



Accreditación Institucional
DE ALTA CALIDAD
Resolución 009527 Mineducación Sep. 6 de 2019

**IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE
PROPIEDADES CROMÁTICAS, FÍSICO-MECÁNICAS,
DINÁMICAS Y DE FRACTURA DEL SISTEMA FRUTO-
PEDÚNCULO DE COFFEA ARABICA L. VAR. CASTILLO A
TRAVÉS DE UN ENFOQUE NUMÉRICO-EXPERIMENTAL**

Alexander Rincón Jiménez



DOCTORADO EN
INGENIERÍA

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MANIZALES - UAM
PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA
LÍNEA EN AUTOMÁTICA
MANIZALES, COLOMBIA
2023**

**IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE
PROPIEDADES CROMÁTICAS, FÍSICO-MECÁNICAS,
DINÁMICAS Y DE FRACTURA DEL SISTEMA FRUTO-
PEDÚNCULO DE COFFEA ARABICA L. VAR. CASTILLO A
TRAVÉS DE UN ENFOQUE NUMÉRICO-EXPERIMENTAL**

Alexander Rincón Jiménez

Tesis para optar al título de Doctor en Ingeniería

Director:

JOSÉ LUIS RODRÍGUEZ SOTELO

Asesor:

HECTOR ANDRES TINOCO NAVARRO

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MANIZALES –UAM
PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA
LÍNEA EN AUTOMÁTICA
MANIZALES
COLOMBIA
2023**

DECLARACIÓN

Declaro que esta presentación es mi propia obra y que, a mi leal saber y entender, no contiene ningún material previamente publicado o escrito por otra persona ni material que en gran medida haya sido aceptado para la concesión de cualquier otro título o diploma de la Universidad u otro instituto de enseñanza superior, excepto cuando se haya hecho el debido reconocimiento en el texto.



Alexander Rincón Jiménez

DEDICATORIA

Este documento está especialmente dedicado a mi esposa, Natalia, y a mi hija, Emma, quienes son mi impulso de vida y mayor fuente de inspiración; a mi madre, Consuelo Jiménez, quien siempre me enseñó con el ejemplo el valor de la ética, del esfuerzo y la dedicación y a quien siempre extrañare, aunque sé que desde el cielo nos acompaña y nos cuida siempre.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mis más profundos agradecimientos a mi asesor y realmente tutor, Héctor A. Tinoco, de quien admiró su profesionalismo y su gran capacidad como investigador y el que me dio la oportunidad de participar en este proyecto, siendo la persona que sin egoísmos y con paciencia me enseñó los procesos científicos; también a mi director de tesis José L. Rodríguez Sotelo, quien ha sido un amigo y una guía profesional en todo este proceso. A mis compañeros y amigos del Laboratorio de Mecánica Computacional y Experimental, quienes muchas veces me tendieron la mano y aportaron en la construcción de esta tesis. Y por supuesto un agradecimiento especial a la Universidad Autónoma de Manizales, al doctorado en Ingeniería de la Red Mutis y al Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación, por sus aportes que permitieron dar término a este proceso doctoral.

“La ciencia no es perfecta, con frecuencia se utiliza mal, no es más que una herramienta, pero es la mejor herramienta que tenemos, se corrige a sí misma, está siempre evolucionando y se puede aplicar a todo. Con esta herramienta conquistamos lo imposible”

Carl Sagan

CONTENIDO

LISTA DE TABLA	1
LISTA DE FIGURAS	2
RESUMEN	5
ABSTRACT	8
CAPÍTULO 1 – INTRODUCCIÓN	10
1.1 Motivación	10
1.2 Objetivos	14
1.2.1 Objetivo general	14
1.2.2 Objetivos específicos	15
1.3 Descripción del problema	15
1.4 Justificación	16
1.5 Estructura de la tesis	18
CAPÍTULO 2 – REVISIÓN DE LITERATURA.	20
2.1 Cosecha asistida	20
2.2 Propiedades físico-mecánicas en frutas	23
2.2.1 Determinación de las propiedades del color en frutas	24
2.2.2 Determinación de las propiedades densitométricas y geométricas en frutas	31
2.2.3 Determinación de las propiedades mecánicas en frutas	37
2.3 Propiedades dinámicas en frutas	43
2.3.1 Propiedades modales y de amortiguamientos en frutas.	43
2.3.2 Características del desprendimiento dinámico del sistema fruto–pedúnculo en frutos	48
2.3.3 Métodos para determinar las propiedades dinámicas en frutas	48
2.4 Métodos Tenacidad a la fractura	49
2.4.1 Métodos para determinar la tenacidad a la fractura	51
CAPÍTULO 3- DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES CROMÁTICAS DEL CAFÉ ARABICA var. CASTILLO	58
3.1 Introducción	58
3.2 Materiales y métodos	61
3.2.1 Espacio cromático CIElab	61
3.2.2 Diagrama de cromaticidad CIExy	66
3.2.3 Espacio cromático RGB	67
3.2.4 Transformaciones RGB	71
3.2.5 Caracterización de las muestras	73
3.2.6 Medición de las muestras	74
3.2.7 Recolección de los datos	77
3.2.8 Homogeneización de los datos	79
3.2.9 Algoritmos de graficación para resultados de colorímetro y cámara fotográfica	81
3.3 Resultados y discusión	83

3.3.1 Resultados gráficos de las caracterizaciones con colorímetro y con cámara fotográfica	83
3.3.2 Caracterización de los estados de maduración	87
<i>CAPÍTULO 4- DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL SISTEMA FRUTO-PEDÚNCULO</i>	90
4.1 Introducción	90
4.2 Materiales y métodos	93
4.2.1 Selección de las muestras	93
4.2.2 Medición de las fuerzas de desprendimiento y diseño de los dispositivos de sujeción	94
4.2.3 Determinación de la geometría en el fruto	100
4.2.4 Medición de la masa	101
4.2.5 Determinación del volumen	101
4.2.6 Determinación de la densidad	103
4.2.7 Medición del pH	104
4.2.8 Determinación de los índices de firmeza	105
4.3 Resultados y discusión	106
4.3.1 Fuerzas de desprendimiento	107
4.3.2 Propiedades de geometría, masa, volumen y densidad	110
4.3.3 Resultados de pH.	117
4.3.4 Índices de firmeza	118
<i>CAPÍTULO 5 - DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES ELÁSTICAS DEL FRUTO Y DEL GRANO A TRAVÉS DE UN ENFOQUE NUMÉRICO – EXPERIMENTAL</i>	121
5.1 Introducción	121
5.2 Materiales y métodos	122
5.2.1 Metodología para la determinación de las propiedades anisotrópicas del grano	122
5.2.2 Escaneo del fruto de café en 3D e integración con el grano	124
5.2.3 Propiedades del fruto de café – indentación	127
5.2.4 Determinación experimental de la firmeza en el fruto del café	131
5.2.5 Modelo de elementos finitos	132
5.2.6 Procedimiento de la primera simulación	134
5.2.7 Procedimiento de la segunda simulación	135
5.2.8 Procedimiento de la tercera simulación	136
5.3 Resultados y discusión	137
5.3.1 Curvas de fuerza contra desplazamiento	137
5.3.2 Determinación del módulo de Young del fruto por indentación	138
5.3.3 Resultados primera simulación	139
5.3.3.1 Análisis de varianza para comprobar la similitud de las curvas elásticas para los resultados de primera simulación	141
5.3.4 Resultados segunda simulación	142
5.3.4.1 Análisis de varianza para para comprobar la similitud de las curvas elásticas para los resultados de la segunda simulación	143
5.3.5 Resultados tercera simulación	144
5.3.5.1 Análisis de varianza para para comprobar la similitud de las curvas elásticas en los resultados de la tercera simulación	146
5.3.6 Resultados de la distribución de esfuerzos máximos de Von Mises para la tercera simulación	146
5.3.7 Resultados de la deformación máxima en el fruto para la tercera simulación	150

<i>CAPÍTULO 6- DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE AMORTIGUAMIENTO E IDENTIFICACIÓN DE LA TENACIDAD A LA FRACTURA DE LA INTERFACE PEDICELO – FRUTO DEL CAFÉ EN LOS DIFERENTES ESTADOS DE MADURACIÓN</i>	153
6.1 Introducción	153
6.2 Materiales y métodos	155
6.2.1. Selección de muestras	155
6.2.2. Medición de las vibraciones en el sistema fruto-Pedúnculo del café	156
6.2.3 Procesamiento de las señales para la obtención de las frecuencias y la razón de amortiguamiento en cada estado de maduración	161
6.2.4. Medición de las características físicas y desprendimiento axial del pedúnculo del café para la identificación de la tenacidad a la fractura	164
6.2.5 Procedimiento para determinar la tenacidad a la fractura en la interface fruto-pedúnculo utilizando métodos numéricos	167
6.3 Resultados y discusión	169
6.3.1. Frecuencias naturales del pedúnculo	169
6.3.2. Razón de amortiguamiento en el pedúnculo del café	172
6.3.3. Resultados de tenacidad a la fractura en la interfaz pedicelo – fruto en cada uno de los estados de maduración	175
<i>ANÁLISIS Y DISCUSIÓN</i>	178
<i>CONCLUSIONES</i>	185
<i>RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO</i>	187
<i>CONTRIBUCIONES DEL TRABAJO</i>	188
Artículos publicados relacionados con la tesis:	188
Conferencia relacionada con la tesis:	188
Otros trabajos derivados:	189
<i>REFERENCIAS</i>	190
<i>ANEXOS</i>	221
ANEXO A. Tablas	221
ANEXO A.1 Tablas Caracterización con el colorímetro	221
ANEXO A.2 Tablas de Caracterización con la cámara fotográfica	222
ANEXO A.3 Tablas de Caracterización de los diámetros ortogonales en frutos de café	223
ANEXO A.4 Tablas de Caracterización del volumen en frutos de café	225
ANEXO A.5 Tablas de Caracterización de la masa en frutos de café	227
ANEXO A.6 Tablas de Caracterización de la densidad en frutos de café	229
ANEXO A.7 Tablas de Caracterización del pH en frutos de café	230
ANEXO A.8 Tablas de Caracterización de la fuerza desprendimiento axial en frutos de café	230
ANEXO A.9 Tablas de Caracterización de la fuerza desprendimiento por torque en frutos de café	231
ANEXO B. Códigos en matlab	232
ANEXO B.1 Código en Matlab para la identificación de color en fruto con imágenes	232
ANEXO B.2 Código en Matlab para graficar posiciones a* y b* con colorímetro.	235
ANEXO B.3 Código en Matlab para graficar posiciones a* y b* con cámara fotográfica.	239
ANEXO B.4 Código en Matlab para creación de mapa cromatográfico.	242

ANEXO B.5 Código en Matlab para graficación en mapa cromatográfico sRGB	244
ANEXO B.6 Código en Matlab para filtrar señales provenientes del experimento de vibración	245
ANEXO B.7 Código en Matlab para identificar picos de señales	247

LISTA DE TABLA

<i>Tabla 3.1. Coordenadas XYZ de los iluminantes C, D50 y D65.</i>	65
<i>Tabla 3.2. Coordenadas de cromaticidad para diferentes espacios de color</i>	70
<i>Tabla 3.3. Matrices de espacio de trabajo RGB</i>	72
<i>Tabla 4.1. Condiciones de medición de pH</i>	78
<i>Tabla 4.2. Valores de las medias de los datos de desprendimiento del fruto</i>	80
<i>Tabla 4.3. P-valores para la fuerza de desprendimiento axial entre estados de maduración</i>	81
<i>Tabla 4.4. P-valores para el desprendimiento por torque entre estados de maduración</i>	81
<i>Tabla 4.5 Relación geométrica a lo largo de los estados de maduración</i>	82
<i>Tabla 4.6. P-valores de los tres diámetros ortogonales divididos por estados de maduración</i>	83
<i>Tabla 4.7. P-valores para el volumen</i>	83
<i>Tabla 4.8. P-valores para la masa</i>	83
<i>Tabla 4.9 P-valores para el pH</i>	84
<i>Tabla 4.10. Parámetros de firmeza de los frutos de café [N/mm]</i>	86
<i>Tabla 5.1. Escala del patrón de calibración según el objeto escaneado, HP 3D Cam Pro</i>	90
<i>Tabla 5.2. Descripción de los nodos por cada uno de los estados de maduración</i>	96
<i>Tabla 5.3. Comparación de las medias de los módulos de Young para la variedad Castillo y la variedad Colombia</i>	101
<i>Tabla 5.4. Medias de los resultados primera simulación de E y ν para la piel y grano del fruto.</i>	102
<i>Tabla 5.5. P-valores para la comparación de las curvas elásticas entre los resultados FEM y los datos experimentales, entre las diferentes direcciones ortogonales y estados de maduración, para la primera simulación</i>	103
<i>Tabla 5.6. Medias de los resultados segunda simulación de E y ν para la piel y grano del fruto.</i>	104
<i>Tabla 5.7. P-valores para la comparación de las curvas elásticas entre los resultados FEM y los datos experimentales, entre las diferentes direcciones ortogonales y estados de maduración, para la segunda simulación</i>	105
<i>Tabla 5.8. Resultados de E y ν para la piel y grano del fruto simulación modelo de elementos finitos simulación 3</i>	106
<i>Tabla 5.9. P-valores para la comparación de las curvas elásticas entre los resultados FEM y los datos experimentales, entre las diferentes direcciones ortogonales y estados de maduración, para la tercera simulación</i>	107
<i>Tabla 5.10. Tabla de los esfuerzos máximos de Von Mises para las tres direcciones ortogonales</i>	109
<i>Tabla 6.1. Caracterización de las muestras para determinar la tenacidad a la fractura</i>	121
<i>Tabla 6.2. Medición de fuerzas de desprendimiento axial</i>	122
<i>Tabla 6.3. Frecuencias adquiridas con los tres sensores</i>	125
<i>Tabla 6.4. Resultado de medias y varianzas de las frecuencias</i>	125
<i>Tabla 6.5. Datos de razón de amortiguamiento de las señales adquiridas.</i>	127
<i>Tabla 6.6. Resultados de las medias y las varianzas de la razón de amortiguamiento</i>	128
<i>Tabla 6.7. Datos de la tenacidad a la fractura en la interface pedicelo - fruto</i>	130

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.1. Gráfica del precio del café entre 2009 - 2019. Tomado y adaptado de Gómez & Palacio (2021)</i>	10
<i>Figura 1.2. Derribadoras de café. tomado y adaptado de Oliveros et al. (2005)</i>	11
<i>Figura 2.1. (a) Aroandes, (b) Canguaro, (c) Canguaro 2M, (d) RASELCA, (e) RASELCA II, (f) Orsel. Tomado y adaptado de a,b,c. Oliveros & Sanz (2011); d,e,f. Oliveros et al. (2005).</i>	17
<i>Figura 2.2. (a) IMFRA 2DC, (b) IMFRA 3DC, (c) Batidor Cenicafé I, (d) Alfa, (e) Brundden DSC 18. Tomado y adaptado de a, b. Oliveros et al. (2005); c. Álvarez et al. (2013); d. Moreno et al. (2015); e. Sanz & Duque (2020)</i>	18
<i>Figura 2.3. Proceso experimental de medición de color y resultados. Tomado y adaptado de Ramos et al. (2010)</i>	19
<i>Figura 2.4. Medición de color con espectrofotómetro y sus resultados. Tomado y adaptado de: Carvajal et al. (2011)</i>	20
<i>Figura 2.5. Medición de color con cámara fotográfica y segmentación de imagen. Tomado y adaptado de: Martínez et al. (2016)</i>	21
<i>Figura 2.6. Medición de color con cámara fotográfica y clasificación. Tomado y adaptado de Costa et al. (2020)</i>	22
<i>Figura 2.7. Medición de color con cámara de video y clasificación. Tomado y adaptado de: Niño & Ortiz (2007)</i>	22
<i>Figura 2.8. Medición de color en el fruto del tomate. Tomado y adaptado de: Benito et al. (2016)</i>	23
<i>Figura 2.9. Estructura experimental para medición de color. Tomado y adaptado de León et al. (2006)</i>	24
<i>Figura 2.10. Medición de diámetros polar, ecuatorial y espesor del fruto de naranja para diseño CAD. Tomado y adaptado de Namdari et al. (2020).</i>	25
<i>Figura 2.11. Modelo geométrico basado en imágenes. Tomado y adaptado de Tinoco et al. (2020b)</i>	26
<i>Figura 2.12. Medición experimental de dimensiones, peso y densidad del café Var. Colombia. Adaptado de Tobón et al. (1999)</i>	26
<i>Figura 2.13. Medición de dimensiones ortogonales y la masa del café variedad Colombia. Tomado y adaptado de Herrera et al. (2012)</i>	27
<i>Figura 2.14. Diseño de fruto de café verificando dimensiones. Tomado y adaptado de Tinoco et al. (2014)</i>	28
<i>Figura 2.15. Medición de fuerzas de ruptura en <i>Jatropha curcas</i>. Adaptado de Sirisomboon et al. (2007)</i>	29
<i>Figura 2.16. Medición de propiedades mecánicas de la naranja. Adaptado de Singh & Reddy. (2006)</i>	30
<i>Figura 2.17. Medición de Firmeza en la fruta de la Uchuva. Adaptado de Ciro et al. (1998)</i>	30
<i>Figura 2.18. Prueba de compresión de la naranja Valencia. Tomado y adaptado de Ihueze & Mgbemena (2017)</i>	31
<i>Figura 2.19. Prueba de vibración y tracción en el sistema fruto-rachilla de la palma macaw. Tomado y adaptado de Velloso et al. (2017).</i>	32
<i>Figura 2.20. Análisis de estrés mecánico en el sistema fruto-pedúnculo del café variedad Colombia. Tomado y adaptado de Tinoco et al. (2018)</i>	33
<i>Figura 2.21. Resultados de las frecuencias naturales de vibración para el café Catuaí Vermelho. Tomado y adaptado de Ciro (2001)</i>	34
<i>Figura 2.22. Diseño geométrico del sistema fruto pedúnculo y análisis modal. Tomado y adaptado de Tinoco et al. (2014)</i>	34
<i>Figura 2.23. Diseño geométrico y análisis modal de la pera Korla. Tomado y adaptado de Wang et al. (2013)</i>	35
<i>Figura 2.24. Medición experimental para determinar la amortiguación del árbol de café. Tomado y adaptado de Aristizábal & Duque et al. (2008)</i>	36
<i>Figura 2.25. Proceso experimental para determinar la tenacidad a la fractura en una película de oro. Tomado y adaptado de Tinoco et al. (2020a)</i>	40
<i>Figura 2.26. Prueba experimental para determinar la tenacidad a la fractura en polímeros. Adaptado de Narisawa & Takemori (1989)</i>	41

<i>Figura 2.27. Prueba experimental para determinar la tenacidad a la fractura de un coco. Tomado y adaptado de: Gludovatz et al. (2017)</i>	42
<i>Figura 3.1. (a) Diagrama cromático CIElab. (b) Diagrama cromático CIExy</i>	48
<i>Figura 3.2. (a) Representación tridimensional de RGB. (b) Representación de los espacios Adobe RGB, CIE RGB y sRGB en diagramas de cromaticidad xy</i>	51
<i>Figura 3.3. Ubicación de la finca la Praderita y la finca el Descanso.</i>	55
<i>Figura 3.4. (a) Medición experimental de color con colorímetro. (b) Medición experimental de color con cámara fotográfica.</i>	56
<i>Figura 3.5. Algoritmo para la extracción del color en RGB. Extraído de Rincón et al. (2020)</i>	59
<i>Figura 3.6. Algoritmo para graficación 2D y 3D de datos caracterizados con colorímetro</i>	61
<i>Figura 3.7. Algoritmo para graficación 2D de datos caracterizados con cámara fotográfica.</i>	62
<i>Figura 3.8. (a) Gráfica en 2D resultado en a^*b^* del colorímetro. (b) Gráfica en 3D resultado en $L^*a^*b^*$ de colorímetro. (c) Gráfica 2D resultado en xy del colorímetro. (d) Gráfica 3D resultado en xyz del colorímetro.</i>	63
<i>Figura 3.9. (a) Gráfica en 2D resultado en RG de Cámara sin corrección. (b) Gráfica en 3D resultado en RGB de Cámara sin corrección. (c) Gráfica en 2D resultado en xy de Cámara sin corrección. (d) Gráfica en 3D en xyz de Cámara sin corrección.</i>	64
<i>Figura 3.10. (a) Datos de colorímetro en CIExy. (b) Datos de cámara en CIExy. (c) Datos de colorímetro transformación al espacio RGB. (d) Datos de cámara transformación a CIElab. Extraído de Rincón et al. (2020)</i>	65
<i>Figura 3.11. (a) Clasificación de frutos de café con datos de colorímetro. (b) Clasificación de frutos de café con datos de cámara fotográfica.</i>	66
<i>Figura 4.1. Selección de los frutos de café</i>	70
<i>Figura 4.2. Medición de fuerzas de desprendimiento (a) Desprendimiento axial. (b) Desprendimiento por torque</i>	71
<i>Figura 4.3. Diseño de grippers para el desprendimiento axial. (a) Primer diseño de gripper. (b) Segundo diseño de gripper.</i>	73
<i>Figura 4.4. Diseño de gripper para el desprendimiento por torsión</i>	74
<i>Figura 4.5. Medición y geometría simplificada en cada estado de maduración</i>	75
<i>Figura 4.6. Medición de masa</i>	76
<i>Figura 4.7. Medición de volumen</i>	77
<i>Figura 4.8. Medición de pH</i>	78
<i>Figura 4.9. Medición de índice de firmeza</i>	79
<i>Figura 4.10. Desprendimiento de las fuerzas en todos los estados de maduración. (a) Desprendimiento de la fuerza axial. (b) Fuerza de desprendimiento por torque</i>	80
<i>Figura 4.11. Propiedades físicas y geométricas del fruto de café. (a) Diámetros ortogonales. (b) Volumen medido y estimado. (c) Masa. (d) Densidad medida y estimada</i>	83
<i>Figura 4.12. pH del fruto de café</i>	88
<i>Figura 4.13 Índice de firmeza de todos los estados de maduración. (a) Inmaduro. (b) Semimaduro. (c) Maduro. (d) Sobremaduro</i>	89
<i>Figura 5.1. Metodología para determinar las propiedades anisotrópicas</i>	92
<i>Figura 5.2. Montaje para adquisición de imágenes 3D de los frutos de café</i>	93
<i>Figura 5.3. Fruto de café en 3D y Post proceso</i>	95
<i>Figura 5.4. Proceso de carga y descarga y profundidades de hendidura sobre una fruta de café.</i>	96
<i>Figura 5.5. Configuración experimental de indentación</i>	98
<i>Figura 5.6. Índices de firmeza</i>	99
<i>Figura 5.7. Placas de compresión en sus orientaciones principales a) Dirección e1. b) Dirección e2. c) Dirección e3.</i>	100
<i>Figura 5.8. Modelo de elementos finitos enmallados del fruto de café maduro junto con las placas de compresión.</i>	100

<i>Figura 5.9. Diagrama de flujo de primera simulación</i>	101
<i>Figura 5.10. Diagrama de flujo de segunda simulación</i>	102
<i>Figura 5.11. Diagrama de flujo de tercera simulación</i>	103
<i>Figura 5.12. Curvas de carga y descarga para el fruto de café</i>	104
<i>Figura 5.13. Comparación de resultados entre los módulos de Young de la variedad Castillo y la variedad Colombia. Los datos de la variedad Colombia son extraídos de Tinoco et al. (2014).</i>	104
<i>Figura 5.14. Comparación de curvas elásticas de la primera simulación y los datos experimentales. (a) Inmaduro. (b) Semimaduro. (c) Maduro. (d) Sobremaduro.</i>	102
<i>Figura 5.15. Comparación de curvas elásticas de la segunda simulación y los datos experimentales. (a) Inmaduro. (b) Semimaduro. (c) Maduro. (d) Sobremaduro.</i>	104
<i>Figura 5.16. Comparación de curvas elásticas de la tercera simulación y los datos experimentales. (a) Inmaduro. (b) Semimaduro. (c) Maduro. (d) Sobremaduro.</i>	110
<i>Figura 5.17. Esfuerzos Von Mises para la dirección ortogonal e_1 en los diferentes estados de maduración.</i>	112
<i>Figura 5.18. Esfuerzos Von Mises para la dirección ortogonal e_2 en los diferentes estados de maduración.</i>	112
<i>Figura 5.19. Esfuerzos Von Mises para la dirección ortogonal e_3 en los diferentes estados de maduración.</i>	113
<i>Figura 5.20. Comparaciones de esfuerzos máximos Von Mises en todas las direcciones ortogonales</i>	114
<i>Figura 5.21. Deformaciones máximas de los frutos en la dirección ortogonal e_1 para cada estado de maduración</i>	114
<i>Figura 5.22. Deformaciones máximas de los frutos en la dirección ortogonal e_2 para cada estado de maduración</i>	115
<i>Figura 5.23. Deformaciones máximas de los frutos en la dirección ortogonal e_3 para cada estado de maduración</i>	115
<i>Figura 6.1. Corte de las muestras para experimento de amortiguamiento</i>	117
<i>Figura 6.2. Corte de muestra para experimento de tenacidad a la fractura.</i>	118
<i>Figura 6.3. (a) Diagrama de flujo de primera configuración experimental para la medición de vibraciones en el sistema fruto pedúnculo. (b) Diagrama de flujo de segunda configuración experimental para la medición de vibraciones en el sistema fruto pedúnculo.</i>	119
<i>Figura 6.4. Primera configuración experimental para las mediciones de vibración en el sistema fruto pedunculo</i>	119
<i>Figura 6.5. (a) Señales de entrada. (b) señales de respuesta en el fruto-pedúnculo.</i>	120
<i>Figura 6.6. Segunda configuración experimental para las mediciones de vibración en el sistema fruto pedunculo</i>	121
<i>Figura 6.7. Estructura para estimular la respuesta en vibración del fruto de café</i>	122
<i>Figura 6.8. Algoritmo para determinar la razón de amortiguamiento del café</i>	123
<i>Figura 6.9. Montaje experimental para determinar la fuerza de desprendimiento axial con micro fisuras generadas.</i>	125
<i>Figura 6.10. Modulo de Young del pedicelo del café arábica L. Var Castillo. Tomado y adaptado de: (Tinoco et al., 2022; Buitrago et al., 2022)</i>	126
<i>Figura 6.11. Proceso para determinar la tenacidad a la fractura</i>	127
<i>Figura 6.12. Señal de respuesta de cada uno de los sensores y frecuencia adquirida</i>	128
<i>Figura 6.13. Medias de las frecuencias distribuidos por estado de maduración y sensor implementado</i>	130
<i>Figura 6.14. Proceso de regresión exponencial para las señales adquiridas</i>	131
<i>Figura 6.15. Medias de la razón de amortiguamiento distribuidos por estado de maduración y sensor implementado</i>	132
<i>Figura 6.16. Tenacidad a la fractura en cada uno de los estados de maduración</i>	133

IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES CROMÁTICAS, FÍSICO-MECÁNICAS, DINÁMICAS Y DE FRACTURA DEL SISTEMA FRUTO-PEDÚNCULO DE COFFEA ARABICA L. VAR. CASTILLO A TRAVÉS DE UN ENFOQUE NUMÉRICO-EXPERIMENTAL

Alexander Rincón Jiménez
José Luis Rodríguez Sotelo (Director de tesis)
Héctor Andrés Tinoco Navarro (Asesor de tesis)
Red Universitaria Mutis - RUM
Universidad Autónoma de Manizales – UAM (Colombia)
Programa de Doctorado en Ingeniería
Línea en Automática

RESUMEN

Para Colombia, el café es uno de los cultivos más importantes ya que de su producción dependen muchas familias, sin embargo, la cosecha de su fruto es la etapa más costosa y compleja de realizar, debido a que los recolectores (los cuales actualmente son una mano de obra especializada difícil de conseguir) deben seleccionar los especímenes lo suficientemente maduros para obtener al final del proceso una bebida suave y de alta calidad, según los estándares Colombianos; por ello se hace necesario desarrollar o adaptar cosechadoras que se acomoden a las condiciones medioambientales del café arábica L. var. Castillo, el cual es la variedad más reciente.

No obstante, la mejora o el diseño de dispositivos para la asistencia a la recolección del café variedad castillo, exige obtener los datos de las propiedades físicas, mecánicas y dinámicas del sistema fruto – pedúnculo, siendo esto el corazón del trabajo elaborado. Cabe aclarar que se determinaron dichas características (experimentalmente y numéricamente), ya que no existían reportes científicos que dieran cuenta de ello. Ahora, para realizar correctamente la extracción de este tipo de datos, se hace una revisión de literatura, tal y como se muestra en el capítulo dos, comprendiendo cuáles son las técnicas utilizadas en procesos experimentales similares, con el fin de tener una base sólida y fidedigna para generar la información requerida.

Luego, se hace una extracción de las características del color en el fruto y su correspondiente división por cuatro estados de maduración, que se encuentra en el capítulo tres, en donde se demuestra que se puede realizar el proceso bien sea por métodos convencionales (con el uso de colorímetros), como por no convencionales (con cámara fotográfica), siempre y cuando se utilicen correctamente los espacios de color o la conversión entre estos, aplicando una matriz como la desarrollada en este trabajo. Esta etapa brinda la información necesaria para generar una separación en los datos físicos, mecánicos y dinámicos del sistema fruto – pedúnculo.

Por otra parte, en el capítulo cuatro se encuentran los resultados de las caracterizaciones físicas, como diámetros ortogonales, volumen, masa y grado de acidez (pH), que son medidos utilizando métodos convencionales como pie de rey, balanza de precisión, medidores de pH, entre otros; mientras que para las mediciones de la fuerza de desprendimiento del fruto de forma axial y por torque, se utilizan equipos especializados con adaptaciones creadas en impresora 3D, ya que no existen los elementos comerciales ajustados al tamaño del fruto del café. Parte de los datos estadísticos generados de esta caracterización ayudan en el capítulo cinco a evaluar el comportamiento dinámico de la estructura del fruto, por medio de experimentos y análisis por elementos finitos.

También, en este trabajo se determina la razón de amortiguamiento del sistema fruto-pedúnculo, estableciendo la existencia de una serie de diferencias entre direcciones ortogonales y estados de maduración de la estructura. Para lograr un resultado pleno se implementó una estrategia experimental que se pudiera aplicar a una estructura de tan pequeñas dimensiones como el café, esto acompañado de algoritmos para procesar la información generada. Así mismo, se encuentran los valores de la tenacidad a la fractura en la interface entre el pedicelo y el fruto en los diferentes estados de maduración, utilizando para ello métodos numéricos, no obstante, los modelos implementados requieren de información dada desde el proceso de caracterización. Todo esto genera un panorama hasta el momento inexistente de las características físicas, mecánicas y dinámicas del café arábica

L. var. Castillo, utilizando diversos métodos para la extracción y para el análisis de sus propiedades.

IDENTIFICATION AND CHARACTERIZATION OF CHROMATIC, PHYSICO-MECHANICAL, DYNAMIC AND FRACTURE PROPERTIES OF THE FRUIT-PEDUNCLE SYSTEM OF COFFEA ARABICA L. VAR. CASTILLO THROUGH A NUMERICAL-EXPERIMENTAL APPROACH

Alexander Rincón Jiménez
José Luis Rodríguez Sotelo (Director of thesis)
Héctor Andrés Tinoco Navarro (Assessor of thesis)
Red Universitaria Mutis - RUM
Universidad Autónoma de Manizales – UAM (Colombia)
Doctoral Program in Engineering
Línea in Automática

ABSTRACT

In Colombia, coffee holds a paramount role as one of the most significant crops, supporting numerous families. However, the harvest of its fruit represents the most costly and intricate stage of production. This complexity arises from the necessity of selecting adequately ripened specimens to obtain a smooth and high-quality beverage, aligning with Colombian standards. Consequently, there is a pressing need to develop or adapt harvesters that can effectively operate within the environmental conditions of Arabica coffee L. var. Castillo, the latest coffee variety.

Nonetheless, the enhancement or design of devices to aid in the harvesting of Castillo coffee variety demands the acquisition of data pertaining to the physical, mechanical, and dynamic properties of the fruit-peduncle system, forming the essence of this study. It's worth noting that these characteristics were determined both experimentally and numerically since there were no existing scientific reports offering insights into these aspects. To ensure the accurate extraction of such data, Chapter Two embarks on an extensive literature review. This review identifies the techniques employed in analogous experimental processes, laying the foundation for a robust and trustworthy dataset.

Subsequently, Chapter Three focuses on extracting color characteristics from the coffee cherries, categorizing them into four stages of maturation. Our findings demonstrate that this process can be carried out through either conventional means, employing colorimeters, or unconventional methods utilizing a photographic camera. The key lies in the correct utilization of color spaces or their conversion, facilitated by a matrix developed within this study. This phase provides the requisite information for segregating the physical, mechanical, and dynamic data of the fruit-peduncle system.

In Chapter Four, we present the results of physical characterizations, encompassing orthogonal diameters, volume, mass, and pH levels. These metrics are measured using conventional tools such as calipers, precision balances, and pH meters. For mechanical measurements, including axial and torque-based detachment of the fruit, specialized equipment with 3D-printed adaptations is employed. This innovation arises due to the lack of commercial tools tailored to coffee fruit dimensions. A portion of the statistical data generated from this characterization aids in Chapter Five, where we evaluate the dynamic behavior of the fruit structure through experimental methods and finite element analysis.

Furthermore, this study includes the determination of the damping ratio of the fruit-peduncle system, revealing disparities between orthogonal directions and maturation states of the structure. To achieve comprehensive results, we implemented an experimental strategy suitable for a structure as diminutive as coffee. This approach is complemented by algorithms to process the resulting data. Similarly, we unveil the values of fracture toughness at the interface between the pedicel and the fruit across different maturation stages using numerical methods. However, these models rely on information acquired during the characterization process. Collectively, our research fills a significant void by providing a comprehensive overview of the physical, mechanical, and dynamic attributes of Arabica coffee *L. var. Castillo*, utilizing diverse methods for data extraction and property analysis.

CAPÍTULO 1 – INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

En Colombia, el café es una de las principales fuentes de ingreso para las familias campesinas desde que fue introducido por el Departamento del Santander hacia 1880 (Machado, 2001). Ha sido el primer producto en generar una estabilidad económica a través de la exportación, ya que hasta ese momento se tenía una herencia mercantil de tipo colonial, que se caracterizaba por un escaso desarrollo del mercado interno, baja productividad y poca integración mundial (Bejarano, 1980). Sin embargo, hasta la década de los 80's, Colombia era el segundo mayor exportador de café en el mundo, pero el cambio hacia una diversificación de la economía global y un desaprovechamiento de las ventajas que esto podría tener, hicieron que se desplazara a un tercer lugar (Ocampo & Álvarez, 2017). No obstante, en la actualidad, es el segundo mayor comerciante del café Arábica (ICO, 2020), y su producto se consume en diferentes mercados como Estados Unidos con un registro de 23 millones de sacos, Alemania con 10 millones de sacos y Japón con 7 millones de sacos (Ocampo & Álvarez, 2017), entendiendo que un saco equivale a 125 kilogramos.

En consecuencia, su consumo ha generado en las sociedades una serie de rituales alrededor del café que se evidencian tanto en eventos sociales como laborales (Pedrajas, 2014), y si bien la materia prima también se produce en países como Brasil, Vietnam, Indonesia, Etiopía, India, Honduras, Uganda, México y Guatemala, el grano colombiano sigue teniendo una marcada predilección por su excelente aroma y sabor que lo diferencian de la competencia (Carvajal, 2017; Ocampo et al. 2017).

Dicho nivel de calidad se resalta desde el momento de la cosecha cuando se hace un desgranado individual de los frutos (*picking*), “tomando principalmente los maduros y dejando los demás para una recolección posterior” (Ocampo et al., 2017). Cabe señalar que esta actividad manual representa la mayor participación en los costos de producción, con una incidencia entre un 35% a un 40% (Oliveros & Sanz, 2011). Sin embargo, aunque este oficio es una tradición heredable de larga data, de padres a hijos, las últimas generaciones se han

visto renuentes a aprender y continuar con dicha ocupación (Salazar et al., 2016), ocasionando que la mano de obra especializada sea escasa, lo cual afecta directamente a los productores (Amaya et al., 2017), En consecuencia, se ven obligados a contratar personal sin experiencia.

Se debe agregar que, otro factor de la ausencia de recolectores se encuentra en el efecto de la alta variabilidad de los precios por carga de café a nivel nacional e internacional (ver **Figura 1.1**), lo que genera ingresos variables para los productores y consecuentemente para sus trabajadores; esto da como resultado la migración laboral hacia otros sectores de la producción, bien sea agrícolas o industriales, donde en muchos casos exige el traslado de estas personas hacia las zonas urbanas; otras condiciones a considerar son: la falta de políticas para la regulación de los precios del café, una mayor inversión estatal, el incremento de la violencia rural y el cambio climático (Flórez & Tamayo, 2019).

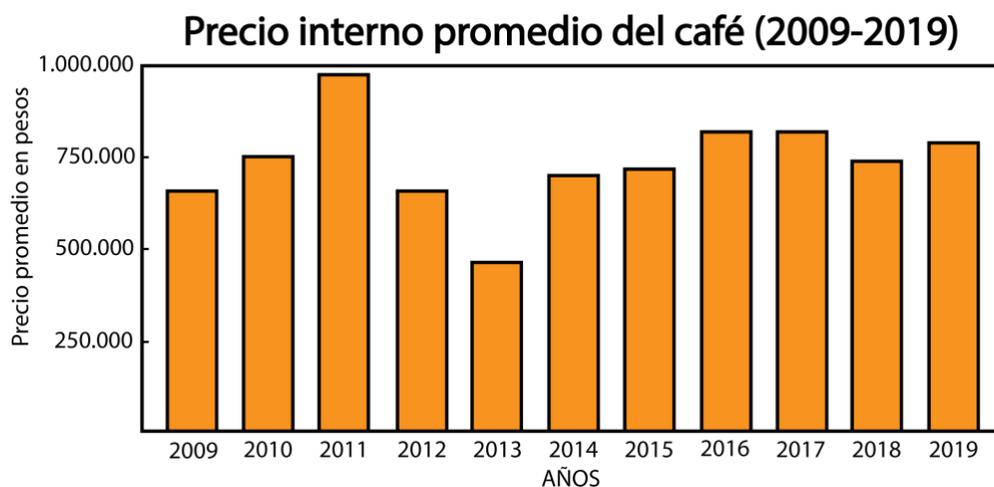


Figura 1.1. Gráfica del precio del café entre 2009 - 2019. Tomado y adaptado de Gómez & Palacio (2021)

A pesar de los desafíos que esto ha ocasionado en el sector cafetero, dicha industria continúa siendo de gran importancia para la economía nacional. Una evidencia de esto es el hecho de que representa el 27% del empleo rural, generado a partir de las actividades relacionadas con una producción que alcanzó la cifra de 14.8 millones de sacos en los años 2018 y 2019, lo cual supuso un aumento del 9% en comparación con la temporada 2017-2018 (Vélez, 2019). En otras palabras, su impacto económico beneficia a más de 3.3 millones de personas y

555,692 familias cafeteras, que obtienen hasta el 46% de sus ingresos de las 931,746 hectáreas plantadas (Aristizabal & Duque, 2008). Esto ha llevado a que diversas organizaciones estatales, industriales y de la sociedad civil se interesen en mejorar toda la cadena productiva del café, desde diversos campos de conocimiento, con el objetivo de brindar a los caficultores una mayor competitividad.

Dentro de este proceso productivo, la etapa de recolección del café se destaca como una de las fases más importantes que requiere de tecnologías modernas, ya que el objetivo es reducir los costos de producción. Por esta razón, entidades como Cenicafé promueven la implementación de técnicas de cosecha mecanizada o semimecanizada, adaptando o mejorando dispositivos existentes (Oliveros et al., 2005), con el fin de mejorar el rendimiento de los recolectores (Rodríguez et al., 2005).

Un ejemplo de este tipo de mejoras tecnológicas se puede observar en Brasil, país que lidera desde 1980 la exportación de café en el mundo con la ayuda de la mecanización y la semi-mecanización de las cosechas. Donde una característica típica de este tipo de avances es el incremento de la capacidad de la mano de obra, obteniendo productos de buena calidad y minimizando los problemas de escasez de recolectores en el periodo de la cosecha (Souza et al., 2022).

Los equipos más conocidos que se han implementado para la asistencia de recolección se denominan derribadoras y son elementos con pinzas o efectores finales con vibración que pueden ser accionados neumáticamente o por motor, bien sea desde un tractor estrecho o ajustadas en una presentación portátil (Tascón et al., 2005). Ver **Figura 1.2**.



Figura 1.2. Derribadoras de café. Tomado y adaptado de [Oliveros et al. \(2005\)](#)

Es así como se podría inferir que para Colombia una transferencia tecnológica sería la mejor solución para abordar el problema de la recolección en las zonas cafeteras. No obstante, existen estudios que analizan el comportamiento de este tipo de dispositivos comerciales, haciendo un énfasis en la posible adaptación a las variedades sembradas en el país; encontrando que estos pueden operar al interior de plantaciones con distancias entre surcos superiores a 1.2 m y con pendientes de hasta el 50%, lo cual es un primer inconveniente, ya que el 55% de los cultivos se encuentra en terrenos con pendientes superiores al 70% ([Martínez et al., 2005](#)), con una topografía agreste y condiciones climáticas variantes que generan una heterogeneidad en la floración y maduración del café ([Oliveros & Sanz, 2011](#)), situación que no sucede en Brasil, donde los cultivos se encuentran en regiones con terreno plano y una mayor distancia entre árboles. Así mismo, existe otro problema con este tipo de dispositivos y es la ubicación de la lona para la recolección de los frutos que caen al suelo, (ver **Figura 1.2**) ya que requiere de los trabajadores un tiempo adicional para su correcta ubicación bajo el árbol.

Otras particularidades concernientes a la caficultura en Colombia están documentadas en estudios como los de [Tascón et al. \(2005\)](#) y [Díaz et al. \(2009\)](#). Estas investigaciones

mencionan que, para cafés como la variedad Colombia, el desprendimiento máximo de frutos verdes debe variar entre el 6.4% y el 17.6% del total de la recolección, ya que un contenido superior al 5% de frutos inmaduros (Puerta, 2000) puede generar en la bebida un sabor y aroma a fermento y acre (Marín et al., 2003). Esta circunstancia representa otro desafío, dado que los equipos adaptados para asistir en la recolección desprenden frutos inmaduros y maduros indiscriminadamente.

Dado el beneficio que estos avances ofrecen para mejorar la competitividad del sector cafetero en Colombia, es necesario desarrollar tecnologías que brinden asistencia a la cosecha mecanizada o semimecanizada, adaptadas a las condiciones de las zonas cafeteras y que fortalezcan variedades como la Castillo, que han experimentado un crecimiento significativo en el comercio desde 2005 (Alvarado et al., 2005). Por lo tanto, el desarrollo de estos elementos requiere un proceso de investigación que abarque varias etapas, incluyendo la extracción de características físico-mecánicas, elásticas, modales y de fractura de los frutos del café, con el objetivo de respaldar y optimizar los procesos de recolección y otros estudios relacionados (Marín et al., 2003), mediante la aplicación de las técnicas y métodos más apropiados. Todo lo mencionado anteriormente constituye una motivación para el desarrollo de tecnologías de cosecha y, en particular, para la caracterización de los frutos del café en diferentes etapas de maduración.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Caracterizar las propiedades cromáticas, físico-mecánicas, dinámicas y de fractura del sistema fruto-pedúnculo de café arábica var. Castillo mediante un enfoque numérico-experimental.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar las propiedades cromáticas, geométricas, el grado de acidez, densitométricas y fuerzas de desprendimiento (axial y torsión) del sistema fruto-pedúnculo del café en diferentes estados de maduración.
- Caracterizar las propiedades elásticas del sistema fruto-pedúnculo a través de ensayos cuasi-estáticos combinados con un análisis de elementos finitos (FEA).
- Calcular las propiedades de amortiguamiento del pedúnculo en los diferentes estados de maduración por medio de técnicas de excitación armónica.
- Identificar la tenacidad a la fractura en la interface pedicelo-fruto para los diferentes estados de maduración, a través de experimentos y análisis de elementos finitos.

1.3 Descripción del problema

En la actualidad, las investigaciones que se centran en encontrar las diferentes características físico-mecánicas del café con fines ingenieriles se dirigen principalmente a las variedades Caturra, Colombia y Catuaí Vermelho. Como resultado, existe una falta de conocimiento en relación con los estados de madurez, las propiedades densitométricas, las propiedades mecánicas, el análisis modal y la tenacidad a la fractura del café arábica de la variedad Castillo, desarrollado e introducido al mercado por Cenicafe ([Alvarado et al., 2005](#)). Es esencial estudiar estas características desde el sistema compuesto por la cereza, el pedicelo y el pedúnculo, ya que presentan pequeñas diferencias topológicas en comparación con el árbol o sus ramas ([Tinoco & Peña, 2018](#)).

Aunque las referencias encontradas y presentadas en el capítulo 2 pueden proporcionar un punto de partida para establecer las características físico-mecánicas del sistema fruto-

pedúnculo, abordar estas actividades representa un desafío científico-tecnológico que involucra varias áreas o disciplinas de la ingeniería.

Es importante destacar que uno de los objetivos del proceso de caracterización de los frutos del café está relacionado con el desarrollo de tecnologías que permitan el desprendimiento selectivo de la cosecha de café arábica L. var. Castillo en el territorio colombiano, lo cual representa el enfoque principal de este trabajo.

1.4 Justificación

Aunque existen varios estudios que discuten en forma individual las características físicas, mecánicas y modales del café en diferentes variedades, estos contienen una serie de diferencias en sus técnicas de caracterización que dificulta la extrapolación experimental hacia otras variedades, como la Castillo. Un ejemplo de este hecho se encuentra en el caso de la diferenciación de los estados de maduración por identificación cromática, el cual es un hito inicial importante ya que desde ese punto se define en qué momento de la cosecha se desean desprender el fruto del árbol para generar todos los análisis posteriores, cuyos resultados son un aporte a la concepción de un dispositivo de asistencia a la recolección; en este aspecto, si se observan las referencias dadas por ([Carvajal et al., 2011](#)) donde clasifica el fruto de café, variedad Colombia, en nueve estados de maduración, con ayuda de un espectrofotómetro de esfera y el seguimiento de los frutos días después de la anthesis (DDA), difieren de la información registrada por ([Ramos et al., 2010](#)), el cual identifica cuatro estados de maduración, utilizando para el reconocimiento del color, un montaje electrónico micro controlado, con un sensor principal de color y un algoritmo de aprendizaje como clasificador. Algo semejante sucede con la información consignada por ([Niño & Ortiz, 2007](#)), que clasifica el café en once categorías, con un sistema de visión artificial y dos técnicas de clasificación, el bayesiano y las redes neuronales.

Sin embargo, así se seleccione un conjunto de técnicas y resultados de los estudios previamente mencionados, estos no tendrían una aplicación acertada dado que al estar

direccionadas en otras variedades, las características mecánicas, en especial del sistema fruto – pedúnculo, cambian; tan solo el hecho de que exista una serie de divergencias fenotípicas en la variedad Castillo, hace que se deban encontrar sus propias características. Por ejemplo, un cambio en las geometrías y en la masa de la cereza, genera que las condiciones como las frecuencias naturales no sean iguales a las registradas (Tinoco et al., 2014). Entre las diferencias se encuentran que el árbol tiene mayor productividad y adaptabilidad en relación a sus contrapartes (Cortina et al., 2013). De igual modo, el fruto presenta una alta resistencia a la roya y una proporción del “grano supremo” mayor al 80% (Alvarado et al., 2005). Es importante destacar que el término "grano supremo" es una expresión utilizada por los cafeteros para referirse al tamaño de los granos. En el caso de las variedades cultivadas en Colombia, se asignan valores porcentuales que representan dicho tamaño. Por ejemplo, la variedad Borbón tiene un tamaño equivalente al 45%, mientras que la variedad Caturra presenta un tamaño intermedio del 62.5%, y la variedad Colombia tiene un rango promedio del 81% (Alvarado & Puerta, 2002).

Por consiguiente, es importante extraer todas las características físicas, mecánicas, elásticas, modales y de tenacidad, que sean necesarias para ayudar a desarrollar dispositivos que mejoren la eficiencia de la recolección, en una variedad que tiende en Colombia a ser la de mayor producción, como la Castillo (Tinoco & Peña, 2018), identificando o generando en el proceso las técnicas y los métodos más adecuados; teniendo a futuro el potencial de servir como guía en otro tipo de estudios, por ejemplo, comprendiendo el mecanismo de desprendimiento de cualquier fruto diferente al estudiado en esta tesis o entendiendo la relación existente entre el sabor de la bebida y las propiedades mecánicas del café, con el fin de establecer una mejora en su calidad (Marín et al., 2003).

Dicho lo anterior, se puede decir que la identificación de todas las propiedades previamente mencionadas en el sistema fruto–pedúnculo del café arábica variedad Castillo, propuesto para el desarrollo de la tesis doctoral, es un aporte al avance de la comunidad de caficultores en Colombia, ya que los posibles resultados obtenidos tendrían un impacto en la investigación denominada “*desarrollo de una tecnología de cosecha selectiva de café arábica aplicando*

vibraciones de alta frecuencia”¹, con el que se pretende documentar un diseño efectivo y preciso para la asistencia a la recolección del café; y el cual se realiza desde la Universidad Autónoma de Manizales, la Universidad Autónoma de Bucaramanga y la Universidade Federal de Lavras en conjunto con el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, a través de sus grupos de investigación de diseño mecánico y desarrollo industrial (UAM), automática (UAM) y del grupo de investigación de control y mecatrónica (UNAB).

1.5 Estructura de la tesis

El presente trabajo se estructura en seis capítulos, cada uno de los cuales aborda de manera detallada los objetivos específicos de la siguiente manera:

- ***En el Capítulo 2***, se ofrece una revisión de la literatura relacionada con la cosecha selectiva en una variedad de frutas. Además, se identifican las técnicas experimentales utilizadas para extraer y evaluar diversos parámetros físico-mecánicos, dinámicos, de fractura y de fatiga en las frutas. Estas técnicas son fundamentales para comprender el comportamiento natural del desprendimiento de los frutos.
- ***En el capítulo 3***, se muestra la caracterización cromatográfica de los frutos del café Arábica L. var. Castillo utilizando un colorímetro y una cámara fotográfica. Se obtiene como resultado una identificación de los estados de maduración, con el apoyo de unas gráficas de 2 y 3 dimensiones, que representan algunas características cromáticas del fruto y la aplicación del método de covarianza para su clasificación.
- ***En el capítulo 4***, se introducen los resultados de la identificación de las características físicas y mecánicas del fruto de café variedad Castillo en los cuatro estados de

¹ Convocatoria 808 del 2018. Proyectos de ciencia, tecnología e innovación y su contribución a los retos del país; programa nacional de ciencia, tecnología e innovación en ciencias agropecuarias.

maduración que se definen en el capítulo 3. Visualizando a lo largo de este apartado, la forma en cómo se realizaron los experimentos y sus gráficas que corresponden a diámetros ortogonales, volumen, masa, fuerzas de desprendimiento, y grado de acidez (pH), ponderadas estadísticamente.

- **En el capítulo 5**, se explica el desarrollo y los resultados obtenidos en la determinación de los parámetros que permiten evaluar el comportamiento dinámico estructural del fruto de café arábica var. Castillo en los cuatro estados de maduración que se definen en la sección 3. Utilizando tres modelos de análisis de elementos finitos, donde en cada uno de ellos se busca obtener una serie de curvas elásticas que sean similares a los resultados de curvas elásticas producto de los experimentos dados en el capítulo 4.
- **En el Capítulo 6**, se realiza la determinación de la razón de amortiguamiento del pedúnculo del café arábica var. Castillo en cada uno de los estados de maduración definidos en el Capítulo 3. Para ello, se utiliza un montaje experimental que permite extraer las frecuencias de vibración, las cuales son fundamentales para establecer el valor estadístico de la razón de amortiguamiento.

Además, se establece la tenacidad a la fractura en el sistema fruto-pedúnculo del café arábica L. var. Castillo en cada uno de los estados de maduración. Para el análisis numérico, se utilizan los datos obtenidos de los procesos experimentales, como la medición de la fuerza de desprendimiento en el sistema fruto-pedúnculo cuando se genera una micro-fisura en la base del pedicelo, así como los datos de las características físicas de cada uno de los especímenes vegetales seleccionados.

- Finalmente se brindan las conclusiones y recomendaciones, contribuciones del trabajo y los anexos.

CAPÍTULO 2 – REVISIÓN DE LITERATURA.

2.1 Cosecha asistida

En Colombia la producción de café es una de las principales fuentes de ingreso tanto para las familias caficultoras como para personas que viven de este recurso, y aunque a nivel mundial no se encuentre como el primer exportador, su posición como tercer productor, permite que este sector sea considerado de suma importancia para la economía nacional, ya que tiene un impacto directo en un poco más de 3.3 millones de personas y 555,692 familias cafeteras; lo que genera una ocupación del 27% de empleo rural y crea diferentes actividades derivadas de su producción (Vélez, 2019; Aristizabal & Duque, 2008).

Sin embargo, en un intento por mejorar la posición de Colombia como exportador, se han abordado diferentes proyectos de investigación en toda las diversas partes de la cadena productiva, siendo la cosecha la sección a la que recientemente se han dispuesto muchos esfuerzos, no obstante, técnicamente es compleja y muy necesaria de mejorar, porque como lo afirma (Vélez et al., 2002), “la recolección del café utiliza mano de obra la cual generalmente es poca y carece de capacitación en esta labor, como consecuencia directa, el rendimiento y la calidad en promedio son deficientes”; sin embargo, dentro de las posibles propuestas de solución, la cosecha mecanizada, semi-mecanizada y asistida es la más viable de implementar, ya que ha sido un recurso adoptado con cierto éxito en Brasil, Australia y Hawái, dándoles la ventaja de disminuir sus precios (Vélez et al., 2002).

Ahora bien, con respecto a la cosecha, Brasil, que lidera la exportación de café en el mundo, tiene procesos de mecanización y semi-mecanización que se presentan desde 1980, proporcionándoles la facilidad de incrementar la capacidad productiva de la mano de obra, obteniendo un producto de mejor calidad y minimizando los problemas de escasez de recolectores en el periodo de la cosecha (Silva et al., 2001). Los equipos que se implementan se denominan derribadoras y son elementos con dedos vibradores que pueden ser accionados

neumáticamente o por motor, bien sea desde un tractor estrecho o ajustadas en una presentación portátil.

Es así, como se podría inferir que una transferencia tecnológica sería la mejor solución para abordar el problema de la recolección en las zonas cafeteras de Colombia, no obstante, existen estudios que analizan el comportamiento de los dispositivos comerciales, haciendo un énfasis en la posible adaptación a las variedades sembradas en Colombia; encontrando, que estos pueden operar al interior de plantaciones con distancias entre surcos superiores a 1.2 m y con pendientes de hasta el 50%, lo cual es un primer inconveniente, ya que el 55% de la caficultura se encuentra en terrenos con pendientes superiores al 70% (Martínez et al., 2016), otras particularidades son reportadas en (Oliveros et al., 2005; Díaz et al., 2009), donde, para la variedad Colombia, el desprendimiento de frutos verdes varía entre el 6.4% y el 17.6% sobre el total de la cosecha; esto es otro problema, ya que un contenido mayor del 5% de frutos inmaduros (Puerta, 2000) genera en la bebida un sabor y aroma a fermento y acre (Marín et al., 2004). Así mismo el enmallado para la toma de los granos del suelo, que debe ir acompañado con el funcionamiento del equipo, exige un tiempo muy alto para los recolectores.

Por lo tanto, se han realizado acercamientos a la implementación de tecnologías autóctonas en la recolección del café, que se observan desde los dispositivos para la cosecha manual asistida, iniciando con el desarrollo denominado “Aroandes”, que es un equipo simple, compuesto por un aro (añadido al brazo), una manga y un recipiente en la espalda del trabajador donde se almacenan temporalmente los granos, con un objetivo, la disminución de frutos dejados en el suelo (López et al., 2008), ver **Figura 2.1a**; su evolución continuó hasta el desarrollo de un sistema llamado “canguaro”, y posterior “canguaro 2M”, que contienen una manga o guantes de recepción, sirviendo como sistemas de protección, y conectada a un morral o depósito que está en la parte frontal de la cintura (López et al., 2008; Ocampo et al., 2017), ver **Figura 2.1a** y **Figura 2.1b**. Existen otros desarrollos que son referenciados en (Oliveros et al., 2005), con diseños especializados para “raspar” los glomérulos de café, buscando el desprendimiento de frutos maduros en un menor tiempo,

como el “RASELCA I”, “RASELCA II”, o el “Orsel”. Ver **Figura 2.1d**, **Figura 2.1e**, **Figura 2.1f**.

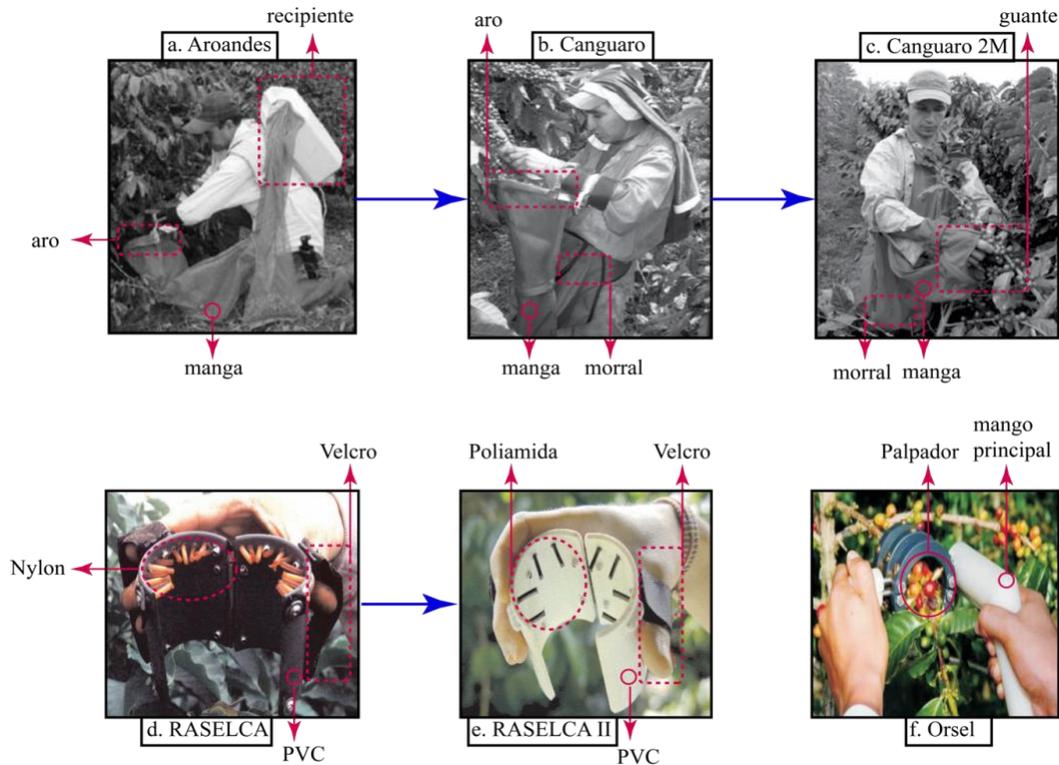


Figura 2.1. (a) Aroandes, (b) Canguaro, (c) Canguaro 2M, (d) RASELCA, (e) RASELCA II, (f) Orsel. Tomado y adaptado de a,b,c. *Oliveros & Sanz (2011)*; d,e,f. *Oliveros et al. (2005)*.

Otro hito importante en el diseño de los dispositivos semi-mecanizados para uso en el país, se encuentra en el “*IMFRA 2DC*”, y su iteración “*IMFRA 3DC*”, siendo dos tipos de dispositivos con diferentes características en sus impactadores; fabricados en teflón y accionados por motores DC, que giran a 1100 rpm, cuya fuente de alimentación es una batería de 8 kg, ubicada en la espalda del operario; el desprendimiento de los granos de la variedad Colombia, se da cuando las terminales golpean los glomérulos que están sobre las ramas (*Oliveros et al., 2005*), ver **Figura 2.2a** y **Figura 2.2b**, por otra parte (*Álvarez et al., 2013*), hacen referencia al “*batidor Cenicafé – I*”, el cual “somete las fibras en las uniones fruto–pedúnculo y pedúnculo–tallo, a ciclos de tracción–compresión suficientes para ocasionar el desprendimiento de los frutos”, ver **Figura 2.2c**. Además, (*Moreno et al., 2015*) mencionan el diseño de un impactador de nombre “Alfa”, que consta de “tres paletas dentadas, un motor DC accionado por baterías secas y un sistema para recibir los frutos desprendidos”, ver

Figura 2.2d. Finalmente (Sanz & Duque, 2020), presentan una derribadora selectiva de café “Brudden DSC18”, compuesta en su extremo de unas tenazas vibratoras, activada con un motor de combustión interna, ver **Figura 2.2e.**

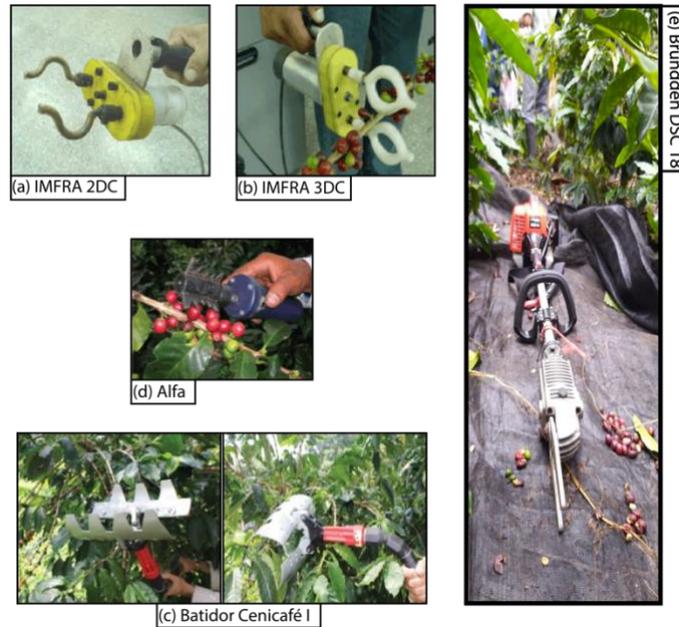


Figura 2.2. (a) IMFRA 2DC, (b) IMFRA 3DC, (c) Batidor Cenicafé I, (d) Alfa, (e) Brudden DSC 18. Tomado y adaptado de a, b. Oliveros et al. (2005); c. Álvarez et al. (2013); d. Moreno et al. (2015); e. Sanz & Duque (2020)

Un rasgo distintivo de estas referencias es que para poder llegar a los diseños planteados primero se deben conocer las frecuencias naturales y los modos de vibración de los frutos, sin embargo, existen una serie de estudios que se desarrollan alrededor de esta temática y que son necesarios para comprender, cómo los diferentes análisis pueden impactar en la creación de un equipo para la recolección de frutos de café.

2.2 Propiedades físico-mecánicas en frutas

La extracción de las propiedades físico-mecánicas del sistema fruto-pedúnculo del café o de cualquier fruta, es una fase importante para comprender los principios naturales del desprendimiento en las diferentes etapas de maduración (Tobón et al., 1999), sus resultados

normalmente se utilizan para desarrollar o mejorar las cosechas mecanizadas y dichos estudios crean los datos de forma experimental, simulados o la combinación simulado-experimental (Tinoco et al., 2014). La primera propiedad que sirve de referente para generar una diferenciación o agrupaciones entre los datos extraídos es la del color, cuya revisión de literatura se presenta a continuación con diversos estudios y varias formas de concebir sus resultados.

2.2.1 Determinación de las propiedades del color en frutas

De forma general, para los procesos experimentales en frutas, la determinación de propiedades de color se inicia con la diferenciación de los estados de maduración, como la realizada por (Ramos et al., 2010), donde el objetivo de este estudio es la identificación de las propiedades cromáticas en el café variedad Colombia en diversas semanas de desarrollo, para su ingreso a un beneficiadero, aplicando un método experimental que se basa en la representación del color Hue-Saturation- Value (HSV), con el que se generan puntos de corte para limitar las áreas de cuatro estados de maduración. La aplicación de algoritmos de aprendizaje y un montaje opto-electrónico ayudan a realizar esta tarea, tal y como se puede observar en la **Figura 2.3**.

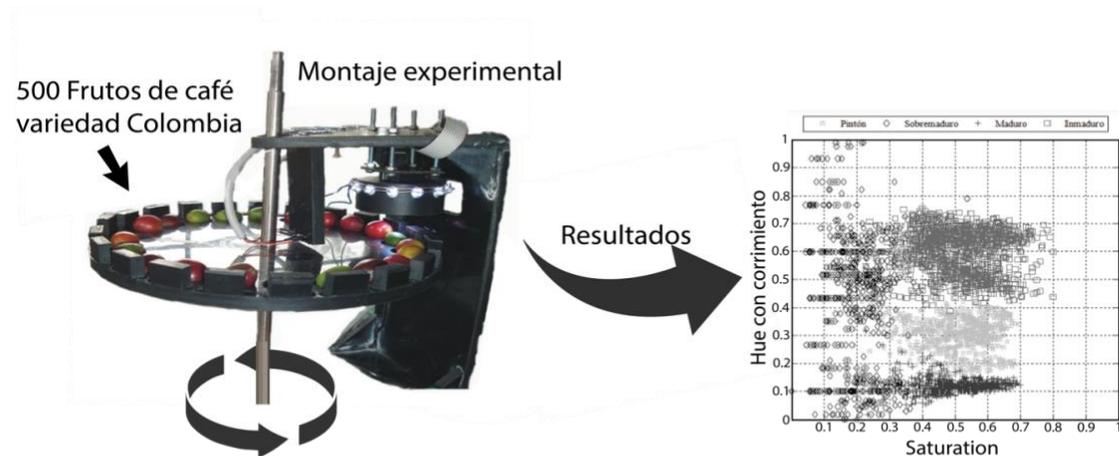


Figura 2.3. Proceso experimental de medición de color y resultados. Tomado y adaptado de Ramos et al. (2010)

Con una finalidad similar a la referencia anterior, el estudio de (Carvajal et al., 2011) busca la identificación en 300 frutos, de las propiedades cromáticas del café variedad Colombia, para diferentes estados de maduración, mientras está en el árbol o en pre-cosecha; la técnica utilizada se basa en la identificación del color utilizando las coordenadas cromáticas dadas por los datos arrojados en un espacio de color CIElab por un espectrofotómetro de esfera, como se presenta en la **Figura 2.4**. Donde se muestra una diferencia de nueve estados de desarrollo, que se encuentran entre los 182 DDA (o días de antesis) y 238 DDA, en el que fueron procesados utilizando los valores medios de los datos recolectados y los coeficientes de variación; cada uno de estos, se dan como valores únicos y no como rangos de datos para una fácil identificación.

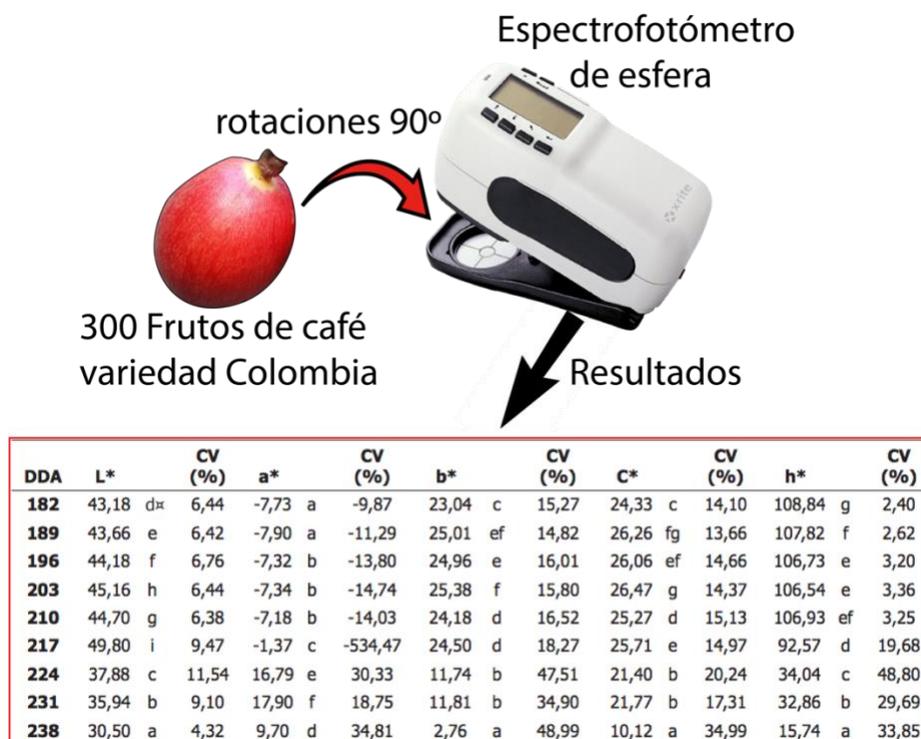


Figura 2.4. Medición de color con espectrofotómetro y sus resultados. Tomado y adaptado de: Carvajal et al. (2011)

Un concepto similar es presentado por (Yuwana et al., 2015), donde parte del trabajo realizado permite relacionar los colores del grano de café robusta, sembrados en indonesia, con sus propiedades físicas de longitud, ancho, espesor, peso, porosidad, densidad,

coeficiente de fricción estática y ángulo de reposo; sin embargo, el color de los frutos no se separan cuantitativamente, como en las referencias anteriores, si no, de una manera cualitativa, con la ayuda de un experto y según los criterios dados por el estándar nacional de indonesia (SIN 2907-2008); en el que su objetivo es determinar los problemas de calidad hacia el consumidor final. El diseño experimental para la recolección de los especímenes se basa en un muestreo aleatorio simple no factorial, donde para cada tratamiento se realizaban hasta tres mediciones, llegando a tener 1000 muestras.

Ahora, la investigación generada por (Martínez et al., 2016), utiliza la misma premisa de identificar el color en la cereza del café, pero con el fin de reconocer la presencia de la broca, desarrollando para ello dos algoritmos que funcionan con un sistema de procesamiento de imágenes, uno para la identificación y clasificación por color de cafés buenos y malos, y otro para la detección de la broca en la variedad Colombia; la metodología propuesta para la adquisición de los datos, consistió en obtener imágenes de 248 frutos de café (distribuidos entre verdes y maduros), con una cámara de 5 megapíxeles (MP) a una distancia de 15 cm, dentro de un ambiente controlado con una iluminación difusa y dos fuentes de luz tipo fluorescente, para luego pasarlo por una segmentación por binarización con el método de Otsu, (Nixon & Aguado, 2019) como se puede ver en la **Figura 2.5**; a los datos arrojados en la segmentación se le extraen sus características de colores con los modelos HSI, L^* , a^* y b^* , para finalmente pasarlos por una red neuronal de base radial que funciona como un clasificador.

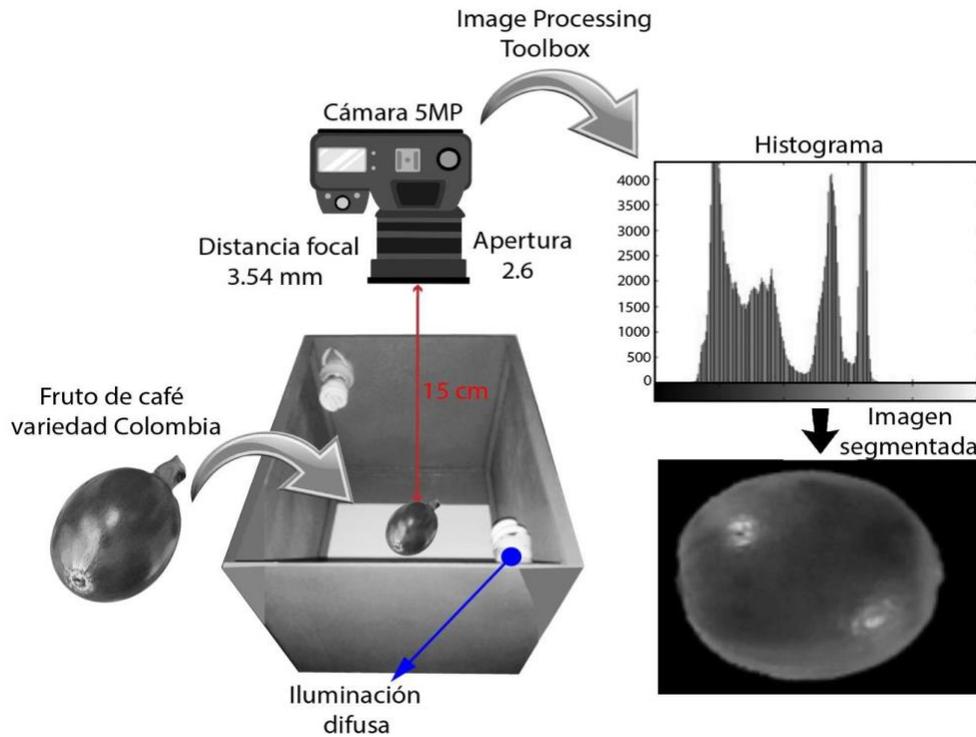


Figura 2.5. Medición de color con cámara fotográfica y segmentación de imagen. Tomado y adaptado de: [Martínez et al. \(2016\)](#)

Así mismo, en ([Costa et al., 2020](#)), obtienen las características colorimétricas del café Robusta variedad Canephora en diferentes estados de madurez, utilizando una cámara Nikon Coolpix 1820; donde la metodología implementada es similar a la utilizada en ([Martínez et al., 2016](#)), en el que para adquirir los datos se debe introducir el conjunto de muestras en una estructura que funciona como un ambiente controlado, con dos lámparas de halógeno de 40W, y una distancia entre la cámara y los frutos de 0.50 m, como se observa en la **Figura 2.6**. cada imagen es segmentada por el método de Otsu ([Nixon & Aguado, 2019](#)) y clasificada con un algoritmo K-means; sin embargo, con los valores conseguidos se hace una relación físico-química del grano, como los sólidos solubles totales (TTS) y la acidez titulable (TTA).

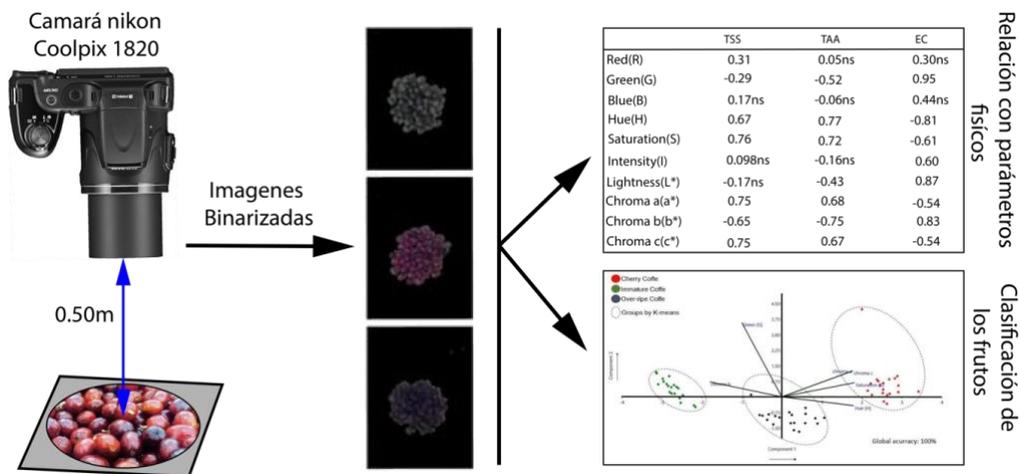


Figura 2.6. Medición de color con cámara fotográfica y clasificación. Tomado y adaptado de [Costa et al. \(2020\)](#)

Otro proceso realizado con una similitud de características, a la hora de adquirir los datos, es el que se muestra en ([Niño & Ortiz, 2007](#)), donde utilizan un sistema de visión artificial para realizar la clasificación de los frutos del café variedad Colombia por color. Para el montaje experimental se utilizó una cámara de video a color y dos lámparas de luz blanca con filtros de papel pergamino para reducir el brillo sobre el espécimen, como se muestra en la [Figura 2.7](#). La información obtenida se digitaliza a través de una tarjeta conectada a un computador, para luego ser procesada hasta conseguir once resultados de clasificación.

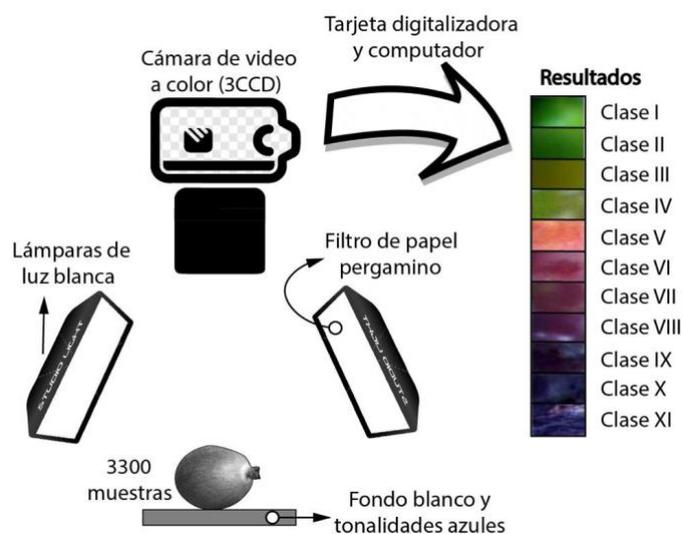


Figura 2.7. Medición de color con cámara de video y clasificación. Tomado y adaptado de: [Niño & Ortiz \(2007\)](#)

En resumen, se puede afirmar que el denominador común de las referencias previamente mencionadas, se encuentra en la identificación y clasificación de los estados de maduración en el fruto de café utilizando técnicas no invasivas; además se puede mencionar que lo que se busca es lograr aumentar la calidad en la tasa y permitir una mejora en la competitividad del gremio cafetero, también este tipo de caracterizaciones permite completar otros estudios.

Sin embargo, se debe aclarar que los estudios de cromaticidad, en agronomía, no son exclusivas del café, existen avances hacia otras especies vegetales, como el presentado por (Benito et al., 2016), cuyo énfasis consiste en identificar el estado de madurez del tomate en cuatro variedades (*San Martín, Tecozautla, Rendidora y Diamante*), utilizando el color en la cáscara. Las correspondientes mediciones se realizaron con un mini scanner, el cual entregó la información en el espacio CIELab; donde a los resultados obtenidos se les realizó un análisis de varianza y las medias se compararon con la prueba de Tukey, como se puede ver en la **Figura 2.8**.

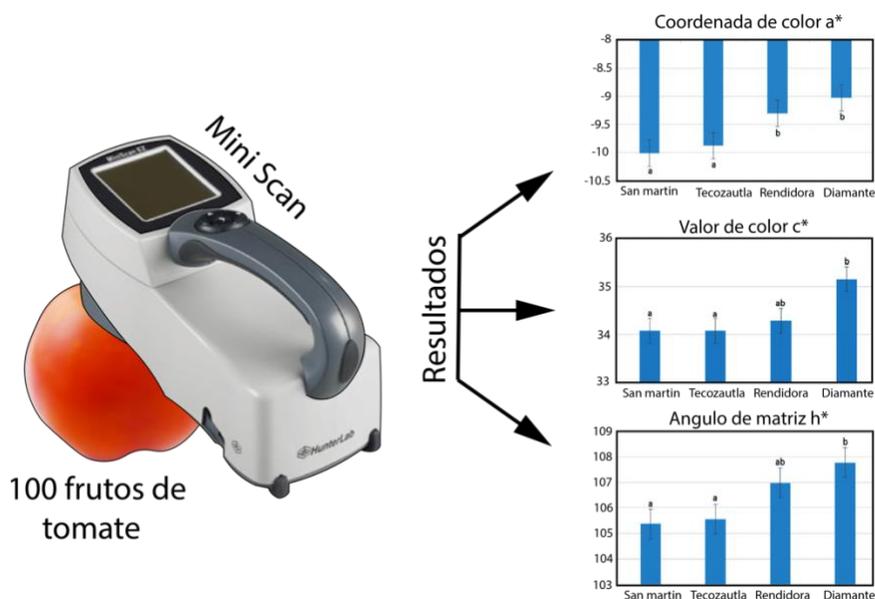


Figura 2.8. Medición de color en el fruto del tomate. Tomado y adaptado de: Benito et al. (2016)

Otro ejemplo se presenta en el estudio realizado por Torres et al. (2013) quienes miden el color con un sistema de adquisición de imágenes para determinar con el uso de modelos lineales y polinómicos, el estado de madurez de las frutas de mango puerco y corazón, maracuyá, papaya y plátano. Para las medidas se utilizó una base experimental similar a la

que se reporta en [León et al. \(2006\)](#), donde se implementan lámparas fluorescentes de 18 W, una cámara digital de color Canon PowerShot SX11S y una estructura para controlar las condiciones medio ambientales de iluminación, como se puede observar en la **Figura 2.9**. Para los resultados reportados por [Torres et al. \(2013\)](#), las imágenes adquiridas son tratadas con el programa Adobe Photoshop CS5 y son cuantificados utilizando un gráfico de distribución acumulada, media y desviación estándar para cada uno de los parámetros L^* , a^* y b^* .

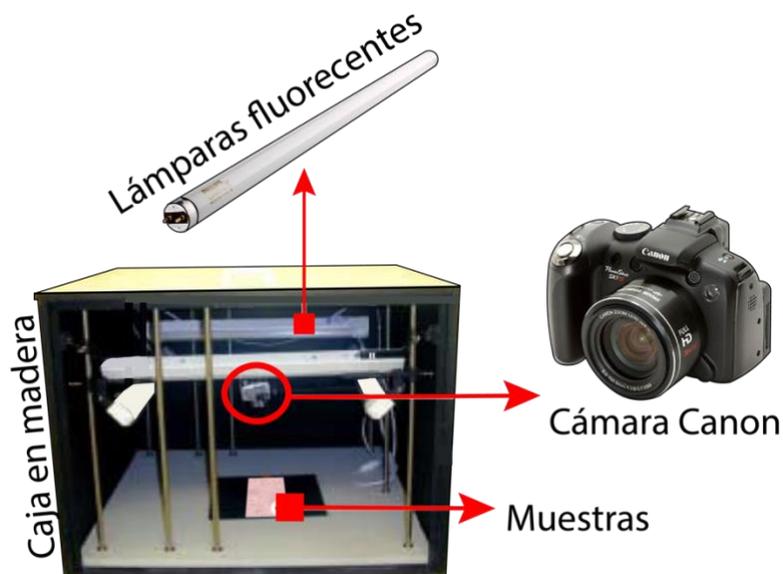


Figura 2.9. Estructura experimental para medición de color. Tomado y adaptado de [León et al. \(2006\)](#)

Estos últimos estudios permiten observar que la colorimetría en los frutos tiene una utilidad mayor que la de realizar una clasificación, con ella se pueden identificar otro tipo de propiedades como las químicas, físicas y biológicas, dando con ello una herramienta para mejorar los productos de cualquier agricultor. Ahora bien, una cualidad presente en todas las referencias mostradas es que su proceso experimental para la extracción del color no es destructivo y se puede dividir en dos componentes: el primero, mediciones con dispositivos especializados y el segundo con cámaras fotográficas y de video, sin embargo también se puede notar que los métodos para procesar la información sustraída, tiende a ser muy

diferente entre todos los trabajos; así mismo se observa que es importante la relación de la cualidad del color con otro tipo de propiedades como las que se exponen a continuación.

2.2.2 Determinación de las propiedades densitométricas y geométricas en frutas

Para identificar las frecuencias naturales y los modos de vibración de un sistema fruto-pedúnculo, se hace necesario determinar sus propiedades geométricas, de masa, densidad y volumen, cabe señalar que el color en el fruto, aunque no es trascendental para establecer un análisis en vibraciones, sirve para clasificar los diferentes estados de maduración y a partir de allí dividir correctamente sus propiedades físicas.

Dichas características se pueden hallar para cualquier fruto, con diferentes enfoques como evaluar la calidad de un producto en post-cosecha o mejorar las condiciones de un sistema o proceso de recolección; sin embargo algunas veces se implementan métodos destructivos, que consumen mucho tiempo, son costosos, y no son adecuados para el uso industrial; aunque, también existen métodos no destructivos como el análisis por vibraciones, donde se busca determinar sus frecuencias naturales para observar las respuestas a las vibraciones (Yang & Wang, 2010), no obstante, esto depende de su densidad, masa y forma geométrica, los cuales varían según su madurez, como en Namdari et al. (2020), donde para poder determinar las propiedades modales de la naranja utilizando elementos finitos, se generó un modelo geométrico en CAD de los estados inmaduro y maduro, no obstante para hacerlo se midió el diámetro polar, el ecuatorial y el espesor en los frutos con un calibrador digital Mitutoyo, como se puede observar en la **Figura 2.10**.

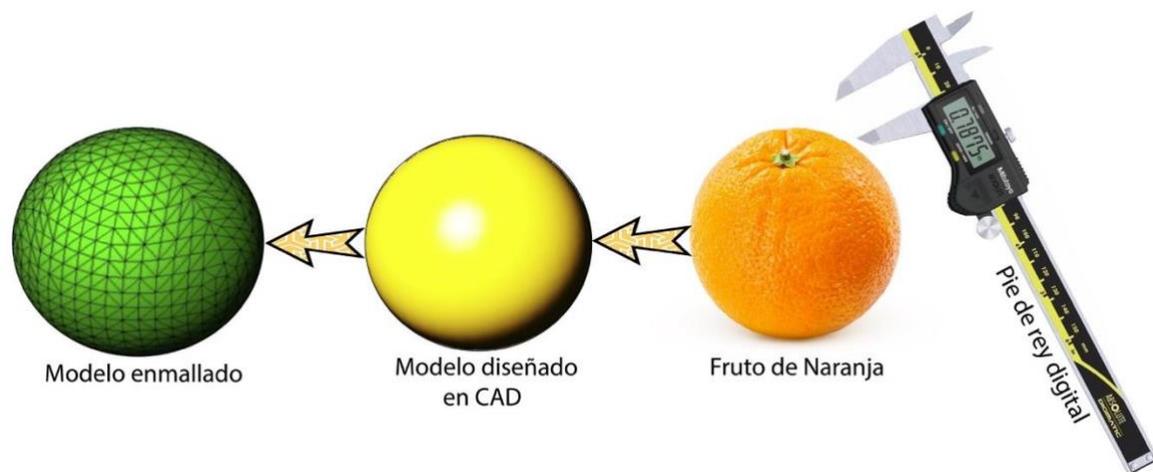


Figura 2.10. Medición de diámetros polar, ecuatorial y espesor del fruto de naranja para diseño CAD. Tomado y adaptado de [Namdari et al. \(2020\)](#).

Es necesario aclarar que la forma de los frutos, es un rasgo crucial del cual dependen otros parámetros ([Jancsó et al., 2001](#); [Tinoco & Peña, 2019](#)), por eso existen diferentes estudios que generan modelos para reproducir la forma de las frutas, bien sea, utilizando un modelado asistido por computadora, por procesamiento de imágenes o por modelos analíticos paramétricos; esta última técnica en algunos casos es difícil de reproducir debido a la dificultad geométrica de los frutos ([Rashidi & Seyfi, 2007](#)).

Entre las referencias que utilizan el diseño asistido para generar un modelo geométrico se encuentra el propuesto por ([Tinoco et al., 2020b](#)), que utiliza las imágenes de la naranja Valencia (*Citrus sinensis*), para modelarlo geoméricamente con la ayuda de las curvas de Bézier y así generar un enfoque CAD. Esto se realiza definiendo en las fotografías los principales perfiles de la fruta y orientando sus direcciones principales al momento de adquirir la imagen; después se exportan a una hoja milimétrica en SolidWorks® para permitir una reconstrucción en 3D. Finalmente el resultado de utilizar las curvas de Bézier, es un modelo CAD, que evidencia la forma de maduración del fruto. Ver la **Figura 2.11**.

Así mismo, en [Dintwa et al. \(2008\)](#), realizaron la construcción en CAD de la mitad de un fruto de manzana; para analizar el proceso dinámico de la colisión de las manzanas en condiciones de transporte con camiones, sus resultados se resumen en que la pérdida de

energía durante un choque depende de las propiedades elásticas y las geometrías del fruto, los cuales se obtuvieron con medidas directas utilizando un pie de rey, en el que se midieron el diámetro ecuatorial, el espesor de la cutícula y el diámetro menor del núcleo. Otro enfoque se da en el estudio de [Torppa et al. \(2006\)](#), donde muestra una técnica simplificada de modelo geométrico para los tubérculos en seis cultivos de papa, con el fin de identificar este rasgo físico como un parámetro de calidad importante en conjunto con otras características como la densidad.

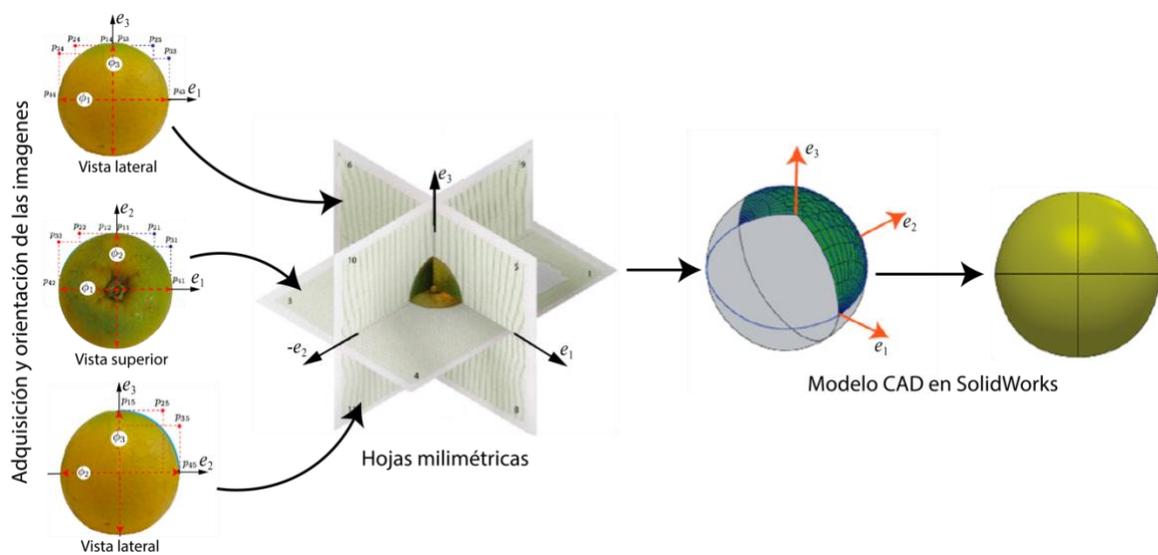


Figura 2.11. Modelo geométrico basado en imágenes. Tomado y adaptado de [Tinoco et al. \(2020b\)](#)

Para el café, también existen estudios que se pueden encontrar en un lapso mayor a los 20 años, como es el presentado por [Tobón et al. \(1999\)](#), donde se encontraron las diferencias en el desprendimiento de los frutos verdes y maduros del café variedad Colombia; sin embargo para determinarlo se identificaron ciertas propiedades físicas, como las dimensiones ortogonales, para el que se utilizó un calibrador digital, el peso, hallado con una balanza electrónica y la densidad real, definida con la ayuda del principio de Arquímedes. Ver **Figura 2.12.**



Figura 2.12. Medición experimental de dimensiones, peso y densidad del café Var. Colombia. Adaptado de [Tobón et al. \(1999\)](#)

De la misma manera, [Herrera et al. \(2012\)](#), evalúa las fuerzas para desprender los frutos de la variedad Colombia en los nueve estados de maduración, definidos en [Carvajal et al. \(2011\)](#); donde la base del estudio es la determinación de las dimensiones ortogonales, las cuales se miden con un calibrador digital de resolución de 0.01 mm en los planos E_1 , E_2 y P , sobre 100 frutos de café, como se observa en la **Figura 2.13**. Estos datos se utilizan para hallar con las siguientes ecuaciones, el diámetro característico D_c .

$$D_1 = \frac{(E_1 + E_2 + P)}{3}, \quad (2.1)$$

$$D_2 = (E_1 * E_2 * P)^{1/3}, \quad (2.2)$$

$$D_3 = \left(\frac{E_1 * E_2 + E_1 * P + E_2 * P}{3} \right)^{(1/2)}, \quad (2.3)$$

$$D_c = \frac{(D_1 + D_2 + D_3)}{3}. \quad (2.4)$$

Para la misma referencia de [Herrera et al. \(2012\)](#), con base a la misma cantidad muestral de 100 frutos, se encuentra la masa fresca (M) y la masa húmeda (M_s), utilizando una balanza digital de 620g, de la forma como se puede ver en la **Figura 2.13**. Estos datos se utilizan para calcular el contenido de humedad M_c, de la siguiente manera

$$M_c = \frac{(M - M_s)}{M} * 100. \quad (2.5)$$

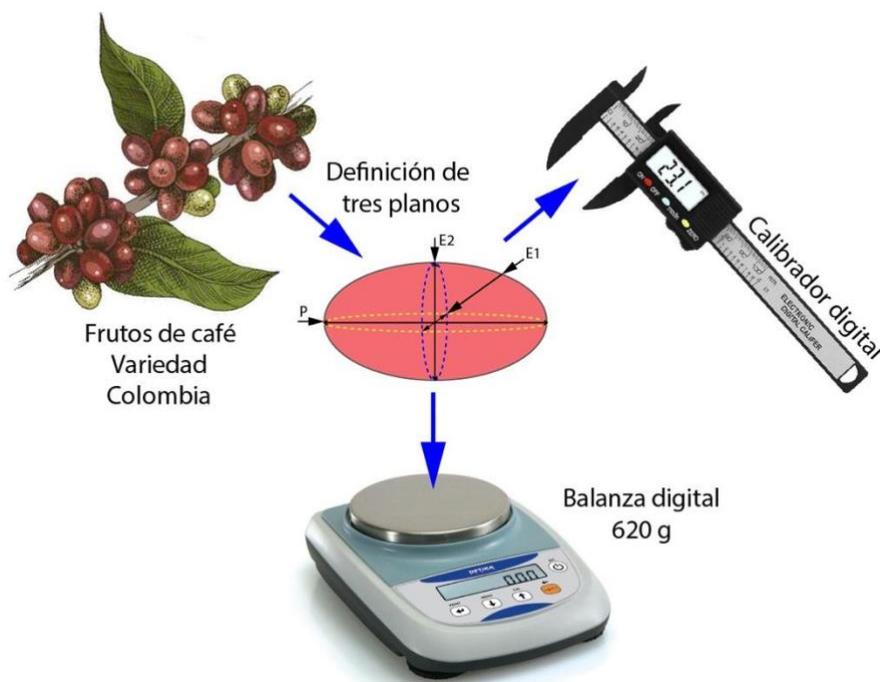


Figura 2.13. Medición de dimensiones ortogonales y la masa del café variedad Colombia. Tomado y adaptado de [Herrera et al. \(2012\)](#)

Hasta este punto, en las referencias anteriores se hallan las características físicas de la cereza de café con el mismo tipo de herramientas, no obstante [Tinoco et al. \(2014\)](#), presentaron una forma diferente para establecer las dimensiones en diferentes estados de maduración para el café variedad Colombia. En él se generan unos modelos paramétricos, fundamentados en las curvas de Bézier, donde establece en base a planos, un modelo estructural, cuyo resultado se compara con las imágenes reales de los frutos, ver **Figura 2.14**; para el pedicelo y el

pedúnculo, la composición se realiza con dos cilindros de diámetro y longitud que varían en función a los días de maduración, según la información dada por [Ciro et al. \(1998\)](#). La determinación de la masa, la cual está registrada en [Herrera et al. \(2012\)](#) y de la densidad en [Ciro et al. \(1998\)](#), son necesarias, en esta referencia, para la identificación heurística de las frecuencias naturales y los modos de vibración.

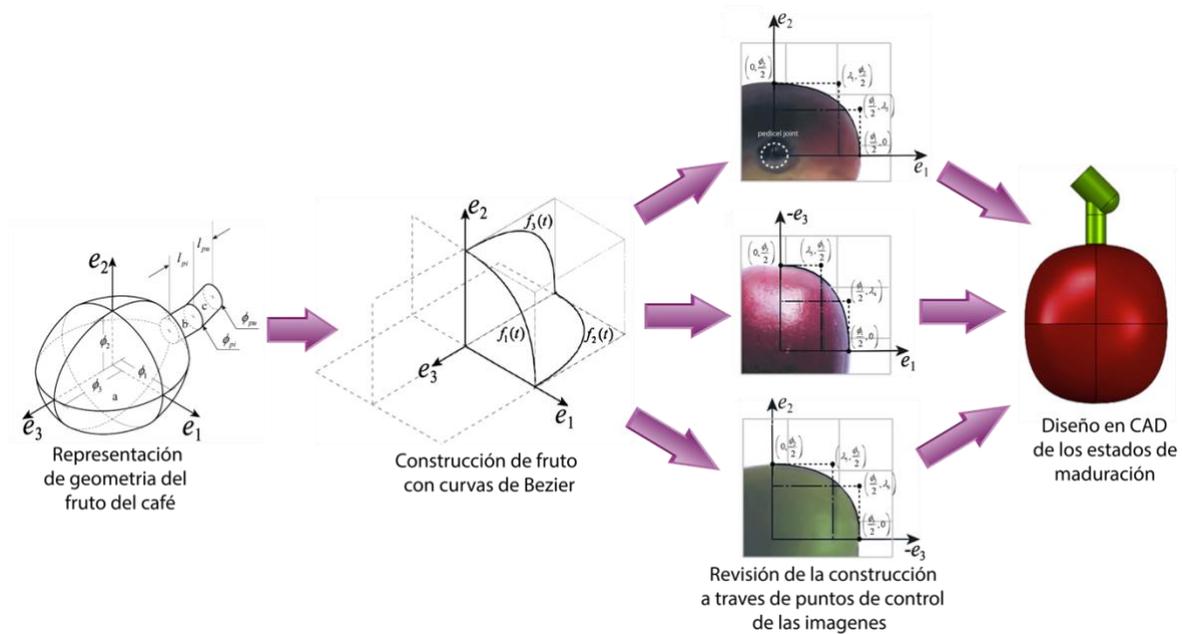


Figura 2.14. Diseño de fruto de café verificando dimensiones. Tomado y adaptado de [Tinoco et al. \(2014\)](#)

Dirigido hacia una especie de café diferente, los estudios de [Rodríguez et al. \(2007\)](#) y [Espinosa et al. \(2007\)](#), van encaminados a encontrar la excitación y los modos de vibración del café Var. Caturra amarillo y rojo, sin embargo, en ambos casos se requirieron los datos del estudio realizado por [Gaskins et al. \(2004\)](#), el cual encuentra las dimensiones, la masa, la densidad y el volumen de la cereza de café, de una manera similar a la realizada en la **Figura 2.12**; entendiéndose a estos datos como la entrada a los análisis modales.

Lo dicho hasta aquí, demuestra que las propiedades densitométricas, se pueden determinar para cualquier fruto, sin embargo, una de las características más complejas de hallar son las geométricas, ya que la forma de los frutos no sigue un patrón definido; así mismo, identificar las dimensiones del pedúnculo con técnicas tradicionales tampoco es sencillo debido a los cambios naturales que se presentan en el transcurso de la maduración del sistema. Cabe

señalar que, de las referencias consultadas, no existen estudios en el tema dirigidos hacia la variedad Castillo.

2.2.3 Determinación de las propiedades mecánicas en frutas

Al igual que las propiedades densitométricas, las propiedades mecánicas ayudan a identificar las frecuencias y las propiedades modales o los modos de vibración del sistema fruto–pedúnculo del café, estas características son la firmeza o rigidez, el módulo de elasticidad o módulo de Young y el coeficiente de Poisson. Al igual que con el punto anterior estos conceptos no son exclusivos del café y se pueden encontrar estudios desarrollados en otras ramas de la agricultura y aplicados en otros conceptos diferentes a la cosecha selectiva, donde uno de ellos es dado por [Sirisomboon et al. \(2007\)](#), que hace una investigación sobre la fruta y la nuez (*Jatropha curcas* L.), en el cual su semilla contiene un aceite no comestible que es utilizado como biocombustible para motores diésel. El documento hace énfasis tanto en las propiedades físicas como en las mecánicas, donde para esta última se determinan las fuerzas de ruptura, deformación, relación de deformación en el punto de ruptura, dureza y energía, utilizando una prueba de compresión, en el que se implementa un analizador de textura (TA.XT Plus, Stable Micro System), para ello cada nuez se alinea horizontalmente y luego se comprimen a una velocidad de deformación de 0.5 mm/s, como se observa en la **Figura 2.15**. La deformación en el punto de ruptura, la relación de deformación, la dureza y la energía utilizada se evaluaron con el software (Texture Exponent 32, Stable Micro System).

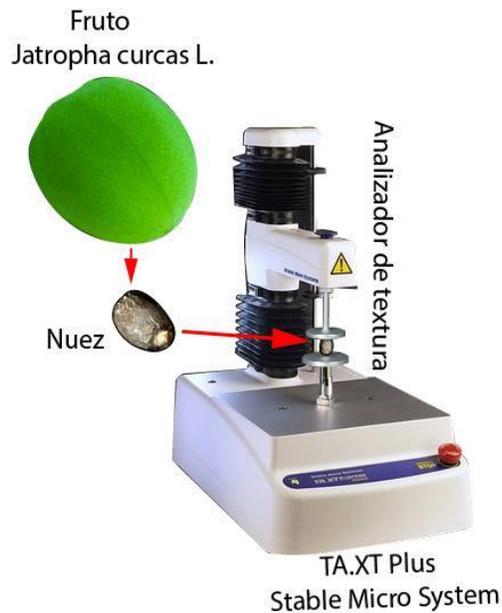


Figura 2.15. Medición de fuerzas de ruptura en *Jatropha curcas*. Adaptado de [Sirisomboon et al. \(2007\)](#)

En la misma orientación de post-cosecha, el autor [Singh & Reddy. \(2006\)](#) determina las propiedades mecánicas para el corte de la naranja. En este proceso se disecaron cuidadosamente trozos de cáscara de cinco frutas seleccionadas al azar y se colocaron piezas desprendidas de aproximadamente 20 a 40 mm, en el analizador de textura, procurando calibrar la celda a 250 N, con una velocidad de corte de 1 mm/s, como se observa en la **Figura 2.16**.

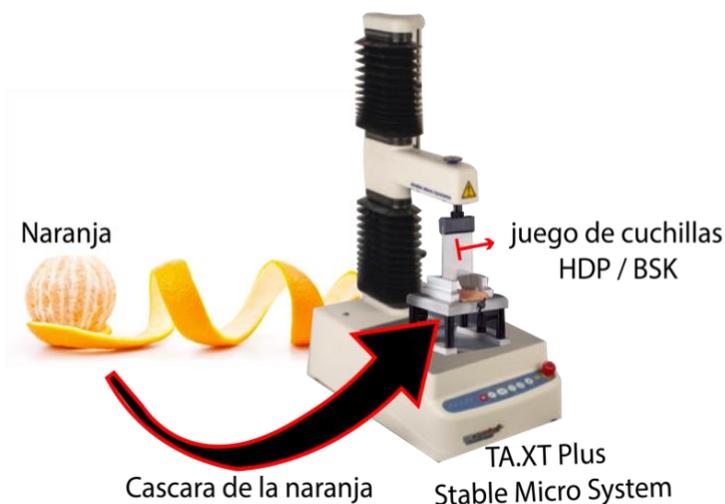


Figura 2.16. Medición de propiedades mecánicas de la naranja. Adaptado de [Singh & Reddy. \(2006\)](#)

Con el mismo objetivo que el anterior autor, [Ciro et al. \(1998\)](#) evaluó experimentalmente la fuerza de fractura y la firmeza de la uchuva, usando técnicas destructivas, como el que se presenta en la [Figura 2.13](#) y la [Figura 2.14](#). para determinar la fractura se utilizó un analizador de textura TA-XT2i, Stable Micro Systems; el cual se configura a una velocidad de carga de 1mm/s para los diferentes tiempos de cosecha de la uchuva, teniendo en cuenta que el fruto es sometido en el sentido longitudinal y luego transversal para la carga. Ahora bien, para establecer la firmeza, se empleó el mismo analizador de textura, solo que a este se le adapta una aguja de penetración cilíndrica de 2mm de diámetro, como se observa en la [Figura 2.17](#), luego a la fruta se le somete a un proceso de punzamiento a una velocidad de carga de 1 mm/s, para cada estado de madurez. Los resultados arrojados se analizaron utilizando la media de todos los datos.

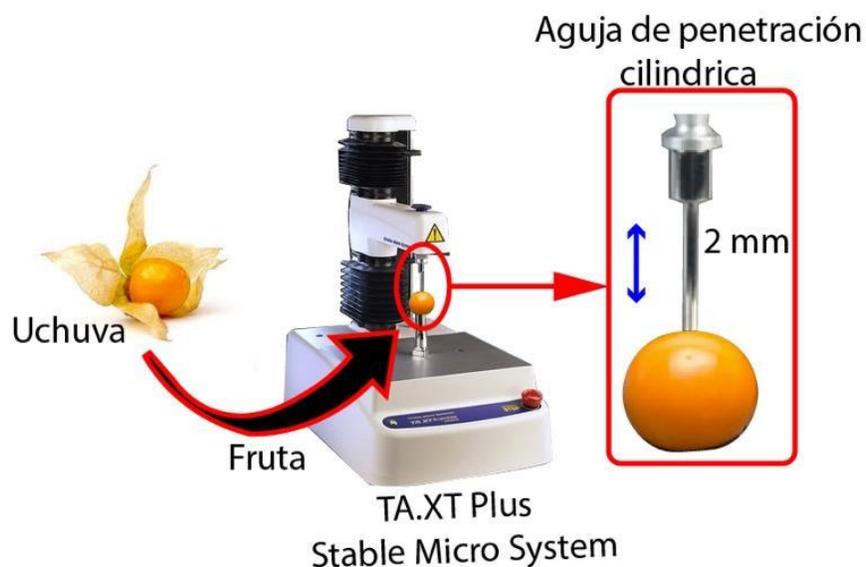


Figura 2.17. Medición de Firmeza en la fruta de la Uchuva. Adaptado de [Ciro et al. \(1998\)](#)

Los estudios de las propiedades mecánicas también se utilizan para encontrar las frecuencias naturales de la naranja, aplicándolo como un método confiable en la detección de madurez ([Namdari et al., 2020](#)), sin embargo, las características principales que se implementan son extraídas del estudio dado por [Ihuez & Mgbemena, \(2017\)](#) que emplea, la teoría de la tensión de contacto de Hertz y el método de elementos finitos para evaluar la presión de contacto

máxima y las tensiones límite de la fruta de naranja Valencia durante su transporte. Para hacerlo utilizó en la etapa experimental, una serie de pruebas de compresión con placas paralelas, con el que se ejerce una fuerza tanto axial como radial, ver **Figura 2.18**; ahora para la evaluación de las tensiones limitantes se utilizó el toolbox PDE de Matlab®, con el que se aplica el método de elementos finitos.

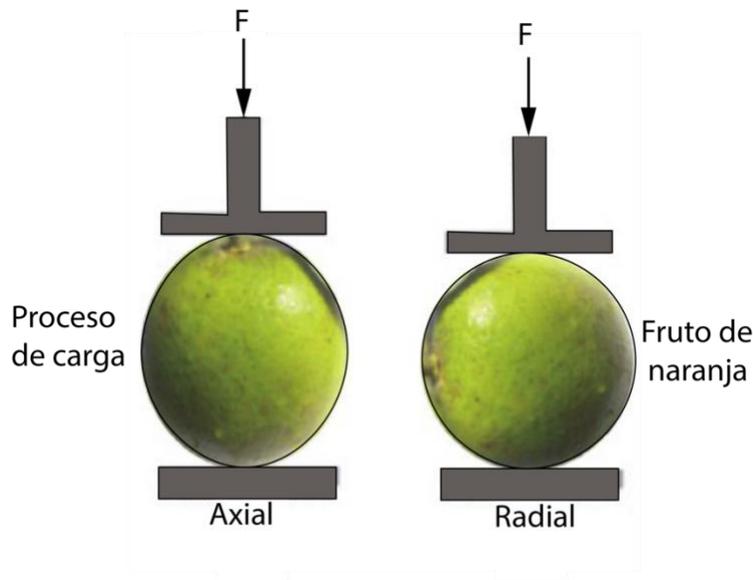


Figura 2.18. Prueba de compresión de la naranja Valencia. Tomado y adaptado de [Ihuez & Mgbemena \(2017\)](#)

En las aplicaciones de recolección selectiva, existen varias referencias como la dada por [Li et al. \(2011\)](#), donde se analizaron diversas características, entre ellas las propiedades mecánicas de los frutos de tomate, donde para determinarlas se realizaron unas pruebas de compresión utilizando el analizador de textura TA-TX2 de texture technologies Cop y dos placas paralelas de 40 mm de diámetro, siendo este proceso experimental similar al presentado por [Sirisomboon et al. \(2007\)](#). El ajuste para la velocidad de desplazamiento de las placas de compresión es de 1.5 mm/s, teniendo como sus puntos de pruebas las regiones ecuatoriales del tomate. Estos estudios se hacen con el fin de diseñar una estructura robótica para la cosecha, el cual se adapte eficientemente a una posición determinada para el desprendimiento sin daño alguno.

Así mismo se puede hacer referencia a [Velloso et al. \(2017\)](#), que hace un estudio de las propiedades mecánicas del sistema fruto-rachilla de la palma Macaw, el cual se utiliza para

la producción de biodiesel; el análisis de las propiedades se justifica en la necesidad de apoyar el diseño de máquinas cosechadoras basadas en vibración mecánica, ya que su explotación se basa en el extractivismo. Para ello se realizaron dos pruebas experimentales una de tracción sobre rachillas de 12 cm, utilizando una máquina de ensayos universal Instron 3365. En la otra prueba experimental, sobre el sistema fruto-rachilla, se aplicó una prueba de vibración utilizando un vibrador electromagnético LDS M6 – CE V555, como se observa en la **Figura 2.19**. Con los resultados que arrojan estas pruebas se encuentra el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson y el amortiguamiento de la rachilla.

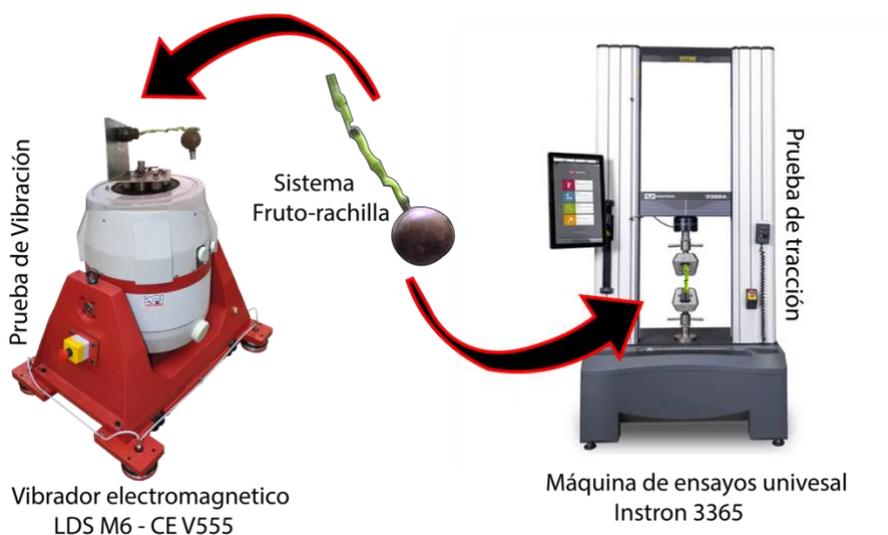


Figura 2.19. Prueba de vibración y tracción en el sistema fruto-rachilla de la palma macaw. Tomado y adaptado de [Velloso et al. \(2017\)](#).

Para el café, las propiedades mecánicas han sido determinadas por diversos autores, como el de [Ciro et al. \(1998\)](#) que hace un estudio del efecto de las vibraciones forzadas en el sistema fruto-pedúnculo del café var. Colombia, y utiliza las características físicas y las mecánicas de rigidez y constante elástica en el pedúnculo como valores de entrada, que le permiten encontrar las frecuencias de resonancia natural del sistema. Esto lo realiza a través de dos montajes experimental, con los que se buscan encontrar las frecuencias de vibración natural del sistema fruto-pedúnculo, para ellos se utiliza un sensor LVDT conectado al eje neutro del pedúnculo cuyos datos son leídos a través de un multímetro y divididos por el factor de

amplificación de la señal. También se construyó un dispositivo mecánico constituido de un motor eléctrico, un variador de frecuencia, una biela, una prensa, una transmisión de cadenas por rodillos y un contraeje, con el que se generan una serie de vibraciones.

Igualmente, [Tinoco et al. \(2018\)](#), presenta otro tipo de análisis, que evalúa el estrés en las interfaces pedicelo–fruto y pedicelo–pedúnculo del café variedad Colombia; en el que una de las características mecánicas determinada, es la elasticidad o módulo de Young, donde, para obtener resultados se implementa un modelo analítico que utiliza un ajuste de mínimos cuadrados. Estos valores satisfacen y permiten encontrar sus índices de firmeza. Este proceso se basa en el estudio realizado por el mismo autor ([Tinoco et al., 2014](#)), donde para realizar el análisis se deben generar los correspondientes modelos geométricos, como se observa en la **Figura 2.12.** y con ellos hace la investigación, a través elementos finitos, de la estructura fruto-pedúnculo, como se observa en la **Figura 2.20.**

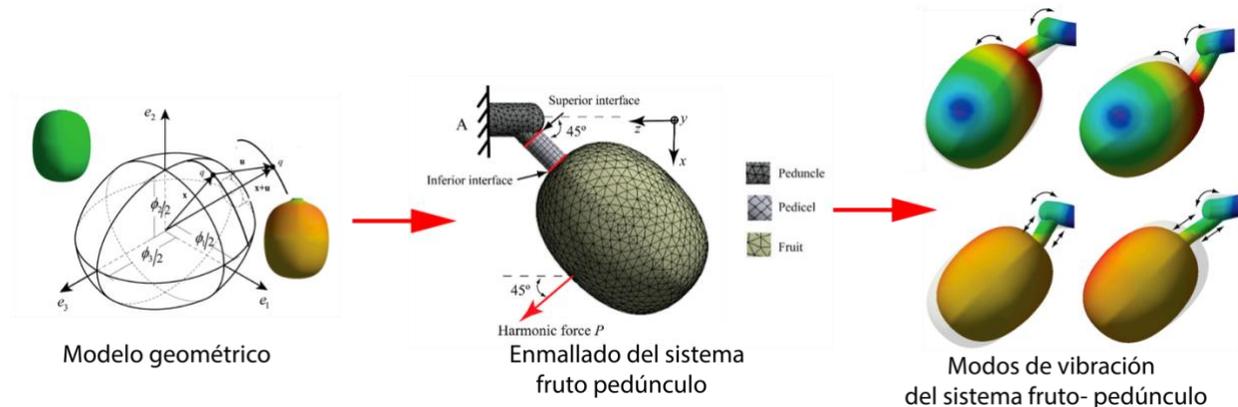


Figura 2.20. Análisis de estrés mecánico en el sistema fruto-pedúnculo del café variedad Colombia. Tomado y adaptado de [Tinoco et al. \(2018\)](#)

Otras referencias donde se centran en la extracción de la firmeza, módulo de Young, y coeficiente de Poisson para el café, se encuentran en ([Tinoco et al., 2014](#); [Herrera et al., 2012](#); [Gaskins et al., 2004](#); [Coelho et al., 2015](#)), una peculiaridad de estos documentos es que hasta el momento no se encuentra un análisis mecánico hacia la variedad Castillo.

2.3 Propiedades dinámicas en frutas

Por lo general las estructuras biológicas tienen la capacidad de responder a cualquier vibración mecánica externa y su respuesta depende de sus propiedades modales, frecuencias naturales, amortiguación y vibración (Castro et al., 2008), por ello en los siguientes apartados se presentan los estudios realizados que explican cómo es el comportamiento de la cereza de café y su pedúnculo.

2.3.1 Propiedades modales y de amortiguamientos en frutas.

La concepción teórica de los modos de vibración en las estructuras biológicas es un concepto difícil de alcanzar, debido a que estas no cuentan con una especie de uniformidad en su distribución; por eso se ha recurrido al uso de métodos numéricos, como el análisis por elementos finitos, con el fin de lograr establecer si una frecuencia de excitación está cercana a una frecuencia natural, para que el sistema fruto pedúnculo, hablando directamente del café, responda con una vibración similar o superior. Un ejemplo de esta afirmación se presenta en [Ciro \(2001\)](#), quien determinó, a través de métodos analíticos para el café Catuaí Vermelho, que los valores de la primera frecuencia natural oscilan entre 24.22 Hz y 28.88 Hz, para las etapas entre rojo a verde, ver [Figura 2.21](#).

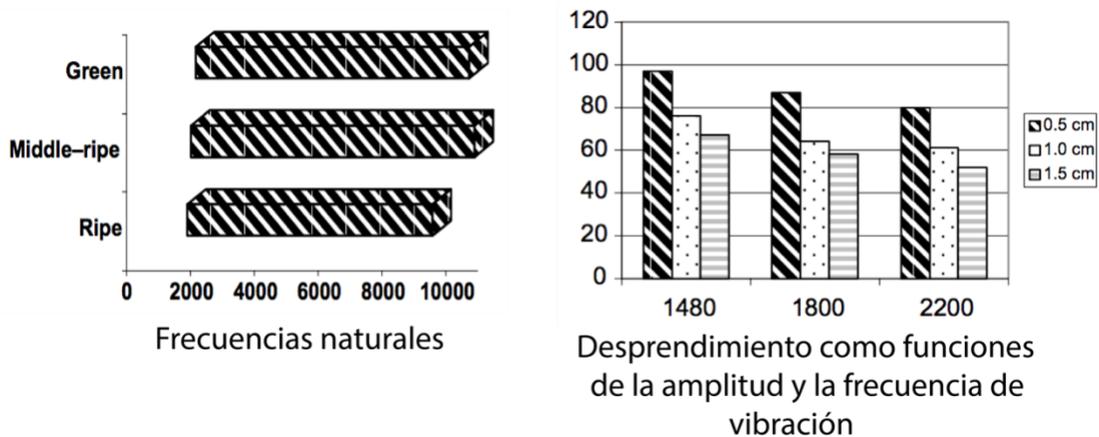


Figura 2.21. Resultados de las frecuencias naturales de vibración para el café Catuaí Vermelho. Tomado y adaptado de [Ciro \(2001\)](#)

Utilizando las mismas formas analíticas, [Espinosa et al. \(2007\)](#) encuentra que, para el pedúnculo, las frecuencias naturales en la cereza verde oscilan entre 19.5 Hz y 22.4 Hz, y para el estado maduro hay una variación de 15.9 a 18.6 Hz; e igualmente [Santos \(2008\)](#), asocia al café Catuaí Vermelho los primeros modos de vibración para la etapa verde y roja. Otra referencia que hace énfasis en la determinación de las frecuencias naturales, pero para la variedad Colombia es la dada por [Tinoco et al. \(2014\)](#), donde hace una serie de diseños geométricos en CAD, para luego realizar un análisis modal en ANSYS a cuatro estados de maduración, como se puede ver en la **Figura 2.22**, resaltando las frecuencias naturales para el estado de madurez, que se encuentran entre 16.33 Hz y 32.43 Hz; estas, según el autor, generan deflexiones concentradas en la interface pedicelo–pedúnculo.

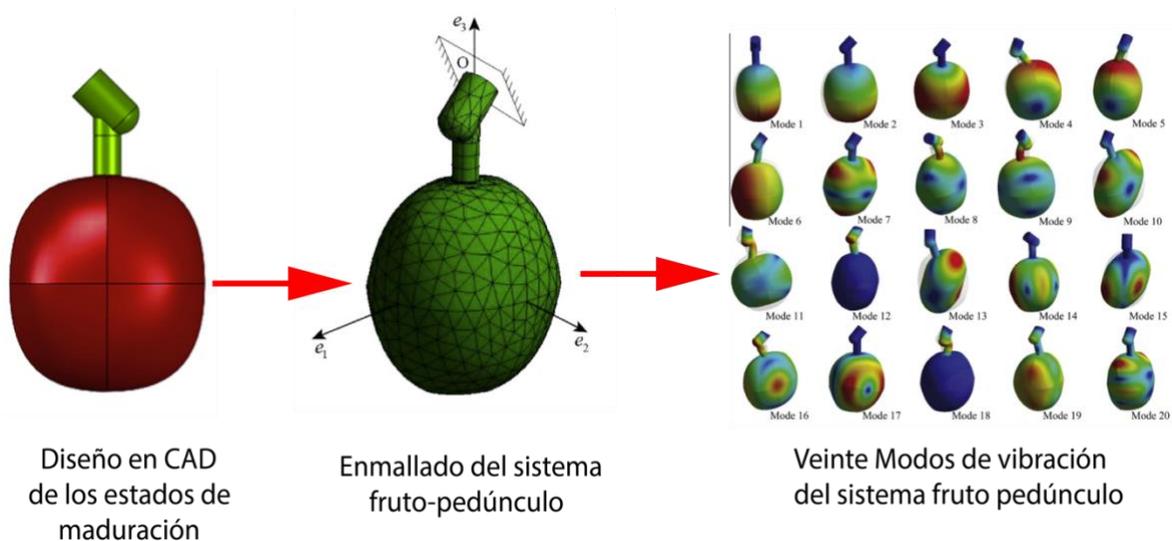


Figura 2.22. Diseño geométrico del sistema fruto pedúnculo y análisis modal. Tomado y adaptado de [Tinoco et al. \(2014\)](#)

Actualmente, existen otros estudios que utilizan la misma dirección para determinar los modos de vibración, pero se encuentran dirigidos a otras secciones estructurales y variedades de plantas, como la dada por [Silveira et al. \(2020\)](#), que evalúa el comportamiento dinámico del árbol completo de café, utilizando un modelo desarrollado en CAD; las frecuencias naturales encontradas en condiciones de laboratorio indican que su rango de vibración se encuentra de 10 a 30 Hz; también [Souza et al. \(2018\)](#), evalúa la interacción entre una varilla

recolectora y una rama plagiotrópica de café, usando modelos computacionales, donde la simulación de desplazamiento es 23.2% más baja que los experimentos reales y la de aceleración es 3.14% más alta que los experimentos; sin embargo las simulaciones se acercan a los valores dados en literatura para el desprendimiento del fruto de café.

Conviene subrayar, que las investigaciones dadas para determinar las propiedades dinámicas, no son exclusivas del café, estos se pueden encontrar para diferentes frutos, como el estudio de [Tang et al. \(2011\)](#), el cual describe las características de vibración del árbol de Wolf Berry, mediante el uso de la técnica de análisis de elementos finitos (FEA); el análisis modal y el análisis de respuesta armónica muestran una variación de resonancia entre 4.3787 Hz hasta 15.613 Hz, con lo cual se genera una base para el desarrollo de cosechadoras mecanizadas. Otra referencia es dada por [Wang et al. \(2013\)](#), que muestra el análisis de los modos de vibración y la evaluación de la firmeza de la pera Korla, utilizando la técnica de análisis de elementos finitos; para realizarlo, se recreó un modelo en 3D, que luego se supone como un material elástico lineal e isotrópico enmallado para su estudio en ANSYS Workbench 14, ver **Figura 2.23**. Los resultados de las frecuencias de resonancia difieren de la forma de la pera, sin embargo, los valores numéricos proporcionan una base teórica para determinar la calidad interna del fruto.

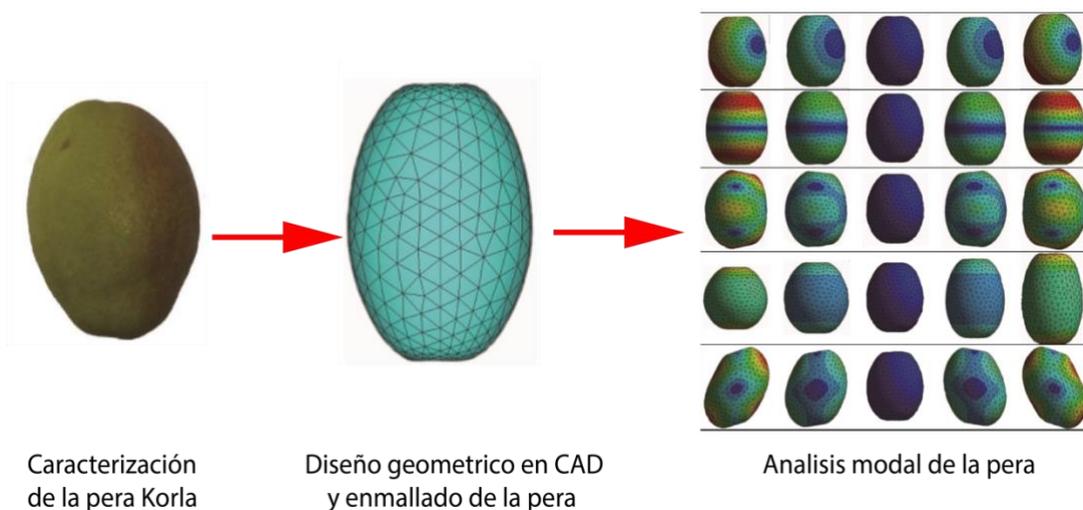


Figura 2.23. Diseño geométrico y análisis modal de la pera Korla. Tomado y adaptado de [Wang et al. \(2013\)](#)

Del mismo modo, los autores [Rosa et al. \(2005\)](#), muestran el modelado de la respuesta transitoria de las ramas del árbol de melocotón, con el objetivo de analizar la respuesta dinámica de las ramas al proceso de raleo que se realiza para reducir la cantidad de frutos y mejorar la calidad de la misma; para realizar este estudio se instalaron acelerómetros en varias partes de las ramas con el fin de verificar experimentalmente un modelo que representa el comportamiento dinámico, esta misma verificación se hizo utilizando las técnicas de elementos finitos. Finalmente, [Jancsó et al. \(2001\)](#) realiza un análisis estocástico FE de peras con fines de medición de calidad.

Una condición que resalta de la planta de café, es su capacidad de disipar energía externa de tipo vibratoria, dicha situación se caracteriza por el amortiguamiento en el sistema fruto-pedúnculo, que no es más que la fuerza presentada por una resistencia de magnitud igual y sentido contrario, esto se da a causa de los mecanismos naturales en la interacción que existe entre la planta-raíz y el suelo, así como en la fricción entre sus ramas.

Por ello existen estudios como el de [Aristizábal & Duque. \(2008\)](#) que determina el coeficiente de amortiguamiento del café en el árbol para las variedades Caturra rojo, Colombia rojo y Colombia amarillo; estos hallaron una disminución del 50% en la amortiguación, cuando se retiraron hojas de la planta. Donde la forma para determinarlo es utilizando el coeficiente de amortiguación con la siguiente ecuación.

$$C = 2 \cdot \zeta \sqrt{M \cdot K} \quad (2.6)$$

Donde ζ , es la relación de amortiguación, que se determinó mediante el método de disminución logarítmica ([Ciro et al., 1998](#)). (M) es la masa del fruto y (K) es la constante elástica. La forma de realizar el experimento que permite hallar los correspondientes cálculos de amortiguación, es generando una oscilación libre sobre el tronco de un árbol, seleccionado

al azar; donde para medirlo se utiliza un LVDT (con un rango de 0 a 20 mm), instalado a una altura de 70 cm, y con el que se mide su desplazamiento, ver **Figura 2.24**.

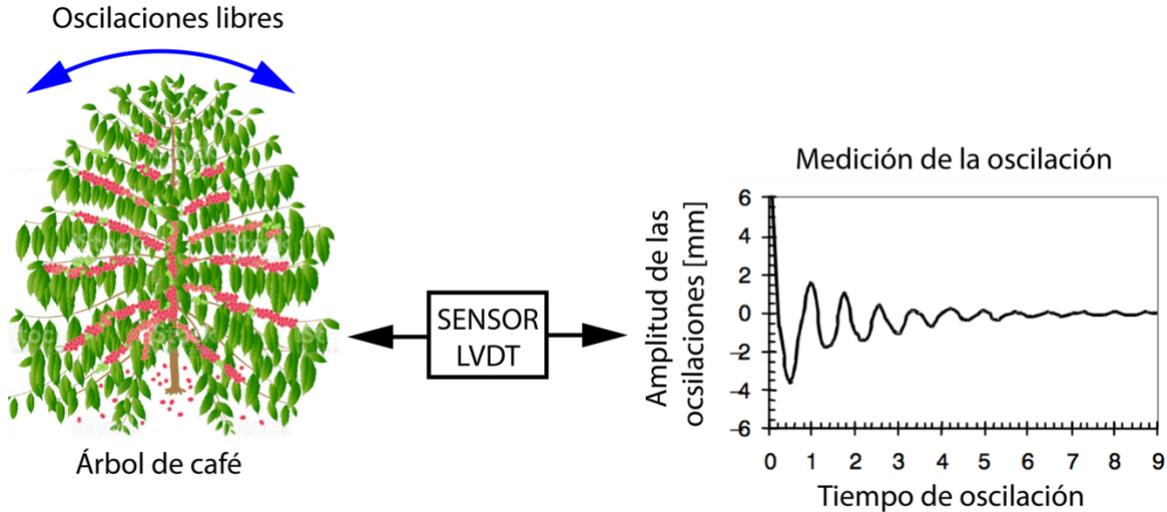


Figura 2.24. Medición experimental para determinar la amortiguación del árbol de café. Tomado y adaptado de [Aristizábal & Duque et al. \(2008\)](#)

Con los datos registrados de la amplitud se eligen dos valores máximos (Y_1 , Y_2) y la disminución logarítmica (d) se calculó a través de las siguientes ecuaciones.

$$d = \ln\left(\frac{Y_1}{Y_2}\right) \quad (2.7)$$

$$z = \frac{d}{\sqrt{4\rho + d^2}} \quad (2.8)$$

Así mismo, [De Queiroz et al. \(2010\)](#) encontró las características de amortiguamiento en las ramas plagiotrópicas, encontrando que el valor para la variedad Catuaí Vermelho es de 0.031 y para la Mundo Novo es de 0.024.

2.3.2 Características del desprendimiento dinámico del sistema fruto–pedúnculo en frutos

Actualmente los dispositivos usados en cosecha semi-mecanizados de asistencia a la recolección del café, generan una vibración en el tallo de la planta y sus ramas que se transmite hasta llegar al sistema fruto-pedúnculo del café, haciendo que este se desprenda de su estructura base, en especial cuando la frecuencia de excitación es cercana a la frecuencia natural del sistema; cuando se alcanza ese punto, la transmisibilidad de la energía es alta (Meirovitch & Parker, 2001), el problema se presenta con el amortiguamiento natural de la estructura del árbol el cual hace reducir la disipación de la energía. Por ello existen estudios que identifican las posibles condiciones que se presentan entre las ramas y el sistema fruto-pedúnculo (Castro et al., 2011).

Ahora bien, no solo las condiciones de amortiguamiento afectan el desprendimiento de los frutos, también existen otras características como la masa, ya que las cerezas con mayor masa tienen una alta probabilidad de recibir una amplificación de la vibración a través de sus tallos, como sucede con el estudio realizado por Castro et al. (2011), el cual evalúa la respuesta en frecuencia de las ramas y los frutos maduros e inmaduros del Pinus Pinea L. Otra condición que afecta la liberación de la estructura, es su posición con respecto al punto de vibración, como se muestra en el estudio presentado por Savary et al. (2011), donde se analiza la distribución de aceleraciones en las plantas de cítricos; con los datos adquiridos, los autores logran resumir que la fuerza necesaria para desprender los frutos no depende solo de las variedades, sino también de su posición en el árbol. Un caso similar sucede con la referencia de (Pezzi & Caprara, 2009), donde se estudia la transmisión de las vibraciones, durante la cosecha mecánica de las uvas, llegando a una conclusión análoga a los autores anteriores.

2.3.3 Métodos para determinar las propiedades dinámicas en frutas

Existen diferentes maneras para encontrar todas las propiedades dinámicas, pero muchas de ellas se centran en la detección de características utilizando sensores, como es el caso de las

vibraciones, donde para hallarlas se utilizan elementos o dispositivos que convierten el desplazamiento y las aceleraciones en señales eléctricas, ópticas o mecánicas (Meirovitch & Parker, 2001). Uno de los sensores o transductores más implementados para detectar vibraciones, determinar propiedades modales y encontrar la transmisibilidad de las vibraciones, es el piezoeléctrico, ya que sus condiciones de alta rigidez mecánica hacen que detecte el efecto de una fuerza generada por cualquier masa cuando un sistema es sometido a aceleraciones (Ripper, 2005).

Otro tipo de sensor utilizado es el acelerómetro, el cual en la actualidad viene comercialmente acondicionado para su fácil implementación; sus aplicaciones se centran en la determinación de propiedades modales, como se muestra en Aristizábal & Duque. (2008) y en Amirante et al. (2007), que son empleados para medir la aceleración en olivos durante su cosecha, para analizar la transmisibilidad de la vibración. El problema con este tipo de elementos es que pueden aumentar la masa de un fruto y su ubicación es compleja, en especial en superficies curvas (Helfrick et al., 2011; Neugebauer et al., 2011).

Para evitar este tipo de inconvenientes, algunos autores implementan la medición sin contacto con dispositivos como vibrómetros láser doppler, los cuales actúan como interferómetros, que mide la velocidad y la aceleración de un objeto vibrante, detectando la luz deflecionada que rebota del elemento medido (Neugebauer et al., 2011). Las aplicaciones de este método, van más allá de la detección de vibraciones en frutos o pedúnculos, un ejemplo es el de (Siringoringo & Fujino, 2009), que implementan el vibrómetro para desarrollar métodos que detecten daños en estructuras.

2.4 Métodos Tenacidad a la fractura

El concepto de “tenacidad a la fractura”, se relaciona con un método usado comúnmente para describir numéricamente la resistencia de un material ante la presencia de una fisura o grieta, su naturaleza varía según sean sus propiedades mecánicas y se ve influenciada por la geometría del material, el esfuerzo aplicado, y la velocidad de deformación; las nociones

teóricas indican que existen dos tipos de fractura, la primera, la frágil, que se caracteriza por una propagación rápida de una fisura y la segunda, la dúctil, por una propagación lenta. Las aplicaciones más comunes se encuentran en el mejoramiento de productos y procesos de fabricación e inspección, sin embargo, sus resultados también pueden servir de base en la caracterización de un material (Broek, 1982).

Un hecho esencial de los materiales es que sus propiedades mecánicas son función de su estructura atómica, entender eso ha permitido que se puedan desarrollar elementos con mucha resistencia a diferentes escalas (Withers, 2015), sin embargo, en diversos casos es más importante la tenacidad o resistencia a la fractura; de hecho existe una norma general, que indica que a mayor resistencia, menor será su tenacidad (Zhu & Joyce, 2012), y esto es importante ya que existen diseños donde una posibilidad de fractura catastrófica no es una opción, como en las alas de un avión, contenedores nucleares, implantes médicos, entre otros.

Ahora bien, de todos los posibles materiales existentes, los biológicos son los más avanzados, ya que crean estructuras compuestas que están organizadas a niveles nano, micro y meso, con lo que logran una alta resistencia y tenacidad (Tan & Cheetham, 2011). Se puede decir que la mayoría de estos, obtienen su resistencia a la fractura a través de una serie de mecanismos de endurecimiento extrínsecos, desarrollando gran parte de su endurecimiento durante el crecimiento de una grieta y no al inicio como sucede con otros materiales (Launey & Ritchie, 2009).

Un ejemplo de esto son los huesos, los cuales, estructuralmente están compuestos de nanopartículas de minerales duros y colágeno, que es un polímero fibroso; los mecanismos que le permiten resistir una fractura al hueso son variados y dependen de la escala como se presente, que pueden ser en el orden de las decenas de nanómetros hasta los varios cientos de micrómetros (Phelps et al., 2000), es tanto así, que la intensidad de la tensión necesaria para fracturar completamente un hueso humano es cinco veces mayor en la dirección transversal que en la longitudinal. Otra ilustración es la madera, que tiene una rigidez específicamente alta, una resistencia comparable con el acero, y una tenacidad a la fractura

altamente anisotrópica, además esta última es diez veces mayor que cualquier compuesto fibroso (Matsumoto & Nairn, 2012). Finalmente cabe resaltar que el café no tiene estudios de tenacidad a la fractura en ninguna de sus subestructuras, sin embargo, los métodos que se citan a continuación sirven de base para iniciar una investigación.

2.4.1 Métodos para determinar la tenacidad a la fractura

Actualmente se han desarrollado diferentes métodos para medir la tenacidad a la fractura, donde sus resultados se dan en términos de ciertos parámetros, encontrando que los más importantes son el factor de intensidad a la tensión K , la tasa de liberación de energía elástica G , la integral J , el desplazamiento de apertura a la fisura (CTOD), y el ángulo de apertura a la fisura (CTOA) (Zhu & Joyce, 2012). Ahora bien, para encontrar la resistencia a la fractura de cualquier material se debe generar una pre fisura en una probeta para crear una grieta conocida con la que se determina la intensidad de la tensión o la energía requerida, es decir, la tenacidad a la fractura, sin embargo se debe tener en cuenta la tensión o deformación máxima para causar una fractura, la presencia ubicua de condiciones similares a la grieta generada y su tamaño, por supuesto refiriéndose en términos generales.

Sin embargo, para hallar cada uno de los parámetros previamente mencionados, el experimentador, se puede ceñir a una serie de normas, todas dadas por la ASTM, como las que se mencionan a continuación:

- ASTM E399, para la prueba K_{Ic} de tenacidad a la fractura por deformación plana, este método de prueba caracteriza la resistencia de un material a la fractura en un ambiente neutro en presencia de una grieta aguda (ASTM E399-20, 2020).
- ASTM E561, para la prueba de curva $K-R$, que caracteriza la resistencia a la fractura de los materiales durante la extensión lenta y estable de una grieta a medida que se extiende por una pre-grieta, también sirve para estimar el grado de extensión estable de la grieta y las condiciones para causar su propagación (ASTM E561-20, 2020).

- ASTM E813, para la prueba J_Ic de tenacidad a la fractura por deformación plana cerca del inicio del crecimiento lento y estable de la fisura (ASTM E813-89E01, 1989).
- ASTM E1152, para la prueba $J-R$ de prueba de curva (ASTM E1152-95, 1995).
- ASTM E1737, para las pruebas de curva J_Ic y $J-R$ (ASTM E1737-96, 1996).

Otras referencias son: E1290 para la prueba de CC, E2472 para la prueba CTOA, el estándar de prueba combinado E1820 para la prueba de tres parámetros de fractura (K, J, d) y la E1921 para definir la referencia dúctil de la transición a la temperatura quebradiza (Zhu & Joyce, 2012). El desarrollo de estos estándares de prueba ha sido un esfuerzo concertado de muchos científicos en el área de desarrollo de materiales, durante medio siglo, y aún hoy se sigue en la búsqueda de un continuo mejoramiento que proporcione procedimientos consistentes y económicos.

Teniendo en cuenta estos conceptos, se han logrado desarrollar diversos estudios donde se aplican los métodos descritos, como el presentado por Tinoco et al. (2020a), en donde se realiza un análisis de elementos finitos en una película fina de oro autoportante, agrietada y sometida a abombamiento, con el fin de determinar las propiedades elasto plásticas y de tenacidad a la fractura. Para realizar las pruebas experimentales, primero se introduce una pre-fisura en el centro de la placa, utilizando un fresado con un haz de iones enfocado, que tiene una longitud de 10 μm y un ancho de 100 nm; se debe tener en cuenta que se introducen tres tipos de pre fisuras, con muesca redondeada, muesca afilada y muesca en forma de “v”, como se observa en la **Figura 2.25**.

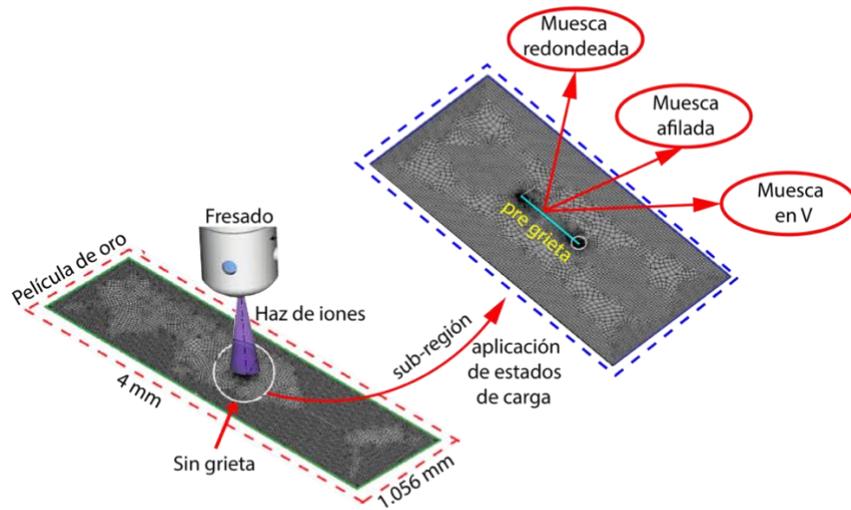


Figura 2.25. Proceso experimental para determinar la tenacidad a la fractura en una película de oro. Tomado y adaptado de Tinoco et al. (2020a)

En la misma referencia de Tinoco et al. (2020a), para calcular la tenacidad a la fractura en la película de oro, se utiliza la siguiente expresión

$$J_e = \frac{K_I^2}{E}. \quad (2.9)$$

Donde E es el módulo de Young y K_I es el factor de intensidad de estrés que se puede calcular para una muesca afilada como

$$K_I(x) = S_y(x,0)\sqrt{2\rho x} \quad (2.10)$$

Donde x es la posición del campo de tensión y la expresión $S_y(x,0)$ se determina de la siguiente manera

$$S_y(x, q) = \frac{K_I}{\sqrt{2\rho x}} \cos\left(\frac{q}{2}\right) \left(1 - \sin\left(\frac{q}{2}\right) \sin\left(\frac{3q}{2}\right)\right) \quad (2.11)$$

Teniendo que q y x , son la dirección y la posición del campo de tensión. Ahora para condiciones de deformación plana, la integral J se calcula de la siguiente forma

$$J = \frac{K_I^2 (1 - \nu^2)}{E}. \quad (2.12)$$

Otro estudio donde se aplican los conceptos teóricos de la tenacidad a la fractura se presenta en (Narisawa & Takemori, 1989), donde se realiza la caracterización de dicha propiedad sobre cuatro polímeros (dos mezclas de poli (butilén-tereftalato) / policarbonato (PBT / PC), un terpolímero de acrilonitrilo butadieno-estireno (ABS) y un nailon semicristalino endurecido), utilizando el concepto de la integral J . Para el realizar el proceso experimental, primero se moldearon mediante la técnica de inyección, placas gruesas rectangulares a las que se le generan grietas con un espesor inicial de 12.7 mm a diferentes profundidades utilizando un cortador de moscas afilado de un solo diente; para determinar la integral, que es útil al momento de encontrar la resistencia a la fractura se realizan una serie de ensayos de carga sobre cada una de las muestras (utilizando una máquina servohidráulica Instron modelo 1350). Después de la descarga, cada muestra se corta en mitades simétricas a lo largo de su eje longitudinal para medir y observar con microscopía óptica de transmisión la fractura generada, como se observa en la Figura 2.26.

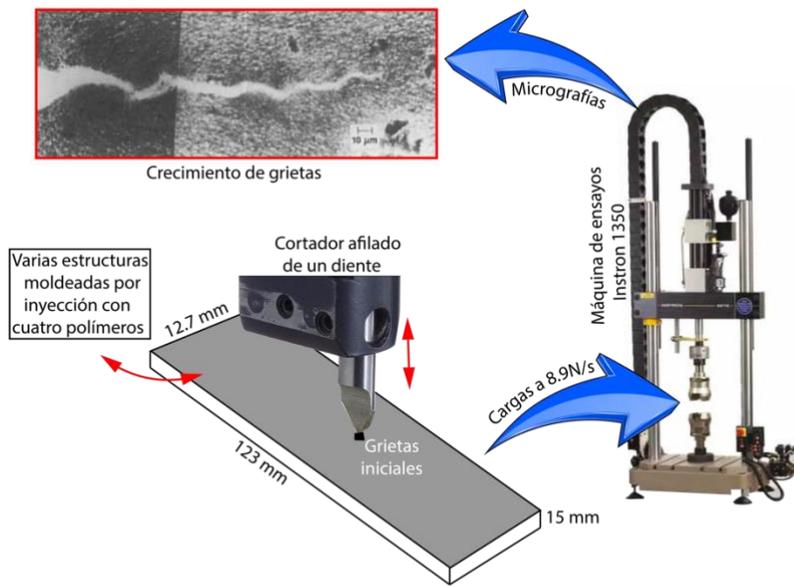


Figura 2.26. Prueba experimental para determinar la tenacidad a la fractura en polímeros. Adaptado de [Narisawa & Takemori \(1989\)](#)

Ahora [Gludovatz et al. \(2017\)](#), realiza un estudio sobre el fruto de *C. Nucifera* o cáscara interna del coco, en el que examinan la estructura a múltiples escalas a través de pruebas de caracterización y pruebas in situ de las propiedades mecánicas. Para evaluar estas propiedades y la anisotropía del material, los autores realizaron pruebas de resistencia y tenacidad a la fractura en secciones rectangulares de la cáscara, las cuales fueron cortadas con una sierra de baja velocidad, siguiendo una dirección longitudinal y latitudinal. Las muestras designadas para las pruebas de tenacidad se cortaron con un ancho de 4 mm, un grosor de 2 mm, y una longitud de 20 mm; luego se realizó una muesca en el centro de cada una de las muestras a 0.4 mm de profundidad y se hizo una micro-muesca con una cuchilla a un radio de 10 μm . Posteriormente las muestras se ubicaron en una platina de Gatan MicroTest ubicada en la máquina de ensayos universales Instron 5944, configurada para la flexión de tres puntos con un espacio de carga de 16 mm; luego se observa la fractura a través de un microscopio electrónico de barrido de presión variable Hitachi S-4300SE / N. Como se muestra en la **Figura 2.27**.

A partir de los datos encontrados se determina la tenacidad a la fractura, sin embargo, primero se calcula de intensidad a la tensión K_{el} , de la siguiente manera

$$K_{el} = \frac{PS}{BW^{3/2}} f\left(\frac{a}{W}\right). \quad (2.13)$$

donde P es la carga aplicada, S es el tramo de carga principal (en tres puntos) y $f\left(\frac{a}{W}\right)$ es una función dependiente de la geometría de la relación entre el largo y el ancho de la fisura proporcionada en la norma ASTM E1820.

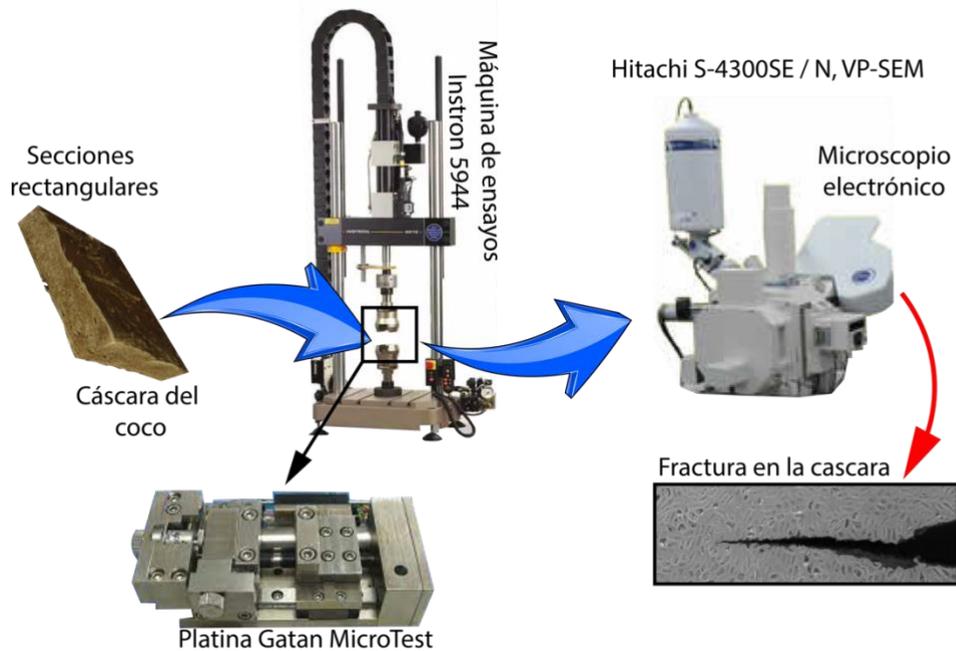


Figura 2.27. Prueba experimental para determinar la tenacidad a la fractura de un coco. Tomado y adaptado de: [Gludovatz et al. \(2017\)](#)

Ahora bien, la J integral que es la que determina la resistencia a la fractura se determina de la siguiente manera

$$J_{pl} = \frac{hA_{pl}}{Bb}. \quad (2.13)$$

Donde $h = 1.9$, A_{pl} es el área plástica debajo de la curva de carga-desplazamiento, y b es el ancho del ligamento no agrietado. Finalmente, KJ se vuelve a calcular a partir del total de J ($= J_{el} + J_{pl}$) utilizando nuevamente la relación estándar de equivalencia $J-K$ (modo I), asumiendo condiciones de plano-deformación. Luego, este valor se puede graficar contra la extensión de la grieta medida para producir una curva $J-R$ ("resistencia"), que muestra la tenacidad total y cómo cambia durante el curso de la falla.

CAPÍTULO 3- DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES CROMÁTICAS DEL CAFÉ ARABICA var. CASTILLO

3.1 Introducción

Dentro de las etapas de producción del café, la selección de los frutos, hasta el momento, es realizada por recolectores que eligen cualitativamente solo los especímenes que tengan una determinada tonalidad roja, lo cual es un indicativo de madurez. El color es una de las variables físicas dentro de un cultivo que sirven para definir el momento de una cosecha; en consecuencia, su caracterización cuantitativa permite obtener información físico-mecánica del sistema fruto-pedúnculo. Por ello, se desarrolló una metodología para la identificación de los estados de madurez en la variedad Castillo; y aunque el concepto es de tipo investigativo, los resultados de sus análisis pueden ser utilizados para mejorar o crear nuevos desarrollos tecnológicos dirigidos a los productores, con el fin de generar herramientas adicionales de competitividad.

Es de señalar que las técnicas para realizar identificaciones de patrones cromáticos no son nuevas. De hecho, surgieron en 1931 en la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) como una respuesta a la necesidad de estandarizar la comprensión del mundo desde el punto de vista de la percepción humana (Fairman, Brill, & Hemmendinger, 1997). Su aplicación para el sector caficultor se da dentro de los diversos puntos de la cadena productiva, como en el control de calidad del café verde (de Oliveira et al., 2016), también para el café tostado (Spence & Carvalho, 2020) y para el café molido (Bertone et al., 2016). Así mismo, se pueden encontrar estudios como el de (Ramos et al., 2010), donde su objetivo es la identificación de las propiedades cromáticas en el café Var. Colombia en diferentes semanas de desarrollo del fruto para su ingreso a un beneficiadero, aplicando un método que se basa en la representación del color Hue, Saturation, Value (HSV), con el que se diferencian puntos de corte para limitar las áreas de cuatro estados de maduración.

La aplicación de técnicas cromáticas como sistema de asistencia a la recolección ha sido documentada en investigaciones enfocadas en variedades distintas a la Castillo. Por ejemplo, Carvajal et al. (2011) identificó las propiedades cromáticas del café Var. Colombia en diferentes estados de maduración del fruto mientras se encontraba en el árbol o en pre-cosecha. La técnica utilizada se basó en la identificación del color mediante las coordenadas cromáticas proporcionadas por los datos generados en CIELab a través de un espectrofotómetro de esfera. Sin embargo, es importante señalar que aunque se diferenciaron nueve estados de desarrollo para la cereza del café, cada uno de ellos se representó como un único valor en coordenadas rectangulares $L^*a^*b^*$ y en coordenadas cilíndricas $L^*C^*h^*$. Esto limita la identificación práctica al no proporcionar un rango de valores para cada estado, lo que dificulta su aplicabilidad en la práctica.

En línea con esta investigación, Herrera et al. (2012) estableció la correlación entre las coordenadas cromáticas y las propiedades físicas y mecánicas del fruto del café Var. Colombia. generando tres modelos de regresión: el primero relaciona las coordenadas cromáticas a^* y b^* con las propiedades físicas; el segundo, la reflectancia con las propiedades mecánicas; y el tercero, el diámetro con las propiedades físicas y mecánicas. El objetivo principal de estos modelos es satisfacer las demandas de los consumidores de café y mejorar la calidad en la cosecha.

Un concepto similar fue presentado por Yuwana et al. (2015), quienes relacionaron los colores del grano de café robusta cultivado en Indonesia con sus propiedades físicas, como longitud, ancho, espesor, peso, porosidad, densidad, coeficiente de fricción estática y ángulo de reposo. Sin embargo, a diferencia de las referencias anteriores, en este estudio el color de los frutos no se separó cuantitativamente, sino de manera cualitativa utilizando criterios definidos por el estándar nacional de Indonesia (SIN 2907-2008). El objetivo final fue determinar los problemas de calidad que afectan a los consumidores.

Así mismo, en el estudio de Sandoval, Prieto & Betancur (2010), se llevó a cabo la caracterización de los frutos de café utilizando técnicas de visión artificial aplicadas a la

variedad Colombia. Además, se han realizado investigaciones para describir el índice de madurez de manera no destructiva para el cronograma de cosecha, como se menciona en los trabajos de Durmus (2020) e Isaza et al. (2007).

En Herrera et al. (2012), se desarrollaron dos algoritmos que emplean un sistema de procesamiento de imágenes. Uno de ellos se enfoca en la identificación y clasificación por color de los cafés buenos y malos, mientras que el otro se centra en la detección de la broca en la variedad Colombia. La metodología propuesta implica adquirir imágenes en un entorno controlado en términos de iluminación, fondo y distancia entre el café y la cámara. Luego, se aplica una segmentación por binarización utilizando el método de Otsu. A partir de los datos obtenidos en la segmentación, se extraen las características de color utilizando los modelos HSI y Lab*. Por último, se emplea una red neuronal de base radial como clasificador.

En Costa et al. (2020), se obtuvieron las características colorimétricas del Café Robusta, Var. Conilon en diferentes estados de madurez utilizando imágenes digitales. La metodología implementada es similar a la utilizada en la referencia anterior. Sin embargo, en este estudio se establece una relación con los parámetros físico-químicos del grano, como los sólidos solubles totales (TTS) y la acidez titulable (TTA), con el objetivo de realizar una clasificación mediante el algoritmo K-means.

Para el caso de otro tipo de alimentos y frutas, los métodos de caracterización y clasificación por cromaticidad permiten optimizar los procesos agrícolas e industriales, ya que, en la mayoría de los casos, la calidad depende del color. Para realizar las mediciones y sus correspondientes representaciones, es común utilizar dispositivos que entregan los datos bajo el estándar CIELab, ya que con esto se puede representar el color a lo largo de tres ejes donde L* representa una escala de blanco a negro, a* una escala de verde a rojo y b* una escala de azul a amarillo. Estos tres ejes describen una esfera de color que puede producir índices que determinan la madurez de una fruta. Uno de estos dispositivos es el colorímetro y se utiliza en los procesos de recolección y selección de frutos como una alternativa para evitar los

métodos destructivos ya que definen tiempos óptimos de cosecha e incluso predicen la vida útil de los productos.

Algunos ejemplos de la aplicación de este estándar se encuentran en (López & Gómez, 2004), donde se determinó la madurez del tomate cuantificando el color en las ramas; (Gomes et al., 2013) calculan un indicador de los momentos de madurez del banano a partir de mediciones de color; (Lafuente et al., 2016) discriminan los grados de madurez del cultivo de cereza dulce "Cashmere", utilizando las mediciones de CIElab; (Zheng & Lu, 2012) estudiaron la detección de pardeamiento en frutos de mango con medidas de color. Las referencias anteriormente descritas generan un panorama de los diferentes métodos que utilizan los investigadores para definir las propiedades cromáticas en diferentes tipos de frutos. Pretenden mostrar cómo este camino recorrido ha llevado a definir una metodología de clasificación para el café arábica L. Var. Castillo, como se puede observar en este capítulo, a través de mapas de colores segmentados por momentos de madurez. Para ello, y como se plantea en el siguiente apartado, se estudiaron los diagramas de cromaticidad CIElab y RGB con el fin de establecer una relación entre las medidas de color obtenidas por un colorímetro y una cámara digital.

3.2 Materiales y métodos

3.2.1 Espacio cromático CIElab

Existen varios modelos matemáticos que buscan realizar una reproducción precisa de la sensación del color, entre ellos se encuentran las representaciones: CIE 1931, CIE XYZ, CIELUV, CIElab, *RGB*, *sRGB*, *Adobe_RGB*, ProPhoto, CMYK, YIQ, YUV, HSV, HSL (Kang, 2006). Cabe resaltar que los espacios de color RGB CIE 1931 (Broadbent, 2004) y CIE 1931 (Wright, 1982), los cuales sirven de base para otros modelos, son el resultado de una serie de experimentos realizados por William Wright y John Guild en 1920 (Ramanath & Drew, 2009). En sus estudios se utilizaron valores triestímulos para realizar una representación del color (Plataniotis & Venetsanopoulos, 2013). Originalmente estos datos

se describieron en términos de integración sobre la longitud de onda de la luz y fueron representados de la siguiente manera.

$$X = k \int E(\lambda) P(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda, \quad (3.1)$$

$$Y = k \int E(\lambda) P(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, \quad (3.2)$$

$$Z = k \int E(\lambda) P(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda, \quad (3.3)$$

donde $E(\lambda)$ es la distribución de potencia espectral relativa de un iluminante; $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ son las funciones de coincidencia de color utilizado en los estándares CIE 1931 y 1964; $P(\lambda)$ es la reflectancia espectral en la superficie de un objeto y k es un factor de normalización determinado como:

$$k = \frac{100}{\int_{\lambda} E(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}. \quad (3.4)$$

Las ecuaciones (3.1), (3.2) y (3.3) se diseñaron para realizar los cálculos en el rango visible del espectro electromagnético. Por lo tanto, en 1986 la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) aproximó el cálculo de los valores triestímulos basados en la integración numérica utilizando incrementos de longitud de onda $\Delta\lambda$ de 1 nm en el intervalo $\lambda \in (360, 830)$ nm. Así, las integrales continuas fueron resueltas por las siguientes aproximaciones.

$$X = k \sum_{\lambda=360}^{\lambda=830} E(\lambda) \bar{x}(\lambda) P(\lambda). \quad (3.5)$$

$$Y = k \sum_{\lambda=360}^{\lambda=830} E(\lambda) \bar{y}(\lambda) P(\lambda). \quad (3.6)$$

$$Z = k \sum_{\lambda=360}^{\lambda=830} E(\lambda) \bar{z}(\lambda) P(\lambda). \quad (3.7)$$

Lo anterior no implica que las funciones expresadas en (3.1), (3.2) y (3.3) carezcan de aplicación. Por el contrario, su uso establece una correlación con la coincidencia de color en un espacio visual que abarca aproximadamente de 1° a 4° de observación, según la retina del espectador. Para ángulos mayores, se implementan las ecuaciones (3.5), (3.6) y (3.7). Además, la American Society of Testing Materials (ASTM) ha generado las tablas 5 y 6, las cuales se encuentran en la norma E308-01 (ASTM, 2006), para facilitar el cálculo de los tres valores triestímulos X, Y, Z. Estas tablas proporcionan datos en un rango de longitud de onda de 360 nm a 780 nm, con intervalos $\Delta\lambda$ de 10 nm y 20 nm (Li et al., 2006). Los datos de estas tablas se utilizan en las ecuaciones (3.5), (3.6) y (3.7), y se expresan de forma simplificada como.

$$X = \int_{\lambda=360}^{\lambda=830} W_x(\lambda) P(\lambda), \quad (3.8)$$

$$Y = \int_{\lambda=360}^{\lambda=830} W_y(\lambda) P(\lambda), \quad (3.9)$$

$$Z = \int_{\lambda=360}^{\lambda=830} W_z(\lambda) P(\lambda), \quad (3.10)$$

donde $W_x(\lambda) = kE(\lambda)\bar{x}(\lambda)$, $W_y(\lambda) = kE(\lambda)\bar{y}(\lambda)$ y $W_z(\lambda) = kE(\lambda)\bar{z}(\lambda)$. Los valores X, Y, Z, mencionados anteriormente sirven de base para el cálculo de los modelos derivados del CIE 1931, como el CIElab, el cual se implementa desde 1976 en diversas prácticas científicas e industriales (McLaren, 1976); su expresión matemática, que se observa en las ecuaciones (3.11), (3.12) y (3.13) es modelado y normalizado en base a la teoría de color oponente (Best et al., 1987),

donde se establece que dos colores no pueden ser rojo y verde o amarillo y azul al mismo tiempo (Shaw & Fairchild, 2002).

$$L^* = 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16 \quad (3.11)$$

$$a^* = 500 \left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right] \quad (3.12)$$

$$b^* = 200 \left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right] \quad (3.13)$$

Los resultados de las ecuaciones anteriores se puede representar en un mapa cromático tridimensional, como se observa en la **Figura 3.1a**, donde L^* es el eje de luminosidad que va del negro hasta el blanco, en escalas de grises, a^* es un eje que representa la variación del verde al rojo y b^* es un eje donde se interpreta el cambio de azul a amarillo (Robertson, 1977). Para representar un color en el mapa, se utilizan las coordenadas rectangulares o cartesianas.

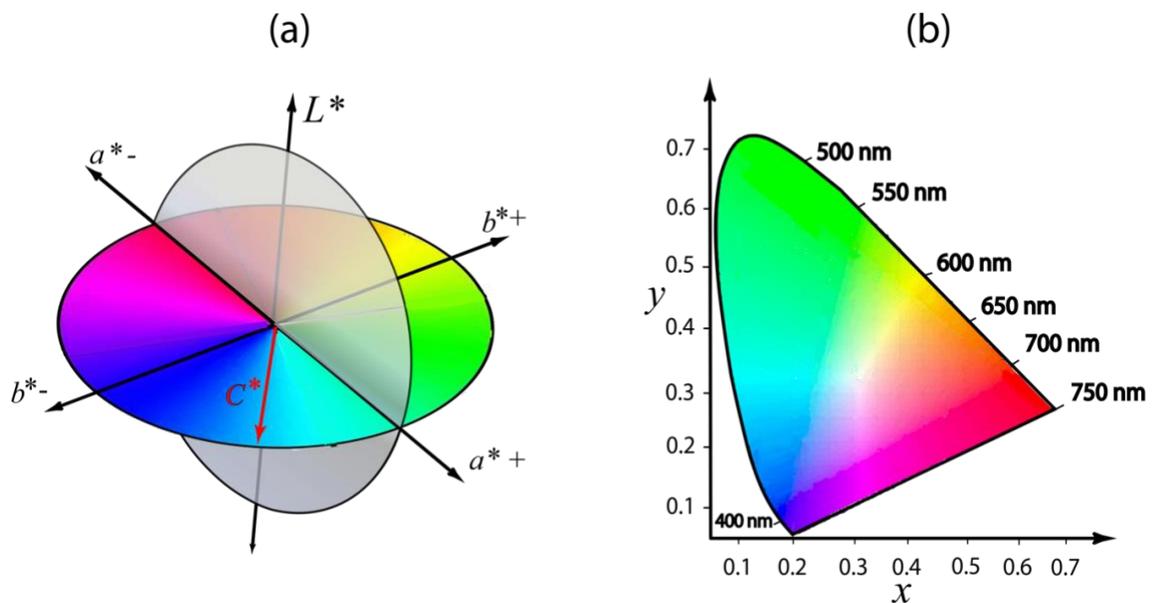


Figura 3.1. (a) Diagrama cromático CIElab. (b) Diagrama cromático CIExy

Las ecuaciones (3.11), (3.12) y (3.13), también se pueden utilizar para determinar los valores X , Y , Z , con la información dada por L^* , a^* y b^* ; dichas expresiones se observan en las ecuaciones (3.14), (3.15) y (3.16) (Pascale, 2006), donde las variables X_n , Y_n , Z_n , se calculan con la referencia en blanco de los iluminantes C, D50 y D65, como se muestran en la **Tabla 3.1**. Es de aclarar que estos datos también se utilizan para las ecuaciones (3.11), (3.12) y (3.13).

$$X = X_n \left[\left(\frac{(L^*+16)}{116} \right) + \left(\frac{a^*}{500} \right) \right]^3 \quad (3.14)$$

$$Y = Y_n \left(\frac{(L^*+16)}{116} \right)^3 \quad (3.15)$$

$$Z = Z_n \left[\left(\frac{(L^*+16)}{116} \right) - \left(\frac{b^*}{200} \right) \right]^3 \quad (3.16)$$

Tabla 3.1. Coordenadas XYZ de los iluminantes C, D50 y D65.

Iluminante	X_n	Y_n	Z_n
C	98.074	100	118.232
D50	96.422	100	82.521
D65	95.047	100	108.883

A pesar de que las coordenadas rectangulares son muy útiles para ubicar un color dentro del espacio cromático, las coordenadas polares permiten determinar otros conceptos, como el atributo de la saturación o croma C_{ab}^* , donde el color se describe en términos de “débil” o “fuerte”. Se dice que su medición es la distancia del eje L^* al plano a^* , b^* (Munsell, 1981),

como se observa en la **Figura 3.1a**, y que su representación matemática se muestra en la ecuación (3.17)

$$C_{ab}^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (3.17)$$

De igual manera se puede establecer el tono del color utilizando su ángulo de tono (h_{ab}^*), donde el atributo responde al sistema de orden de color Munsell ([Billmeyer, 1987](#)), y su representación se observa en la siguiente ecuación.

$$h_{ab}^* = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \left(\frac{180}{\pi} \right) \quad (3.18)$$

Además, en el espacio CIElab es posible calcular las diferencias entre dos estímulos o colores utilizando la distancia euclidiana (ΔE_{ab}^*), como se muestra en la ecuación (3.19). Esta medida se emplea para determinar el error relativo de un color en dos puntos cartesianos distintos. El concepto es ampliamente utilizado en la industria para el control de calidad de productos ([Best et al., 1987](#)).

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (3.19)$$

Una anotación importante es que los modelos mencionados en este apartado se encuentran en constante revisión ya que la interpretación del color es una de las características más complejas de representar como lo destaca [Shaw & Fairchild \(2002\)](#).

3.2.2 Diagrama de cromaticidad CIExy

El diagrama CIExy, se utiliza para representar la percepción del color pero solo con dos parámetros o dos dimensiones, el CIE x e y ; su caracterización se realiza con una cuantificación de luminancia Y , y dos coordenadas de color x , y , los cuales ubican un punto

espacial, de un color, sobre el diagrama de cromaticidad (Ohno, 2000), como se observa en la **Figura 3.1b**, donde normalmente los colores espectrales y sus tonos están distribuidos alrededor del borde del espacio de color. Este diagrama cromatográfico posee algunas propiedades, como:

- Poseer todas las cromaticidades visibles por el ojo humano, formando, con la parte coloreada, una herradura o lengua.
- El borde recto en la parte baja se conoce como la línea púrpura.
- Los colores menos saturados aparecen al interior del gráfico con el blanco hacia el centro.
- Todas las cromaticidades visibles corresponden a valores positivos.
- Todos los colores que se pueden formar con la mezcla de los tres primarios, se encuentran dentro del diagrama cromatográfico.
- Los valores que se presentan al borde del área coloreada, representan las longitudes de onda de los colores que se encuentran dentro del área visible.

La forma para ubicar espacialmente un color, dentro del espacio cromatográfico, se presenta en (3.20) y (3.21), donde cada ecuación requiere la información de los valores triestímulo XYZ , en otras palabras, la cromaticidad de luminancia se basa en el espacio de color CIE XYZ (Kerr, 2010).

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (3.20)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (3.21)$$

3.2.3 Espacio cromático RGB

Otro de los espacios de color de uso común, es el RGB , el cual se utiliza en dispositivos electrónicos que emiten radiación lumínica (Kang, 2006), como pantallas de computador o

celular; sin embargo, no existe un único espacio *RGB* que haya logrado una aceptación universal (Plataniotis & Venetsanopoulos, 2013). El modelo se basa en el concepto de síntesis aditiva, con el que es posible representar cualquier color, los estímulos lumínicos primarios con los que se construyen se dividen en tres: rojo (*R*), verde (*G*) y azul (*B*) (Noor et al., 2012), todos ellos dentro del rango del espectro visible de la luz, como se presenta en (3.22), (3.23) y (3.24), donde $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$, son los valores de observación de cada primario.

$$\bar{r}(\lambda) = 700nm \quad (3.22)$$

$$\bar{g}(\lambda) = 546.1nm \quad (3.23)$$

$$\bar{b}(\lambda) = 435.8nm \quad (3.24)$$

Si los valores dados en (3.22), (3.23) y (3.24), se operan matemáticamente con la distribución de potencia espectral $E(\lambda)$, se pueden obtener los valores triestímulo de cada color primario, según sea su intensidad, como se observa en (3.25), (3.26) y (3.27).

$$R = \int_0^{\infty} E(\lambda)\bar{r}(\lambda)d\lambda \quad (3.25)$$

$$G = \int_0^{\infty} E(\lambda)\bar{g}(\lambda)d\lambda \quad (3.26)$$

$$B = \int_0^{\infty} E(\lambda)\bar{b}(\lambda)d\lambda \quad (3.27)$$

La especificación de un color en este espacio, implica una combinación lineal de los tres colores primarios dados en (3.25), (3.26) y (3.27); por lo tanto, la manera en que se observan los colores varía de un dispositivo a otro, haciendo que el espacio *RGB* tenga una alta dependencia de la tecnología.

Este modelo tiene la capacidad de representar cualquier color dentro de un cubo tridimensional como el que se observa en la **Figura 3.2a**; el gráfico se utiliza en aplicaciones de visualización en donde los datos son de naturaleza aditiva; por ejemplo, se observan tres colores representados en datos de 8 bits con el formato (*RGB*), el primero es el color azul con valores de (0,0,1), el segundo es el color rojo con valores (1,0,0) y el tercero es el color verde con valores (0,1,0), estos nombres son asignados según sea el valor ([Walsh, 2004](#)).

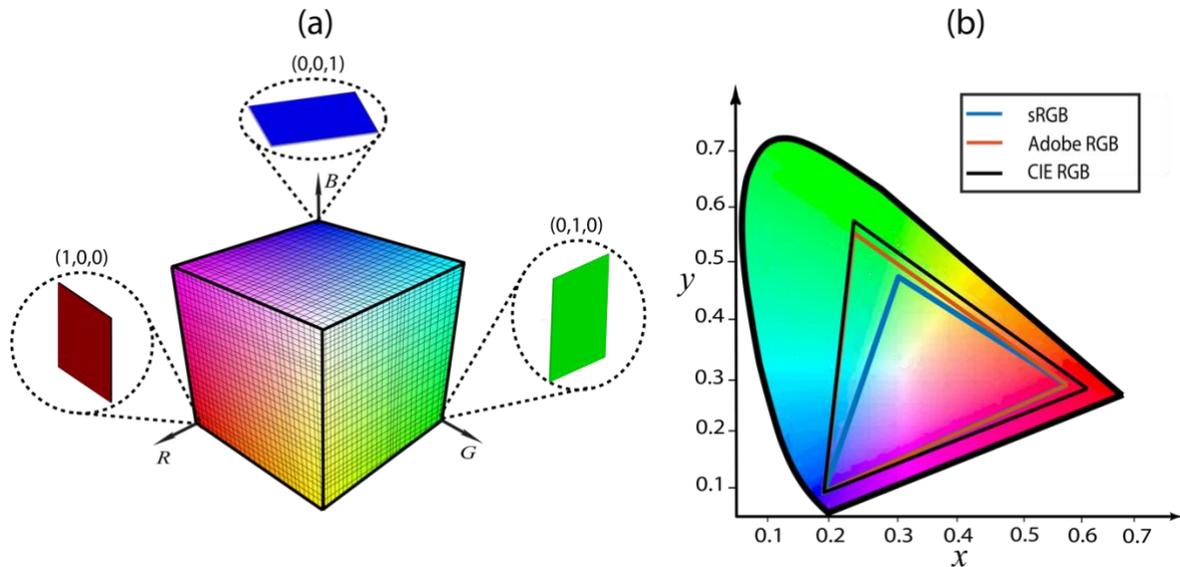


Figura 3.2. (a) *Representación tridimensional de RGB.* (b) *Representación de los espacios Adobe RGB, CIE RGB y sRGB en diagramas de cromaticidad^{xy}*

Otro rasgo importante del color *RGB* es su clasificación, el cual se parte en dos tipos, lineal y no lineal; el primero no es adecuado para realizar análisis numéricos y rara vez se utiliza para la representación de imágenes, sin embargo, se implementa en aplicaciones de gráficos por computador; mientras que el espacio no lineal se emplea para el procesamiento de imágenes. Su representación se plasma en el rango de valores de 0 a 255 ([Plataniotis & Venetsanopoulos, 2013](#)), sin embargo, es común encontrar una normalización de los datos, como el que se observa en las ecuaciones (3.28), (3.29) y (3.30).

$$R = \frac{\int_0^{\infty} E(\lambda)\bar{r}(\lambda)d\lambda}{255} \quad (3.28)$$

$$G = \frac{\int_0^{\infty} E(\lambda)\bar{g}(\lambda)d\lambda}{255} \quad (3.29)$$

$$B = \frac{\int_0^{\infty} E(\lambda)\bar{b}(\lambda)d\lambda}{255} \quad (3.30)$$

Debido a que el modelo no tiene una forma para especificar cualquier posible tonalidad de un color, fue necesario la creación de otros espacios derivados que permitieran el manejo de una tonalidad exacta sobre los tres colores primarios; por ello existen espacios como el *CIE_RGB*, el *sRGB* o el *Adobe_RGB* (Ryu et al., 2014). Su comparación, según la longitud de onda manejada por cada espacio, se puede observar en la **Figura 3.2b**, el cual muestra tres diagramas de cromaticidad CIE_{xy}, obtenidos del espectro visible del color y del modelo general *RGB*; las coordenadas de cada uno de los espacios se especifican en la **Tabla 3.2**.

Tabla 3. 2. Coordenadas de cromaticidad para diferentes espacios de color

Espacio de color	A		B		C	
	R		G		B	
	x	y	x	y	x	y
<i>sRGB</i>	0.640	0.330	0.300	0.600	0.150	0.060
<i>Adobe_RGB</i>	0.640	0.330	0.210	0.710	0.150	0.060
<i>CIE_RGB</i>	0.680	0.320	0.210	0.740	0.150	0.060

La derivación *sRGB*, que se observa gráficamente dentro de la **Figura 3.2b**, es un espacio no lineal, propuesto por las empresas Hewlett-Packard y Microsoft en 1996, para el uso en sus sistemas operativos; siendo este, el más utilizado por sus diversos programas, un ejemplo de ello es Matlab®. sin embargo, existen problemas al utilizarlo en aplicaciones diferentes,

como la impresión de imágenes, ya que la gama de colores es limitada, en especial en el rango del azul al verde, generando resultados indeseados.

3.2.4 Transformaciones RGB

En el caso de las conversiones de *RGB* a *XYZ* se utiliza como base de conversión la ecuación (3.31), donde **T**, **c** y **M** son matrices que se interpretan de la siguiente manera:

- **T** es una matriz, $\mathbf{T} = [X, Y, Z]^t$, donde cada elemento representa una de las variables de los valores triestímulos que se observan en las ecuaciones (3.8), (3.9) y (3.10). Es normal que para utilizar el espacio *sRGB*, el iluminante seleccionado sea el D65, el cual es una estimación de la luz solar de mediodía.
- **c** es una matriz, $\mathbf{c} = [R, G, B]^t$, al cual se le asignan los valores que se requieren convertir.
- **M** es una matriz que se puede observar en la ecuación (3.32), denominada matriz de espacio de trabajo *RGB*, la cual tiene diferentes valores como se observa en la **Tabla 3.3**; en ella se presentan las matrices de espacio de trabajo *RGB* (**M**) más relevantes, con una iluminación D65; sin embargo, se pueden consultar otras referencias en ([Pascale, 2006](#)).

Existen algunos casos donde se hace necesario realizar la conversión contraria, de *XYZ* a *RGB*, para ello se realiza un despeje de la ecuación (3.31), quedando como se observa en la ecuación (3.33).

$$\mathbf{T} = \mathbf{M}\mathbf{c} \tag{3.31}$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} X_R & X_G & X_B \\ Y_R & Y_G & Y_B \\ Z_R & Z_G & Z_B \end{bmatrix} \tag{3.32}$$

$$\mathbf{c} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{T} \quad (3.33)$$

Tabla 3. 3. Matrices de espacio de trabajo RGB

Espacio de trabajo RGB	Referencia en blanco	M			M ⁻¹		
		RGB a XYZ			XYZ a RGB		
Adobe RGB (1998)	D65	0.5767309	0.1855540	0.1881852	2.0413690	-0.5649464	-0.3446944
		0.2973769	0.6273491	0.0752741	-0.9692660	1.8760108	0.0415560
		0.0270343	0.0706872	0.9911085	0.0134474	-0.1183897	1.0154096
Apple RGB	D65	0.4497288	0.3162486	0.1844926	2.9515373	-1.2894116	-0.4738445
		0.2446525	0.6720283	0.0833192	-1.0851093	1.9908566	0.0372026
		0.0251848	0.1411824	0.9224628	0.0854934	-0.2694964	1.0912975
CIE RGB	D65	0.4887180	0.3106803	0.2006017	2.3706743	-0.9000405	-0.4706338
		0.1762044	0.8129847	0.0108109	-0.5138850	1.4253036	0.0885814
		0.0000000	0.0102048	0.9897952	0.0052982	-0.0146949	1.0093968
sRGB	D65	0.4124564	0.3575761	0.1804375	3.2404542	-1.5371385	-0.4985314
		0.2126729	0.7151522	0.0721750	-0.9692660	1.8760108	0.0415560
		0.0193339	0.1191920	0.9503041	0.0556434	-0.2040259	1.0572252

Por consiguiente, si se desea realizar una conversión de los valores triestímulo XYZ a sRGB con un iluminante D65, se toma la ecuación (3.33) y se resuelve en la ecuación (3.34).

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.2404 & -1.5372 & -0.4985 \\ -0.9693 & 1.8760 & 0.0415 \\ 0.0556 & 0.2040 & 1.0572 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

Así mismo, si lo que se requiere es convertir los valores de sRGB a valores triestímulos XYZ con un iluminante D65, se utiliza la ecuación (3.31) y se resuelve en la ecuación (3.35).

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4125 & 0.3576 & 0.1804 \\ 0.2127 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9503 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Los conceptos teóricos, previamente definidos, son la base fundamental del trabajo realizado en este capítulo, ya que sirven de soporte para ayudar a identificar los estados de madurez en el fruto de café de la variedad Castillo.

3.2.5 Caracterización de las muestras

Para hacer el análisis de las muestras para una identificación de las propiedades cromáticas, dichas muestras se obtuvieron en dos ubicaciones físicas:

- La primera en la finca La Praderita, ubicada en la vereda el Porvenir, del municipio de Belalcázar, departamento de Caldas; situado en las coordenadas 5° 0' 40'' latitud norte y 75° 47' 44'' longitud oeste, como se ve en la **Figura 3.3**.
- La segunda, en la finca El Descanso, ubicada en la vereda Bajo Arenillo en la zona rural del municipio de Manizales, departamento de Caldas; situado en las coordenadas 5° 02' 58.7" latitud norte y 75° 32' 48.4" longitud oeste, como se ve en la **Figura 3.3**.

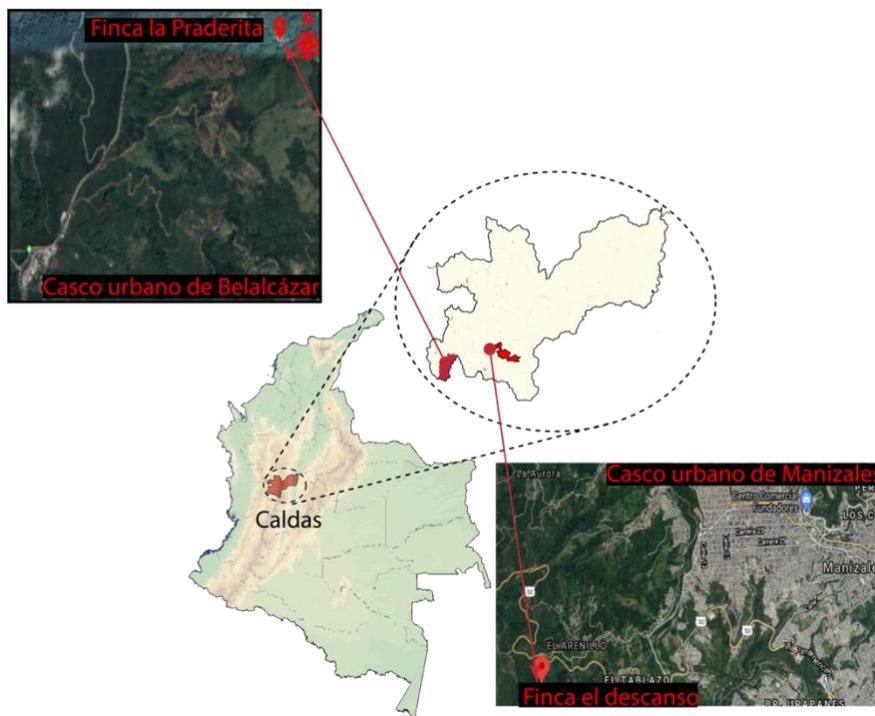


Figura 3.3. Ubicación de la finca la Praderita y la finca el Descanso.

Para la recolección de los frutos, primero, se estableció un protocolo donde se indicaron las condiciones de exclusión de la cereza al momento de recolección; por ejemplo, frutos con daños por afectaciones hídricas (Arcila & Jaramillo, 2003; Jaramillo & Arcila, 2009; Arcila et al., 2007; Gaitán et al., 2016), con infestación por plaga, como la broca (Constantino et al., 2011), sin bifurcaciones en su pedúnculo u otros tipos de características. Por otra parte, para la selección del tamaño de la muestra, la recolección de los datos se realizó a través de un muestreo aleatorio no probabilístico, ya que no se disponía de suficiente información acerca de las características de la población a medirse (Vivanco, 2005; Bencardino, 2012; Mostacedo & Fredericksen, 2000), utilizando un espacio muestral mayor a 200 frutos con el fin de generar una estratificación de la información a través de las propiedades de color.

3.2.6 Medición de las muestras

Una de las técnicas implementadas para medir el color en cada uno de los granos del café utiliza un colorímetro de marca PCE con referencia CSM4, fabricado por PCE instrument en

Alemania, el cual emplea el espacio de color CIElab para mostrar cada uno de los resultados. Debido a que el dispositivo utiliza un sensor reflectivo, la medición de cada grano se debe realizar a la misma distancia entre el pericarpio del café y el sensor del colorímetro; por ello, se diseñó un acople que se ajusta a la boquilla del colorímetro. Para adquirir los datos, se debe ubicar la muestra en el punto central del acople, como se observa en la **Figura 3.4a**, y luego se posiciona la boquilla del colorímetro.

Otra forma implementada para medir el color en los granos del café resulta de usar una cámara fotográfica Nikon Colpix B500, fabricado por Nikon Corporation en Japón. Aunque no es posible extraer directamente datos en el espacio de color RGB a partir de las imágenes, se pueden procesar cada una de las fotografías de las muestras de café. Cada toma se debe realizar en un entorno oscuro para eliminar los ruidos visuales ocasionados por el reflejo de la luz en la superficie del pericarpio, como se muestra en la **Figura 3.4b**.

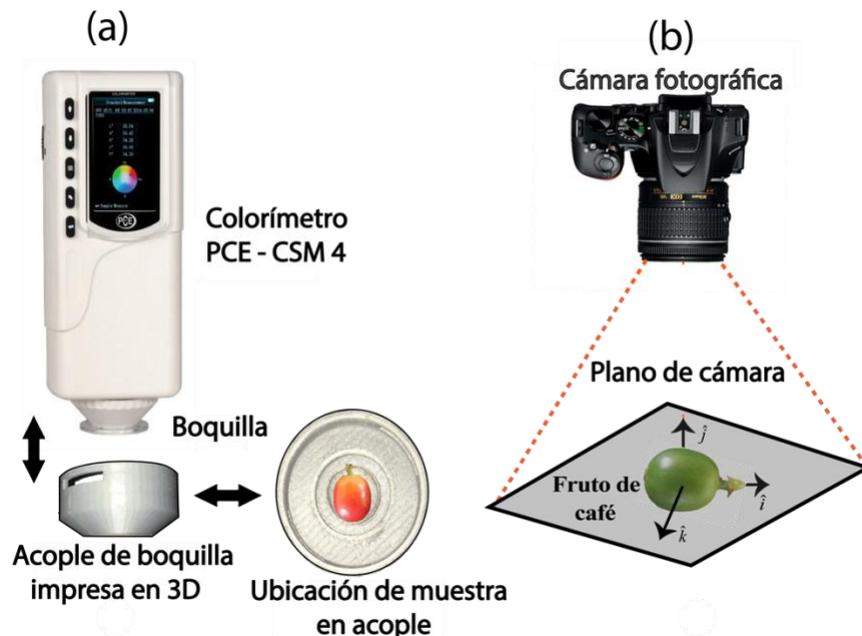
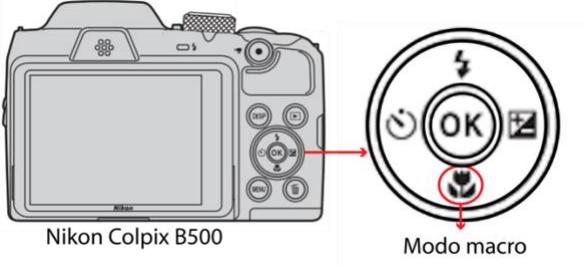
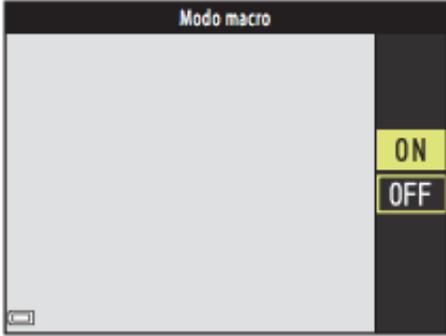
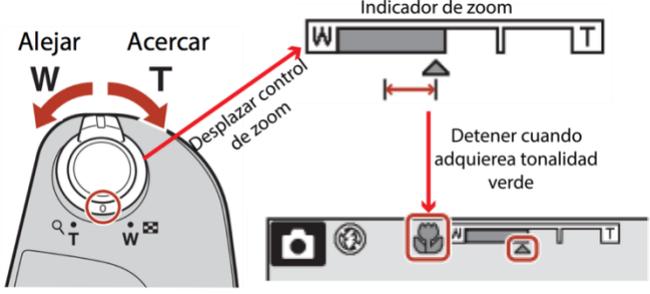


Figura 3.4. (a) Medición experimental de color con colorímetro. (b) Medición experimental de color con cámara fotográfica.

El protocolo de operación de la cámara fotográfica se describe en la **Tabla 3.4**.

Tabla 3.4. Configuración cámara Colpix B500 para caracterización de frutos de café

Pasos	Representación
1. Pulse el modo macro en la parte posterior de la cámara.	 <p>The diagram shows the back of a Nikon Colpix B500 camera. A red arrow points from the camera's control panel to a circular inset showing a close-up of the camera's menu buttons. In this inset, the 'OK' button is at the top, and the macro mode button (a flower icon) is at the bottom, circled in red. The text 'Modo macro' is written below the inset.</p>
2. Presione ON en la pantalla modo macro y pulse el botón OK, si este paso no se realiza la selección del modo macro se cancela.	 <p>The screenshot shows the camera's LCD screen in macro mode. The text 'Modo macro' is at the top. On the right side, there are two yellow buttons labeled 'ON' and 'OFF' stacked vertically.</p>
3. Se desplaza el control del zoom para configurar la relación de acercamiento (normalmente se realiza hasta que el indicador se pone en verde). Con esto la cámara enfoca los frutos de café a 10 cm de distancia.	 <p>The diagram illustrates the zoom control. On the left, a camera lens is shown with a zoom ring. Red arrows indicate 'Alejar' (W) and 'Acercar' (T) directions. A red arrow labeled 'Desplazar control de zoom' points from the lens to a zoom indicator on the right. The indicator is a horizontal bar with 'W' on the left and 'T' on the right. A red arrow points to the indicator with the text 'Detener cuando adquiera tonalidad verde'.</p>

3.2.7 Recolección de los datos

Las mediciones realizadas con el colorímetro generan valores individuales en L^* , a^* y b^* para cada una de las caracterizaciones, los cuales deben ser recopilados como se muestra en la **Tabla 3.5**. Los datos completos se encuentran disponibles en el Anexo A.1.

Tabla 3.5. Datos de Color en $L^*a^*b^*$ de colorímetro

No	Color del fruto			No	Color del fruto			No	Color del fruto			No	Color del fruto		
	L^*	a^*	b^*		L^*	a^*	b^*		L^*	a^*	b^*		L^*	a^*	b^*
1	31.87	8.54	17.02	8	27.78	-7.30	9.72	15	49.99	6.09	27.96	22	40.11	20.06	4.59
2	34.01	-8.71	19.66	9	25.81	26.12	6.56	16	40.68	30.44	13.44	23	53.63	29.17	30.35
3	32.95	-8.33	19.75	10	39.00	-9.93	25.77	17	35.16	14.91	1.67	24	61.24	21.01	39.93
4	35.87	-6.90	20.34	11	29.53	-8.45	11.55	18	37.01	21.65	4.26	25	44.15	33.06	21.22
5	36.35	-7.18	22.06	12	38.28	-8.86	26.37	19	53.14	9.16	33.62	26	35.25	33.23	11.34
6	28.32	-8.78	10.98	13	29.04	-9.38	10.20	20	54.59	8.40	35.05	27	31.35	26.41	7.71
7	36.77	-7.29	23.17	14	39.01	-6.55	27.35	21	56.33	7.13	37.70	28	44.12	36.87	20.69

Ahora bien, la extracción del espacio de color con la cámara fotográfica Nikon Colpix B500 se hace sobre cada una de las fotografías de los frutos, bien sea en formato JPG o PNG, asegurándose de hacer un recorte digital a un tamaño que sea ajustado a la fruta. Después se lee la imagen y se identifica el valor en RGB de cada uno de los píxeles, los valores numéricos resultantes se separan y se almacenan en tres vectores llamados R, G y B. Luego se hace una identificación del número máximo de veces que se repite ese conjunto de valores y se traza un histograma para representar el color predominante en cada uno de los componentes R, G y B, tal como se muestra en la **Figura 3.5**. Los resultados arrojados por este algoritmo se pueden reunir en un archivo plano como se muestra en la **Tabla 3.6**. Cabe resaltar que estos datos son los equivalentes a los mostrados en la **Tabla 3.5**, tan solo se encuentran en dos espacios de color diferentes. El compendio de valores están en el Anexo A.2

Tabla 3.6. Datos de color predominante de las imágenes caracterizadas de los frutos de café.

No	Color del fruto														
	R	G	B		R	G	B		R	G	B		R	G	B
1	78	112	30	8	78	129	11	15	99	128	52	22	233	137	62
2	88	111	47	9	139	141	53	16	75	6	9	23	221	134	75
3	0	36	0	10	75	87	26	17	108	0	12	24	155	72	34
4	88	111	0	11	32	35	15	18	116	27	37	25	165	72	0
5	77	129	11	12	89	81	0	19	138	33	51	26	114	59	0
6	0	129	11	13	0	169	0	20	50	6	8	27	255	167	67
7	0	108	11	14	114	105	0	21	65	45	0	28	129	80	33

El conjunto de todos estos resultados en RGB se pueden convertir a diferentes espacios de color, como el CIELab, con el fin de igualar los espacios de color existentes entre los datos de la cámara fotográfica y los del colorímetro; y aunque se puede utilizar funciones definidas como el *rgb2lab* de Matlab, esto no logra alcanzar una igualación, debido a que existe una diferencia entre la intensidad del color determinado por el colorímetro y por la cámara fotográfica.

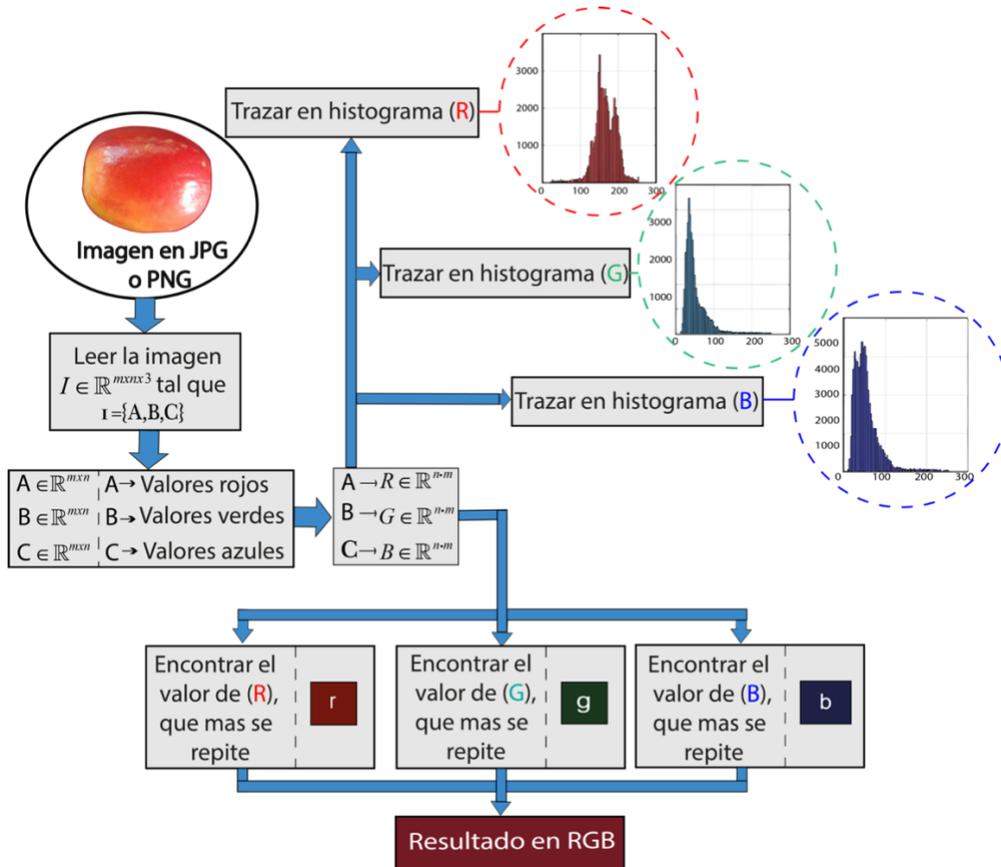


Figura 3.5. Algoritmo para la extracción del color en RGB. Extraído de Rincón et al. (2020)

3.2.8 Homogeneización de los datos

Para aplicar un método de homogeneización entre los valores RGB y el espacio de color CIELab, se deben llevar a cabo varias transformaciones (Arana et al., 2015). En primer lugar, se procede a determinar la transpuesta de la matriz de la siguiente manera.

$$d_{Lab} = [X_{Lab} \quad Y_{Lab} \quad Z_{Lab}]^T. \quad (3.36)$$

Ahora utilizando las ecuaciones (3.14), (3.15) y (3.16) se establece la transpuesta de la siguiente matriz

$$d_{Lab} = [X_{RGB} \quad Y_{RGB} \quad Z_{RGB}]^T. \quad (3.37)$$

Esto se hace implementando la expresión $\mathbf{d}_{RGB} = \mathbf{M}\mathbf{c}_{RGB}$, donde \mathbf{c}_{RGB} corresponde al conjunto de datos arrojados por el algoritmo de extracción en RGB y \mathbf{M} es

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1806 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{bmatrix}. \quad (3.38)$$

El tercer paso es la homogeneización de los espacios de color, lo que significa que existe interdependencia entre ellos, ya que se pueden transformar unos en otros, por lo tanto, la transformación lineal es

$$\mathbf{d}_{Lab} = \mathbf{R}_c \mathbf{d}_{RGB} + \mathbf{b}_c, \quad (3.39)$$

donde $\mathbf{R}_c \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$, siendo definido como el operador rotacional y $\mathbf{b}_c \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ es el operador traslacional. En total son doce los parámetros desconocidos, tres para \mathbf{b}_c y nueve para \mathbf{R}_c . Por lo tanto, fue necesario crear el siguiente sistema lineal de ecuaciones $y = Tx, \forall T \in \mathbb{R}^{(276) \times 12}$ y $x \in \mathbb{R}^{12 \times 1}$. Con esto se determina el vector x teniendo los doce parámetros desconocidos. Después de realizar ese cálculo se obtiene las siguientes matrices

$$\mathbf{R}_c = \begin{bmatrix} 0.3261 & -0.0093 & -0.1346 \\ -0.0248 & 0.3422 & -0.3465 \\ 0.0300 & -0.0824 & 0.17484 \end{bmatrix}. \quad (3.40)$$

$$\mathbf{b}_c = \begin{bmatrix} 80.6222 \\ 85.2147 \\ 63.2354 \end{bmatrix}. \quad (3.41)$$

Estas matrices facilitan la transformación entre los espacios de color utilizados en los frutos del café arábico L. Var. Castillo. Algunos de los resultados de esta transformación lineal se presentan en la **Tabla 3.7**, donde se puede comparar visualmente las intensidades de las caracterizaciones con los equivalentes mostrados en la casilla de color, en relación al resultado de la transformación lineal. Es importante destacar que, para realizar esta comparación, los datos obtenidos por el colorímetro en L^* , a^* y b^* se transformaron a su equivalente en el espacio de color RGB.

Tabla 3.7. Tabla de resultados de la transformación lineal.

Datos cámara Fotográfica				Datos colorímetro				Resultado transformación lineal de los datos de la cámara a datos equivalentes arrojados por el colorímetro			
R	G	B	color	R	G	B	color	R	G	B	color
87	110	34		82	89	42		96	97	34	
215	45	37		168	89	72		235	79	56	
255	130	65		183	101	85		255	103	64	
151	42	53		136	72	78		189	78	62	
196	145	64		136	93	73		183	105	56	
144	132	41		149	140	70		193	167	50	
83	91	33		98	105	56		119	128	43	
255	84	73		172	87	73		242	74	57	
255	83	65		163	84	80		229	83	62	

Desde una perspectiva práctica, esta conversión posibilita adaptar una cámara fotográfica para medir las condiciones cromáticas de manera similar a un colorímetro. Este ajuste se refleja en la **Tabla 3.7**, donde se puede apreciar una disparidad de tonalidad entre los resultados en RGB de la cámara y los del colorímetro. Por ejemplo, al aplicar la transformación lineal a los datos del colorímetro, estos tienden a aproximarse en tonalidad a los resultados de la cámara fotográfica, como se muestra en la casilla 'Resultado Transformación Lineal' de la **Tabla 3.7**. Este proceso también es posible en sentido inverso.

3.2.9 Algoritmos de graficación para resultados de colorímetro y cámara fotográfica

Para graficar los resultados arrojados por el colorímetro y la cámara fotográfica, se desarrollaron dos algoritmos. El primero, ver la **Figura 3.6**, toma los datos almacenados, en la **Tabla 3.5**, y los representa en el espacio CIELab a través de dos gráficas $L^*a^*b^*$ tanto en 2D como en 3D. Y también genera una para el espacio CIExyz a través de una gráfica en 2D y en 3D.

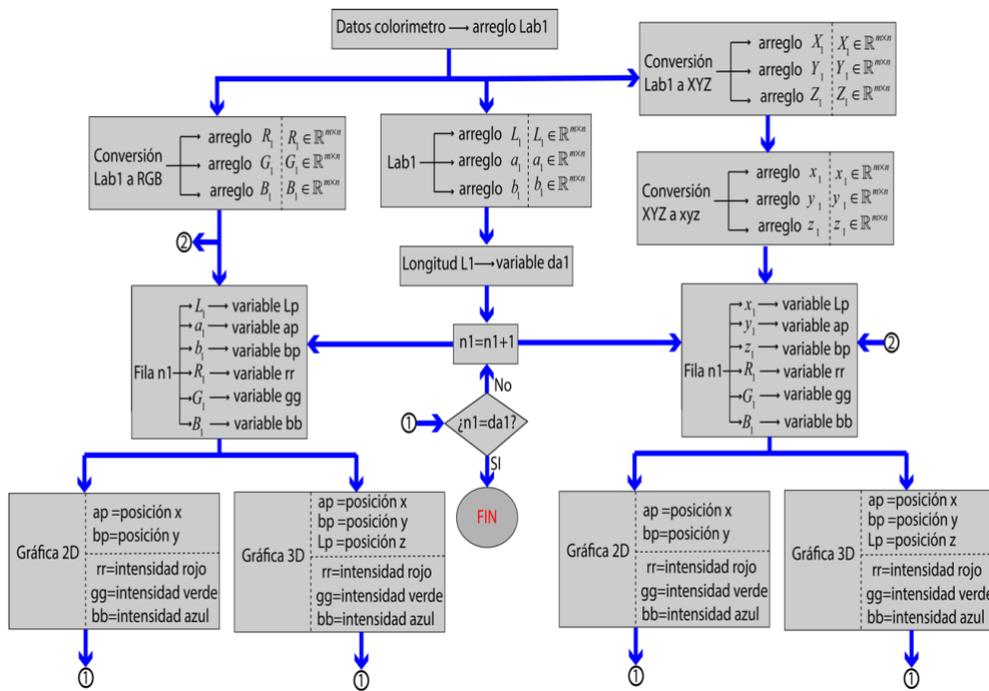


Figura 3.6. Algoritmo para graficación 2D y 3D de datos caracterizados con colorímetro

En cuanto al segundo algoritmo, representado en la **Figura 3.7**, se introduce la información almacenada en un archivo plano que contiene los resultados de la transformación lineal, obtenidos a través de la caracterización mediante una cámara fotográfica. El objetivo de este algoritmo es representar dichos resultados en forma de gráficas en 2D y 3D en los espacios RGB y CIExyz.

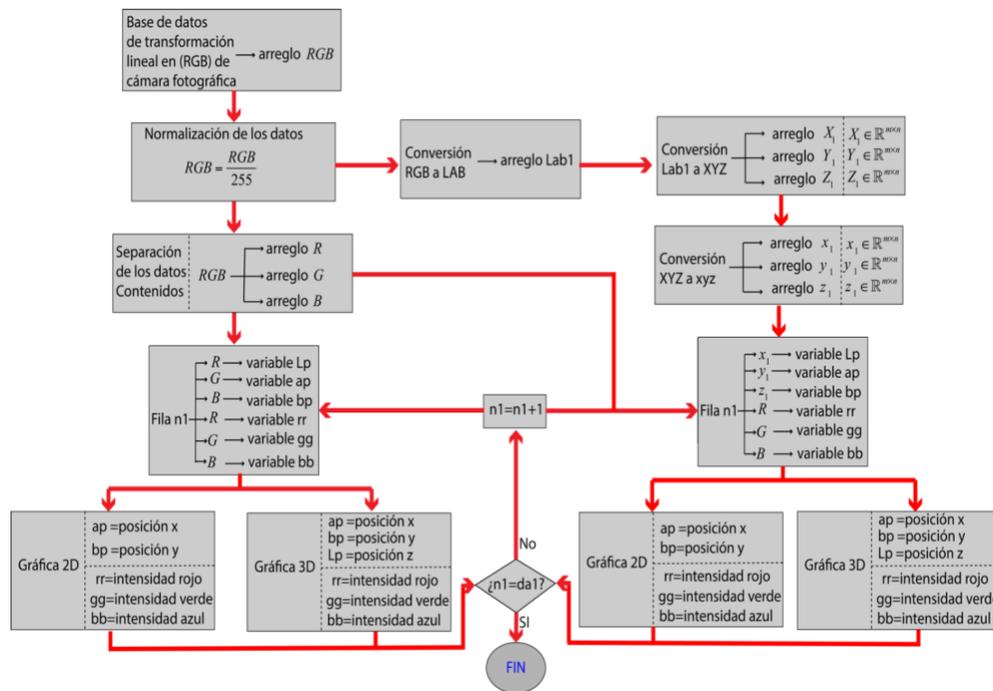


Figura 3.7. Algoritmo para graficación 2D de datos caracterizados con cámara fotográfica.

3.3 Resultados y discusión

3.3.1 Resultados gráficos de las caracterizaciones con colorímetro y con cámara fotográfica

En las **Figuras 3.8a** y **3.8b** se muestran los datos de color medidos por el colorímetro, que son procesados por el algoritmo que se muestra en la **Figura 3.6**. Esta información se representa en el espacio de color CIELab, tanto en 2D como en 3D, y en ambos se visualiza un patrón en forma de herradura, donde se describen la evolución del gradiente de color, de verde (extremo A) a rojo (extremo B), a lo largo de una línea de tiempo que representa la madurez. Es de notar que en ambas gráficas se observan agrupaciones definidas en las regiones verde, vino tinto, rojo y rojo oscuro.

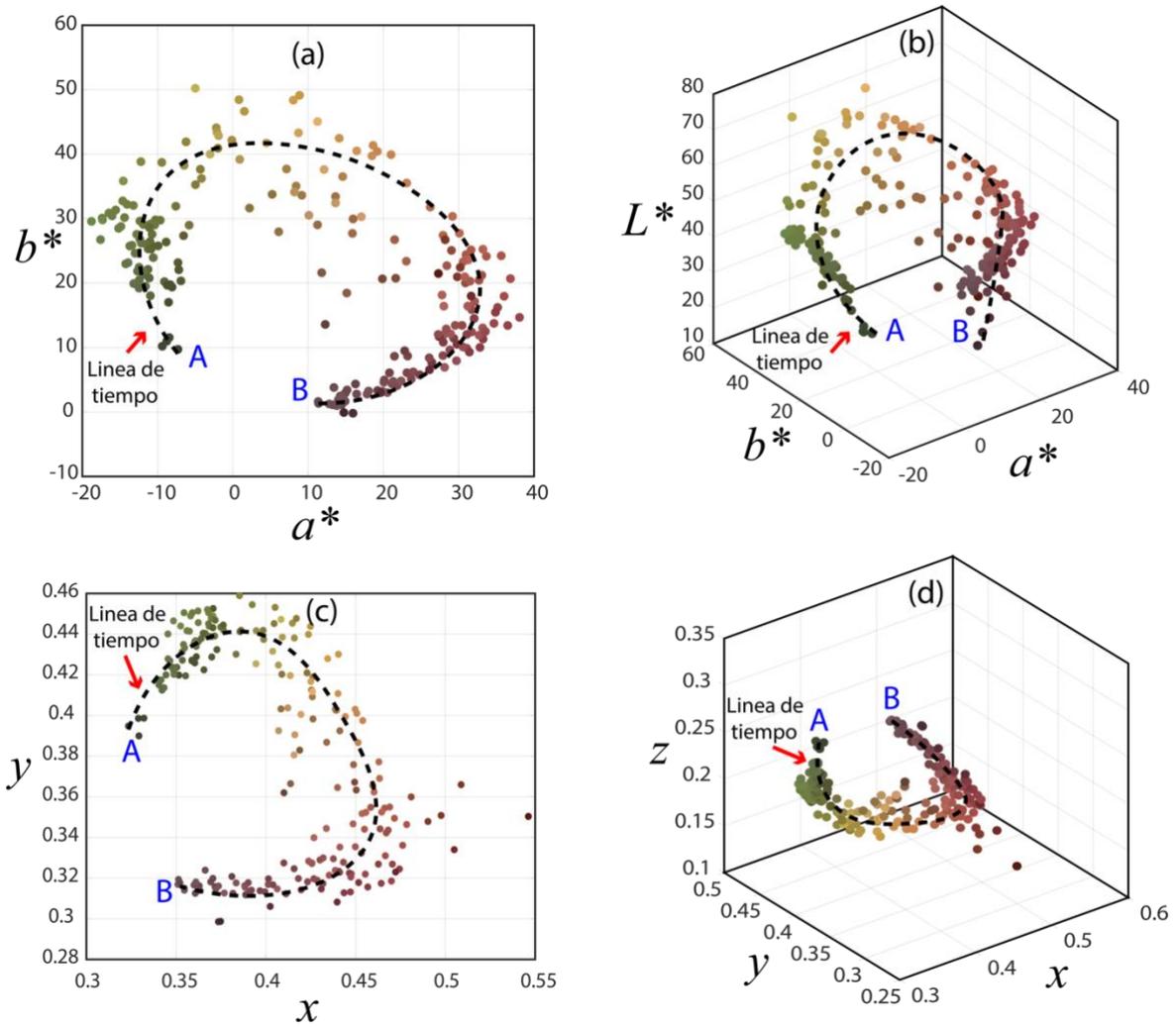


Figura 3.8. (a) Gráfica en 2D resultado en a^*b^* del colorímetro. (b) Gráfica en 3D resultado en $L^*a^*b^*$ de colorímetro. (c) Gráfica 2D resultado en xy del colorímetro. (d) Gráfica 3D resultado en xyz del colorímetro.

De una manera similar sucede con la **Figura 3.8c** y **3.8d**, donde se presentan las mismas características de la **Figura 3.8a** y **3.8b**, solo que con una conversión hacia el espacio CIExy en 2D y CIExyz en 3D.

En las **Figuras 3.9a** y **3.9b** se presentan los datos obtenidos mediante la cámara fotográfica Nikon Coolpix B500, fabricada por Nikon Corporation en Japón, los cuales fueron posteriormente procesados utilizando el algoritmo ilustrado en la **Figura 3.7**. Al igual que en

la caracterización realizada con el colorímetro, se observa un patrón tanto en 2D como en 3D que describe la evolución del gradiente de color, indicando el progreso en el estado de maduración del café desde el extremo A hasta el extremo B. No obstante, es evidente que existen diferencias entre los resultados de las mediciones realizadas con el colorímetro y la cámara fotográfica, especialmente al comparar el avance en el estado de maduración. A pesar de esto, se aprecian clústeres en las variaciones de color.

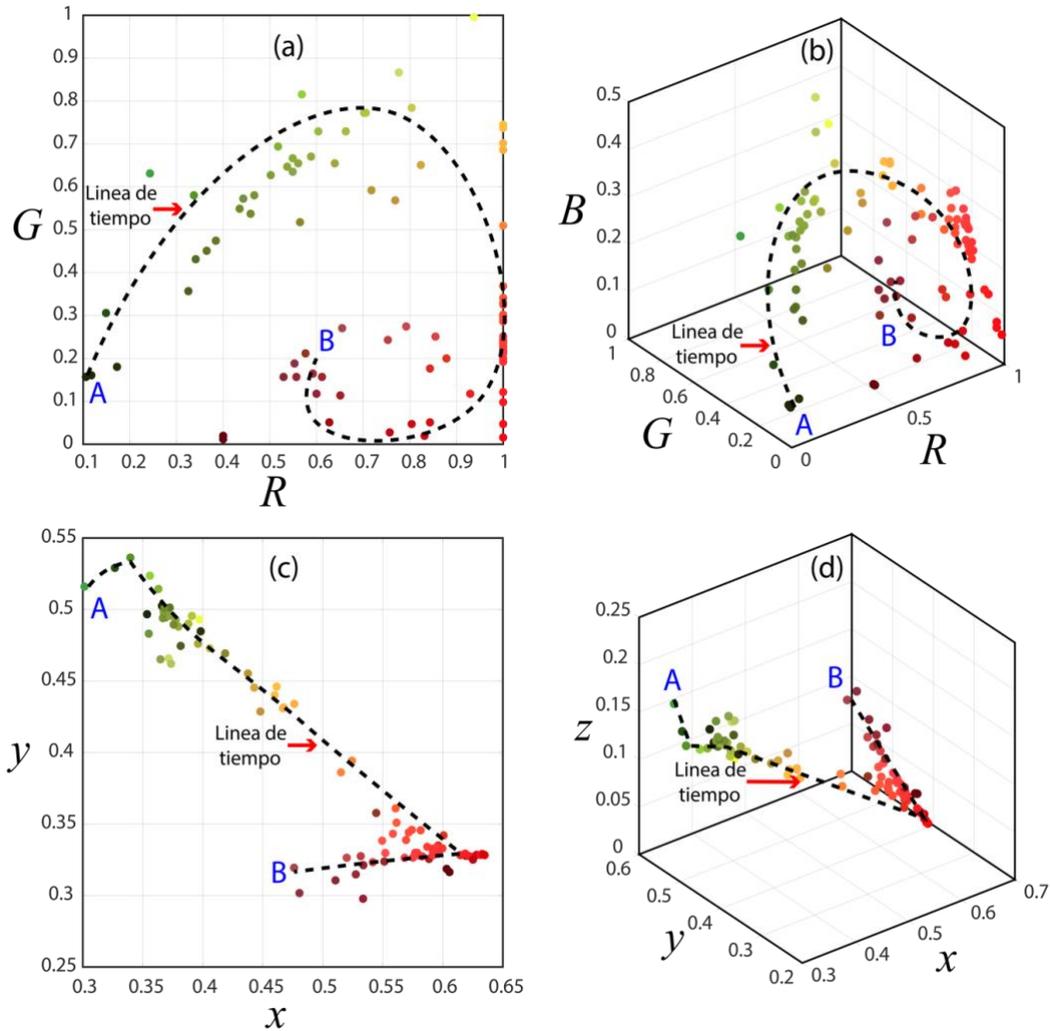


Figura 3.9. (a) Gráfica en 2D resultado en RG de Cámara sin corrección. (b) Gráfica en 3D resultado en RGB de Cámara sin corrección. (c) Gráfica en 2D resultado en xy de Cámara sin corrección. (d) Gráfica en 3D en xyz de Cámara sin corrección.

Para la **Figura 3.9c** y **3.9d**, se relacionan los mismos resultados, pero transformados a los espacios CIExy en 2D y CIExyz en 3D.

Aun con estas divergencias, es posible realizar una aproximación entre los datos generados con la cámara fotográfica, **Figura 3.10b** a los del colorímetro, **Figura 3.8a**, donde el resultado se observa en la **Figura 3.10a**. Para ello, se utiliza la regresión lineal de la ecuación (3.39), donde se hace un ajuste de los valores en RGB, producto de la caracterización con la cámara fotográfica. Ahora bien, la gráfica de la **Figura 3.10c**, muestra la aproximación a la información creada con la cámara fotográfica desde el colorímetro, utilizando el mismo concepto de regresión; esta conversión es comparada con los datos originales que se muestran en color gris. Además, el resultado observado en la **Figura 3.10d** compara la aproximación de los datos organizados y convertidos (mediante regresión) de la cámara fotográfica con la información dada por el colorímetro, la cual se visualiza en color gris. Por consiguiente, se puede inferir que es posible llevar a cabo una transformación entre espacios de color mediante el correcto uso de la regresión creada, lo que demuestra la viabilidad de caracterizar el color de los frutos de café utilizando dispositivos fotográficos.

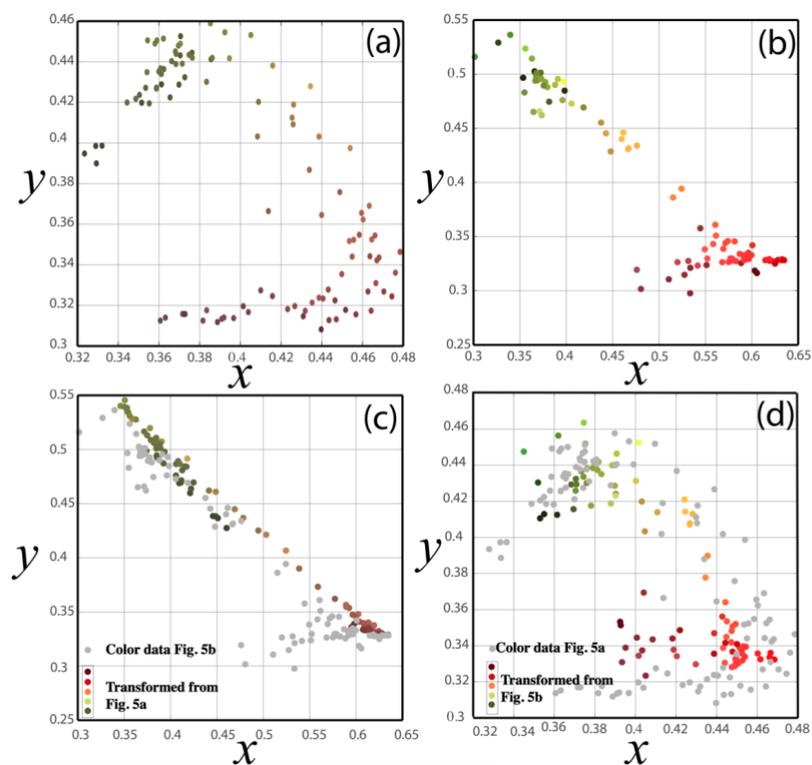


Figura 3.10. (a) Datos de colorímetro en CIExy. (b) Datos de cámara en CIExy. (c) Datos de colorímetro transformación al espacio RGB. (d) Datos de cámara transformación a CIElab. Extraído de [Rincón et al. \(2020\)](#)

La información previamente recopilada no solo ofrece una visión clara de cómo los datos pueden agruparse en subdivisiones, lo cual conduce a una única estrategia de clasificación que se aborda en la sección 3.4.2. Es importante destacar que este enfoque difiere de la presentada en (Cardona et al., 2020). Este capítulo se centra en el uso del espacio de color CIExy adquirido a través de imágenes fotográficas. Además, se destaca la capacidad de reemplazar un costoso colorímetro por una cámara fotográfica. Aunque se utilizó una cámara Colpix B500 para el desarrollo de la caracterización, se pueden explorar otras propuestas que empleen la cámara de un teléfono móvil. Incluso es posible desarrollar una herramienta informática que, además de identificar las intensidades de los colores, permita clasificar en tiempo real los frutos de café arábico L. Var Castillo.

3.3.2 Caracterización de los estados de maduración

Ahora bien, con los resultados generados (*producto de la caracterización con un colorímetro y una cámara fotográfica*) se hace una separación por agrupaciones, procurando asignar una denominación según sea la distribución. Este concepto se basa en la interpretación de los datos de color dados en el espacio CIExy, sin embargo, el mismo procedimiento se puede realizar sobre cualquier espacio de color. De forma general, la técnica consiste en que a las gráficas desarrolladas se les genere una línea de tiempo como se puede ver en las **Figuras 3.8c y 3.9c**, con el fin de permitir la segmentación del grupo principal, haciendo particiones que se estructuran en secciones de definición simple. Para realizar este proceso se utilizan hiperplanos, como se muestra en la **Figura 3.11a**, que contiene los resultados en CIExy de la caracterización con un colorímetro y en la **Figura 3.11b**, que es la representación en CIExy de los datos adquiridos con la cámara fotográfica; las divisiones de los grupos separados se designan como inmaduro, semimaduros, maduro y sobremaduro.

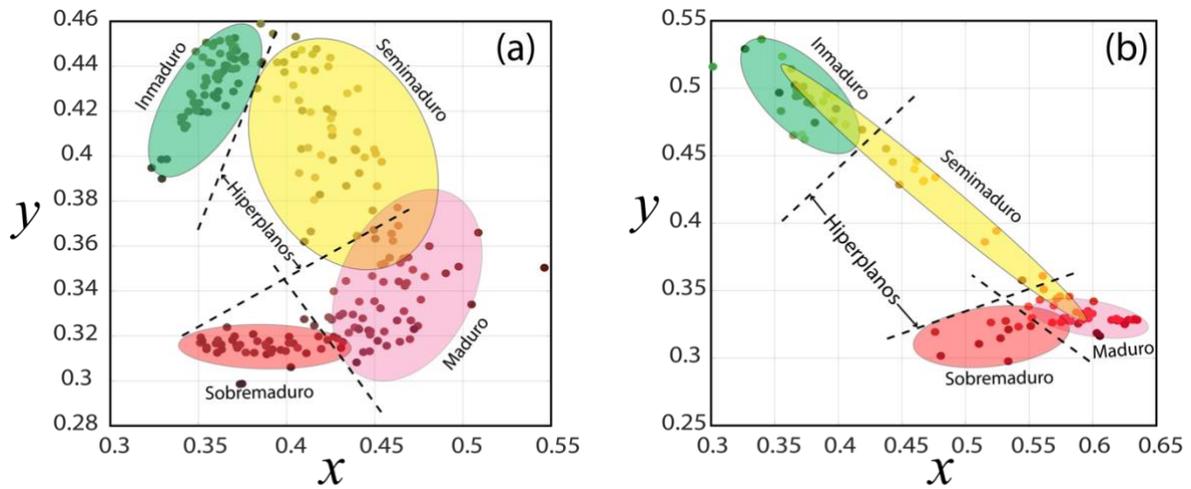


Figura 3.11. (a) Clasificación de frutos de café con datos de colorímetro. (b) Clasificación de frutos de café con datos de cámara fotográfica.

Posteriormente, se procede a calcular las covarianzas, así como los autovalores y autovectores, para cada uno de los subgrupos. Utilizando esta información, se determinan las correspondientes elipses de las cuatro categorías, estableciendo así un dominio basado en la distribución gaussiana, conocida en la teoría de la probabilidad, y que representa la posibilidad de que los valores se encuentren dentro del intervalo definido por los grupos de segmentación. Esto se realiza de la siguiente manera°

$$N(\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(n-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (3.42)$$

donde μ es la media de los datos de color; σ es la desviación estándar y n son los datos que se definen en términos de x , y , (Tinoco & Marulanda, 2015). Ahora bien, las funciones de distribución se encuentran como N_a y N_b , en cada dirección de color. Todo esto tiene relación con la siguiente matriz de covarianza

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \sigma_a^2 & \sigma_{ab} \\ \sigma_{ba} & \sigma_b^2 \end{bmatrix}, \quad (3.43)$$

en la que σ_a^2 y σ_b^2 son las variaciones en cada coordenada de color; y σ_{ab} y σ_{ba} son las covarianzas cruzadas. Esta matriz de covarianza permite establecer el problema de los autovalores como

$$\mathbf{C}\mathbf{x} = \lambda\mathbf{x}, \quad (3.44)$$

Donde λ representa los eigenvalores; ΔC_{\max} y ΔC_{\min} son las máximas amplitudes de variación encontradas en los datos de todos los grupos, los cuales están delimitados por las elipses que se orientan en la dirección definida por los eigenvectores, los cuales a su vez se basan en las coordenadas proporcionadas por el espacio de color CIExy. Por último, se determina la dirección de cada grupo utilizando la siguiente ecuación

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda_b}{\lambda_a} \right). \quad (3.45)$$

Finalmente, en algunos casos los datos pueden encontrarse en un punto medio entre dos elipses, sin definirse su estado de maduración, por lo tanto, para resolver este inconveniente, se busca el punto central de la elipse que más cerca se encuentre a la coordenada e inmediatamente se clasifica según sea la denominación de ese clúster.

CAPÍTULO 4- DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL SISTEMA FRUTO-PEDÚNCULO

4.1 Introducción

La extracción de las propiedades físico – mecánicas del sistema fruto – pedúnculo del café, es una etapa necesaria para la comprensión de los principios naturales del desprendimiento en las diferentes etapas de maduración ([Tobón et al., 1999](#)). Entre las propiedades de mayor interés se encuentran las características geométricas, de masa, densidad, volumen y pH. Es relevante destacar que la clasificación de los frutos de café, presentada en el capítulo 3, complementa la obtención de estas características, ya que posibilita la separación de los valores según su estado de maduración.

Ahora bien, con los resultados arrojados se espera contribuir al desarrollo de cosechadoras mecanizadas especializadas para el proceso de producción del café arábica L. Var. Castillo en Colombia. Sin embargo, al realizar una búsqueda exhaustiva de referencias que aborden el tema de cosechadoras mecanizadas y semi-mecanizadas, se observa que, aunque existen diseños adaptados a otras variedades de la misma especie, la industria cafetera sigue optando por la recolección tradicional ([Velásquez, 2018](#)). Esto se debe a que los prototipos existentes hasta ahora no se han ajustado completamente a las exigencias de la topografía del país y a las características específicas del cultivo.

En otras industrias agrícolas, se han utilizado tecnologías que emplean vibraciones de baja frecuencia con éxito, como en cultivos de manzanas ([Hitchman, 2016](#)), cítricos ([Gupta et al., 2016](#)), cerezas ([Zhou et al., 2012](#)) y olivos ([Aiello et al., 2019](#)). Sin embargo, no se ha encontrado ninguna propuesta que se enfoque en la cosecha selectiva, un aspecto fundamental para garantizar la calidad del café suave colombiano. Por lo tanto, el conocimiento de las propiedades físicas y mecánicas de los frutos del café es crucial para estimar los niveles adecuados de frecuencia y amplitud necesarios para lograr una cosecha mecanizada y selectiva.

Estas particularidades se pueden encontrar en diversos estudios relacionados con la evaluación de la calidad de productos en post-cosecha o la mejora de sistemas y procesos de recolección de diferentes frutos. Algunos de estos enfoques utilizan métodos destructivos que son costosos, consumen mucho tiempo y no son adecuados para su implementación a nivel industrial. Sin embargo, también existen métodos no destructivos, como el análisis de la respuesta vibratoria, que busca determinar las frecuencias naturales y observar las respuestas de los frutos a las vibraciones (Yang & Wang, 2010). Esto implica el conocimiento detallado de características del sistema, como su densidad, masa, velocidad, restricciones de movimiento y forma geométrica, que varían según el grado de madurez del fruto, como se ha observado en estudios de naranjas (Namdari et al., 2020).

Es importante destacar que la forma de los frutos es un rasgo crucial que afecta otros parámetros (Jancsó et al., 2001; Tinoco & Peña, 2019). Por esta razón, se han realizado diversos estudios que generan modelos para reproducir la forma de las frutas utilizando técnicas como el modelado asistido por computadora, el procesamiento de imágenes y los modelos analíticos paramétricos. Sin embargo, cabe mencionar que la aplicación de esta última técnica puede ser desafiante debido a las dificultades geométricas que presentan algunos frutos (Rashidi & Seyfi, 2007).

Dentro de las investigaciones que abordan el diseño asistido para generar modelos geométricos, se destaca el trabajo propuesto por (Tinoco et al., 2020). En su estudio, utilizan ecuaciones paramétricas, como las curvas de Bézier, y un enfoque CAD basado en imágenes para modelar geoméricamente la naranja Valencia. Otro ejemplo es el trabajo realizado por (Dintwa et al., 2008), donde se construye en CAD la mitad de un fruto de manzana para analizar el proceso dinámico de sus colisiones durante el transporte en camiones. Los resultados indican que la pérdida de energía durante un impacto depende de las propiedades elásticas y las geometrías del fruto. Además, (Torppa et al., 2006) presenta una técnica simplificada de modelo geométrico para los tubérculos de seis cultivares de papa, con el

objetivo de identificar este rasgo físico como un parámetro importante de calidad en conjunto con características adicionales como la densidad.

Para el café, también se han llevado a cabo estudios similares, como el presentado por (Tobón et al., 1999), quien determinó las dimensiones y la masa de la cereza Var. Colombia, así como la longitud y los diámetros de su pedúnculo, con el fin de identificar las diferencias en el desprendimiento de los frutos verdes y maduros. Por otro lado, los estudios realizados por (Rodríguez et al., 2007) y (Espinosa et al., 2007) se enfocaron en encontrar la excitación y los modos de vibración del café Var. Caturra amarillo y rojo. Sin embargo, en ambos casos, se requirieron los datos del estudio realizado por (Gaskins et al., 2004), que proporcionó información sobre las dimensiones, masa, densidad y volumen de la cereza de café.

Del mismo modo, en un estudio realizado por (Herrera et al., 2012), se determinó la fuerza requerida para desprender los frutos de la variedad Colombia. Donde el cálculo se basó en el análisis de las tres dimensiones ortogonales de los frutos, su masa y el contenido de humedad en cada uno de los nueve estados de maduración previamente definidos en un estudio anterior (Herrera et al., 2011), en el que se abarcó un período de 182 a 238 días después de la anthesis (DDA), las dimensiones de la cereza de café se obtuvieron de manera convencional mediante el uso de un pie de rey. Sin embargo, otro enfoque presentado por (Tinoco et al., 2014) empleó modelos paramétricos basados en curvas de Bézier para la variedad Colombia. Este planteamiento estructural se basó en planos y se comparó con imágenes reales de los frutos. Para establecer las dimensiones del pedicelo y el pedúnculo, se utilizó información proporcionada por (Ciro et al., 1998), que estableció el uso de dos cilindros de diámetro y longitud variables en función de los días de maduración. Por otro lado, la determinación de la masa se realizó según lo descrito por (Herrera et al., 2012), y la densidad se obtuvo utilizando datos de (Ciro et al., 1998). Estos valores resultaron esenciales para la identificación heurística de las frecuencias naturales y los modos de vibración.

En consecuencia, la finalidad de este capítulo es presentar los resultados obtenidos durante la caracterización experimental y cuantitativa de los frutos de café arábica L. Var. Castillo,

agrupando las diferentes propiedades bajo los correspondientes parámetros cromáticos que fueron definidos en el capítulo 3. Entre las mediciones realizadas se encuentra el volumen, donde los datos se extraen utilizando el desplazamiento de líquidos a través de una columna, como en (Tobón et al., 1999; Torres et al., 2012; Salazar et al., 1994; Marín et al., 2003). Las mediciones de fuerza de desprendimiento, que tienen un enfoque similar al que se presenta en (Silva et al., 2010), mostrando que los valores cuantitativos tienden a aumentar durante la etapa temprana de desarrollo del fruto y disminuir durante su maduración. Dichas fuerzas, tanto axial como de torsión se caracterizaron y analizaron estadísticamente para comparar los niveles que permiten lograr el desprendimiento del fruto.

Adicionalmente, dada la necesidad de mejorar los procesos de cosecha selectiva, se han medido individualmente los índices de pH y firmeza de cada fruto de café. Este enfoque es contrario a otras técnicas como las que se muestran en (Marín et al., 2003). En las tres dimensiones ortogonales definidas en la geometría de la sección, las medidas del índice de firmeza se analizan estadísticamente y se caracterizan para cada una de las etapas de maduración. Por último, los apartados que se muestran a continuación hacen parte de los procesos que se debieron realizar para extraer las características físico-mecánicas del fruto de café arábica L. Var. Castillo y que en conjunto con sus resultados descritos pueden ser de utilidad para el diseño de equipos especializados en esta variedad o para mejorar sus procesos de producción.

4.2 Materiales y métodos

4.2.1 Selección de las muestras

Para la realización de este capítulo se seleccionaron 211 frutos de café arábica L. Var. Castillo, utilizando un muestreo aleatorio estratificado basado en el enfoque propuesto por Casal & Mateu (2003) y Otzen & Manterola (2017). La recolección de los frutos siguió un protocolo establecido previamente, donde es importante evitar los frutos que presenten daños por agua (Arcila & Jaramillo, 2003; Jaramillo & Arcila, 2009; Arcila et al., 2007; Gaitan et al., 2016) o infestación de plagas (Constantino et al., 2011), y sin bifurcaciones en su

pedúnculo, como se muestra en la **Figura 4.1**. El objetivo de esta selección es asegurar que las propiedades de los frutos se encuentren dentro de los rangos de confianza establecidos en el sistema de clasificación por color, el cual se describe en el capítulo 3. Este procedimiento garantiza que los frutos seleccionados representen una parte específica de la población categorizada.

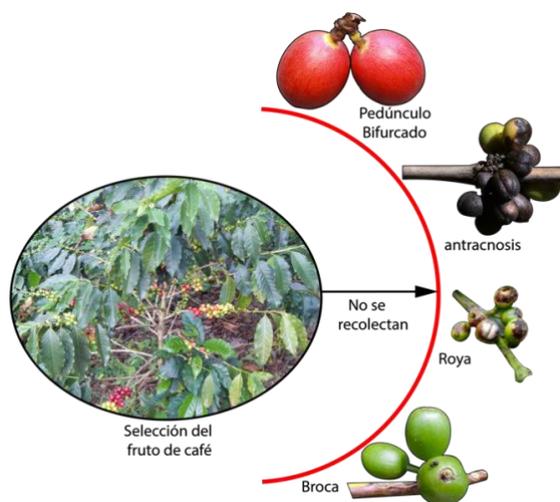


Figura 4.1. Selección de los frutos de café

4.2.2 Medición de las fuerzas de desprendimiento y diseño de los dispositivos de sujeción

La caracterización de la fuerza de desprendimiento axial y de torsión es una de las primeras mediciones realizadas en el café. Este proceso tiene como objetivo determinar el esfuerzo necesario para separar el sistema fruto-pedúnculo de la rama del árbol en diferentes etapas o estados de maduración. Para llevar a cabo estas mediciones, se utilizan dos equipos: el dinamómetro Mark-10 M5-10, que registra la tensión media de la fuerza axial, como se muestra en la **Figura 4.2a**, y el medidor de torque Mark-10 MTT03-12, ambos fabricados por la empresa Mark-10 en Estados Unidos, que se utiliza para medir el desprendimiento mediante la torsión, como se muestra en la **Figura 4.2b**.

En cada una de las mediciones, se sujetan las ramas de cada fruto seleccionado utilizando los extremos de los sistemas de sujeción correspondientes. En la medición de la fuerza axial se

realiza un movimiento de tracción, mientras que en la medición de torque se realiza un movimiento de rotación. Los datos registrados por ambos dispositivos se almacenan y se toman las precauciones necesarias para separar y clasificar los frutos por color, tal como se definió previamente en el capítulo 3.

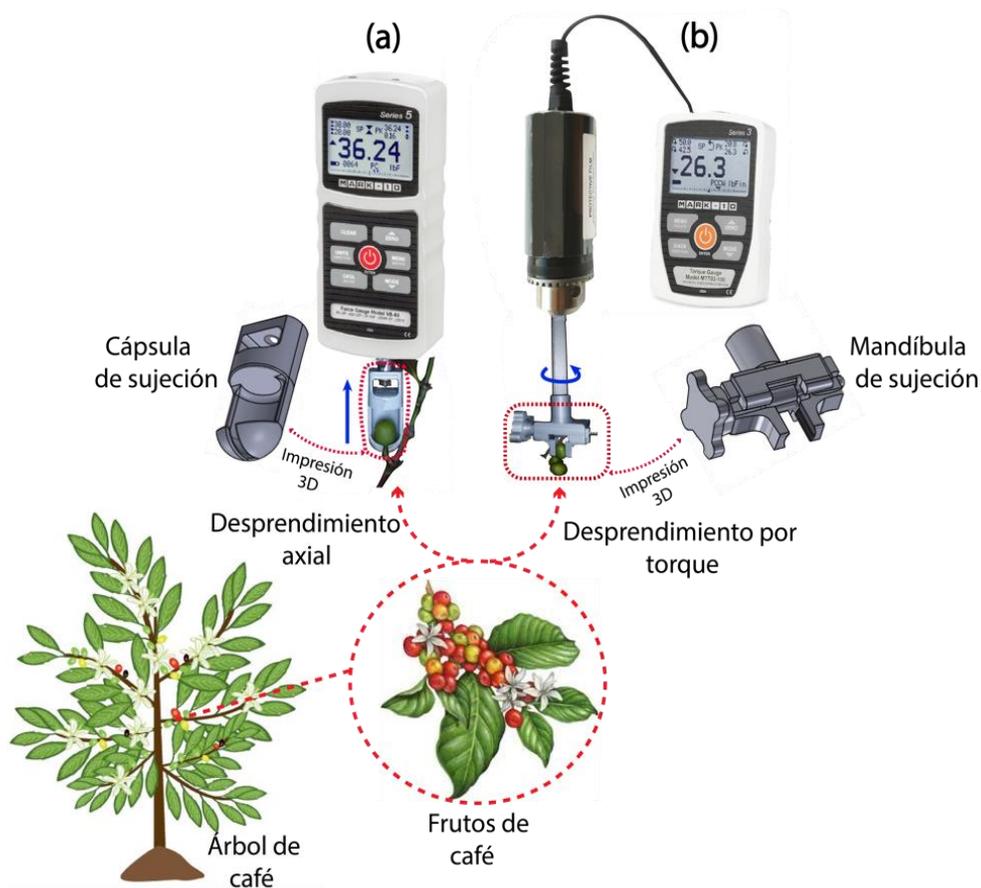


Figura 4.2. Medición de fuerzas de desprendimiento (a) Desprendimiento axial. (b) Desprendimiento por torque

Los sistemas de sujeción utilizados debieron ser diseñados y fabricados en impresora 3D, para ser adaptados a cada uno de los equipos de medición, ya que hasta el momento no existen adaptadores comerciales especializados en frutos del café. El proceso para el diseño del gripper de desprendimiento axial se inicia con el concepto observado en la **Figura 4.3a**, donde sus componentes se distribuyen de la siguiente manera:

- Una carcasa que corresponde a la estructura principal del dispositivo, y que cumple la función de brindar soporte a los elementos mecánicos.

- Un engranaje sin-fin, con el que se inicia el movimiento, hacia el lado derecho, del mecanismo.
- Un tornillo sin-fin, que transmite el movimiento a la corona del engranaje sin-fin.
- El engrane 2, que es un engranaje de dientes rectos, donde su accionamiento permite el movimiento del mecanismo hacia el lado izquierdo.
- El acople a galga, que es un soporte de acople al dispositivo MARK-10.
- Los eslabones o las barras complementarias de los mecanismos cuatro barras.
- Las tenazas para sujetar el fruto de café; estos son accionados desde los eslabones y los semi-engranes, con los que se genera un movimiento simétrico y sincrónico con el que se retiene la cereza.

Dicho elemento fue probado en campo para verificar la estabilidad en el agarre y en el desprendimiento del fruto del café, encontrando que existe un correcto desempeño en la estabilidad mecánica para el registro de las fuerzas. Sin embargo, se presenta un deslizamiento entre el tornillo sin fin y la corona, con lo que se genera una pequeña apertura al momento de agarrar la cereza; esta situación sucede debido a que los contactos mecánicos se deben fabricar en materiales más rígidos y con un ajuste más preciso.

Otra desventaja presentada es el tamaño del mecanismo de sujeción, ya que tiene una contribución de masa hacia el dinamómetro, que debe ser contrarrestado continuamente con un ajuste en la configuración del equipo de medición.

Considerando las desventajas y limitaciones evidenciadas con las pinzas presentadas en la **Figura 4.3a**, se decidió realizar un rediseño utilizando una única pieza con un agarre tipo cápsula. Este permite ubicar el fruto en una cavidad integrada, tal como se muestra en la **Figura 4.3b**. Donde, como se puede apreciar tiene una base con una perforación diseñada para el ajuste del tornillo M5 de la galga del sistema de medición. Una ventaja destacada de este nuevo diseño es la reducción de peso en el sistema, ya que su masa es considerablemente más baja en comparación con la propuesta anterior.

Ahora bien, para la impresión en 3D, cuyo resultado se observa en las **Figuras 4.3a** y **4.3b**, se utilizó una impresora Ultimaker 3, con el software Ultimaker Cura y para el proceso de la impresión se empleó un material PLA de la casa matriz ULTIMAKER, definiendo una tolerancia de 0.3mm para compensar las dilataciones del material en la impresión final.

En relación a la impresión en 3D, se utilizó una impresora Ultimaker 3 y el software Ultimaker Cura para llevar a cabo el proceso de impresión. Para este fin, se empleó un material PLA proporcionado por la casa matriz ULTIMAKER. Además, se definió una tolerancia de 0.3 mm para compensar las dilataciones del material durante la impresión final.

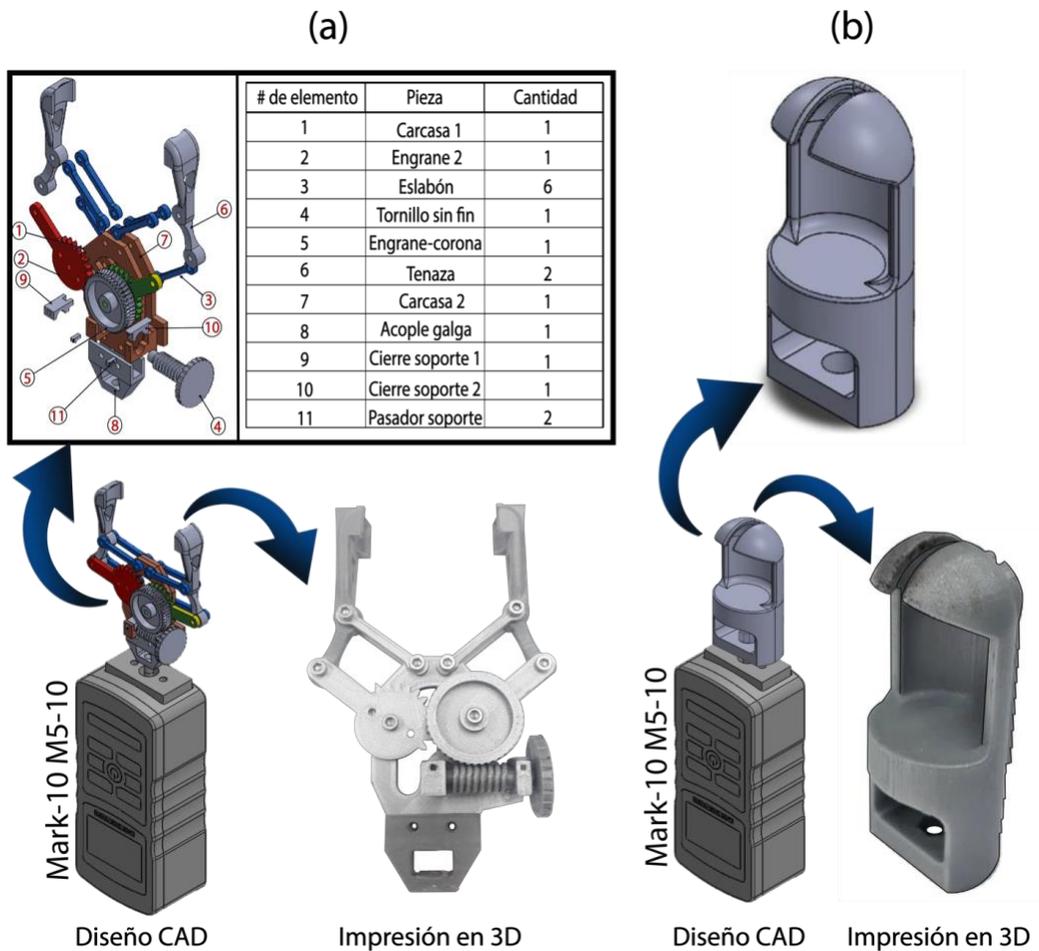


Figura 4.3. Diseño de grippers para el desprendimiento axial. (a) Primer diseño de gripper. (b) Segundo diseño de gripper.

Otro de los dispositivos que se utiliza en campo es el medidor de torque al cual también se le diseñó y fabricó un sistema de sujeción que se puede ver en la **Figura 4.4**. Sin embargo, para llegar a este concepto se realizaron varias pruebas, donde inicialmente se utilizó el mandril de sujeción del sistema de medición de torque, evidenciando que habían frutos de café con un volumen que excedía la capacidad de agarre del mandril de sujeción y adicionalmente los datos no fueron totalmente confiables. Por lo tanto, se propuso un diseño de mandril secundario adaptable al mandril principal del sistema de medición de torque, tomando como referencia diseños existentes de sujeción disponibles en fuentes open source; aunque se evidencian desventajas ya que requieren de varias vueltas para cerrar las mordazas, y su accionamiento llega a ser muy lento; además, al momento de la impresión estos mecanismos exigen tolerancias difíciles de lograr con material PLA.

Por ende, como el propósito es generar un agarre estable y de forma simétrica sobre el fruto de café, permitiendo una sujeción en dirección normal a sus planos de simetría, se procede a diseñar el gripper para el desprendimiento por torsión, que se puede ver en la **Figura 4.4**, considerando el concepto de una mordaza de sujeción con los elementos mecánicos que lo conforman:

- **La mordaza de agarre:** Sistema con geometría escalonada para el contacto y sujeción del fruto de café a medir.
- **Las tuercas:** Insertos deslizantes que generan el desplazamiento de las plataformas de las mordazas.
- **El buje:** Elemento mecánico de rotación y control de movimiento axial del eje de transmisión de movimiento
- **El soporte principal:** Carcasa principal de alojamiento de las piezas del mecanismo
- **La perilla:** Dial de accionamiento para la transmisión de movimiento al eje de rotación
- **El tornillo de rosca izquierda:** Tramo del eje para transmitir avance de mordaza
- **El tornillo de rosca derecha:** Tramo del eje para avance de mordaza
- **La barra de conexión:** Elemento de acople entre el soporte principal y el mandril de

sujeción del sistema de medición de torque.

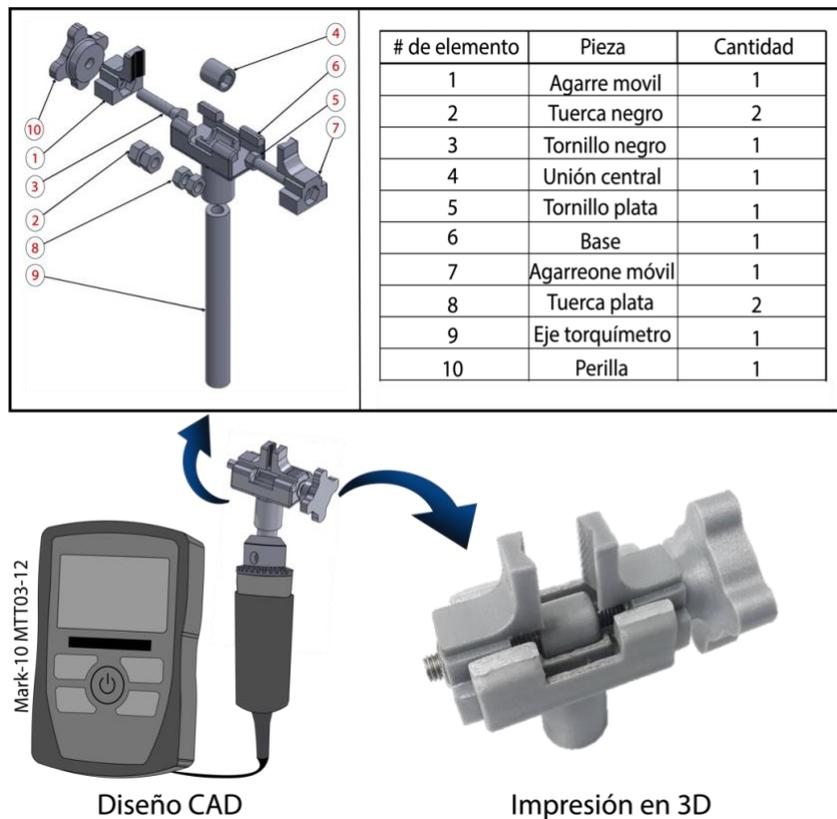


Figura 4.4. Diseño de gripper para el desprendimiento por torsión

En las pruebas se evidenció que el mecanismo presenta la capacidad de agarrar el fruto establemente sin generar apertura en las mordazas. Dicho control en el cierre, evita daños no deseados en la piel del fruto, igualmente la barra de conexión instalada permite aplicar el torque deseado desde un punto de mayor ergonomía, y ayuda a impedir la generación de movimientos laterales que puedan aplicar fuerzas no deseadas sobre el fruto.

El dispositivo fue manufacturado en impresión 3D (Impresora Ultimaker 3), utilizando materiales PLA, con una tolerancia de 0.3mm. Luego del proceso de fabricación, se pulieron las caras de los rieles del soporte principal para un mejor deslizamiento de las mordazas y el buje central; los tornillos fueron integrados al buje central usando adhesivo epóxico.

Inicialmente, para el ensamble de las piezas, se posiciona el eje en el cojinete central del dispositivo, posteriormente se acoplan los rieles simétricamente y se revoluciona el eje desde su buje central para deslizar los rieles hacia el centro. Finalmente se ajusta la perilla de accionamiento usando adhesivo epóxico y se integra el dispositivo con la barra de conexión para el sistema de medición de torque.

4.2.3 Determinación de la geometría en el fruto

Todos los frutos a lo largo de su vida pasan por una serie de cambios que se caracterizan por un continuo cambio metabólico. Estos se pueden resumir en tres etapas: el crecimiento, la maduración y la senescencia, donde las dos primeras se completan adecuadamente en el árbol (Martínez et al., 2017). Por lo tanto, a medida que un fruto se desarrolla, sufre una serie de cambios que son perfectamente evaluables y su caracterización es importante para determinar el momento óptimo de recolección. Ahora bien, estas etapas se pueden representar con la geometría, en especial refiriéndose al fruto del café arábica L. Var. Castillo, que para representarla y medirla (utilizando un vernier), primero se debe asumir su estructura como se puede ver en la **Figura 4.5**, donde ϕ_1 y ϕ_2 , son los diámetros ecuatoriales, siempre y cuando $\phi_1 \geq \phi_2$. Así como ϕ_3 se considera el diámetro polar.

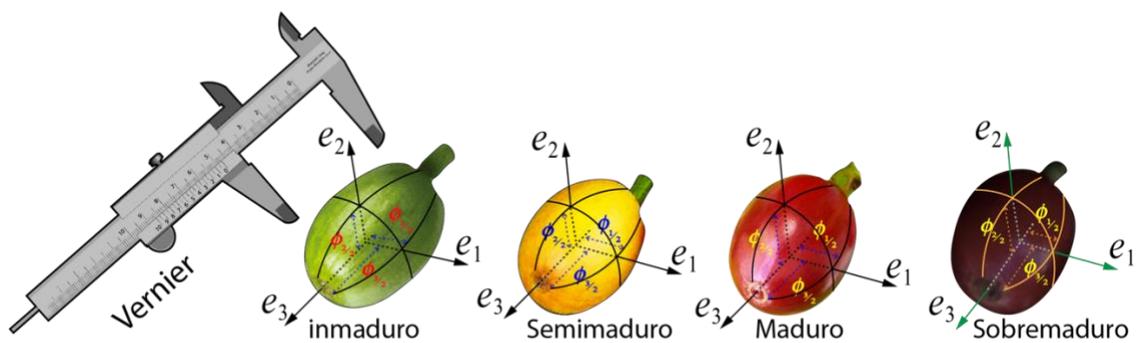


Figura 4.5. Medición y geometría simplificada en cada estado de maduración

En esta simplificación geométrica, que se aplica a todo el proceso de maduración, las direcciones e_1, e_2, e_3 , definen topológicamente el fruto y coinciden con el sistema de

coordenadas x, y, z, que es ortogonal por definición. Por lo tanto, a estas medidas en el fruto del café se les llama diámetros ortogonales; este término está definido en los trabajos de Tinoco (2017) y Herrera et al. (2012). A cada uno de estos diámetros se le puede realizar un análisis durante el proceso de maduración para entender cómo crece la fruta y la correlación (γ) que existe entre ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 . La definición matemática se desarrolla en el trabajo de Tinoco (2017), de la siguiente manera

$$\gamma = \frac{\phi_2}{\phi_3} \left(\frac{\phi_3}{\phi_1} + 1 \right) \quad (4.1)$$

4.2.4 Medición de la masa

La medición de esta característica se realiza con el apoyo de una balanza de precisión PCE-ABE 220 de PCE-Instruments, donde se ubica cada uno de los frutos seleccionados del árbol en el centro del plato, como se ve en la **Figura 4.6**.



Figura 4.6. Medición de masa

4.2.5 Determinación del volumen

La teoría general del volumen lo define como una magnitud escalar que permite precisar la extensión de un objeto en sus tres dimensiones: longitud, ancho y altura. En el caso de frutos, esta caracterización se utiliza para controlar la calidad del producto a comercializar y como ayuda en el diseño de equipos de recolección. Por esta razón, se han empleado diversos

métodos para su determinación, entre ellos, técnicas de visión artificial (Forbes & Tattersfield, 1999; Hahn & Sánchez, 2000). Asimismo, se ha utilizado el método del picnómetro y tolueno para comprobar el volumen de las semillas, aunque su aplicación en frutos de mayor tamaño resulta demasiado lenta (Cleva et al., 2017). Otro método es el xilométrico, que implica introducir un objeto en un vaso de agua y medir el desplazamiento del líquido según las graduaciones del vaso. Sin embargo, este procedimiento presenta una fuente potencial de error al requerir una apreciación visual por parte del operador (Moreda et al., 2009).

Otra técnica utilizada para medir el volumen de los frutos es mediante el método de la lata eureka. Este método involucra un vaso de precipitados con un pico aliviadero, en el cual se introduce el objeto a medir para que produzca un desplazamiento de agua que luego se recoge en un cilindro graduado. Sin embargo, esta técnica requiere de largos periodos de medición y puede presentar una posible fuente de error debido al goteo del pico, lo que afecta la precisión de las mediciones (Forbes, 2000).

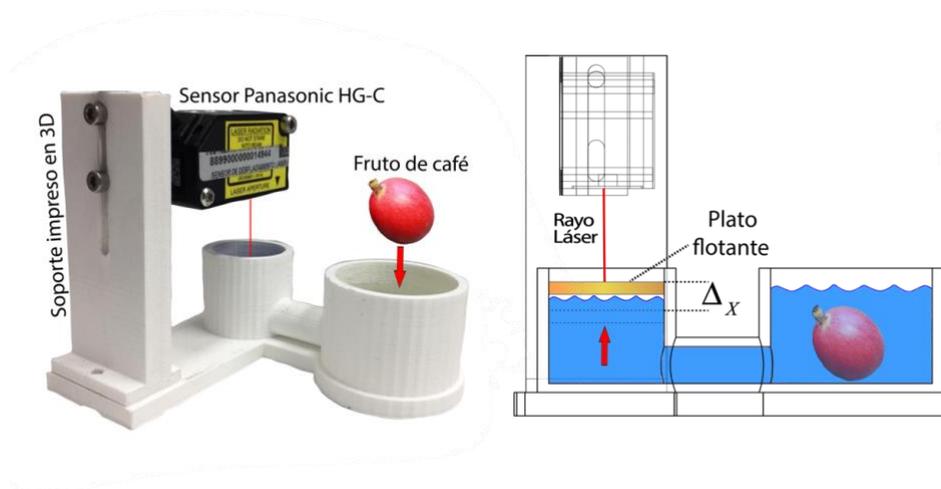


Figura 4.7. Medición de volumen

En conclusión, el método más adecuado para medir el volumen es mediante el desplazamiento de agua siguiendo el principio de Arquímedes. Mohsenin (1970) esbozó una metodología basada en este principio, que representa un equilibrio entre precisión y velocidad de medición. Siguiendo las directrices de Arquímedes, se propuso una configuración

experimental para caracterizar el volumen de cada fruto de café, como se muestra en la **Figura 4.7**. En este procedimiento, se introduce cada fruto en el recipiente de mayor diámetro, lo que provoca un cambio en la altura (Δx) del líquido en un plato flotante ubicado dentro de la cavidad menor. El desplazamiento de la placa se mide con el sensor Panasonic HG206C, fabricado en Japón por Panasonic, con una resolución de 300 μm y un rango de ± 35 mm. Es importante destacar que el volumen de los frutos de café se determina multiplicando este cambio de altura por el área del contenedor, y todas las mediciones se registran en una base de datos.

Adicionalmente, el volumen del fruto del café también puede ser estimado utilizando la ecuación dada en (Tinoco & Peña, 2019), la cual se basa en las mediciones de los diámetros ortogonales. Esta se expresa de la siguiente manera

$$V \approx \frac{1}{5} \left(\frac{(\phi_3 + \phi_1) \phi_2^{4/3}}{(\phi_3 \phi_1)^{2/3}} \right) - \frac{5}{4} \left(\frac{(\phi_3 + \phi_1) \phi_2}{\phi_3 \phi_1} \right)^{9/5}. \quad (4.2)$$

4.2.6 Determinación de la densidad

La densidad es una magnitud escalar que indica la cantidad de masa contenida en un determinado volumen de un objeto, como el fruto del café. Se expresa en unidades de g/cm^3 y se calcula utilizando la siguiente ecuación

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (4.3)$$

En esta ecuación, ρ representa la densidad, m es la masa y V es el volumen del objeto, como en el caso del fruto del café. Los datos utilizados para calcular la densidad del fruto en diferentes estados de maduración se dividen en dos partes: la primera parte está relacionada con la información del volumen medido, mientras que la segunda parte se basa en el volumen estimado.

4.2.7 Medición del pH

El objetivo de medir el grado de acidez es describir el comportamiento del pH en la pulpa del café, ya que esta variable tiene un impacto en la respuesta de otras variables como las antocianinas y las clorofilas (Wills et al., 1998). Para realizar esta caracterización, se utiliza un medidor de pH de la marca PCE-PH22, fabricado por la empresa PCE Instruments en Alemania. El procedimiento comienza con la extracción del endocarpio del fruto del café, asegurándose de tener una masa estandarizada para cada muestra. Posteriormente, esta cantidad se disuelve en 5 ml de agua destilada dentro de un recipiente de polietileno, como se muestra en la **Figura 4.8**.

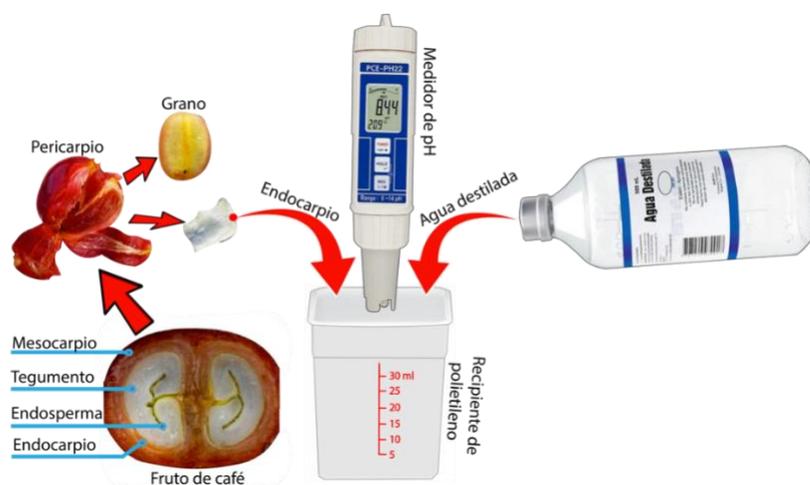


Figura 4.8. Medición de pH

Una vez realizado este procedimiento, se introduce el electrodo del medidor de pH en la muestra durante 20 segundos, asegurándose de calibrar el equipo cada diez muestras con soluciones de pH 4.0 y pH 7.0. Para cada etapa de maduración, las condiciones de medición del pH se detallan en la **Tabla 4.1**, donde mpH representa la masa media extraída de las frutas para la prueba. Es importante destacar que existen otras pruebas para medir la acidez en cada pulpa del fruto de café, como el estándar AOAC 981.12 (Horwitz & Latimer, 1975).

Tabla 4.1. Condiciones de medición de pH

Estado de maduración	Condiciones de medición			
	T (°C)	CV	m_{pH}	CV
Inmaduro	21.74	0.03144	0.1303	0.0447
Semimaduro	20.83	0.03288	0.2307	0.2915
Maduro	22.10	0.04925	0.4444	0.3085
Sobremaduro	20.56	0.00571	0.5421	0.2197

Al igual que con las características anteriormente mencionadas, todas las mediciones realizadas con el medidor de pH se registraron y se almacenaron en una base de datos, donde se hace una división por color según sea la clasificación asignada.

4.2.8 Determinación de los índices de firmeza

El índice de firmeza o dureza de cualquier fruto es una medida utilizada para determinar su estado de maduración y su relación con el color externo. Además, esta medida es esencial para evaluar la aceptación comercial de un fruto. Para llevar a cabo esta medición, se empleó una máquina de prueba Mark-10 ESM303, fabricada por la empresa Mark-10 en Estados Unidos. Con esta máquina, se determinaron los índices de firmeza de 60 frutos de café, divididos en 15 por cada etapa de maduración. En cada una de ellas, se realizó una subdivisión de tres grupos, cada uno compuesto por cinco frutos, uno por cada una de las tres direcciones ortogonales, como se define en la sección 4.2.3

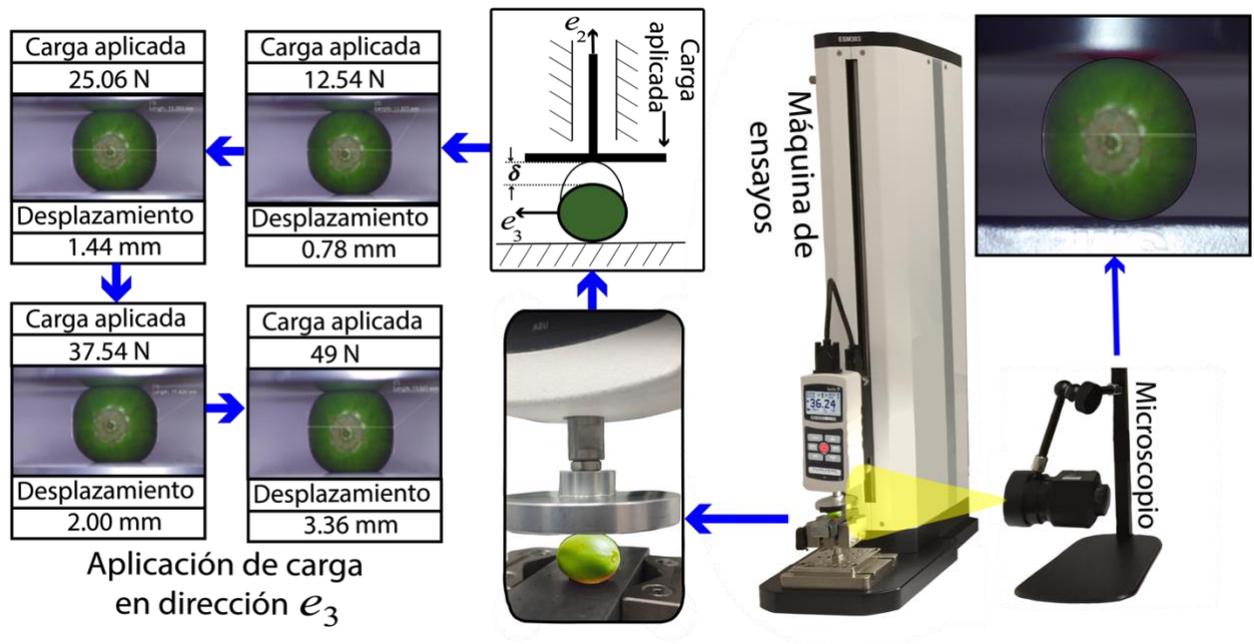


Figura 4.9. Medición de índice de firmeza

Por lo tanto, el objetivo de la máquina de pruebas es medir la fuerza de compresión y el desplazamiento a lo largo de la dirección de compresión, utilizando un microscopio PCE-WSM 100, con el que se mide el desplazamiento lateral mientras se comprimen los frutos de café, como se muestra en la **Figura 4.9**. Por cada carga aplicada se realiza la medición del desplazamiento del fruto.

4.3 Resultados y discusión

En esta sección se presentan los resultados de las propiedades físicas y mecánicas del fruto de café arábico L. Var. Castillo y se presenta un análisis de varianza unidireccional (ANOVA), con el fin de rechazar la hipótesis nula de que todas las medias poblacionales de las etapas de maduración son iguales. Además, se rechaza la hipótesis nula de que las medias de las propiedades físicas de la fruta en las etapas de maduración son iguales entre sí. Esto se lleva a cabo realizando una comparación múltiple en las etapas y así determinar, cuales son diferentes a las demás.

4.3.1 Fuerzas de desprendimiento

Para el desarrollo de este apartado se seleccionan aleatoriamente los datos de 50 frutos, que se utilizan para determinar la fuerza axial. Los resultados se presentan en la **Tabla 4.2** y la **Figura 4.10a**; en ellas, se observa una variación estadística menor entre las etapas inmadura, semimadura y sobremadura, para los valores promedio de fuerza axial o tracción. Sin embargo, se observa que en el estado maduro disminuye la fuerza de desprendimiento en un 11.70%, comparado con el estado inmaduro. Así mismo, se señala que los valores medios obtenidos, difieren de las cifras reportadas para el café variedad Colombia (Tobón et al., 1999; Marín et al., 2003; Herrera et al., 2012).

Tabla 4.2. Valores promedio y desviación estándar (σ), de los datos de desprendimiento del fruto

Estado de maduración	Fuerza axial		Toque	
	F[N]	σ	T [N.cm]	σ
Inmaduro	10.850	2.781	4.050	1.079
Semimaduro	10.790	0.988	3.480	0.969
Maduro	9.580	2.171	2.660	0.614
Sobremaduro	10.800	1.962	1.600	0.583

En la caracterización de los torques requeridos para desprender cada fruto de su rama, los datos arrojados dependen de la etapa de maduración; esto se pueden ver en la **Tabla 4.2** y la **Figura 4.10b**. Es de aclarar que en total se seleccionaron aleatoriamente 31 frutos directamente del árbol. Estos a diferencia de los resultados de fuerza axial, tienen un comportamiento en los datos de tipo lineal decreciente, infiriendo que el torque para desprender cada fruto disminuye conforme avanzan los estados de maduración.

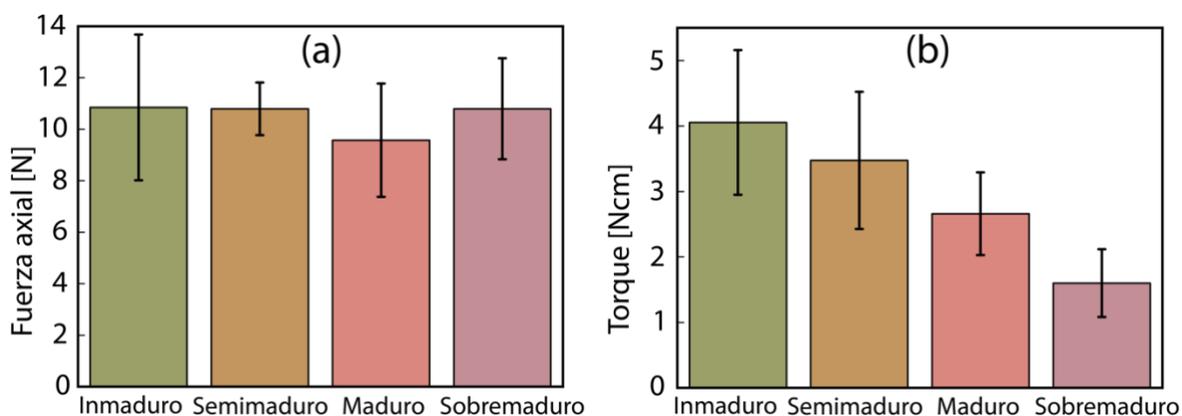


Figura 4.10. Desprendimiento de las fuerzas en todos los estados de maduración. (a) Desprendimiento de la fuerza axial. (b) Fuerza de desprendimiento por torque

En la **Tabla 4.3** se muestra la prueba ANOVA para la fuerza de desprendimiento axial entre estados de maduración, donde en el resultado no se muestra una variación estadística significativa para las medias de los valores entre las etapas de maduración.

Tabla 4.3. p-valores para la fuerza de desprendimiento axial entre estados de maduración

P- valores para el desprendimiento por fuerza axial				
	Inmaduro	Semimaduro	Maduro	Sobremaduro
Inmaduro	x	0.9999	0.3710	0.9999
Semimaduro	0.9999	x	0.5801	1
Maduro	0.3710	0.5801	x	0.5785
Sobremaduro	0.9999	1	0.5785	x

Así mismo, para la prueba ANOVA entre los valores medios de los estados de maduración para el desprendimiento por torque que se registra en la **Tabla 4.4**, se muestra que el par de desprendimiento disminuye a medida que avanzan las etapas maduración, y por tanto sugiere que el par de desprendimiento difiere entre etapas.

Tabla 4.4. P-valores para el desprendimiento por torque entre estados de maduración

P-valores para el desprendimiento por torque				
	Inmaduro	Semimaduro	Maduro	Sobremaduro
Inmaduro	x	0.6681	0.005	3.8290e-5
Semimaduro	0.6681	x	0.4047	0.0123
Maduro	0.005	0.4047	x	0.1089
Sobremaduro	3.8290e-5	0.0123	0.1089	x

Basándose en los datos de desprendimiento axial y torque para el café arábico variedad Castillo en diferentes estados de maduración, se pueden explorar las posibles razones detrás de las condiciones que ocurren en el sistema fruto-pedúnculo a medida que avanzan los estados de maduración.

Fuerza de desprendimiento axial: Los datos muestran que la fuerza de desprendimiento axial disminuye a medida que el fruto de café avanza en los estados de maduración. La media de la fuerza de desprendimiento axial en el estado "Inmaduro" es de aproximadamente 10.85 N, mientras que en el estado "Sobremaduro" es de aproximadamente 10.80 N. Esto sugiere que el fruto de café se vuelve más fácil de desprender a medida que madura, lo que puede ser beneficioso para facilitar la cosecha.

Fuerza de desprendimiento por torque: Al analizar los datos de torque, también se puede observar una tendencia similar. La fuerza de torque disminuye a medida que el fruto de café avanza en los estados de maduración. La media de torque en el estado "Inmaduro" es de aproximadamente 4.05 N.cm, mientras que en el estado "Sobremaduro" es de aproximadamente 1.60 N.cm. Esto indica que a medida que el fruto de café madura, se requiere menos fuerza para el desprendimiento y torsión en el pedúnculo.

Este comportamiento se debe a que el fruto de café experimenta cambios físicos y químicos significativos a medida que avanza en los estados de maduración. Estos cambios pueden influir en las propiedades mecánicas del fruto y su unión con el pedúnculo, lo que se refleja en los resultados de desprendimiento axial y torque (Marín et al., 2004).

Conforme el fruto madura, es probable que se produzcan cambios en la estructura celular y la composición de las paredes celulares, lo que puede afectar la cohesión entre las células del fruto y el pedúnculo. Estos cambios pueden resultar en una menor fuerza requerida para el desprendimiento del fruto del pedúnculo.

Es importante destacar que la variabilidad en los datos puede estar influenciada por factores agronómicos, condiciones de crecimiento, clima, etc. Por lo tanto, estos resultados son específicos para la variedad Castillo.

4.3.2 Propiedades de geometría, masa, volumen y densidad

Para determinar las propiedades físicas de los frutos del café, se aplicaron los métodos detallados en las secciones (4.2.3), (4.2.4), (4.2.5) y (4.2.6). Los resultados obtenidos de las mediciones geométricas revelan un constante aumento en los diámetros ecuatoriales \emptyset_1 y \emptyset_2 desde la etapa inmadura hasta la sobremadura. El diámetro polar \emptyset_3 también experimenta un incremento desde el estado inmaduro hasta el sobremaduro, como se aprecia en la **Figura 4.11a** y en la **Tabla 4.5**. Estos hallazgos indican que el crecimiento del fruto está determinado por el desarrollo del grano a lo largo de las distintas etapas de maduración. En consecuencia, se puede afirmar que el aumento en el tamaño del fruto está influenciado predominantemente por las direcciones e_1 y e_3 .

Tabla 4.5. Valores promedio de los diámetros ortogonales y desviación estándar (σ)

Estado de maduración	\emptyset_1	σ [\emptyset_1]	\emptyset_2	σ [\emptyset_2]	\emptyset_3	σ [\emptyset_3]
Inmaduro	12.674	0.863	11.358	1.946	14.009	1.946
Semimaduro	13.391	0.874	11.889	0.649	14.424	1.919
Maduro	13.931	1.173	12.034	0.928	14.735	1.539
Sobremaduro	15.206	1.082	13.342	0.761	15.504	1.562

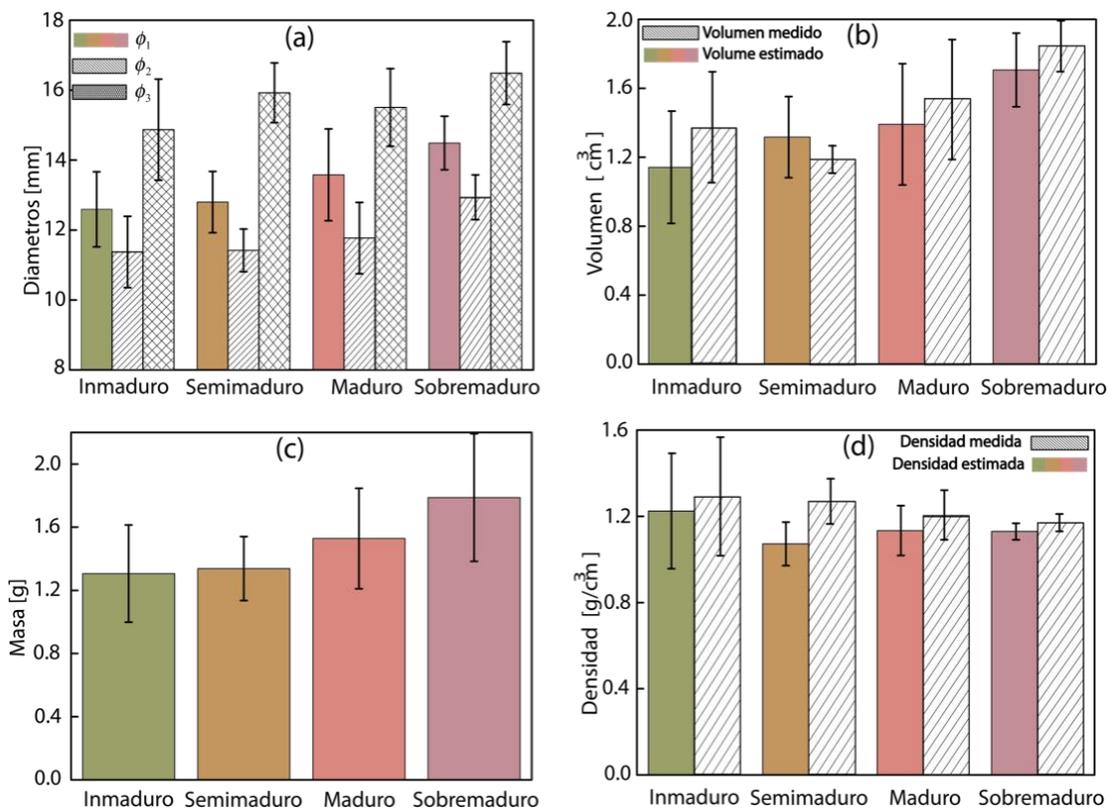


Figura 4.11. Propiedades físicas y geométricas del fruto de café. (a) Diámetros ortogonales. (b) Volumen medido y estimado. (c) Masa. (d) Densidad medida y estimada

También se procedió a estimar las relaciones geométricas existentes entre los diámetros ortogonales de los frutos del café, de acuerdo con la ecuación (4.1) que se encuentra detallada en la sección (4.2.3). Esta correlación, tal como sostiene Tinoco (2017), desempeña un papel en la predicción del tamaño y el estado de madurez de los frutos. En la **Tabla 4.6**, se presenta la media de la relación geométrica [γ] en cada etapa de maduración, acompañada por su nivel de variabilidad, expresado en forma de coeficiente de variación (CV).

Las medias y los coeficientes de variación presentados en la **Tabla 4.6** no indican una fluctuación significativa en la relación geométrica a lo largo de las diversas etapas de maduración. Este hallazgo concuerda con resultados en otras variedades de café arábica, como lo ilustra el trabajo de Tinoco (2017) en relación al Café arábica L. Var. Colombia.

Tabla 4.6 Relación geométrica a lo largo de los estados de maduración

Estado de maduración	g	CV
Inmaduro	1.635	0.0484
Semimaduro	1.718	0.1690
Maduro	1.632	0.0485
Sobremaduro	1.685	0.0313

Basado en esta información, se calcula la variación porcentual ($\Delta\%$) de la relación geométrica en los distintos estados de maduración utilizando la siguiente ecuación.

$$D\% = \left(\frac{g_{posterior} - g_{anterior}}{g_{anterior}} \right) \times 100\% \quad (4.4)$$

Por consiguiente, al llevar a cabo los cálculos pertinentes, se obtienen las variaciones porcentuales entre las etapas de Inmaduro a Semimaduro, de Semimaduro a Maduro, y de Maduro a Sobremaduro, tal como se presenta en la **Tabla 4.7**.

Tabla 4.7. Variación porcentual de las relaciones geométricas

Comparación entre estado de Maduración	$\Delta\%$
Inmaduro-Semimaduro	5.08%
Semimaduro-Maduro	-5.01%
Maduro-Sobremaduro	3.25%

Estos datos revelan una clara correlación entre los diferentes estados de maduración y los diámetros ortogonales de los frutos. El aumento del 5.08% entre las fases de Inmaduro y Semimaduro puede vincularse con los procesos de expansión celular y los cambios estructurales que caracterizan el comienzo del desarrollo del fruto ([Sadeghian et al., 2015](#)).

En la transición de Semimaduro a Maduro, se presenta una disminución en el cambio porcentual del -5.01%. Este descenso sugiere una posible compresión en las dimensiones de los frutos a medida que alcanzan su plena madurez, lo cual se debe a que el agua contenida en el fruto es reemplazada por el grano y la pulpa, siendo esto una representación del máximo crecimiento del fruto ([Sadeghian et al., 2015](#)). Además, se observa un aumento moderado del

3.25% en la correlación entre la fase Maduro y la fase Sobremaduro. Esto indica cierta recuperación en el aumento progresivo de las dimensiones del fruto durante la etapa de Sobremaduración. Dicho incremento se atribuye a que el fruto gana de nuevo humedad, debido a la posibilidad de los cambios que ocurren en la pulpa (Sadeghian et al., 2015). Sin embargo, este aumento, en comparación con las fases anteriores, es pequeño debido a la transpiración o pérdida de agua en el fruto.

Igualmente, se determinaron los valores de P para los diámetros ortogonales, mostrados en la **Figura 4.11a**, en el que se indica que existen diferencias entre las medias de los estados de maduración de ϕ_1 , ϕ_2 y ϕ_3 como se aprecia en la **Tabla 4.8**.

Tabla 4.8. P-valores de los tres diámetros ortogonales divididos por estados de maduración

P- valores del diámetro ecuatorial ϕ_1				
	Inmaduro	Semimaduro	Maduro	Sobremaduro
Inmaduro	x	4.0292e-4	1.8320e-8	3.7682e-9
Semimaduro	4.0292e-4	x	0.0344	3.9528e-9
Maduro	1.8320e-8	0.0344	x	7.0850e-6
Sobremaduro	3.7682e-9	3.9528e-9	7.0850e-6	x
P-valores del diámetro ecuatorial ϕ_2				
	Inmaduro	Semimaduro	Maduro	Sobremaduro
Inmaduro	x	0.01101	1.1123e-5	3.7682e-9
Semimaduro	0.01101	x	0.16780	3.9001e-9
Maduro	1.1123e-5	0.16780	x	3.7404e-7
Sobremaduro	3.7682e-9	3.9001e-9	3.7404e-7	x
P-valores del diámetro polar ϕ_3				
	Inmaduro	Semimaduro	Maduro	Sobremaduro
Inmaduro	x	0.1122	0.4733	0.83609
Semimaduro	0.1122	x	0.00236	0.001435
Maduro	0.4733	0.00236	x	0.9274
Sobremaduro	0.83609	0.001435	0.9274	x

La medición del volumen se llevó a cabo siguiendo los procedimientos detallados en la sección (4.2.5), utilizando la ecuación (4.2). Esto se refleja visualmente en la **Figura 4.11b** y se puede verificar en la **Tabla 4.9**. Es relevante destacar que la media del volumen estimado muestra una coherencia con la media del volumen medido experimentalmente, manifestando un incremento continuo desde la etapa semimadura hasta la sobremadura.

Tabla 4.9. Valores promedio del volumen medido y estimado con su desviación estándar (σ)

Estado de maduración	Volumen medido (cm³)	σ (Volumen medido)	Volumen estimado (cm³)	σ (Volumen estimado)
Inmaduro	1.130	0.442	1.359	0.120
Semimaduro	1.302	0.208	1.169	0.094
Maduro	1.378	0.457	1.525	0.117
Sobremaduro	1.688	0.465	1.831	0.078

Según Sadeghian et al. (2015), las primeras etapas de desarrollo del fruto tienden a contener una mayor proporción de agua que de material. Este concepto se refleja en los datos que se han presentado. En el estado inmaduro, se observa un volumen medido de 1.130 cm³ y un volumen estimado de 1.359 cm³. Donde puede ser un indicativo de la presencia de un mayor contenido de agua en comparación con la materia sólida del fruto en su etapa temprana.

En la etapa semimadura, el volumen medido es de 1.302 cm³, mientras que el volumen estimado es de 1.169 cm³. Estos datos podrían estar relacionada con la transformación de agua en materia sólida, como grano y pulpa, tal como menciona Sadeghian et al. (2015).

Para el estado de madurez, el volumen medido es de 1.378 cm³, y el volumen estimado es de 1.525 cm³. Este incremento en el volumen podría reflejar la consolidación del grano y la pulpa, lo que desplaza el agua al interior del fruto, como sugiere Sadeghian et al. (2015).

La etapa de sobremaduro tiene un volumen medido de 1.688 cm³ y un volumen estimado de 1.831 cm³, se puede inferir que la degradación de la pulpa en esta etapa, como plantea Sadeghian et al. (2015), podría contribuir a un ligero aumento en la cantidad de agua en el interior del fruto.

todo esto indica que la fruta sufre una expansión paulatina durante su maduración. Los datos de los P-valores para la prueba de hipótesis indican “que no existe diferencia entre la media de los valores del volumen”, esto se puede ver en la **Tabla 4.10**.

Tabla 4.10. P-valores para el volumen

P-valores para el volumen				
	Inmaduro	Semimaduro	Maduro	Sobremaduro
Inmaduro	x	0.7720	0.0045	3.7693e-9
Semimaduro	0.7720	x	0.0596	3.807e-9
Maduro	0.0045	0.0596	x	6.6601e-7
Sobremaduro	3.7693e-9	3.807e-9	6.6601e-7	x

La masa sigue un patrón similar al del volumen, cuyos valores se presentan en la **Figura 4.11c** y la **Tabla 4.11**. Al analizar las medias de los datos experimentales de masa en los diversos estados de maduración de la variedad Castillo, se nota un incremento gradual a medida que avanzan estas etapas. Este fenómeno puede atribuirse a varios factores vinculados con el proceso de maduración, incluyendo cambios internos en su composición. Durante esta transformación, los granos acumulan una mayor cantidad de nutrientes y compuestos orgánicos, como azúcares y aceites, que contribuyen al aumento en su masa. Además, el proceso de maduración también podría conllevar una mayor acumulación de humedad dentro de los granos, lo cual también desempeña un papel en el incremento de la masa observada.

Tabla 4.11. Valores promedio de la masa y su desviación estándar (σ)

Estado de maduración	Masa (g)	σ
Inmaduro	1.290	0.286
Semimaduro	1.426	0.233
Maduro	1.561	0.314
Sobremaduro	1.780	0.459

Los P-valores, que se muestran en la **Tabla 4.12**, indican que los valores medios difieren entre el sobremaduro y las otras etapas de maduración.

Tabla 4.12. P-valores para la masa

P-valores para la masa				
	Inmaduro	Semimaduro	Maduro	Sobremaduro
Inmaduro	x	0.1775	0.0013	7.6132e-9
Semimaduro	0.1775	x	0.2540	8.9921e-6
Maduro	0.0013	0.2540	x	0.0048
Sobremaduro	7.6132e-9	8.9921e-6	0.0048	x

Finalmente, los resultados de densidad describen un comportamiento decreciente a lo largo de todas las etapas, como se muestra en la **Figura 4.11d**. y en la **Tabla 4.13**. El valor de la densidad experimental oscila entre 1,167 a 1,280 g/cm³ en todas las etapas, ver **Figura 4.11d**.

Tabla 4.13. Valores promedio de la densidad y su desviación estándar (σ)

Estado de maduración	Densidad [ρ] Medida	σ	Densidad [ρ] estimada	σ
		Densidad [ρ] Medida		Densidad [ρ] estimada
Inmaduro	1.280	1.580	1.211	0.083
Semimaduro	1.260	0.172	1.060	0.077
Maduro	1.205	0.175	1.131	0.145
Sobremaduro	1.167	0.495	1.127	0.125

El análisis de la densidad medida y estimada de los frutos de café arábico variedad Castillo proporciona una visión sobre los cambios en la composición interna de los frutos a medida que avanzan en su proceso de maduración. Estos datos muestran las diferencias en densidad en función de las etapas de maduración, lo que permite inferir sobre los procesos fisiológicos que ocurren durante el proceso.

Observando los valores dados en la **Figura 4.11d** y en la **Tabla 4.13**, se aprecia una tendencia general de disminución en la densidad a medida que los frutos avanzan de un estado inmaduro a uno sobremaduro. Este patrón de decremento podría sugerir un aumento en la proporción de contenido acuoso dentro de los frutos conforme maduran. Dicho concepto es congruente con las investigaciones anteriores, como se menciona en Sadeghian et al. (2015), donde se explica que en las primeras etapas de desarrollo, los frutos tienden a tener una mayor cantidad de agua en comparación con su material sólido. Esto se refleja en la densidad medida y

estimada en la etapa inmadura, donde se muestra un valor de 1.280 g/cm³ y 1.211 g/cm³ respectivamente.

En la etapa de madurez, los valores de densidad disminuyen. Este fenómeno podría relacionarse con la consolidación del grano y la pulpa en el interior del fruto, lo que podría desplazar una parte del contenido acuoso, reduciendo la densidad. Este proceso de consolidación y cambio en la composición es respaldado por los resultados del estado maduro, donde las densidades medidas y estimadas son 1.205 g/cm³ y 1.131 g/cm³ respectivamente.

Para el estado de sobremaduro, la densidad medida y estimada son relativamente cercanas entre sí. Esto podría indicar que, a pesar de la degradación de la pulpa mencionada por Sadeghian et al. (2015), el incremento en el contenido acuoso no es lo suficientemente significativo como para causar una disminución considerable en la densidad.

4.3.3 Resultados de pH.

El comportamiento del pH de la pulpa de café en función de su etapa de maduración se puede observar en la **Figura 4.12**. Se muestra que la etapa inmadura presenta menos acidez que las otras etapas. Este resultado también se puede ver en la **Tabla 4.10**, donde los valores de P sólo tienen diferencias significativas para la etapa inmadura frente a los demás. En términos generales, la pulpa del café Var. Castillo, es casi neutra o poco ácida. Sin embargo, para una etapa semimadura, los datos de pH promedio están por debajo de 6, lo que indica un aumento en la acidez hacia las etapas maduras y sobremadura.

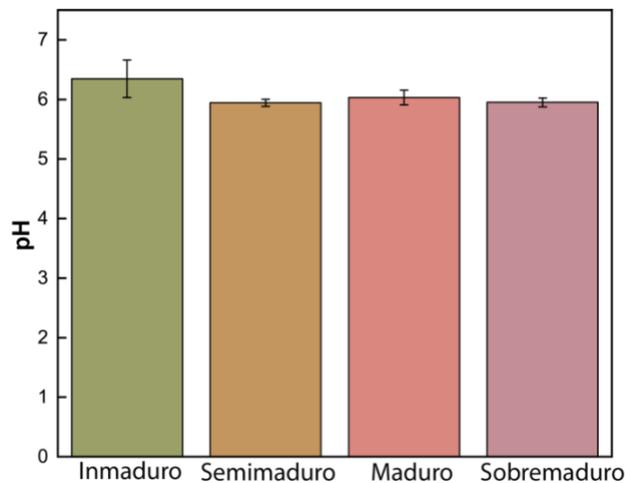


Figura 4.12. pH del fruto de café

Por tanto, se puede afirmar que el pH de la pulpa del Café arábica L. Var. Castillo tiene un valor de pH neutro estable (baja acidez) durante su maduración (6.35 a 5.94). Estos resultados son levemente diferentes en lo que respecta a la pulpa de la variedad colombiana, donde la variación del pH varía de 5.2 a 4.8 (Sampaio, 2000) o la pulpa Robusta de 7.8 a 7.3 (Murthy & Naidu, 2011) durante el proceso de maduración. Así, la variedad Colombia es ligeramente más ácida que el Café arábica L. Var. Castillo. Como se muestra en la Figura 4.12. Por ende, se infiere que el pH de la pulpa disminuye debido a un proceso de fermentación en el mucílago durante su maduración (Kader & Holcroft, 1999).

Tabla 4.14 P-valores para el pH

	P-valores para el pH			
	Inmaduro	Semimaduro	Maduro	Sobremaduro
Inmaduro	x	5.3032e-5	0.00149	6.6924e-5
Semimaduro	5.3032e-5	x	0.6775	0.9998
Maduro	0.00149	0.6775	x	0.7232
Sobremaduro	6.6924e-5	0.9998	0.7232	x

4.3.4 Índices de firmeza

Las pruebas de compresión se realizaron en una máquina de ensayos universal Mark10 ESM303. Las curvas de fuerza-desplazamiento se obtuvieron en cada una de las direcciones ortogonales y en cada una de las etapas de maduración identificadas en el capítulo 3. La

Figura 4.13 muestra la fuerza de compresión media, con su desviación estándar vs. el desplazamiento, en cada dirección ortogonal y para todas las etapas de maduración. El cambio de firmeza se puede observar a lo largo del proceso de maduración de los frutos del café.

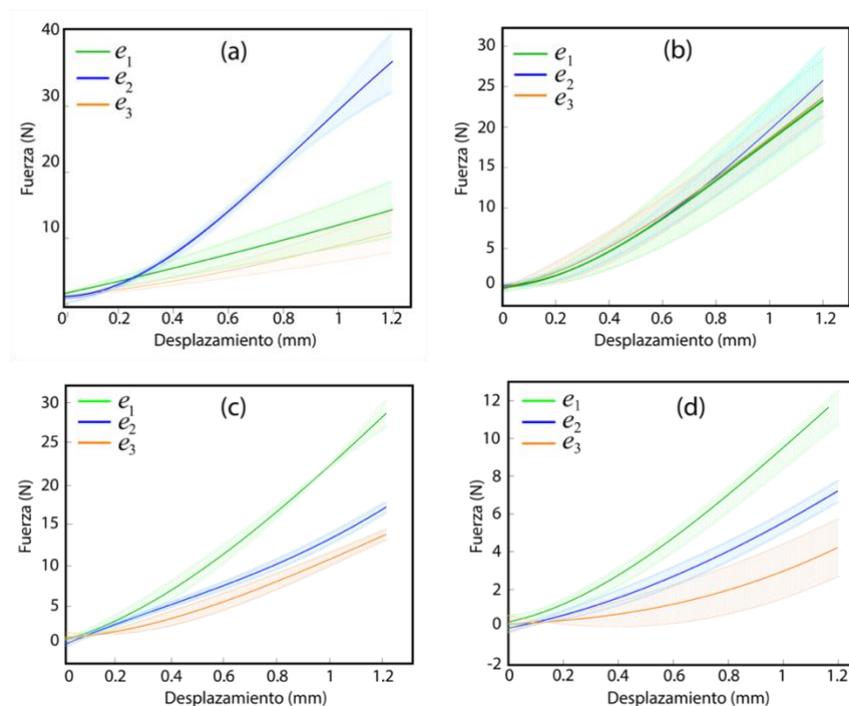


Figura 4.13 Índice de firmeza medido de todos los estados de maduración. (a) Inmaduro. (b) Semimaduro. (c) Maduro. (d) Sobremaduro

En la **Figura 4.13a**, se puede ver que la firmeza en la dirección e_2 es mayor para la etapa inmadura que en las otras dos direcciones. En comparación, el estado semimaduro no muestra una diferencia significativa en el índice de firmeza medido en las tres direcciones ortogonales, como se muestra en la **Figura 4.13b**. En la etapa madura (**Figura 4.13c**), comienza a exhibirse una mayor rigidez en la dirección e_1 con respecto a las dos direcciones ortogonales restantes. Esta distancia se mantiene en el estado Sobremaduro, aunque es evidente una disminución general del índice de firmeza en las tres direcciones ortogonales (**Figura 4.13d**). Claramente, la firmeza varía con la etapa de maduración de la fruta. En general, se puede observar una pérdida de firmeza en el fruto del café a lo largo de su proceso

de maduración. Este comportamiento podría explicarse por una pérdida de humedad reportada en (Herrera et al., 2012) para frutos de café arábica L. Var. Colombia.

Para cuantificar la firmeza de los frutos del café durante las etapas de maduración, se realizó un cálculo mediante una regresión lineal. De estos resultados se puede considerar que K_i , con el subíndice $i = 1, 2$, representa la sección de la curva del índice de firmeza en la que se realizó la regresión lineal; de 0 a 0.6 mm para K_1 y de 0.6 a 1.2 mm para K_2 . La **Tabla 4.15** ilustra el parámetro K_i para todas las etapas de maduración y la dirección ortogonal de los tres frutos; observando que las curvas presenta un comportamiento no lineal en toda la caracterización.

Tabla 4.15. Parámetros de firmeza de los frutos de café [N/mm]

Dirección ortogonal	e_1		e_2		e_3	
	K_1	K_2	K_1	K_2	K_1	K_2
Inmaduro	10.218	11.522	23.188	38.507	6.361	9.808
Semimaduro	13.866	24.357	13.226	28.261	14.437	24.357
Maduro	12.361	20.325	8.560	11.234	5.116	9.739
Sobremaduro	6.912	11.887	4.432	7.548	1.636	4.983

CAPÍTULO 5 - DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES ELÁSTICAS DEL FRUTO Y DEL GRANO A TRAVÉS DE UN ENFOQUE NUMÉRICO – EXPERIMENTAL

5.1 Introducción

En los últimos años, la práctica de la cosecha selectiva de café ha experimentado un declive influenciado por diversos factores socioculturales y económicos. Estos aspectos están vinculados al aumento de los costos y a las dificultades operativas que han afectado la producción. No obstante, en respuesta a esta situación, han emergido tecnologías de cosecha mecanizada en la agricultura que se perfilan como soluciones prometedoras. Estas innovaciones tienen como objetivo mejorar la competitividad del café colombiano en los mercados internacionales (OECD, 2015).

El desarrollo de métodos de cosecha mecanizada, procesamiento, almacenamiento, y clasificación requiere un conocimiento previo de las propiedades físicas y mecánicas del fruto de café (Moreira et al., 2016). Bajo esta premisa se han desarrollado dispositivos para los cultivos de Colombia como los utilizados para el tronco del árbol (Oliveros et al., 2005a), y en las ramas (Oliveros et al., 2005b) con diferentes tipos de actuadores. Estos proyectos indicaron una eficiencia global en la cosecha, tanto de frutos maduros, como frutos cosechados totales del 13% y 71%, respectivamente. Debido a esa baja eficiencia en sus funcionamientos, la cosecha manual todavía es la preferida en Colombia. Los estudios sobre cosecha mecanizada para los frutos de café se enfocaron inicialmente en el árbol (Torres, 1998; Torres et al., 2000; Granja & Oliveros, 2003) y luego en las ramas (Ciro et al., 1998; Torres et al., 1999). Debido a los problemas en la validez de las propuestas, surge la necesidad de estudiar métodos para el desarrollo de tecnologías de cosecha de frutos de café, teniendo como desafío el estimular selectivamente los frutos maduros para su desprendimiento usando vibraciones.

Por lo tanto, el propósito principal de este capítulo radica en identificar el modelo que mejor emule el comportamiento mecánico presente en los cuatro estados de maduración del fruto

de café. Esto se logra a través de la simulación de diversos modelos mediante el uso de elementos finitos, los cuales fueron creados siguiendo los procedimientos que se detallan a continuación: se simula la compresión en los ejes principales utilizando el software ANSYS 21.1 R2, que permite determinar la rigidez del fruto. Para llevar a cabo esta tarea, se realiza un escaneo tridimensional de cada fruto mediante un escáner 3D. Con el propósito de lograr una precisión óptima en el escaneo, se aplica una capa de barniz a cada fruto.

Posteriormente, se realiza un proceso de post-procesamiento en cada fruto, lo que culmina en la obtención de un modelo CAD. En cada uno de estos, se aborda la topología del fruto como una entidad única que comprende la piel, que integra el endocarpo, el mesocarpo y el exocarpo. Esta asunción se realiza con el fin de simplificar el modelo y tratar al fruto como una unidad cohesiva. En lo que respecta a los materiales utilizados en la simulación, se extrajeron datos de las curvas experimentales de compresión e indentación, específicas para los diversos estados de maduración del fruto. Estos datos proporcionaron los parámetros necesarios para la simulación.

Posteriormente, se llevaron a cabo tres procesos de simulación, durante los cuales se establecieron comparaciones entre las curvas experimentales de los frutos sometidos a compresión y los resultados obtenidos mediante el software. Finalmente, los datos presentados exponen el comportamiento integral del fruto y brindan una comprensión más completa de su respuesta mecánica en los diferentes estados de maduración.

5.2 Materiales y métodos

5.2.1 Metodología para la determinación de las propiedades anisotrópicas del grano

La metodología implementada para el desarrollo de este capítulo se puede observar en el diagrama de la **Figura 5.1**, donde lo que se busca, con la ayuda de una serie de modelos de elementos finitos (FEM), es realizar la simulación de la compresión de los frutos de café para que se generen sus correspondientes gráficas de firmeza; pretendiendo igualar o aproximar

estos resultados a los generados en los experimentos presentados en la sección 4.3.4 del capítulo 4. Esto permite deducir las propiedades del grano.

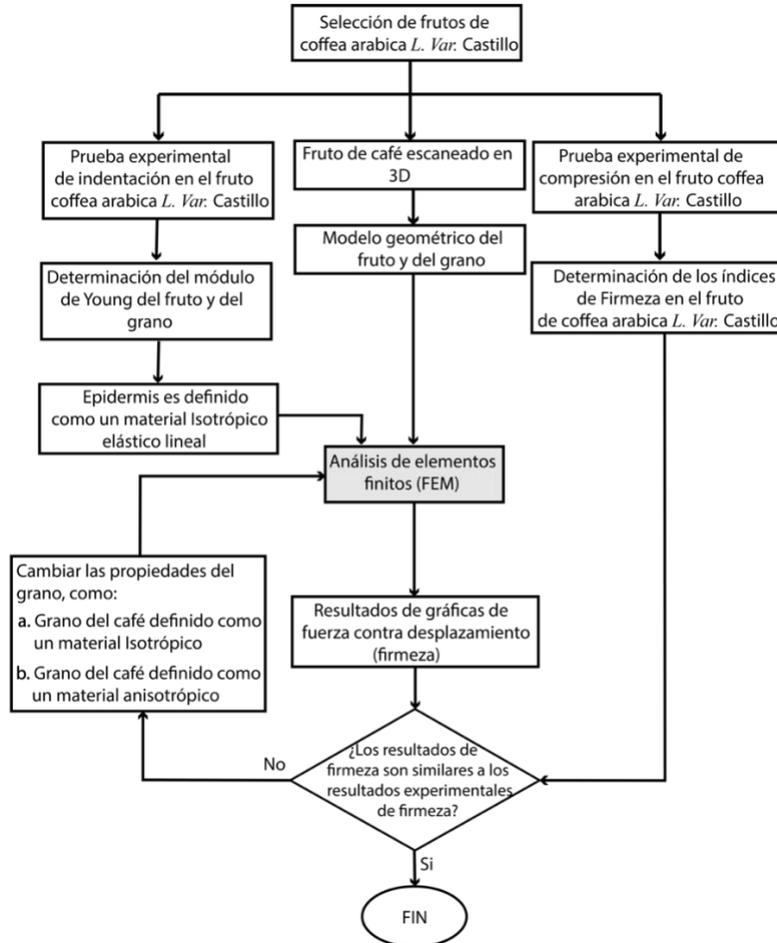


Figura 5.1. Metodología para determinar las propiedades anisotrópicas

Sin embargo, para simular la compresión utilizando la técnica del modelo de elemento finitos, se requiere de los resultados experimentales de indentación, los cuales son presentados en la sección 5.2.3, y de los frutos escaneados en 3D, como se muestra en la sección 5.2.2. Se debe tener en cuenta que para llegar a un resultado que defina las propiedades del grano se deben realizar iteraciones cada vez que los datos de firmeza (producto de la simulación) no se aproximen a los resultados experimentales; por ello se deben estar haciendo cambios en las propiedades del material. Ahora bien, en los siguientes apartados se explicará la manera de

obtener las diferentes entradas que son requeridas para desarrollar el modelo de elementos finitos (FEA).

5.2.2 Escaneo del fruto de café en 3D e integración con el grano

Este proceso se realiza como una parte necesaria para el modelado de elementos finitos. Los frutos seleccionados y categorizados con herramientas de colorimetría, son escaneados con la ayuda de una estructura HP 3D Light Scanner Pro el cual contiene: un Proyector Acer® K132, una Cámara HP® 3D de 2.3 MP Cam Pro, una base giratoria HP® 3D Automatic Turntable Pro y un Panel de Calibración HP®, como se puede ver en la **Figura 5.2**. Es de aclarar que el panel de calibración es una sugerencia del fabricante para ajustar la adquisición al tamaño del objeto, estos ajustes se realizan según lo que se muestra en la **Tabla 5.1**.

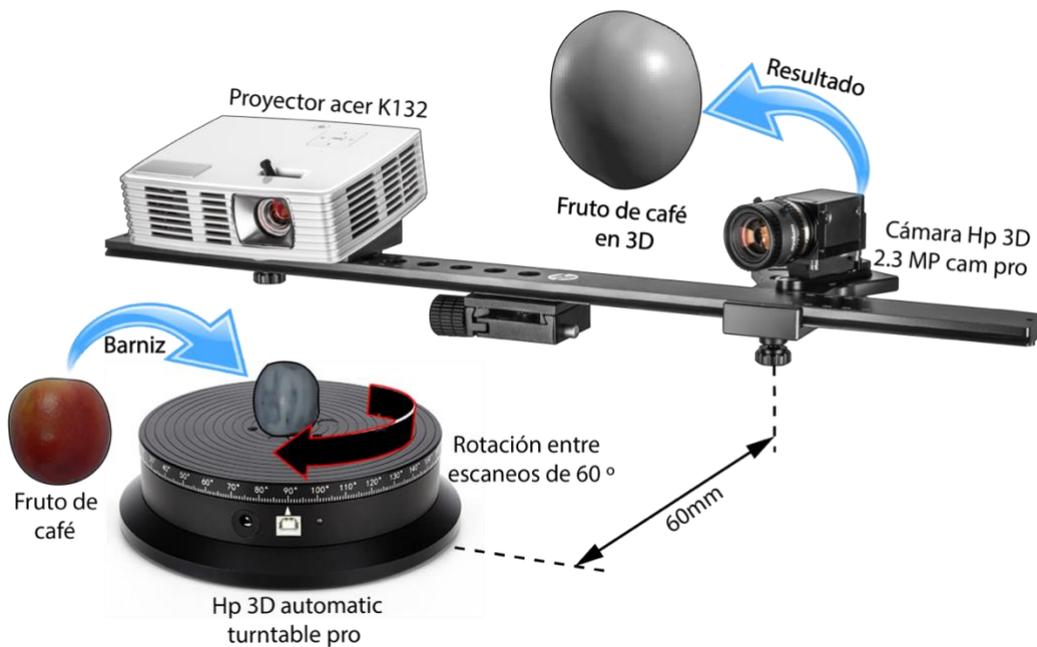


Figura 5.2. Montaje para adquisición de imágenes 3D de los frutos de café

El proceso de escaneo se inicia con la preparación de cada una de las muestras, ya que se deben recubrir cada uno de los frutos con un barniz de color gris, como se observa en la **Figura 5.2**, esto con el fin de evitar el exceso de brillo, ya que de no hacerse se puede producir

un error en el resultado. Es de aclarar que la aplicación de barniz en el pericarpio no afecta el proceso del escaneo.

Tabla 5.1. Escala del patrón de calibración según el objeto escaneado, HP 3D Cam Pro

Tamaño del objeto escaneado	Escala del patrón de calibración	Distancia cámara - proyector	Distancia escáner - objeto	Resolución esperada
< 30 mm	30 mm	30 mm	90 mm	< 0.05 mm
50 mm	60 mm	40 mm	120 mm	0.05 mm
70 mm	60 mm	65 mm	180 mm	0.08 mm
90 mm	120 mm	80 mm	220 mm	0.10 mm
120 mm	120 mm	110 mm	300 mm	0.13 mm
150 mm	120 mm	125 mm	350 mm	0.15 mm
200 mm	240 mm	160 mm	450 mm	0.20 mm
300 mm	240 mm	250 mm	700 mm	0.30 mm
500 mm	240 mm	400 mm	1200 mm	0.50 mm
En general	Similar al objeto	Ángulo de 15° a 25° entre ellos	El objeto debe llenar la vista de la cámara	Alrededor del 0.1% del tamaño del objeto

Después de realizar este procedimiento, se deben ubicar cada una de las muestras en el centro de la base giratoria para el proceso de escaneo; la adquisición se controla desde el software HP3DScan5®, donde se realiza un total de 6 escaneos por fruto, programando una rotación automática de 60 grados por espécimen, como se muestra en la **Figura 5.2**. Se debe tener en cuenta que la distancia del punto de escaneo (cámara Hp 3D), hasta la estructura HP 3D Light Scanner Pro debe ser de 60 mm, según las condiciones recomendadas por el fabricante, además no debe existir una fuente de iluminación adicional o diferente a la generada por el Proyector Acer® K132.

El fruto de café se captura en un modelo tridimensional (3D) mediante cada escaneo, como se puede observar en la **Figura 5.3**. El archivo resultante se crea en formato STL, debido a su capacidad para eliminar propiedades físicas como el color, además se implementa para definir la geometría del objeto a través de una malla de triángulos cerrados. Este formato también permite obtener la geometría tanto del fruto como del grano de café en un archivo liviano, mientras se preserva su estructura topológica. Sin embargo, es importante destacar

que el resultado no constituye un sólido en sí mismo, por lo que se requiere llevar a cabo un proceso adicional para transformarlo en un archivo sólido, utilizable en el software de análisis de elementos finitos.

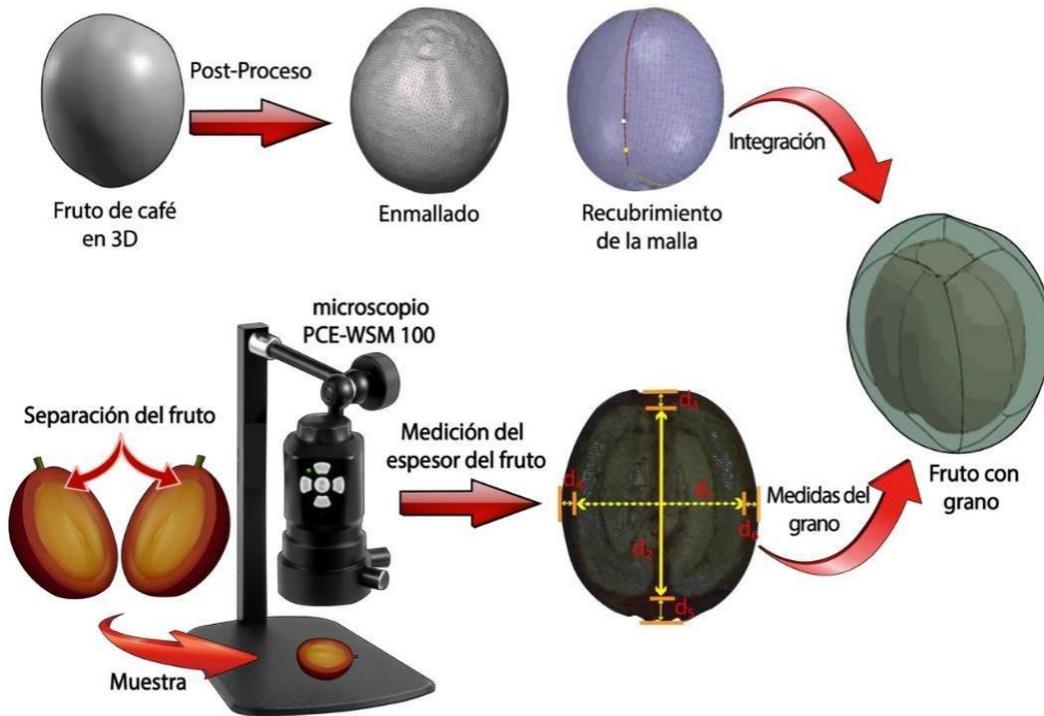


Figura 5.3. Fruto de café en 3D y Post proceso

Para iniciar el post-proceso, se debe realizar el enmallado de todos los frutos escaneados en 3D, utilizando el software Autodesk® Meshmixer®. Obteniendo una malla homogénea, como se observa en la **Figura 5.3**. Esto reduce el tamaño del archivo resultante, representando una ventaja para realizar la simulación de elementos finitos, aunque trae como consecuencia la pérdida de detalles en la geometría de la superficie, pero esto no representan una desventaja para la simulación, por el contrario, genera una reducción en el costo computacional del proceso, lo cual es una característica deseable en el análisis, debido a que la rugosidad de la superficie es un obstáculo a la hora de crear mallas para simulaciones por análisis de elementos finitos.

Luego se debe generar un recubrimiento en la superficie del enmallado, como se presenta en la **Figura 5.3**, utilizando el módulo SpaceClaim Document Manager® de Ansys®, permitiendo crear un sólido que se almacena en un formato IGES o Especificación de Intercambio Inicial de Gráficos (Initial Graphics Exchange Specification).

El siguiente paso implica la medición del espesor del fruto, considerando tanto el grano como la pulpa, y tomando en consideración las distintas dimensiones del fruto del café. Es importante destacar que este proceso resulta fundamental para la creación de un modelo en tres dimensiones (3D). La ejecución del procedimiento involucra la separación de un fruto real en dos partes, y con la asistencia del microscopio PCE-WSM 100, tal como se presenta en la **Figura 5.3**, se llevan a cabo las mediciones necesarias. Los datos adquiridos en esta etapa permiten la incorporación de las dimensiones del grano en cada uno de los estados de maduración a los modelos 3D.

5.2.3 Propiedades del fruto de café – indentación

La realización de los ensayos experimentales de indentación se llevaron a cabo con el fin de evaluar el módulo de elasticidad y de dureza, que se estiman a partir de los desplazamientos de carga y descarga (Rico et al., 2008), como se observa en la **Figura 5.4**, utilizados para evaluar las propiedades mecánicas en materiales compuestos (Czerner et al., 2015), y vegetales (Njeugna et al., 2016; Khan et al., 2021). Es de notar que las pruebas se pueden adaptar para predecir el comportamiento mecánico de materiales de tipo fibroso-biológico (Fuerte, 2014).

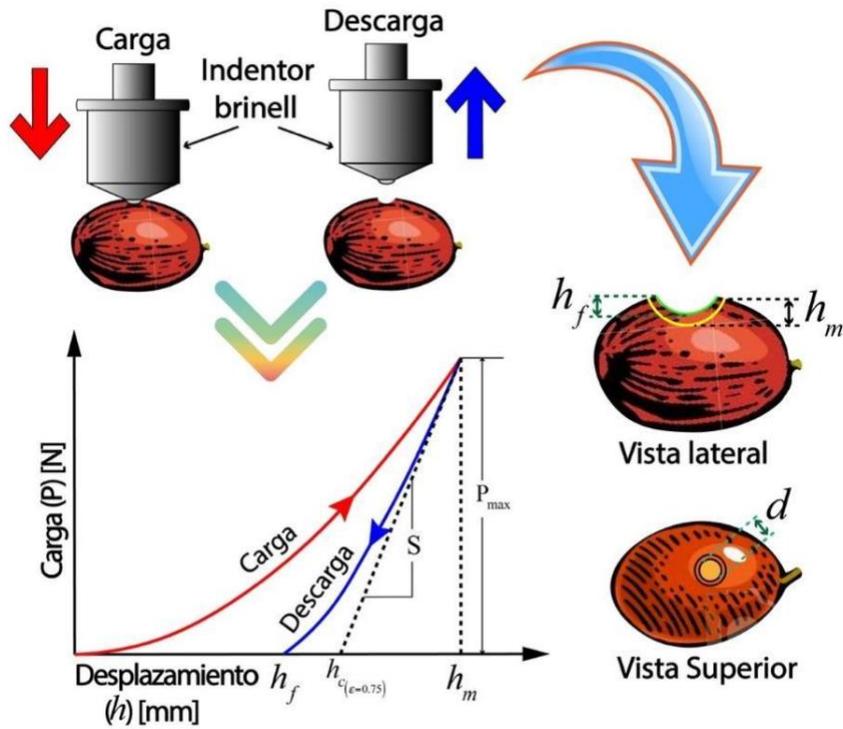


Figura 5.4. Proceso de carga y descarga y profundidades de hendidura sobre una fruta de café.

Esta técnica se usa ampliamente en la evaluación del módulo de elasticidad (E) y la dureza de la indentación (H), el cual es encontrado a partir de los desplazamientos de prueba durante la carga y descarga. Las propiedades elásticas están estrechamente relacionadas con el área de contacto, inferidas de los datos de la prueba, como la profundidad máxima de indentación (h_m), la profundidad después de la recuperación elástica (h_f), la rigidez de contacto (S) y la profundidad de contacto (h_c) (Oliver y Pharr, 1992). De acuerdo con la teoría del contacto elástico (Johnson et al., 1985), el módulo de elasticidad del material indentado (E) se puede estimar a partir de la rigidez de contacto que es definida como

$$S = \left(\frac{dP}{dh} \right)_{h=h_{\max}} \quad (5.1)$$

Un módulo reducido se puede estimar como una relación entre el indenter y el material del indenter (Oliver y Pharr, 1992), de la siguiente manera

$$E_r = \frac{1}{\beta} S \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{1}{\sqrt{A_c}}, \quad (5.2)$$

Donde β es un factor de corrección del indenteor ($\beta=1$ para un indenteor esférico); A_c es el área de contacto entre el indenteor y el material indenteado, a una profundidad h_c , definida como

$$h_c = h_{\max} - \varepsilon \frac{P_{\max}}{S}, \quad (5.3)$$

El parámetro geométrico empírico depende de la forma del indenteor (Oliver y Pharr, 1992). Donde para pruebas con un indenteor esférico ($\varepsilon = 0.75$), el área proyectada A_c se puede determinar mediante

$$A_c = a\pi^2 = \pi(2Rh_c - h_c^2), \quad (5.4)$$

donde R es el radio del indenteor y a es el radio de la trayectoria del indenteor sobre la fruta del café. Debido a que el material del indenteor sufre deformaciones durante la prueba de carga, los módulos elásticos de ambos materiales están relacionados en el módulo reducido (E_r), como

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i}, \quad (5.5)$$

Donde E es el módulo de Young de la fruta y ν es el coeficiente de Poisson. El subíndice i se refiere al material del indenteor. La dureza de la indentación es la presión de contacto entre el indenteador y el material indenteado. Por lo tanto, la dureza de la indentación se puede establecer de acuerdo con la definición general de presión (Oliver & Pharr, 1992):

$$H = \frac{P_{\max}}{A_c}, \quad (5.6)$$

Ahora bien, las pruebas experimentales fueron llevadas a cabo usando indenteor Brinell de 1mm de diámetro el cual va ajustado en una máquina de prueba universal Mark 10 ESM 303

junto con un medidor de fuerza, como se observa en la **Figura 5.5**. A este se le estableció una velocidad de avance de 0.5 mm / min. El proceso general consiste en aplicar una carga sobre el exocarpio de las diferentes muestras de cada estado maduración del fruto de café. Estableciéndose una profundidad de penetración en cada muestra, de la siguiente manera:

- Para frutos verdes y semimaduros 1 mm.
- Para los frutos maduros y sobremaduros 2mm.

Esta selección se debe a que los frutos maduros y sobremaduros presentan una recuperación elástica más lenta con respecto a los otros estados. Dichas condiciones fueron validadas a través de diversas pruebas experimentales cuyo montaje es representado en la **Figura 5.5**

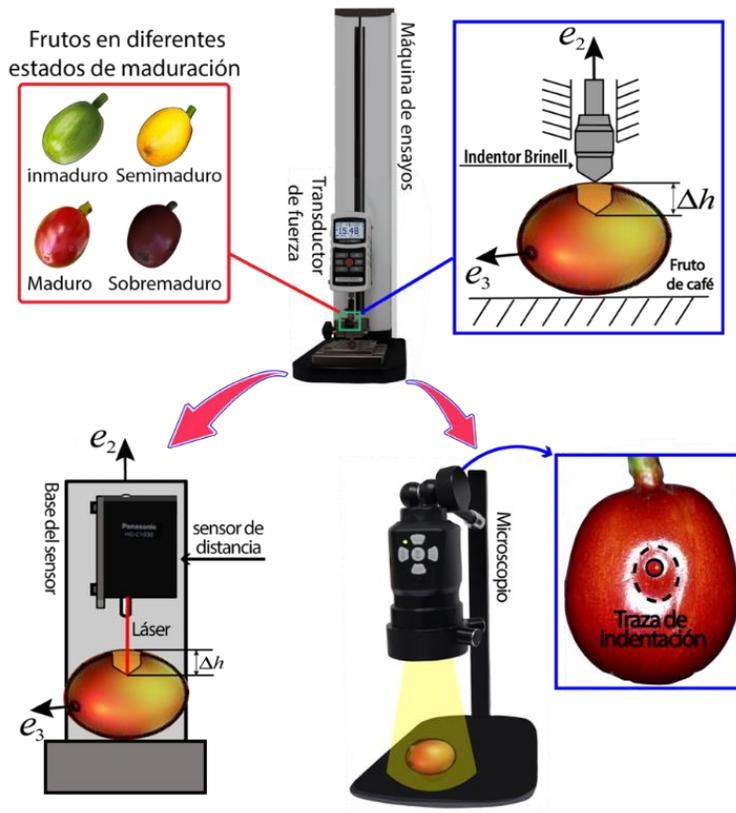


Figura 5.5. Configuración experimental de indentación

En este montaje se utiliza un microscopio PCE-WSM 100 para determinar el diámetro de la pista. Igualmente, con un láser para medir distancias, se caracteriza la profundidad de la recuperación elástica, tal como se observa en la **Figura 5.5**

5.2.4 Determinación experimental de la firmeza en el fruto del café

Para determinar la firmeza en el fruto del café, se efectuó un montaje experimental para pruebas de compresión el cual fue descrito en el capítulo 4, sección 4.2.8; en este proceso se realizaron ensayos de compresión para las muestras de frutos en todos los estados de maduración, como se muestra en la **Figura 5.6**, experimento de firmeza. En este se efectuó un registro fotográfico en tiempo real de los desplazamientos experimentados por el fruto durante sus etapas de compresión, que está percibida entre 0 a 1.2 mm de desplazamiento.

Las pruebas que se llevaron a cabo se realizaron en las tres direcciones principales de la siguiente manera, 5 frutos en la dirección e_1 , 5 frutos en la dirección e_2 y 5 frutos en la dirección e_3 . Las curvas de carga y desplazamiento fueron obtenidas para cada dirección ortogonal y son mostradas en los resultados de firmeza que están diferenciadas por estado de maduración y que se distinguen en la **Figura 5.6**. En estas gráficas, se puede observar que los frutos presentan disminución en su rigidez conforme aumenta su estado de maduración.

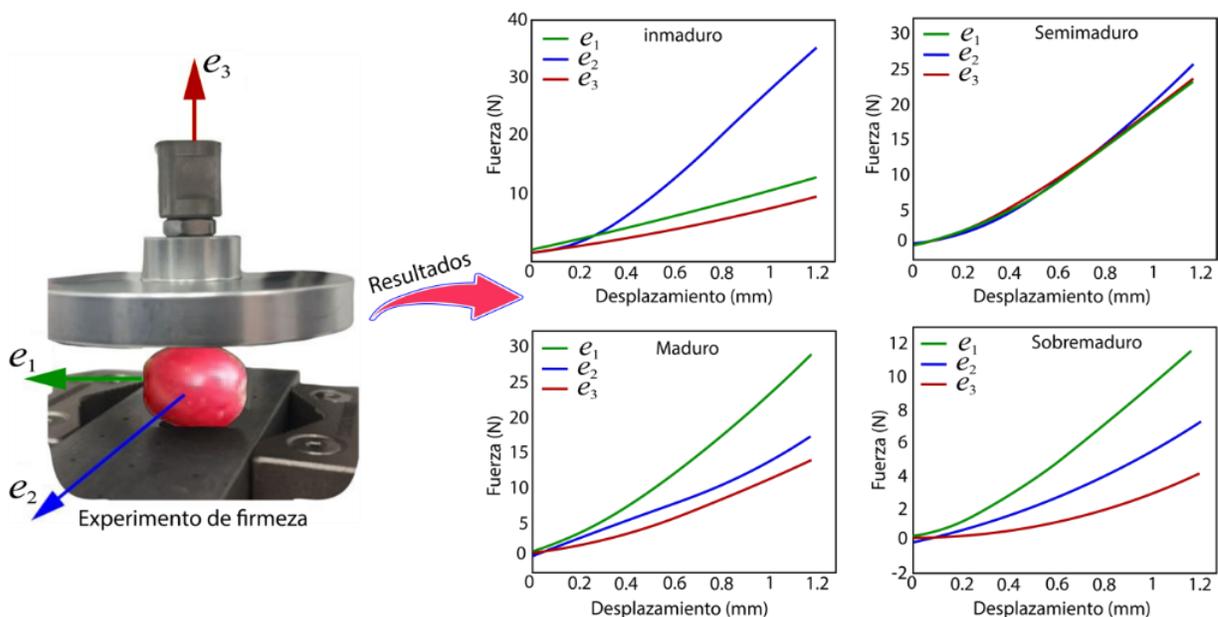


Figura 5.6. Índices de firmeza

5.2.5 Modelo de elementos finitos

Para la simulación por modelos de elementos finitos se utilizó el software ANSYS 21.1 R2, con el objetivo de determinar las propiedades mecánicas (módulo de Young E y relación de Poisson ν) en el fruto del café, y que sirven para encontrar las propiedades del grano. Inicialmente, para su realización se asumió que la topología del fruto es la piel, la cual integra el endocarpo, el mesocarpo, y el exocarpo en una única pieza; recordando que esto es obtenido por escaneo 3d y post procesado geométrico para su simulación, como se describe en la sección 5.2.2.

Ahora bien, el material asignado para generar cada simulación se obtuvo de los experimentos de compresión e indentación, como se describe en la sección 5.2.3 y 5.2.4. Donde para los modelos virtuales, se incluyeron dos placas de compresión con el propósito de aplicar una carga distribuida sobre el fruto, procurando configurar un desplazamiento hacia las tres direcciones principales del fruto (e_1 , e_2 y e_3) de forma tal que se logren evaluar las propiedades mecánicas en sus debidas direcciones, como se observa en la **Figura 5.7**. Para

propósitos de simulación se asume como material para las placas de compresión el acero estructural ($E = 200GPa$, $\nu = 0,3$).

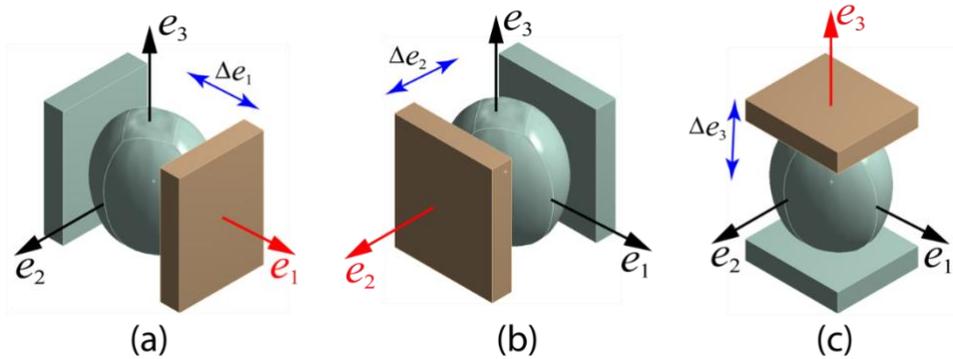


Figura 5.7. Placas de compresión en sus orientaciones principales a) Dirección e_1 . b) Dirección e_2 . c) Dirección e_3 .

Por último, se asigna el enmallado a cada uno de los modelos del fruto, utilizando elementos tetraédricos cuadráticos y para las placas de compresión se aplican elementos hexaédricos, como se observa en la **Figura 5.8**. Donde la cantidad de nodos obtenidos para las mallas de los modelos es descrita en la **Tabla 5.2**.

Tabla 5.2. Descripción de los nodos por cada uno de los estados de maduración

Estado de maduración	Número de nodos de la malla
Verde	99268
Semimaduro	98860
Maduro	100000
Sobremaduro	110250

Para la **Figura 5.8**, se aplicó una condición de desplazamiento y de soporte fijo en la parte alta de la placa superior y en la parte baja de la placa inferior. Ahora el desplazamiento se definió en dirección perpendicular a la superficie de la placa, y los contactos entre las piezas que conforman el fruto de café fueron definidos con condición de pegado. También se emplearon contactos con coeficiente de fricción infinito entre las placas y la piel del fruto para evitar su movimiento. La fuerza de reacción generada se monitoreó en el soporte fijo con una función del desplazamiento aplicado.

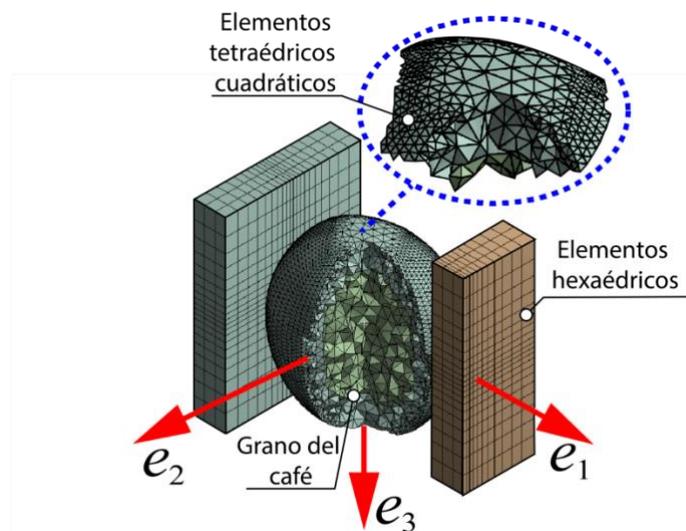


Figura 5.8. Modelo de elementos finitos enmallado del fruto de café maduro junto con las placas de compresión.

El proceso de simulación FEM, se compone de varios pasos. Uno de ellos es la replicación del comportamiento mecánico que fue determinado en capítulos anteriores, a través de al menos una iteración. Cada uno de los procedimientos se define en los siguientes apartados, entendiendo que con el avance de las simulaciones lo que se busca es encontrar la metodología que genere la mejor aproximación a los resultados experimentales.

5.2.6 Procedimiento de la primera simulación

En el primer procedimiento de simulación, que se puede ver representado en la **Figura 5.9**, el material utilizado para el modelo del fruto del café y su grano, se asumió como isotrópico elástico lineal, esto significa que se busca determinar dos constantes del material para cada dirección de carga, por cada estado de maduración. Así mismo, el modelo de ese material se basa en las curvas elásticas que son el resultado de las pruebas de compresión en las tres direcciones principales del fruto, que se define en la sección 5.2.4. En el momento que las curvas elásticas (producto de la simulación), tiendan hacia las obtenidas mediante los experimentos de compresión, se termina el proceso para determinar las propiedades del material del fruto.

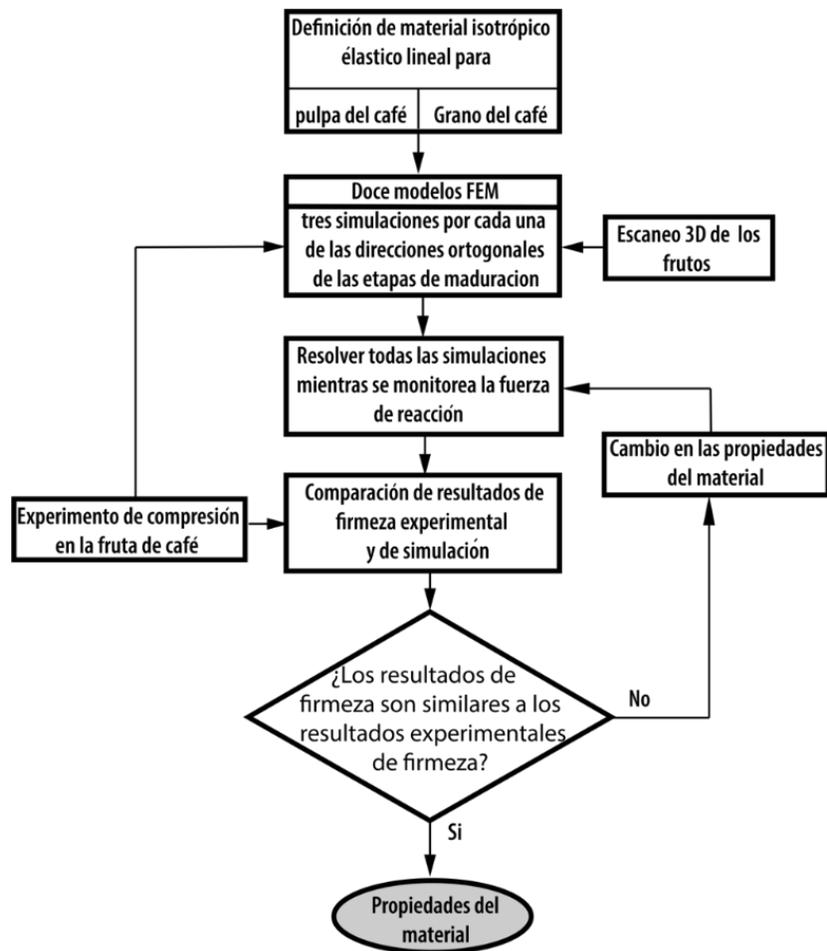


Figura 5.9. Diagrama de flujo de primera simulación

Los resultados entregados por esta metodología de simulación se pueden ver en la sección 5.3.3. Sin embargo, se procede a realizar una metodología adicional que mejore la forma de aproximar las curvas elásticas de la simulación y la experimental, como se muestra a continuación.

5.2.7 Procedimiento de la segunda simulación

Para el segundo procedimiento, cuyo diagrama se puede observar en la **Figura 5.10**, el modelo se inicia asumiendo la piel del fruto como un material isotrópico elástico lineal, utilizando los valores del módulo de Young estimados en las pruebas de indentación que son descritas en la sección 5.2.3. Ahora bien, el proceso de comparación de resultados es similar

a la descripción de la sección 5.2.6. Adicionalmente, el material del grano se definió con un modelo de material elástico isotrópico cuyas propiedades fueron obtenidas desde la indentación. Es decir, este modelo supone que el fruto de café presenta una rigidez global. En este caso se llevaron a cabo 3 simulaciones para cada estado de maduración para un total de doce simulaciones.

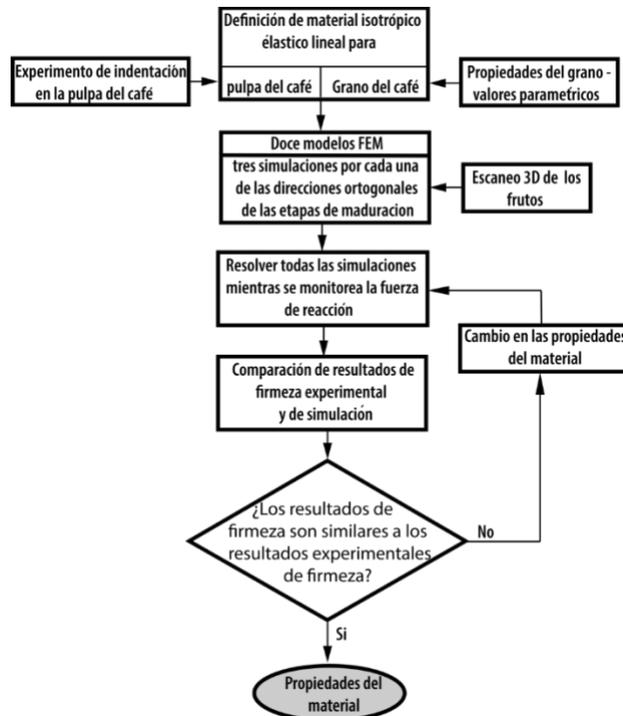


Figura 5.10. Diagrama de flujo de segunda simulación

5.2.8 Procedimiento de la tercera simulación

Para la tercera simulación, cuyo diagrama se puede ver la **Figura 5.11**, se supuso la piel del fruto como si fuera un material ortótropico elástico lineal obtenido desde las pruebas experimentales de indentación. Este cambio se da debido a que se evidenciaron diferencias significativas entre el modelo numérico y experimental en los procedimientos de simulación anterior. Entonces, para la obtención de una solución aproximada a las curvas experimentales se varió paraméricamente el módulo de elasticidad del grano en cada dirección ortogonal

hasta lograr convergencia en todos los modelos. Se recalca que este modelo permitió generar un resultado más aproximado que las dos simulaciones anteriores.

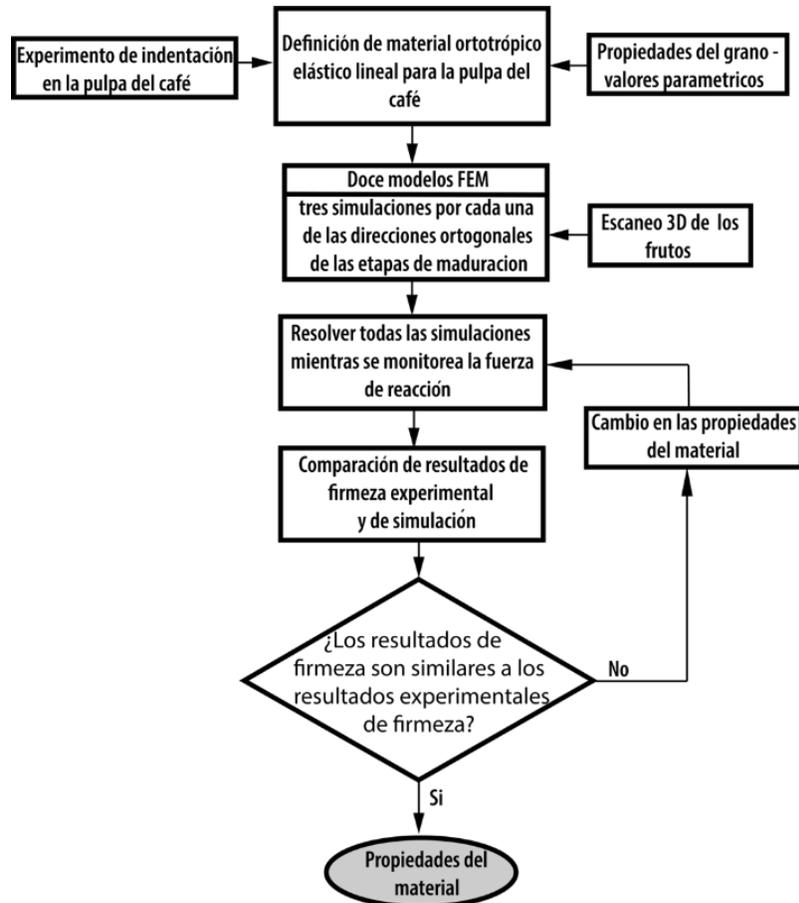


Figura 5.11. Diagrama de flujo de tercera simulación

5.3 Resultados y discusión

5.3.1 Curvas de fuerza contra desplazamiento

Las pruebas experimentales de indentación generan una serie de curvas de fuerza contra desplazamiento. En la **Figura 5.12** se ilustra la manera en que el fruto presenta una recuperación elástica después de realizar un proceso de carga.

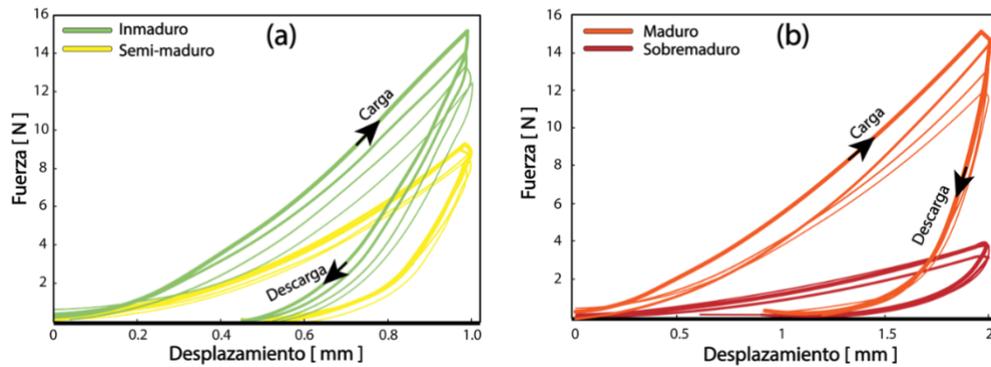


Figura 5.12. Curvas de carga y descarga para el fruto de café obtenidas experimentalmente con indentación

Ahora bien, al momento de crearse una huella de profundidad máxima en la piel del fruto, producto del proceso de carga con el indenter, la fuerza aplicada y su recuperación muestran la rigidez de la fruta. En la **Figura 5.12**, se observa una pérdida de rigidez conforme avanzan los estados de maduración, esto se evidencia por la disminución en la carga máxima soportada a una profundidad de hendidura fija. Esta pérdida de firmeza puede explicarse por el mayor contenido de agua del fruto en las últimas etapas de maduración respecto a las primeras (Marín et al., 2003).

5.3.2 Determinación del módulo de Young del fruto por indentación

Con los resultados de las pruebas experimentales, el uso de las ecuaciones (5.5), (5.6), y la estimación del coeficiente de Poisson de 0.3 (Khodabakhshian & Emadi, 2011), se logró determinar el módulo de Young para el fruto, como se presenta en las barras de la **Figura 5.13**.

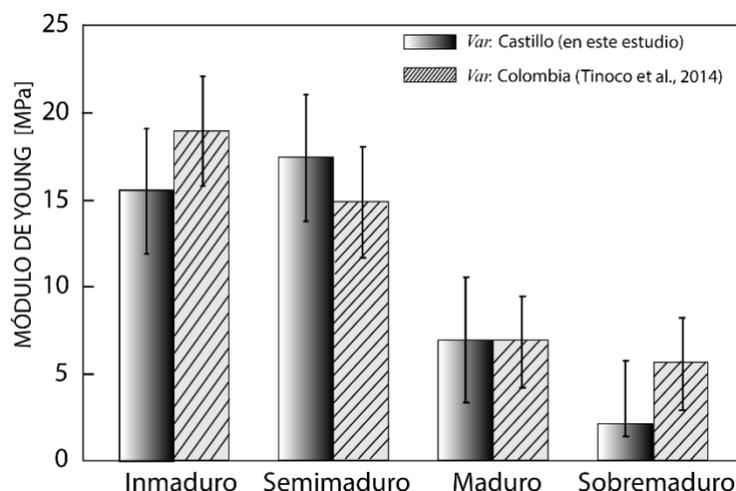


Figura 5.13. Comparación de resultados entre los módulos de Young de la variedad Castillo y la variedad Colombia. Los datos de la variedad Colombia son extraídos de [Tinoco et al. \(2014\)](#).

Se observa que la capacidad de recuperación elástica de la pulpa se empieza a perder desde la etapa de Semimaduro; sin embargo, si se compara gráficamente con el estudio realizado por [\(Tinoco et al., 2014\)](#) en la **Figura 5.13**, se puede advertir que esta característica, para la variedad Castillo tiene unos niveles de aumento que van desde el inmaduro hasta el Semimaduro, mientras que para la variedad Colombia, se encuentra en una disminución constante a lo largo de todos los estados de maduración, una comparación mas precisa se brinda en la **Tabla 5.3**

Tabla 5.3. Comparación de las medias de los módulos de Young para la variedad Castillo y la variedad Colombia

Estado de maduración	Variedad Castillo	Variedad Colombia
	Módulo de Young [Mpa]	Módulo de Young [Mpa]
Inmaduro	15.4691	18.8968
Semimaduro	17.3653	14.8366
Maduro	6.8862	6.9187
Sobremaduro	2.0958	5.6737

5.3.3 Resultados primera simulación

Las gráficas que se observan en la **Figura 5.14**, son los resultados de la simulación de las pruebas de compresión en el conjunto fruto-grano, donde el procedimiento realizado se

explica en la sección 5.2.5 y 5.2.6. Estas se dividen según su estado de maduración, donde la **Figura 5.14a**, corresponde al estado inmaduro en las tres direcciones ortogonales; la **Figura 5.14b**, es el estado semimaduro en las tres direcciones ortogonales; la **Figura 5.14c**, es el estado maduro en las tres direcciones ortogonales; y la **Figura 5.14d**, es el estado sobremaduro en las tres direcciones ortogonales.

Para todas las graficas, la fuerza de reacción resultante se trabaja en un desplazamiento de 0.6 a 1.2 mm, debido a que en el rango de 0 a 0.6 mm, la simulación presenta problemas de convergencia. Las curvas de los resultados FEM, tanto para las direcciones ortogonales e_1 , e_2 , y e_3 , se comparan con sus correspondientes datos experimentales, encontrando que existen diferencias entre cada una de las curvas comparadas, por ejemplo, para el estado inmaduro, **Figura 5.14a**, se evidenció la mayor correlación entre las curvas para la dirección e_3 . Así mismo para el estado semimaduro, **Figura 5.14b**, las soluciones más aproximadas se encuentran en las direcciones e_1 y e_3 . En cuanto al maduro, **Figura 5.14c**, el modelo más aproximado es en la dirección e_3 ; por último, para el sobremaduro, **Figura 5.14d**, la mejor aproximación es en e_3 .

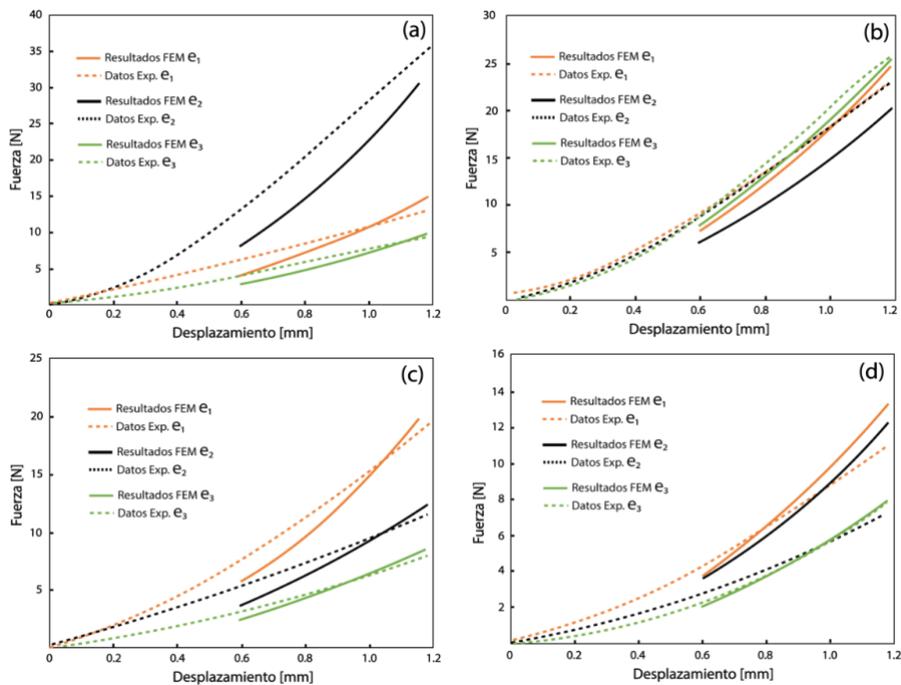


Figura 5.14. Comparación de curvas elásticas de la primera simulación y los datos experimentales. (a) Inmaduro. (b) Semimaduro. (c) Maduro. (d) Sobremaduro.

Los resultados de este modelo se pueden considerar como una solución preliminar para la definición de un material, con valores de módulo de elasticidad y módulo de Poisson obtenidos en las tres direcciones, como se puede ver en la **Tabla 5.4**. Sin embargo, estos valores no tienen una aproximación cercana a los datos en la forma experimental, por ello se realiza una segunda simulación utilizando una metodología diferente.

Tabla 5.4. Medias de los resultados primera simulación de E y ν para la piel y grano del fruto.

Estado	skin E [MPa]	skin ν [-]	grain E [MPa]	grain ν [-]
Inmaduro	4.50	0.27	12.67	0.32
Semimaduro	5.25	0.27	21.75	0.37
Maduro	2.75	0.37	14.58	0.37
Sobremaduro	1.92	0.30	9.92	0.37

5.3.3.1 Análisis de varianza para comprobar la similitud de las curvas elásticas para los resultados de primera simulación

Los datos que se observan en la **Tabla 5.5**, corresponden a las pruebas ANOVA de un solo factor con valor de significancia de 0.05, lo que corresponde a un 95% de confiabilidad en la comparación de las diferencias estadísticas de las curvas que se presentan en la **Figura 5.14**. En esta tabla se pueden observar que las diferencias significativamente estadísticas, al comparar las curvas elásticas, corresponden al 75%, dejando al 25% de las curvas con unas diferencias no significativas.

Tabla 5.5. P-valores para la comparación de las curvas elásticas entre los resultados FEM y los datos experimentales, entre las diferentes direcciones ortogonales y estados de maduración, para la primera simulación

Estado de maduración	FEM - Experimental	FEM - Experimental	FEM - Experimental
	e_1	e_2	e_3
Inmaduro	0.0082	0.2649	0.0581
Semimaduro	0.0129	0.1825	0.0167
Maduro	0.0185	0.0229	0.0096
Sobremaduro	0.0011	1.6928e-07	0.0024

Por lo tanto, estas diferencias sugieren la realización de una segunda simulación para mejorar los resultados, buscando un mayor acercamiento entre las curvas comparadas.

5.3.4 Resultados segunda simulación

En esta sección se pueden evidenciar los resultados de firmeza generados por la segunda simulación, ver **Figura 5.15**, cuyo procedimiento está descrito en la sección 5.2.7; estos se comparan con los resultados de firmeza generados experimentalmente. En este conjunto de gráficos, específicamente en la **Figura 5.15a**, que corresponde a la clasificación del fruto inmaduro, se observa que la curva resultante más aproximada a la fase de experimentación fue la dirección ortogonal e_2 , mientras que para e_1 y e_3 las curvas no presentan una aproximación.

Ahora para el estado Semimaduro, el cual se puede ver en la **Figura 5.15b**, la mejor aproximación se da en la curva e_3 . En el caso del estado maduro, que se muestra en la **Figura 5.15c**, se presentaron aproximaciones entre las curvas en las direcciones ortogonales e_1 y en e_3 , mientras en e_2 , se evidenció una notable diferencia. Por otra parte, para el estado Sobremaduro, mostrado en la **Figura 5.15c**, se presentó una aproximación para la curva obtenida en e_3 , mientras en e_1 y e_2 se evidenciaron unas diferencias notables.

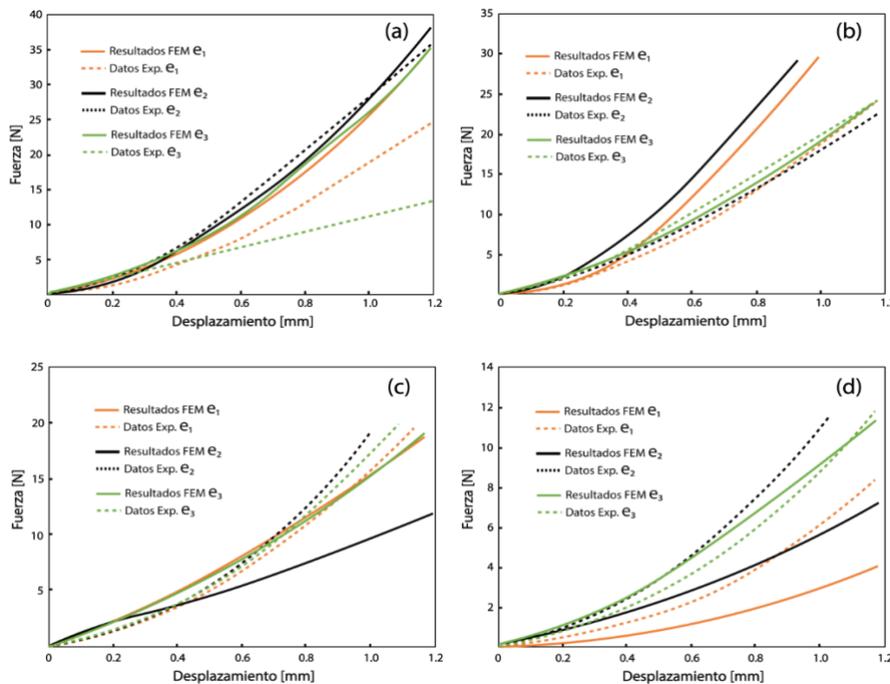


Figura 5.15. Comparación de curvas elásticas de la segunda simulación y los datos experimentales. (a) Inmaduro. (b) Semimaduro. (c) Maduro. (d) Sobremaduro.

Con los datos obtenidos de la simulación en elementos finitos, se calcularon los valores de módulo de Young y relación de Poisson para la piel y el grano, cuyos valores son reportados en la **Tabla 5.6**.

Tabla 5.6. Medias de los resultados segunda simulación de E y ν para la piel y grano del fruto.

Estado	skin E [MPa]	skin ν [-]	grain E [MPa]	grain ν [-]
Inmaduro	19.0	0.30	12.5	0.30
Semimaduro	9.0	0.30	22.0	0.30
Maduro	7.0	0.30	14.0	0.30
Sobremaduro	2.5	0.30	10.0	0.30

5.3.4.1 Análisis de varianza para para comprobar la similitud de las curvas elásticas para los resultados de la segunda simulación

Los valores que se observan en la **Tabla 5.7**, corresponden a las pruebas ANOVA con un factor de significancia de 0.05. Donde este análisis estadístico corresponde a la comparación de las curvas elásticas presentada en la **Figura 5.15**. En esta tabla se puede observar que las diferencias significativamente estadísticas, al comparar las curvas elásticas, corresponden al 25%, dejando al 75% de las curvas con unas diferencias no significativas.

Tabla 5.7. P-valores para la comparación de las curvas elásticas entre los resultados FEM y los datos experimentales, entre las diferentes direcciones ortogonales y estados de maduración, para la segunda simulación

Estado de maduración	FEM - Experimental	FEM - Experimental	FEM - Experimental
	e_1	e_2	e_3
Inmaduro	0.1523	0.9066	0.0020
Semimaduro	0.4641	0.2564	0.9234
Maduro	0.7191	0.2711	0.6814
Sobremaduro	0.0027	0.0357	0.9946

Esto mejora significativamente los resultados dados para la primera simulación, sin embargo, se realiza un tercer proceso de simulación, que tenga mayor aproximación entre las curvas elásticas de las simulaciones y las curvas elásticas experimentales.

5.3.5 Resultados tercera simulación

Para generar este último resultado se implementa el procedimiento descrito en el apartado 5.2.8. En esta sección, al igual que las dos anteriores, se realiza la comparación de las curvas de firmeza, simulación contra experimentación en cada una de las direcciones ortogonales previamente definidas y distribuidas en los cuatro estados de maduración; donde cada uno de sus gráficos se pueden visualizar en la **Figura 5.16**. Cabe resaltar que las curvas obtenidas en este proceso de simulación son las más aproximadas a las curvas experimentales, convirtiéndose así en la solución más óptima, ya que replica consistentemente el comportamiento mecánico del fruto bajo cargas de compresión y mostrando las soluciones con una tendencia de aproximación en todas las direcciones de carga.

Haciendo una revisión particular en cada una de las gráficas, se puede observar que en la **Figura 5.16a**, que corresponde a la solución para el estado inmaduro, la curva de firmeza que tiene una mejor aproximación a su curva de comparación es en la dirección e_3 , seguido por la dirección e_2 y la dirección e_1 . Ahora bien, en la **Figura 5.16b**, estado semimaduro, la curva de carga que más se ajusta a su punto de comparación se dio en la dirección e_2 , sin embargo, se presenta que las otras dos direcciones también tienen una buena cercanía a sus curvas de referencia. Para la **Figura 5.16c**, estado maduro, las tres direcciones (e_1 , e_2 , e_3), tienen una aproximación similar a sus curvas de referencia. Por último, para el estado Sobremaduro, **Figura 5.16d**, la curva más aproximada a la referencia experimental es la dirección e_2 .

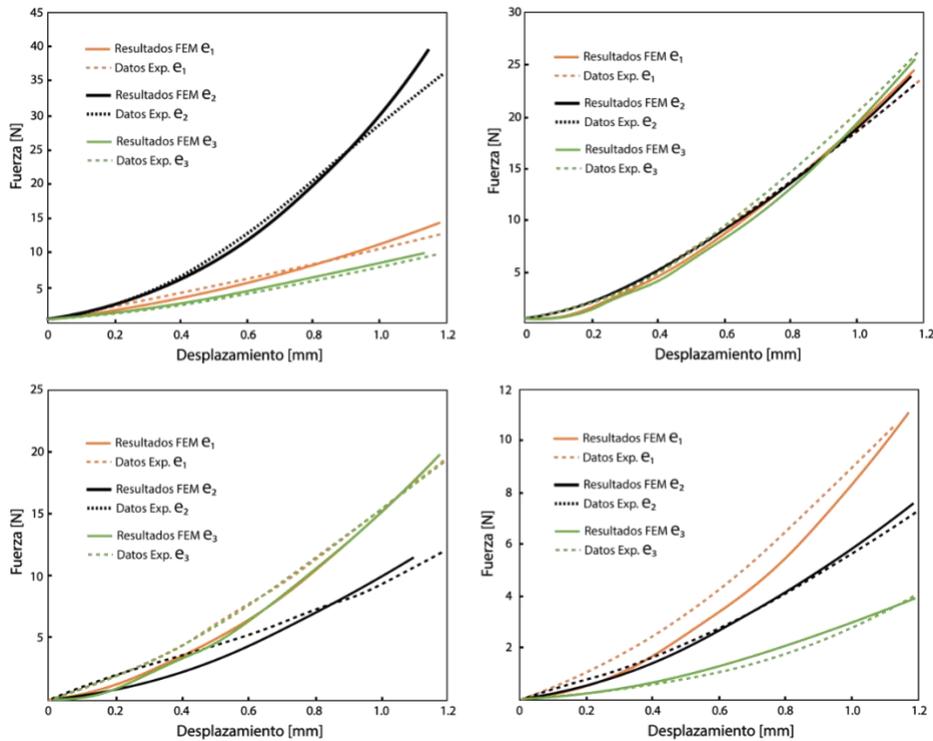


Figura 5.16. Comparación de curvas elásticas de la tercera simulación y los datos experimentales. (a) Inmaduro. (b) Semimaduro. (c) Maduro. (d) Sobremaduro.

Para lograr estos resultados en la simulación, se realizó una parametrización de los módulos de Young y relación de Poisson del grano de cada fruto. Para todos los frutos el módulo de elasticidad obtenido está consolidado en la **Tabla 5.8**.

Tabla 5.8. Resultados de E y nu para la piel y grano del fruto simulación modelo de elementos finitos simulación 3

Estado	skin E [MPa]	skin nu [-]	grain E_x [MPa]	grain E_y [MPa]	grain E_z [MPa]	grain ν_{xy} [-]	grain ν_{yz} [-]	grain ν_{zx} [-]	grain G_{xy} [MPa]	grain G_{yz} [MPa]	grain G_{zx} [MPa]
Inmaduro	19.0	0.30	3.5	1.5	12.0	0.25	0.25	0.25	0.9	1.7	2.6
Semimaduro	9.0	0.30	10.0	26.0	6.0	0.30	0.30	0.30	6.2	4.8	3.0
Maduro	7.0	0.30	12.0	14.5	3.5	0.30	0.30	0.30	5.1	2.7	2.5
Sobremaduro	2.5	0.30	11.0	1.0	2.2	0.30	0.30	0.30	1.3	0.6	1.9

Por lo tanto, se puede afirmar que este último modelo es el que tiene una mayor concordancia con el sistema físico y que con los datos generados, se puede llegar a generar un análisis de respuesta armónica del fruto en los rangos de frecuencia de interés, todo esto para entender

los esfuerzos generados en resonancias mecánicas de los frutos inmaduros, semimaduros, maduros y sobremaduros.

5.3.5.1 Análisis de varianza para para comprobar la similitud de las curvas elásticas en los resultados de la tercera simulación

La **Tabla 5.9**, corresponde a las pruebas ANOVA con un factor de significancia de 0.05. Donde el análisis estadístico corresponde a la comparación de las curvas elásticas presentada en la **Figura 5.16**. En esta tabla se pueden observar que las diferencias significativamente estadísticas, al comparar las curvas elásticas, corresponden al 0%; eso quiere decir que estadísticamente ninguna de las curvas elásticas comparadas tiene diferencias significativas.

Tabla 5.9. P-valores para la comparación de las curvas elásticas entre los resultados FEM y los datos experimentales, entre las diferentes direcciones ortogonales y estados de maduración, para la tercera simulación

Estado de maduración	FEM - Experimental	FEM - Experimental	FEM - Experimental
	e_1	e_2	e_3
Inmaduro	0.8429	0.9398	0.7988
Semimaduro	0.9883	0.9539	0.4506
Maduro	0.7387	0.2915	0.5986
Sobremaduro	0.5742	0.9685	0.5956

Esto permite reafirmar que el mejor procedimiento de simulación es el que se presentó en la sección 5.2.8, ya que todas las curvas elásticas tienen una buena aproximación a su punto de referencia que son las curvas elásticas de la parte experimental

5.3.6 Resultados de la distribución de esfuerzos máximos de Von Mises para la tercera simulación

Los datos gráficos que se presentan en la **Figura 5.17**, **Figura 5.18** y **Figura 5.19**, corresponden a los resultados de los esfuerzos de Von Mises, en las tres direcciones ortogonales, para el procedimiento de la tercera simulación, del cual se presenta en la sección 5.3.3. En estas imágenes se logra observar el campo de esfuerzos mecánicos de Von Mises

al momento de realizar las simulaciones de carga a través de las direcciones ortogonales previamente definidas.

Específicamente, para el resultado mostrado en la **Figura 5.17**, los esfuerzos de Von Mises están representados para la dirección ortogonal e_1 , en los estados inmaduro, semimaduro, maduro y sobremaduro. Encontrando que el valor máximo de la energía de distorsión se presenta para el estado inmaduro con un valor de 2.0042 Mpa, y va disminuyendo hasta 0.7584 Mpa para el estado sobremaduro.

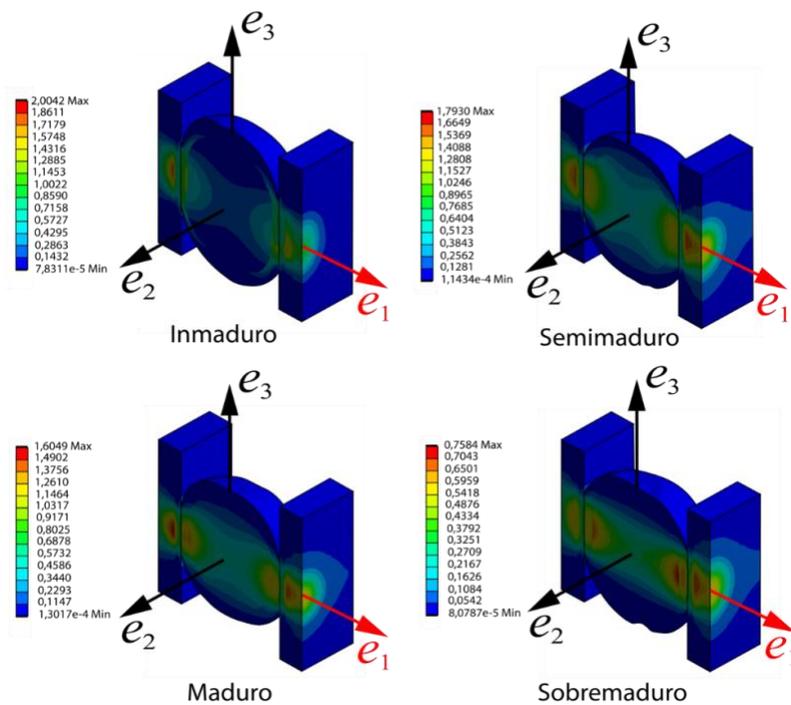


Figura 5.17. Esfuerzos Von Mises para la dirección ortogonal e_1 en los diferentes estados de maduración.

Para la **Figura 5.18**, los esfuerzos de Von Mises están dados para la dirección ortogonal e_2 , en el que para el estado inmaduro el valor máximo es de 3.2589 Mpa y va disminuyendo a través de los estados de maduración hasta el estado sobremaduro con un valor máximo de 0.4192 Mpa.

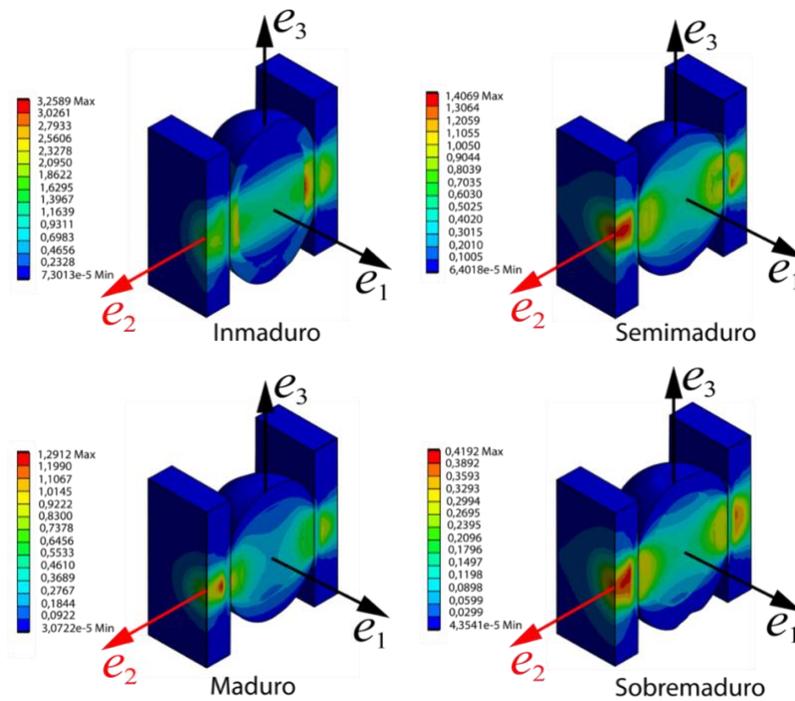


Figura 5.18. Esfuerzos Von Mises para la dirección ortogonal e_2 en los diferentes estados de maduración.

En la **Figura 5.19**, se muestran los esfuerzos de Von Mises para la dirección ortogonal e_3 , donde el máximo valor se presenta para el estado inmaduro con 5.0014 Mpa y al igual que en las dos figuras anteriores la máxima energía de distorsión se va disminuyendo según se da el avance de los estados de maduración, donde para el estado Sobremaduro el valor máximo del esfuerzo de Von Mises es de 0.8527, siendo este último el mínimo valor de los máximos valores de Von Mises.

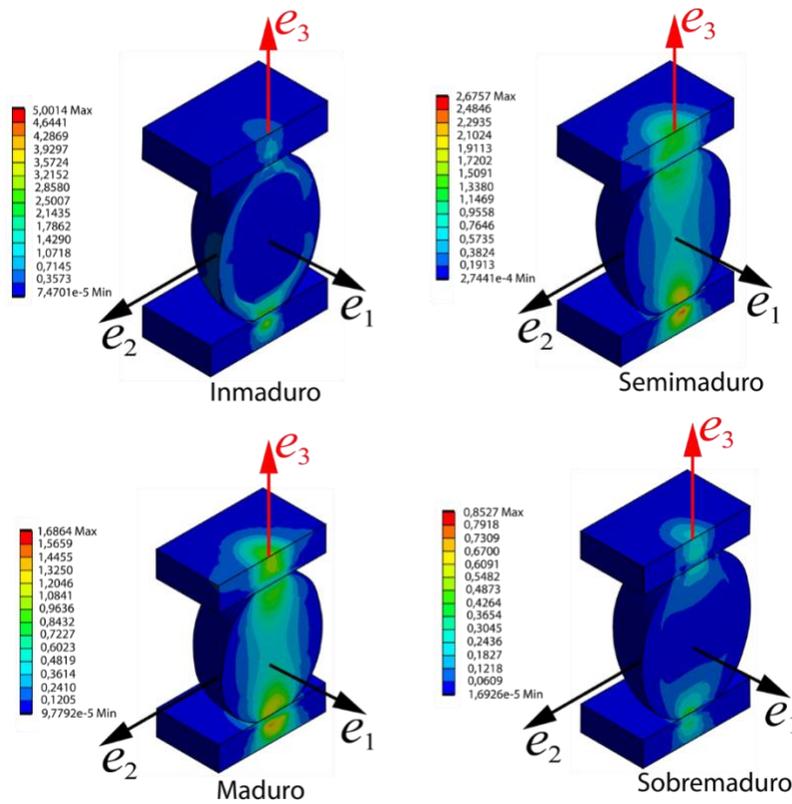


Figura 5.19. Esfuerzos Von Mises para la dirección ortogonal e_3 en los diferentes estados de maduración.

En la tabla 5.7, se presentan todos los valores máximos de los esfuerzos de von mises para las tres direcciones ortogonales, en esta se observa que, para todos los estados de maduración, la dirección e_3 es la que presenta los valores más altos.

Tabla 5.10. Tabla de los esfuerzos máximos de Von Mises para las tres direcciones ortogonales

Estado de maduración	Esfuerzo Von mises $\sigma_{max}(MPa)$		
	e_1	e_2	e_3
Verde	2.0042	3.2589	5.0014
Semimaduro	1.7930	1.4090	2.6757
Maduro	1.6049	1.2912	1.6468
Sobremaduro	0.7584	0.4192	0.8527

La figura 5.20, muestra gráficamente los datos comparados en la tabla 5.7, de los esfuerzos máximos de Von Mises para las tres direcciones ortogonales en los cuatro estados de

maduración. En el que se logra ratificar que los valores dados para la dirección e_3 son los más altos, mientras que en promedio para la dirección e_2 son los más bajos.

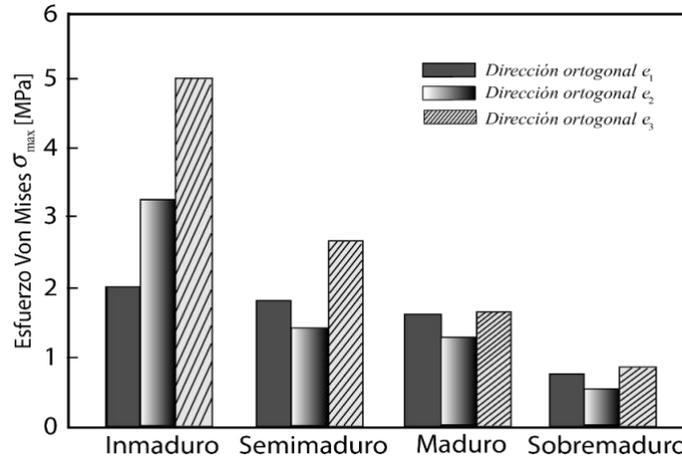


Figura 5.20. Comparaciones de esfuerzos máximos Von Mises en todas las direcciones ortogonales

5.3.7 Resultados de la deformación máxima en el fruto para la tercera simulación

El conjunto de resultados que se enseñan en la **Figura 5.21**, corresponde a la deformación que se presenta en cada uno de los frutos cuando se realizan los procesos de la simulación de compresión en la dirección ortogonal e_1 , el cual se encuentra previamente descrito. En esta se puede observar que los máximos niveles se presentan en los puntos donde se genera el desplazamiento de la placa que permite la deformación, identificado por el color rojo. Para este conjunto de resultados es claro que la deformación en el fruto va disminuyendo conforme aumentan los estados de maduración; teniendo su punto mayor en el estado inmaduro y el menor en el estado Sobremaduro.

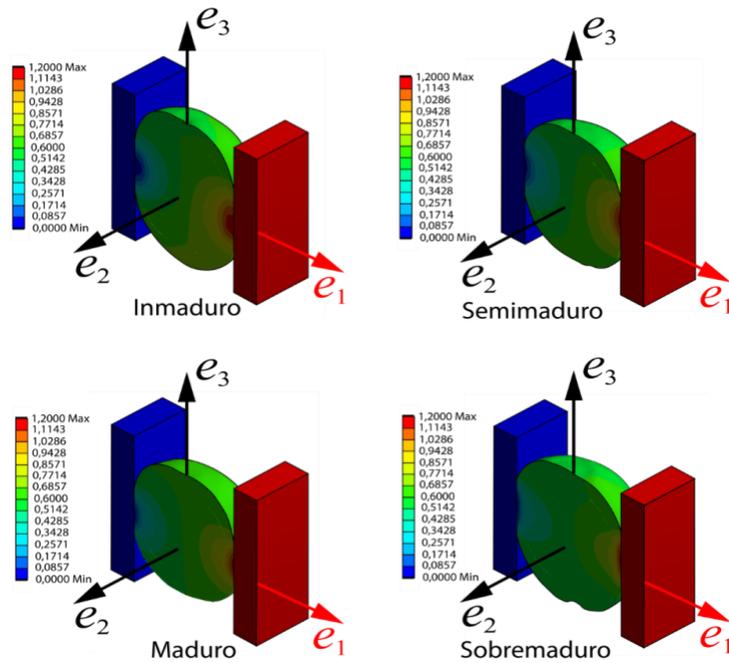


Figura 5.21. Deformaciones máximas de los frutos en la dirección ortogonal e_1 para cada estado de maduración

En la **Figura 5.22**, se presentan las deformaciones máximas de los frutos de café para la dirección ortogonal e_2 , en este se observa que a diferencia de la **Figura 5.21**, los puntos máximos de deformación son variables según el estado de maduración. Como en los estados semimaduro y sobremaduro, donde se presentan las mayores deformaciones, mientras que para los estados inmaduro y maduro se observan los puntos de menor deformación.

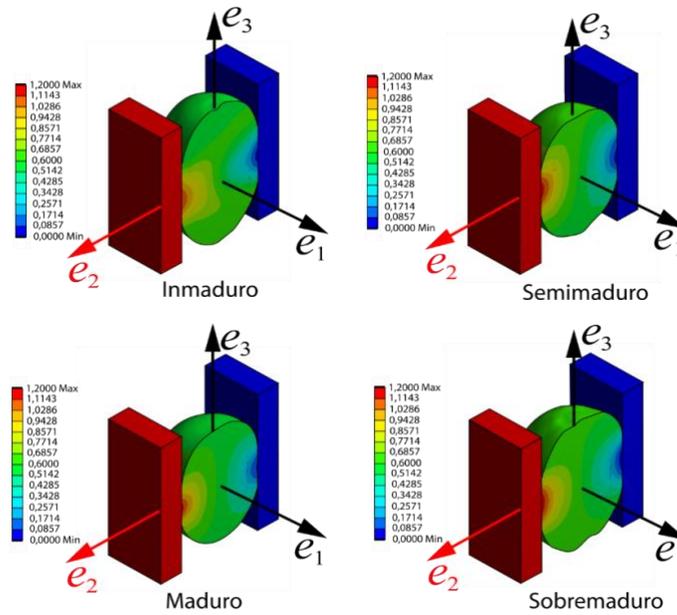


Figura 5.22. Deformaciones máximas de los frutos en la dirección ortogonal e_2 para cada estado de maduración

Ahora en la **Figura 5.23**, las deformaciones máximas, que se observan, tienden a ser homogéneas entre sus estados de maduración y no muestran grandes variaciones, como si se presentan en la **Figura 5.21** y la **Figura 5.22**. Esta condición tan particular se puede generar debido a la constitución del material con el que se está simulando.

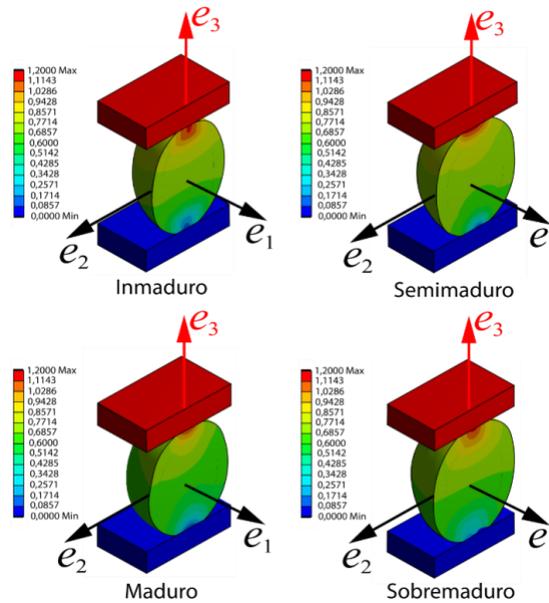


Figura 5.23. Deformaciones máximas de los frutos en la dirección ortogonal e_3 para cada estado de maduración

CAPÍTULO 6- DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE AMORTIGUAMIENTO E IDENTIFICACIÓN DE LA TENACIDAD A LA FRACTURA DE LA INTERFACE PEDICELO – FRUTO DEL CAFÉ EN LOS DIFERENTES ESTADOS DE MADURACIÓN

6.1 Introducción

La importancia de determinar las propiedades de amortiguamiento, el cual son parámetros que describen la disipación de energía en el pedúnculo del café y su tenacidad a la fractura radica en obtener resultados que brinden a los diseñadores de dispositivos de recolección la comprensión necesaria del comportamiento del pedúnculo. Esto abarca tanto su respuesta al ser estimulado por vibraciones externas en el sistema fruto-pedúnculo, como su reacción en el momento de la aparición de una fisura en la interfaz pedicelo-fruto.

Ahora bien, los resultados experimentales de amortiguamiento que se presentan en este capítulo tienen como objetivo comprender la fuerza de separación en respuesta a un estímulo vibratorio externo en el sistema fruto-pedúnculo. Paralelamente, se explora la respuesta natural inherente del pedúnculo ante los movimientos de la estructura. Este comportamiento es influenciado por variables como el volumen, la masa, la longitud del pedúnculo, el estado de maduración y las características de la vibración forzada, tales como frecuencia, desplazamiento y duración.

Adicionalmente, en relación a la tenacidad a la fractura en la interfaz pedicelo-fruto, se determina la resistencia al desprendimiento entre ambos elementos con el apoyo de modelos FEM. Esto se realiza al considerar situaciones en las que se induce o presenta una fisura o grieta. Dicha resistencia varía según factores como el diámetro, la longitud y el comportamiento elástico del pedicelo, así como el estado de maduración.

Cabe aclarar que para determinar las propiedades de amortiguamiento ya se han presentado estudios similares en otras especies vegetales diferentes a la del café, como el realizado por

(Castro et al. 2017), donde se investigó la respuesta en frecuencia de los frutos maduros e inmaduros de la naranja valencia, con el fin de obtener una cosecha selectiva mecánica más eficiente. O también el de (He et al. 2013), que realiza una serie de pruebas dinámicas sobre las cerezas dulces para analizar la respuesta ante las excitaciones externas, buscando obtener la información suficiente para el diseño de una cosechadora. También (Zhou et al. 2022), efectuó un estudio del grado de respuesta del movimiento para el sistema semilla – tallo de ginkgo, ante diferentes frecuencias, con el fin de mejorar la cosecha de esta especie.

En cuanto a la tenacidad a la fractura en frutos, en especial analizando el comportamiento en la interface entre el pedicelo y el fruto cuando este sistema está en el árbol, no existen estudios significativos. Tan solo se pueden encontrar referencias donde examinan la textura a través de análisis de fractura de otras especies vegetales como zanahorias, apio y manzanas (Alvarez et al., 2000), implementando métodos convencionales para el análisis en metales y polímeros (Broek, 1982), donde se realiza una pre-grieta, se genera una carga y se analiza el comportamiento de la grieta a través de un microscopio.

Cabe agregar, que en las referencias mencionadas, las dimensiones de las estructuras analizadas tienen un mayor tamaño al del café, por lo tanto la realización de las pruebas experimentales que son comúnmente utilizadas en ingeniería para la extracción de las propiedades de amortiguamiento y tenacidad a la fractura, tienden a ser complejas y por lo general para identificar propiedades de este tipo, se implementan métodos numéricos como una alternativa para obtener información del sistema tallo-fruto, tal y como lo muestra (Tinoco et al. 2014; Santos et al, 2021). Sin embargo, y pese a la poca información que existe sobre posibles métodos experimentales para lograr adquirir datos que lleven a determinar dichas propiedades en una especie vegetal de pequeñas dimensiones, se logró para la realización de este objetivo, desarrollar y mejorar un proceso donde, con la ayuda de un vibrómetro láser, un láser Panasonic, un dispositivo piezoeléctrico, y un dinamómetro, se pudo encontrar en cada estado de maduración, la frecuencia natural, el amortiguamiento y la tenacidad a la fractura en el café arábica L. Var Castillo.

6.2 Materiales y métodos

6.2.1. Selección de muestras

Las muestras utilizadas para los experimentos fueron seleccionadas en base a las condiciones previamente descritas en la sección 3.2.5 del capítulo 3. En total, se eligieron 20 frutos de café arábica L. Var Castillo para determinar las propiedades de amortiguamiento. Estos se distribuyeron en 5 especímenes por cada estado de maduración. Al recolectar los frutos del árbol, se cortaron de manera que se obtuvieran el fruto mismo, el pedúnculo-pedicelo y una pequeña sección de la rama que sostiene naturalmente la estructura, como se ilustra en la **Figura 6.1**.

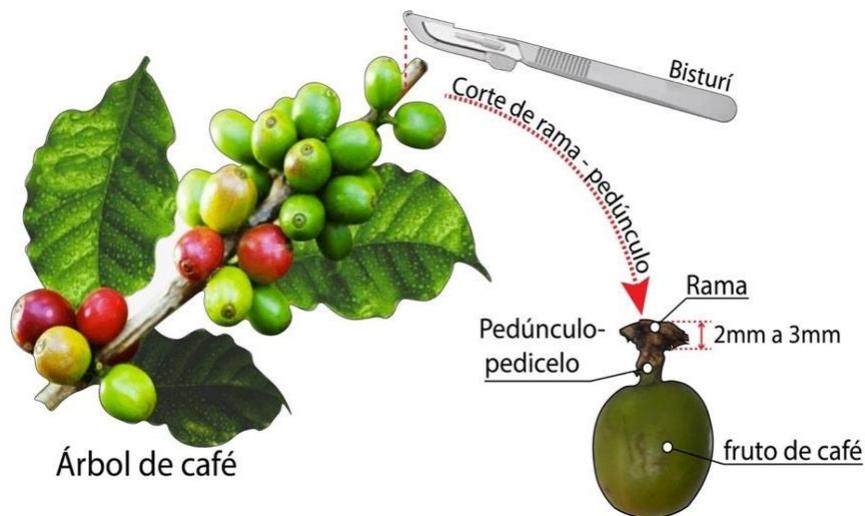


Figura 6.1. Corte de las muestras para experimento de amortiguamiento

Ahora, para establecer las muestras que se utilizan para la identificación de la tenacidad a la fractura, se recortan dos ramas del árbol del café, tal y como se observa en la **Figura 6.2**, procurando que exista una variada distribución de frutos en cada una de ellas, según su estado de maduración. De las estructuras vegetales seleccionadas, se escogen sin apartar de la rama un mínimo de dos muestras por cada estado de maduración, siguiendo los lineamientos de selección previamente descritos en el capítulo 3 y 4; esto permite que el proceso experimental

en condiciones de laboratorio como se describe en la sección 6.2.3 se aproxime a unas condiciones naturales de desprendimiento.

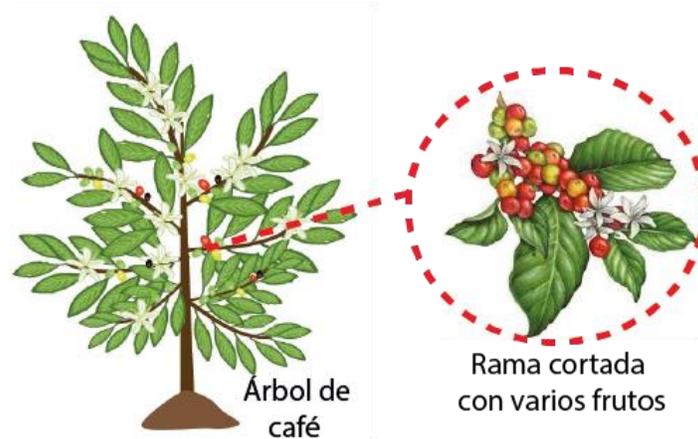


Figura 6.2. Corte de muestra para experimento de tenacidad a la fractura.

6.2.2. Medición de las vibraciones en el sistema fruto-Pedúnculo del café

Para llevar a cabo el montaje experimental que permite determinar la razón de amortiguamiento en el pedúnculo del café, se verificaron diversas fuentes académicas como las de Yamamoto et al. (1980), Láng (2008), Velloso et al. (2017), Faheem et al. (2021) y Munde et al. (2019). En cada una de estas, se destaca la aplicación de estímulos en los frutos, seguida de la medición de sus vibraciones a través de instrumentación especializada.

Teniendo en cuenta la revisión realizada y en vista de que existe una similitud en la estructura general de los experimentos de este tipo, se procedió a realizar la primera configuración experimental para la medición de vibraciones en el sistema fruto – pedúnculo. Tal como se aprecia en las Figuras 6.3a y 6.4, se superpone la estructura del café en el piezoeléctrico, el cual se empotran en el dispositivo de sujeción. Este conjunto se aferra de manera segura a un mini shaker Sentek. Por otro lado, la tarjeta de adquisición NI USB-6361 se conecta mediante cables al shaker, al piezoeléctrico y al vibrómetro láser CLV 2534. Esta tarjeta, a su vez, se enlaza con el ordenador, cuya función principal consiste en recibir y procesar los datos

capturados por los sensores piezoeléctrico y vibrómetro láser, además de enviar señales digitales al shaker para generar movimientos.

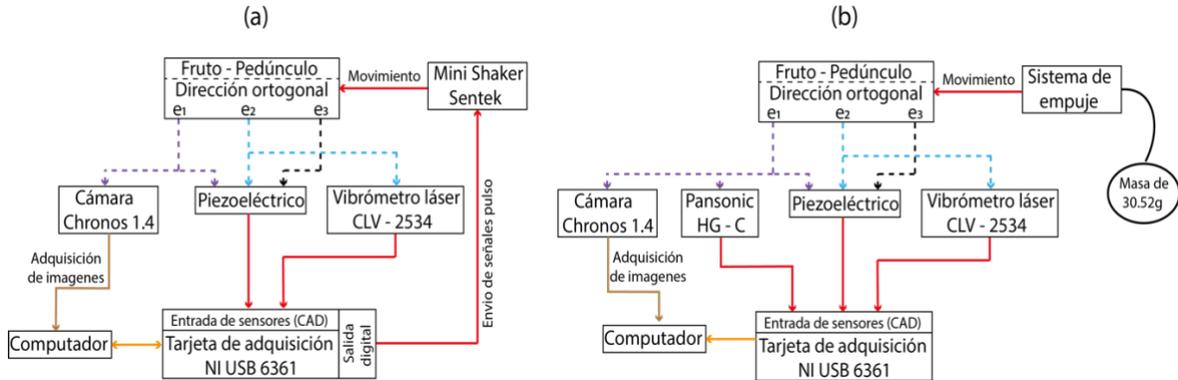


Figura 6.3. (a) Diagrama de flujo de primera configuración experimental para la medición de vibraciones en el sistema fruto pedúnculo. (b) Diagrama de flujo de segunda configuración experimental para la medición de vibraciones en el sistema fruto pedúnculo.

Es relevante mencionar que la cámara de alta velocidad, marca Chronos 1.4, desempeña un papel fundamental en el análisis de los movimientos de la estructura fruto-pedúnculo del café. Sin embargo, a diferencia de los demás componentes, no se establece una conexión directa con el ordenador. En este caso, las imágenes en video adquiridas necesitaron ser transferidas al ordenador a través de una tarjeta SD.

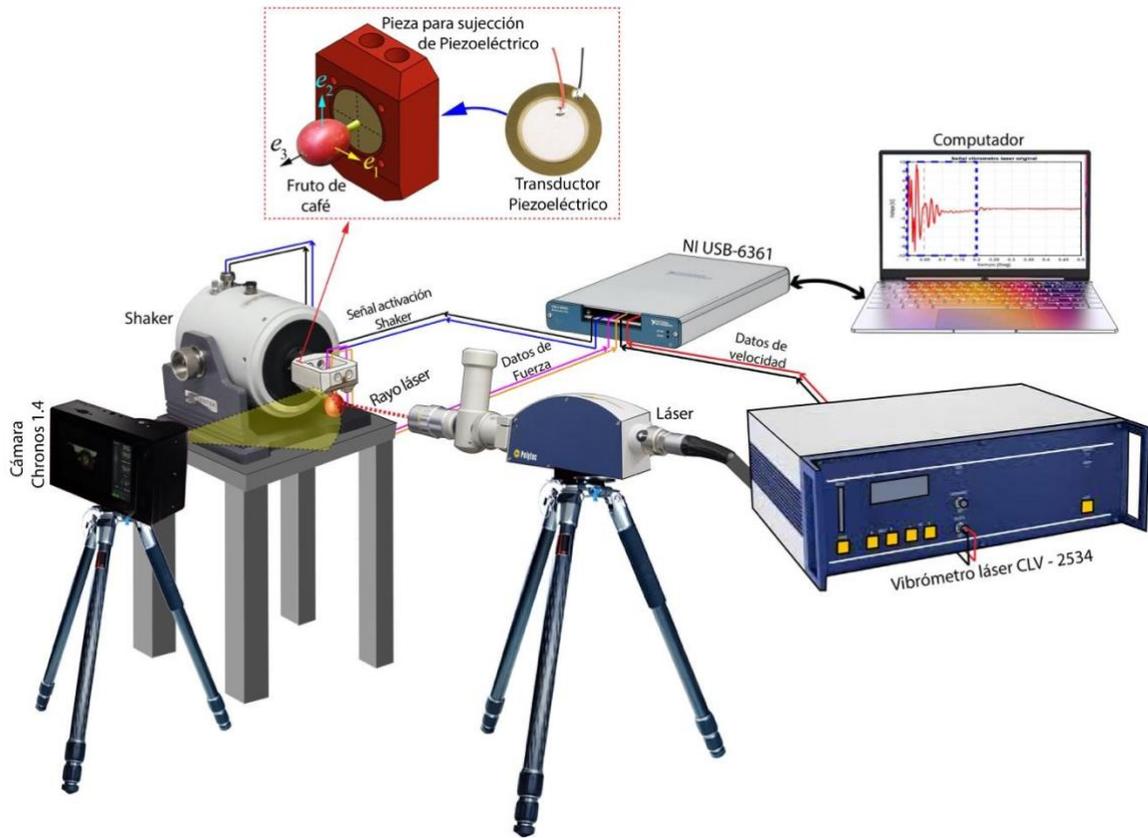


Figura 6.4. Primera configuración experimental para las medición de vibraciones en el sistema fruto pedúnculo

Ahora bien, para inducir un movimiento dinámico en el fruto, se generaron señales pulso con tres distintas duraciones en tiempo. Estas se transmiten desde la tarjeta NI USB-6361, con la ayuda del software Matlab®, hacia el mini shaker, como se ilustra en la **Figura 6.5a**. Cada una de ellas posibilita un desplazamiento máximo de 2 mm en el cabezal del shaker y en la pieza de sujeción (que alberga el sistema fruto-pedúnculo), con tiempos de desplazamiento de 0.2 s, 0.17 s y 0.1 s respectivamente, ver **Figura 6.5b**, Esta acción genera una respuesta en vibración del sistema fruto-pedúnculo, cuya caracterización en términos de fuerza se realiza mediante el transductor piezoeléctrico (la medición se efectúa sobre las direcciones ortogonales e_3 , e_2 y e_1). Por otro lado, la velocidad del movimiento se captura con el vibrómetro láser, ubicado hacia la dirección ortogonal e_2 . La reacción a cada una de las señales de entrada se muestra en la **Figura 6.5c**.

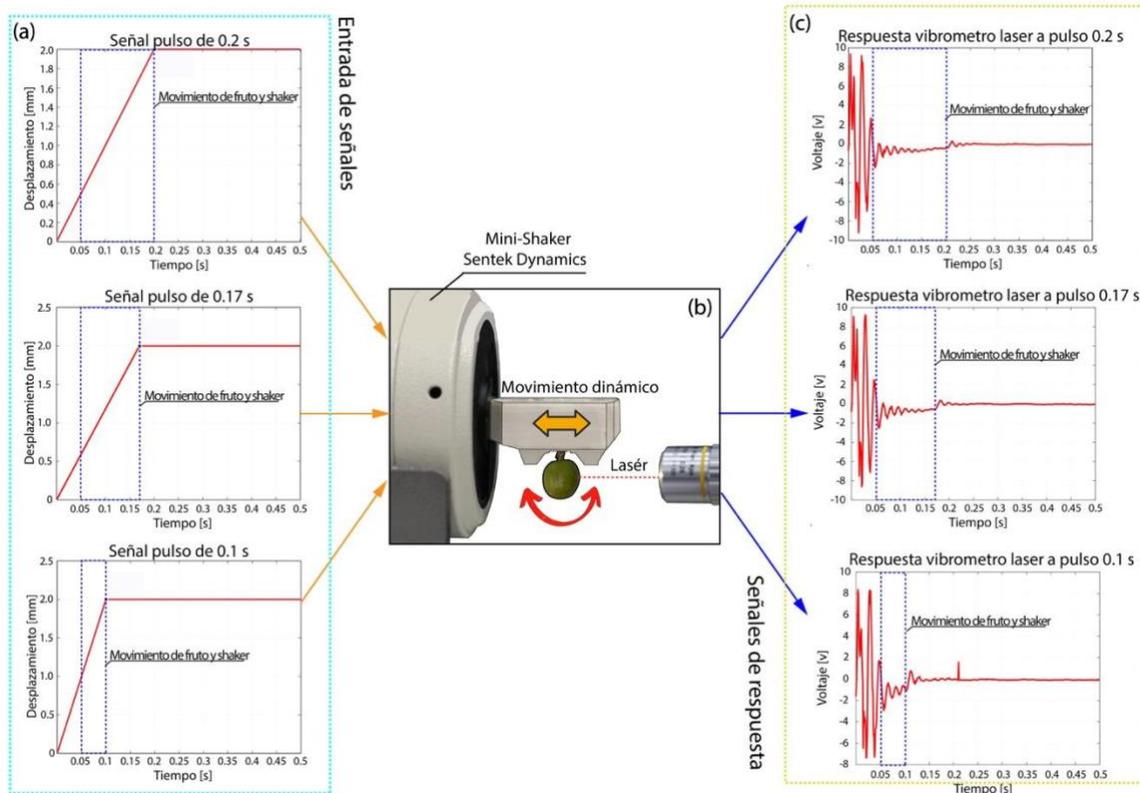


Figura 6.5. (a) Señales de entrada al shaker. (b) movimiento dinámico de la estructura fruto - pedúnculo (c) señales de respuesta en el fruto-pedúnculo.

Sin embargo, al analizar los datos generados, se observa que la respuesta en vibración del sistema fruto-pedúnculo se sobrepone con la respuesta del cabezal del mini shaker ante cada señal de entrada. Esto dificulta la identificación del movimiento del fruto en relación con el movimiento del shaker. Por lo tanto, se reconsideró la configuración experimental, como se presenta en las **Figuras 6.6** y **6.3b**. En esta nueva disposición, la estructura fruto-pedúnculo se sujeta a un transductor piezoeléctrico, que a su vez se encuentra incrustado en la pieza de sujeción. La respuesta en vibración del café frente a un estímulo externo se mide mediante el piezoeléctrico (en las direcciones ortogonales e_3 , e_2 y e_1), el vibrómetro láser CLV 2534 (en la dirección ortogonal e_2) y el láser Panasonic HG-C 1101 (en la dirección ortogonal e_1). Es importante destacar que se incluyó este último sensor debido a las observaciones realizadas con la cámara de alta velocidad Chronos 1.4, que indicaron que, al estimular el fruto, se producen movimientos en las direcciones ortogonales e_1 y e_2 .

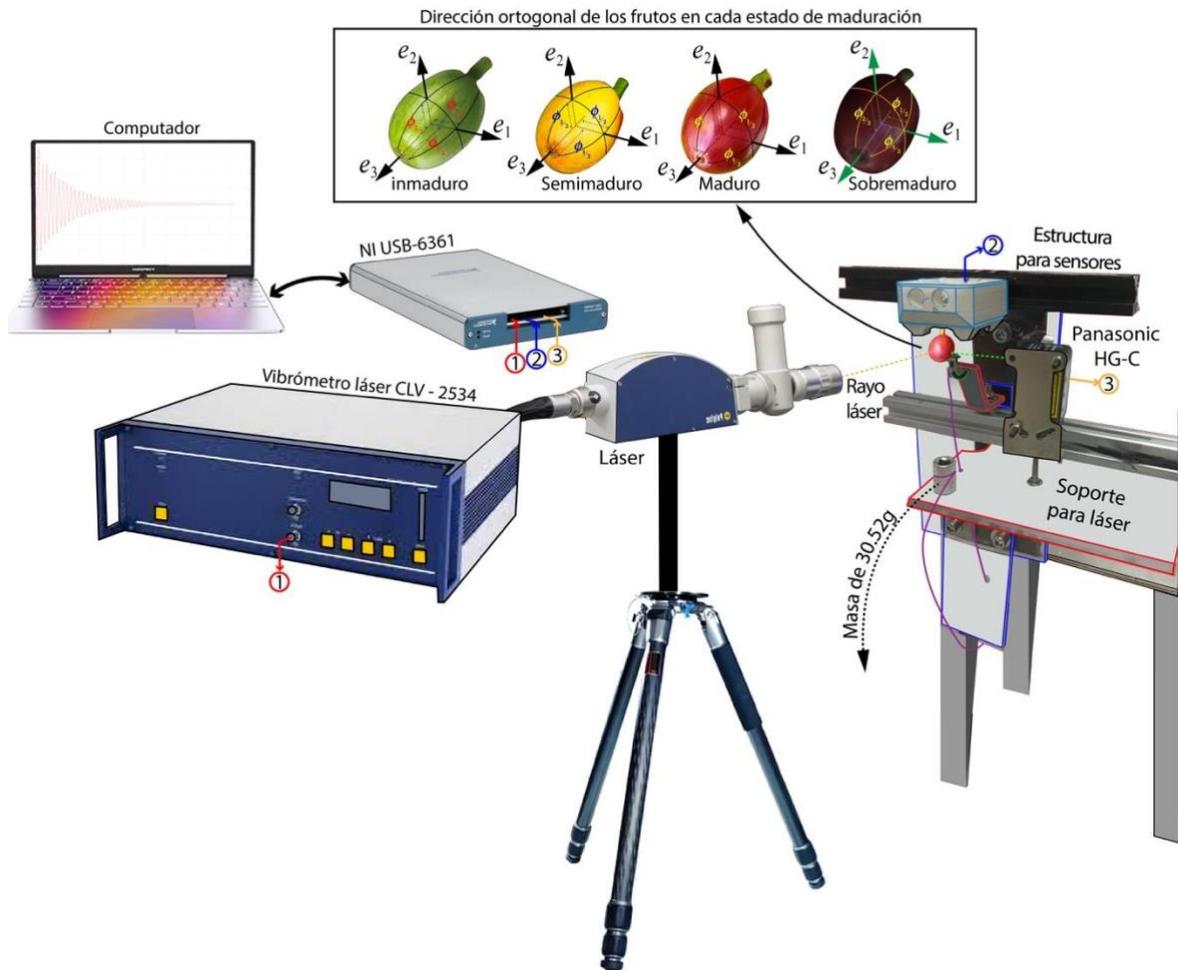


Figura 6.6. Segunda configuración experimental para la medición de vibraciones en el sistema fruto pedúnculo

Por otra parte, los tres sensores envían los datos correspondientes a la tarjeta de adquisición NI USB-6361 y, desde allí, al ordenador para su recepción y procesamiento. Cabe aclarar que, a diferencia de la primera configuración experimental, la estimulación externa ya no se controla desde la tarjeta de adquisición. En su lugar, se lanza una masa de 30.52 g, adherida a un nylon de 15 cm de longitud. Cuando la masa alcanza su máxima extensión, empuja un O-Ring de 12 mm de diámetro, previamente recortado en el medio, que a su vez lleva una tuerca y una arandela en uno de sus extremos. Esta configuración se utiliza para golpear el

extremo inferior del fruto. El otro extremo del O-Ring está unido a una base ajustable que permite la alineación con cada uno de los especímenes.

Este único impulso, generado al soltar la masa, como se muestra en la **Figura 6.7**, permite que los sensores registren la respuesta vibracional exclusivamente originada por el fruto. No obstante, cada una de estas señales requiere un procesamiento adecuado para calcular el factor de amortiguamiento en cada uno de los estados de maduración predefinidos.

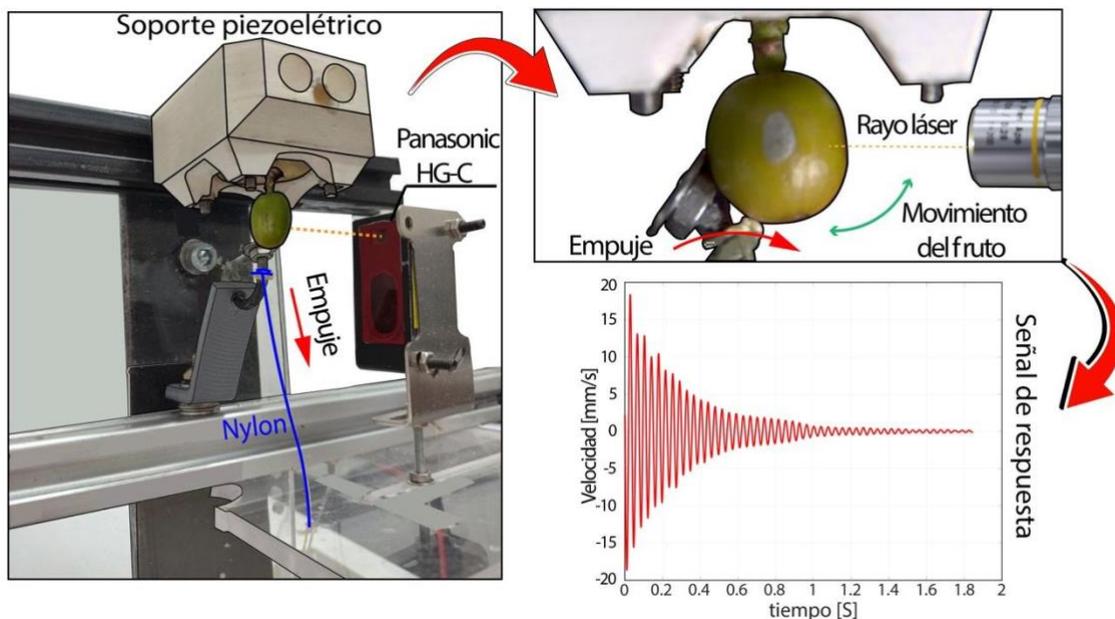


Figura 6.7. Estructura para estimular la respuesta en vibración del fruto de café

El procedimiento utilizado para procesar y determinar las propiedades del amortiguamiento del pedúnculo en los diferentes estados de maduración se describe a continuación.

6.2.3 Procesamiento de las señales para la obtención de las frecuencias y la razón de amortiguamiento en cada estado de maduración

La **Figura 6.8** ilustra las señales de respuesta obtenidas al ejercer excitación sobre los 20 frutos, capturando variables como velocidad (registrada por el vibrómetro láser), desplazamiento (mediante el láser Panasonic) y fuerza (por el sensor piezoeléctrico). Esto da

lugar a un total de 60 señales, cada una sometida a un preprocesamiento específico, con el que se busca identificar las frecuencias fundamentales (w_0) y la razón de amortiguamiento (ζ). Para procesar este conjunto de datos, se sigue un procedimiento de dos pasos. En primer lugar, se aplica un filtro digital Butterworth de sexto orden con características de pasabandas, para eliminar ruidos eléctricos inherentes al montaje experimental. Las frecuencias de corte se ajustan en función de los sensores de medición. En segundo lugar, la señal resultante de la vibración del sistema fruto-pedúnculo se somete a un análisis espectral para identificar su frecuencia natural de vibración. Adicionalmente, se detectan los picos máximos en la serie temporal, permitiendo estimar la envolvente de la señal. Para cada estado de maduración, se calculan tanto las medias ($\bar{F}[Hz]$) como las varianzas (σ^2) de la frecuencia correspondiente a cada variable.

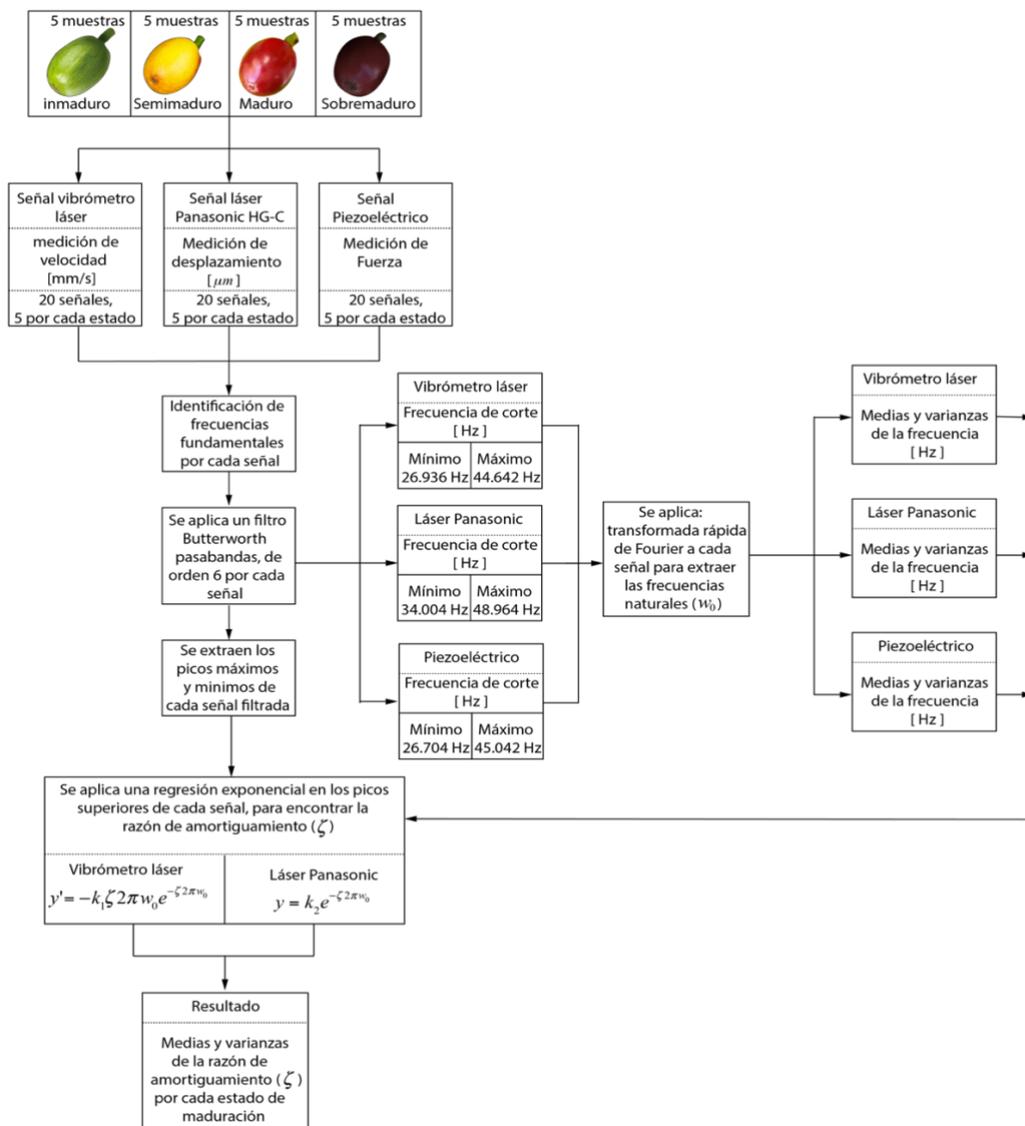


Figura 6.8. Algoritmo para determinar la razón de amortiguamiento del café

Para calcular la razón de amortiguamiento (ζ) en el conjunto de datos, se utiliza una regresión exponencial de los picos (*peaks*), o pico de cada señal medida (Opazo, 2015; Tadeus, 2018). De esta manera se estima una función envolvente equivalente a la razón de amortiguamiento.

Ahora bien, con este conjunto de datos y con la información de las frecuencias naturales de vibración (w_0), se realiza la regresión exponencial utilizando la ecuación 6.1 (Opazo, 2015), para los datos de desplazamiento que son medidos con el láser Panasonic

$$y = k_2 e^{-z2\rho w_0 t}. \quad (6.1)$$

donde k_2 , es la constante de regresión exponencial del láser Panasonic; ζ , es la razón de amortiguamiento y w_0 , es la frecuencia natural. De la misma manera se realiza la regresión exponencial para los datos de velocidad que son medidos con el vibrómetro láser, sin embargo, se debe aplicar una derivación sobre la ecuación 6.1.

$$\frac{dy}{dt} = -k_1 z 2\rho w_0 e^{-z2\rho w_0 t}. \quad (6.2)$$

donde, k_1 es la constante de regresión exponencial del vibrómetro láser; ζ , es la razón de amortiguamiento y, w_0 es la frecuencia natural. Es de aclarar que sobre la ecuación 6.1 como con la ecuación 6.2, se realizó un despeje que permite encontrar la razón de amortiguamiento de cada una de las señales de vibración del pedúnculo tanto en la dirección ortogonal \mathbf{e}_1 como en la \mathbf{e}_2 . Finalmente se calculan las medias y las varianzas de la razón de amortiguamiento sobre cada variable medida en los diferentes estados de maduración. Los resultados de las propiedades de amortiguamiento se pueden encontrar en las secciones 6.3.1 y 6.3.2.

6.2.4. Medición de las características físicas y desprendimiento axial del pedúnculo del café para la identificación de la tenacidad a la fractura

Para llevar a cabo la identificación de la tenacidad a la fractura mediante métodos numéricos en la interfaz pedicelo-fruto para distintos estados de maduración, es necesario generar una serie de modelos que utilicen tres conjuntos de datos como entrada.

El primero de estos conjuntos es la caracterización de las propiedades físicas de las muestras seleccionadas, en especial las del pedicelo. Estas propiedades incluyen el diámetro del

pedicelo (\emptyset_p) y su longitud (L_p), medidas con un vernier o pie de rey, además de la masa (g), la cual es registrada con una gramera digital, tal como se explica en el capítulo 4. La información recopilada se encuentra detallada en la **Tabla 6.1**.

Tabla 6.1. Caracterización de las dos primeras muestras de cada estado, para determinar la tenacidad a la fractura

Estado	Muestra	\emptyset_p [mm]	L_p [mm]	Masa [g]
Inmaduro	1	1.30	5.58	1.18
	2	1.30	6.51	1.37
Semimaduro	1	1.90	5.05	1.67
	2	1.70	5.00	1.62
Maduro	1	1.70	4.44	1.54
	2	1.70	4.87	1.54
Sobremaduro	1	1.50	4.93	2.02
	2	1.60	5.66	2.03

Adicionalmente, otro dato crucial para determinar la tenacidad a la fractura es la fuerza de desprendimiento axial. No obstante, para obtener estos datos se llevó a cabo un montaje experimental, tal y como se muestra en la **Figura 6.9**. En este procedimiento, a cada uno de los tres especímenes correspondientes a cada uno de los estados de maduración, extraídos de las muestras seleccionadas de la rama de café, se les efectuó un corte o muesca horizontal de 0.85 mm en la frontera entre el fruto y el pedúnculo.

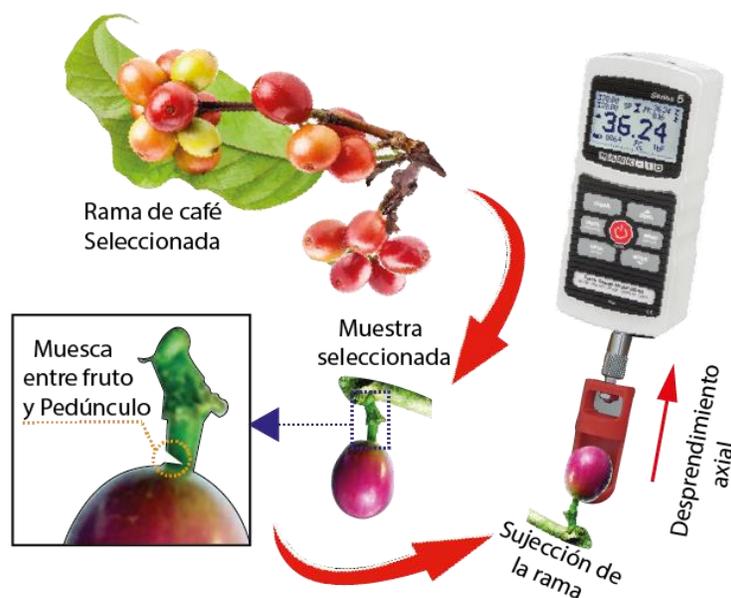


Figura 6.9. Montaje experimental para determinar la fuerza de desprendimiento axial con microfisuras generadas.

Luego se realiza una sujeción de la rama de la muestra seleccionada y con la ayuda del dinamómetro Mark-10 M5-10, se registra la magnitud de la fuerza del desprendimiento axial, tal y como se muestra en la **Tabla 6.2**.

Tabla 6.2. Medición de fuerzas de desprendimiento axial

Estado	Muestra	Fuerza de desprendimiento [N]
Inmaduro	1	2.79
	2	2.52
Semimaduro	1	5.52
	2	3.81
Maduro	1	4.70
	2	4.89
Sobremaduro	1	3.56
	2	2.13

Otro conjunto de información que se implementa en el modelo utilizado para identificar la tenacidad a la fractura, es el módulo de Young del pedicelo del café arábica L. Var Castillo, cuyos datos son extraídos de las investigaciones generadas por ([Tinoco et al., 2022](#); [Buitrago et al., 2022](#)), los cuales se pueden observar en la **Figura 6.10**.

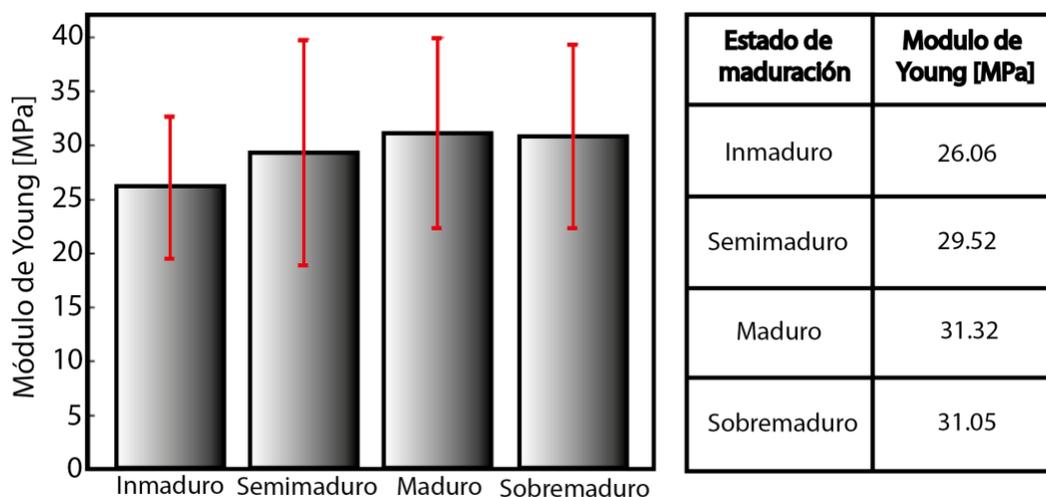


Figura 6.10. Módulo de Young del pedicelo del café arábica L. Var Castillo. Tomado y adaptado de: ([Tinoco et al., 2022](#); [Buitrago et al., 2022](#))

6.2.5 Procedimiento para determinar la tenacidad a la fractura en la interface fruto-pedúnculo utilizando métodos numéricos

Tal y como se presenta en la **Figura 6.11**, para establecer la tenacidad a la fractura en el sistema fruto-pedúnculo del café, a través de métodos numéricos, se deben generar doce modelos CAD, tres por cada estado de maduración, donde los parámetros como el diámetro y longitud se establecen desde el proceso experimental con la información presentada en la **Tabla 6.1**. Con estos diseños se generan la misma cantidad de modelos FEM, cuyos datos requeridos para crear la simulación de fractura en cada modelo del pedúnculo, son el módulo de Young para el pedúnculo **Figura 6.9**, y la fuerza de desprendimiento **Tabla 6.2**; además, se define el material, para cada uno de los modelos del pedúnculo, como material isotrópico, ya que las propiedades, como el módulo de Young, no van a presentar una variación con respecto a la fuerza de desprendimiento aplicada en la simulación.

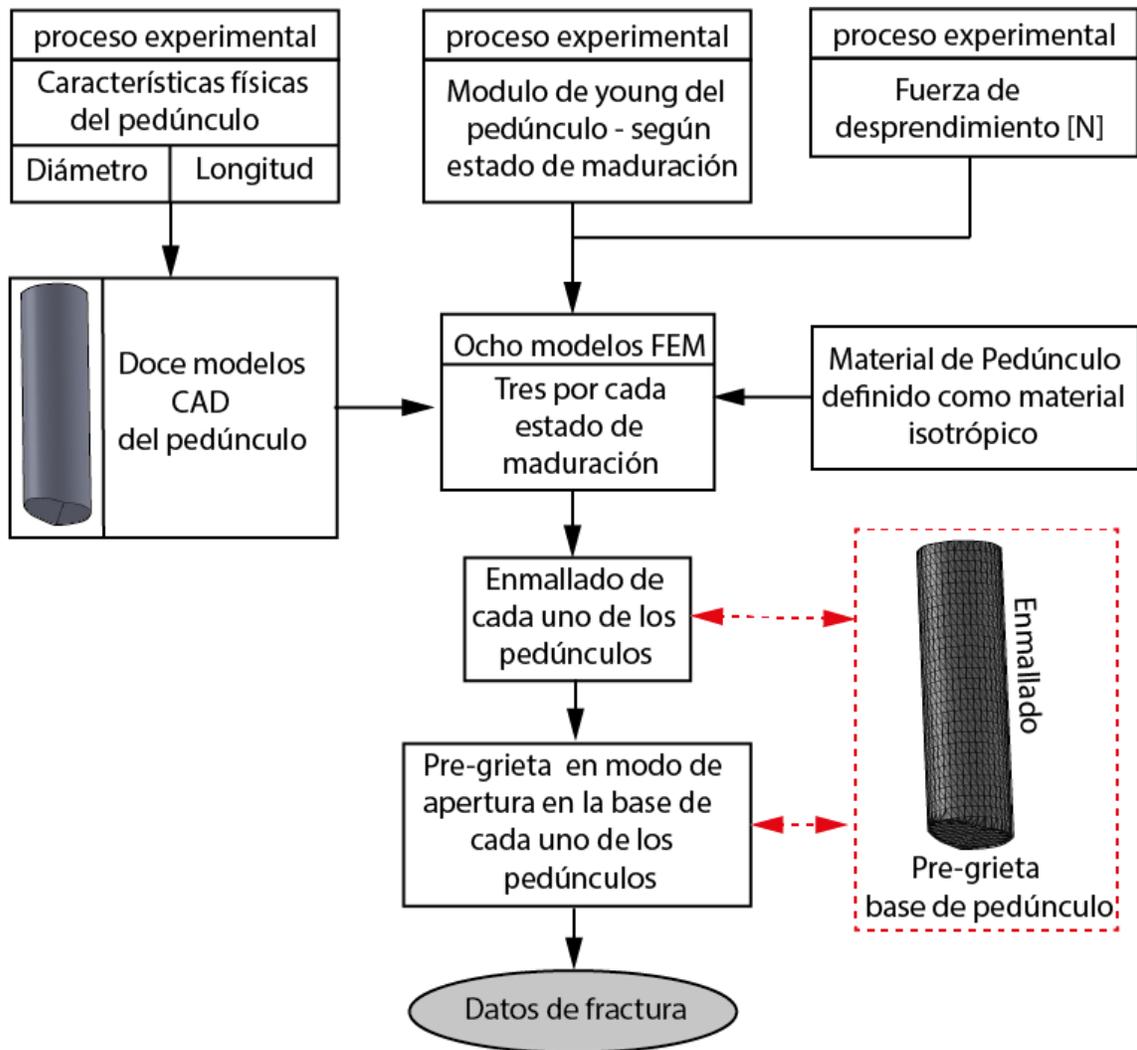


Figura 6.11. Proceso para determinar la tenacidad a la fractura

Ahora bien, para generar los datos resultantes, se debe crear un enmallado en cada una de los modelos y luego, en la base de cada estructura se forma una pre-grieta en modo I de apertura (Broek, 2012). Con este procedimiento se puede extraer la información requerida de las condiciones de fractura en la interfaz pedicelo – fruto en cada uno de los estados de maduración, estos se pueden observar en la sección 6.3.3.

6.3 Resultados y discusión

6.3.1. Frecuencias naturales del pedúnculo

Con la estimulación externa inducida sobre cada uno de los 20 especímenes, seleccionados aleatoriamente, se genera una vibración que disminuya exponencialmente en el tiempo y como se mencionó en los apartados 6.2.2 y 6.2.3, el fenómeno se va registrando sobre las direcciones ortogonales e_1 , e_2 y e_3 . Debido a la naturaleza oscilatoria de las respuestas, las variables de desplazamiento, velocidad y fuerza, presentan una similitud en el comportamiento como se observa en los gráficos de la **Figura 6.12**.

Para determinar la frecuencia natural (w_0), a los datos de los sensores se les estima el espectro de potencia usando la transformada rápida de Fourier (FFT), tal y como se presenta en la **Figura 6.12**.

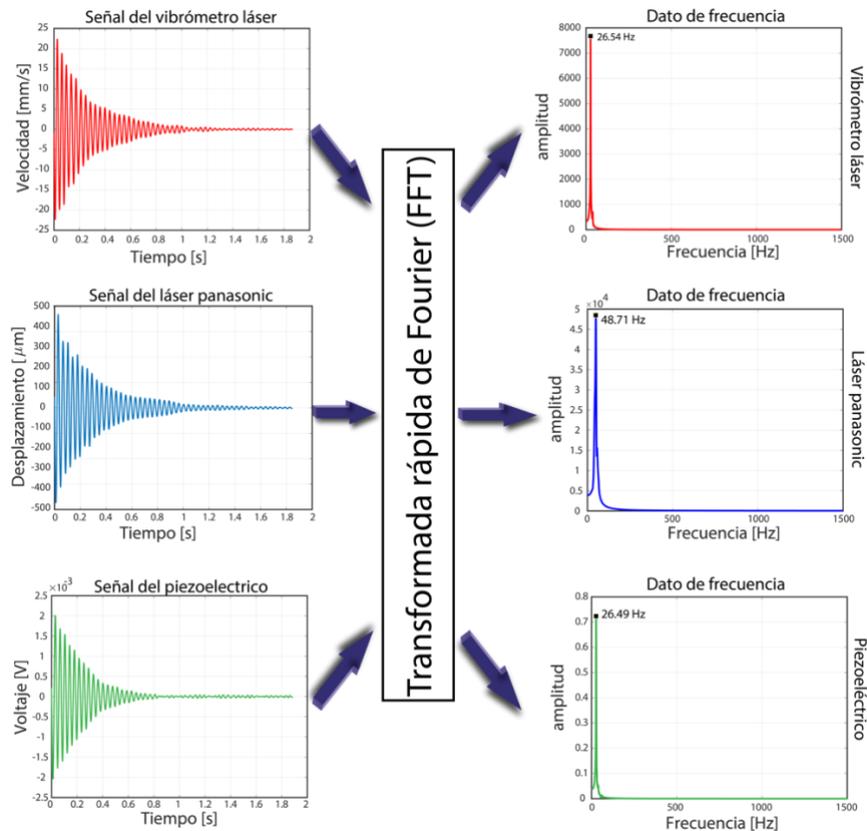


Figura 6.12. Señal de respuesta de cada uno de los sensores y frecuencia adquirida

Los resultados de las frecuencias se separan en frecuencias adquiridas por el vibrómetro láser, frecuencias adquiridas por el láser Panasonic y frecuencias adquiridas por el piezoeléctrico, como se muestra en la **Tabla 6.3**.

Tabla 6.3. Frecuencias adquiridas con los tres sensores

Frecuencias [Hz] – Vibrómetro láser				
	Inmaduro	Semimaduro	Maduro	Sobremaduro
Fruto 1	26.54	40.80	39.69	54.28
Fruto 2	26.76	47.52	43.90	49.40
Fruto 3	27.31	43.08	33.91	39.05
Fruto 4	26.95	48.68	46.23	32.89
Fruto 5	27.17	41.90	40.60	47.54
Frecuencias [Hz] – Láser Panasonic				
Fruto 1	39.05	48.71	26.75	58.00
Fruto 2	39.27	35.93	36.34	48.43
Fruto 3	28.51	32.56	31.28	44.08
Fruto 4	27.51	46.65	42.90	47.01
Fruto 5	35.73	44.63	44.32	47.25
Frecuencias [Hz] - Piezoeléctrico				
Fruto 1	26.52	48.32	46.20	46.65
Fruto 2	26.76	62.75	39.09	44.28
Fruto 3	26.49	26.35	42.48	34.91
Fruto 4	27.27	47.20	38.54	46,21
Fruto 5	26.53	40.63	41.52	46.79

Con los datos de las frecuencias de cada sensor se determinaron las medias y varianzas, por estado de maduración y sensor de medición; los resultados se pueden observar en la **Tabla 6.4**.

Tabla 6.4. Resultado de medias y varianzas de las frecuencias

	$\bar{F} [Hz]$	S^2
Estado	Medias y varianzas del vibrómetro láser	
Inmaduro	26.94	0.095
Semimaduro	44.39	12.25
Maduro	40.86	21.95
Sobremaduro	44.63	73.32
	Medias y varianzas del láser Panasonic	
Inmaduro	34.01	25.70
Semimaduro	41.69	39.81
Maduro	36.31	44.85
Sobremaduro	48.95	22.50
	Medias y varianzas del Piezoeléctrico	
Inmaduro	26.71	0.108
Semimaduro	45.05	174.4

Maduro	41.56	9.399
Sobremaduro	43.76	25.53

Así mismo, con la información consignada en la **Tabla 6.4** se realiza un gráfico que se puede observar en la **Figura 6.13**, en donde se hace una segmentación de la información por estados de maduración y por sensor instalado al momento de la medición.

Una observación que se puede realizar de las gráficas dadas en la **Figura 6.13**, es que existe una tendencia positiva de la frecuencia natural del pedúnculo, proporcional a los estados de maduración en el fruto, siendo esto similar a los resultados de vibración obtenidos con el vibrómetro láser y el láser Panasonic. La frecuencia generada por el sensor piezoeléctrico tiene una tendencia al comportamiento de la frecuencia de vibración con respecto a las otras dos direcciones ortogonales de medición, ya que el sensor mide una relación entre las direcciones ortogonales e_1 y e_2 .

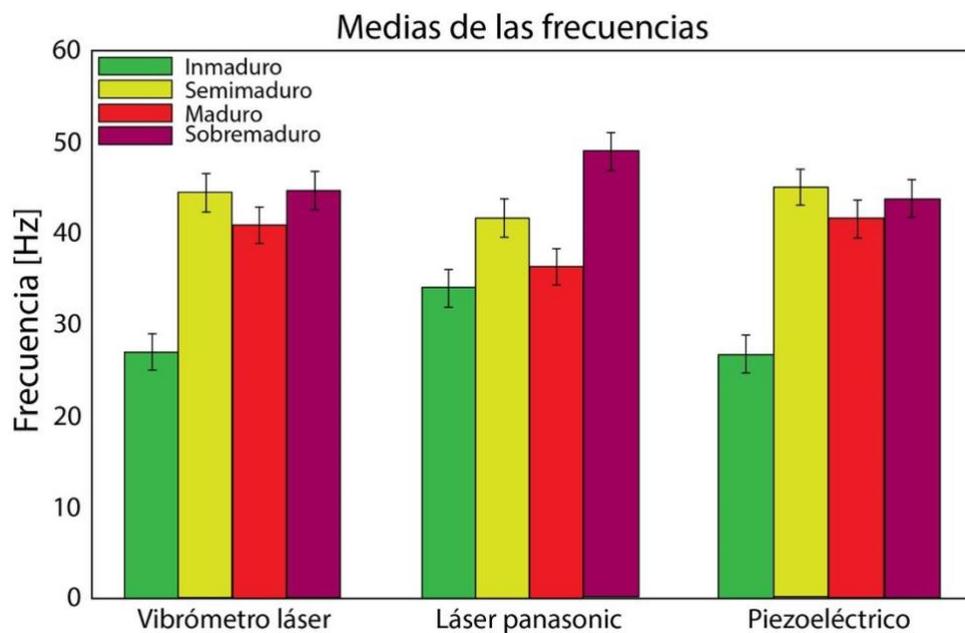


Figura 6.13. Medias de las frecuencias distribuidos por estado de maduración y sensor implementado

El comportamiento vibratorio del sistema fruto-pedúnculo en la variedad de café Castillo se ve directamente influenciado por sus propiedades físicas y químicas en diversas etapas de

maduración. Como la rigidez que se disminuye a medida que el fruto madura, lo que guarda relación con el contenido de agua y las alteraciones en pulpa y grano. Además, la variación en firmeza y pH, junto con los cambios geométricos y de masa, configuran las respuestas vibracionales observadas en el sistema fruto-pedúnculo, dejando al descubierto la complejidad de su comportamiento en relación a su estado de maduración.

6.3.2. Razón de amortiguamiento en el pedúnculo del café

Para obtener la razón de amortiguamiento primero se identifican los picos de las señales provenientes del vibrómetro láser (que mide la velocidad en la dirección ortogonal \mathbf{e}_2) y el del láser Panasonic (que mide el desplazamiento en la dirección ortogonal \mathbf{e}_1); con esto se aplica una regresión exponencial usando la ecuación 6.1, para los datos provenientes del laser Panasonic y la ecuación 6.2 para los del vibrómetro láser, tal y como se observa en la **Figura 6.14**. Por otro lado, las frecuencias naturales (ω_0) de cada una de las señales, registradas en la **Tabla 6.3**, permiten completar las variables de las ecuaciones 6.1 y 6.2 obteniendo las razones de amortiguamiento (ζ) requeridas, bien sea para los datos del láser Panasonic como para la información del vibrómetro láser.

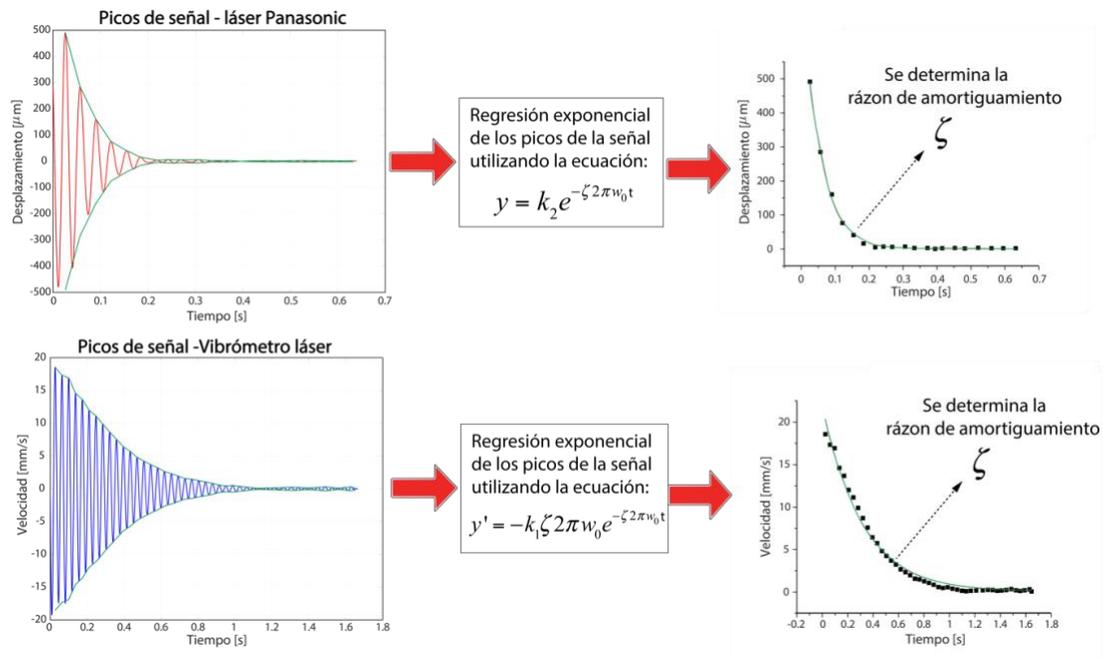


Figura 6.14. Proceso de regresión exponencial para las señales adquiridas

Los resultados del conjunto de todas las razones de amortiguamiento (ζ), se encuentran registrados en la **Tabla 6.5**, donde los datos están separados por estado de maduración, fruto y tipo de sensor desde donde fue adquirida la señal.

Tabla 6.5. Datos de razón de amortiguamiento de las señales adquiridas.

Razón de amortiguamiento (ζ) – Vibrómetro láser (e_2)				
	Inmaduro	Semimaduro	Maduro	Sobremaduro
Fruto 1	0.02137	0.07841	0.11127	0.08885
Fruto 2	0.02287	0.11148	0.10230	0.09382
Fruto 3	0.01849	0.08692	0.09791	0.06708
Fruto 4	0.01539	0.10362	0.07081	0.05750
Fruto 5	0.03282	0.11556	0.10597	0.09320
Razón de amortiguamiento (ζ) – Láser Panasonic (e_1)				
	Inmaduro	Semimaduro	Maduro	Sobremaduro
Fruto 1	0.02181	0.04554	0.11654	0.06241
Fruto 2	0.02557	0.08727	0.09378	0.12352
Fruto 3	0.07667	0.10963	0.09453	0.04280
Fruto 4	0.07921	0.03407	0.04434	0.03489
Fruto 5	0.07684	0.09450	0.04766	0.02975

Con estos registros, se procedió a determinar las medias y las varianzas de la razón de amortiguamiento sobre cada uno de los estados de maduración, tal y como se presenta en la **Tabla 6.6**, donde la información también se encuentra separada en los provenientes del vibrómetro láser y el láser Panasonic.

Tabla 6.6. Resultados de las medias y las varianzas de la razón de amortiguamiento

Medias y varianzas de la razón de amortiguamiento para el vibrómetro láser (e_2)		
Estado	\bar{z}	S^2
Inmaduro	0.02219	0.00004
Semimaduro	0.09200	0.00025
Maduro	0.09765	0.00024
Sobremaduro	0.08009	0.00027
Medias y varianzas de la razón de amortiguamiento para el láser Panasonic (e_1)		
Inmaduro	0.05602	0.00087
Semimaduro	0.07420	0.00107
Maduro	0.07937	0.00101
Sobremaduro	0.05867	0.00147

Por consiguiente, la **Figura 6.15**, es la representación gráfica de los resultados dados en la **Tabla 6.6**. En términos generales, se observa un aumento en los valores de la razón de

amortiguamiento a medida que los frutos avanzan de estados inmaduros a maduros, seguido de una disminución en el estado sobremaduro. Una particularidad radica en la variabilidad de los resultados entre los dos métodos de medición. Esto implica que las propiedades intrínsecas de los frutos influyen de manera diferente en cada técnica de medición.

Es importante reconocer que, si bien los resultados presentados abren nuevas perspectivas en la comprensión de las propiedades vibracionales de los frutos de café Castillo, existen limitaciones inherentes a la investigación. La muestra experimental de 20 frutos puede limitar la generalización de los resultados a toda la población de frutos. Además, la variabilidad natural en las propiedades físicas de los frutos son factores que deben considerarse en la interpretación de los resultados.

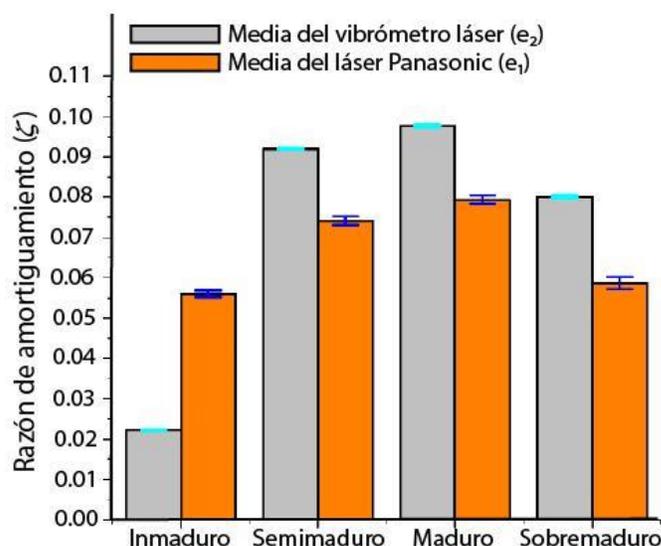


Figura 6.15. Medias de la razón de amortiguamiento distribuidos por estado de maduración y sensor implementado

En este sentido, el comportamiento observado guarda una estrecha vinculación con las propiedades elásticas y físicas propias de los frutos de café de la variedad Castillo. Los cambios evidenciados en los resultados obtenidos encuentran su origen en la transformación de la estructura del fruto a medida que avanza en su proceso de maduración. En esta

secuencia, emergen variaciones internas suscitadas por elementos tales como el contenido de agua, la densidad, la composición del grano y la pulpa. En lo que respecta a las características elásticas, se debe considerar que los frutos, al tener la capacidad de deformarse y luego recobrar su forma original de manera elástica en respuesta a las fuerzas a las que se encuentran expuestos, desencadenan un efecto directo que influye en su habilidad para disipar energía, y lo mismo acontece en relación con las condiciones físicas.

En resumen, los resultados presentes en la **Tabla 6.6** indican una correlación entre el grado de madurez de los frutos de café de la variedad Castillo y su habilidad para absorber energía durante las vibraciones. Esta relación posiblemente esté influenciada por cambios en las propiedades físicas y elásticas de los frutos. No obstante, se necesita un análisis más profundo y estudios adicionales para lograr una comprensión exhaustiva de las relaciones y las causas subyacentes.

6.3.3. Resultados de tenacidad a la fractura en la interfaz pedicelo – fruto en cada uno de los estados de maduración

Los resultados generados por el procedimiento que se describió en la sección 6.2.5, se pueden observar en la **Figura 6.16**; este conjunto de gráficas se divide en cuatro partes, donde cada una corresponde a la relación de los datos del esfuerzo de la fractura o la tenacidad a la fractura, con respecto a la longitud del desplazamiento o evolución de la pre-grieta, utilizando para ello dos muestras por cada estado de maduración.

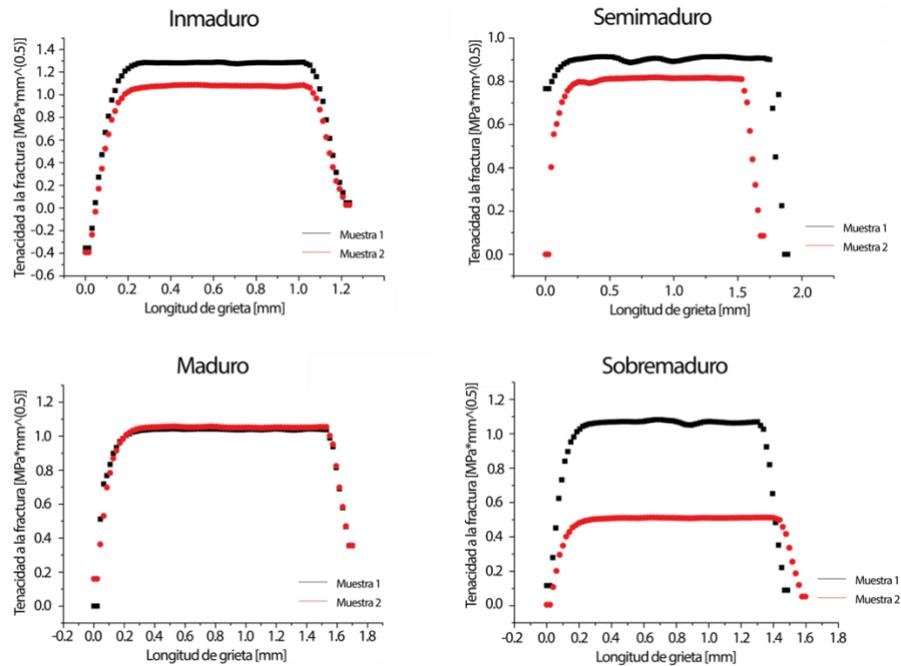


Figura 6.16. Tenacidad a la fractura en cada uno de los estados de maduración

En el conjunto de las cuatro gráficas, se puede observar que la tenacidad a la fractura en su punto máximo tiende a presentar una disminución en su magnitud conforme los estados de maduración avanzan de inmaduro a sobremaduro. Sin embargo, la longitud de la grieta o desplazamiento de la pre-grieta generada para el modelo FEM en cada uno de las muestras, tiende a ir aumentando en su valor conforme cambia sus estados de maduración. Estas características en el cambio de la tenacidad a la fractura ante los diferentes estados de maduración se presentan por la pérdida de rasgos físicos del pedúnculo frente a la maduración del fruto, una condición que es inherente al comportamiento del sistema fruto-pedúnculo.

Los datos del comportamiento de la tenacidad a la fractura en la interface pedicelo - fruto, de cara a los diferentes estados de maduración, en su punto maximo de esfuerzo y longitud de desplazamiento de la grieta se puede apreciar en la **Tabla 6.7.**

Tabla 6.7. Datos de la tenacidad a la fractura en la interface pedicelo - fruto

Estado de maduración	Muestra	Tenacidad a la fractura [Mpa * mm ^{0.5}]	Longitud de grieta [mm]
Inmaduro	Muestra 1	1.2883	1.2369
	Muestra 2	1.0887	1.2369
Semimaduro	Muestra 1	0.9148	1.8894
	Muestra 2	0.8191	1.7000
Maduro	Muestra 1	1.0430	1.7000
	Muestra 2	1.0579	1.7000
Sobremaduro	Muestra 1	1.0825	1.4866
	Muestra 2	0.5138	1.5969

Al comparar los datos de la tenacidad a la fractura, **Tabla 6.7**, con el diagrama de Ashby dado en términos del esfuerzo de la fractura contra el módulo de Young, como el que se presenta en el estudio dado por ([Rahimizadeh et al., 2021](#)), se puede notar que existe una coincidencia en el comportamiento del pedúnculo con los materiales naturales y con los metales. Es de resaltar que estos resultados demuestran la posibilidad de realizar de manera experimental, una aproximación no determinístico del área de trabajo de la tenacidad a la fractura de una estructura vegetal de tan pequeñas dimensiones, como lo es la interface pedicelo – fruto; abriendo la posibilidad de generar a futuro estudios con resultados de mayor precisión que permitan la formulación de una regla para definir resultados mas precisos de este experimento.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Para el desarrollo de los objetivos de la tesis doctoral, se llevaron a cabo una serie de investigaciones que se presentan en cuatro capítulos. El tercer capítulo se enfoca en detallar el método empleado para determinar las propiedades cromáticas de los frutos de café arábico L. Var. Castillo, un aspecto fundamental en la caracterización de su madurez. En este se explora una combinación de técnicas: la medición tradicional mediante un colorímetro y un enfoque alternativo que involucra la captura de imágenes con una cámara fotográfica. Aunque el colorímetro ha sido ampliamente utilizado en la industria para medir la cromaticidad de los frutos, la propuesta de utilizar una cámara digital introduce una perspectiva innovadora y potencialmente más accesible.

Sin embargo, esta adopción de la fotografía como herramienta de medición plantea una serie de desafíos. A diferencia de las mediciones con el colorímetro, que implican un procesamiento directo y rápido de los datos, la captura de imágenes requiere un conjunto más amplio de procedimientos y cálculos. A pesar de esta complejidad adicional, el enfoque de la cámara fotográfica ofrece una ventaja crucial: la posibilidad de reemplazar la necesidad de un costoso colorímetro especializado. Esto abre la puerta a aplicaciones más económicas y accesibles, particularmente en el contexto de la cosecha de café.

El corazón de este enfoque es la transformación lineal de los espacios de color CIELab y RGB, lo que permite igualar los resultados de ambas técnicas, el cual se basa en los datos combinados tanto del colorímetro como de la cámara fotográfica, establece una relación directa entre los espacios de color y posibilita la estimación de la cromaticidad a partir de las imágenes. Sin embargo, es esencial reconocer que la estandarización del sistema de adquisición de imágenes podría representar un desafío en aplicaciones prácticas debido a la susceptibilidad de las cámaras digitales a las variaciones de luz ambiente y la necesidad de establecer procedimientos generalizados.

A pesar de estas consideraciones, los resultados de color generados mediante este método arrojan luz sobre un proceso de maduración claramente definido en los frutos de café. Esta estructura se manifiesta tanto en los datos del colorímetro como en los de la cámara, lo que facilita la trazabilidad del proceso de maduración. La organización de los datos de color en el espacio CIExy, derivado de los espacios CIELab y RGB, exhibe una estructura lineal que posibilita una clasificación efectiva. Este enfoque tiene un potencial significativo en la industria del café, ya que identificar con precisión las etapas de maduración podría mejorar la calidad de la cosecha y el procesamiento de los granos. Además, la correlación entre los espacios de color podría ser extrapolada a otras variedades de café y, posiblemente, a otras especies de frutas, lo que subraya el potencial de esta técnica en la industria agrícola en general.

En resumen, el método que combina la medición de color con un colorímetro y la captura de imágenes mediante una cámara digital se presenta como una estrategia prometedora para determinar la madurez de los frutos de café. A pesar de los desafíos relacionados con la estandarización de la adquisición de imágenes, los resultados sugieren un impacto positivo en la calidad de la cosecha y un posible alcance en aplicaciones más amplias en la agricultura. Este enfoque, sin embargo, requiere una consideración más detenida y ajustes en el sistema de adquisición de imágenes para su implementación efectiva en aplicaciones prácticas.

En el capítulo cuatro se describen las propiedades físicas y mecánicas que corresponden al comportamiento natural de los frutos del café arábica L. Var. Castillo. Los resultados mostrados indican una dependencia de su estado de madurez. Estos hallazgos se basan en experimentos que involucraron la toma de una serie de muestras cuantitativas y aleatorias utilizando métodos colorimétricos. Los datos obtenidos se analizaron mediante técnicas estadísticas que permitieron generar una división de cuatro fases, con un nivel de confianza del 95% para cada una, y una serie de parámetros de error relativo. Este paso se presenta como un insumo valioso que no solo caracteriza las propiedades físicas y mecánicas, sino que también posibilita la clasificación de otros resultados según la fase o estado de maduración de los frutos.

Estas propiedades físicas y mecánicas se analizaron cuidadosamente en relación con la madurez de los frutos. En particular, se observó un incremento gradual en las dimensiones geométricas de los frutos a medida que avanzaba su madurez, lo que indica un cambio constante en su comportamiento físico-mecánico en comparación con otras variedades de la misma especie (Tinoco & Peña, 2019). Además, se evidenció un aumento en el volumen, la masa y la densidad de los frutos a lo largo de su maduración. Este fenómeno es relevante, ya que señala una expansión continua de su material interno hasta alcanzar su etapa máxima de desarrollo. Asimismo, la propiedad de firmeza se sometió a un análisis estadístico completo, considerando sus tres direcciones ortogonales. Los resultados revelaron una tendencia: a medida que los frutos maduran, la fuerza necesaria para alcanzar el punto de ruptura disminuye de manera gradual.

Una propiedad que resalta por su diferencia biológica con respecto a otras variedades es la acidez o pH. Los valores estadísticos demuestran una tendencia constante y cercana a la acidez en los frutos de la variedad Castillo, lo que plantea preguntas sobre la fisiología de la planta. Una posible hipótesis, que requiere verificación adicional, es que el cafeto proporciona continuamente elementos esenciales para el crecimiento de los frutos. Esto podría influir en el proceso de desprendimiento entre el sistema fruto-pedúnculo y la rama, que podría depender del peso en la cereza y la resistencia del pedúnculo. Esta afirmación se basa en los resultados del análisis de desprendimiento por torque y axial, donde se observó que la fuerza necesaria para el desprendimiento disminuye a medida que aumenta el estado de madurez de los frutos.

En conjunto, estos resultados ofrecen información valiosa para la industria del café. La dependencia de las propiedades físicas y mecánicas de los frutos de su estado de madurez sugiere oportunidades para mejorar la calidad de la cosecha. Además, la diferencia en el comportamiento de la variedad Castillo en comparación con otras variedades subraya la necesidad de adaptar las prácticas agrícolas y de procesamiento a las características específicas de cada variedad. La hipótesis sobre la acidez plantea cuestiones sobre la

nutrición de los frutos y su relación con la calidad. Finalmente, la disminución de la fuerza necesaria para el desprendimiento a medida que los frutos maduran ofrece pistas valiosas para técnicas de cosecha más eficientes y sostenibles. Esto no solo tienen implicaciones en la producción de café sino que también pueden guiar futuras investigaciones en el campo de la fisiología de las plantas y la agronomía.

Hacia el capítulo cinco, se muestra el desarrollo y los resultados obtenidos de los análisis de elementos finitos, realizados sobre el fruto de café arábica *L. Var. castillo* con el fin de obtener un acercamiento a la conformación real del material del fruto y su correspondiente grano en cada uno de sus estados de maduración, los cuales fueron previamente definidos en el capítulo dos. Para ello, primero se utiliza como insumo principal del análisis, los frutos y granos de café escaneados y procesados en Meshmixer® y Ansys®; así mismo se emplean los datos experimentales del módulo de Young y el coeficiente de Poisson, dados en capítulo cuatro, para definir el material del modelo.

Con esta fase definida se procede a realizar una serie de simulaciones con el software Ansys®, donde los modelos se dividen según el estado de maduración del fruto escaneado y las direcciones ortogonales e_1 , e_2 , y e_3 , a trabajar. En esta etapa se procura recrear el experimento de compresión del capítulo cuatro, utilizando para ello dos placas paralelas de acero estructural ($E = 200 \text{ GPa}$, $\nu = 0,3$), por cada uno de los frutos; y al igual que con el proceso experimental, se aplica una carga distribuida sobre los especímenes. Además, hay que mencionar que se implementaron dos tipos de enmallado en cada proceso de simulación, en el que para cada modelo de fruto se utilizaron elementos tetraédricos cuadráticos y para las placas de compresión elementos hexaédricos.

Este proceso de análisis de elementos finitos (FEM), requiere de tres modelos separados de simulación, donde con cada uno de ellos se busca obtener una serie de curvas elásticas (desplazamiento contra fuerza), que, al ser comparados con las curvas elásticas, producto de la experimentación descrita en el capítulo cuatro, permiten predecir si el tipo de material (bien sea isotrópico elástico lineal o ortótropico elástico lineal), es similar al del fruto físico.

Así mismo se determina el módulo de Young y la relación de Poisson de los diferentes estados de maduración.

Por otra parte, las gráficas generadas por cada simulación presentan diferentes aproximaciones que, al ser comparadas con las curvas elásticas, producto de las experimentaciones, permiten indicar el modelo que mejor se aproxima a la representación de los frutos y sus granos en cada uno de los estados de maduración. En resumen, el procedimiento que más aproximación tiene es el que se indica como la tercera simulación, ya que con este se obtuvieron curvas de carga de desplazamiento bastante aproximadas a las curvas experimentales de compresión, por lo tanto, este se considera como modelo definitivo, que genera una serie de variaciones paramétricas como el módulo de Young y la relación de Poisson.

Para el capítulo seis, se halla la razón de amortiguamiento, la cual corresponde al comportamiento natural de pedúnculo del café arábica L. Var Castillo, donde los resultados indican que existe una dependencia del comportamiento con el estado de maduración. Estas cantidades estadísticas son determinadas experimentalmente, tomando inicialmente una serie de muestras aleatorias, donde se seleccionan los especímenes con base a métodos colorimétricos y con un protocolo de elección; luego, con la ayuda del montaje experimental, proceso que se diseñó y se mejoró, se realizaron las mediciones de la vibración resultante, después de generar un golpe sobre el fruto (lo cual es equivalente a una señal de excitación tipo pulso); estas lecturas, sobre cada una de las muestras, se caracterizaron con base a las variables de posición o cantidad de desplazamiento en el fruto (con la ayuda de un láser Panasonic), velocidad de desplazamiento (con la ayuda de un vibrómetro láser) y fuerza ejercida por el sistema fruto-pedúnculo (con la ayuda de un piezoeléctrico). Apuntando las mediciones hacia las direcciones ortogonales e_1 , e_2 y e_3 del fruto respectivamente

Cada una de las señales generadas deben pasar a través de un filtro digital pasa bandas tipo Butterworth de orden 6, con el cual se limpian los datos de ruidos eléctricos creados por el tipo de montaje experimental; a los datos obtenidos se les calcula las frecuencias de vibración

utilizando la transformada rápida de Fourier. Los resultados indican que la vibración de respuesta a la excitación externa se va incrementando conforme avanzan los estados de maduración, siendo notable que existe una similitud entre las tres variables entregadas por los sensores.

Después, tanto con las señales de vibración como con las frecuencias de cada uno de los frutos, se realiza una regresión exponencial, teniendo como base los picos superiores de cada una de las señales de vibración del fruto de café; se debe tener en cuenta que este procedimiento solo se realizó para las direcciones ortogonales e_1 y e_2 de los datos originalmente adquiridos, en otras palabras a la información generada y procesada del láser Panasonic y del vibrómetro láser, ya que la relación de movimiento (según las observaciones con la cámara de alta velocidad Chronos 1.4) muestran una reacción al estímulo del golpe en estas dos direcciones; aclarando que los datos provenientes del sensor piezoeléctrico son la suma o la verificación de la reacción en dichas dos orientaciones.

Por lo tanto, se dividió en dos tipos de regresiones, donde en cada una se utiliza, bien sea, una ecuación para las mediciones de desplazamiento como una ecuación para las mediciones de velocidad, la cual es una derivada de la ecuación de regresión que se utiliza para las mediciones de vibración en unidades de desplazamiento. Finalmente, para este proceso, de cada una de estas ecuaciones se extraen y se ponderan las razones de amortiguamiento en cada uno de los estados de maduración.

Ahora, para los resultados obtenidos en la tenacidad a la fractura, se realizó una identificación de las características físicas, diámetro y longitud del pedúnculo, utilizando un pie de rey por cada una de las muestras. También se generó un proceso experimental para medir la fuerza de desprendimiento en cada una de las interfaces pedicelo – fruto de los especímenes seleccionados, cuando existe una pre-grieta (o muesca), generada con la ayuda de un bisturí, entre el límite del pedicelo y el fruto. Con estos resultados definidos experimentalmente y el módulo de Young del pedúnculo, hallado en estudios previos, se procedió a crear ocho modelos FEM, con los que se obtienen los datos de la tenacidad a la fractura en cada uno de

los estados de maduración; observando que el esfuerzo a la fractura tiende a disminuir ante el avance de los estados de maduración en el fruto del café.

CONCLUSIONES

Este proyecto doctoral tuvo como objetivo extraer y comprender las propiedades físicas, mecánicas, dinámicas y de fractura del café variedad Castillo en sus diferentes estados de maduración. El enfoque se basó en una combinación de técnicas experimentales, algunas de las cuales representaron contribuciones innovadoras en la caracterización de este café específico.

En una fase inicial, se abordaron aspectos cruciales, como sus propiedades cromáticas, geométricas, el grado de acidez, densitométricas y fuerzas de desprendimiento (axial y torsión) del sistema fruto-pedúnculo. Estos análisis no solo proporcionaron información esencial sobre el café, sino que también generaron una nueva contribución al acercamiento entre espacios de color CIElab y RGB, utilizando datos del colorímetro y de la cámara fotográfica, con lo cual se facilita el reemplazo del colorímetro como una herramienta especializada y costosa para medir el color en el café. Además, se destaca que esta información no estaba disponible previamente en las bases de datos, lo que subraya la singularidad de la investigación.

La caracterización de las propiedades elásticas del sistema fruto-pedúnculo fue otro hito importante en el proyecto. Se combinaron ensayos cuasi-estáticos con un análisis de elementos finitos (FEA) para determinar las propiedades elásticas del fruto en diferentes estados de maduración. Este enfoque representa una base valiosa para futuras investigaciones en el campo de la resistencia del café a daños mecánicos y el diseño de equipos tecnológicos para la cosecha selectiva.

El estudio también se adentró en el análisis de las propiedades de amortiguamiento del pedúnculo en los diferentes estados de maduración, utilizando técnicas de excitación armónica. A pesar de la complejidad debida a las dimensiones de los especímenes, se estableció un precedente para proyectos futuros en este campo. Los resultados obtenidos aquí sentaron las bases para el diseño de aplicaciones de vibradores que podrían aprovechar la

frecuencia natural o resonancia del café variedad Castillo durante la cosecha, optimizando así el proceso para los productores.

Además, se identificó la tenacidad a la fractura en la interface pedicelo-fruto en diferentes estados de maduración, un aspecto que no había sido abordado previamente en estructuras vegetales, especialmente en el contexto de la interface pedicelo-fruto del café. Este método se considera novedoso y podría replicarse en futuras investigaciones, lo que ofrece nuevas perspectivas sobre la resistencia del café a daños mecánicos durante la poscosecha.

Por último, el enfoque numérico-experimental utilizado para medir y extraer todos estos datos proporcionó referentes valiosos, algunos de los cuales no existían previamente. Este enfoque es relevante tanto para la evaluación de especies vegetales de pequeñas dimensiones como para el diseño o adaptación de equipos para la cosecha del café variedad Castillo. Al comparar este estudio con otros sobre el fruto de café en distintas especies, se destacaron una serie de características fenotípicas únicas en el café Castillo, como su tamaño, forma, resistencia, densidad, color, textura y otras propiedades, que son diferenciadores fundamentales en la creación o utilización de cualquier tecnología de recolección. Este proceso de investigación podría incluso ramificarse en futuros desarrollos de tecnología de recolección, aunque se debe tener en cuenta la complejidad de las condiciones en las que se cultiva este tipo de café. En resumen, este proyecto doctoral no solo caracterizó en detalle el café variedad Castillo en sus diversos estados de maduración, sino que también introdujo contribuciones originales y significativas en múltiples áreas de estudio y desarrollo tecnológico relacionadas con este café específico.

RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

Desarrollar un sistema orientado para tecnologías móviles, que permitan la identificación de los estados de maduración del café, no solo en la variedad castillo, si no también en otras variedades de café producidas en Colombia, utilizando las estrategias implementadas para determinar las propiedades cromáticas. El desarrollo de esta tecnología permitiría aportar en la producción de café en la etapa de cosecha.

Generar una investigación complementaria a la caracterización físico – mecánica y dinámica de la variedad Castillo, en diferentes zonas del país a distintas alturas sobre el nivel del mar. Esto debido a que las condiciones medioambientales pueden cambiar las características de una especie, generando un vacío en el conocimiento, que puede afectar o limitar un diseño de sistema recolector de café.

Trasladar, mejorar y/o explorar nuevas técnicas para determinar propiedades elásticas, de amortiguamiento y de tenacidad a la fractura, en otras variedades de café o en otro tipo de cultivos para la producción, ya que este tipo de información científica es escasa para el territorio colombiano, y con el cual se pueden generar diferentes tipos de avances tecnológicos para la agricultura.

Realizar un estudio determinístico que permita ahondar, tomando una mayor cantidad de muestras en el estudio de la tenacidad a la fractura en el café variedad Castillo. En esta investigación solo se planteó la forma de realizar el proceso experimental, debido a que no existían precedentes de este tipo de estudios sobre ningún tipo de material vegetal.

Implementar una nueva investigación, utilizando los datos generados en este estudio, para desarrollar o adaptar tecnologías de cosecha selectiva para el café, que permitan a los productores nacionales tener equipos desarrollados especialmente para las condiciones medioambientales del cultivo.

CONTRIBUCIONES DEL TRABAJO

Artículos publicados relacionados con la tesis:

- Rincón-Jiménez, A., Tinoco, H. A., Buitrago-Osorio, J., Ocampo, O., Berrio, L. V., Rodriguez-Sotelo, J. L., & Arizmendi, C. (2021). Ripeness stage characterization of coffee fruits (*coffea arabica* L. var. Castillo) applying chromaticity maps obtained from digital images. *Materials Today: Proceedings*, *44*, 1271-1278.
- Buitrago-Osorio, J., Tinoco, H. A., Perdomo-Hurtado, L., Rincon-Jimenez, A., Ocampo, O., Berrio, L. V., ... & Lopez-Guzman, J. (2022). Physical-mechanical characterization of coffee fruits *Coffea arabica* L. var. Castillo classified by a colorimetry approach. *Materialia*, *21*, 101330.
- Tinoco, H. A., Buitrago-Osorio, J., Perdomo-Hurtado, L., Lopez-Guzman, J., Ibarra, C. A., Rincon-Jimenez, A., ... & Berrio, L. V. (2022). Experimental Assessment of the Elastic Properties of Exocarp–Mesocarp and Beans of *Coffea arabica* L. var. Castillo Using Indentation Tests. *Agriculture*, *12*(4), 502.

Conferencia relacionada con la tesis:

- 1er Congreso internacional de ingeniería biomédica y bioingeniería: impactando vidas desde la ingeniería. Methodology for the classification of ripeness state of coffee fruits through chromaticity color space. Póster.

Otros trabajos derivados:

Los siguientes trabajos también se encuentran enmarcados en el proyecto denominado: “desarrollo de una tecnología de cosecha selectiva de café arábica aplicando vibraciones de alta frecuencia”², siendo un complemento a esta tesis doctoral:

- Buitrago-Osorio, J., Tinoco, H. A., Perdomo-Hurtado, L. (2022). Caracterización de propiedades mecánicas del sistema fruto-pedúnculo del Café Arábica L. Var. Castillo mediante pruebas experimentales y análisis de elementos finitos [tesis maestría, Universidad Autónoma de Manizales].
- Cardona- García, C. I., Tinoco, H. A. (2022). Dispositivo de excitación por pulsos de aire para la generación de vibraciones en frutos de café. [tesis maestría, Universidad Autónoma de Manizales].
- Pineda, M. F., Tinoco, H. A., Lopez-Guzman, J., Perdomo-Hurtado, L., Cardona, C. I., Rincon-Jimenez, A., & Betancur-Herrera, N. (2022). Ripening stage classification of Coffea arabica L. var. Castillo using a Machine learning approach with the electromechanical impedance measurements of a contact device. *Materials Today: Proceedings*.

² Convocatoria 808 del 2018. Proyectos de ciencia, tecnología e innovación y su contribución a los retos del país; programa nacional de ciencia, tecnología e innovación en ciencias agropecuarias.

REFERENCIAS

- Aiello, G., Vallone, M., & Catania, P. (2019). Optimising the efficiency of olive harvesting considering operator safety. *Biosystems Engineering*, 185, 15-24. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.02.016>
- Alvarado, G., Posada, H. E., & Cortina, H. A. (2005). Castillo: Nueva variedad de café con resistencia a la roya. *Avances Técnicos Cenicafé*, 337, 1-8. <https://doi.org/10.38141/10779/0337>
- Alvarado, G., & Puerta, G. (2002). *La variedad Colombia y sus características de calidad física y en taza*. Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé).
- Alvarez, M. D., Saunders, D. E. J., Vincent, J. F. V., & Jeronimidis, G. (2000). An engineering method to evaluate the crisp texture of fruit and vegetables. *Journal of texture studies*, 31(4), 457-473.
- Álvarez M. F., Oliveros T. C. E., & Sanz U. J. R. (2013). Evaluation of mechanical beaters in coffee harvesting/evaluación de batidores mecánicos en la cosecha del café. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. 66(1), 6919-6928.
- Amaya, A. K., Jiménez, R. E., & Montealegre, A. V. (2017). Análisis de la deserción laboral de recolectores de café en el eje cafetero (2001-2014) [Tesis, Fundación Universitaria Los Libertadores]. Repositorio institucional. <https://repository.libertadores.edu.co/handle/11371/1635>

- Amirante, P., Catalano, P., Giametta, F., Leone, A., & Montel, G. L. (2007). Vibration analysis of an olives mechanical harvesting system. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. Vol IX.
- Arana, V. A., Medina, J., Alarcón, R., Moreno, E., Heintz, L., Schäfer, H., & Wist, J. (2015). Coffee's country of origin determined by NMR: the Colombian case. *Food Chemistry*, 175, 500–506. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.11.160>
- Arcila P., J., & Jaramillo R., A. (2003). *Relación entre la humedad del suelo, la floración y el desarrollo del fruto del cafeto*. *Avances Técnicos No 311 (CENICAFÉ)*, 1-8. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/4215>
- Arcila P., J., Farfán V., F., Moreno B., A., Salazar G., L., & Hincapié G., E. (2007). *Sistemas de Producción de café en Colombia - FNC - Cenicafé*. Chinchiná, Caldas, Colombia: Editorial Blanecolor Ltda.
- Aristizabal A., C., & Duque O., H. (2008). Identificación de los patrones de ingreso en fincas de economía campesina de la zona central cafetera de Colombia. *Cenicafe*. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/220>
- ASTM E399-20. (2020). Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials. *ASTM International, West Conshohocken, PA*.
- ASTM E561-20. (2020). Standard Test Method for KR Curve Determination. *ASTM International, West Conshohocken, PA*.
- ASTM E813-89E01. (1989). Test Method for JIC, A Measure of Fracture Toughness (Withdrawn 1997). *ASTM International, West Conshohocken, PA*.

- ASTM E1152-95. (1995). Test Method for Determining J-R Curves. *ASTM International, West Conshohocken.*
- ASTM E1737-96. (1996). Test Method for J-Integral Characterization of Fracture Toughness (Withdrawn 1998). *ASTM International, West Conshohocken, PA*
- ASTM, E.-0. (2006). Standard Practice for Computing the Colors of Objects by Using the CIE System.
- Bencardino, C. M. (2012). *Estadística y muestreo (13.ª ed.)*. Bogotá: Ecoe Ediciones.
- Bertone, E., Venturello, A., Giraud, A., Pellegrino, G., & Geobaldo, F. (2016). Simultaneous determination by NIR spectroscopy of the roasting degree and Arabica/Robusta ratio in roasted and ground coffee. *Food Control*, 59, 683–689. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.06.055>
- Best, R., Bridgeman, I., Hill, A., McDonald, R., McLaren, K., Patterson, D., & Rigg, B. (1987). *Color physics for industry*. Bradford, United Kingdom: The Society of Dyers and Colourists.
- Bejarano, J. A. (1980). Los estudios sobre la historia del café en Colombia. *Cuadernos de economía (Santafé de Bogotá)*, 1(2), 115-140.
- Benito, B. P., Arellanes, J. N., & Pérez, F. M. E. (2016). Color y estado de madurez del fruto de tomate de cáscara. *Agronomía Mesoamericana*, 27(1), 115-130.
- Billmeyer, F. W. (1987). Survey of color order systems. *Color Research and Application*, 12(4), 173–186. <https://doi.org/10.1002/col.5080120405>

- Broadbent, A. D. (2004). A critical review of the development of the CIE1931 RGB color-matching functions. *Color Research and Application*, 29(4), 267–272. <https://doi.org/10.1002/col.20020>
- Broek, D. (1982). *Elementary engineering fracture mechanics*. Springer Science & Business Media. Fourth revised edition.
- Broek, D. (2012). *The practical use of fracture mechanics*. Springer Science & Business Media.
- Buitrago, O. J., Tinoco, H. A., Perdomo, H. L., Rincon, J. A., Ocampo, O., Berrio, L. V., Pineda, M. F., & Lopez, G. J. (2022). Physical-mechanical characterization of coffee fruits *Coffea arabica* L. var. Castillo classified by a colorimetry approach. *Materialia*, 21, 101330. <https://doi.org/10.1016/J.MTLA.2022.101330>
- Cardona, C. I., Tinoco, H. A., Pereira, D. A., Buitrago-Osorio, J., Perdomo-Hurtado, L., Hurtado-Hernandez, M., & Lopez-Guzman, J. (2020). Vibration shapes identification applying eulerian video magnification on coffee fruits to study the selective harvesting. *2020 19th International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME)*, 1–8.
- Carvajal, J. J., Aristizábal, I. D., Oliveros, C. E., & Mejía, J. W. (2011). Colorimetría del fruto de café (*Coffea arabica* L.) durante su desarrollo y maduración. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 64(2), 6229-6240.
- Carvajal, A. (2017). *Análisis de la cadena de valor de café para la creación de un sistema integrado de gestión para el procesamiento y comercialización de café verde*. Recuperado el 2 de diciembre de 2022, de <https://repository.cesa.edu.co/handle/10726/1817>

- Casal, J. & Mateu, E. (2003). "Tipos de muestreo," *Rev. Epidem. Med. Prev* 1, 3–7.
- Castro, S., Blanco, G. L., Ferguson, L., & Gonzalez, E. J. (2017). Frequency response of late-season 'Valencia' orange to selective harvesting by vibration for juice industry. *Biosystems Engineering*, 155, 77e83. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.11.012>
- Castro, G. S., Blanco, R. G. L., Gil, R. J. A., & Agüera, V. J. (2008). Dynamic analysis of olive trees in intensive orchards under forced vibration. *Trees (Berlin, Germany: West)*, 22(6), 795–802. <https://doi.org/10.1007/s00468-008-0240-9>
- Castro, G. S., Blanco, R. G. L., & Gil, R. J. A. (2011). Frequency response of *Pinus Pinea* L. for selective cone harvesting by vibration. *Trees (Berlin, Germany: West)*, 25(5), 801–808. <https://doi.org/10.1007/s00468-011-0556-8>
- Ciro, H.J., Álvarez, F., & Oliveros, T. C.E., (1998). Estudio experimental de la dinámica de las vibraciones longitudinales y transversales aplicadas a las ramas de café. *Rev. Facul. Nacional Agronomía Medellín* 51 (2), 245–275.
- Ciro, H. J., Oliveros T, C. E., & Mejía, F. Á. (1998). Estudio Dinámico Bajo Oscilación Forzada del Sistema Fruto-Pedúnculo (S.F.P) del Café Variedad Colombia. *Revista Facultad Nacional De Agronomia Medellin*, 51(1), 63–90. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/28857>
- Ciro, H. J. (2001). Coffee harvesting I: Determination of the natural frequencies of the fruit stem system in coffee trees. *Applied Engineering in Agriculture*, 17(4), 475-479.

- Cleva, M. S., Sampallo, G. M., Da Fonseca, C. R., Aquino, D. C., Liska, D. O., & Ventre, F. R. (2017). Método para la determinación de la densidad de una muestra de granos enteros de alubia por procesamiento digital de imágenes. *RIA. Revista de investigaciones agropecuarias*, 43(2), 144-148.
- Coelho, A. L. de F., Santos, F. L., Pinto, F. A. C., & Queiroz, D. M. de. (2015). Determinação das propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental/Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering*, 19(3), 286–292. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n3p286-292>
- Constantino, L., Jaramillo, A., Benavides, P., & Bustillo, A. (2011). Efecto del cambio y la variabilidad climática en la dinámica de infestación de la broca del café, *Hypothenemus hampei* en la zona central cafetera de Colombia. *Libro de Memorias 38° Congreso Sociedad Colombiana de Entomología (Simposio variabilidad climática)*, 106-121.
- Cortina, H. A., Moncada, M., & Herrera, J. C. (2013). *Variedad Castillo®: Preguntas frecuentes*. Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé). <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/410>
- Costa, A. G., Sousa, D. A. G. de, Paes, J. L., Cunha, J. P. B., & Oliveira, M. V. M. de. (2020). Classification of robusta coffee fruits at different maturation stages using colorimetric characteristics. *Engenharia Agrícola*, 40(4), 518–525. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v40n4p518-525/2020>

Czerner, M., Fellay, L. S., Suárez, M. P., Frontini, P. M., & Fasce, L. A. (2015). Determination of Elastic Modulus of Gelatin Gels by Indentation Experiments. *Procedia Materials Science*, 8, 287–296. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.04.075>

De Queiroz, D. M., Villibor, G. P., DE AFRANCISCO., PINTO, C., & GUEDES, D. M. (2010). Determination of the damping coefficient of coffee branches using image processing techniques. *XVIIth World Congress of the International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering (CIGR)* (pp. 1-10). Quebec: Quebec, Proceedings.

de Oliveira, E. M., Leme, D. S., Barbosa, B. H. G., Rodarte, M. P., & Pereira, R. G. F. A. (2016). A computer vision system for coffee beans classification based on computational intelligence techniques. *Journal of Food Engineering*, 171, 22–27. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.10.009>

Díaz, G. D., Ramírez, G. C. A., Oliveros, T. C. E., & Moreno, C. E. L. (2009). Cosecha de café con el equipo portátil Stihl SP-81, de actuadores oscilantes. *Cenicafé*, 60(1), 41-57. Recuperado el 2 de diciembre de 2022, de [https://www.cenicafe.org/es/publications/arc060\(01\)041-057.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/arc060(01)041-057.pdf)

Dintwa, E., Van Zeebroeck, M., Ramon, H., & Tijskens, E. (2008). Finite element analysis of the dynamic collision of apple fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 49(2), 260–276. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2008.01.012>

- Durmus, D. (2020). CIELAB color space boundaries under theoretical spectra and 99 test color samples. *Color Research and Application*, 45(5), 796–802. <https://doi.org/10.1002/col.22521>
- Espinosa, B. G., Rodríguez, A. M., & Guerra, O. L. (2007). Búsqueda de modos de vibración apropiados para la cosecha selectiva del café. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 16(1), 1-6.
- Faheem, M., Liu, J., Chang, G., Ahmad, I., & Peng, Y. (2021). Hanging force analysis for realizing low vibration of grape clusters during speedy robotic post-harvest handling. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 14(4), 62-71.
- Fairman, H. S., Brill, M. H., & Hemmendinger, H. (1997). How the CIE 1931 color-matching functions were derived from Wright-Guild data. *Color Research and Application*, 22(1), 11–23. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1520-6378\(199702\)22:1<11::aid-col4>3.0.co;2-7](https://doi.org/10.1002/(sici)1520-6378(199702)22:1<11::aid-col4>3.0.co;2-7)
- Flórez, J. D., & Tamayo, C. (2019). *Factores determinantes de la escasez de mano de obra en el Grupo Café Cascada en Ciudad Bolívar (Antioquia)* [Tesis, Corporación Universitaria Minuto de Dios]. Repositorio institucional Corporación Universitaria Minuto de Dios <https://repository.uniminuto.edu/handle/10656/10380>
- Forbes, K. A., & Tattersfield, G. M. (1999). Estimating fruit volume from digital images. In 1999 *IEEE Africon. 5th Africon Conference in Africa (Cat. No. 99CH36342)* (Vol. 1, pp. 107-112). IEEE.

Forbes, K., (2000). Volume estimation of fruit from digital profile images. [Master's thesis. Cape Town, South Africa: University of Cape Town, Department of Electrical Engineering].

Fuerte, A. (2014). *Análisis del comportamiento viscoelástico en materiales compuestos utilizando nanoindentación* [Instituto Politécnico Nacional].
<https://1library.co/document/dy4xwdrz-analisis-comportamiento-viscoelastico-materiales-compuestos-utilizando-nanoindentacion.html>

Gaitán, A., Flórez, C., García, J., Benavides, P., Gil, Z., Sadeghian, S., ... & López, J. (2016). *Evento de La Niña en Colombia: recomendaciones para la caficultura*. Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé).
<https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/705>.

Gaitán B., A. L., Flórez R., C. P., García L., J. C., Benavides M., P., Gil P., Z. N., Sadeghian K., S., Lince S., L. A., Salazar G., L. F., Oliveros T., C. E., Sanz U., J. R., Ramírez G., C. A., Peñuela M., A. E., Rodríguez V., N., Quintero Y., L. V., & López N., J. C. (2016). *Evento de La Niña en Colombia: Recomendaciones para la caficultura. Avances Técnicos No 467 (Cenicafé)*, 1-12.
<https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/705>

Gaskins, B., Martínez, A., & Llanes, O. (2004). Determinación de las propiedades físico-mecánicas del sistema fruto pedúnculo-rama de café variedad Caturra Rojo y Amarillo. *Conferencia de Ingeniería Agrícola de La Habana AgrIng*. La Habana.

Gludovatz, B., Walsh, F., Zimmermann, E. A., Naleway, S. E., Ritchie, R. O., & Kruzic, J. J. (2017). Multiscale structure and damage tolerance of coconut shells. *Journal of the*

mechanical behavior of biomedical materials, 76, 76-84.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1751616117302138>

Gómez, A. M., & Palacio, E. J. (2021). La relación de la tasa de cambio en las exportaciones de café en Colombia (2009-2019) [Tesis, Universidad Antonio Nariño]. Repositorio institucional Universidad Antonio Nariño

Gomes, J. F. S., Vieira, R. R., & Leta, F. R. (2013). Colorimetric indicator for classification of bananas during ripening. *Scientia Horticulturae*, 150, 201–205.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.11.014>

Granja, J.J., & Oliveros, T. C.E., (2003). Diseño, construcción y evaluación de un vibrador multidireccional de tallos para la cosecha mecánica de café en Colombia. *Sci. Tech.* 9 (21), 59–64.

Gupta, S. K., Ehsani, R., & Kim, N.-H. (2016). Optimization of a citrus canopy shaker harvesting system: Mechanistic tree damage and fruit detachment models. *Transactions of the ASABE*, 59(4), 761–776.
<https://doi.org/10.13031/trans.59.10819>

Hahn, F., & Sanchez, S. (2000). Carrot Volume Evaluation using Imaging Algorithms. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 75(3), 243–249.
<https://doi.org/10.1006/jaer.1999.0466>

He, L., Zhou, J., Du, X., Chen, D., & Zhang, Q. (2013). Energy efficacy analysis of a mechanical shaker in sweet cherry harvesting. *Biosystems Engineering*, 116, 309e315. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.08.013>

- Helfrick, M. N., Niezrecki, C., Avitabile, P., & Schmidt, T. (2011). 3D digital image correlation methods for full-field vibration measurement. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(3), 917–927. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.08.013>
- Herrera, J. J. C., Torres, I. D. A., & Tascón, C. E. O. (2012). Evaluación de propiedades físicas y mecánicas del fruto de café (*Coffea Arabica* l. var. Colombia) durante su desarrollo y maduración. *Dyna*, 79(173), 116-124. <https://www.redalyc.org/pdf/496/49623206015.pdf>
- Herrera, J. J. C., Torres, I. D. A., Tascón, C. E. O., & Montoya, J. W. M. (2011). Colorimetría del fruto de café (*Coffea arabica* L.) durante su desarrollo y maduración. *Revista Facultad Nacional de Agronomía-Medellín*, 64(2), 6229-6240.
- Hitchman, S., van Wijk, K., & Davidson, Z. (2016). Monitoring attenuation and the elastic properties of an apple with laser ultrasound. *Postharvest Biology and Technology*, 121, 71–77. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2016.07.006>
- Horwitz, W & Latimer, G. W. (1975). *Official methods of analysis of AOAC International* (Vol. 222). Washington, DC: Association of Official Analytical Chemists. <https://doi.org/10.1093/jaoac/80.6.127a>
- ICO Report: Coffee market prices continued to climb in December.* (2020, enero 9). Tea & Coffee Trade Journal. <https://www.teaandcoffee.net/news/23489/ico-report-coffee-market-prices-continued-to-climb-in-december/>
- Ihueze, C. C., & Mgbemena, C. E. (2017). Design for limit stresses of orange fruits (*Citrus sinensis*) under axial and radial compression as related to transportation and storage design. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 16(1), 72–81. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2015.02.005>

- Isaza G., L. E., Montoya R., E. C., Vélez Z., J. C., & Oliveros T., C. E. (2007). Evaluación de la concentración de los frutos maduros de café empleando técnicas no selectivas de recolección manual. *Cenicafe*. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/106>
- Jaramillo, R. A., & Arcila, P. J. (2009). *Variabilidad climática en la zona cafetera colombiana asociada al evento de El Niño y su efecto en la caficultura*. *Avances Técnicos No 390 (Cenicafé)*, 1-8. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/1133>
- Jancsó, P. T., Clijmans, L., Nicolai, B. M., & De Baerdemaeker, J. (2001). Investigation of the effect of shape on the acoustic response of ‘conference’ pears by finite element modelling. *Postharvest Biology and Technology*, 23(1), 1–12. [https://doi.org/10.1016/s0925-5214\(01\)00098-9](https://doi.org/10.1016/s0925-5214(01)00098-9)
- Johnson, K. L., Greenwood, J. A., & Higginson, J. G. (1985). The contact of elastic regular wavy surfaces. *International Journal of Mechanical Sciences*, 27(6), 383–396. [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(85\)90029-3](https://doi.org/10.1016/0020-7403(85)90029-3)
- Kader, A. A., & Holcroft, D. M. (1999). Postharvest: an introduction to the physiology and handling of fruit, vegetables and ornamentals. *HortTechnology*, 9(2), 299-299.
- Kang, H. (2006). *COLOR Technology for Electronic Imaging Devices*. Bellingham, Washington, United State of America: SPIE Optical Engineering press.
- Kerr, D. A. (2010). *The CIE XYZ and xyY Color Spaces*. Haralick.org. http://www.haralick.org/DV/CIE_XYZ.pdf

- Khan, M. I. H., Patel, N., Mahiuddin, M., & Karim, M. A. (2021). Characterisation of mechanical properties of food materials during drying using nanoindentation. *Journal of Food Engineering*, 291, 110306. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110306>
- Khodabakhshian, R., & Emadi, B. (2011). Determination of the Modulus of Elasticity in Agricultural Seeds on the Basis of Elasticity Theory. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 7(3), 367–373.
- Lafuente, V., Val, J., & Negueruela, A. I. (2016). Non-destructive determination of the optimum harvest time of the sweet cherry cultivar ‘Cashmere’ through CIELab colour coordinates and the principal component analysis (PCA). *Acta horticulturae*, 1194, 1099–1102. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2018.1194.157>
- Láng, Z. (2008). A one degree of freedom damped fruit tree model. *Transactions of the ASABE*, 51(3), 823-829.
- Launey, M. E., & Ritchie, R. O. (2009). On the fracture toughness of advanced materials. *Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla.)*, 21(20), 2103–2110. <https://doi.org/10.1002/adma.200803322>
- León, K., Mery, D., Pedreschi, F., & León, J. (2006). Color measurement in L*a*b* units from RGB digital images. *Food Research International (Ottawa, Ont.)*, 39(10), 1084–1091. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2006.03.006>

- Li, C., Luo, M. R., & Wang, G. (2006). Recent progress in computing weighting tables for calculating CIE tristimulus values. En D. Zhao, M. R. Luo, & H. Yaguchi (Eds.), *SPIE Proceedings*. SPIE. *International Society for Optics and Photonics.*, 6033, 60330R-10.
- Li, Z., Li, P., & Liu, J. (2011). Physical and mechanical properties of tomato fruits as related to robot's harvesting. *Journal of Food Engineering*, 103(2), 170–178. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.10.013>
- López, H. A., Oliveros, C. E., Ramírez, C. A., Álvarez, J. A., & Sanz, J. R. (2008). Manga para la recolección manual de café: Experiencia de investigación participativa. *Avances Técnico Cenicafé*, (374), 8.
- López, C. A. F., & Gómez, P. A. (2004). Comparison of color indexes for tomato ripening. *Horticultura Brasileira*, 22(3), 534–537. <https://doi.org/10.1590/s0102-05362004000300006>
- Machado, A. (2001). El café en Colombia a principios del siglo XX. *Desarrollo económico y social en Colombia siglo xx*, 77-97.
- Martínez, R. A., Montoya, E. C., Vélez, J. C., & Oliveros, C. E. (2005). Estudio de tiempos y movimientos de la recolección manual del café en condiciones de alta pendiente. *Cenicafé*, 56(1), 50-66
- Martínez Llano, G. E., Medina Ortiz, S. M., Herrera Pérez, J. C., Berrio Pérez, J. S., & Beleño Sáenz, K. de J. (2016). Clasificación de los frutos de café según su estado de

maduración y detección de la broca mediante técnicas de procesamiento de imágenes
. N° 1, 15–22. <http://repositorio.uac.edu.co/xmlui/handle/11619/3013>

Martínez, G. M. E., Balois, M. R., Alia, T. I., Cortes. C. M. A., Palomino, H. Y. A., & López, G. G. G. (2017). Poscosecha de frutos: maduración y cambios bioquímicos. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 8(SPE19), 4075-4087

Marín, L., S. M., Arcila, P. J., Montoya, R. E. C., Carlos, & Oliveros, T. E. (2003). Cambios físicos y químicos durante la maduración del fruto de café (*coffea arabica* l. Var. Colombia). *Cenicafé*, 54(3), 208-225

Marín L., S. M., Arcila P., J., Montoya R., E. C., & Oliveros T., C. E. (2004). Relación entre el estado de madurez del fruto del café y las características de beneficio rendimiento y calidad de la bebida. *Cenicafe*, 54(4), 297-315. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/254>

Matsumoto, N., & Nairn, J. (2012). Fracture toughness of wood and wood composites during crack propagation. *Wood and Fiber Science*, 44(2), 121-133.

McLAREN, K. (1976). XIII—the development of the CIE 1976 (L* a* b*) uniform colour space and colour-difference formula. *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, 92(9), 338–341. <https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.1976.tb03301.x>

Meirovitch, L., & Parker, R. G. (2001). Fundamentals of vibrations. *Appl. Mech. Rev.*, 54(6), B100-B101.

- Mohsenin, N.N., (1970.) Chapter 3: physical characteristics. *Physical Properties of Plant and Animal Materials*, vol. I. Gordon & Breach Science Publishers Inc., New York, pp. 51–87.
- Moreda, G. P., Ortiz, C. J., García, R. F. J., & Ruiz, A. M. (2009). Non-destructive technologies for fruit and vegetable size determination – A review. *Journal of Food Engineering*, 92(2), 119–136. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.11.004>
- Moreira, R. M. G., Teixeira, M. M., Santos, F. L., Fernandes, H. C., & Cecon, P. R. (2016). Preliminary design of a coffee harvester. *Semina: Ciências Agrárias*, 37(5), 2933–2946. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2016v37n5p2933>
- Moreno, C. E. L., Oliveros, T. C. E., & Álvarez, M. F. (2015). A portable device to assist in the harvest of coffee in Colombia: Un Equipo Portátil para Asistir la Cosecha de Café en Colombia. *Revista Facultad Nacional De Agronomía Medellín*, 68(1), 7471–7479. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v68n1.47833>
- Mostacedo, B., & Fredericksen, T. (2000). *Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal* (Vol. 87). Santa Cruz, Bolivia: Proyecto de Manejo Forestal Sostenible (BOLFOR)
- Munde, Y. S., Ingle, R. B., & Siva, I. (2019). A comprehensive review on the vibration and damping characteristics of vegetable fiber-reinforced composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 38(17), 822-832
- Murthy, P. S., & Naidu, M. M. (2011). Improvement of robusta coffee fermentation with microbial enzymes. *European Journal of Applied Sciences*, 3(4), 130-139.

- Munsell, A. (1981). *A Color Notation* (Vol. 14). Baltimore, Maryland, USA: Macbeth Division of Kollmorgen Co.
- Namdari, G. B., Maghsoudi, H., & Mohammadi, M. (2020). Ripeness detection of orange fruit using experimental and finite element modal analysis. *Scientia Horticulturae*, *261*, 108958.
- Narisawa, I., & Takemori, M. T. (1989). Fracture toughness of impact-modified polymers based on the J-integral. *Polymer Engineering & Science*, *29*(10), 671-678.
- Neugebauer, R., Werner, M., Voigt, C., Steinke, H., Scholz, R., Scherer, S., & Quickert, M. (2011). Experimental modal analysis on fresh-frozen human hemipelvic bones employing a 3D laser vibrometer for the purpose of modal parameter identification. *Journal of Biomechanics*, *44*(8), 1610–1613. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2011.03.005>
- Niño, Z. L. S., & Ortiz, F. A. P. (2007). Caracterización de café cereza empleando técnicas de visión artificial. *Revista Facultad Nacional de Agronomía-Medellín*, *60*(2), 4105-4127
- Nixon, M., & Aguado, A. (2019). *Feature Extraction and Image Processing for Computer Vision*. Elsevier Science.
- Njeugna, E., Ganou, M. B. K., Ndapeu, D., Foba, J. N. T., Sikame, N. R. T., & Huisken, P. W. M. (2016). An Instrumented Macro-Indentation Method for Determining the Mechanical Properties of Coconut Shell (Coco Nucifera of Cameroon). *Mechanics, Materials Science & Engineering*, July. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1447.3846>

- Noor, A. I., Mokhtar , M. H., Rafiqul , Z. K., & Pramod , K. M. (2012). Understanding Color Models: A Review. *ARNP Journal of Science and Technology*, 2(3), 265-275.
- Ocampo, O. L., & Álvarez, L. M. (2017). Trend in Coffee Production and Consumption in Colombia. *Apuntes del Cenes*, 36(64), 139-165.
- Ocampo, O. L., Ovalle, A. M., Arroyave, A., Salazar, K., Ramírez, C. A., & Oliveros, C. E. (2017). Nuevo método estándar para la recolección selectiva de café. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 18(2), 127-137.
- OECD. (2015). OECD Review of Agriculture Policies: Colombia 2015 (OECD Publi). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1787/9789264227644-en>
- Ohno, Y. (2000). CIE Fundamentals for Color Measurements. *In NIP & Digital Fabrication Conference* (pp. 540-545). Society for Imaging Science and Technology.
- Oliver, W. C., & Pharr, G. M. (1992). An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research*, 7(6), 1564–1583. <https://doi.org/10.1557/jmr.1992.1564>
- Oliveros, C. E., & Sanz, J. R. (2011). Ingeniería y café en Colombia. *Revista de ingeniería*, 33, 99–114. <https://doi.org/10.16924/revinge.33.10>
- Oliveros, T. C.E., Gómez, C.A.R., Acosta, R.A., Mejía, F.A., (2005). Equipo portátil para asistir la cosecha manual de café. *Rev. Facul. Nacional Agronomía Medellín* 58 (2), 3003–3013.

- Oliveros, C. E., Ramírez, C. A., Buenaventura, J. D., & Sanz, J. R. (2005). Diseño y evaluación de una herramienta para agilizar la cosecha manual del café. *Cenicafé*, 56(1), 37-49.
- Oliveros, C. E., Benítez, R., Álvarez, F., Aristizábal, I. D., Ramírez, C. A., & Sanz, J. R. (2005). Cosecha del café con vibradores portátiles del tallo. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 58(1), 2697-2708.
- Opazo, V. A. I. (2015). Determinación de la razón de amortiguamiento en vigas de madera para uso en paneles CLT [Tesis]. Repositorio Institucional - Universidad del Bio- Bio.
- Otzen, T., & Manterola, C. (2017). Técnicas de Muestreo sobre una Población a Estudio. *Revista Internacional de Morfología [International Journal of Morphology]*, 35(1), 227–232. <https://doi.org/10.4067/s0717-95022017000100037>
- Pascale, D. (2006). *RGB coordinates of the Macbeth ColorChecker*. The BabelColor Company. [Kronometric.org. http://kronometric.org/phot/lighting/Macbeth%20ColorChecker%20Tables.pdf](http://kronometric.org/phot/lighting/Macbeth%20ColorChecker%20Tables.pdf)
- Pedrajas, R. F. (2014). *El mundo del Café*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Centro de Publicaciones.
- Pezzi, F., & Caprara, C. (2009). Mechanical grape harvesting: Investigation of the transmission of vibrations. *Biosystems Engineering*, 103(3), 281–286. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.04.002>
- Phelps, J. B., Hubbard, G. B., Wang, X., & Agrawal, C. M. (2000). Microstructural heterogeneity and the fracture toughness of bone. *Journal of Biomedical Materials*

Research, 51(4), 735–741. [https://doi.org/10.1002/1097-4636\(20000915\)51:4<735::aid-jbm23>3.0.co;2-g](https://doi.org/10.1002/1097-4636(20000915)51:4<735::aid-jbm23>3.0.co;2-g)

Plataniotis, K. N., & Venetsanopoulos, A. N. (2013). *Color Image Processing and Applications*. Berlin: Springer.

Puerta, G. I. (2000). Influencia de los granos de café cosechados verdes en la calidad física y organoléptica de la bebida. *Cenicafé*, 51(2), 136-150.

Rahimizadeh, A., Sarvestani, H. Y., Li, L., Robles, J. B., Backman, D., Lessard, L., & Ashrafi, B. (2021). Engineering toughening mechanisms in architected ceramic-based bioinspired materials. *Materials & Design*, 198, 109375.

Ramanath, R., & Drew, M. S. (2009). COLOR: COLOR MODELS. En B. W. Wah, *Wiley Encyclopedia of Computer Science and Engineering* (Vol. Volumen I, págs. 453-463). Vancouver, British Columbia, Canada.

Ramos, P. J., SANZ, J., & OLIVEROS, C. (2010). Identificación y clasificación de frutos de café en tiempo real, a través de la medición de color. *Cenicafé*, 61(4), 315-326.

Rashidi, M., & Seyfi, K. (2007). Classification of fruit shape in cantaloupe using the analysis of geometrical attributes. *World J. Agric. Sci.*, 3, 735–740.

Rico, A., Garrido, M. A., & Rodríguez, J. (2008). Problemática en la determinación de módulo elástico y dureza de materiales cerámicos de alta rigidez mediante indentación. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 47(2), 110-116.

Rincón, J. A., Tinoco, H. A., Buitrago, O. J., Ocampo, O., Berrio, L. V., Rodríguez, S. J. L., & Arizmendi, C. (2020). Ripeness stage characterization of coffee fruits (*coffea*

arabica L. var. Castillo) applying chromaticity maps obtained from digital images. *Materials Today: Proceedings*, 44, 1271-1278.

Ripper, G. P. (2005). *Padronização primária em metrologia de vibrações* [Tesis doctoral, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Doutorado em Ciências de Engenharia Mecânica]. <http://repositorio.bom.org.br:8080/jspui/handle/2050011876/1148>

Robertson, A. R. (1977). The CIE 1976 color-difference formulae. *Color Research and Application*, 2(1), 7–11. <https://doi.org/10.1002/j.1520-6378.1977.tb00104.x>

Rodríguez, A. M., Queiroz, D. M. de, Espinosa, B. G., & Matsuo, H. (2005). *Análise modal do sistema fruto-pedúnculo de café*. <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/2173>

Rodríguez, A. M., Espinosa, B. G., & Guerra, O. L. (2007). Cálculo de la amplitud de la excitación requerida para la cosecha selectiva del café por vibración. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 16(2), 1-6.

Rosa, U.A., Lee, B.S., Diezma, I. B., & Thompson, J.F. (2005). Modeling transient response of fruitful branch for sensing of fruit removal. *ASAE Annual International Meeting*. Tampa, FL July 17-20, 2005, 1.

Ryu, B., Kim, K., Ha, Y., Bae, J., Lee, S., Song, J., Lee, K., Lee, J., Kim, K., & Kim, H. (2014). New RGB primary for various multimedia systems. *Journal of Information Display*, 15(2), 65–70. <https://doi.org/10.1080/15980316.2014.919966>

- Salazar, G. M. R., Chaves, C. B., Riaño, H. M. N., Arcila, P. J., & Jaramillo, R. A. (1994). *Crecimiento del fruto de café Coffea arabica L. var. Colombia*. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Caldas (Colombia). *Cenicafé (Colombia)* v. 45 (2) p. 41-50.
- Salazar, K., Arroyave, A., Mauricio, A., Ocampo, O. L., Ramírez, C. A., & Eugenio, O. C. (2016). Tiempos en la recolección manual tradicional de café. *Ingeniería Industrial*, 37(2), 114-126.
- Sampaio, C. P. (2000). Determinação da força requerida para o desprendimento de frutos de café em diferentes estádios de maturação. <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/199>
- Sandoval, Z., Prieto, F., & Betancur, J. (2010). Digital image processing for classification of coffee cherries. In *2010 IEEE Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference* (pp. 417-421). IEEE.
- Santos, F. L. (2008). Simulação e avaliação do comportamento dinâmico de frutos do cafeeiro na derriça. *f. : il. [Tesis doctoral - Doutorado em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa.]*. T, 631, 3 S237. <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/457>
- Santos, F., Scinocca, F., Siqueira, F., Marques, D., Velloso, N., & Villar, F. (2021). Modal properties of macaw palm fruit-rachilla system: An approach by the stochastic finite element method (SFEM). *Computers and Electronics in Agriculture*, 184, 106099. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106099>
- Sanz, J. R., & Duque, H. (2020). Cosecha con la Derribadora Selectiva de Café Brudden DSC18. *Boletín Técnico Cenicafé*, 43, 1-20.

- Savary, S. K. J. U., Ehsani, R., Salyani, M., Hebel, M. A., & Bora, G. C. (2011). Study of force distribution in the citrus tree canopy during harvest using a continuous canopy shaker. *Computers and Electronics in Agriculture*, 76(1), 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.01.005>
- Shaw, M., & Fairchild, M. (2002). Evaluating the 1931 CIE color-matching functions. *Color Research and Application*, 27(5), 316–329. <https://doi.org/10.1002/col.10077>
- Silva, F. C. da, Silva, F. M. da, Alves, M. de C., Barros, M. M. de, & Sales, R. de S. (2010). Comportamento da força de desprendimento dos frutos de cafeeiros ao longo do período de colheita. *Ciência e Agrotecnologia*, 34(2), 468–474. <https://doi.org/10.1590/s1413-70542010000200028>
- Silva, F. M. D., Salvador, N., & Pádua, T. D. S. (2002). Café: mecanização da colheita. Recuperado el 2 de diciembre de 2022, de http://200.235.128.121/bitstream/handle/123456789/528/166699_Art13f.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Silva, F. M. da, Salvador, N., Rodrigues, R. F., & Tourino, E. de S. (2001). *Avaliação da colheita do café totalmente mecanizada*. <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/1212>
- Silveira, V. N., Rodrigues, M. R., Lúcio, S. F., & Assis, R. S. A. (2020). Modal properties of coffee plants via numerical simulation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 175(105552), 105552. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105552>

- Singh, K. K., & Reddy, B. S. (2006). Post-harvest physico-mechanical properties of orange peel and fruit. *Journal of Food Engineering*, 73(2), 112–120. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.01.010>
- Siringoringo, D. M., & Fujino, Y. (2009). Noncontact operational modal analysis of structural members by laser Doppler vibrometer. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 24(4), 249–265. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2008.00585.x>
- Sirisomboon, P., Kitchaiya, P., Pholpho, T., & Mahuttanyavanitch, W. (2007). Physical and mechanical properties of *Jatropha curcas* L. fruits, nuts and kernels. *Biosystems Engineering*, 97(2), 201–207. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.02.011>
- Souza, G. S. de, Bouzan, A. M. B., Infantini, M. B., Silva, S. de A., & Almeida, R. F. de. (2022). Mechanized harvesting of conilon coffee plants using a self-propelled machine. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental/Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering*, 27(2), 140–148. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v27n2p140-148>
- Souza, V. H. S., Dias, G. L., Santos, A. A. R., Costa, A. L. G., Santos, F. L., & Magalhães, R. R. (2018). Evaluation of the interaction between a harvester rod and a coffee branch based on finite element analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*, 150, 476–483. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.020>

- Spence, C., & Carvalho, F. M. (2020). The coffee drinking experience: Product extrinsic (atmospheric) influences on taste and choice. *Food Quality and Preference*, 80(103802). <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2019.103802>
- Tadeus, M. S., (2018). Vibraciones en sistemas físicos. Primera edición. Editorial Alfaomega
- Tang, X., Ren, J., & Xiao, D. (2011). Simulation of vibration harvesting mechanism for wolfberry. *American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting*, 5, 4096-4110.
- Tan, J. C., & Cheetham, A. K. (2011). Mechanical properties of hybrid inorganic-organic framework materials: establishing fundamental structure-property relationships. *Chemical Society Reviews*, 40(2), 1059–1080. <https://doi.org/10.1039/c0cs00163e>
- Tascón, C. E. O., Gómez, C. A. R., Acosta, R. A., & Mejía, F. Á. (2005). Equipo portátil para asistir la cosecha manual de café. *Revista Facultad Nacional De Agronomía Medellín*, 58(2), 3003–3013. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/24257>
- Tinoco, H. A. (2017). Modeling elastic and geometric properties of Coffea arabicaL. Var.ColombiaFruits by an experimental-numerical approach. *International Journal of Fruit Science*, 17(2), 159–174. <https://doi.org/10.1080/15538362.2016.1270249>
- Tinoco, H., & Peña, F. (2018). Finite element analysis of Coffea arabica L. var. Colombia fruits for selective detachment using forced vibrations. *Vibration*, 1(1), 207–219. <https://doi.org/10.3390/vibration1010015>

- Tinoco, H. A., Ocampo, D. A., Peña, F. M., & Sanz, U. J. R. (2014). Finite element modal analysis of the fruit-peduncle of *Coffea arabica* L. var. Colombia estimating its geometrical and mechanical properties. *Computers and Electronics in Agriculture*, *108*, 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.06.011>
- Tinoco, H. A., Hutař, P., Merle, B., Göken, M., & Kruml, T. (2020a). Fracture toughness evaluation of a cracked Au thin film by applying a finite element analysis and bulge test. *Key Engineering Materials*, *827*, 196–202. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.827.196>
- Tinoco, H. A., & Peña, F. M. (2019). Mechanical and geometrical characterization of fruits *Coffea arabica* L. var. Colombia to simulate the ripening process by finite element analysis. *Engineering in Agriculture Environment and Food*, *12*(3), 367–377. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2019.04.004>
- Tinoco, H. A., Barco, D. R., Ocampo, O., & Buitrago-Osorio, J. (2020b). Geometric modeling of the Valencia orange (*citrus sinensis* L.) by applying Bézier curves and an image-based CAD approach. *Agriculture*, *10*(8), 313. <https://doi.org/10.3390/agriculture10080313>
- Tinoco, H. A., & Marulanda, D. J. (2015). Damage identification in active plates with indices based on Gaussian confidence ellipses obtained of the electromechanical admittance. *Journal of Nondestructive Evaluation*, *34*(3). <https://doi.org/10.1007/s10921-015-0299-3>

- Tinoco, H. A., Buitrago-Osorio, J., Perdomo-Hurtado, L., Lopez-Guzman, J., Ibarra, C. A., Rincon-Jimenez, A., Ocampo, O., & Berrio, L. V. (2022). Experimental Assessment of the Elastic Properties of Exocarp-Mesocarp and Beans of *Coffea arabica* L. var. Castillo Using Indentation Tests. *Agriculture* 2022, Vol. 12, Page 502, 12(4), 502. <https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE12040502>
- Tobón, E. A., Mejia, F. A., Taseón, C. O., & Restrepo, E. C. M. (1999). Propiedades físico-mecánicas del fruto y del sistema fruto-pedúnculo del café variedad Colombia. *Revista facultad nacional de agronomía Medellín*, 52(2), 701-720.
- Torres, A.I.D., Oliveros, T.C.E., Álvarez, M. F., (1999). Propiedades físico-mecánicas del árbol de café y su relación con la mecanización de la cosecha. *Cenicafé* 50 (4), 313–326.
- Torres, A.I.D. (1998). Estudio del efecto de la vibración del árbol de café en la selectividad de la cosecha. Experimento ING-0105, Informe anual Cenicafé, Chinchiná, Colombia.
- Torres, I. D. A., Herrera, J. J. C., & Tascón, C. E. O. (2012). Physical and mechanical properties correlation of coffee fruit (*Coffea arabica*) during its ripening. *Dyna*, 79(172), 148–155. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/22633>
- Torres, R., Montes, E. J., Pérez, O. A., & Andrade, R. D. (2013). Relación del Color y del Estado de Madurez con las Propiedades Físicoquímicas de Frutas Tropicales. *CIT Informacion Tecnologica*, 24(3), 51–56. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642013000300007>

- Torres, A.I.D., Oliveros, T.C.E., Sanz, U. J. R., Montoya, R. E. C., Álvarez, M. F.A., (2000). Cosecha mecánica de café aplicando vibraciones circulares al tallo del cafeto. *Cenicafé* 51 (1), 41
- Torppa, J., Valkonen, J. P. T., & Muinonen, K. (2006). Three-dimensional stochastic shape modelling for potato tubers. *Potato Research*, 49(2), 109–118. <https://doi.org/10.1007/s11540-006-9010-5>
- Velásquez, S., Peña, N., Bohórquez, J. C., & Gutiérrez, N. (2018). Determination of the complex permittivity of cherry, pulped, green, and roasted coffee using a planar dielectric platform and a coaxial probe between 0.3 and 6 GHz. *International Journal of Food Properties*, 21(1), 1332–1343. <https://doi.org/10.1080/10942912.2018.1490320>
- Vélez, R. (2019). Informe del gerente al Congreso Nacional de Cafeteros. *Federación Nacional de Cafeteros. Recuperado de <https://federaciondecafeteros.org/wp>*.
- Vélez, C. M. R., Mejía, F. Á., Tascón, C. O., & Torres, I. D. A. (2002). Diseño y construcción de un cosechador de café por vibración circular al tallo. *Revista Facultad Nacional De Agronomía Medellín*, 55(1), 1395–1413. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/24471>
- Velloso, N. S., Santos, F. L., Pinto, F. de A. de C., Villar, F. M. de M., & Valente, D. S. M. (2017). Mechanical properties of the macaw palm fruit-rachilla system1. *Pesquisa Agropecuaria Tropical*, 47(2), 218–225. <https://doi.org/10.1590/1983-40632016v4745792>

- Vivanco, M. (2005). *Muestreo estadístico Diseño y aplicaciones*. Editorial Universitaria.
- Walsh, K. J. (2004). RGB to Color Name Mapping (Triplet and Hex).
- Wang, Z., Wu, J., Mei, W., & Ge, Y. (2013). Finite element analysis of vibration mode and firmness evaluation for Korla pear. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering/Nongye Gongcheng Xuebao*, 29(25), 251–256. <https://www.ingentaconnect.com/content/tcsae/tcsae/2013/00000029/00000025/art00039>
- Wills, R. B. H., McGlasson, B., Graham, D., & Joyce, D. (1998). Postharvest: An introduction to the physiology and handling of fruits, vegetables and ornamentals. Univ. New South Wales Press, 262.
- Withers, P. J. (2015). Fracture mechanics by three-dimensional crack-tip synchrotron X-ray microscopy. *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 373, 1-26. <https://doi.org/10.1098/rsta.2013.0157>
- Wright, W. D. (1982). The golden jubilee of colour in the CIE 1931–1981. *Color Research and Application*, 7(1), 12–15. <https://doi.org/10.1002/col.5080070103>
- Yamamoto, H., Iwamoto, M., & Haginuma, S. (1980). Acoustic impulse response method for measuring natural frequency of intact fruits and preliminary applications to

internal quality evaluation of apples and watermelons. *Journal of Texture studies*, 11(2), 117-136.

Yang, Z., & Wang, L. (2010). Structural damage detection by changes in natural frequencies. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 21(3), 309–319. <https://doi.org/10.1177/1045389x09350332>

Yuwana, Silvia, E., & Sidebang, B. (2015). Engineering properties of coffee beans from various colors of coffee cherries. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 3, 274–277. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.01.052>

Zheng, H., & Lu, H. (2012). A least-squares support vector machine (LS-SVM) based on fractal analysis and CIELab parameters for the detection of browning degree on mango (*Mangifera indica* L.). *Computers and Electronics in Agriculture*, 83, 47–51. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.01.012>

Zhou, J., He, L., Du, X., Chen, D., Zhang, Q., & Karkee, M. (2012). Dynamic response of sweet cherry tree to the vibration of a limb shaker. In *2012 Dallas, Texas, July 29-August 1, 2012* (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers

Zhou, J., Xu, L., Zhao, J., Hang, X., & Zhou, H. (2022). Effective excitation conditions for the intense motion of the ginkgo seed-stem system during mechanical vibration harvesting. *Biosystems Engineering*, 215, 239-248.

Zhu, X.-K., & Joyce, J. A. (2012). Review of fracture toughness (G, K, J, CTOD, CTOA) testing and standardization. *Engineering Fracture Mechanics*, 85, 1–46.
<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2012.02.001>

ANEXOS

ANEXO A. Tablas

ANEXO A.1 Tablas Caracterización con el colorímetro

Tabla de datos L*a*b*, resultado de la caracterización realizada con el colorímetro PCE-CSM4. Estos se recolectaron en dos salidas a campo en diferentes fechas.

Datos L*a*b* de la salida 1							
muestra	L*	a*	b*	muestra	L*	a*	b*
1	31.87	-8.54	17.02	8	27.78	-7.30	9.72
2	34.01	-8.71	19.66	9	25.81	26.12	6.56
3	32.95	-8.33	19.75	10	39.00	-9.93	25.77
4	35.87	-6.90	20.34	11	29.53	-8.45	11.55
5	36.35	-7.18	22.06	12	38.28	-8.86	26.37
6	28.32	-8.78	10.98	13	29.04	-9.38	10.2
7	36.77	-7.29	23.17	14	39.01	-6.55	27.35

Datos L*a*b* de la salida 2							
muestra	L*	a*	b*	muestra	L*	a*	b*
1	43.91	-11.74	21.31	47	40.92	-11.11	20.79
2	44.00	-12.42	20.50	48	47.11	-12.34	29.62
3	46.72	-12.35	26.79	49	39.86	-9.09	20.22
4	40.70	31.06	9.90	50	45.11	-10.58	23.95
5	57.57	-14.56	35.84	51	36.28	-10.92	26.09
6	50.50	-13.22	32.04	52	46.86	30.97	24.42
7	35.65	21.16	4.37	53	51.77	31.26	23.58
8	34.21	14.46	1.16	54	38.61	27.90	8.75
9	51.20	-16.46	30.87	55	43.41	15.13	18.46
10	39.79	28.82	9.64	56	57.50	-6.47	38.25
11	41.68	31.70	12.42	57	42.74	-11.01	26.44
12	47.75	-7.58	31.92	58	45.27	32.11	17.14
13	31.11	19.22	3.33	59	47.60	-5.81	28.98
14	35.70	16.44	2.79	60	36.10	23.12	6.09
15	49.99	6.09	27.96	61	49.92	-17.36	30.08
16	40.68	30.44	13.44	62	44.57	32.70	11.91
17	35.16	14.91	1.67	63	49.53	2.21	31.63
18	37.01	21.65	4.26	64	46.18	-10.29	29.80
19	53.14	9.16	33.62	65	46.20	-9.65	29.75
20	54.59	8.40	35.05	66	28.14	14.27	2.47
21	56.33	7.13	37.70	67	49.80	-15.57	31.33
22	40.11	20.06	4.59	68	46.39	-11.89	29.09
23	53.63	29.17	30.35	69	34.94	29.33	11.44
24	61.24	21.01	39.93	70	47.23	-13.69	25.75
25	44.15	33.06	21.22	71	48.89	15.88	27.71
26	35.25	33.23	11.34	72	45.19	28.42	22.70
27	31.35	26.41	7.71	73	36.91	19.87	3.19
28	44.12	36.87	20.69	74	53.95	-12.22	38.83
29	68.00	8.03	48.38	75	53.39	-9.44	38.72
30	38.83	36.51	13.42	76	33.59	20.80	6.08

31	42.16	30.89	20.02	77	45.24	-10.73	27.57
32	43.55	36.03	17.96	78	46.30	-12.16	26.19
33	48.53	23.04	23.39	79	35.53	23.21	8.68
34	39.00	35.17	16.23	80	45.39	33.18	13.05
35	59.02	-0.14	42.17	81	35.74	21.46	8.65
36	52.76	30.09	27.73	82	55.44	-6.22	41.91
37	50.95	33.21	25.25	83	36.41	34.88	15.47
38	49.66	30.60	23.32	84	43.20	32.70	20.43
39	47.00	21.48	26.73	85	35.10	31.42	9.30
40	36.38	32.05	14.51	86	50.31	27.92	27.41
41	36.43	32.82	10.02	87	57.48	14.59	36.52
42	46.84	31.51	20.30	88	46.33	35.65	24.24
43	41.92	-11.27	22.13	89	35.97	22.35	4.81
44	44.33	-11.26	25.30	90	32.13	29.77	10.51
45	44.54	-11.48	26.00	91	47.38	-10.40	29.01
46	49.27	-16.05	30.43				

ANEXO A.2 Tablas de Caracterización con la cámara fotográfica

Tabla de datos RGB, resultado de la caracterización realizada con la cámara Nikon Colpix B500. Estos se recolectaron en dos salidas a campo en diferentes fechas.

Datos salida 1 -datos en RGB por cámara							
muestra	R	G	B	muestra	R	G	B
1	78	112	30	16	75	6	9
2	88	111	47	17	108	0	12
3	0	36	0	18	116	27	37
4	88	111	0	19	138	33	51
5	77	129	11	20	50	6	8
6	0	129	11	21	65	45	0
7	0	108	11	22	233	137	62
8	78	129	11	23	221	134	75
9	139	141	53	24	155	72	34
10	75	87	26	25	165	72	0
11	32	35	15	26	114	59	0
12	89	81	0	27	255	167	67
13	0	169	0	28	129	80	33
14	114	105	0	29	129	86	0
15	99	128	52				

Datos salida 2 -datos en RGB por cámara							
muestra	R	G	B	muestra	R	G	B
1	98	121	40	47	111	140	44
2	132	177	50	48	255	49	50
3	154	186	63	49	135	40	52
4	145	208	56	50	142	40	46
5	140	170	58	51	202	70	73
6	27	40	9	52	218	64	71
7	30	41	7	53	156	40	45
8	44	46	8	54	141	48	65
9	163	167	60	55	237	30	34

10	93	115	33	56	153	30	56
11	205	200	71	57	167	69	76
12	198	221	103	58	192	62	64
13	147	54	33	59	255	60	65
14	215	13	22	60	255	62	62
15	160	13	17	61	255	31	33
16	255	60	53	62	255	51	45
17	255	56	51	63	255	77	56
18	255	55	48	64	255	54	52
19	255	25	32	65	255	51	54
20	102	5	15	66	255	64	69
21	255	4	15	67	255	74	61
22	102	3	15	68	166	29	34
23	205	12	17	69	255	175	56
24	255	12	17	70	255	190	58
25	193	7	21	71	210	166	62
26	224	51	30	72	255	60	63
27	255	12	20	73	255	62	62
28	212	5	11	74	255	179	67
29	239	254	74	75	255	76	76
30	183	151	50	76	255	61	61
31	255	94	51	77	255	56	60
32	255	73	48	78	255	179	68
33	180	197	93	79	255	87	58
34	113	146	61	80	255	77	53
35	143	167	56	81	255	58	61
36	169	186	60	82	255	130	51
37	179	197	57	83	87	110	34
38	128	160	54	84	144	132	41
39	150	171	60	85	83	91	33
40	117	137	47	86	215	45	37
41	119	148	52	87	151	42	53
42	38	78	20	88	255	84	73
43	140	162	76	89	255	83	65
44	86	148	36	90	255	130	65
45	137	165	55	91	196	145	64
46	62	161	66	92	255	188	66

ANEXO A.3 Tablas de Caracterización de los diámetros ortogonales en frutos de café

La siguiente tabla de datos corresponde a los diámetros ortogonales de los frutos de café variedad Castillo, divididos por estados de maduración, adquiridos a través de un vernier, pie de rey o calibrador.

Datos de diámetros ortogonales de frutos Inmaduros [mm]							
Muestra	φ_1	φ_2	φ_3	Muestra	φ_1	φ_2	φ_3
1	12.65	11.94	16.90	26	12.00	11.05	14.55
2	12.20	10.80	16.40	27	12.00	11.00	14.65
3	14.00	12.20	12.90	28	9.85	8.85	12.35
4	13.50	11.60	16.60	29	13.55	12.95	15.00
5	12.95	11.85	13.70	30	12.70	12.00	15.75
6	14.00	12.90	16.80	31	13.40	11.15	16.05

7	11.45	10.60	13.50	32	13.20	11.50	15.40
8	12.45	11.00	14.20	33	12.85	11.35	16.05
9	12.45	10.90	14.20	34	12.00	10.30	13.65
10	13.35	12.00	15.30	35	12.25	10.35	13.95
11	12.00	11.05	14.55	36	13.10	10.95	14.50
12	12.00	11.00	14.65	37	13.20	12.00	16.60
13	9.85	8.85	12.35	38	12.30	11.10	15.00
14	13.55	12.95	15.00	39	12.70	11.00	15.60
15	12.50	10.95	16.00	40	12.00	11.30	11.30
16	12.65	11.94	16.90	41	12.40	11.10	11.10
17	12.20	10.80	16.40	42	12.20	11.30	11.30
18	14.00	12.20	12.90	43	12.80	11.50	11.50
19	13.50	11.60	16.60	44	12.90	11.40	11.40
20	12.95	11.85	13.70	45	12.40	10.80	10.80
21	14.00	12.90	16.80	46	13.20	11.44	11.44
22	11.45	10.60	13.50	47	12.62	11.24	11.24
23	12.45	11.00	14.20	48	12.84	11.80	11.80
24	12.45	10.90	14.20	49	12.16	11.40	11.40
25	13.35	12.00	15.30	50	13.70	12.20	12.20

Datos de diámetros ortogonales de frutos Semimaduros [mm]

Muestra	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	Muestra	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3
1	13.65	11.80	15.30	21	13.95	12.40	15.55
2	13.25	11.40	16.35	22	12.90	12.00	14.30
3	12.90	12.25	16.45	23	13.50	12.30	15.35
4	13.00	11.40	16.05	24	14.10	12.50	16.90
5	12.35	11.05	15.50	25	13.00	11.90	15.10
6	13.00	11.80	17.30	26	13.90	12.55	16.25
7	13.40	11.45	16.00	27	13.98	12.00	12.00
8	10.85	10.20	14.45	28	14.86	12.76	12.76
9	13.65	11.80	15.30	29	14.12	12.20	12.20
10	13.25	11.40	16.35	30	14.36	13.10	13.10
11	12.90	12.25	16.45	31	12.70	11.10	11.10
12	13.00	11.40	16.05	32	14.96	12.26	12.26
13	12.35	11.05	15.50	33	13.74	12.66	12.66
14	13.00	11.80	17.30	34	12.64	10.96	10.96
15	13.40	11.45	16.00	35	14.10	12.40	12.40
16	10.85	10.20	14.45	36	13.00	11.88	11.88
17	13.90	11.90	14.10	37	15.00	12.98	12.98
18	14.10	12.25	16.40	38	13.88	12.02	12.02
19	12.95	12.30	14.90	39	13.70	11.98	11.98
20	13.35	12.50	15.60	40	14.18	12.20	12.20
				41	13.38	11.64	11.64

Datos de diámetros ortogonales de frutos Maduros [mm]

Muestra	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	Muestra	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3
1	15.35	12.50	15.40	26	14.50	12.60	16.55
2	16.50	14.55	16.90	27	13.30	11.50	15.80
3	13.90	12.30	14.40	28	10.95	10.75	13.60
4	12.95	11.10	15.05	29	13.55	11.50	15.40
5	14.00	12.70	14.10	30	13.45	11.50	15.40
6	12.60	11.30	14.65	31	12.70	11.95	14.95
7	14.50	12.60	16.55	32	13.15	11.10	15.95
8	13.30	11.50	15.80	33	13.55	11.50	16.90
9	10.95	10.75	13.60	34	13.45	11.25	15.90

10	13.55	11.50	15.40	35	11.50	9.85	13.70
11	13.45	11.50	15.40	36	13.55	11.35	16.10
12	12.70	11.95	14.95	37	13.35	11.25	16.20
13	13.15	11.10	15.95	38	14.20	12.10	15.20
14	13.55	11.50	16.90	39	14.72	12.26	15.68
15	13.45	11.25	15.90	40	14.12	12.12	15.38
16	11.50	9.85	13.70	41	12.96	11.80	13.34
17	13.55	11.35	16.10	42	14.00	11.64	15.18
18	13.35	11.25	16.20	43	14.50	12.20	15.34
19	15.70	13.10	17.65	44	13.34	11.60	14.00
20	15.35	12.50	15.40	45	13.24	11.80	14.40
21	16.50	14.55	16.90	46	14.92	13.84	15.50
22	13.90	12.30	14.40	47	14.64	11.94	14.64
23	12.95	11.10	15.05	48	15.30	12.76	16.36
24	14.00	12.70	14.10	49	15.80	13.52	13.52
25	12.60	11.30	14.65	50	15.58	14.00	14.00

Datos de diámetros ortogonales de frutos Sobremaduros [mm]

Muestra	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	Muestra	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3
1	15.35	12.50	15.40	26	14.50	12.60	16.55
2	16.50	14.55	16.90	27	13.30	11.50	15.80
3	13.90	12.30	14.40	28	10.95	10.75	13.60
4	12.95	11.10	15.05	29	13.55	11.50	15.40
5	14.00	12.70	14.10	30	13.45	11.50	15.40
6	12.60	11.30	14.65	31	12.70	11.95	14.95
7	14.50	12.60	16.55	32	13.15	11.10	15.95
8	13.30	11.50	15.80	33	13.55	11.50	16.90
9	10.95	10.75	13.60	34	13.45	11.25	15.90
10	13.55	11.50	15.40	35	11.50	9.85	13.70
11	13.45	11.50	15.40	36	13.55	11.35	16.10
12	12.70	11.95	14.95	37	13.35	11.25	16.20
13	13.15	11.10	15.95	38	14.20	12.10	15.20
14	13.55	11.50	16.90	39	14.72	12.26	15.68
15	13.45	11.25	15.90	40	14.12	12.12	15.38
16	11.50	9.85	13.70	41	12.96	11.80	13.34
17	13.55	11.35	16.10	42	14.00	11.64	15.18
18	13.35	11.25	16.20	43	14.50	12.20	15.34
19	15.70	13.10	17.65	44	13.34	11.60	14.00
20	15.35	12.50	15.40	45	13.24	11.80	14.40
21	16.50	14.55	16.90	46	14.92	13.84	15.50
22	13.90	12.30	14.40	47	14.64	11.94	14.64
23	12.95	11.10	15.05	48	15.30	12.76	16.36
24	14.00	12.70	14.10	49	15.80	13.52	13.52
25	12.60	11.30	14.65	50	15.58	14.00	14.00

ANEXO A.4 Tablas de Caracterización del volumen en frutos de café

La tabla que se muestra a continuación corresponde al volumen de los frutos de café variedad Castillo, divididos por estados de maduración, donde se pueden encontrar resultados medidos y calculados.

Datos de volumen de frutos Inmaduros [cm³]

Muestra	Vol. medido	Vol. calculado	Muestra	Vol. medido	Vol. calculado
1	0.99	1.71	21	0.88	1.55
2	0.26	1.87	22	0.96	1.58
3	1.82	1.69	23	1.17	1.70
4	2.26	1.86	24	1.48	1.88
5	2.04	1.83	25	1.11	1.71
6	1.92	1.81	26	1.25	1.72
7	2.60	2.00	27	1.08	1.64
8	1.82	1.99	28	1.42	1.61
9	0.70	1.71	29	1.21	1.64
10	0,18	1.87	30	1.38	1.70
11	1,28	1.69	31	1.40	1.68
12	1,59	1.86	32	1.26	1.56
13	1,44	1.83	33	1.28	1.70
14	1,35	1.81	34	1.36	1.65
15	1,84	2.00	35	1.45	1.75
16	1,29	1.99	36	1.25	1.66
17	1,29	1.86	37	1.46	1.84
18	1,41	1.76	38	1.53	1.69
19	1,32	1.79	39	1.23	1.59
20	1,34	1.78	40	1.33	1.78

Datos de volumen de frutos Semimaduros [cm³]

Muestra	Vol. medido	Vol. calculado	Muestra	Vol. medido	Vol. calculado
1	1.62	1.84	19	1.26	1.84
2	1.75	1.79	20	1.57	1.95
3	1.59	1.91	21	1.50	1.81
4	1.77	1.79	22	1.69	1.95
5	1.64	1.72	23	1.39	1.85
6	1.15	1.84	24	1.57	2.00
7	1.24	1.79	25	1.09	1.62
8	1.12	1.91	26	1.49	1.88
9	1.25	1.79	27	1.62	1.92
10	1.15	1.72	28	1.08	1.60
11	1.26	1.84	29	1.35	1.88
12	1.60	1.92	30	1.35	1.77
13	1.22	1.89	31	1.69	1.99
14	1.40	1.94	32	1.42	1.81
15	1.48	1.93	33	1.41	1.80
16	1.12	1.84	34	1.50	1.85
17	1.38	1.91	35	1.22	1.74
18	1.68	1.95			

Datos de volumen de frutos Maduros [cm³]

Muestra	Vol. medido	Vol. calculado	Muestra	Vol. medido	Vol. calculado
1	2.93	2.02	21	1.15	1.79
2	1.86	1.95	22	1.19	1.82
3	3.25	2.17	23	1.69	2.11
4	2.36	1.90	24	1.44	1.86
5	1.51	1.73	25	1.73	2.07
6	1.46	1.95	26	1.70	2.13
7	1.88	1.74	27	1.41	1.85

8	2.07	2.02	28	1.56	1.85
9	1.31	1.95	29	1.67	1.97
10	2.29	2.17	30	1.59	1.88
11	1.67	1.90	31	1.61	1.91
12	1.06	1.73	32	1.50	1.90
13	1.03	1.95	33	1.57	1.89
14	1.33	1.74	34	1.95	2.00
15	1.46	1.89	35	1.67	1.86
16	1.60	1.92	36	1.96	1.96
17	1.48	1.89	37	1.32	1.79
18	0.97	1.79	38	1.58	1.94
19	1.41	1.82	39	1.48	1.75
20	1.53	1.91			

Datos de volumen de frutos Sobremaduros [cm ³]					
Muestra	Vol. medido	Vol. calculado	Muestra	Vol. medido	Vol. calculado
1	2.44	2.00	19	1.95	2.08
2	2.56	2.03	20	1.65	1.99
3	2.69	2.05	21	1.68	1.95
4	2.92	1.94	22	2.09	2.14
5	0.86	2.10	23	2.01	2.07
6	2.42	2.08	24	2.03	2.11
7	1.72	2.00	25	2.03	2.13
8	1.81	2.03	26	2.11	2.15
9	1.90	2.05	27	2.08	2.11
10	2.06	1.94	28	2.72	2.23
11	0.61	2.10	29	2.52	2.21
12	1.71	2.08	30	1.76	2.02
13	1.94	2.11	31	1.94	2.09
14	2.03	2.03	32	1.73	1.98
15	1.35	1.94	33	2.16	2.12
16	1.70	2.00	34	2.48	2.24
17	1.84	2.01	35	1.97	2.08
18	1.89	2.03	36	1.64	1.96

ANEXO A.5 Tablas de Caracterización de la masa en frutos de café

La siguiente tabla, corresponde a los datos de la masa en los frutos del café variedad castillo, distribuidos por estados de maduración.

Datos de masa en frutos Inmaduros [g]							
Muestra	masa	Muestra	masa	Muestra	masa	Muestra	masa
1	1.26	17	0.87	33	0.87	49	1.43
2	1.44	18	0.93	34	0.93	50	1.27
3	1.33	19	1.56	35	1.56	51	1.30
4	1.83	20	1.06	36	1.06	52	0.82
5	1.65	21	1.45	37	1.45	53	1.43
6	1.60	22	1.37	38	1.37	54	1.49
7	1.81	23	1.43	39	1.43	55	1.42
8	1.08	24	1.27	40	1.27	56	1.38
9	1.14	25	1.30	41	1.30	57	1.07

10	1.12	26	0.82	42	0.82	58	1.10
11	1.44	27	1.27	43	1.27	59	1.29
12	1.11	28	1.44	44	1.44	60	1.59
13	1.11	29	1.33	45	1.33	61	1.22
14	0.62	30	1.83	46	1.83	62	1.29
15	1.49	31	1.65	47	1.65		
16	1.73	32	1.60	48	1.60		

Datos de masa en frutos Semimaduros [g]

Muestr	masa	Muestra	masa	Muestra	masa	Muestra	masa
a							
1	1.50	10	1.41	19	1.52	28	1.84
2	1.49	11	0.98	20	0.98	29	1.75
3	1.27	12	1.29	21	1.20	30	1.43
4	1.45	13	1.50	22	1.41	31	1.45
5	1.32	14	1.49	23	0.98	32	1.88
6	1.60	15	1.27	24	1.29	33	1.52
7	1.52	16	1.45	25	1.52	34	1.80
8	0.98	17	1.32	26	1.59		
9	1.20	18	1.60	27	1.55		

Datos de masa en frutos Maduros [g]

Muestr	masa	Muestra	masa	Muestra	masa	Muestra	masa
a							
1	2.28	17	0.98	33	1.55	49	1.96
2	1.69	18	1.52	34	1.38	50	1.51
3	2.37	19	1.62	35	1.24	51	1.48
4	1.55	20	1.96	36	1.35	52	1.82
5	1.38	21	1.51	37	1.86	53	1.17
6	1.24	22	1.48	38	1.56	54	1.35
7	1.35	23	1.82	39	0.98	55	1.60
8	1.86	24	1.17	40	1.50	56	1.42
9	1.56	25	1.35	41	1.47	57	1.33
10	0.98	26	1.60	42	1.47	58	1.13
11	1.50	27	1.42	43	1.46	59	1.56
12	1.47	28	1.33	44	1.65	60	1.85
13	1.47	29	1.13	45	1.52	61	1.56
14	1.46	30	2.28	46	0.98	62	1.19
15	1.65	31	1.69	47	1.52	63	1.68
16	1.52	32	2.37	48	1.62	64	1.75

Datos de masa en frutos Sobremaduros [g]

Muestr	masa	Muestra	masa	Muestra	masa	Muestra	masa
a							
1	1.88	15	2.48	29	1.59	43	2,37
2	2.12	16	1.88	30	2.48	44	2,48
3	1.77	17	2.12	31	2.34	45	2,43
4	1.97	18	1.77	32	2.28	46	3,06
5	1.95	19	1.97	33	1.48	47	2,98
6	2.19	20	1.95	34	1.90	48	2,27
7	2.09	21	2.19	35	2,09	49	2,39
8	1.43	22	2.09	36	2,13	50	2,11
9	1.35	23	1.43	37	2,24	51	2,65
10	0.99	24	1.35	38	1,71	52	2,98
11	1.74	25	0.99	39	1,83	53	2,21
12	1.29	26	1.74	40	2,29	54	2,10

13	1.73	27	1.29	41	2,29
14	1.59	28	1.73	42	2,27

ANEXO A.6 Tablas de Caracterización de la densidad en frutos de café

La tabla que se observa a continuación corresponde a los datos de la densidad del fruto de café variedad Castillo, distribuido por estados de maduración.

Datos de densidad en frutos Inmaduros [ρ]					
Muestra	Densidad medida	Densidad calculada	Muestra	Densidad medida	Densidad calculada
1	1.27	0.73	14	1.17	0.88
2	5.54	0.77	15	0.98	0.90
3	0.73	0.78	16	1.15	0.74
4	0.81	0.98	17	1.10	0.76
5	0.80	0.90	18	1.06	0.84
6	0.83	0.88	19	1.07	0.79
7	0.69	0.90	20	1.03	0.77
8	0.81	0.74	21	1.21	0.69
9	1.80	0.73	22	1.13	0.69
10	7.84	0.77	23	1.10	0.76
11	1.03	0.78	24	1.07	0.84
12	1.14	0.98	25	1.09	0.71
13	1.14	0.90	26	1.03	0.75

Datos de densidad en frutos Semimaduros [ρ]					
Muestra	Densidad medida	Densidad calculada	Muestra	Densidad medida	Densidad calculada
1	0.92	0.81	11	1.20	0.82
2	0.85	0.83	12	0.99	0.82
3	0.79	0.66	13	1.27	0.81
4	0.81	0.80	14	1.31	0.94
5	0.80	0.76	15	1.17	0.90
6	1.30	0.81	16	1.27	0.77
7	1.20	0.83	17	1.04	0.75
8	1.12	0.66	18	1.12	0.96
9	1.15	0.80	19	1.21	0.82
10	1.14	0.76	20	1.14	0.92

Datos de densidad en frutos Maduros [ρ]					
Muestra	Densidad medida	Densidad calculada	Muestra	Densidad medida	Densidad calculada
1	0.77	1.12	16	1.15	0.96
2	0.90	0.86	17	1.05	0.82
3	0.72	1.09	18	1.23	0.66
4	0.65	0.81	19	1.19	0.92
5	0.91	0.80	20	1.14	0.91
6	0.84	0.63	21	1.06	0.68
7	0.71	0.77	22	1.20	0.79
8	1.10	1.12	23	1.16	0.93
9	1.28	0.86	24	1.21	0.93
10	1.03	1.09	25	1.15	1.03
11	0.93	0.81	26	1.09	1.08

12	1.29	0.80	27	1.05	0.78
13	1.19	0.63	28	1.18	0.96
14	1.01	0.77	29	1.19	1.01
15	1.06	0.82			
Datos de densidad en frutos Sobremaduros [ρ]					
Muestra	Densidad medida	Densidad calculada	Muestra	Densidad medida	Densidad calculada
1	0.77	0.93	19	1.14	1.07
2	0.82	1.04	20	1.03	0.85
3	0.73	0.96	21	1.09	0.93
4	0.66	1.00	22	1.09	1.06
5	2.52	1.04	23	1.13	1.10
6	0.86	1.00	24	1.11	1.07
7	1.09	0.93	25	1.16	1.11
8	1.17	1.04	26	1.17	1.15
9	1.03	0.96	27	1.17	1.15
10	0.94	1.00	28	1.12	1.37
11	3.57	1.04	29	1.18	1.34
12	1.22	1.00	30	1.28	1.12
13	1.20	1.11	31	1.22	1.14
14	1.11	1.11	32	1.22	1.06
15	1.10	0.76	33	1.23	1.24
16	1.11	0.95	34	1.20	1.33
17	1.13	1.04	35	1.12	1.06
18	1.12	1.04	36	1.28	1.06

ANEXO A.7 Tablas de Caracterización del pH en frutos de café

Los siguientes datos corresponden al pH del café variedad Castillo, distribuido por estados de maduración.

Datos de pH en frutos							
Inmaduros		Semimaduros		Maduros		Sobremaduros	
Muestra	pH	Muestra	pH	Muestra	pH	Muestra	pH
1	6.16	1	6.02	1	6.07	1	6.07
2	6.40	2	5.96	2	6.07	2	5.86
3	6.73	3	5.96	3	6.03	3	5.99
4	6.45	4	5.97	4	6.14	4	5.86
5	6.57	5	6.02	5	5.72	5	6.00
6	6.78	6	5.92	6	6.16	6	6.00
7	6.18	7	5.86	7	6.03	7	5.86
8	6.42	8	5.90	8	5.98	8	5.94
9	5.82	9	5.98	9	6.01	9	6.00
10	5.97	10	5.85	10	6.11	10	5.92

ANEXO A.8 Tablas de Caracterización de la fuerza desprendimiento axial en frutos de café

La siguiente tabla corresponde a la fuerza de desprendimiento axial del fruto de café variedad Castillo, distribuido por estados de maduración.

Datos de desprendimiento axial en frutos [N]							
Inmaduros		Semimaduros		Maduros		Sobremaduros	
Muestr	N	Muestra	N	Muestra	N	Muestra	N
a							
1	11.92	1	12.14	1	7.99	1	8,91
2	12.73	2	10.29	2	12.61	2	11,57
3	15.82	3	12.14	3	10.10	3	11,17
4	11.85	4	10.62	4	13.75	4	11,62
5	10.61	5	10.68	5	11.85	5	14,68
6	13.95	6	10.41	6	8.46	6	8,71
7	12.86	7	9.01	7	5.88	7	9,22
8	13.67	8	11.06	8	12.10	8	10,49
9	6.70	9	12.14	9	7.13	9	8,91
10	6.56	10	10.29	10	10.58	10	11,57
11	8.18	11	12.14	11	8.12	11	11,17
12	10.59	12	10.62	12	10.97	12	11,62
13	8.27	13	10.68	13	8.09	13	14,68
14	11.39	14	10.41	14	8.78	14	8,71
15	7.63	15	9.01	15	7.21	15	9,22
16	11.92	16	11.06	16	9.88		

ANEXO A.9 Tablas de Caracterización de la fuerza desprendimiento por torque en frutos de café

La siguiente tabla corresponde a la fuerza de desprendimiento por torque del fruto de café variedad Castillo, distribuido por estados de maduración.

Datos de desprendimiento por torque en frutos [N-cm]							
Inmaduros		Semimaduros		Maduros		Sobremaduros	
Muestr	N-cm	Muestra	N-cm	Muestra	N-cm	Muestra	N-cm
a							
1	3.80	1	2.30	1	1.60	1	3.50
2	4.60	2	4.70	2	2.50	2	2.10
3	5.40	3	3.90	3	3.60	3	1.80
4	2.60	4	3.00	4	2.00	4	2.90
5	6.30	5	2.30	5	2.50	5	2.00
6	2.80	6	4.70	6	2.80	6	2.90
7	4.40	7	3.90	7	2.60	7	2.50
8	3.60	8	3.00	8	3.60	8	3.50
9	4.20			9	3.00	9	2.10
10	3.10			10	2.40	10	1.80
11	3.80			11	1.60	11	2.90
12	3.80			12	2.50	12	2.00
13	4.60			13	3.60	13	2.90
14	5.40			14	2.00	14	2.50
15	2.60			15	2.50		
16	6.30			16	2.80		
17	2.80			17	2.60		

18	4.40	18	3.60
19	3.60	19	3.00
20	4.20	20	2.40
21	3.10	21	12.61
22	3.80	22	10.10

ANEXO B. Códigos en matlab

ANEXO B.1 Código en Matlab para la identificación de color en fruto con imágenes

```

%**PROGRAMA PARA IDENTIFICACION DE COLOR DE FRUTOS CON IMAGENES*****

% Dentro de la caracterización de los frutos, se debe realizar un
registro
% fotográfico, asegurándose de tener las mejores condiciones de
%iluminación
% y siempre bajo las mismas condiciones de iluminación, para reducir el
% error que se puede presentar en el programa. también se puede agregar
% algunos filtros de imagen para reducir los ruidos producidos por la
misma
% iluminación; cuando se obtenga la fotografía se debe recortar la imagen
a
% unas dimensiones de 180x180 y se debe almacenar en formato JPG, por
% último busque la dirección de la imagen y reemplácela dentro del
% paréntesis del comando imread.
%
% desarrollado por: Alexander Rincón Jiménez
% Héctor Tinoco.
% para: el laboratorio de mecánica computacional y experimental
% Institución: Universidad Autónoma de Manizales
% Ciudad: Manizales, Caldas (Colombia).
% fecha: 25 de septiembre de 2019.
%
%
%*****Adquisición de imagen*****
clc;
d=imread('Imagen.png');
[d1,d2,d3]=size(d);
%**se realiza un barrido de la imagen para extraer todos los colores
% básicos RGB y graficarlos posteriormente.

x=[0];
a=0;
y=[0];
b=0;
c=0;
while (a<(d2+1))
    for n=1:d2
        x=[x,a];
        if (n==d2)
            a=a+1;

```

```

        end
        end
    end

    while (c < (d2+1))
        for m=1:d2

            y=[y,b];
            b=b+1;
            if (m==d2)
                b=0;
                c=c+1;
            end
            end
        end
    end

    %**se grafica la imagen original en un mapa de intensidad de pixeles,
    para
    % observar los colores básicos mas predominantes en toda la imagen

    datos=improfile(d,x,y);
    figure;
    subplot(2,3,1);
    image(d);
    colorbar;
    title('imagen del fruto');

    subplot(2,3,2);
    hold on;
    grid on;
    plot(datos(:,:,1),'r');
    plot(datos(:,:,2),'g');
    plot(datos(:,:,3),'b');
    xlabel('muestras');
    ylabel('valor RGB');
    title('colores RGB de imagen');

    %**se extraen los valores numéricos de los colores RGB de la imagen
    real**
    %**cada valor de color se muestra en forma de matriz

    rojo_RGB=d(:,:,1);
    verde_RGB=d(:,:,2);
    azul_RGB=d(:,:,3);

    %**ahora para trabajar los datos se deben convertir los valores RGB que
    se
    % muestran en matrices a vectores (con el fin de mostrar una estadística
    de cada uno)

    [w h]=size(rojo_RGB);
    for i=1:w
        R(i*h-(h-1):i*h,1)=(rojo_RGB(i,1:h))';
    end

```

```

end

[w h]=size(verde_RGB);
for i=1:w
    G(i*h-(h-1):i*h,1)=(verde_RGB(i,1:h))';
end

[w h]=size(azul_RGB);
for i=1:w
    B(i*h-(h-1):i*h,1)=(azul_RGB(i,1:h))';
end

end

% se grafica el histograma de los colores que se encuentran en los
%vectores R,G,B

%figure;
subplot(2,3,3);
rr=histogram(R);
set(rr,'facecolor',[1 0 0]);
title('estadística color rojo (R)');
grid on;

subplot(2,3,4);
gg=histogram(G);
set(gg,'facecolor',[0.75 0.75 0]);
title('estadística color verde (G)');
grid on;

subplot(2,3,5);
bb=histogram(B);
set(gg,'facecolor',[0 0 1]);
title('estadística color azul (B)');
grid on;

%se calcula el valor máximo de cada color en la estadística, se extrae
%numéricamente el que mas se repite. Para ello se llama a la función
%creada valormaximo1

ROJO1=valormaximo1(R');
VERDE1=valormaximo1(G');
AZUL1=valormaximo1(B');

RGB=[ROJO1 VERDE1 AZUL1];
CIE1931=rgb2xyz(RGB);
fprintf('el color predominante en el fruto (RGB) es: '),disp(RGB);
fprintf('el color predominante en el fruto (CIE1931) es: '),disp(CIE1931
);

subplot(2,3,6);

```

```

plot(0,0);
set(gca,'color',(RGB));
title('resultado de color predominante');

```

```

figure
image(d);

```

```

figure
plot(0,0);
set(gca,'color',(RGB));

```

ANEXO B.2 Código en Matlab para graficar posiciones a* y b* con colorímetro.

```

%programa para graficar las posiciones a* y b* del CIElab tomado desde
*****colorímetro*****
clc;
clear all;
close all;

% *****manejo de datos de salida 1*****

%*****Datos tomados en campo*****
Lab1=[31.87 -8.54 17.02;
34.01 -8.71 19.66;
32.95 -8.33 19.75;
35.87 -6.9 20.34;
36.35 -7.18 22.06;
28.32 -8.78 10.98;
36.77 -7.29 23.17;
27.78 -7.3 9.72;
25.81 26.12 6.56;
39 -9.93 25.77;
29.53 -8.45 11.55;
38.28 -8.86 26.37;
29.04 -9.38 10.2;
39.01 -6.55 27.35];
%*****Separación de los datos*****
L1=Lab1(:,1); %Columna 1 de matriz Lab1
a1=Lab1(:,2); %Columna 2 de matriz Lab1
b1=Lab1(:,3); %Columna 3 de matriz Lab1

RGB1=lab2rgb(Lab1); %conversión de Lab a RGB

R1=RGB1(:,1); %Columna 1 de matriz RGB
G1=RGB1(:,2); %Columna 2 de matriz RGB
B1=RGB1(:,3); %Columna 3 de matriz RGB

```

```

da=size(L1);
daa=da(:,1);

%*****gráfica datos salida 1 en forma a*,b* de CIElab*****

for n= 1:daa
ap=a1(n,:);
bp=b1(n,:);
rr=R1(n,:);
gg=G1(n,:);
bb=B1(n,:);
plot(ap,bp,'marker','s','DisplayName','salida_1','markersize',8,'linewidth
h',4,'Linestyle','none','color',[[rr gg bb]]);
hold on;
end
legend('salida1');

%
% %*****manejo de datos de salida 2*****

Lab2=[43.91 -11.74 21.31;
44 -12.42 20.5;
46.72 -12.35 26.79;
40.7 31.06 9.9;
57.57 -14.56 35.84;
50.5 -13.22 32.04;
35.65 21.16 4.37;
34.21 14.46 1.16;
51.2 -16.46 30.87;
39.79 28.82 9.64;
41.68 31.7 12.42;
47.75 -7.58 31.92;
31.11 19.22 3.33;
35.7 16.44 2.79;
49.99 6.09 27.96;
40.68 30.44 13.44;
35.16 14.91 1.67;
37.01 21.65 4.26;
53.14 9.16 33.62;
54.59 8.4 35.05;
56.33 7.13 37.7;
40.11 20.06 4.59;
53.63 29.17 30.35;
61.24 21.01 39.93;
44.15 33.06 21.22;
35.25 33.23 11.34;
31.35 26.41 7.71;
44.12 36.87 20.69;
68 8.03 48.38;
38.83 36.51 13.42;

```

42.16	30.89	20.02;
43.55	36.03	17.96;
48.53	23.04	23.39;
39	35.17	16.23;
59.02	-0.14	42.17;
52.76	30.09	27.73;
50.95	33.21	25.25;
49.66	30.6	23.32;
47	21.48	26.73;
36.38	32.05	14.51;
36.43	32.82	10.02;
46.84	31.51	20.3;
41.92	-11.27	22.13;
44.33	-11.26	25.3;
44.54	-11.48	26;
49.27	-16.05	30.43;
40.92	-11.11	20.79;
47.11	-12.34	29.62;
39.86	-9.09	20.22;
45.11	-10.58	23.95;
36.28	-10.92	26.09;
46.86	30.97	24.42;
51.77	31.26	23.58;
38.61	27.9	8.75;
43.41	15.13	18.46;
57.5	-6.47	38.25;
42.74	-11.01	26.44;
45.27	32.11	17.14;
47.6	-5.81	28.98;
36.1	23.12	6.09;
49.92	-17.36	30.08;
44.57	32.7	11.91;
49.53	2.21	31.63;
46.18	-10.29	29.8;
46.2	-9.65	29.75;
28.14	14.27	2.47;
49.8	-15.57	31.33;
46.39	-11.89	29.09;
34.94	29.33	11.44;
47.23	-13.69	25.75;
48.89	15.88	27.71;
45.19	28.42	22.7;
36.91	19.87	3.19;
53.95	-12.22	38.83;
53.39	-9.44	38.72;
33.59	20.8	6.08;
45.24	-10.73	27.57;
46.3	-12.16	26.19;
35.53	23.21	8.68;
45.39	33.18	13.05;
35.74	21.46	8.65;
55.44	-6.22	41.91;
36.41	34.88	15.47;
43.2	32.7	20.43;

```

35.1    31.42    9.3;
50.31   27.92   27.41;
57.48   14.59   36.52;
46.33   35.65   24.24;
35.97   22.35   4.81;
32.13   29.77   10.51;
47.38   -10.4   29.01];

%*****Separación de los datos*****

L2=Lab2(:,1);           %Columna 1 de matriz Lab1
a2=Lab2(:,2);           %Columna 2 de matriz Lab1
b2=Lab2(:,3);           %Columna 3 de matriz Lab1

RGB2=lab2rgb(Lab2);     %conversión de Lab a RGB

R2=RGB2(:,1);           %Columna 1 de matriz RGB
G2=RGB2(:,2);           %Columna 2 de matriz RGB
B2=RGB2(:,3);           %Columna 3 de matriz RGB

da2=size(L2);
daa2=da2(:,1);

hold on;

for m= 1:daa2
ap2=a2(m,:);
bp2=b2(m,:);
rr2=R2(m,:);
gg2=G2(m,:);
bb2=B2(m,:);
plot(ap2,bp2,'marker','.', 'DisplayName','salida_2','LineWidth',100,'marke
rsize',20,'Linestyle','none','color',[[rr2 gg2 bb2]]);
hold on;
end

a3=linspace(-40,40,10);
b3=linspace(0,0,10);
hold on;
plot(a3,b3,'LineWidth',2,'color','black');

b4=linspace(-10,60,10);
a4=linspace(0,0,10);
hold on;
plot(a4,b4,'LineWidth',2,'color','black');
grid on;
xlabel('a*');
ylabel('b*');

```

```

title('salida 1 Vs salida2 (datos de colorimetro)');
hold off
legend;

```

ANEXO B.3 Código en Matlab para graficar posiciones a* y b* con cámara fotográfica.

```

%programa para graficar las posiciones a* y b* del cielab_cámara*****
clc;
clear all;
close all;
% *****manejo de datos de salida 1*****
RGB11=[78 112 30;
88 111 47;
0 36 0;
88 111 0;
77 129 11;
0 129 11;
0 108 11;
78 129 11;
139 141 53;
75 87 26;
32 35 15;
89 81 0;
0 169 0;
114 105 0;
99 128 52;
75 6 9;
108 0 12;
116 27 37;
138 33 51;
50 6 8;
65 45 0;
233 137 62;
221 134 75;
155 72 34;
165 72 0;
114 59 0;
255 167 67;
129 80 33;
129 86 0];

RGB11=RGB11/255;

R1=RGB11(:,1);
G1=RGB11(:,2);
B1=RGB11(:,3);

Lab1=rgb2lab(RGB11);
L1=Lab1(:,1);
a1=Lab1(:,2);
b1=Lab1(:,3);

da=size(L1);

```

```

daa=da(:,1);

%*****gráfica datos salida 1 en forma a*,b* de CIElab*****

for n= 1:daa
ap=a1(n,:);
bp=b1(n,:);
rr=R1(n,:);
gg=G1(n,:);
bb=B1(n,:);
plot(ap,bp,'marker','*','DisplayName','salida_1','markersize',8,'Linestyl
e','none','color',[[rr gg bb]]);
hold on;
end

% *****manejo de datos de salida 2*****

RGB22= [98 121 40;
132 177 50;
154 186 63;
145 208 56;
140 170 58;
27 40 9;
30 41 7;
44 46 8;
163 167 60;
93 115 33;
205 200 71;
198 221 103;
147 54 33;
215 13 22;
160 13 17;
255 60 53;
255 56 51;
255 55 48;
255 25 32;
102 5 15;
255 4 15;
102 3 15;
205 12 17;
255 12 17;
193 7 21;
224 51 30;
255 12 20;
212 5 11;
239 254 74;
183 151 50;
255 94 51;
255 73 48;
87 110 34;
144 132 41;
83 91 33;
215 45 37;
151 42 53;

```

255 84 73;
255 83 65;
255 130 65;
196 145 64;
255 188 66;
180 197 93;
113 146 61;
143 167 56;
169 186 60;
179 197 57;
128 160 54;
150 171 60;
117 137 47;
119 148 52;
38 78 20;
140 162 76;
86 148 36;
137 165 55;
62 161 66;
111 140 44;
255 49 50;
135 40 52;
142 40 46;
202 70 73;
218 64 71;
156 40 45;
141 48 65;
237 30 34;
153 30 56;
167 69 76;
192 62 64;
255 60 65;
255 62 62;
255 31 33;
255 51 45;
255 77 56;
255 54 52;
255 51 54;
255 64 69;
255 74 61;
166 29 34;
255 175 56;
255 190 58;
210 166 62;
255 60 63;
255 62 62;
255 179 67;
255 76 76;
255 61 61;
255 56 60;
255 179 68;
255 87 58;
255 77 53;
255 58 61;

```

255 130 51];

RGB22=RGB22/255;

R2=RGB22(:,1);
G2=RGB22(:,2);
B2=RGB22(:,3);

Lab2=rgb2lab(RGB22);
L2=Lab2(:,1);
a2=Lab2(:,2);
b2=Lab2(:,3);

da2=size(L2);
daa2=da2(:,1);

hold on;

for m= 1:daa2
ap2=a2(m,:);
bp2=b2(m,:);
rr2=R2(m,:);
gg2=G2(m,:);
bb2=B2(m,:);
plot(ap2,bp2,'marker','.', 'DisplayName','salida_2','LineWidth',100,'marke
rsize',20,'Linestyle','none','color',[[rr2 gg2 bb2]]);
hold on;
end

legend('salida1','salida2');

a3=linspace(-90,90,10);
b3=linspace(0,0,10);
hold on;
plot(a3,b3,'LineWidth',2,'color','black');

b4=linspace(-10,90,10);
a4=linspace(0,0,10);
hold on;
grid on;
plot(a4,b4,'LineWidth',2,'color','black');
title('salida 1 Vs salida2 (datos de cámara fotográfica)');
xlabel('a*');
ylabel('b*');
hold off

```

ANEXO B.4 Código en Matlab para creación de mapa cromatográfico.

```

function [N]=cromaRGB(n)
clc;
clear all;
close all;

```

```

R=0:8:255;
G=0:8:255;
B=0:8:255;
[fil,col]=size(R);

R=R/255;
G=G/255;
B=B/255;

RGB=[1];

n=1;
A=1;
while (A<(col+1))
    P=1;
    while (P<(col+1))
        O=1;
        while (O<(col+1))
            RGB(:,n)=R(:,A);
            RGB(:,n+1)=G(:,P);
            RGB(:,n+2)=B(:,O);

            O=O+1;
            n=n+3;

            end
            P=P+1;
        end
        A=A+1;
    end
[fil1,col1]=size(RGB);
Q=1;
x=[1];
y=[1];

for m=1:3:col1

    R1=RGB(:,m);
    G1=RGB(:,m+1);
    B1=RGB(:,m+2);

    RGB2=[R1 G1 B1];
    XYZ=rgb2xyz([RGB2], 'WhitePoint', 'd65');
    X1=XYZ(:,1);
    Y1=XYZ(:,2);
    Z1=XYZ(:,3);

    x=(X1)/(X1+Y1+Z1);
    y=(Y1)/(X1+Y1+Z1);

    x1=(x/1.03);

```

```

x2=x1;
dife=x-x1;
x3=x+dife;
x4=x3;

y1=(y/1.03);
dif=y-y1;
y2=y+dif;
y3=y2;
y4=y1;

Xt=[x1 x2 x3 x4];
Yt=[y1 y2 y3 y4];
patch([Xt],[Yt],[R1 G1 B1], 'EdgeColor', 'none');

set(gcf, 'DefaultFigureRenderer', 'opengl')
grid on;
hold on;
end
hold on;
Xa=[0.15 0.3 0.6551 0.15];
Ya=[0.06 0.6130 0.3327 0.06];
plot([Xa],[Ya], 'color', 'black', 'lineWidth', 8);

```

ANEXO B.5 Código en Matlab para graficación en mapa cromatográfico sRGB

```

clc;
clear all;
close all;

RGB2=[65 45 0;
233 137 62;
221 134 75;
155 72 34;
165 72 0;
114 59 0;
255 167 67;
129 80 33;
129 86 0;
75 6 9;
108 0 12;
116 27 37;
138 33 51;
50 6 8;
78 112 30;
88 111 47;
0 36 0;
88 111 0;
77 129 11;
0 129 11;
0 108 11;
78 129 11;
139 141 53;

```

```

75  87  26;
32  35  15;
89  81  0;
0   169 0;
114 105 0;
99  128 52];
    RGB2=RGB2/255;
    XYZ=rgb2xyz ([RGB2], 'WhitePoint', 'd65');

    X1=XYZ(:,1);
    Y1=XYZ(:,2);
    Z1=XYZ(:,3);
    [fila columna]=size (RGB2);
    x=[1];
    y=[1];
    for n=1:fila
    x(:,n)=(X1(n,:))/((X1(n,:))+(Y1(n,:))+(Z1(n,:)));
    y(:,n)=(Y1(n,:))/((X1(n,:))+(Y1(n,:))+(Z1(n,:)));
    end

    openfig('cromaRGB2');
    hold on;

plot([x],[y], 'color', 'black', 'marker', 'O', 'markersize', 4, 'LineStyle', 'none');
    title('Todos los Frutos (análisis)')

```

ANEXO B.6 Código en Matlab para filtrar señales provenientes del experimento de vibración

```

% programa para limpiar las señales del experimento de amortiguamiento

clc;
clear all;
close all;

time=5;
Freq=50;
n=20;
rate=Freq*n;
load('fruto');

panasonic=data2(:,2);
figure
plot(t,L11, 'r');
title('señal');
xlabel('Tiempo [s]');
ylabel('Voltaje [V]');
grid on;
mayor3=0.04;

```

```

% ****filtro pasabajas*****

n=6; % orden del filtro
wn=35.74/(rate/2);
[num den]=butter(n,wn,'low');
sfiltrada3=filter(num,den,L11);
figure
plot(t,sfiltrada3,'b');
title('señal filtrada 1');
xlabel('tiempo [Seg]');
ylabel('Voltaje [V]');
grid on;

% *****filtro pasa altas*****

n=6;
wn=35.72/(rate/2);
[num den]=butter(n,wn,'high');
sfiltrada3a=filter(num,den,sfiltrada3);

% *****correccion de amplitud por aplicacion de filtros*****

mayor4=max(sfiltrada3a);
multi2=mayor3/mayor4;
sfiltrada3a=sfiltrada3a*multi2;

figure
plot(t,sfiltrada3a,'b');
title('señal filtrada 2');
xlabel('tiempo [Seg]');
ylabel('Voltaje [V]');
grid on;

sfiltrada4=sfiltrada3a(734:3001);
t00=t0(734:3001);
figure
plot(t00,sfiltrada4);
title('señal panasonic cortada');
xlabel('tiempo [Seg]');
ylabel('Voltaje [V]');
grid on;

Re=sfiltrada4;
Re2=mode(Re);
desp=Re;
t002a=t00-0.2443;

desp=((desp*50)/5)*1000;

```

```

figure
plot(t002a, desp);
title('señal 2');
xlabel('tiempo [Seg]');
ylabel('Desplazamiento [\mum]', 'FontSize', 15);
grid on;

```

```

% ***** Frequency *****

```

```

freq2=0:(rate)/(length(desp)-1):rate;
Tffs2=abs(fft(desp));

```

```

figure;
plot(freq2(1:end/2), Tffs2(1:end/2), 'b')
title('Frequency Data');
xlabel('frecuencia [Hz]');
ylabel('amplitud');
grid on;

```

```

freq2=freq2';

```

ANEXO B.7 Código en Matlab para identificar picos de señales

```

% programa para encontrar los picos positivos y negativos de las señales
clc;
clear all;
close all;

load('datos_frutos');

x1v=Tiempo_vibrometro_fruto1;
y1v=velocidad_vibrometro_fruto1;
figure;
plot(x1v,y1v, 'color', 'blue');
xlabel('Time [s]');
ylabel('Velocity [mm/s]');
title('fruto 1. Vibrometro laser');
pkylv = findpeaks(y1v);
n1=size(pkylv);
pkx1v=[0];
for ia=1:n1
    indexedex=find(y1v==pkylv(ia));
    pkx1v(ia)=x1v(indexdex);
end
pkx1v=pkx1v';
hold on;
plot(pkx1v,pkylv, 'color', 'red', 'lineWidth', 0.5);
hold on;
plot(pkx1v, (-pkylv), 'color', 'red', 'lineWidth', 0.5)
grid on

```

```

%% ***** fruto 1*****
%*****laser panasonic*****

x1bv=Tiempo_panasonic_fruto1;
y1bv=desplazamiento_panasonic_fruto1 ;
figure;
plot(x1bv,y1bv,'color','blue');
xlabel('Time [s]');
ylabel('Desplazamiento [\mum]');
title('fruto 1. laser panasonic');
pky1bv = findpeaks(y1bv);
n1b=size(pky1bv);
pkx1bv=[0];
for iab=1:n1b
    indexedex=find(y1bv==pky1bv(iab));
    pkx1bv(iab)=x1bv(indexedex);
end
pkx1bv=pkx1bv';
hold on;
plot(pkx1bv,pky1bv,'color','red','lineWidth',0.5);
hold on;
plot(pkx1bv,(-pky1bv),'color','red','lineWidth',0.5)
grid on

%% ***** fruto 2*****
%*****vibrometro laser*****

x2v=Tiempo_vibrometro_fruto2;
y2v=velocidad_vibrometro_fruto2;
figure;
plot(x2v,y2v,'color','blue');
xlabel('Time [s]');
ylabel('Velocity [mm/s]');
title('fruto 2. Vibrometro laser');
pky2v = findpeaks(y2v);
n2=size(pky2v);
pkx2v=[0];
for ib=1:n2
    indexedex=find(y2v==pky2v(ib));
    pkx2v(ib)=x2v(indexedex);
end
pkx2v=pkx2v';
hold on;
plot(pkx2v,pky2v,'color','red','lineWidth',0.5);
hold on;
plot(pkx2v,(-pky2v),'color','red','lineWidth',0.5)
grid on

%*****laser panasonic*****

x2bv=Tiempo_panasonic_fruto2;
y2bv=desplazamiento_panasonic_fruto2 ;
figure;

```

```

plot(x2bv,y2bv,'color','blue');
xlabel('Time [s]');
ylabel('Desplazamiento [\mum]');
title('fruto 2. laser panasonic');
pky2bv = findpeaks(y2bv);
n2b=size(pky2bv);
pkx2bv=[0];
for iab=1:n2b
    indexedex=find(y2bv==pky2bv(iab));
    pkx2bv(iab)=x2bv(indexedex);
end
pkx2bv=pkx2bv';
hold on;
plot(pkx2bv,pky2bv,'color','red','lineWidth',0.5);
hold on;
plot(pkx2bv,(-pky2bv),'color','red','lineWidth',0.5)
grid on

%***** fruto 3*****
%*****vibrometro laser*****

x3v=Tiempo_panasonic_fruto3;
y3v=velocidad_vibrometro_fruto3;
figure;
plot(x3v,y3v,'color','blue');
xlabel('Time [s]');
ylabel('Velocity [mm/s]');
title('fruto 3. Vibrometro laser');
pky3v = findpeaks(y3v);
n3=size(pky3v);
pkx3v=[0];
for ic=1:n3
    indexedex=find(y3v==pky3v(ic));
    pkx3v(ic)=x3v(indexedex);
end
pkx3v=pkx3v';
hold on;
plot(pkx3v,pky3v,'color','red','lineWidth',0.5);
hold on;
plot(pkx3v,(-pky3v),'color','red','lineWidth',0.5)
grid on

%*****laser panasonic*****

x3bv=Tiempo_panasonic_fruto3;
y3bv=desplazamiento_panasonic_fruto3 ;
figure;
plot(x3bv,y3bv,'color','blue');
xlabel('Time [s]');
ylabel('Desplazamiento [\mum]');
title('fruto 3. laser panasonic');
pky3bv = findpeaks(y3bv);
n3b=size(pky3bv);
pkx3bv=[0];

```

```

for iab=1:n3b
    indexedex=find(y3bv==pky3bv(iab));
    pkx3bv(iab)=x3bv(indexedex);
end
pkx3bv=pkx3bv';
hold on;
plot(pkx3bv,pky3bv,'color','red','lineWidth',0.5);
hold on;
plot(pkx3bv,(-pky3bv),'color','red','lineWidth',0.5)
grid on

%% ***** fruto 4*****
%*****vibrometro laser*****

x4v=Tiempo_panasonic_fruto4;
y4v=velocidad_vibrometro_fruto4;
figure;
plot(x4v,y4v,'color','blue');
xlabel('Time [s]');
ylabel('Velocity [mm/s]');
title('fruto 4. Vibrometro laser');
pky4v = findpeaks(y4v);
n4=size(pky4v);
pkx4v=[0];
for id=1:n4
    indexedex=find(y4v==pky4v(id));
    pkx4v(id)=x4v(indexedex);
end
pkx4v=pkx4v';
hold on;
plot(pkx4v,pky4v,'color','red','lineWidth',0.5);
hold on;
plot(pkx4v,(-pky4v),'color','red','lineWidth',0.5)
grid on

%*****laser panasonic*****

x4bv=Tiempo_panasonic_fruto4;
y4bv=desplazamiento_panasonic_fruto4 ;
figure;
plot(x4bv,y4bv,'color','blue');
xlabel('Time [s]');
ylabel('Desplazamiento [\mum]');
title('fruto 4. laser panasonic');
pky4bv = findpeaks(y4bv);
n4b=size(pky4bv);
pkx4bv=[0];
for iab=1:n4b
    indexedex=find(y4bv==pky4bv(iab));
    pkx4bv(iab)=x4bv(indexedex);
end
pkx4bv=pkx4bv';
hold on;
plot(pkx4bv,pky4bv,'color','red','lineWidth',0.5);

```

```

hold on;
plot(pkx4bv, (-pky4bv), 'color', 'red', 'lineWidth', 0.5)
grid on

%% ***** fruto 5*****
%*****vibrometro laser*****

x5v=Tiempo_panasonic_fruto5;
y5v=velocidad_vibrometro_fruto5;
figure;
plot(x5v,y5v, 'color', 'blue');
xlabel('Time [s]');
ylabel('Velocity [mm/s]');
title('fruto 5. Vibrometro laser');
pky5v = findpeaks(y5v);
n5=size(pky5v);
pkx5v=[0];
for ie=1:n5
    indexedex=find(y5v==pky5v(ie));
    pkx5v(ie)=x5v(indexedex);
end
pkx5v=pkx5v';
hold on;
plot(pkx5v,pky5v, 'color', 'red', 'lineWidth', 0.5);
hold on;
plot(pkx5v, (-pky5v), 'color', 'red', 'lineWidth', 0.5)
grid on

%*****laser panasonic*****

x5bv=Tiempo_panasonic_fruto5;
y5bv=desplazamiento_panasonic_fruto5;
figure;
plot(x5bv,y5bv, 'color', 'blue');
xlabel('Time [s]');
ylabel('Desplazamiento [\mum]');
title('fruto 5. laser panasonic');
pky5bv = findpeaks(y5bv);
n5b=size(pky5bv);
pkx5bv=[0];
for iab=1:n5b
    indexedex=find(y5bv==pky5bv(iab));
    pkx5bv(iab)=x5bv(indexedex);
end
pkx5bv=pkx5bv';
hold on;
plot(pkx5bv,pky5bv, 'color', 'red', 'lineWidth', 0.5);
hold on;
plot(pkx5bv, (-pky5bv), 'color', 'red', 'lineWidth', 0.5)
grid on

%% ***** datos*****

```

```

%*****fruto 1*****

xf1V=pkx1v;          % dato en x frutol vibrometro
yf1V=pky1v;          % dato en y frutol vibrometro
Nyf1V=(-pky1v);     % dato en y negativo frutol vibrometro

xf1L=pkx1bv;         % dato en x frutol Laser panasonic
yf1L=pky1bv;         % dato en y frutol Laser panasonic
Nyf1L=(-pky1bv);    % dato en y negativo frutol Laser panasonic

%*****fruto 2*****

xf2V=pkx2v;          % dato en x fruto2 vibrometro
yf2V=pky2v;          % dato en y fruto2 vibrometro
Nyf2V=(-pky2v);     % dato en y negativo fruto 2 vibrometro

xf2L=pkx2bv;         % dato en x fruto2 Laser panasonic
yf2L=pky2bv;         % dato en y fruto2 Laser panasonic
Nyf2L=(-pky2bv);    % dato en y negativo fruto2 Laser panasonic

%*****fruto 3*****

xf3V=pkx3v;          % dato en x fruto3 vibrometro
yf3V=pky3v;          % dato en y fruto3 vibrometro
Nyf3V=(-pky3v);     % dato en y negativo fruto 3 vibrometro

xf3L=pkx3bv;         % dato en x fruto3 Laser panasonic
yf3L=pky3bv;         % dato en y fruto3 Laser panasonic
Nyf3L=(-pky3bv);    % dato en y negativo fruto3 Laser panasonic

%*****fruto 4*****

xf4V=pkx4v;          % dato en x fruto4 vibrometro
yf4V=pky4v;          % dato en y fruto4 vibrometro
Nyf4V=(-pky4v);     % dato en y negativo fruto 4 vibrometro

xf4L=pkx4bv;         % dato en x fruto4 Laser panasonic
yf4L=pky4bv;         % dato en y fruto4 Laser panasonic
Nyf4L=(-pky4bv);    % dato en y negativo fruto4 Laser panasonic

%*****fruto 5*****

xf5V=pkx5v;          % dato en x fruto5 vibrometro
yf5V=pky5v;          % dato en y fruto5 vibrometro
Nyf5V=(-pky5v);     % dato en y negativo fruto 5 vibrometro
xf5L=pkx5bv;         % dato en x fruto5 Laser panasonic
yf5L=pky5bv;         % dato en y fruto5 Laser panasonic
Nyf5L=(-pky5bv);    % dato en y negativo fruto5 Laser panasonic

```