ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DEL RESIDUO AGRÍCOLA DE LAS SEMILLAS DEL ZAPALLO: ALTERNATIVA DE OBTENCIÓN DE ACEITE

Autor: Sandra Patricia Paz Peña

Nota de Aceptación

Certificamos que el presente Trabajo de Grado Satisface, en alcances y calidad, todos los requisitos que demanda un Trabajo de Grado de Maestría.

Director

Jurado

Jurado

Aprobado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Pontificia Universidad Javeriana Cali, para optar el título de Magister.

HERNÁN CAMILO ROCHA NIÑO Ph. D.
Decano Facultad de Ingeniería y Ciencias

JUAN CARLOS MARTÍNEZ ARIAS
Director Posgrados de Ingeniería y Ciencias

23/06/2022

Acta de Correcciones al Documento de Trabajo de Grado

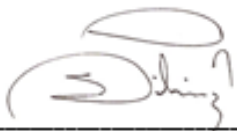
Santiago de Cali, 29 de junio de 2022

Autor:

Título del Trabajo de Grado: "ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DEL RESIDUO AGRÍCOLA DE LAS SEMILLAS DEL ZAPALLO: ALTERNATIVA DE OBTENCIÓN DE ACEITE"

Director:

Como indica el artículo 2.13 de las Directrices para Trabajo de Grado de Maestría, he verificado que el estudiante indicado arriba ha implementado todas las correcciones que los Jurados del Proyecto de Trabajo de Grado definieron que se efectuaran, como consta en el Acta de Evaluación correspondiente.



Firma del Director del Trabajo de Grado

DATOS DE LA ESTUDIANTE

NOMBRE COMPLETO: Sandra Patricia Paz Peña

CÉDULA DE CIUDADANÍA: 1.061.731.454 de Popayán

TELÉFONO: 3004287820

DIRECCIÓN: Transversal 7 # 51N – 24 Club Residencial Camino Viejo casa G15

CORREO ELECTRÓNICO: sandrapaz@javerianacali.edu.co

PROFESIÓN: Ingeniera Agroindustrial egresada de la Universidad del Cauca

CARGO – EMPRESA: Docente e Investigador en la Universidad del Cauca.

ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DEL RESIDUO AGRÍCOLA DE LAS SEMILLAS DEL ZAPALLO: ALTERNATIVA DE OBTENCIÓN DE ACEITE

SANDRA PATRICIA PAZ PEÑA

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI
FACULTAD DE INGENIERÍA
SANTIAGO DE CALI
2022

ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DEL RESIDUO AGRÍCOLA DE LAS SEMILLAS DEL ZAPALLO: ALTERNATIVA DE OBTENCIÓN DE ACEITE

SANDRA PATRICIA PAZ PEÑA

Proyecto de tesis para optar al título de Magister en Ingeniería

Director
M.Sc. SILVIO ANDRÉS MOSQUERA SÁNCHEZ

Codirectores
M.Sc. EDUARD BENAVIDES VILLAMARÍN
Ph.D. JOSÉ LUIS RAMÍREZ DUQUE

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI
FACULTAD DE INGENIERÍA
SANTIAGO DE CALI
2022

DEDICATORIA

A Dios y María Auxiliadora por guiarme de su mano con amor, fortaleza y sabiduría.

A mi madre, Amparo, por animarme siempre, su gran fortaleza, impedirme desistir y su amor incondicional.

A mi padre, Armando, por sus interminable curiosidad, apoyo e ideas para continuar.

A mis tíos, Alonso y Enrique, por ser parte de este equipo de tesis, estar siempre prestos y sus cálidos abrazos al llegar.

A Juliana, la vida nos hizo hermanas, gracias ser, estar e impulsarme a seguir, en todo momento y a Gloria y Vanessa, su luz, alegría y fortaleza siempre me acompañaron.

A Matías por tu enorme energía para ser mi compañero de tesis en casa y a Lucas, tu presencia siempre estará con nosotros.

AGRADECIMIENTOS

A mi director de tesis, el Profesor Silvio Andrés Mosquera, gracias por su confianza y respaldo en estos años de trabajo.

A mis codirectores, profesores Eduard Benavides y José Luis Ramírez, por sus valiosos aportes y consejos.

A las familias Paz Mosquera, Paz Rivera, Ahumada Daza y Paredes Bustamante por recibirme con cariño en sus hogares.

A la Gobernación del Cauca, Colciencias y Colfuturo, quienes a través de la convocatoria 823 de 2018 gestionaron los recursos para el desarrollo de los estudios de maestría.

A la Pontificia Universidad Javeriana, docentes y administrativos, por su calidad educativa y humana.

A la Universidad del Cauca, en especial a docentes e investigadores de los grupos CYTBIA y ASUBAGROIN, al facilitar equipos e insumos y sobre todo, por su constante apoyo; así como a mis estudiantes.

A Tecnoparque y el Sena CTPI, por facilitar las instalaciones, herramientas y talento humano para el cumplimiento de las actividades propuestas.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 11
1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA 13
1.1.1. Residuos derivados del zapallo 15
1.1.2. Consumo de aceite en Colombia 17
1.1.3. Aceite de semilla de zapallo 19
1.1.4. Pregunta de investigación 20
1.2. JUSTIFICACIÓN 21
1.3. OBJETIVOS 23
1.4. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO ESCRITO 23
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA 24
2.1. ZAPALLO Y CARACTERÍSTICAS GENERALES 24
2.2. SEMILLAS DE ZAPALLO 27
2.3. ACEITE DE SEMILLAS DE ZAPALLO 28
2.4. MÉTODOS PARA LA EXTRACCIÓN DE ACEITE 29
2.4.1. Extracción mecánica. 29
2.4.2. Extracción por solventes. 31
2.4.3. Extracción por ultrasonido. 32
2.4.4. Extracción por prensado en frío. 33
2.4.5. Extracción por altas presiones. 34
2.5. ANÁLISIS DE CALIDAD DEL ACEITE 35
2.5.1. Determinación de la densidad. 35
2.5.2. Determinación del índice de acidez. 35
2.5.3. Determinación del índice de peróxido. 35
2.5.4. Determinación del índice de yodo. 36
2.5.5. Determinación del índice de saponificación. 36
2.5.6. Estabilidad oxidativa. 36
3. MATERIALES Y MÉTODOS 37
3.1. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO 37
3.2. MATERIALES 37
3.2.1. Material vegetal. 37
3.3. MÉTODOS 37

3.3.1. Objetivo específico 1. Estimar la cantidad de semilla de zapallo disponible en el Departamento del Cauca para la extracción de aceite 37
3.3.2. Acondicionamiento de las semillas. 40
3.3.3. Caracterización física de las semillas. 40
3.3.4. Objetivo específico 2. Seleccionar y aplicar la técnica de extracción para obtener el aceite de la semilla de zapallo 42
3.3.5. Sistema de extracción 45
3.3.6. Obtención del aceite 45
3.3.7. OBJETIVO ESPECÍFICO 3. CARACTERIZAR PARCIALMENTE EL ACEITE DE SEMILLA DE ZAPALLO PARA EVALUAR SU CALIDAD Y ESTABILIDAD OXIDATIVA 46
3.3.8. Pruebas de calidad del aceite 47
3.3.9. Prueba de estabilidad oxidativa 47
4. RESULTADOS 48
4.1. OBJETIVO ESPECÍFICO 1. ESTIMAR LA CANTIDAD DE SEMILLA DE ZAPALLO DISPONIBLE EN EL DEPARTAMENTO DEL CAUCA PARA LA EXTRACCIÓN DE ACEITE 48
4.1.1. Acondicionamiento de las semillas 49
4.1.2. Caracterización física de las semillas: tamaño y forma 50
4.2. OBJETIVO ESPECÍFICO 2. SELECCIONAR Y APLICAR LA TÉCNICA DE EXTRACCIÓN PARA OBTENER EL ACEITE DE LA SEMILLA DE ZAPALLO 53
4.3. OBJETIVO ESPECÍFICO 3. CARACTERIZAR PARCIALMENTE EL ACEITE DE SEMILLA DE ZAPALLO PARA EVALUAR SU CALIDAD Y ESTABILIDAD OXIDATIVA 56
4.3.1. Rendimiento 58
4.3.2. Determinación de la densidad 60
4.3.3. Determinación del índice de acidez 61
4.3.4. Determinación del índice de peróxido 63
4.3.5. Determinación del índice de yodo 64
4.3.6. Determinación de índice de saponificación 66
4.3.7. Prueba de estabilidad oxidativa 68
5. CONCLUSIONES 70
5.1. CONCLUSIONES 70
5.2. TRABAJOS FUTUROS 71
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 72

7. ANEXOS 85
ANEXO 1. PROTOCOLOS PARA ANÁLISIS QUÍMICO.....85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área cosechada, producción y rendimiento nacional de zapallo (2006-2020) 25
Figura 2. Costos promedio de producción de zapallo por ha en 2017 27
Figura 3. Sistema de extracción por tornillo sin fin 29
Figura 4. Diagrama de Método Soxhlet.....31
Figura 5. Esquema de extracción por ultrasonido 33
Figura 6. Diagrama de equipo de extracción por CO_2 supercrítico.....34
Figura 7. Clases de forma de granos 41
Figura 8. Metodología de extracción de aceite de semilla de zapallo 46
Figura 9. Secado solar de semillas de zapallo 50
Figura 10. Semillas descascarilladas 50
Figura 11. Observación microscópica de la superficie de la semilla del zapallo con cáscara 51
Figura 12. A y B: imágenes de la epidermis a través del SEM.....52
Figura 13. Epidermis de semilla descascarillada de zapallo con acercamiento a: A. 45 mm; B. 23 mm. 52
Figura 14. Visualización de estructuras y dimensiones.....53
Figura 15. Extracción (A) y aceite centrifugado (B) 57
Figura 16. Variaciones de color del aceite extraído.....58
Figura 17. Prueba de comparaciones múltiples de Tukey para densidad 61
Figura 18. Prueba de comparaciones múltiples de Tukey para índice de acidez.....62
Figura 19 Prueba de comparaciones múltiples de Tukey para índice de peróxido 64
Figura 20. Prueba de comparaciones múltiples de Tukey para índice de yodo 65
Figura 21 Prueba de comparaciones múltiples de Tukey para índice de saponificación67
Figura 22. Prueba de estabilidad oxidativa a 120°C.....69

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Comparativo de precios de aceites en Colombia 18
Tabla 2. Naciones exportadoras de aceite de semilla de zapallo y valores de exportación 19
Tabla 3. Área sembrada y cosechada, producción y rendimiento del cultivo de zapallo de 2007 a 2017 25
Tabla 4. Producción nacional y departamental (Cauca) de zapallo para 2020.....26
Tabla 5. Modelo de matriz de comparación de métodos de extracción.....43
Tabla 6. Ponderación de los vectores promedio 44
Tabla 7. Matriz de comparación por pares para criterios.....44
Tabla 8. Diseño experimental.....47
Tabla 9. Valores promedio para la caracterización física 51
Tabla 10. Matriz de comparación por pares para Rendimiento 54
Tabla 11. Matriz de comparación por pares para Calidad 54
Tabla 12. Matriz de comparación para Costo.....55
Tabla 13. Resultado de los Vectores Promedio para los criterios 55
Tabla 14. Matriz de comparación por pares para los criterios del método de extracción mecánica.....56
Tabla 15. Determinación de Consistencia.....56
Tabla 16. Características de color y olor del aceite extraído.....58
Tabla 17. Resultados pruebas de caracterización.....59
Tabla 18. Análisis de varianza para densidad.....60
Tabla 19. Análisis de varianza para acidez 61
Tabla 20. Índice de acidez reportados por diversos autores 62
Tabla 21. Análisis de varianza para peróxidos.....63
Tabla 22. Análisis de varianza para índice de yodo 65
Tabla 23. Análisis de varianza para índice de saponificación 66
Tabla 24. Tiempo de inducción según tratamientos 68
Tabla 25. Análisis de varianza para estabilidad oxidativa 68

Palabras clave: semilla de zapallo, aceite, extracción, calidad

ABSTRACT

In the Cauca region, pumpkin seeds constitute a wasted product in the field and during the commercialization of the fruit, for this reason and for exploitation purposes, its use as a source of oil was proposed, in this way, estimates of pumpkin seed were made. squash produced in the Department of Cauca, with government data from 2020 and the amount of oil that could be produced, on that basis, an AHP decision matrix was applied to establish the oil extraction methods, as well as the most relevant criterion associated to this. Subsequently, the oil was extracted, under an experimental design where the pretreatment temperatures applied to the seed and the heating temperatures of the extraction equipment were varied, in such a way that a partial characterization was carried out on the samples of the oil obtained, where it was evaluated its quality and oxidative stability.

From the development of the methodology, it was established that, by 2020, were produced approximately 57 tons of seed, from which between 19,2 and 25,6 tons of oil could be extracted annually and, with a favorability of 37,9% mechanical extraction was chosen over extraction with organic solvents and ultrasound, supported by 71,1% in terms of superior performance.

Finally, the quality analysis yielded the following average values for the response variables: density (0,84 g/mL), acid value (2,14 mg KOH/g), peroxide value (6,02 me O2/ Kg), iodine value (124 g/100g), saponification value (159,84 mg/g) and oxidative stability (2.08h), and establishing that, during extraction, the applied temperature that allows obtaining a better oil is 180°C.

Key words: pumpkin seed, oil, extraction, quality

RESUMEN

En la región caucana, las semillas de zapallo constituyen un producto desperdiciado en campo y durante la comercialización de la fruta, por ello y con fines de aprovechamiento se propuso su uso como fuente de aceite, de esta manera, se realizaron las estimaciones de semilla de zapallo producida en el Departamento del Cauca, con datos gubernamentales de 2020 y la cantidad de aceite que podría producirse, con esa base, se aplicó una matriz de decisión AHP para establecer los métodos de extracción del aceite, así como el criterio de mayor relevancia asociado a este. Posteriormente, se extrajo el aceite, bajo un diseño experimental donde fueron variadas las temperaturas de pretratamiento aplicado a la semilla y las de calefacción del equipo extractor, de tal forma que a las muestras del aceite obtenido se les realizó una caracterización parcial, donde se evaluó su calidad y estabilidad oxidativa.

A partir del desarrollo de la metodología, se estableció que, para 2020, se produjeron aproximadamente 57 ton de semilla, de los que se podrían extraer entre 19,2 y 25,6 ton de aceite anualmente y, con una favorabilidad del 37,9% se eligió la extracción mecánica sobre la extracción con solventes orgánicos y ultrasonido, soportado por 71,1% en cuanto al rendimiento superior.

Finalmente, el análisis de calidad arrojó los siguientes valores promedio para las variables de respuesta: densidad (0,84 g/mL), índice de acidez (2,14 mg KOH/g), índice de peróxido (6,02 me O2/Kg), índice de yodo (124 g/100g), índice de saponificación (159,84 mg/g) y estabilidad oxidativa (2,08h), y estableciendo que, durante la extracción, la temperatura aplicada que permite obtener un mejor aceite es 180°C.

Palabras clave: semilla de zapallo, aceite, extracción, calidad

1. INTRODUCCIÓN

El zapallo o ahuyama (*Cucurbita moschata* Duch.) es una especie vegetal originaria de México, y desde la antigüedad, ha sido esencial en la dieta de las comunidades rurales y algunas áreas urbanas de todo el mundo; en la actualidad, suele estar marginado en términos de cultivo, comercialización, industrialización e investigación. Este fruto constituye una fuente importante de vitamina A (20 ± 4 mg/g) y es rica en carotenoides, especialmente β-caroteno y luteína, los cuales son importantes nutricionalmente (Jacobo-Valenzuela *et al*., 2011), así como polisacáridos, carotenoides, pectina, elementos minerales, aminoácidos y vitamina C (Chen & Huang, 2018).

Durante el procesamiento agroindustrial del zapallo, se generan subproductos como cáscara y semillas, estas últimas, son ricas en lípidos, proteínas, fitoesteroles, vitaminas, minerales (K, Ca y Na), que se consumen en varios países como bocadillos después de la salazón y el asado y también se usan para cocinar y hornear, además, se han utilizado como medicamentos funcionales para vermífugas y galactogogos seguros en muchos países y, recientemente, han recibido una atención considerable debido a sus valores protectores para la salud, como los efectos antiesterolémicos, antioxidantes, anticancerígenos y antiinflamatorios (Wang *et al*., 2017).

Las semillas de zapallo son una buena fuente de antioxidantes y aceites. El contenido de aceite y proteína de la harina proveniente de esta fuente, es de aproximadamente 51,0% y 36,5%, respectivamente (Lalnunthari *et al*., 2019) y puede extraerse por métodos mecánicos, enzimáticos, por compresión, fluidos supercríticos, ultrasonido o combinaciones entre éstos (Can Cauich et al., 2019; Jiao et al., 2014; Pazinato Cuco et al., 2019).

Para determinar los posibles usos de este residuo, se realizó la exploración de las zonas productivas a nivel global, nacional, departamental y municipal, y al indagar sobre los porcentajes de semilla aproximados, se estimó la cantidad de semilla producida y las cantidades aprovechables para la extracción de aceite, para finalmente determinar un estimado del tonelaje de aceite producido.

A su vez, se evaluaron posibles métodos de extracción, empleando una matriz de decisión (AHP), aplicado a los métodos de extracción mecánica por tornillo sin fin, uso de solventes orgánicos y empleo de ultrasonido, tomando como criterios de los mismos su rendimiento, costo y calidad del aceite obtenido.

Los resultados de la matriz de decisión permitieron establecer que el método a emplear fuese la extracción mecánica por tornillo sin fin, en el que se utilizaron tres temperaturas para la extracción (60, 120 y 180°C), que se determinaron según reportes bibliográficos; adicionalmente, a las semillas descascarilladas se les aplicó un pretratamiento térmico previo a su procesamiento, de esta forma, se generó un diseño experimental factorial

evaluando la calidad física y química del aceite a través de las variables de respuesta: determinación de la densidad, índices de acidez, peróxidos, yodo, saponificación con base en los procedimientos descritos en las Normas Técnicas Colombianas y AOCS, y medir su estabilidad oxidativa empleando la metodología de Rancimat.

1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) son residuos sólidos resultantes o incidentales de actividades municipales, comunitarias, comerciales, institucionales y recreativas, e incluyen basura, desperdicios, cenizas, limpieza de calles, animales muertos, residuos médicos y todos los demás residuos sólidos no industriales; son generados por hogares, oficinas, hoteles, comercios, escuelas y otras instituciones. Los principales componentes de los RSU son los desechos de alimentos, papel, plástico, trapos, metal y vidrio, aunque los desechos de demolición y construcción a menudo se incluyen en los desechos recolectados, al igual que pequeñas cantidades de desechos peligrosos, como bombillas eléctricas, baterías, piezas de automóviles y medicamentos y productos químicos desechados (Speight, 2015). Los RSU residenciales y comerciales típicos incluyen ropa, vajilla desechable, recortes de jardín, latas, mesas desechables de oficina, papel y cajas, mientras que los RSU industriales e institucionales contienen basura de restaurantes, papel, desechos de aulas, tarimas de madera, plásticos, cajas de cartón corrugado y papeles de oficina. Aunque su composición puede ser muy variable, en general los materiales orgánicos son el componente más importante entre los desechos (Adhikari et al., 2018) y se encuentran principalmente desechos de jardín, papel de oficina, periódicos impresos corrugados, desechos de cáscaras de frutas y vegetales, desechos de hojas, hojarasca y desechos de alimentos, siendo estos últimos los que representan la mayor parte de la fracción orgánica de dichos residuos (Ghosh et al., 2020).

Se ha encontrado que la composición de los desechos difiere según los niveles de ingresos, lo que refleja patrones variados de consumo; en general, la mayoría de los desechos generados en los países de ingresos medios o altos se componen de material inorgánico como papel o plástico, mientras que los países en desarrollo son responsables de producir más de la mitad del total de desechos sólidos del planeta (HWH Environmental, 2022): los países con salarios altos generan relativamente menos desechos verdes y alimentarios (32%) y producen más de los considerados secos que podrían reciclarse, incluidos plástico, papel, cartón, metal y vidrio, que son el (51%), mientras que los países de ingresos medios y bajos generan un 53% y un 57% de residuos alimentarios y verdes, respectivamente, y la fracción de residuos orgánicos aumenta a medida que disminuyen los niveles de desarrollo económico (The World Bank, 2020). Particularmente, los alimentos son la forma más común de desperdicio y representan casi el 50% de los RSU globales, donde cada año se desperdician millones de ton de víveres, especialmente frutas y hortalizas; al igual que otras formas de residuos, el desperdicio de alimentos es una de las principales causas de contaminación ambiental (Tiseo, 2021).

A nivel mundial, se generan más de 2 mil millones de ton de RSU cada año y se prevé que la producción mundial de residuos aumente un 70% para 2050, alcanzando los 3.400 millones de ton (HWH Environmental, 2022); la generación de residuos ha aumentado enormemente en todo el mundo en las últimas décadas y no hay señales de que

disminuya, lo que se debe a una serie de factores, como el crecimiento demográfico, la urbanización y el crecimiento económico, así como a los hábitos de compra de los consumidores, donde cada año, los seres humanos producen millones de toneladas de desechos, esto se está convirtiendo cada vez más en un problema importante en todo el mundo, ya que con volúmenes tan inmensos de desechos generados, la necesidad de que las autoridades brinden servicios adecuados de tratamiento y eliminación de desechos se ha vuelto cada vez más importante (Tiseo, 2022).

La población mundial produjo aproximadamente 931 millones de toneladas métricas de desperdicio de alimentos en 2019, lo que representó aproximadamente el 17% del total de comestibles disponibles, siendo el hogar la principal fuente de desperdicio, con el 61% del total y la segunda fuente de desperdicio fue el sector de servicios de alimentos (Tiseo, 2022)

El desecho de víveres tiene muchos impactos sociales que afectan a todos. No solo le cuesta a la economía mundial cientos de miles de millones de dólares cada año y agota los recursos, sino que también daña el medio ambiente y contribuye a la crisis climática: cuando los desechos se vierten en vertederos, se pudren y producen grandes volúmenes de metano, un potente gas de efecto invernadero; representa aproximadamente el 9% de las emisiones del sistema alimentario mundial, que en 2015 totalizaron 17,9 mil millones de ton métricas de CO_2 equivalente (Tiseo, 2021); por otra parte, es una carga para los sistemas de gestión de residuos, aumenta la inseguridad alimentaria y es uno de los principales contribuyentes a los problemas globales del cambio climático, la pérdida de biodiversidad y la contaminación: unos 931 millones de ton de alimentos se desperdician cada año, y entre el 8 y el 10 % de las emisiones globales de carbono están vinculadas a productos no consumidos, según un informe de la ONU (Marchant, 2021).

En Colombia, se desperdician 9,7 millones de ton de alimentos al año (Asociación de Bancos de Alimentos de Colombia, 2022) y aproximadamente 3,5 millones corresponden a desperdicios en el hogar en el año 2021 (United Nations Environment Programme, 2021). En el mismo año, con el trabajo de la Asociación de Bancos de Alimentos de Colombia, se evitó la emisión de 602 ton de CO_2 al ambiente, como resultado de las 27.562 ton de alimentos donados y rescatados, representado en cifras económicas, se logró el ahorro de 44.166 millones de pesos, tanto en almacenamiento, transporte y disposición de recursos, gracias a las empresas que tomaron la decisión de donar (Asociación de Bancos de Alimentos de Colombia, 2021).

Según el Ministerio de Salud y la FAO, en el país, durante el año 2010 (no existen reportes más recientes) se desperdiciaron en postcosecha, 1.426.932 ton de alimentos, distribuidos entre 22,93% de fruta (1.1154.923 ton) y 16,30% de hortalizas (272.009 ton) (PROCOLOMBIA, 2014; Suárez Peña, 2014); se evidencia un crecimiento en el porcentaje de desperdicios entre 2010 y 2016, puesto que para el último año se registró que el desperdicio fue de 62% para frutas y hortalizas (6,1 millones de ton), el 25% en raíces y tubérculos (2,4 millones de ton), el 8% de cereales (772 mil de ton), el 3% en

cárnicos (269 mil ton), el 2% para oleaginosos y legumbres (148 mil ton), el 1% fueron pescados (50 mil ton) y 1% en productos lácteos (29 mil ton) (Medellín Aranguren, 2021).

Este segmento requiere de especial atención en las etapas de producción, ya que de las poco más de 6 millones de ton que se dañan, 4,38 millones de ton lo hacen en las etapas de producción, almacenamiento y procesamiento industrial (72%), es decir, que de cada 100 kg de frutas y verduras que se dañan, 72 kg se pierden en las fincas y centros de procesamiento y los 28 kg restantes se desechan en los supermercados y los hogares y desperdicia el 34% de los alimentos disponibles para el consumo, lo que equivale a 9,76 millones de ton: el 40,5% ocurre en la producción agropecuaria (3,95 millones de ton), el 20,6% en la distribución y *retail* (2,01 millones de ton), el 19% en la postcosecha y almacenamiento (1,93 millones de ton, el 15,6% en el consumo (1,53 millones de ton) y el 3,5% en el procesamiento industrial (342 millones de ton) (Dirección Nacional de Planeación - DNP, 2016).

Los resultados indican que cada colombiano en promedio desperdicia 32 kg de comida al año, siendo las frutas y verduras los alimentos que más se pierden y/o desperdician (Reyes, 2021), por cada 10.434.327 ton disponibles al año, se pierden o desperdician 6.081.134 ton, lo que equivale al 58%; lo que se desecha en los supermercados, tiendas de barrio, plazas de mercado y en los hogares alcanzan a sumar, para el caso de frutas y vegetales, 1.699.910 de ton, que representa un 28% de lo que se daña.

Por lo tanto, la reducción del desperdicio de alimentos en todos los niveles (consumidor y doméstico) podría tener importantes beneficios ambientales, sociales y económicos (Marchant, 2021).

1.1.1. Residuos derivados del zapallo

Los desperdicios generados durante el manejo del zapallo forman parte de los millones de ton de residuos vegetales que se producen anualmente (Valdez-Arjona & Ramírez-Mella, 2019), mayormente representados en piel (10-12%) y semillas (Sathiya Mala & E. Kurian, 2016), de las que su volumen está sujeto al porcentaje en peso en el fruto y variará según la especie y su valor puede estar entre el 3% (Romero Barona et al., 2022) al 9% (Remedi González, 2010).

Aunque las semillas de zapallo se consideran comúnmente como residuos, podrían utilizarse en la alimentación del ganado para aprovechar compuestos nutricionales y bioactivos con fines de uso humano o animal; su valor no solo depende de su contenido nutricional, ya que sus compuestos bioactivos podrían modificar la composición de la carne, la leche y el huevo, que son de gran valor para la nutrición humana (Valdez-Arjona & Ramírez-Mella, 2019), de los que se pueden aprovechar para los componentes de nutrientes y antioxidantes (Sathiya Mala & E. Kurian, 2016), adicionalmente, tienen un alto e importante contenido de ácidos grasos y aminoácidos que pueden aportar un alto valor agregado a los productos alimenticios, por otra parte, los desechos que no se empleen para consumo humano, pueden contribuir a disminuir la competencia entre

humanos y ganado (Valdez-Arjona & Ramírez-Mella, 2019) evitando también la contaminación microbiológica por su alto contenido de humedad (Malenica & Bhat, 2020).

Se han atribuido a las semillas de zapallo varios efectos beneficiosos para la salud humana, debido a su contenido de macro y micronutrientes, son una fuente natural de fitoesteroles y vitaminas antioxidantes como los tocoferoles y los carotenoides y una excelente fuente de ácidos grasos insaturados como el oleico y el linoleico; el contenido de ácidos grasos en las semillas de *Cucurbita máxima* es de hasta el 50% del peso total de la semilla, con predominio de ácidos grasos insaturados de cadena corta, a estos compuestos se les atribuye actividad fisiológica beneficiosa para la próstata y otras como antiparasitario para el intestino (actividades antihelmíntica, vermífuga y tenífuga). El aceite de semilla de zapallo es rico en varios compuestos bioactivos que incluyen ácidos grasos insaturados, esteroles, tocoferoles, escualeno y pigmentos carotenoides y ha sido reconocido por varios beneficios para la salud, como la prevención del crecimiento y la reducción del tamaño de la próstata, la desaceleración de la progresión de la hipertensión, la mitigación de la hipercolesterolemia y la artritis, la reducción de la presión vesical y rectal y la mejora de la distensibilidad de la vejiga, el alivio de la diabetes mediante la promoción de la actividad hipoglucémica y la reducción de los niveles de cáncer gástrico, mamario, pulmonar y colorrectal (Lemus-Mondaca et al., 2019). También ha demostrado ser útil para el tratamiento de la nicturia en pacientes con trastornos urinarios en varios países occidentales (Nishimura et al., 2014).

Debido a estos efectos beneficiosos para la salud humana, las semillas de zapallo pueden considerarse un alimento funcional natural (Lemus-Mondaca et al., 2019).

Aunque en Colombia se han realizado estudios en semillas de zapallo recolectadas a nivel nacional (Ortiz Grisales, 2012; Ortiz Grisales *et al*., 2009), la situación contrasta con la presentada en países como México (Tamayo Castañeda *et al*., 2017), donde se consume completamente la hortaliza y es especialmente importante la obtención, separación y almacenamiento de la semilla, dado su alto valor nutricional, con un porcentaje representado en el aceite que contienen (Achu *et al*., 2005; Nawirska-Olszańska *et al*., 2013; Nishimura *et al*., 2014; Ortiz Grisales *et al*., 2009) o Austria, donde se emplea también como combustible (Rodríguez *et al*., 2018).

Teniendo en cuenta que el aceite es uno de los referentes en la agroindustria, se han realizado ensayos para la evaluación de metodologías para la extracción por medios físicos, químicos y mecánicos, valorar la calidad y obtener el rendimiento (Aktaş et al., 2018; Koubaa et al., 2016; X. Li et al., 2016; Murkovic et al., 2004; Uguar & Korkmaz, 2011) debido a las cualidades de actividad biológica y nutracéutica mostradas por el aceite (Alfawaz, 2004; Gorjanović *et al*., 2011; Meru *et al*., 2018; Wang *et al*., 2017).

Se han realizado pruebas de extracción por prensa tipo expeller con un sistema equipado con control de temperatura para evitar cualquier daño que pueda afectar las propiedades del aceite (Mosquera-Artamonov *et al*., 2016). Los métodos de extracción por solventes se basan en la adición de líquidos orgánicos a las semillas molidas para luego filtrar la

mezcla y calentar a unos 150°C para eliminar los disolventes por evaporación, proceso que se considera de alto costo y se usa principalmente a nivel de laboratorio (Mosquera-Artamonov et al., 2016). Un método que permite alcanzar buenos rendimientos y conservar las características biológicas de los aceites es la extracción con fluidos supercríticos (SC-CO_2) que está adquiriendo popularidad como un método rentable y ecológico para sustraer componentes útiles como aceites de extractos de plantas, separación y fraccionamiento de grasas, aceites, esencias, pigmentos y compuestos funcionales o bioactivos, sin embargo, no se ha utilizado ampliamente para la extracción de aceite de semilla de zapallo (*C. maxima*) (Mitra *et al.*, 2009) dado que las instalaciones y equipos resultan complejas y costosas en comparación con otros métodos (Gutiérrez Suquillo *et al*., 2017).

1.1.2. Consumo de aceite en Colombia

La cadena productiva de las oleaginosas, aceites y grasas ocupa el quinto lugar dentro del macrosector agroindustrial y la producción del sector corresponde al 9% del PIB de agroindustria. De acuerdo con las estadísticas publicadas por el perfil sectorial de Proexport, en 2003 el sector de aceites y oleaginosas tuvo una producción bruta de US$ 830 millones y generó 8.500 empleos. Incluso, el informe de la entidad llega a catalogar a Colombia como potencia mundial en aceites y grasas a partir del año 2004, cuando incrementó sus exportaciones en un 85%, ya que en ese año, el país pasó de exportar US$ 78 millones en 2003 a US$ 144,5 millones en 2004 (IAlimentos, 2015); este crecimiento se vio reflejado en el tercer trimestre de 2020, en donde el PIB de los aceites y las grasas animales y vegetales registró un incremento del 5,7% respecto al mismo periodo de 2019 (eInforma, 2021).

El mercado de los aceites en Colombia es liderado por los aceites de palma y soya que participan con un 75%, aproximadamente; seguidos de los de canola, girasoles y otras materias primas *premium* que tienen un 20% y el restante porcentaje corresponde a los de oliva (Semana, 2018), aunque actualmente, se pueden encontrar varios tipos como: el de aguacate, ajonjolí, maíz, palma y otros (Vargas Rubio, 2019). En cuanto al consumo, se estima que el consumo total de aceites comestibles, está alrededor de 1,7 millones de ton, de las cuales 1,1 millones corresponden a aceite de palma y el resto principalmente a soya, y en menor proporción a girasol y colza, alcanzando una penetración superior al 98% (IAlimentos, 2019).

En la Tabla 1, se muestra el comparativo de los precios de aceites tradicionales y no convencionales, para marzo de 2022, con base en consultas realizadas en las páginas electrónicas de grandes superficies y plataformas digitales de ventas.

Tabla 1. Comparativo de precios de aceites en Colombia

Aceite	Precio ($/mL)	Precio	Presentación (mL)	Marca
Aguacate	$ 123,96	$ 30.990	250	Oleo Hass
	$ 199,50	$ 39.900	200	Zoí
	$ 93,33	$ 70.000	750	Chosen foods
Ajonjolí	$ 35,40	$ 17.700	500	El natural
	$ 98,00	$ 24.500	250	Bioessens
	$ 91,60	$ 22.900	250	Cosmybell
Canola	$ 6,62	$ 33.100	5000	Canola Life
	$ 20,76	$ 20.760	1000	
	$ 21,20	$ 21.200	1000	
Coco	$ 120,45	$ 199.950	1660	Member's Mark
	$ 62,58	$ 31.290	500	CocoyNatural
	$ 92,60	$ 38.890	420	Bioessens
Girasol	$ 7,13	$ 21.400	3000	Éxito
	$ 16,32	$ 8.160	500	Premier
	$ 17,40	$ 87.000	5000	Member´s selecction
Maíz	$ 6,35	$ 19.050	3000	Éxito
	$ 16,67	$ 67.900	4073	Wesson
	$ 39,70	$ 150.081	3780	Mazola
Oliva	$ 34,45	$ 68.900	2000	Member´s selecction
	$ 56,00	$ 28.000	500	Sublime
	$ 36,63	$ 109.900	3000	Ybarra
Palma	$ 94,84	$ 350.900	3700	Essencial Depot
	$ 54,22	$ 12.200	225	Botanical Beauty
	$ 112,50	$ 225.000	2000	Sheperd's Natural
Sacha Inchi	$ 160,00	$ 40.001	250	Sacha inchi world
	$ 158,68	$ 39.670	250	Tamarin Fruits
	$ 168,00	$ 42.000	250	Tierra andina
Soya	$ 11,10	$ 9.990	900	Olímpica
	$ 16,89	$ 79.900	4730	Wesson
	$ 12,90	$ 64.500	5000	Member´s selecction
Zapallo	$ 590,31	$ 134.000	227	Dr Adorable
	$ 602,80	$ 150.700	250	Flora

	$ 467,32	$ 165.900	355	Omega Nutrition
	$ 897,46	$ 105.900	118	SVA organics
	$ 4.614,40	$ 138.432	30	Rejuve Naturals
	$ 448,20	$ 212.000	473	Seed Oil Company

Fuente. La autora

1.1.3. Aceite de semilla de zapallo

El mercado global de aceite de semilla de zapallo está valorado en aproximadamente USD 676,58 millones en 2018 y se prevé una tasa de crecimiento superior al 15 % durante el período de pronóstico 2019-2026, donde los principales factores responsables de la alta tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR, por sus siglas en inglés) del mercado son el aumento del usos de productos alimenticios y aceites de alta calidad, así como la demanda de bio-aceites fabricados con sustancias naturales (MarketWatch, 2022).

En ese mismo periodo y en cuanto a las regiones clave para su producción, América del Norte es la zona líder del mundo en términos de participación de mercado, debido a la creciente demanda de aceites de semilla de zapallo entre sus usuarios finales, Europa contribuye con un crecimiento satisfactorio en el mercado mundial y se anticipa que Asia-Pacífico exhibirá la tasa de crecimiento/CAGR más alta durante el período de pronóstico 2019-2026, gracias a una gran cantidad de productores y consumidores en toda la región (MarketWatch, 2022).

Para el 2020 el principal exportador a nivel global fue Malasia, con un valor de exportación de USD 1650M, país que también fue el principal importador con importaciones de USD 196M (Tridge, 2022); los valores de exportación y crecimiento de los restantes primeros países exportadores de aceite de semilla de zapallo, se observan en la Tabla 2.

Tabla 2. Naciones exportadoras de aceite de semilla de zapallo y valores de exportación

Rango	País	Participación en exportación 2020	Valor de exportación 2020 (USD)	Crecimiento del valor de exportación (2019-2020)	Crecimiento del valor de exportación (2017-2020)
1	Malasia	48,36%	$ 1,65M	+9,33%	-15,71%
2	Indonesia	8,75%	$ 297,58M	- 54,55%	-16,28%
3	Países Bajos	6,70%	$ 228,07M	-3,97%	-26,03%
4	Alemania	6,58%	$ 223,89M	+ 11,69%	+9,03%
5	Suiza	3,65%	$ 124,24M	+4,74%	+9,36%
6	China	2,51%	$ 85,29M	+561,37%	+996,13%
7	India	2,30%	$ 78,30M	-14,25%	+2,35%
8	Estados Unidos	2,19%	$ 74,47M	-9,59%	-30,72%

9	España	1,85%	$ 62,88M	-12,16%	-26,65%
10	Bélgica	1,39%	$ 47,32M	-1,54%	17,99%

Fuente. (Tridge, 2022)

1.1.4. Pregunta de investigación

¿Cuál es el potencial de aprovechamiento de la semilla del zapallo en la extracción de aceite?

Sub-preguntas de investigación

¿Qué técnica o método de extracción del aceite puede ser implementado para extraer el aceite de la semilla de zapallo?

¿Con una técnica de extracción específica, cuál es el efecto que tiene el proceso en la calidad y estabilidad oxidativa del aceite?

1.2. JUSTIFICACIÓN

El zapallo contribuye a la seguridad alimentaria por su plasticidad agronómica y versatilidad culinaria, constituido en su mayor parte por el alto valor biológico en la pulpa (80% de digestibilidad *in vitro*) y aceite en las semillas (45%), donde el 55% son ácidos grasos insaturados (56% de ácido linoleico). El zapallo procesado es una materia prima competitiva y sostenible para la industria agroalimentaria y es fuente de carotenoides, luteína, vitamina A, vitamina C, almidones, aceites polinsaturados de cadena larga, y todo ello supone un aumento en la investigación en zapallo debido a su utilidad integral, tanto en la pulpa como en la semilla (Rodríguez *et al*., 2018).

Las semillas de zapallo (género *Cucurbita*) son consideradas oleaginosas con propiedades medicinales, alimenticias e industriales (Achu *et al.*, 2005; Rodríguez *et al*., 2018), se emplean directamente para el consumo humano como aperitivo en muchas culturas en todo el mundo, se consumen enteras, asadas, tostadas o molidas, constituyen el principal ingrediente de las salsas y son especialmente populares en los países árabes, después de la salazón y el tostado (Alfawaz 2004; Rodríguez *et al*., 2018). Debido a su composición y, lo que es más importante, a un espectro específico de grasas presentes, estas semillas se consideran un valioso componente dietético. En algunos países se sirven como merienda, principalmente después de ser salados y asados y se utilizan como aditivos para productos de pastelería y panadería, convirtiéndose en algunas regiones en el producto más importante, debido a su alto contenido de aceite (39%) y proteína (44%) (Rodríguez *et al*., 2018).

En el mundo, el papel medicinal más difundido y popularizado de este producto se asocia con la concentración de extracto etéreo (aceite), y esto tiene una razón de ser supremamente importante; el extracto etéreo es sinónimo de energía (Rodríguez *et al.,* 2018).

Se sabe que el contenido de compuestos bioactivos de los aceites obtenidos de una diversidad de semillas varía según el clima, suelo, especie, grado de madurez y sistema de extracción. En la literatura se pueden encontrar diversos informes que describen el uso de diferentes métodos para la extracción de aceite de las semillas de diversas especies de zapallo y sus diferentes áreas geográficas, con el fin de obtener aceite con un alto contenido de compuestos bioactivos. Estos métodos incluyen la extracción por fluidos supercríticos (Pazinato Cuco, Cardozo-Filho et al., 2019; Samaram *et al.,* 2014), extracción enzimática acuosa asistida por microondas, extracción por prensado mecánico (MP) y extracción por solvente orgánico (OS). Sin embargo, la extracción con solventes orgánicos (OS) y prensado mecánico (MP) son los métodos utilizados para la producción comercial de aceites vegetales (Can Cauich *et al*., 2019).

De esta forma, en el actual trabajo se realizó una cuantificación del tonelaje aproximado que aceite de semilla de zapallo que producirse en el Departamento del Cauca, con base en las estadísticas oficiales de producción y datos obtenidos experimentalmente del

zapallo, se seleccionó el método de extracción y se determinó la calidad del aceite extraído con base en evaluaciones químicas y físicas.

1.3. OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar el efecto de los parámetros del proceso de extracción sobre las propiedades del aceite de la semilla de zapallo variedad bolo verde.

Objetivos específicos

Estimar la cantidad de semilla de zapallo disponible en el Departamento del Cauca para la extracción de aceite.

Seleccionar y aplicar la técnica de extracción para obtener el aceite de la semilla de zapallo.

Caracterizar parcialmente el aceite de semilla de zapallo para evaluar su calidad y estabilidad oxidativa.

1.4. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO ESCRITO

En el capitulo1 se encuentran la identificación del problema, la justificación y los objetivos general y específicos.

Seguidamente, el capítulo 2 contiene la revisión bibliográfica, la contextualización del fruto del zapallo como objeto de estudio, las características de la semilla, la posibilidad de extracción de aceite a partir de este material vegetal, los métodos de extracción y finalmente el análisis de calidad del aceite extraído.

Los materiales y métodos aplicados en el presente estudio se encuentran en el capítulo 3, donde se describen la localización, materiales y los métodos para la caracterización física de las semillas y la selección del método de extracción.

Posteriormente, en el capítulo 4, se exponen los resultados y análisis de la investigación realizada.

Finalmente, el capítulo 5 contiene las conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. ZAPALLO Y CARACTERÍSTICAS GENERALES

Actualmente, el zapallo se cultiva la amplia gama de altitudes en el continente americano y a nivel mundial se reportan 830 especies del género Cucurbitaceae, dando como resultado una gran diversidad morfológica de sus semillas y frutos (colores, formas, grosores y durabilidad de la cáscara del fruto), generando la existencia de variedades con ciclos de vida de diferente duración, así como la de numerosos cultivares desarrollados en otras partes del mundo y de variedades locales con características agronómicas sobresalientes (resistencia a enfermedades virales) (Mera Obando *et al.*, 2011).

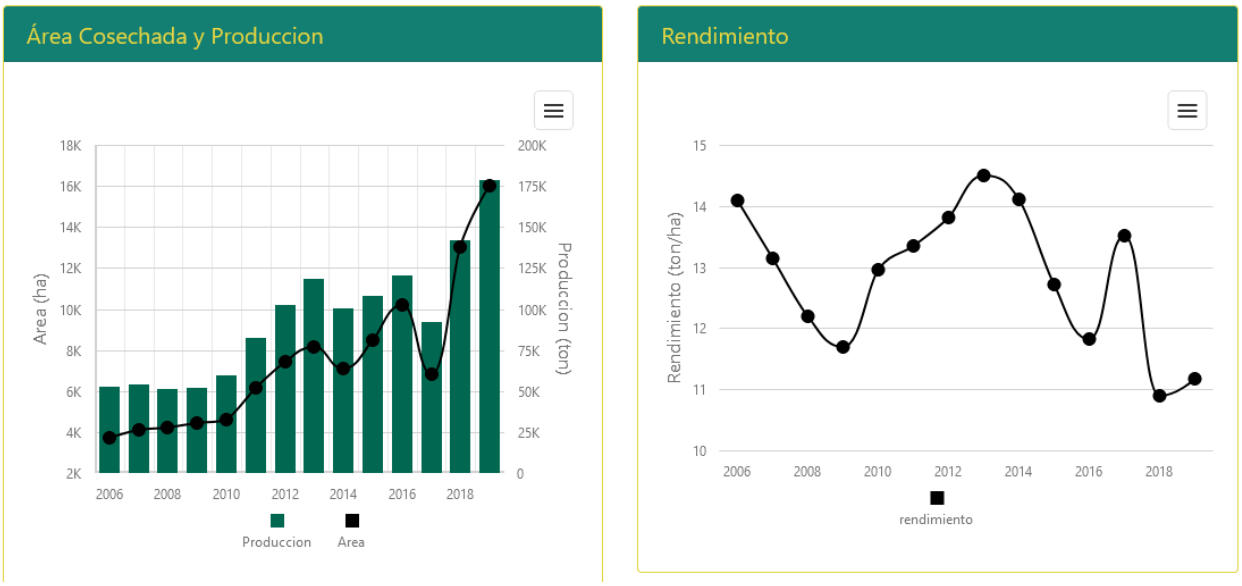
En Colombia es posible encontrar la planta hasta los 2300 msnm, en su mayor parte de la variedad *C. moschata*, de los que sobresale la variedad bolo verde perteneciente a la variedad *Cucurbita moschata* Durch, y también se cultivan otras variedades y especies (zapallo variedad cuero de sapo, mandarino o calabacines) (Mera Obando *et al.*, 2011).

El zapallo contribuye a la seguridad alimentaria por su plasticidad agronómica y versatilidad culinaria, constituido en su mayor parte por el alto valor biológico en la pulpa (80% de digestibilidad *in vitro*) y aceite en las semillas (45%), donde el 55% son ácidos grasos insaturados (56% de ácido linoleico). El zapallo procesado es una materia prima competitiva y sostenible para la industria agroalimentaria y es fuente de carotenoides, luteína, vitamina A, vitamina C, almidones, aceites polinsaturados de cadena larga, y todo ello supone un aumento en la investigación en zapallo debido a su utilidad integral, tanto en la pulpa como en la semilla (Rodríguez *et al*., 2018).

Junto con los frutos desechados, se desperdician también sus semillas, uno de estos casos es el zapallo, una cucurbitácea cuya familia comprende aproximadamente 130 géneros y 900 especies (Méndez-López et al., 2010). Según estadísticas de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación (FAO), para el año 2016, la producción mundial de *Cucurbita spp*., que incluye el zapallo, estuvo alrededor de los 26,5 millones de ton, obtenidas en aproximadamente 2 millones de ha, con rendimientos medios de 13,3 ton/ha. China continental es el mayor productor, con 7,7 millones de ton, mientras que India presenta la mayor área cosechada, con 528.000 ha, y Bahréin reporta los mayores rendimientos, con 94,2 ton/ha; Colombia, por su parte, se ubica a nivel mundial en los puestos 44, 34 y 61 en producción, área cosechada y rendimiento, respectivamente (Correa Álvarez *et al*., 2019).

En Colombia, el reporte de Área, Producción y Rendimiento Nacional por Cultivo entre los años 2006 y 2020 (AGRONET, 2020a), indica que en el país se ha incrementado el área cultivada, así como la producción nacional, sin embargo, el rendimiento muestra un comportamiento inverso a las tasas de producción entre 2006 y 2020 (Figura 1).

Figura 1. Área cosechada, producción y rendimiento nacional de zapallo (2006-2020)



Fuente. (AGRONET, 2020b)

En la Tabla 3 se muestran los datos relacionados con la productividad del zapallo en Colombia.

Tabla 3. Área sembrada y cosechada, producción y rendimiento del cultivo de zapallo de 2007 a 2017

Año	Área sembrada (ha)	Área cosechada (ha)	Producción (ton)	Rendimiento (ton/ha)
2007	4.828	3.729	52.535	14,09
2008	5.084	4.123	54.176	13,14
2009	5.011	4.196	51.185	12,2
2010	5.703	4.446	51.969	11,69
2011	6.790	4.621	59.854	12,95
2012	7.858	6.171	82.320	13,34
2013	9.344	7.429	102.593	13,81
2014	8.664	8.158	118.312	14,5
2015	9.547	7.103	100.130	14,1
2016	11.724	8.485	107.839	12,71
2017	11.377	10.172	120.212	11,82

Fuente. (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural & Agronet, 2017)

En 2020, los tres departamentos con mayor tonelaje producido fueron Bolívar (38.247 ton), Cesar (21.668 ton) y Magdalena (21.137 ton). El Departamento del Cauca se ubica en la decimoquinta posición (2.375 ton), siendo el Patía (895 ton) el municipio de mayor producción (Tabla 4)(AGRONET, 2020a).

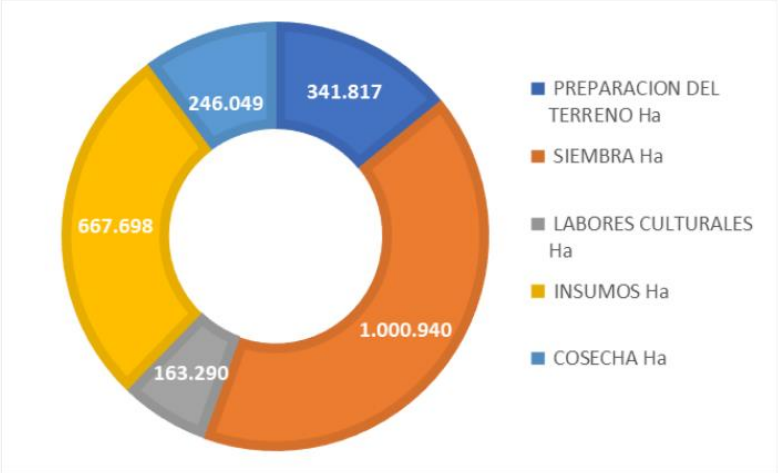
Tabla 4. Producción nacional y departamental (Cauca) de zapallo para 2020

COLOMBIA				
Lugar	**Departamento**	**Área (ha)**	**Producción (ton)**	**Rendimiento (ha/ton)**
1	Bolívar	3.498,00	38.247,00	10,93
2	Cesar	1.948,00	21.668,00	11,12
3	Magdalena	2.033,75	21.137,00	10,39
4	La Guajira	2.444,00	19.268,00	7,88
5	Córdoba	676,18	11.990,00	17,73
15	Cauca	199,00	2.375,00	11,93
CAUCA				
Municipio	**Área Sembrada**	**Área Cosechada**	**Producción (ton)**	**Rendimiento (ha/ton)**
Patía	40,00	40,00	895,00	22,38
Balboa	70,00	70,00	840,00	12,00
Villa Rica	42,00	42,00	398,00	9,48
Mercaderes	40,00	40,00	200,00	5,00
Puerto Tejada	8,00	7,00	42,00	6,00

Fuente. (AGRONET, 2020b)

Los registros indican que el precio promedio de venta del zapallo ha mostrado un incremento hasta alcanzar $ 652/kg entre 2015 y 2020 (CORABASTOS, 2020), sin embargo, algunos cultivadores de áreas productoras afirman que el precio de compra ofrecido por el intermediario no supera los $ 500/kg, lo que lo convierte en un producto poco atractivo en la producción agropecuaria de las zonas donde las condiciones climáticas son ideales para su producción, considerando que los costos de producción varían entre 1,5 y 3,8 millones por ha (Correa Álvarez et al., 2019) y se dividen en los costos de instalación, mantenimiento, materiales e insumos (Figura 2); en cuanto a los ingresos por un bulto de zapallo el precio puede ser de hasta $70.000 (Rodríguez, 2020).

Figura 2. Costos promedio de producción de zapallo por ha en 2017



Fuente. (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural & Universidad Sergio Arboleda, 2018).

En el Departamento del Cauca, percepciones culturales como clasificarlo a modo de "alimento para pobres" y el escaso conocimiento de sus propiedades nutricionales, lo hacen poco atractivo para su producción a mayor escala y han limitado la comercialización en fresco y la generación de valor agregado, representado en la potencialidad de los subproductos comercializables (cáscara y semillas) y la disminución de desechos que se generan posteriormente al procesamiento del alimento (Lalnunthari *et al*., 2019; Norfezah *et al*., 2011).

A pesar de lo anteriormente mencionado, es posible encontrar que se da valor agregado a este producto, tal es el caso de la planta procesadora de zapallo para la producción de harinas de exportación, localizada en Maicao, en el Departamento de La Guajira (De la Hoz, 2020b, 2020a; Entornos, 2020), sin embargo y en la actualidad, el país no cuenta con una cadena productiva definida y que aborde su aprovechamiento integral, como es posible evidenciar en los Planes de Desarrollo nacional, departamental y municipal.

2.2. SEMILLAS DE ZAPALLO

Las semillas de zapallo (género Cucurbita) son consideradas oleaginosas con propiedades medicinales, alimenticias e industriales (Achu *et al.*, 2005; Rodríguez *et al*., 2018), se emplean directamente para el consumo humano como aperitivo en muchas culturas en todo el mundo, se consumen enteras, asadas, tostadas o molidas, constituyen el principal ingrediente de las salsas y son especialmente populares en los países árabes, después de la salazón y el tostado (Alfawaz 2004; Rodríguez *et al*., 2018). Debido a su composición y, lo que es más importante, a un espectro específico de grasas

presentes, estas semillas se consideran un valioso componente dietético. En algunos países se sirven como merienda y se utilizan como aditivos para productos de pastelería y panadería, convirtiéndose en algunas regiones en el producto más importante, debido a su alto contenido de aceite (39%) y proteína (44%) (Rodríguez *et al*., 2018).

En el mundo, el papel medicinal más difundido y popularizado de este producto se asocia con la concentración de extracto etéreo (aceite), y esto tiene una razón de ser supremamente importante; el extracto etéreo es sinónimo de energía (Castro, Coello and Castillo 2007 citado por Rodríguez *et al.,* 2018) y forman parte de un grupo menor de plantas y hierbas que contienen ácidos grasos y fitoesteroles que se administran en la etapa inicial de la terapia de hiperplasia prostática y durante muchos años, se han utilizado en medicina complementaria, principalmente como vermífugo (Uguar & Korkmaz, 2011).

Las semillas son una rica fuente de ácidos grasos y proteínas y hay reportes de su alto contenido de aminoácidos esenciales, lo que les confiere gran potencial para su uso en los sistemas alimentarios, no solo como suplemento nutricional sino también como agente funcional. En México, se usan en la producción de bocadillos (semilla tostada) o como ingrediente en la preparación de platos tradicionales, sin embargo, en países como Austria, Hungría y partes del sur de Rusia, su uso es, principalmente, para la producción de aceite como aderezo para ensaladas y en medicina alternativa como agente antiparasitario y para la eliminación del moco respiratorio. Actualmente, los investigadores están concentrando sus esfuerzos en la búsqueda de alternativas al uso de aceites no convencionales y el desarrollo de métodos para minimizar la degradación de estos aceites en el proceso de extracción (Hernández-Santos *et al*., 2016). Además, son una fuente rica para aplicaciones médicas e incluye diversos compuestos bioactivos como ácidos grasos ω-3, ω -6 y ω -9, tocoferoles α y γ, esteroles α-5 y α-7, β-caroteno y luteína, por lo que en los últimos años han recibido considerable atención debido a las propiedades nutricionales y los efectos protectores sobre la salud (Uguar & Korkmaz, 2011)**.**

Finalmente, en cuanto a rendimiento, una variedad no mejorada de zapallo *C. moschata*, produce en promedio 400 kg de semilla/Ha con un rendimiento de 200 L de extracto etéreo por ha, el que sobresale por su calidad para uso comestible, medicinal y agroindustrial (Rodríguez *et al*., 2018). El valor teórico del contenido de aceite es del 45% (Ortiz Grisales, 2012), sin embargo, este porcentaje puede variar debido a las condiciones edafoclimáticas del cultivo y la madurez del fruto y la semilla, por lo tanto, se empleará un valor menor, de 35%.

2.3. ACEITE DE SEMILLAS DE ZAPALLO

El aceite de semilla de zapallo es un aceite viscoso fuertemente dicromático que se ha documentado por su fuerte actividad antioxidante y se ha identificado como un preventivo

excepcional contra la hipertensión y las enfermedades cancerígenas. En los últimos años, se han realizado varios estudios para resaltar mejor sus beneficios medicinales, así como también en la determinación tanto de las propiedades fisicoquímicas como de la estabilidad oxidativa contribuiría significativamente a la valorización del potencial del aceite en las industrias cosmética, farmacéutica y alimentaria (Rezig *et al*., 2012).

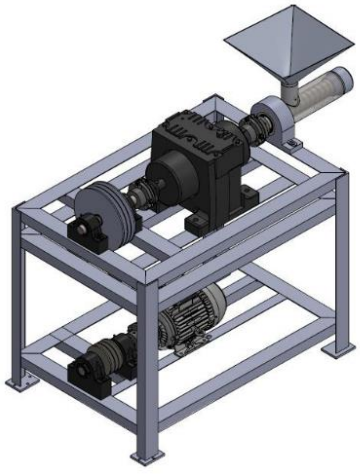
Actualmente, el aceite de esta semilla será popular para futuras investigaciones médicas debido a sus propiedades médicas como antidiabético, antihipertensivo, antitumoral, inmunomodulación, antibacteriano, anti hipercolesterolemia, antiparasitario intestinal, antiinflamatorio (Uguar & Korkmaz, 2011)**.** Este aceite (especialmente el obtenido a partir de semillas sin cáscara) es utilizado por las industrias alimenticia y farmacéutica, puede representar el 50% del contenido total de la semilla e incluye ácidos grasos, la mayoría consiste en ácido palmítico (C16: 0, 9.5–14.5% en peso), ácido esteárico (C18: 0, 3.1–7.4% en peso), ácido linoleico (C18: 2, 35,6–60,8% en peso) y ácido oleico (C18: 1, 21,0–46,9% en peso) (Nawirska-Olszańska *et al*., 2013; Uguar & Korkmaz, 2011).

2.4. MÉTODOS PARA LA EXTRACCIÓN DE ACEITE

2.4.1. Extracción mecánica.

La presión de las semillas oleaginosas se realiza hoy en día casi exclusivamente mediante prensas continuas, llamadas normalmente expellers, en los que la semilla entra por una tolva de alimentación a un tornillo sinfín de presión, que la hace avanzar por las espiras helicoidales de que está provisto, a lo largo de la cesta, realizada con especial configuración. A medida que la semilla avanza encuentra un espacio entre el sinfín y la cesta, cada vez más reducido, lo que hace aumentar la presión de la masa (Figura 3).

Figura 3. Sistema de extracción por tornillo sin fin



Fuente. (Galarraga Rivera, 2015)

La cesta está constituida de muchos segmentos de acero especial, convenientemente espaciados de forma que permite la salida del aceite. La masa de semilla continuará su recorrido hasta el final del sinfín por donde ha de salir y donde existe un cono de acero que, moviéndose a lo largo del eje de la prensa, puede regular el espacio que queda entre la parte final del sinfín y el propio cono, lo cual permite regular fácilmente el espesor de la lámina de la semilla presada que sale de la prensa y, por consiguiente, el grado de presión a que se somete la semilla. Para obtener un buen rendimiento por prensado dejando poco aceite en la harina residual, es necesario aplicar grandes presiones usando prensas de tornillo llamados *expellers* que permiten presiones de hasta 2500 Kg/cm^2 y la harina residual contiene de 2 a 4 % de aceite, promoviendo el desarrollo del color y aumento de temperatura, lo que da lugar a la desnaturalización de proteínas, alteración de algunos componentes y oscurecimiento del aceite (Valentin Chancavilca *et al*., 2007)**.**

Con respecto al rendimiento de aceite, las prensas de tornillo tienen una ventaja sobre las prensas hidráulicas para producir rendimientos ligeramente más altos. Las prensas mecánicas (manuales o motorizadas) diseñadas para la extracción de aceite a pequeña escala (laboratorio) son simples, más seguras y contienen menos pasos en comparación con la extracción de aceites vegetales con solventes. Los métodos de prensa mecánica se utilizan a menudo para extraer aceite vegetal de semillas oleaginosas que tienen un contenido de aceite superior al 20%. Generalmente, estos métodos tienen la ventaja de un bajo costo de operación y de producir aceite de color claro de alta calidad con baja concentración de ácidos grasos libres (Yusuf, 2018).

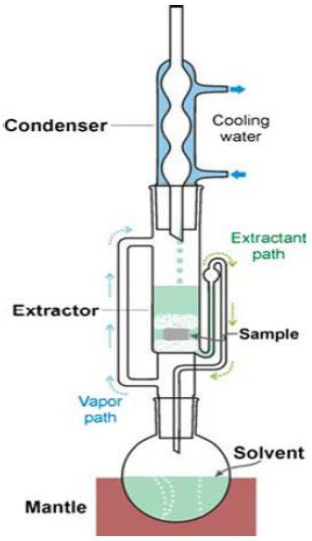
Hay dos tipos de métodos de prensado mecánico: en frío (por debajo de 50°C) y en caliente, a saber, métodos de prensado en frío y de prensado en caliente; los aceites de semillas prensados en frío son más seguros que los aceites de semillas prensados en caliente, ya que en los primeros se evitan los efectos adversos causados por las altas temperaturas, tales como la disminución de la estabilidad oxidativa, la degradación de los componentes valiosos del aceite y la reducción de la calidad de mantenimiento del aceite. En los aceites prensados en frío se conservan la pureza y las propiedades naturales de los aceites de semillas, incluyendo la retención de valiosos nutracéuticos como fitoesteroles y tocoferoles en el aceite extraído (Yusuf, 2018).

Debido a estas cualidades, existe una creciente demanda mundial de aceite prensado en frío, sin embargo, los métodos de prensado en caliente generan mayor rendimiento de aceite debido en gran parte a la disminución de la viscosidad del aceite de semilla a altas temperaturas, lo que mejora el flujo de aceite durante la extracción, por lo tanto, las altas temperaturas aumentan la eficiencia del proceso de extracción y son posibles rendimientos de hasta el 80% del aceite disponible en la semilla, pero también pueden generar la degradación del aceite, con el consiguiente deterioro de la calidad del aceite (Yusuf, 2018).

2.4.2. Extracción por solventes.

Una manera eficiente de obtener los aceites vegetales es a través del extractor sólido-líquido con disolventes, ya que este método permite que el solvente se ponga en contacto con la semilla y, por difusión, arrastre los componentes líquidos y solubles que se buscan obtener, procurando extraer todo el aceite contenido en la semilla, con la ventaja de aprovechar los diferentes puntos de ebullición para recuperar fácilmente tanto el aceite obtenido como el solvente utilizado (González *et al.*, 2012)**,** como se visualiza en la Figura 4**.** Es un método de extracción convencional comúnmente aplicado a semillas oleaginosas con bajo contenido de aceite (< 20%), como la soja, y se considera como uno de los métodos más eficientes en la extracción de aceite vegetal, dejando menos aceite residual en la torta o harina (Yusuf, 2018).

Figura 4. Diagrama de Método Soxhlet



Fuente. (Dabbs et al., 2006)

Los tres pasos principales involucrados en la extracción por solventes son la limpieza y el acondicionamiento de las semillas oleaginosas, la extracción del aceite y la separación de la micela. La calidad del aceite crudo y la harina depende principalmente del tipo de solvente utilizado, la temperatura de reacción y el tipo de pretratamiento que se le da a la semilla oleaginosa. El método de extracción por solvente es preferible porque es rentable y fácil de usar (Nde & Anuanwen, 2020).

Aunque entre sus ventajas se encuentran su repetibilidad, reproducibilidad y una tasa de recuperación de aceite del 90 % al 98 %, el método tiene algunas desventajas industriales como largos tiempos de extracción, consumo de solvente relativamente alto, alta inversión, alto requerimiento de energía, problemas de seguridad de la planta, emisión de compuestos orgánicos volátiles a la atmósfera, altos costos de operación, mala calidad del producto causada por un alto procesamiento temperaturas, un número relativamente

alto de pasos de procesamiento y un proceso de refinación adicional para obtener el aceite de la calidad requerida; por otra parte solvente que se usa con más frecuencia (hexano) es peligroso y puede dañar la salud (Nde & Anuanwen, 2020; Yusuf, 2018).

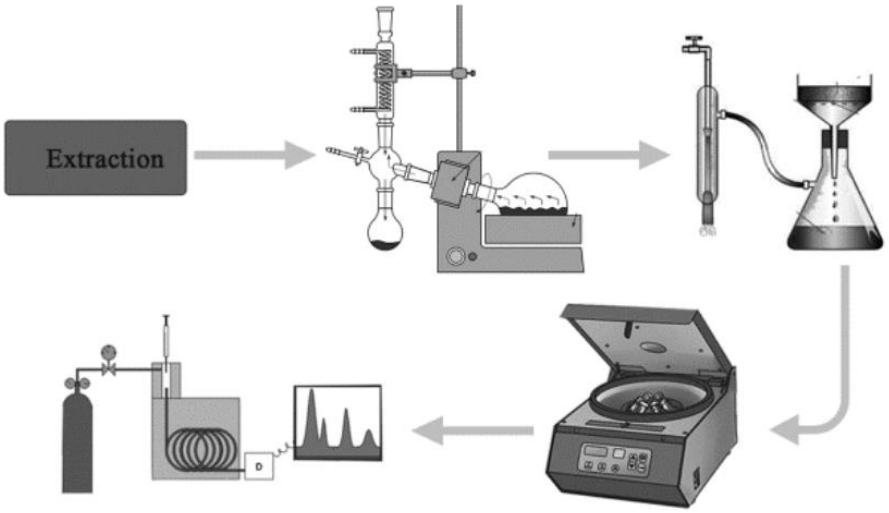
En el caso de la extracción con solventes aplicada a la semilla de zapallo, primero se realiza su secado para facilitar la posterior extracción del extracto etéreo, molidas para facilitar su inclusión en el equipo de desengrasado, en el cual se emplean solventes orgánicos como éter de petróleo (Ortiz Grisales *et al*., 2009; Rezig *et al*., 2012) y propano (Pazinato Cuco *et al*., 2019), aplicando el método Soxhlet.

2.4.3. Extracción por ultrasonido.

El ultrasonido emplea ondas sonoras de una frecuencia inferior a 18-20 kHz. El método de extracción asistida por ultrasonido, debido a su mayor eficiencia y menor consumo de energía y agua, se ha convertido en una alternativa apropiada a los métodos de extracción convencionales y es aprobado para procesar sustancias vegetales, especialmente para la extracción de compuestos con bajo peso molecular. El efecto aditivo de las ondas de ultrasonido en la tasa de extracción de sustancias vegetales está relacionado con la ruptura de las células y la liberación de su contenido en el entorno de extracción, esto da como resultado la destrucción del tejido, así como una mayor eficiencia de extracción y tasa de transferencia de masa (Alirezapour *et al*., 2020). Además, este método de extracción se considera una técnica ecológica, ya que se basa en el desarrollo y diseño de procesos que reducen el consumo de energía, permite el uso de solventes alternativos y productos naturales renovables y garantiza un extracto seguro y de alta calidad/producto buscando maximizar el valor de la materia prima para la sostenibilidad económica y reducir o eliminar el uso de sustancias peligrosas (Hernández-Santos *et al*., 2016). La representación del sistema de extracción por ultrasonido se visualiza en la Figura 5.

Varias clases de componentes alimentarios como aromas, pigmentos, antioxidantes y otros compuestos orgánicos y minerales han sido extraídos, analizados y formulados de manera eficiente a partir de una variedad de matrices, principalmente tejidos animales, microalgas, levaduras, alimentos y materiales vegetales (Chemat *et al*., 2017).

Figura 5. Esquema de extracción por ultrasonido



Fuente. (Alirezapour et al., 2020)

2.4.4. Extracción por prensado en frío.

Las prensas en frío se pueden clasificar en expulsores, expansores y sistemas de doble frío, de los que éstos últimos se utilizan actualmente a escala de laboratorio y piloto y en los que se están generando estudios de optimización. El aceite obtenido bajo este proceso generalmente está listo para el consumo sin necesidad de ser refinado y se considera aceite de alta calidad. Muchos compuestos fenólicos sensibles a la temperatura no se pierden y no se producen reacciones de oxidación junto con el tratamiento térmico, lo que se conoce como un aceite de mayor calidad. En la depuración de aceites de prensa en frío sólo se pueden realizar lavados con agua, filtración y centrifugación (Çakaloğlu et al., 2018).

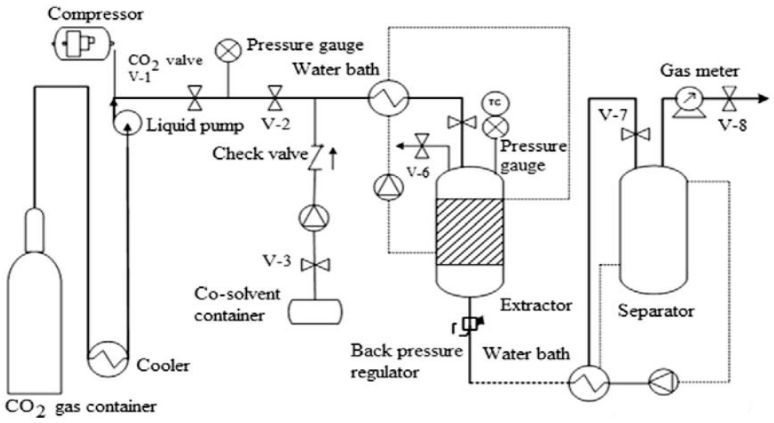
La producción de aceite de semillas de zapallo prensado en frío (PSO) como su consumo, han aumentado constantemente en los últimos años. Un factor importante en el proceso de obtención de aceite prensado en frío es la temperatura del aceite que sale de la prensa que, debido a la fricción, se acompaña de la liberación de calor. Sin embargo, las prensas de tornillo modernas se construyen de una manera que reduce el calor liberado por unidad de masa de materia prima procesada por la prensa, lo que disminuye la temperatura y permite un mejor control de la temperatura durante el proceso. La temperatura del aceite que sale de la prensa durante el proceso de prensado de semillas oleaginosas, con el objetivo de producir aceites prensados en frío, no debe exceder los 50°C. Este método de extracción de aceite preserva los componentes bioactivos, como las vitaminas, las provitaminas, los fitoesteroles, los fosfolípidos y el escualeno, que son, junto con algunos ácidos grasos, factores clave del valor nutricional del PSO. Además, se ha demostrado que estos componentes tienen un efecto positivo en la salud humana de muchas maneras diferentes: tienen propiedades antiinflamatorias y diuréticas, alivian

los síntomas negativos de la hiperplasia prostática benigna, ayudan a reducir los niveles de colesterol, se unen a los radicales libres y otros (Rabrenovic *et al*., 2014).

2.4.5. Extracción por altas presiones.

La extracción de aceites vegetales utilizando fluidos presurizados (como el dióxido de carbono o el propano) se ha aplicado ampliamente porque da como resultado extractos de alta calidad. Este proceso ofrece muchas ventajas: puede llevarse a cabo a bajas temperaturas en ausencia de luz y oxígeno, se evita la degradación de los compuestos, no se requieren solventes orgánicos contaminantes, se puede lograr una alta selectividad y el consumo de energía es bajo (Pazinato *et al*., 2019). Un aparato de extracción SC-CO_2 consta de un recipiente extractor, una bomba de compresión un regulador de presión y un manómetro (Figura 6).

Figura 6. Diagrama de equipo de extracción por CO_2 supercrítico



Fuente. (Mitra et al., 2009)

El dióxido de carbono (CO_2) con propiedades de presiones de 10-50 MPa y temperaturas de 35-80°C es el disolvente más frecuentemente utilizado porque tiene una temperatura crítica relativamente baja (31,1°C), no es tóxico, no es inflamable, tiene buen poder disolvente, baja viscosidad, alta difusividad, se puede eliminar fácilmente del producto (no deja residuos de solventes orgánicos) y está fácilmente disponible a bajo costo (Nde & Anuanwen, 2020).

El CO_2 se usa ampliamente en este tipo de extracción, sin embargo, en este medio, los triglicéridos muestran baja solubilidad y, por lo tanto, se requieren presiones extremadamente altas y largos tiempos de extracción para obtener aceites vegetales. Por otra parte, el propano es una alternativa adecuada al dióxido de carbono porque tiene un alto poder de solvatación de triglicéridos, es relativamente económico, no genera residuos tóxicos y requiere bajas presiones de operación lo que resulta en mayores rendimientos de aceite en cortos tiempos de extracción. Los estudios también han encontrado que el uso de propano conduce a una buena eficiencia en la extracción de

compuestos activos, como los tocoferoles, los fitoesteroles y los carotenoides (Pazinato *et al*., 2019).

Se observa que las investigaciones recientes sobre extracciones de aceite vegetal se han centrado más en los métodos asistidos y la extracción con fluidos supercríticos en comparación con los métodos convencionales de extracción por solventes y mecánicos. La eficiencia de extracción de aceite y la calidad del aceite es una función del material que contiene aceite y el método de extracción utilizado (Nde & Anuanwen, 2020).

2.5. ANÁLISIS DE CALIDAD DEL ACEITE

A continuación, se describen los análisis de calidad que deben efectuarse a grasas y aceites según normatividad (Codex Alimentarius, 2015; Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia, 2012).

2.5.1. Determinación de la densidad.

Permite obtener el valor de densidad de la muestra tomando en cuenta la medida de la masa, a una temperatura específica, de un volumen de grasa líquida en un picnómetro calibrado (ICONTEC, 2016).

2.5.2. Determinación del índice de acidez.

El índice de acidez es una medida de los ácidos grasos libres producto de la hidrólisis o descomposición de los triglicéridos, se define como el número de miligramos de hidróxido de sodio que se requieren para neutralizar los ácidos grasos libres contenidos en un gramo de grasa y se expresa de acuerdo al ácido graso predominante en la grasa o aceite como ácido láurico, acido palmítico y en la mayoría de los casos como ácido oleico (Grupo de Investigación ASUBAGROIN, 2015).

El principio consiste en disolver la muestra en una mezcla de solventes adecuada, y los ácidos presentes se titulan con una solución etanólica o metanólica de hidróxido de potasio o de sodio (ICONTEC, 2011a).

2.5.3. Determinación del índice de peróxido.

El índice de peróxidos es una medida de la cantidad de mili equivalentes de oxígeno presente en el aceite, está medición es importante porque permite establecer el estado de deterioro oxidativo del aceite o grasa, producto de la reacción de los ácidos grasos y el oxígeno (Grupo de Investigación ASUBAGROIN, 2016).

La cantidad de estas sustancias en la muestra, se expresa en términos de miliequivalentes de oxígeno activo por kilogramo, el cual el yoduro de potasio oxida bajo las condiciones del ensayo descrito (ICONTEC, 2011b) .

2.5.4. Determinación del índice de yodo.

El índice de yodo es una medida del grado medio de insaturación de los ácidos grasos presentes en el aceite o grasa, expresado como centigramos de yodo absorbidos, por cada gramo de sustancia (ASUBAGROIN, 2015).

2.5.5. Determinación del índice de saponificación.

Se define como el número de miligramos de hidróxido de potasio necesarios para saponificar un gramo de grasa, y es un valor inversamente proporcional al peso molecular de los ácidos grasos presentes en la grasa o aceite (Grupo de Investigación ASUBAGROIN, 2008).

2.5.6. Estabilidad oxidativa.

La técnica Rancimat es una prueba de envejecimiento acelerado. El aire pasa a través de la muestra en el recipiente de reacción a una temperatura alta constante y los ácidos grasos se oxidan en este proceso. Al final de la prueba se forman productos de reacción secundarios volátiles, que se transportan al recipiente de medición a través de la corriente de aire y se absorben en la solución de medición (agua desionizada).

Debido a la absorción de los productos de reacción, la conductividad eléctrica registrada continuamente de la solución de medición crece. Por lo tanto, su apariencia puede ser detectada. El tiempo hasta que se detectan los productos de reacción secundarios se conoce como tiempo de inducción. Caracteriza la estabilidad a la oxidación de grasas y aceites (Metrohm USA Inc, 2019).

Empleando un Rancimat 892, es posible determinar la estabilidad a la oxidación de grasas o aceites, acelerando el proceso de envejecimiento de la muestra por exposición al calor y mayor volumen de aire, midiendo el tiempo que transcurre hasta que tiene lugar la oxidación a alta velocidad. El sistema Rancimat tiene ocho posiciones de medida, cuatro en cada uno de sus dos bloques independientes de calefacción. Al ser independientes, las distintas temperaturas se pueden aplicar al mismo tiempo en los bloques de calefacción. Cada medida particular se puede iniciar individualmente, directamente en el aparato, una vez que la muestra se ha colocado en posición (Metrohm, 2018).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La caracterización física de la semilla y la observación por Microscopía Electrónica de barrido (SEM) se realizaron en Laboratorio de Biotecnología y Nanotecnología de Tecnoparque nodo Popayán.

El sistema extractor de aceite se ajustó en el ambiente de Ingeniería y Diseño de Tecnoparque, nodo Popayán y en el ambiente de Mecanizado y Torno, del Centro de Teleinformática y Producción Industrial – CTPI-, pertenecientes al Sena Regional Cauca.

El análisis químico del aceite extraído se llevó a cabo en el Laboratorio de Textura y Empaque y el Centro Internacional Biotecnológico Agroindustrial, de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad del Cauca y el Laboratorio de Biotecnología y Nanotecnología de Tecnoparque nodo Popayán, localizados a 1738 m.s.n.m, temperatura promedio de 19°C (Alcadía de Popayán, 2013).

3.2. MATERIALES

3.2.1. Material vegetal.

Se obtuvieron 8 Kg de semilla de zapallo variedad bolo verde, suministradas por la empresa Campos de Oriente (Santiago de Cali), que fueron limpiadas para eliminar material particulado como piedras, palos y lodo, seleccionando aquellas sin afecciones químicas, físicas o biológicas. Posteriormente, se retiró la humedad hasta el 4,6% empleando secado por convección natural.

Se empleó tal cantidad de semilla tomando en cuenta los kilogramos aprovechables tras el descascarillado, evitando también el efecto negativo provocado por el deterioro dado el envejecimiento natural de las semillas.

3.3. MÉTODOS

3.3.1. Objetivo específico 1. Estimar la cantidad de semilla de zapallo disponible en el Departamento del Cauca para la extracción de aceite

La exploración de páginas web oficiales y reportes publicados de entidades como la ONU, FAO y Bancos de Alimentos de Colombia permitió generar un contexto de los desperdicios a nivel global y nacional, de esta forma, se enmarcó la propuesta en el contexto de los residuos alimentarios, volúmenes y afectaciones económicas y ambientales.

También fueron revisadas las bases de datos gubernamentales del Ministerio de Agricultura, la Red de Información y Comunicación del Sector Agropecuario Colombiano (Agronet), el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE) y la Corporación de Abastos de Bogotá S.A (CORABASTOS), así como artículos científicos, tesis y reportes, para determinar las cantidades producidas de zapallo y los precios de venta asociados al producto.

Adicionalmente, se cuenta como antecedente la ejecución del proyecto "Propuesta de mejoramiento de las condiciones de conservación de la ahuyama var. bolo verde, cultivada en el municipio de Guachené (Cauca), para su comercialización en fresco" (Mosquera Sánchez et al., 2016), aprobado en el marco de la convocatoria 667 de 2014 del Ministerio de Ciencia y Tecnología (Minciencias), investigación que se realizó entre 2014 y 2016 en el municipio de Guachené (Cauca) y que permitió obtener datos experimentales relacionados con el peso promedio de los zapallos variedad bolo verde y los precios de compra del intermediario a los productores de la zona rural del municipio.

Finalmente, con base en la revisión bibliográfica se establecieron los criterios de análisis de rendimiento de la semilla por fruto, obteniendo un aproximado del volumen anual producido de aceite de semilla de zapallo para el departamento del Cauca, como se describe a continuación (Ecuación 1):

PDZ: producción de zapallo anual en el Departamento del Cauca (kg)
PZ: peso promedio de un zapallo (kg)
TZ: cantidad total de zapallos producidos en 2020 en el Departamento del Cauca (ud.)

$$TZ = \frac{PDZ}{PZ} \qquad \textit{(Ec. 1)}$$

A partir de la cantidad de zapallos obtenidos, se determinó un aproximado de la cantidad de semillas que podrían ser utilizadas, tomando en cuenta el porcentaje en peso que representan en el fruto. Según literatura, este valor ronda entre el 3% (Romero Barona et al., 2022) al 9% (Remedi González, 2010), por lo tanto, se empleó el promedio (6%) para su cuantificación.

Con los datos mencionados, se determinó el peso de las semillas (PS) que podrían obtenerse según la cantidad de zapallos cosechados (Ecuación 2):

PS: peso total de semillas (kg)
%S: porcentaje promedio de semillas en el fruto (%)

$$PS = PZ * \%S \qquad \textit{(Ec. 2)}$$

Para cuantificar la cantidad de semillas por fruto se obtuvo experimentalmente el peso de la semilla descascarillada (PSDC), debido a que los procesos de extracción son más eficientes al prescindir de la testa; de tal forma que la relación entre la cantidad de

semillas y su peso brindó un aproximado de la cantidad de semillas por zapallo (Ecuación 3).

CS: cantidad aproximada de semilla por zapallo (ud)
PSDC: peso promedio de semillas descascarilladas (kg)

$$CS = \frac{PS}{PSDC} \quad \textit{(Ec. 3)}$$

Habiéndose determinado la cantidad de semillas por zapallo (CS), este valor se multiplicó por las unidades de zapallos cuantificadas, para obtener la cantidad de semillas en el Departamento del Cauca (CSC) (Ecuación 4).

$$CSC = TZ * CS \quad \textit{(Ec. 4)}$$

El valor de CSC, multiplicado por el peso de las semillas descascarilladas, permitió determinar el peso de semillas disponibles (PSD) (Ecuación 5).

$$PSD = CSC * PSDC \quad \textit{(Ec. 5)}$$

Sin embargo, se debe considerar que no todo el 100% de las semillas producidas está disponible para su aprovechamiento en la extracción de aceite, debido a que una parte de estas se emplea para el siguiente ciclo de cultivo o alimentación animal, se vende a otros comercializadores o se presentan pérdidas por daños fisiológicos (germinación) o microbiológicos. Por las razones previamente mencionadas y con base en literatura (Romero Barona et al., 2022) se empleó el 40% como porcentaje de semilla aprovechable (%SA); de esta forma, la cantidad de semillas aprovechables en el Departamento del Cauca (CSA) se cuantificó como se indica en la Ecuación 6:

$$CSA = PSD * \%SA \quad \textit{(Ec. 6)}$$

A partir de la cuantificación de las semillas utilizables y considerando que el porcentaje de aceite en la semilla es de alrededor del 35 al 45% (Ortiz Grisales, 2012), se pudo establecer el peso aproximado del aceite extraído anualmente (PA) con las Ecuaciones 7 y 8:

$$PA = CSA * 35\% \quad \textit{(Ec. 7)}$$

$$PA = CSA * 45\% \quad \textit{(Ec. 8)}$$

Finalmente, se reportó el peso de la testa de la semilla del zapallo (PT), obtenido por diferencia entre el peso de la semilla entera (SE) y la semilla descascarillada (PSDC) (Ecuación 9):

$$PT = SE - PSDC \quad \textit{(Ec. 9)}$$

Para caracterizar el producto de interés, se realizaron mediciones físicas a la semilla de zapallo, tomando en cuenta que, para la extracción del aceite, la semilla debe estar seca y descascarillada, debido a que al emplearse semilla con cascarilla, el aceite se retiene mayormente en el sólido (Kipping et al., 2018), así como evitar obstrucciones durante la extracción, por lo tanto se optó por retirar este componente.

3.3.2. Acondicionamiento de las semillas.

Las semillas limpias se llevaron a secado por convección natural y exposición solar durante 4 días y se almacenaron en bolsas herméticas. El control del secado se realizó tomando muestras aleatoriamente en las bandejas de secado, por cada día de exposición y pesándolas en una balanza de humedad Adam PMB53.

Empleando pinzas de acero inoxidable se retiró la testa de las semillas, y tanto la almendra (semilla descascarillada), como la testa (o cascarilla), se almacenaron en bolsas resellables hasta su pesaje.

3.3.3. Caracterización física de las semillas.

Para realizar una caracterización física de las almendras (semilla descascarillada), se tomaron 50 unidades y se realizaron las siguientes mediciones (Sánchez-Salas et al., 2015):

- Dimensiones de la semilla. La longitud, la amplitud y espesor fueron medidos con un calibrador Vernier digital.
- Peso. Fue medido con una balanza analítica HRB 103 TREE LW Measurements, LLC.
- Diámetro equivalente (De). El promedio de diámetro de semilla y almendra se calculó usando el diámetro equivalente usando la siguiente ecuación (Ecuación 10) (Khodabakhshian, 2012):

$$\mathrm{De} = \mathrm{L}\left(\frac{(\mathrm{W}+\mathrm{T})^2}{4}\right)^{1/3} \qquad \textit{(Ec. 10)}$$

Donde;
L: longitud (mm)
W: amplitud (mm)
T: espesor (mm)

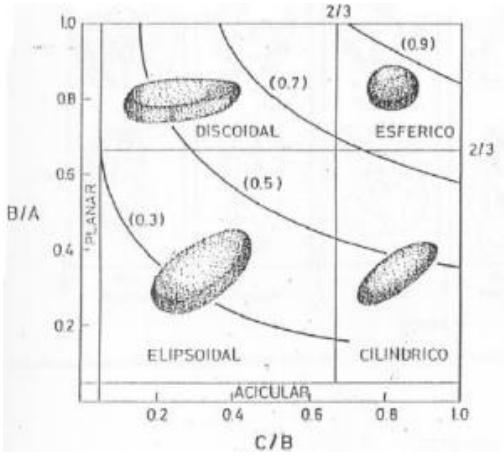
- Esfericidad: empleando la ecuación 11 (Bwade & Aliyu, 2012):

$$\emptyset = \frac{(\mathrm{L}*\mathrm{W}*\mathrm{T})^{0.33}}{\mathrm{L}} \qquad \textit{(Ec. 11)}$$

Donde;
L: longitud (mm)
W: amplitud (mm)
T: espesor (mm)

Para obtener la forma de la semilla, se genera una relación entre los ejes de la semilla: el eje mayor (a), el eje intermedio (b) y el eje menor (c), correspondientes a la longitud, amplitud y espesor de la semilla; de esta forma, la relación c/b y b/a, es posible determinar su geometría de acuerdo a cuatro clases (Figura 7) (Manayay Sánchez et al., 2015).

Figura 7. Clases de forma de granos



Fuente. (Manayay Sánchez et al., 2015)

- Densidad aparente de la semilla descascarillada. Se determinó usando una probeta de 250 mL y una balanza digital ADAM Core Balance. La probeta se llenó con semillas descascarilladas, de las que se conocía previamente su porcentaje de humedad; el exceso de semillas se eliminó deslizando una elemento recto a lo largo de los bordes de la probeta y se pesó en conjunto la semilla y la probeta. La densidad aparente se calculó utilizando la ecuación 12 (Bwade & Aliyu, 2012):

$$\rho = \frac{(g2 - g1)}{V} \qquad \textit{(Ec. 12)}$$

Donde;
ρ: densidad (g/mL)
g2: peso de la probeta + semilla (g)
g1: peso de la probeta vacía (g)
V: volumen de la probeta (mL)

- Análisis de la superficie de la semilla de zapallo por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM). La Microscopía Electrónica de Barrido es una técnica no destructiva que utiliza una sonda de haz de electrones para analizar la superficie de las muestras hasta nanoescala. Los microscopios electrónicos de barrido producen imágenes de gran aumento con alta resolución, una característica que los convierte en herramientas adecuadas para una amplia gama de aplicaciones en numerosos campos de la ciencia y la industria. En el caso del caso del microscopio TESCAN VEGA3, cuenta con una fuente de electrones de filamento de tungsteno, tensión de aceleración de 200 V-30 kV, está equipado con un detector CL pancromático con un rango de longitud de onda de 185-850 nm, un detector SE de bajo vacío, un detector de electrones transmitidos y una cámara de TV IR para la visualización de la cámara y combina imágenes SEM con análisis de composición elemental en vivo en única ventana del software Essence™ de TESCAN (TESCAN ORSAY HOLDING, 2022a, 2022b; The University of Western Australia, 2022).

Para muestras no conductoras sin recubrir, el microscopio integra un Detector para bajo vacío -LVSTD- (*Low Vacuum Secondary Tescan Detector*) que da información topográfica de la muestra en bajo vacío. El detector de electrones retrodispersados -BSE- (Back-scattered Electrons) está disponible para los modos de alta y baja presión de y brinda información de composición (Tescan, 2013).

Se realizaron dos tipos de observación en la semilla de zapallo; en donde la primera observación se hizo superficialmente sobre la semilla con cascarilla, para identificar las estructuras externas, empleando un microscopio digital OEM 1000x, mientras que para la superficie de la semilla descascarillada se empleó un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) TESCAN VEGA3.

El procedimiento para la preparación y uso de la muestra y el equipo se describe a continuación:

- Se midió el porcentaje de humedad a la semilla descascarillada, empleando muestras con un porcentaje menor al 5%.
- Las muestras se adhirieron a los platos de porta-muestras con cinta de carbono.
- De forma paralela se realizó un despresurizado de la cabina de observación.
- Con la cámara despresurizada, los porta-muestras se ubicaron en la cabina y se realizó su cerrado.
- Se procedió a realizar vacío en el interior de la cabina hasta 1.8 $x10^{-3}$ Pa.
- Una vez generado el vacío, se encendió del filamento con un voltaje de 5 kV.
- Con los parámetros generados, fue posible iniciar la visualización de la superficie.

3.3.4. Objetivo específico 2. Seleccionar y aplicar la técnica de extracción para obtener el aceite de la semilla de zapallo

La elección del método de extracción y los criterios de evaluación asociados a estos se realizó tomando en cuenta aquellos reportados en la bibliografía (Alirezapour et al., 2020;

Chemat et al., 2017; Jiao et al., 2014; Juárez Rafael et al., 2016; Mitra et al., 2009; Murkovic et al., 2004; Pantano Ladino & Urrego Roldán, 2018; Saavedra et al., 2015; Siger et al., 2017; Wroniak, Malgorzata; Rekas, Agnieszka; Siger, Aleksander; Janowics, 2016), con esa base se eligieron aquellos que pudieran ser ejecutados en las instalaciones de Tecnoparque nodo Popayán y la Facultad de Ciencias Agrarias.

A partir de la información recopilada se eligieron como métodos de extracción: mecánico por tornillo sin fin, solventes empleando éter de petróleo y ultrasonido; también se tomaron como criterios de evaluación de los métodos los relacionados con el Rendimiento de extracción, Calidad del aceite extraído y Costo de extracción.

Para el análisis de métodos y criterios se empleó como herramienta de decisión el Proceso Analítico Jerárquico (*AHP*, por sus siglas en inglés), debido a que es uno de los muchos métodos disponibles para resolver problemas de decisión de criterios múltiples y la preferencia individual se expresa en una escala verbal y luego se convierte en un valor numérico para calcular las prioridades; generalmente, la tabla de conversión la decide *a priori* el analista (Meesariganda & Ishizaka, 2017).

Tomando en cuenta escalas reportadas (Meesariganda & Ishizaka, 2017; Teknomo, 2006), se designaron los rangos de importancia como se describe a continuación, lo que permitió crear una matriz de comparación (Tabla 5), indicando el criterio a evaluar para los tres métodos:

- Poco o nada importante: 0-3
- Medianamente importante: 4-6
- Sumamente importante: 7-9

Tabla 5. Modelo de matriz de comparación de métodos de extracción

CRITERIO: _____							
	Mecánica	**Solventes**	**Ultrasonido**	**Matriz Normalizada**			**Vector Promedio**
Mecánica	**1**						
Solventes		**1**					
Ultrasonido			**1**				
SUMA							

Tomando en cuenta los valores para la asignación de importancia entre los métodos, y su ubicación respectiva, se generó la matriz normalizada, en donde se inserta el valor correspondiente al cociente entre el puntaje en importancia y la suma por cada método.

Luego, se realizó el cálculo del vector promedio, promediando los valores de la matriz normalizada, por cada fila o método, de tal forma que el compendio de los hallazgos para cada uno los métodos de extracción se consolidó en una tabla de resultados para los vectores promedio (Tabla 6), con el que se determinó el método de extracción del aceite de semilla descascarillada de zapallo variedad bolo verde.

Tabla 6. Ponderación de los vectores promedio

RESULTADOS VECTORES PROMEDIO				
	Rendimiento	**Calidad**	**Costo**	**Total**
Mecánica				
Solvente				
Ultrasonido				
Ponderación				

Posteriormente, el proceso de asignación de valores y la obtención de la matriz normalizada y el vector promedio, se repitió para generar la matriz de comparación por pares para los criterios Rendimiento, Calidad y Costo, adicionando tres cálculos (Tabla 7): la verificación de consistencia, multiplicando el vector promedio por cada uno de los valores en las asignaciones, el Total de consistencia de pesos, logrado a través de la suma por filas del Total de consistencia de pesos y la Relación de pesos, a partir del cociente entre el Total de consistencia en pesos y el Vector Promedio.

Tabla 7. Matriz de comparación por pares para criterios

Matriz de comparación por pares							
	Rendimiento	**Calidad**	**Costo**	**Matriz Normalizada**			**Vector Promedio**
Rendimiento	**1**						
Calidad		**1**					
Costo			**1**				
Suma							

Matriz de comparación por pares (continuación)				
Verificación de consistencia			**Total consistencia de pesos**	**Relación de pesos**

Al ser tres la cantidad de criterios evaluados, se asignó este valor a la variable “n” y finalmente, se verificó el proceso a través del cálculo de λ máximo, el Índice de consistencia y la relación de consistencia, obtenidos como se indica a continuación: λ máximo se calculó empleando el promedio de la relación de pesos y se comparó con el valor n.

El Índice de Consistencia se obtuvo a través de la expresión: $\frac{\lambda - n}{n-1}$

Por último, la Relación de consistencia se generó a partir de la función de Excel “BUSCARV”, de esta forma =$valor del Índice de consistencia$/BUSCARV(n;index4;2;FALSO).

Una Relación de Consistencia positiva indicó que los valores dados fueron aceptables, de lo contrario, se requeriría de una revisión y reasignación.

3.3.5. Sistema de extracción

Se empleó un sistema de extractor mecánico con las siguientes características:

- Motor eléctrico SEMCO YC90S-4 de 110-220V, 60Hz, 1 HP, 0.75 kW y 557 rpm.
- Sistema de transmisión por poleas de 12” y 14”.
- Tornillo de 22 cm de largo y 4 cm de amplitud.
- Barril de diámetro interno 4,5 cm, profundidad 20 cm.
- Calentamiento por resistencia de banda de 100 W, sistema de encendido ON/OFF, controlado por un Arduino Nano y en sensor PT100 con módulo MAX31865.

Para el control de temperatura se generó un código en el software Arduino para controlar las temperaturas de extracción propuestas (60, 120 y 180°C) y se definió una tolerancia de ± 2°C para cada una de ellas. El incremento de la temperatura en la resistencia es proporcional al paso de la corriente a través de esta, que se restringe mediante un relé cuando el sensor PT100 envía una señal hacia el módulo de control. Cuando el sensor registra un valor inferior al rango definido, el relé cambia de estado para permitir el paso de corriente, que incremente la temperatura.

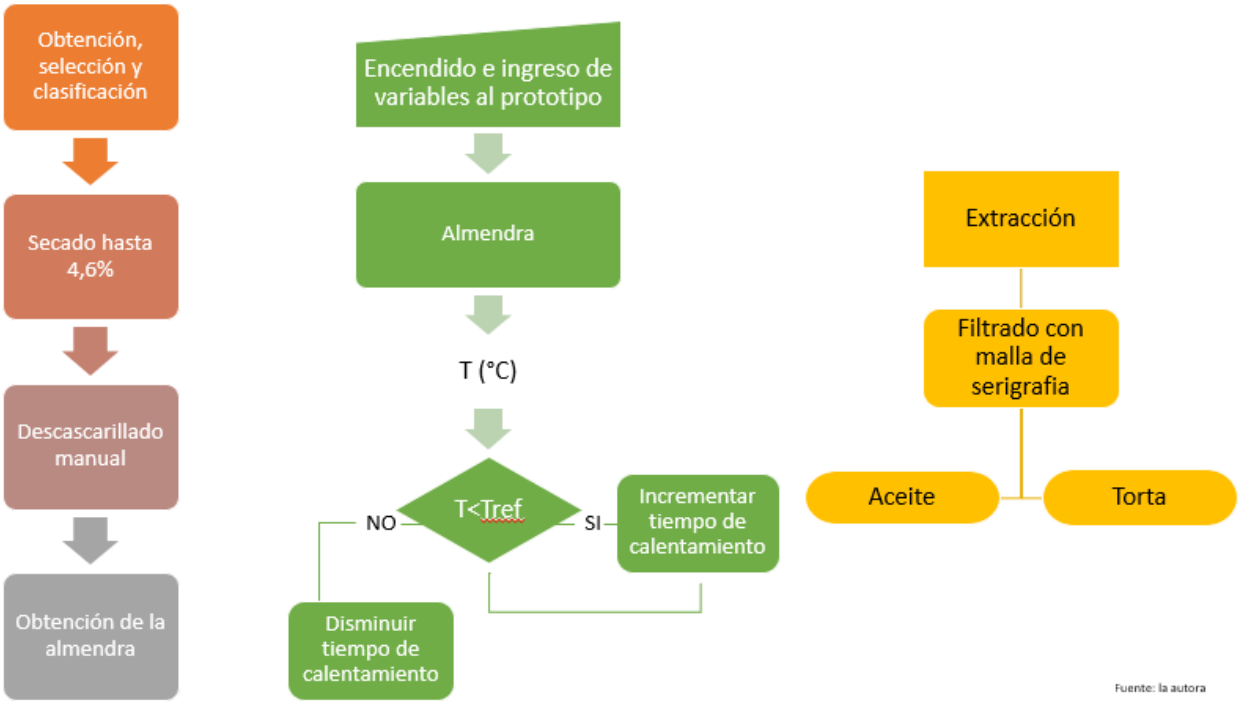
3.3.6. Obtención del aceite

Se determinó una secuencia de operaciones requeridas para la obtención del aceite de semilla de zapallo (Figura 8), que inició con la obtención y acondicionamiento de la semilla, continuaron con el ajuste de condiciones de operación del sistema, hasta la obtención de dos productos finales: el aceite y la torta.

El proceso de obtención del aceite dio inicio con el pesaje de 60 g de semilla descascarillada para cada prueba, a los que se aplicó un pretratamiento según el diseño experimental propuesto. Al mismo tiempo, se realizó el ajuste del código en Arduino para

la temperatura requerida de calefacción según diseño y el calentamiento de la resistencia hasta llegar al valor indicado según cada tratamiento (60, 120 o 180°C), con base en bibliografía consultada.

Figura 8. Metodología de extracción de aceite de semilla de zapallo



Fuente. La autora

Cuando se alcanzó la temperatura requerida del tratamiento, se alimentó por tolva el sistema y se extrajo el aceite contenido en las semillas de zapallo, que se filtró en malla de serigrafía de 180 micras antes de ser depositado en tubos Falcon de 10 mL. Posteriormente, el aceite se dejó decantar durante 24 h bajo refrigeración y luego fue centrifugado por 20 minutos a 6000 rpm en una centrífuga Hettich EBA 200.

3.3.7. OBJETIVO ESPECÍFICO 3. CARACTERIZAR PARCIALMENTE EL ACEITE DE SEMILLA DE ZAPALLO PARA EVALUAR SU CALIDAD Y ESTABILIDAD OXIDATIVA

Con base en referencias bibliográficas, se tomaron tres temperaturas diferentes tanto de calentamiento del equipo (P) como de pre-tratamiento para las semillas (T), tal como se describen en la (Tabla 8), sin embargo, tras estudios preliminares, se realizó la aplicación de un diseño factorial 2^2 por triplicado para cada tratamiento, en donde el tratamiento P1T1 (60°C – Semillas sin precalentar) no hizo parte de la ejecución del diseño experimental. Los resultados obtenidos y el análisis estadístico fueron ejecutados en el software GraphPad v.8 con un nivel de confianza de 95%.

Tabla 8. Diseño experimental

Factor	Nivel	Codificación	Variables de respuesta
Temperatura del barril (°C)	60 120 180	P1 P2 P3	• Densidad • Índice de acidez • Índice de peróxido • Índice de yodo • Índice de saponificación • Estabilidad oxidativa (tiempo de inducción)
Pretratamiento de la semilla descascarillada	Sin precalentar 120°C/5 min 155°C/5 min	T1 T2 T3	

Las temperaturas aplicadas fueron de 60°C, 120°C y 180°C para facilitar el flujo del aceite en el barril sin que se llegara a su descomposición; estas temperaturas se tomaron con base en las aplicadas por diversos autores para sus estudios (Aktaş et al., 2018; Heriawan et al., 2018; Martínez et al., 2012; Mosquera-Artamonov et al., 2016; Nwokocha & Adegbuyiro, 2017).

El pretratamiento aplicado sobre las semillas consistió en un grupo de semillas sin precalentamiento y dos grupos sobre los que se aplicó un calentamiento previo a su procesamiento en el sistema, realizado con una freidora de aire Hyundai 1.8 L a temperaturas y tiempos de 120°C/5 min y 155°/5 min, debido a que las referencias bibliográficas indican que el incremento en la temperatura sobre las semillas facilita la circulación del aceite en el sólido (P. Li et al., 2016; Murkovic et al., 2004; Potočnik et al., 2018)**.**

3.3.8. Pruebas de calidad del aceite

Las variables de respuesta fueron el rendimiento del proceso, representado en el porcentaje de aceite obtenido y los criterios de calidad del aceite (densidad, índice de acidez, índice de peróxido, índice de yodo, índice de saponificación y estabilidad a la oxidación), evaluados según las Normas Técnicas Colombianas y las normas de la American Oil Chemists' Society (AOCS) (Ayala Ramírez, 2011; Hayqui Betancurt, 2016), siguiendo los lineamiento de las guías suministradas por el Grupo de Investigación ASUBAGROIN y que pueden ser consultadas en el Anexo 1.

3.3.9. Prueba de estabilidad oxidativa

Se empleó el Rancimat 892 (Metrohm) y la metodología descrita por el fabricante (Metrohm USA Inc, 2019), utilizando 3,0 ± 0,1 g de aceite por cada muestra de ensayo, 60 mL de agua desionizada, un flujo de aire purificado de 20 L/h y con temperatura de calentamiento 120°C, para determinar el tiempo de inducción en las muestras de aceite por cada tratamiento, por duplicado.

4. RESULTADOS

4.1. OBJETIVO ESPECÍFICO 1. ESTIMAR LA CANTIDAD DE SEMILLA DE ZAPALLO DISPONIBLE EN EL DEPARTAMENTO DEL CAUCA PARA LA EXTRACCIÓN DE ACEITE

Se presentan las expresiones matemáticas empleadas para estimar las semillas disponibles y la cantidad aproximada de aceite a obtener, con base en los datos reportados por el Ministerio de Agricultura en la plataforma AGRONET, para el año 2020. Con la Ecuación 1, se determinó la cantidad de zapallo anual en el Departamento del Cauca.

PDZ: producción de zapallo anual en el Departamento del Cauca (kg)
PZ: peso promedio de un zapallo (kg)
TZ: cantidad total de zapallos producidos en un año en el Departamento del Cauca (ud)

$$TZ = \frac{PDZ}{PZ} \qquad \textit{(Ec. 12)}$$

$$TZ = \frac{2'375.000\ kg}{4.23\ kg} = 561.466\ zapallos$$

Se obtuvo un peso promedio de la semilla descascarillada, tomando como muestra 100 semillas descascarilladas (PSDC), obteniéndose un valor medio de 0,00011 kg.

PS: peso total de semillas (kg)
%S: porcentaje promedio de semillas en el fruto (%)

$$PS = PZ * \%S \qquad \textit{(Ec. 13)}$$

$$PS = 4{,}23\ kg * 6\% = 0{,}2538\ kg\ de\ semilla$$

La cantidad de semillas por fruto, se determinó con la Ecuación 3:

CS: cantidad aproximada de semilla por zapallo (ud)
PSDC: peso promedio de semillas descascarilladas (kg)

$$CS = \frac{PS}{PSDC} \qquad \textit{(Ec. 14)}$$

$$CS = \frac{0{,}2538\ kg}{0{,}00011\ kg} = 2.307\ semillas\ por\ zapallo$$

La cantidad de semillas en el Cauca para 2020 (CSC), se estimó empleando la relación:

$$CSC = TZ * CS \quad \textit{(Ec. 15)}$$

$$CSC = 561.466 * 2.307 = 1.295'454.545\ semillas$$

Semillas disponibles (PSD)

$$PSD = CSC * PSDC \quad \textit{(Ec. 16)}$$

$$PSD = 1.295'454.545 * 0{,}00011 = 142.500\ kg\ de\ semilla$$

Semilla aprovechable (CSA)

$$CSA = PSD * \%SA \quad \textit{(Ec. 17)}$$

$$CSA = 142.500\ kg * 40\% = 57.000\ kg\ de\ semilla$$

Cantidad de aceite extraído

$$PA = CSA * 35\% \quad \textit{(Ec. 18)}$$

$$PA = CSA * 45\% \quad \textit{(Ec. 19)}$$

$$PA = 57.000\ kg * 35\% = 19.950\ kg\ de\ aceite$$

$$PA = 57.000\ kg * 45\% = 25.650\ kg\ de\ aceite$$

En cuanto al porcentaje en peso de la testa de la semilla del zapallo (PT), se obtuvo en promedio, el peso de la testa representa el 41,9% del peso de la semilla completa.

4.1.1. Acondicionamiento de las semillas

Para disminuir la posibilidad de crecimiento fúngico, las semillas se dispusieron para secado solar en bandejas de poliestireno expandido (icopor) entre dos láminas de policarbonato (Figura 9), con ventilación e irradiancia naturales, con incidencia directa desde las 11:00 am hasta las 5:00 pm, durante 4 sesiones de secado, hasta que su humedad fue de 4,6%; posterior a cada sesión, se almacenaron en bolsas resellables para evitar la absorción de humedad del aire.

Figura 9. Secado solar de semillas de zapallo

Fuente. La autora

Para las extracción de aceite se emplearon semillas descascarilladas manualmente (Figura 10) para los tratamientos, debido a que la testa retiene el aceite y dificulta el avance de los sólidos hacia la boquilla.

Figura 10. Semillas descascarilladas

Fuente. La autora

4.1.2. Caracterización física de las semillas: tamaño y forma

Tomando como referencia 50 unidades de semilla descascarillada, se obtuvieron como dimensiones promedio: 13,26 mm de longitud, 7,18 mm de amplitud y 2,10 mm de

espesor, así como un diámetro equivalente de 36,92 mm, esfericidad de 0,433 y densidad aparente de 0,73 g/mL.
Con relación a la geometría de la semilla, se obtuvo un valor promedio para relación *c/b* de 0,294 ± 0,05 y una relación *b/a* de 0,546 ± 0,07 (Tabla 9), con lo que se clasifica la semilla como de clase elipsoidal (Manayay Sánchez *et al.*, 2015).

Tabla 9. Valores promedio para la caracterización física

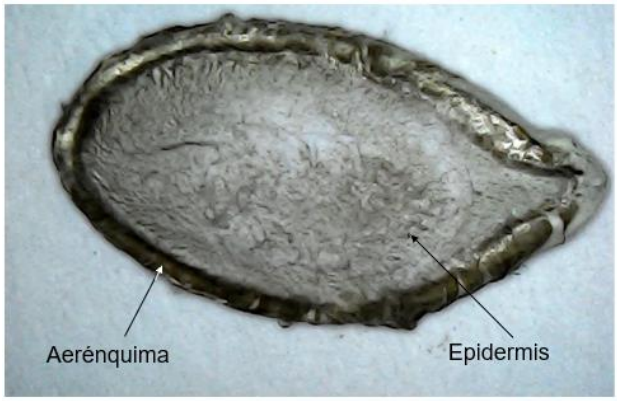
Promedio	
Longitud (mm)	13,26 ± 1,29
Amplitud (mm)	7,18 ± 0,68
Espesor (mm)	2,09 ± 0,34
Diámetro equivalente (mm)	36,92 ± 4,52
Esfericidad (f)	0,43 ± 0,04
Relación c/b	0,29 ± 0,05
Relación b/a	0,55 ± 0,07
Peso con testa (g)	0,16 ± 0,18
Peso sin testa (g)	0,11 ± 0,03

Fuente. La autora

4.1.2.1 Análisis de la superficie de la semilla por Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)

Las características visuales de la semilla con cáscara se visualizaron con un microscopio digital OEM 1000x (Figura 11) donde se observó que la epidermis es ligeramente rugosa y experimentalmente se determinó que la aerénquima (Murovec et al., 2012) mide máximo 1 mm de amplitud.

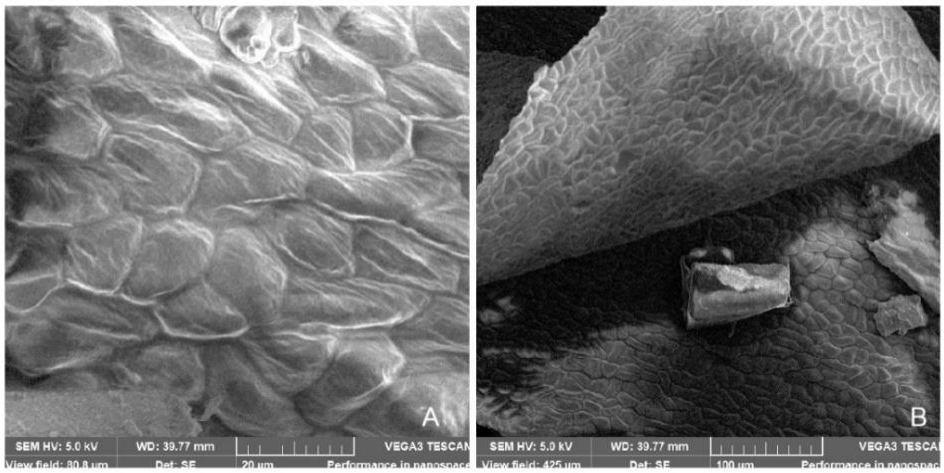
Figura 11. Observación microscópica de la superficie de la semilla del zapallo con cáscara



Fuente. La autora

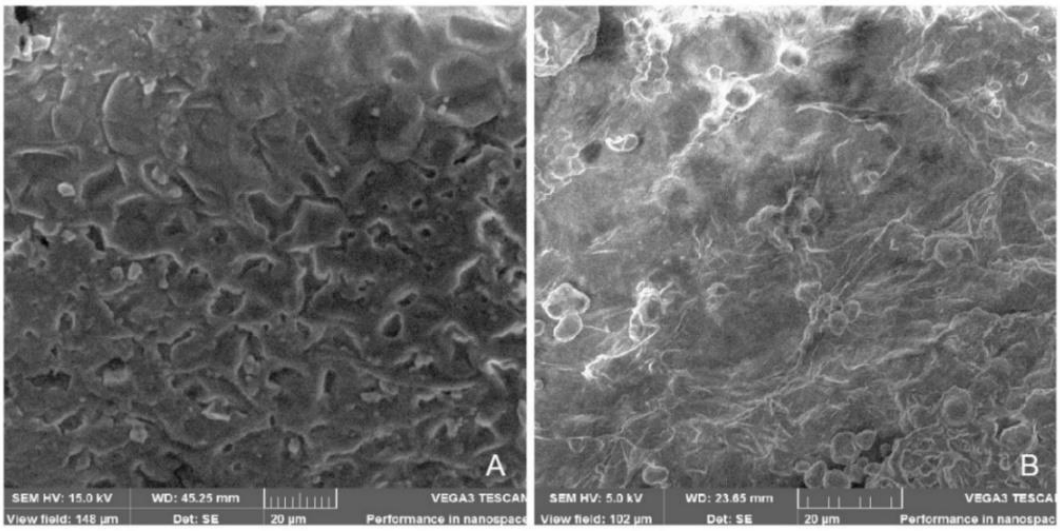
Se realizó la observación de la superficie de la semilla de zapallo descascarillada y seca a humedad del 2,22%, empleando un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) TESCAN VEGA3 a través de un corte longitudinal en la zona central (Figura 12), con aumento hasta 77x y energía de 5 kV.

Figura 12. A y B: imágenes de la epidermis a través del SEM



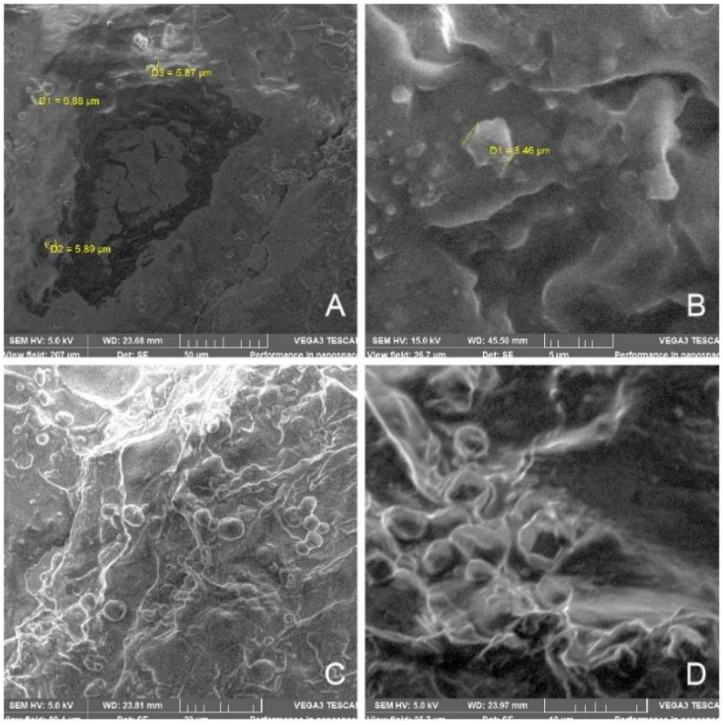
Es posible asociar las estructuras observadas a la epidermis y el cotiledón de las semillas descascarilladas de zapallo, aspectos que son coincidentes con los encontrados para *Cucurbita pepo* (Murovec et al., 2012).

Figura 13. Epidermis de semilla descascarillada de zapallo con acercamiento a: A. 45 mm; B. 23 mm.



Las estructuras globulares encontradas (Figura 14 A y B) tienen un diámetro entre 3,46 y 6,88 µm, correspondientes a glóbulos de almidón (Brent Loy, 2000), como es posible observar en la Figura 14 C y D.

Figura 14. Visualización de estructuras y dimensiones



La visualización de las estructuras contribuye al conocimiento de las características físicas de la semilla de zapallo variedad bolo verde, que permitan indagar su relación con los métodos de extracción de aceite.

4.2. OBJETIVO ESPECÍFICO 2. SELECCIONAR Y APLICAR LA TÉCNICA DE EXTRACCIÓN PARA OBTENER EL ACEITE DE LA SEMILLA DE ZAPALLO

A través de la herramienta AHP, se analizó la importancia de los criterios Rendimiento de extracción, Costo de extracción y Calidad del aceite extraído, como factores de evaluación de los posibles métodos de extracción del aceite.

En el procedimiento de prensado expeller las materias primas se exprimen a alta presión, ya sea en un solo paso o en lotes y el sistema está comúnmente equipado con un dispositivo de control de temperatura para evitar cualquier daño al aceite que pueda afectar sus propiedades (Mosquera-Artamonov et al., 2016).

En la Tabla 10, el 71,1% indica la favorabilidad del método de extracción mecánica, para la evaluación del criterio Rendimiento.

Tabla 10. Matriz de comparación por pares para Rendimiento

CRITERIO 1: RENDIMIENTO							
	Mecánica	Solventes	Ultrasonido	Matriz Normalizada			Vector Promedio
Mecánica	1	3,00	5,00	0,65	0,69	0,79	71,1%
Solventes	0,33	1	0,33	0,22	0,23	0,05	16,7%
Ultrasonido	0,20	0,33	1	0,13	0,08	0,16	12,2%
SUMA	1,53	4,33	6,33				

En este proceso se genera la rotura de la pared celular, extrayéndose valores cercanos o superiores al 70% del aceite contenido en las semillas (Sicaire et al., 2016), se ha reportado incluso hasta del 2% de aceite residual en la torta (Guzmán Brito & Rojas Pacheco, 2016); de esta forma, se obtienen diferentes rendimientos al generar variaciones en la configuración del tornillo, temperaturas aplicadas y velocidad de giro (rpm) del husillo (Ruiz Carreño, 2021).

Posteriormente, se evaluó el criterio Calidad del aceite extraído (Tabla 11), en relación a los diferentes métodos de obtención, de esta forma, la matriz arroja como resultado que la mejor calidad se obtiene empleando la extracción por ultrasonido, con un 51,7% de favorabilidad respecto de los otros; múltiples autores indican que el beneficio en el uso de ultrasonido radica en la preservación de proteínas, ácidos grasos, compuestos fenólicos, tocoferoles, así como de sus propiedades nutricionales, fisicoquímicas y sensoriales e incluso disminuir la huella de carbono (Chemat et al., 2017; Koubaa et al., 2016), su limpieza y calidad del producto (Sicaire et al., 2016), además de la reducción en los tiempos de extracción mientras que se incrementa el rendimiento (Hernández-Santos et al., 2016).

Tabla 11. Matriz de comparación por pares para Calidad

CRITERIO 2: CALIDAD							
	Mecánica	Solventes	Ultrasonido	Matriz Normalizada			Vector Promedio
Mecánica	1	0,50	0,40	0,18	0,14	0,21	17,8%
Solventes	2,00	1	0,50	0,36	0,29	0,26	30,4%
Ultrasonido	2,50	2,00	1	0,45	0,57	0,53	51,7%
SUMA	5,5	3,50	1,9				

Adicionalmente, fue analizado el criterio de Costo (Tabla 12), relacionado con el valor que conlleva la implementación de cada uno de los métodos, en donde la matriz AHP arrojó que los menores costos están ligados a la extracción mecánica con tornillo sin fin, en comparación con la extracción por solventes y ultrasonido.

Tabla 12. Matriz de comparación para Costo

CRITERIO 3: COSTO							
	Mecánica	Solventes	Ultrasonido	Matriz Normalizada			Vector Promedio
Mecánica	1	5,00	7,00	0,74	0,77	0,70	73,8%
Solventes	0,20	1	2,00	0,15	0,15	0,20	16,8%
Ultrasonido	0,14	0,50	1	0,11	0,08	0,10	9,4%
SUMA	1,34	6,50	10,00				

Se ha reportado que el proceso de extracción mecánica de aceite tiene menores costo de operación e impacto ecológico que un proceso de extracción química (Heriawan et al., 2018; Idárraga Vélez, 2015); es posible generar una comparación por ejemplo, con la extracción por solventes, donde se indica que es un proceso de alto costo debido al uso de solventes y alta temperatura, lo que hace que su uso sea mayormente a nivel de laboratorio (Mosquera-Artamonov et al., 2016).

Con base en las matrices anteriores se generó la tabla de resultados de los Vectores Promedio (Tabla 13), que indicó que, la favorabilidad de la extracción mecánica es del 37,9%, seguido por el empleo de ultrasonido con 36,7% y la extracción con solventes orgánicos de 25,4%, por lo que se seleccionó la extracción mecánica por tornillo sin fin como método a implementar.

Tabla 13. Resultado de los Vectores Promedio para los criterios

RESULTADOS VECTORES PROMEDIO				
	Rendimiento	Calidad	Costo	Total
Mecánica	0,71	0,18	0,74	37,9%
Solvente	0,17	0,30	0,17	25,4%
Ultrasonido	0,12	0,52	0,09	36,7%
Ponderación	0,19	0,63	0,17	

Habiéndose seleccionado el método de extracción (mecánico), se realizó nuevamente una matriz de AHP, a través de la comparación por pares, para los criterios de Rendimiento, Calidad y Costo asociados a este, de tal forma que se tuviera claridad sobre la importancia de los criterios en la ejecución del proceso (Tabla 14); para ello se

realizaron los cálculos relacionados con la Verificación de Consistencia, Total de Consistencia de Pesos y la Relación de pesos.

Tabla 14. Matriz de comparación por pares para los criterios del método de extracción mecánica

Matriz de comparación por pares - CRITERIOS							
	Rendimiento	Calidad	Costo	Matriz Normalizada			Vector Promedio
Rendimiento	1	0,3	1,0	0,20	0,21	0,17	0,19
Calidad	3,0	1	4,0	0,60	0,63	0,67	0,63
Costo	1,0	0,3	1	0,20	0,158	0,17	0,17
Total	5,00	1,58	6,00				

Matriz de comparación por pares (continuación)				
Verificación de consistencia			Total consistencia de pesos	Relación de pesos
0,19	0,21	0,17	0,58	3,0051
0,58	0,63	0,70	1,91	3,0176
0,19	0,16	0,17	0,53	3,0050

Con los valores obtenidos y en aras de verificar que en la matriz se hubieran designado correctamente los parámetros, se realizó la revisión de Consistencia, a partir de un valor de n de tres (3) y los cálculos de λ máximo, Índice y Relación de Consistencia (Tabla 15).

Tabla 15. Determinación de Consistencia

n	λ máximo	Índice de Consistencia	Relación de consistencia
3	3,0092	0,00461	0,00794

Finalmente, la relación positiva de la Relación de consistencia dio paso al desarrollo del diseño experimental propuesto, con el que se extrajo el aceite de la semilla de zapallo descascarillada y sobre el cual se realizaron las pruebas para evaluar su calidad.

4.3. OBJETIVO ESPECÍFICO 3. CARACTERIZAR PARCIALMENTE EL ACEITE DE SEMILLA DE ZAPALLO PARA EVALUAR SU CALIDAD Y ESTABILIDAD OXIDATIVA

Durante la aplicación de los tratamientos propuestos, se determinó que el programa de extracción P1, equivalente a un calentamiento del sistema de 60°C, requería de aproximadamente 1h para la extracción de 2 mL, 4 h para obtener 6 mL, finalizando con

7h para 8 mL, requiriendo de un aproximado de 16 repasos del sólido para extraer la mayor cantidad de aceite posible. Bajo estas condiciones ocurrieron atascos en el equipo por cada repaso realizado, incrementando el tiempo de proceso, dado que, para liberar las obstrucciones, se debía desensamblar el sistema, reducir el sólido para su reprocesamiento por medio de una fuerza externa (martillo) y nuevamente ensamblar; por estas razones, se declinó el uso de los tratamientos P1 (60°C) asociados a los tratamientos T1 (semillas sin precalentar), T2 (calentamiento a 120°C y 5 minutos) y T3 (calentamiento a 155°C y 5 minutos).

En promedio, de una muestra de 60 g de semilla descascarillada, fue posible extraer 18 mL de aceite, donde la mayoría de los sólidos fueron retenidos por la malla de filtrado y posteriormente fueron completamente separados por centrifugación (Figura 15).

Figura 15. Extracción (A) y aceite centrifugado (B)

Fuente. La autora

Con base en lo anterior y en relación con el tiempo de extracción, se cuantificó el tiempo que tomaba la extracción para cada uno de los tratamientos y se obtuvo que, en promedio, el programa P2 (120°C) requirió de 40 minutos para la extracción de 10 mL en el primer paso de las semillas descascarilladas y de 2 h 10 minutos para extraer el aceite restante en el sólido, mientras que para el programa P3 (180°C) se emplearon 30 minutos en promedio para obtener 13 mL de aceite y 1 h 15 minutos para extraer el aceite remanente.

En cuanto a las características sensoriales (color y olor) el aceite tuvo las siguientes particularidades: el color varió en función de la temperatura aplicada tanto al pretratamiento a las semillas como al sistema de extracción, ubicándose en la gama de

colores entre color amarillo claro (P1T1), tonalidades ámbar (P2 T2) hasta llegar al marrón oscuro (P3T3) (Figura 16).

Figura 16. Variaciones de color del aceite extraído

Fuente. La autora.

Con respecto al olor, se presentaron cambios según el tratamiento térmico aplicado, en donde una mayor temperatura aplicada generó algunos similares a frutos secos como nueces o maní (Tabla 16).

Tabla 16. Características de color y olor del aceite extraído

Tratamiento	Color	Olor
P2 T1	Amarillo	Olor poco perceptible y con tendencia a dulce
P2 T2	Ámbar	
P2 T3		Con tendencia a dulce, similar a las nueces
P3 T1	Marrón oscuro	
P3 T2		Similar a maní tostado
P3 T3		

Fuente. La autora

4.3.1. Rendimiento

Se obtuvo un rendimiento promedio de extracción de 21,06% para 60 g de muestra, siendo un valor más bajo que el obtenido a través de prensado en frío de 22,13%, obtenido por Artica M *et al.* (2016) para semillas de zapallo molidas y tamizadas. Es posible determinar que la diferencia en el rendimiento se deba a la fuerza a la que se vieron sometidas las semillas, siendo mayor en el procesamiento en frío.

Adicionalmente, se realizaron, por triplicado las pruebas calidad para la determinación de la densidad, los índices de acidez, peróxido, saponificación, yodo (Tabla 17), y la evaluación del tiempo de inducción (estabilidad oxidativa) por duplicado (Tabla 24).

Tabla 17. Resultados pruebas de caracterización

TRATAMIENTO		PRUEBA				
Código	**Valores**	**Densidad (g/mL)**	**Índice acidez (mg de KOH/g)**	**Índice peróxido (meq O2/Kg)**	**Índice yodo (g/100g)**	**Índice saponificación (mg KOH/g)**
P2 T1	120°C - CRD	0,83	5,39	6,59	127,51	177,28
		0,80	5,10	6,96	127,05	171,45
		0,83	5,19	6,79	132,56	173,60
	Promedio	0,82	5,23	6,78	129,04	174,11
	Desviación	0,02	0,15	0,19	3,06	2,95
P2 T2	120°C - 120°C/5"	0,85	1,40	7,39	121,00	186,21
		0,87	2,20	7,39	124,92	180,30
		0,85	2,20	6,99	122,11	175,43
	Promedio	0,86	1,93	7,26	122,68	180,65
	Desviación	0,01	0,46	0,23	2,02	5,40
P2 T3	120°C - 155°C 5"	0,83	3,50	10,56	132,56*	192,69
		0,83	3,90	7,97	126,12*	184,81
		0,85	3,59	7,79	122,66*	194,67
	Promedio	0,84	3,66	8,77	127,11	190,72
	Desviación	0,01	0,21	1,55	5,02	5,22
P3 T1	180°C - CRD	0,83	0,70	4,40	111,32	157,24
		0,85	0,70	5,78	119,97	123,33
		0,83	0,80	2,40	111,10	142,39
	Promedio	0,84	0,73	4,19	114,13	140,99
	Desviación	0,01	0,06	1,70	5,06	17,00
P3 T2	180°C - 120°C/5"	0,83	0,60	2,57	119,07	182,95
		0,87	0,40	2,38	122,05	175,49
		0,85	0,40	2,11	126,59	168,56
	Promedio	0,85	0,47	2,35	122,57	175,67
	Desviación	0,02	0,12	0,23	3,79	7,20
P3 T3	180°C - 155°C/5"	0,85	1,00	7,12	131,17	131,51
		0,85	0,70	6,97	129,96	84,54
		0,85	0,80	6,19	129,31	74,65
	Promedio	0,85	0,83	6,76	130,15	96,90
	Desviación	0,00	0,15	0,50	0,94	30,38
General	Promedio	0,84	2,14	6,02	124,28	159,84
	Desviación	0,02	1,76	2,27	6,15	34,26

Fuente: la autora

- CRD: semillas crudas o sin pretratamiento térmico en freidora de aire
- (*) muestras donde se presentó viraje de color tras la adición de la solución de almidón al 1%.

Los datos obtenidos para cada una de las pruebas fueron procesados en el software GraphPad Prism 8, aplicando un ANOVA y el análisis de comparaciones múltiples de Tukey.

4.3.2. Determinación de la densidad

Se obtuvo un aceite con densidad promedio 0,84 g/mL, que es inferior a los reportados por Artica y colaboradores (2016) de 0,916 g/mL y de 0,9175 g/mL de León-Velandia (2020); quien también realiza una comparación con un aceite comercial, de valor de 0,91 g/ml y 0,93 g/mL. En cuanto a la normativa colombiana, el valor obtenido es inferior al de cualquier otro de los aceites que se incluyen en la Resolución 2154 de 2012, en donde el límite inferior corresponde al aceite de palma (0,891 g/mL) (Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia, 2012).

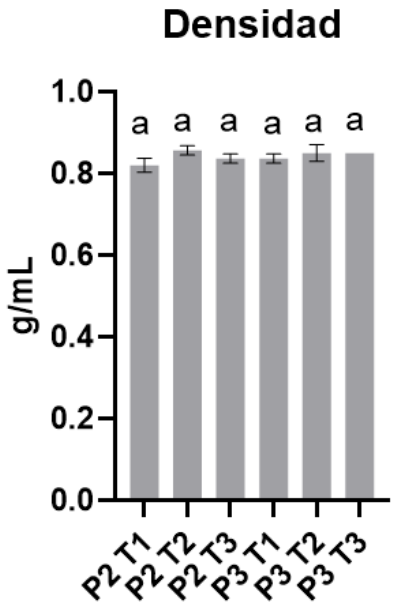
Las mediciones realizadas y analizadas en el software GraphPad Prism 8 (Tabla 18), con un nivel del confianza del 95%, indican que no hay diferencias significativas entre las interacciones de los factores Programa y Pretratamiento, con base en el *p-valor*.

Tabla 18. Análisis de varianza para densidad

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	0,003164	0,000633	2,89	0,062
Lineal	3	0,002600	0,000867	3,95	0,036
Programa	1	0,000282	0,000282	1,29	0,279
Pretratamiento	2	0,002318	0,001159	5,29	0,023
Interacciones de 2 términos	2	0,000564	0,000282	1,29	0,312
Programa*Pretratamiento	2	0,000564	0,000282	1,29	0,312
Error	12	0,002631	0,000219		
Total	17	0,005795			

Empleando la prueba de comparaciones múltiples de Tukey, fue posible establecer que esta no fue afectada por los tratamientos utilizados al no existir diferencias significativas entre ellos (Figura 17), indicando que no se presentaron modificaciones físicas en esta propiedad por la acción los pretratamientos a la semilla (T) o de las temperaturas de los programas (P) en el equipo.

Figura 17. Prueba de comparaciones múltiples de Tukey para densidad



4.3.3. Determinación del índice de acidez

El análisis de varianza para acidez (Tabla 19) permite establecer que el factor que tiene mayor influencia es el Programa previo a su procesamiento, con un valor de 725,47 para F-Fisher, sin embargo, como los p-valor son menores a 0,05, se indica diferencia significativa entre los factores principales y la interacción Figura 18.

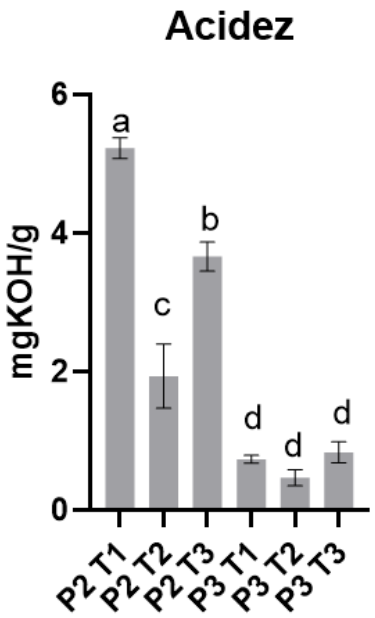
Tabla 19. Análisis de varianza para acidez

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	55,1100	11,0220	207,13	0,000
Lineal	3	48,2305	16,0768	302,12	0,000
Programa	1	38,6052	38,6052	725,47	0,000
Pretratamiento	2	9,6252	4,8126	90,44	0,000
Interacciones de 2 términos	2	6,8796	3,4398	64,64	0,000
Programa*Pretratamiento	2	6,8796	3,4398	64,64	0,000
Error	12	0,6386	0,0532		
Total	17	55,7486			

La prueba de comparaciones múltiples de Tukey para el índice de acidez permitió establecer que el factor con mayor incidencia sobre esta variable es el programa de calentamiento (P), donde la temperatura de 120°C generó diferencias significativas para

los valores de acidez, como se visualiza en la Figura 18, dado que en esta condición se requirió de un mayor número de repasos de la torta para extraer la misma cantidad de aceite que los programas P3, exponiendo por más tiempo la muestra a la temperatura y al oxígeno.

Figura 18. Prueba de comparaciones múltiples de Tukey para índice de acidez



Actualmente, no se encuentra descrita una normatividad nacional o internacional exclusiva para el aceite de semilla de zapallo, por lo tanto, se compararon los valores obtenidos con otros autores que hubieran extraído el aceite a condiciones iguales o semejantes a las ejecutadas en este proyecto (Tabla 20), así como los hallazgos de Potočnik y colaboradores (2018), para dos variedades de semilla diferente (*Gleisdorf* y *Rustikal*), pretratadas a diferentes temperaturas (110, 130 y 150°C).

Tabla 20. Índice de acidez reportados por diversos autores

Autor		**Índice de acidez reportado (mg de KOH/g)**
Presente trabajo		0,4 - 5,39 (± 0,2)
Ortiz y colaboradores (2019)		3,19 – 4,19
León Velandia (2020)		7,6
Rezig y colaboradores (2012)		7,54
	Var. *Gleisdorf*	(Sin tostar): 2,49

Potočnik y colaboradores (2018)		(110°C): 2,19 (130°C): 2,14 (150°C):2,45
	Var. *Rustikal*	(Sin tostar): 2,19 (110°C): 2,21 (130°C): 2,37 (150°C):2,59

Fuente. (León Velandia, 2020; Ortiz Grisales et al., 2009; Potocnik et al., 2018; Rezig et al., 2012)

4.3.4. Determinación del índice de peróxido

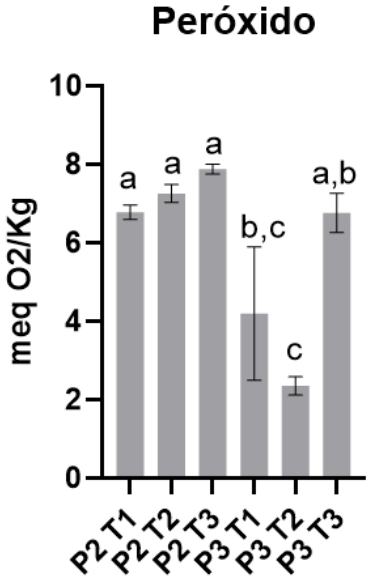
Es posible establecer que existen diferencias significativas entre los factores Programa y Pretratamiento, donde el factor que es más influyente sobre el índice de peróxidos es el programa de calentamiento del equipo con un valor F de 47,71 (Tabla 21).

Tabla 21. Análisis de varianza para peróxidos

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	81,095	16,2190	17,12	0,000
Lineal	3	74,058	24,6859	26,06	0,000
Programa	1	45,190	45,1897	47,71	0,000
Pretratamiento	2	28,868	14,4340	15,24	0,001
Interacciones de 2 términos	2	7,037	3,5187	3,71	0,056
Programa*Pretratamiento	2	7,037	3,5187	3,71	0,056
Error	12	11,367	0,9472		
Total	17	92,462			

Al generar la prueba de comparaciones múltiples de Tukey (Figura 19), se determinó que no existen diferencias significativas para los tratamientos del Programa de calentamiento P2 (120°C), sin embargo, si se presentaron para el Programa de calentamiento P3, posiblemente asociadas con el pretratamiento dado a la semilla previo a la extracción; de esta forma, el mayor índice de peróxido se presenta para P3T3, que tiene las temperaturas más altas de procesamiento, generando una disminución de la capacidad antioxidante del aceite al acelerarse los procesos de oxidación (Instruments, 2016; Potocnik et al., 2018).

Figura 19 Prueba de comparaciones múltiples de Tukey para índice de peróxido



La Resolución 2154 de 2012 indica que el índice de peróxido para aceites prensados en frío y vírgenes debe ser ≤ 20 meq O_2/Kg de aceite; por lo tanto, el aceite extraído cumple con este indicador de la normativa, puesto que los valores obtenidos se encuentran en un rango entre 2,11 - 7,97 (± 2,27) meq O_2/Kg, y entre los tratamientos realizados, el valor más bajo que se obtuvo fue el relacionado con P3T2, con 2,35 ± 0,2 meq O_2/Kg y el más elevado 8,77 ± 1,5 meq O_2/Kg correspondiente al tratamiento P2T3. Estos valores están en concordancia con la clasificación de aceite virgen para aceites en cuya obtención por prensado solo se haya aplicado calor (Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia, 2012). Los cambios en las cifras halladas están relacionados con la velocidad de los procesos oxidativos generados por las altas temperaturas y se debe considerar que algunos de los peróxidos detectados podrían ser efecto de la temperatura aplicada en los tratamientos o pertenecer a reacciones de peroxidación secundaria (Potocnik et al., 2018).

De otro lado, los valores obtenidos son superiores a los 2,83 meq O_2/Kg obtenidos por prensado en frío (Artica M *et al.*, 2016) y a los 2,33 meq O_2/Kg por extracción en frío (Rezig et al., 2012), y el efecto se podría atribuir al efecto de los repasos realizados al sólido para extraer la mayor cantidad de aceite y a efecto constante de la temperatura sobre el fluido.

4.3.5. Determinación del índice de yodo

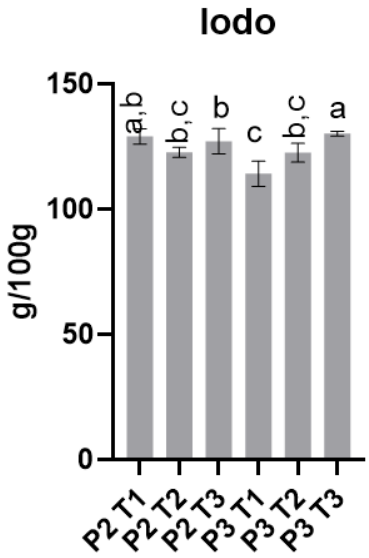
El análisis de varianza para el índice de yodo permite determinar con una confianza del 95%, que existen diferencias significativas entre el factor Programa y la temperatura de calentamiento del sistema y los pretratamientos aplicados (Tabla 22).

Tabla 22. Análisis de varianza para índice de yodo

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	520,85	104,17	7,86	0,002
Lineal	3	245,46	81,82	6,17	0,009
Programa	1	71,85	71,85	5,42	0,038
Pretratamiento	2	173,61	86,81	6,55	0,012
Interacciones de 2 términos	2	275,39	137,69	10,39	0,002
Programa*Pretratamiento	2	275,39	137,69	10,39	0,002
Error	12	159,09	13,26		
Total	17	679,94			

El índice de yodo obtenido se ubicó en un rango entre 74,65 - 194,67 (± 2,02) g I_2/100g en promedio, que lo clasifica como semisecante, ubicándolo en los rangos del aceite de canola, el aceite de girasol y el de aceite de girasol con contenido medio de ácido oleico. Este valor se encuentra en el rango obtenido por Ortiz de 97 a 132 g I_2/100g (Ortiz Grisales, 2012; Ortiz Grisales et al., 2009) para un aceite obtenido empleando el método Soxhlet e inferior al obtenido por Artica *et al*. (2016) de 137,46 g I_2/100 g para aceite prensado en frío. El hecho de que los valores obtenidos para el índice de yodo se encuentren entre 97 y 132 g I_2/100 g, indican presencia de ácidos grasos insaturados, lo que permite clasificarlo como semisecante o absorbente de oxígeno en presencia de aire (Ortiz Grisales *et al*., 2009).

Figura 20. Prueba de comparaciones múltiples de Tukey para índice de yodo



Bajo la prueba de comparaciones múltiples de Tukey para índice de yodo, se identificaron diferencias significativas entre los tratamientos (Figura 20), donde las principales desigualdades están dadas por el uso de dos programas de calentamiento del equipo (P2 = 120°C y P3 = 180°C), así como por el uso del pretratamiento de la semilla T1 (semilla cruda) y T2 (semilla precalentada a 120°C por 5 minutos), correspondiente a la semilla cruda.

Potočnik y colaboradores (2018) encontraron diversos valores para el índice de yodo según dos variedades de semilla de zapallo y los tratamientos aplicados a éstas, de tal forma que, para la variedad Gleisdof sin tostar, su valor fue de 155 g I_2/100g, mientras que para las semillas tostadas a 110, 130 y 150°C sus valores fueron de 109, 100 y 90 g I_2/100g, respectivamente, adicionalmente, para las semillas de la variedad Rustikal, el índice de yodo para las semillas sin tratamiento térmico fue de 146 g I_2/100g, mientras que para las semillas tostadas a 110, 130 y 150°C, se obtuvieron valores de 102, 96 y 89 g I_2/100g, respectivamente. Estos valores contrastan con los obtenidos en la presente investigación, en donde, a mayor temperatura no se disminuye el índice de yodo, lo que podría indicar que los tratamientos aplicados no afectan en alta medida los ácidos grasos insaturados y podría ser utilizado con fines alimentarios (Lemus-Mondaca et al., 2019; Rezig et al., 2012).

4.3.6. Determinación de índice de saponificación

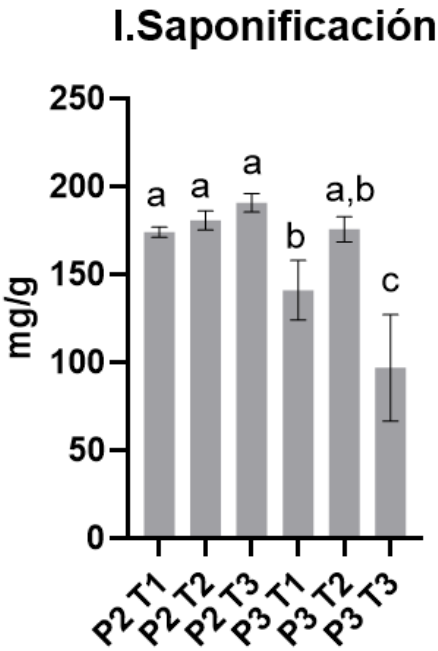
El análisis de varianza para índice de saponificación permite determinar con un 95% de confianza que existen diferencias significativas entre los programas y pretratamientos aplicados (Tabla 23) y su incidencia sobre la característica analizada. Entre tanto, no se presentó viraje de color en los tratamientos, excepto para los triplicados de P2T3, lo que indicaría una posible degradación de los ácidos grasos debido al estrés térmico generado por el continuo repaso al sólido, con los que se pretendía extraer la mayor cantidad de aceite posible.

Tabla 23. Análisis de varianza para índice de saponificación

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	18472	3694,5	16,68	0,000
Lineal	3	12288	4095,9	18,50	0,000
Programa	1	8702	8701,7	39,29	0,000
Pretratamiento	2	3586	1793,0	8,10	0,006
Interacciones de 2 términos	2	6185	3092,4	13,96	0,001
Programa*Pretratamiento	2	6185	3092,4	13,96	0,001
Error	12	2658	221,5		
Total	17	21130			

Con la prueba de comparaciones múltiples de Tukey para índice de saponificación determinó la existencia de diferencias significativas entre los programas P2 y P3 (Figura 21), ocasionado por el efecto de la temperatura aplicada sobre el equipo para la extracción del aceite y los reprocesos necesarios para extraer en mayor cantidad el aceite de las semillas.

Figura 21 Prueba de comparaciones múltiples de Tukey para índice de saponificación



Los valores hallados para los tratamientos se encontraron entre 74,65 - 132,56 (± 2,95) mg de KOH/g; Adawy et al. (2001) indican que el aceite crudo de semilla de calabaza tiene un índice de saponificación de 206 mg KOH/g, mientras que Artica y colaboradores (2016) hallaron un índice de 191,77 mg KOH/g y Rezig *et al*. (2012), un valor de 175 mg KOH/g. Es probable que la temperatura a la que fue sometida el aceite y la cantidad de repasos necesarios para liberarlo en mayor cantidad del sólido, generaran la descomposición de sus ácidos grasos y representan los valores obtenidos en la prueba.

Es posible establecer que, en general, para los índices de acidez, peróxido, yodo y saponificación, existen diferencias significativas entre los tratamientos aplicados, directamente por el efecto de la temperatura y de forma probable por los repasos realizados para extraer la mayor cantidad de aceite y separarla del sólido (torta). Estos resultados indican que los tratamientos aplicados a las semillas de zapallo antes de la extracción del aceite tuvieron efectos significativos sobre las características de calidad evaluadas, resultados similares a los encontrados por Aktaş y colaboradores para aceite originado de dicha materia prima, pretratado térmicamente y extraído por medios mecánicos (Aktaş et al., 2018).

4.3.7. Prueba de estabilidad oxidativa

La prueba de estabilidad oxidativa realizada en un Rancimat 892 a temperatura de 120°C, permitió la obtención de los siguientes tiempos de inducción (Tabla 24) para cada uno de los tratamientos, evaluados por duplicado.

Tabla 24. Tiempo de inducción según tratamientos

Temperatura	Tratamiento	Identificación	Tiempo (h)
120°C	P2T2	A1	2,63
		B1	2,07
	P2T3	A2	2,58
		B2	2,4
	P3T2	A3	2,7
		B3	2,93
	P3T3	A4	2,35
		B4	2,37

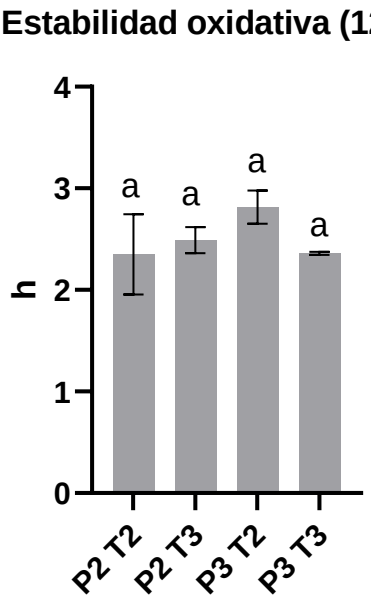
El análisis de varianza (Tabla 25), permite establecer con un 95% de confianza que no existen diferencias significativas entre los tratamientos aplicados y evaluados a 120°C.

Tabla 25. Análisis de varianza para estabilidad oxidativa

	SS	DF	MS	F (DFn, DFd)	P valor
Tratamiento	0,2827	3	0,09425	F (3, 4) = 1,888	P=0,2727
Residual	0,1997	4	0,04991		
Total	0,4824	7			

Se realizó la prueba de comparaciones múltiples de Tukey (Figura 22), con el 95 % de confianza, donde se evidencia que para los tratamientos evaluados no se presentaron diferencias significativas.

Figura 22. Prueba de estabilidad oxidativa a 120°C



Finalmente, se obtuvo que, en promedio, el tiempo de inducción fue de 2,8 h a temperatura de 120°C, valores bajos en comparación con el tiempo de inducción hallado de 4h para semilla descascarillada de Gorjanović y colaboradores (2018); 4,3h y 3,8h para las variedades de semilla *Nevşehir çerçevelisi* y *Ürgüp sivrisi*, respectivamente (Aktaş et al., 2018), hallazgos que indican que al tostar la semilla se reduce significativamente la estabilidad a la oxidación del aceite y que incrementar la temperatura genera una disminución en el período de inducción y un aumento en la tasa de oxidación, consistente en que para obtener la misma cantidad de aceite que los tratamientos P3, se debió someter a reproceso los tratamientos de P2, lo que se reflejó en el incremento en los valores de los índices de acidez, peróxido, saponificación, yodo y estabilidad a la oxidación está relacionado con altas temperaturas para el tostado de las semillas de zapallo (Aktaş et al., 2018; Potocnik et al., 2018).

5. CONCLUSIONES

5.1. CONCLUSIONES

Fue posible estimar la cantidad de semillas producidas en el Departamento del Cauca con base en los datos gubernamentales reportados para 2020, en donde se produjeron alrededor de 57 ton de semilla, de los que podrían extraerse entre 19,2 y 25,6 ton de aceite anualmente.

A partir del análisis por la matriz AHP y tomando como referencia la bibliografía consultada para los métodos de extracción mecánica, extracción por solventes orgánicos y extracción por ultrasonido, se seleccionó el método de extracción mecánica como mejor alternativa para la extracción del aceite de semilla de zapallo, en las condiciones particulares del caso de estudio.

Se obtuvo un aceite crudo bajo proceso de extracción mecánica y clarificado por sedimentación y centrifugación, en el que las pruebas químicas realizadas permitieron establecer que se encuentra bajo las características generales de la normativa colombiana vigente.

La disminución del porcentaje de humedad de la semilla en niveles inferiores al 5% facilitó la conservación de las semillas para su procesamiento y la extracción del aceite, así como redujo las posibilidades de daños por hidrólisis durante la extracción.

Considerando que los reportes de la producción de zapallo en el departamento del Cauca muestran una tendencia al crecimiento y bajo las estimaciones realizadas de materia prima disponible para la extracción de aceite a partir de esta semilla, se establece que este material vegetal podría ser empleado para generar valor a través de su transformación.

El tratamiento P2 T3 (120°C – 180°C/5”) generó los valores de índice de acidez, índice de peróxido, índice de yodo e índice de saponificación menos favorables para la conservación de calidad del aceite de semilla de zapallo; los resultados indican que, durante el procesamiento bajo dichas condiciones, se genera un deterioro de la calidad debido a la descomposición de los ácidos grasos.

Con el uso del tratamiento P1 T1 (60°C – Semilla cruda) disminuyó la fluidez del aceite para su extracción, al generarse empastamientos en el tornillo y no la separación del sólido y del líquido, con base en ello se determinó el requerimiento de incrementar la temperatura de extracción.

En general, los tratamientos concernientes a P3 (180°C), mostraron valores de índice de acidez, índice de peróxido, índice de yodo e índice de saponificación acordes con la norma para consumo humano.

Los tratamientos relacionados con P2 (120°C) generaron los valores de índice de acidez, índice de peróxido, índice de yodo e índice de saponificación menos favorables para la conservación de calidad del aceite de semilla de zapallo; los resultados indican que, durante el procesamiento a esta temperatura, se genera la descomposición de los ácidos grasos, provocados por los múltiples repasos requeridos para separar la mayor cantidad de aceite del sólido de la semilla.

Con relación a los tratamientos aplicados sobre la semilla, es posible determinar que se favorece la extracción al aplicar calor sobre estas, como en el caso de los tratamientos T2 (120°C/5") y T3 (155°C/5"), sin embargo, temperaturas superiores generan descomposición de la semilla, disminuyendo la cantidad de aceite a obtener.

5.2. TRABAJOS FUTUROS

Al finalizar este trabajo de grado y a partir de los análisis realizados, se pueden establecer las siguientes recomendaciones para futuros trabajos:

1. Complementar los hallazgos del presente trabajo con el análisis de factibilidad financiera para el establecimiento de una industria productora de aceite de semilla de zapallo en el Departamento del Cauca.

2. Estudiar la testa de la semilla del zapallo para identificar sus posibles usos.

3. Realizar el análisis histológico de las semillas con y sin cáscara y emplear métodos de observación microscópica de alta resolución.

4. Complementar los análisis del aceite, incluyendo la determinación de fenoles, tocoferoles, polifenoles y clorofilas en el aceite extraído.

5. Analizar mediante ensayos repetidos, la eficiencia del proceso de extracción a través del análisis de la torta.

6. Evaluar la influencia de la temperatura en la estabilidad oxidativa del aceite y su repercusión en el tiempo de inducción.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Achu, M. B., Fokou, E., Tchiégang, C., Fotso, M., & Tchouanguep, F. M. (2005). Nutritive value of some Cucurbitaceae oilseeds from different regions in Cameroon. *African Journal of Biotechnology*, *4*(11), 1329–1334. https://doi.org/10.5897/AJB2005.000-3263

Adhikari, S., Nam, H., & Chakraborty, J. P. (2018). Conversion of solid wastes to fuels and chemicals through pyrolysis. In *Waste Biorefinery: Potential and Perspectives*. Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63992-9.00008-2

AGRONET. (2020a). *Reporte: Área, Producción y Rendimiento Nacional por Cultivo*. https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1

AGRONET. (2020b). *Reporte:Área, Producción, Rendimiento y Participación Municipal en el Departamento por Cultivo*.

Aktaş, N., Uzlaşır, T., & Emre, Y. (2018). Pre-roasting treatments significantly impact thermal and kinetic characteristics of pumpkin seed oil. *Thermochimica Acta*, *669*(June), 109–115. https://doi.org/10.1016/j.tca.2018.09.012

Alcadía de Popayán. (2013). *Alcaldía Municipal de Popayán - Nuestra geografía*. Alcadía de Popayán. http://www.popayan.gov.co/ciudadanos/popayan/nuestra-geografia#:~:text=Popayán es la capital del,oeste del meridiano de Greenwich.%0Ahttp://www.popayan.gov.co/ciudadanos/popayan/nuestra-geografia

Alfawaz, M. A. (2004). Chemical Composition and Oil Characteristics of Pumpkin (Cucurbita maxima) Seed Kernels. *Food Science & Agriculture Research*, *129*, 5–19.

Alirezapour, N., Haghighi Asl, A., & Khajenoori, M. (2020). Ultrasound-assisted extraction of thymol from Zataria multiflora Boiss.: Optimization by response surface methodology and comparison with conventional Soxhlet extraction. *Bulgarian Chemical Communications*, *52*(4), 419–427. https://doi.org/10.34049/bcc.52.4.5159

Artica M, L., Baquerizo C, M., Rosales P, A., & Rodríguez, G. (2016). Aprovechamiento de semillas de cucúrbita ficifolia y cucúrbita máxima para la extracción de aceite y uso en la industria alimentaria. *Prospectiva Universitaria*, *13*(1), 66–74. http://revistas.uncp.edu.pe/index.php/prospectiva/article/view/385#.XzxT9XPNW58.mendeley

Asociación de Bancos de Alimentos de Colombia. (2021). *Los Bancos de Alimentos de Colombia en 2021 – Abaco*. ABACO. https://abaco.org.co/los-bancos-de-alimentos-de-colombia-en-2021/

Asociación de Bancos de Alimentos de Colombia. (2022). *Abaco – Abaco*. ABACO.

ASUBAGROIN, G. de I. (2015). Determinación del índice de yodo. In *Universidad del Cauca* (Vol. 1).

ASUBAGROIN, G. de I. (2016). *Determinación del índice de peróxidos*.

Ayala Ramírez, M. J. (2011). *EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL ACEITE DE MEZCLAS VEGETALES UTILIZADO EN DOCE FRITURAS SUCESIVAS EMPLEADO PARA FREÍR PLÁTANO HARTÓN VERDE* (Vol. 11, Issue 2) [PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA]. https://doi.org/10.16194/j.cnki.31-1059/g4.2011.07.016

Brent Loy, J. (2000). Seed Development in Cucurbita pepo An Overview with Emphasis on Hull-less Seeded Genotypes of Pumpkin – The Cucurbit Genetics Cooperative (CGC). In *The Cucurbit Genetics Cooperative (CCG)* (Vol. 23). https://cucurbit.info/2000/07/seed-development-in-cucurbita-pepo-an-overview-with-emphasis-on-hull-less-seeded-genotypes-of-pumpkin/

Bwade, K. ., & Aliyu, B. (2012). Investigations on the Effects of Moisture Content and Variety Factors on Some Mechanical Properties of Pumpkin Seed (Cucurbitaceae spp). *International Journal of Engineering, Business and Enterprise Applications (IJEBEA)*, *1*, 14–19.

Çakaloğlu, B., Özyurt, V. H., & Ötleş, S. (2018). Cold press in oil extraction. A review. *Ukrainian Food Journal*, *7*(4), 640–654. https://doi.org/10.24263/2304-974x-2018-7-4-9

Can Cauich, C. A., Sauri Duch, E., Moo Huchin, V. M., Betancur Ancona, D., & Cuevas Glory, L. F. (2019). Effect of extraction method and specie on the content of bioactive compounds and antioxidant activity of pumpkin oil from Yucatan , Mexico. *Food Chemistry*, *285*(September 2018), 186–193. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.153

Castro, P., Coello, J., & Castillo, L. (2007). *Opciones para la producción y uso del biodiésel en el Perú*. Soluciones Prácticas-ITDG.

Chemat, F., Rombaut, N., Sicaire, A. G., Meullemiestre, A., Fabiano-Tixier, A. S., & Abert-Vian, M. (2017). Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, *34*, 540–560. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.035

Chen, L., & Huang, G. (2018). Extraction, characterization and antioxidant activities of pumpkin polysaccharide. *International Journal of Biological Macromolecules*, *118*, 770–774. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.06.148

Codex Alimentarius. (2015). Norma para grasas y aceites comestibles no regulados por Normas Individuales. *Normas Internacionales de Los Alimentos*, *19–1981*, 1–5. http://www.fao.org/input/download/standards/74/CXS_019s_2015.pdf

CORABASTOS, C. de A. de B. S. .-. (2020). *APP Historico de Precios*. https://www.corabastos.com.co/sitio/historicoApp2/reportes/prueba.php

Correa Álvarez, E. M., Yacomelo Hernández, M. J., León Pacheco, A. R., Silva Acosta, G. E., & Tamara Morelos, R. E. (2019). Modelo productivo de ahuyama para la región Caribe colombiana. In AGROSAVIA (Ed.), *Siembra*. Ministerio de Agricultura. http://editorial.agrosavia.co/index.php/publicaciones/catalog/download/29/20/361-1?inline=1

Dabbs, D. M., Mulders, N., & Aksay, I. A. (2006). Solvothermal removal of the organic template from L 3 ("sponge") templated silica monoliths. *Journal of Nanoparticle Research*, *8*(5), 603–614. https://doi.org/10.1007/s11051-005-9063-4

De la Hoz, F. (2020a). *Con ahuyama y batata plantean "revolución" agraria La Guajira _ El Heraldo*. El Heraldo. https://www.elheraldo.co/la-guajira/con-ahuyama-y-batata-plantean-revolucion-agraria-la-guajira-703820

De la Hoz, F. (2020b). *La Guajira exportará 75 toneladas de harina de ahuyama a Holanda El Heraldo*. El Heraldo. https://www.elheraldo.co/la-guajira/la-guajira-exportara-75-toneladas-de-harina-de-ahuyama-holanda-695289

Dirección Nacional de Planeación - DNP. (2016). *Colombianos botan 9,76 millones de toneladas de comida al año*. DNP. https://www.dnp.gov.co/Paginas/Colombianos-botan-9,76-millones-de-toneladas-de-comida-al-año.aspx

eInforma. (2021). *Análisis del Sector Aceites y Grasas en Colombia -*. EInforma. https://www.einforma.co/informes-sectoriales/sector-aceites-grasas

Entornos, R. (2020). *Maicao exportará 75 toneladas de harina de ahuyama » Revista Entornos*. Revista Entornos. http://revistaentornos.com/maicao-exportara-75-toneladas-de-harina-de-ahuyama/

Galarraga Rivera, Y. O. (2015). *Diseño de una prensa tipo expeller para la extracción de aceite vegetal virgen de la semilla de maíz, para uso comestible*. UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA.

Ghosh, P., Shah, G., Sahota, S., Singh, L., & Vijay, V. K. (2020). Biogas production from waste: Technical overview, progress, and challenges. In L. Singh, A. Yousuf, & D. M. Mahapatra (Eds.), *Bioreactors: Sustainable Design and Industrial Applications in Mitigation of GHG Emissions* (pp. 89–104). Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821264-6.00007-3

González Chavarrea, D. M., & Yánez Andrade, Y. M. (2012). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EXTRACTOR SÓLIDO-LÍQUIDO PARA LA OBTENCIÓN DE ACEITE DE SEMILLAS DE SAMBO Y ZAPALLO*. ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO.

Gorjanović, S. Ž., Rabrenović, B. B., Novaković, M. M., Dimić, E. B., Basić, Z. N., & Sužnjević, D. Ž. (2011). Cold-pressed pumpkin seed oil antioxidant activity as determined by a DC polarographic assay based on hydrogen peroxide scavenge. *JAOCS, Journal of the American Oil Chemists' Society*, *88*(12), 1875–1882. https://doi.org/10.1007/s11746-011-1863-3

Grupo de Investigación ASUBAGROIN. (2008). Determinación del índice de saponificación. In *Universidad del Cauca*.

Grupo de Investigación ASUBAGROIN. (2015). *Determinación de acidez*.

Gutiérrez Suquillo, N. R., Saá Arévalo, I. A., & Vinueza Lozada, A. F. (2017). Diseño y construcción de un prototipo para la extracción continua de aceite de la semilla Sacha Inchi con un proceso de prensado en frío. *Enfoque UTE*, *8*(2), 15. https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v8n2.153

Guzmán Brito, W. F., & Rojas Pacheco, H. E. (2016). *Rediseño de una máquina tipo expeller para extracción de la semilla de scha inchi con capacidad de 20 kilogramos/hora*. Universidad Politécnica Salesiana sede Quito.

Hayqui Betancurt, H. (2016). *Extracción y caracterización de aceite de semillas de zapallo de la variedad Macre (Cucurbita maxima)*. Universidad Peruana Unión.

Heriawan, Indartono, Y. S., & Kartika, I. A. (2018). Optimization of mechanical oil extraction process of Nyamplung seeds (Calophyllum inophyllum L.) by flexible single screw extruder. *AIP Conference Proceedings*, *1984*. https://doi.org/10.1063/1.5046597

Hernández-Santos, B., Rodríguez-Miranda, J., Herman-Lara, E., Torruco-Uco, J. G., Carmona-García, R., Juárez-Barrientos, J. M., Chávez-Zamudio, R., & Martínez-Sánchez, C. E. (2016). Effect of oil extraction assisted by ultrasound on the physicochemical properties and fatty acid profile of pumpkin seed oil (Cucurbita pepo). *Ultrasonics Sonochemistry*, *31*, 429–436. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.01.029

HWH Environmental. (2022). *Facts and Statistics About Waste For 2021 - HWH Environmental*. HWH Environmental. https://www.hwhenvironmental.com/facts-and-statistics-about-waste/

IAlimentos. (2015). *Aceites y grasas, el quinto sector*. Revista IAlimentos.

https://www.revistaialimentos.com/ediciones/edicion-6/aceites-y-grasas-el-quinto-sector/

IAlimentos. (2019). *Aceites una batalla entre el precio y la oferta*. Revista IAlimentos. https://www.revistaialimentos.com/ediciones/ed-83-los-expertos-hablan-lecciones-2019-oportunidades-2020/aceites-una-batalla-entre-el-precio-y-la-oferta/

ICONTEC. (2011a). *NTC 218 - DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE ACIDEZ Y DE LA ACIDEZ* (p. 16). ICONTEC.

ICONTEC. (2011b). *NTC 236 - DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE PERÓXIDO* (p. 19). ICONTEC.

ICONTEC. (2016). *NTC 336 - MÉTODO DE LA DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD (MASA POR VOLUMEN CONVENCIONAL)* (p. 11). ICONTEC.

Idárraga Vélez, Á. M. (2015). *PRODUCCIÓN DE BIOMOLÉCULAS CON APLICACIONES COSMÉTICAS A PARTIR DE RESIDUOS DE FRUTAS*. Universidad Nacional de COlombia.

Instruments, H. (2016). *Determinación Del Índice De Peróxidos*. Hanna Instruments. https://www.hannainst.es/blog/116/determinacion-del-indice-de-peroxidos

Jacobo-Valenzuela, N., Maróstica-Junior, M. R., Zazueta-Morales, J. de J., & Gallegos-Infante, J. A. (2011). Physicochemical, technological properties, and health-benefits of Cucurbita moschata Duchense vs. Cehualca. A Review. *Food Research International*, *44*(9), 2587–2593. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.04.039

Jiao, J., Li, Z., Gai, Q., Li, X., Wei, F., Fu, Y., & Ma, W. (2014). Microwave-assisted aqueous enzymatic extraction of oil from pumpkin seeds and evaluation of its physicochemical properties , fatty acid compositions and antioxidant activities. *Food Chemistry*, *147*, 17–24. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.09.079

Juárez Rafael, M. de la L., Hernández Santos, B., Rodríguez Miranda, J., Herman y Lara, E., Torruco Uco, J. G., & Martínez Sánchez, C. E. (2016). Efecto del método de extracción sobre la calidad del aceite de semilla de calabaza (Cucurbita pepo). *Avances y Perspectivas En Biotecnología y Ciencias Agropecuarias*, *1*(June).

Khodabakhshian, R. (2012). Mechanical strength and physical behavior of pumpkin seed and its kernel. *Thai Journal of Agricultural Science*, *45*(1), 37–43.

Kipping, D. R., Laurel, H. O. and chemical characteristics of pumpkin seeds for mechanization and processing, Orozco, A. A., & López, H. M. D. G. L. A. (2018). Características físicas y químicas de la semilla de calabaza para mecanización y procesamiento. *Nova Scientia*, *10*(21), 61–77.

https://doi.org/doi.org/10.21640/ns.v10i21.1467

Koubaa, M., Mhemdi, H., Barba, F. J., Roohinejad, S., Greiner, R., & Vorobiev, E. (2016). Oilseed treatment by ultrasounds and microwaves to improve oil yield and quality : An overview. *FRIN*, *85*, 59–66. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.04.007

Lalnunthari, C., Devi, L. M., Amami, E., & Badwaik, L. S. (2019). Valorisation of pumpkin seeds and peels into biodegradable packaging films. *Food and Bioproducts Processing*, *118*, 58–66. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.08.015

Lemus-Mondaca, R., Kessami, M., Rivas, J., Leyla, S., Soto, Y., Vera, N., & Puente Díaz, L. (2019). Semillas de calabaza (Cucurbita máxima). Una revisión de sus propiedades funcionales y sub-productos. *Revista Chilena de Nutrición*, *46*(6), 783–791. https://doi.org/10.4067/S0717-75182019000600783

León Velandia, J. F. (2020). *Caracterización y extracción de aceite de semillas de calabaza para la producción de un batido funcional .* [Universidad de los Andes]. http://hdl.handle.net/1992/51646

Li, P., Abdalbasit, M., Zhang, W., Liu, J., Bing, R., & Yang, R. (2016). Effects of roasting temperatures and grinding type on the yields of oil and protein obtained by aqueous extraction processing. *Journal of Food Engineering*, *173*, 15–24. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.10.031

Li, X., Li, Z., Wang, X., Han, J., Zhang, B., & Fu, Y. (2016). Application of cavitation system to accelerate aqueous enzymatic extraction of seed oil from Cucurbita pepo L . and evaluation of hypoglycemic effect. *Food Chemistry*, *212*, 403–410. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.05.185

Malenica, D., & Bhat, R. (2020). Review article: Current research trends in fruit and vegetables wastes and by-products management-scope and opportunities in the estonian context. *Agronomy Research*, *18*(Special Issue 3), 1760–1795. https://doi.org/10.15159/AR.20.086

Manayay Sánchez, D., Taramona Ruiz, L., & Jordán Suárez, O. (2015). Evaluación de la forma, redondez, esfericidad y ecuanticidad en granos comerciales de maíz amarillo duro (Zea mays L.) y arveja (Pisum sativum). In *Revista de Investigaciones de la Universidad Le Cordon Bleu* (Vol. 3, Issue 1). https://doi.org/10.36955/riulcb.2016v3n1.001

Marchant, N. (2021). *Global food waste twice the size of previous estimates World Economic Forum*. World Economic Forum. https://www.weforum.org/agenda/2021/03/global-food-waste-solutions/

MarketWatch. (2022). *Global Pumpkin Seed Oil Market Size, Trends, Shares, Revenue,*

Share Estimation, Challenges, Business Opportunities, Forecast 2022 – 2031 - MarketWatch. MarketWatch. https://www.marketwatch.com/press-release/global-pumpkin-seed-oil-market-size-trends-shares-revenue-share-estimation-challenges-business-opportunities-forecast-2022-2031-2022-03-16?mod=search_headline

Martínez, M. L., Marín, M. A., Salgado, C. M., Revol, J., Penci, M. C., & Ribotta, P. D. (2012). Chia (Salvia hispanica L) oil extraction : Study of processing parameters. *LWT - Food Science and Technology*, *47*(1), 78–82. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.12.032

Medellín Aranguren, P. (2021). *Mientras 2.7 millones de colombianos sufren hambre, 10 millones de toneladas de alimentos se desperdician anualmente*. Instituto de Estudios Urbanos; Universidad Nacional de Colombia. http://ieu.unal.edu.co/medios/noticias-del-ieu/item/mientras-2-7-millones-de-colombianos-sufren-hambre-10-millones-de-toneladas-de-alimentos-se-desperdician-anualmente

Meesariganda, B. R., & Ishizaka, A. (2017). Mapping verbal AHP scale to numerical scale for cloud computing strategy selection. *Applied Soft Computing Journal*, *53*, 111–118. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.12.040

Méndez-López, A., Villanueva-Verduzco, C., Sahagún-Castellanos, J., Avitia-García, E., Colinas-León, T., Jamilena-Quesada, M., & Rojas-Martínez, R. I. (2010). Obtención, caracterización y agrupamiento de genotipos partenocárpicos de calabaza (Cucurbita pepo L.) tipo “round zucchini.” *Revista Chapingo, Serie Horticultura*, *16*(2), 123–131.

Mera Obando, L. M., Bye Boettler, R. A., Villanueva Verduzco, C., & Luna Mera, A. (2011). *Documento de diagnóstico de las especies cultivadas de Cucurbita L*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Meru, G., Fu, Y., Leyva, D., Sarnoski, P., & Yagiz, Y. (2018). Phenotypic relationships among oil , protein , fatty acid composition and seed size traits in Cucurbita pepo. *Scientia Horticulturae*, *233*(January), 47–53. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.01.030

Metrohm. (2018). *Medida de estabilidad a la oxidación en grasas y aceites naturales | Metrohm*. https://www.metrohm.com/es/productos/medicion-de-la-estabilidad/rancimat/

Metrohm USA Inc. (2019). *Rancimat Method for the Oxidation Stability of Fats and Oils*. https://www.news-medical.net/whitepaper/20190821/Rancimat-Method-for-the-Oxidation-Stability-of-Fats-and-Oils.aspx

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, & Agronet. (2017). *Ahuyama 2007-2017*.

https://www.agronet.gov.co/Documents/12-AHUYAMA_2017.pdf

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, & Universidad Sergio Arboleda. (2018). *Evaluaciones Agropecuarias del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural*. http://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/default.aspx

Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia. (2012). *Resolución 2154 de 2012* (No. 2154; Vol. 2012, p. 47).

Mitra, P., Ramaswamy, H. S., & Seob Chang, K. (2009). Pumpkin (Cucurbita maxima) seed oil extraction using supercritical carbon dioxide and physicochemical properties of the oil. *Journal of Food Engineering*, *95*(1), 208–213. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.04.033

Mosquera-Artamonov, J. D., Vasco-Leal, J. F., Acosta-Osorio, A. A., Hernandez-Rios, I., Ventura-Ramos, E., Gutiérrez-Cortez, E., & Rodríguez-Garcia, M. E. (2016). Optimization of castor seed oil extraction process using response surface methodology. *Ingenieria e Investigacion*, *36*(3), 82–88. https://doi.org/10.15446/ing.investig.v36n3.55632

Mosquera Sánchez, S. A., Paz Peña, S. P., Ruiz Mondragón, L. K., Suárez, E. A., Arango Ceballos, D. M., & Echeverría, C. (2016). *Informe Técnico del Proyecto 667 de 2014 de CTeI del Ministerio de Ciencia y Tecnología*.

Murkovic, M., Piironen, V., Lampi, A. M., Kraushofer, T., & Sontag, G. (2004). Changes in chemical composition of pumpkin seeds during the roasting process for production of pumpkin seed oil (Part 1: Non-volatile compounds). *Food Chemistry*, *84*(3), 359–365. https://doi.org/10.1016/S0308-8146(03)00240-1

Murovec, J., Drašlar, K., & Bohanec, B. (2012). Detailed analysis of Cucurbita pepo seed coat types and structures with scanning electron microscopy. *Botany*, *90*(11), 1161–1169. https://doi.org/10.1139/b2012-088

Nawirska-Olszańska, A., Kita, A., Biesiada, A., Sokół-Łętowska, A., & Kucharska, A. Z. (2013). Characteristics of antioxidant activity and composition of pumpkin seed oils in 12 cultivars. *Food Chemistry*, *139*(1–4), 155–161. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.02.009

Nde, D. B., & Anuanwen, C. F. (2020). Optimization methods for the extraction of vegetable oils: A review. *Processes*, *8*(2). https://doi.org/10.3390/pr8020209

Nishimura, M., Ohkawara, T., Sato, H., Takeda, H., & Nishihira, J. (2014). Pumpkin seed oil extracted from Cucurbita maxima improves urinary disorder in human overactive bladder. *Journal of Traditional and Complementary Medicine*, *4*(1), 72–74. https://doi.org/10.4103/2225-4110.124355

Norfezah, M. N., Hardacre, A., & Brennan, C. S. (2011). Comparison of waste pumpkin material and its potential use in extruded snack foods. *Food Science and Technology International*, *17*(4), 367–373. https://doi.org/10.1177/1082013210382484

Nwokocha, L. M., & Adegbuyiro, A. (2017). Effect of roasting temperature on the physicochemical properties of Jatropha curcas Kernel oil extracted with cold hexane and hot water. *African Journal of Pure and Applied Chemistry*, *11*(3), 19–29. https://doi.org/10.5897/ajpac2017.0721

Ortiz Grisales, S. (2012). Fruto y semilla de Cucurbita moschata fuente de carotenoides y aceite con valor agregado. *Horticultura Brasileira 30.*, *30*, 8455–8472.

Ortiz Grisales, S., Pasos López, S. C., Rivas Abadía, X. C., Valdés Restrepo, M. P., & Vallejo Cabrera, F. A. (2009). Extracción y caracterización de aceite de semillas de zapallo. *Acta Agronómica*, *58*(3), 145–151.

Pantano Ladino, L. C., & Urrego Roldán, A. M. (2018). *Evaluación de la extracción de aceite de semillas de amapola mediante los métodos Soxhlet y prensado en frío a nivel laboratorio*. Fundación Universidad de América.

Pazinato Cuco, R., Bovo Massa, T., Postaue, N., Cardozo Filho, L., & Julio Iwassa, I. (2019). Oil extraction from structured bed of pumpkin seeds and peel using compressed propane as solvent. *The Journal of Supercritical Fluids*, *152*, 104568. https://doi.org/10.1016/j.supflu.2019.104568

Potocnik, T., Cizej, M. R., & Joze Kosir, I. (2018). Influence of seed roasting on pumpkin seed oil tocopherols, phenolics and antiradical activity. *Journal of Food Composition and Analysis*, *69*(December 2016), 7–12. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2018.01.020

Potočnik, T., Iztok, M. R., & Košir, I. J. (2018). Influence of seed roasting on pumpkin seed oil tocopherols, phenolics and antiradical activity. *Journal of Food Composition and Analysis*, *69*, 7–12.

PROCOLOMBIA. (2014). *Logística de perecederos y cadena de frío en Colombia*.

Rabrenovic, B. B., Dimic, E. B., Novakovic, M. M., & Tesevic, V. V. (2014). The most important bioactive components of cold pressed oil from different pumpkin (Cucurbita pepo L .) seeds. *LWT - Food Science and Technology*, *55*, 521–527. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.10.019

Remedi González, P. A. (2010). *Desarrollo y evaluación de una pasta untable para el aprovechamiento de semillas de zapallo (Cucurbita máxima)* [Universidad de Chile]. https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/134928

Reyes, A. M. (2021). *Pasando de pérdida y desperdicio de alimentos a soluciones, desde*

la producción hasta el consumo, aportes que construimos juntos Naciones Unidas en Colombia. Naciones Unidas - Colombia. https://colombia.un.org/es/168173-pasando-de-perdida-y-desperdicio-de-alimentos-soluciones-desde-la-produccion-hasta-el

Rezig, L., Chouaibi, M., Msaada, K., & Hamdi, S. (2012). Chemical composition and profile characterisation of pumpkin (Cucurbita maxima) seed oil. *Industrial Crops and Products*, *37*(1), 82–87. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.12.004

Rodríguez, L. E. (2020). *Auyama Alerta productores Bolívar, calabaza, zapallo: Productores de ahuyama de Pinillos están perdiendo la cosecha y lanzan SOS*. Caracol Radio. https://caracol.com.co/programa/2020/09/06/al_campo/1599388829_305996.html

Rodríguez R, R., Valdés, M., & Ortiz, S. (2018). Características agronómicas y calidad nutricional de los frutos y semillas de zapallo Cucurbita sp . *Revista Colombiana de Ciencia Animal*, *10*(1), 86–97. https://doi.org/10.24188/recia.v10.n1.2018.636

Romero Barona, I., Medina labrada, J. J., Hincapié Zamora, M., & Gómez Corrales, A. F. (2022). *Diseño de un proceso para la fabricación de aceite a partir de las semillas del zapallo*. Pontificia Universidad Javeriana. Santiago de Cali.

Ruiz Carreño, D. G. (2021). *DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y ANÁLISIS DE RENDIMIENTO A TRES TORNILLOS EXTRUSORES PARA LA EXTRACCIÓN DE ACEITE DE LA SEMILLA DE AGUACATE TIPO LORENA*. Universidad ECCI.

Saavedra, M. J., Aires, A., Dias, C., Almeida, J. A., De Vasconcelos, M., Santos, P., & Rosa, E. (2015). Evaluation of the potential of squash pumpkin by-products (seeds and shell) as sources of antioxidant and bioactive compounds. *Journal Food Science Technology*, *52*(February), 1008–1015. https://doi.org/10.1007/s13197-013-1089-5

Sánchez-Salas, J., Flores, J., Muro-Pérez, G., Arias-Montes, S., & Jurado, E. (2015). Morfometría de semillas en la cactácea amenazada de extinción Astrophytum myriostigma Lemaire. *Polibotánica*, *0*(39), 119–131. https://doi.org/10.18387/polibotanica.39.7

Sathiya Mala, K., & E. Kurian, A. (2016). Nutritional composition and antioxidant activity of pumpkin wastes. *International Journal of Pharmaceutical, Chemical and Biological Sciences*, *6*(3), 336–344.

Semana. (2018). *Negocio del aceite de oliva va al alza, pero aún es muy pequeño*. Semana. https://www.semana.com/empresas/articulo/negocio-del-aceite-de-oliva-en-colombia-en-2018/261295/

Sicaire, A.-G., Abert Vian, M., Fine, F., Carré, P., Tostain, S., & Chemat, F. (2016).

Ultrasound induced green solvent extraction of oil from oleaginous seeds. *Ultrasonics Sonochemistry*, *31*, 319–329. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.01.011

Siger, A., Dwiecki, K., Borzyszkowski, W., Turski, M., Rudzinka, M., & Nogala Kalucka, M. (2017). Physicochemical characteristics of the cold-pressed oil obtained from seeds of Fagus sylvatica L. *Food Chemistry*, *225*, 239–245. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.01.022

Speight, J. G. (2015). Waste gasification for synthetic liquid fuel production. In *Gasification for Synthetic Fuel Production: Fundamentals, Processes and Applications*. © 2015 Woodhead Publishing Limited. All rights reserved. https://doi.org/10.1016/B978-0-85709-802-3.00012-6

Suárez Peña, A. C. (2014). El Hambre y el desperdicio de alimentos en Colombia reto de logística inversa y responsabilidad social. In *Editorial. Logística. LA*. Editorial. Logística. LA. https://editorial.logistica.la/2014/10/19/el-hambre-y-el-desperdicio-de-alimentos-en-colombia-reto-de-logistica-inversa-y-responsabilidad-social/

Tamayo Castañeda, S. O., Carreón Reyes, E., Nanco Colula, J. R., & Fitz Rodríguez, E. (2017). Diseño de un mecanismo extractor de semillas de calabaza sin causar daño a la pulpa. *Ciencias Matemáticas Aplicadas a La Agronomía. Handbook T-I*, *9*, 80–88.

Teknomo, K. (2006). ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP) TUTORIAL. In *Revoledu* (Issue 1). http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE02431839

Tescan. (2013). *VEGA 3SEM: Instructions for Use*.

TESCAN ORSAY HOLDING. (2022a). *TESCAN SEM Solutions for Materials Science | TESCAN*. https://www.tescan.com/product-portfolio/sem/sem-for-materials-science/

TESCAN ORSAY HOLDING. (2022b). *Tescan Vega – Tescan*. https://tescan.ru/product/skaniruyushchie-elektronnye-mikroskopy/tescan-vega/

The University of Western Australia. (2022). *TESCAN VEGA3 Centre for Microscopy, Characterisation and Analysis*. The University of Western Australia. https://www.cmca.uwa.edu.au/facilities/sem/tescan-vega3

The World Bank. (2020). *Trends in Solid Waste Management*. The World Bank. http://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html

Tiseo, I. (2021). *Annual food waste by select country worldwide 2020 | Statista*. Statista. https://www.statista.com/statistics/933083/food-waste-of-selected-countries/

Tiseo, I. (2022). *Global Waste Generation - Statistics & Facts*. Statista. https://www.statista.com/topics/4983/waste-generation-worldwide/#dossierSummary%0Ahttps://www.statista.com/topics/4983/waste-generation-worldwide/

Tridge. (2022). *Pumpkin Seed Oil*. Tridge. https://www.tridge.com/intelligences/sesame-oil/price

Uguar, S., & Korkmaz, H. (2011). A green separation process for recovery of healthy oil from pumpkin seed. *The Journal of Supercritical Fluids*, *58*, 239–248. https://doi.org/10.1016/j.supflu.2011.06.002

United Nations Environment Programme. (2021). *FOOD WASTE INDEX REPORT 2021*.

Valdez-Arjona, L. P., & Ramírez-Mella, M. (2019). Pumpkin waste as livestock feed: Impact on nutrition and animal health and on quality of meat, milk, and egg. *Animals*, *9*(10), 1–16. https://doi.org/10.3390/ani9100769

Valentin Chancavilca, R. G., Bustamante García, L. Y., Canturín Aliaga, M. C., Contreras Nuñez, S. Y., Rojas Bautista, D., & Urreta Cabanilla, G. J. (2007). *Extracción del aceite de calabaza*. http://www.mailxmail.com/curso-extraccion-aceite-pepa-calabaza/proceso-extracion-aceites-grasas

Vargas Rubio, P. A. (2019). *El aceite de girasol ha perdido 3% del mercado dentro de su categoría durante 2018*. La República. https://www.larepublica.co/empresas/el-aceite-de-girasol-ha-perdido-3-del-mercado-dentro-de-su-categoria-durante-2018-2817565

Wang, L., Liu, F., Wang, A., Yu, Z., Xu, Y., & Yang, Y. (2017). Purification, characterization and bioactivity determination of a novel polysaccharide from pumpkin (Cucurbita moschata) seeds. *Food Hydrocolloids*, *66*, 357–364. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.12.003

Wroniak, Malgorzata; Rekas, Agnieszka; Siger, Aleksander; Janowics, M. (2016). Microwave pretreatment effects on the changes in seeds microstructure , chemical composition and oxidative stability of rapeseed oil. *LWT - Food Science and Technology*, *68*, 634–641. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.01.013

Yusuf, A. K. (2018). A Review of Methods Used for Seed Oil Extraction. A.K. Yusuf Department of Chemistry, Al-Qalam University, Katsina, Nigeria. *International Journal of Science and Research*, *7*(December), 233–238. https://doi.org/10.21275/1121804

7. ANEXOS

ANEXO 1. PROTOCOLOS PARA ANÁLISIS QUÍMICO

A continuación, se presentan los protocolos empleados para la evaluación química del aceite obtenido, determinando la densidad y los índices de acidez, peróxidos, yodo y saponificación, con base en los procedimientos suministrados por el grupo de investigación ASUBAGROIN.

DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE ÁCIDOS GRASOS LIBRES
Código de Guía: AC-04
GRUPO DE INVESTIGACIÓN ASUBAGROIN
UNIVERSIDAD DEL CAUCA. 2015

1. OBJETIVO

Establecer el procedimiento para la determinación del índice de ácidos grasos libres en grasas y aceites animales o vegetales de acuerdo a norma AOAC 940.28.

2. FUNDAMENTO

El índice de acidez es una medida de los ácidos grasos libres producto de la hidrólisis o descomposición de los triglicéridos, se define como el número de miligramos de hidróxido de sodio que se requieren para neutralizar los ácidos grasos libres contenidos en un gramo de grasa y se expresa de acuerdo al ácido graso predominante en la grasa o aceite como ácido láurico, acido palmítico y en la mayoría de los casos como ácido oleico.

3. MATERIALES

Material	Cantidad
Erlenmeyer de 250 mL	3
Erlenmeyer de 100 mL	3
probeta de 50 mL	1
Pipeta de 50 mL	1
Pro-pipeta	1
Bureta	1

4. REACTIVOS

Reactivo	Cantidad

Hidróxido de sodio (NaOH) 0,1N	50 mL
Hidróxido de sodio (NaOH) 0,25N	100 mL
Fenoftaleina 1%	100 mL
Etanol	

5. EQUIPOS

Equipo	Cantidad
Balanza analítica	1

6. PROCEDIMIENTO

6.1. Toma de muestras

- Agitar la muestra para obtener una muestra representativa

6.2. Preparación de muestra

- Si la muestra es líquida y presenta aspecto claro y sin sedimento, homogeneizar y tomar la muestra.
- Si la muestra es líquida y presenta aspecto turbio o con sedimento o es sólida, calentar la muestra a 50°C hasta desaparición del sedimento, si el sedimento no desaparece filtrar, homogenizar y tomar la muestra.

6.3. Preparación de reactivos

- **Hidróxido de sodio (NaOH) 0,1 N.** En un beaker pesar 0,2 g de hidróxido sodio (NaOH), adicionar 25 mL de agua destilada y agitar hasta disolución total, transferir la solución anterior a un balón aforado de 50 mL, lavar el beaker con agua destilada, asegurándose de que no quede reactivo en este, transfiera los lavados al balón y complete el aforo con agua destilada

- **Hidróxido de sodio (NaOH) 0,25 N.** En un beaker pesar 1 g de hidróxido sodio (NaOH), adicionar 50 mL de agua destilada y agitar hasta disolución total, transferir la solución anterior a un balón aforado de 100 mL, lavar el beaker con agua destilada, asegurándose de que no quede reactivo en este, transfiera los lavados al balón y complete el aforo con agua destilada

- **Fenolftaleína 1%.** En un beaker pesar 1,0101g de fenolftaleína, adicionar 60 mL de etanol y agitar hasta disolución total, transferir la solución anterior a un balón aforado de 100 mL, lavar el beaker utilizado con etanol, asegurándose de que no quede reactivo en este, transferir los lavados al balón y completar el aforo con etanol, almacenar en un frasco ámbar con tapa (con gotero preferiblemente)

- **Estandarización del hidróxido de sodio**

1. Poner en una caja de Petri aproximadamente 1 g de ftalato ácido de potasio (KHP)
2. Secar por 1 hora a 110 ºC sacar y llevar a desecador
3. Pesar en beaker de 100 mL 0,1 g de ftalato ácido de potasio previamente seco (realizar triplicado)
4. Adicionar 10 mL de agua destilada y 2 gotas de fenolftaleína
5. Titular con el hidróxido de sodio a estandarizar hasta aparición del color rosa
6. Calcular la concentración de la base a partir de la siguiente ecuación

$$N\ NaOH = \frac{g\ KHP}{204{,}22\ g\ KHP} \times \frac{1000}{mL\ NaOH\ gastados}$$

6.4. Procedimiento

1. La determinación se debe realizar por triplicado
2. Pesar en erlenmeyer de 250 mL, con una aproximación de 0,01g, 7,05 g de aceite o grasa si se encuentra cruda o 56,4 g si el producto es refinado
3. En un Erlenmeyer de 100 mL adicionar 50 mL (etanol 95% pureza) 2 mL de fenolftaleína y 15 gotas de hidróxido de sodio 0,1 N
4. Verter el contenido del Erlenmeyer de 100 mL en el erlenmeyer de 250 mL que contiene la muestra de aceite
5. Agitar hasta desaparición del color rosa
6. Titular con NaOH 0,25 N o con NaOH 0,1 N si el producto se encuentra crudo o refinado respectivamente, hasta aparición del color rosa
7. Agitar vigorosamente por 15 segundos, si el color cambia seguir titulando hasta que el color rosa se mantenga.

6.5. Cálculos

De acuerdo con la naturaleza de la grasa o aceite analizado, la acidez debe expresarse como porcentaje de:

a) ácido láurico, en las grasas de coco, palma real, palmiste y similares
b) ácido palmítico, en la grasa de palma africana
c) ácido erúcico, en los aceites de colza y ciertas crucíferas
d) ácido oleico, en los demás casos

$$IA = \frac{V \times N\ \times M}{m} \times 100$$

Donde:
IA= acidez de la muestra de acuerdo al porcentaje del ácido graso predominante
V= volumen de solución de hidróxido de sodio empleado en la titulación de la muestra, en mL
N= normalización de la solución de hidróxido de sodio

M= masa molecular del ácido graso usado para expresar el resultado
m = masa de la muestra analizada, en g

- masas moleculares de ácidos grasos más usados
  Ácido láurico 200
  Ácido palmítico 256
  Ácido oleico 282
  Ácido erúcico 338

7. DISPOSICIÓN DE RESIDUOS QUÍMICOS Y/O BIOLÓGICOS

Disponer todos los residuos de la titulación en el recipiente número 4, que corresponde a solventes orgánicos.

BIBLIOGRAFÍA

AOAC 940.28. 18th ed. Gaithersburg, MD: the association, 2005. Fatty Acids (Free) in Crude and Refined Oils. En: Official Methods of Analysis.

DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE PERÓXIDOS
Código de Guía: AC-01
GRUPO DE INVESTIGACIÓN ASUBAGROIN
UNIVERSIDAD DEL CAUCA. 2015

ASUBAGROIN
Aprovechamiento de Subproductos Agroindustriales
Grupo de Investigación - Unicauca

8. OBJETIVO

Establecer el procedimiento para la determinación del índice de peróxidos en grasas y aceites animales o vegetales de acuerdo a norma AOAC 965.33.

9. FUNDAMENTO

El índice de peróxidos es una medida de la cantidad de mili equivalentes de oxígeno presente en el aceite, está medición es importante porque permite establecer el estado de deterioro oxidativo del aceite o grasa, producto de la reacción de los ácidos grasos y el oxígeno.

10. MATERIALES

Material	Cantidad*
Erlenmeyer de 250 mL	3
Pipeta de 1 mL	2

Probeta de 100 mL	1
Probeta de 50 mL	1
Pro-pipeta	1
Bureta	1

*La cantidad que se presenta hace referencia a una muestra por triplicado

11. REACTIVOS

Reactivo	Cantidad*
Solución de ácido acético: cloroformo 3:2	100 mL
Solución saturada de KI	100 mL
Almidón al 1%	100 mL
Agua hervida y fría	300 mL
Tiosulfato de sodio 0,01N ($Na_2S_2O_3$)	100 mL
Dicromato de potasio	0,5 g

*La cantidad que se presenta hace referencia a una muestra por triplicado

12. EQUIPOS

Equipo	Cantidad
Balanza analítica	1
Plancha de calentamiento	1

13. PROCEDIMIENTO

13.1. Toma de muestras

- Agitar la muestra para obtener una muestra representativa

13.2. Preparación de muestra

- Si la muestra es líquida y presenta aspecto claro y sin sedimento, homogeneizar y tomar la muestra.
- Si la muestra es líquida y presenta aspecto turbio o con sedimento o es sólida, calentar la muestra a 50°C hasta desaparición del sedimento, si el sedimento no desaparece filtrar, homogenizar y tomar la muestra.

13.3. Preparación de reactivo

- **Solución de ácido acético: cloroformo 3:2.** Adicionar 60 mL de ácido acético y 40 mL de cloroformo en un frasco con tapa.

- **Solución saturada de yoduro de potasio (KI).** En un frasco ámbar de 50 mL pesar 7,5 g de KI, adicionar 5 mL de agua previamente hervida y fría.
  Se recomienda preparar la solución el día de uso.

- **Solución de almidón 1%.** Pesar en un beaker de 250 mL 1,0101 g de almidón soluble, adicionar 50 mL de agua destilada caliente y disolver, adicionar 50 mL más de agua destilada y poner a ebullición por dos minutos, dejar enfriar y almacenar en frasco ámbar.

- **Tiosulfato de sodio 0,01 N ($Na_2S_2O_3$).** Pesar en un beaker de 100 mL 0,24 g de $Na_2S_2O_3$, adicionar 50 mL de agua hervida y fría, disolver y transferir la solución a un balón aforado de 100 mL, hacer lavados con agua hervida al beaker y transferir los lavados al balón, completar el aforo.

  Se recomienda preparar la solución con 8 días de anterioridad al uso para garantizar la estabilidad de la solución y estandarizarla.

- **Estandarización de Tiosulfato de sodio.** Secar dicromato de potasio $K_2Cr_2O_7$ a 100ºC por dos horas, colocar en el desecador hasta temperatura ambiente , luego pesar 0,0122 g. y aforar a 25 mL, tomar 2.5 mL de esta solución agregar 2 gramos de yoduro de potasio y 0.8 mL de HCL concentrado. Titular con el tiosulfato de sodio anteriormente preparado hasta coloración verde claro, si se gasta más de 2.5 mL de tiosulfato de sodio, repetir la titulación y adicionar dos gotas de almidón si es necesario.

$$F = \frac{20 * 0{,}01}{V * 0{,}01}$$

$$N = 0{,}01 * F$$

13.4. Procedimiento

1. La determinación se debe realizar por triplicado
2. Pesar 5,00 g de aceite en un Erlenmeyer de 250 mL.
3. Adicionar 25 mL de una solución de ácido acético/cloroformo (3:2), y disolver completamente.
4. Adicionar 0,5 mL de una solución saturada de yoduro de potasio y dejar reposar en la oscuridad durante 60 s, medidos con cronómetro.
5. Añadir 75 mL de agua previamente hervida y fría
6. Adicionar 0,5 mL de solución de almidón 1%, en este punto la solución se oscurece.
7. Titular lentamente con tiosulfato de sodio 0,01 N hasta la desaparición del color

6.5. Cálculos

El índice de peróxidos se calcula a partir de la siguiente ecuación.

$$IP = \frac{V1 \times N \times 1000}{m}$$

Donde:
IP= Índice del peróxido en meq. de O_2 por kilogramo del producto.
V1 = volumen de solución de tiosulfato de sodio empleado en la titulación de la muestra, en mL
N = normalización de la solución de tiosulfato de sodio
m = masa de la muestra analizada, en g

14. DISPOSICIÓN DE RESIDUOS QUÍMICOS Y/O BIOLÓGICOS

Disponer todos los residuos de la titulación en el recipiente número 1 que corresponde a solventes e hidrocarburos halogenados.

BIBLIOGRAFÍA

AOAC 965,33. 18th ed. Gaithersburg, MD: the association, 2005. Peroxide Value of Oils and Fats. En: Official Methods of Analysis.

DETRMINACIÓN DEL ÍNDICE DE YODO
MÉTODO WIJS
Código de Guía: AC-03
GRUPO DE INVESTIGACIÓN ASUBAGROIN
UNIVERSIDAD DEL CAUCA. 2015

15. OBJETIVO

Establecer el procedimiento para la determinación del índice de yodo mediante el método de wijs en grasas y aceites animales o vegetales de acuerdo a norma AOAC 920.159.

16. FUNDAMENTO

El índice de yodo es una medida del grado medio de insaturación de los ácidos grasos presentes en el aceite o grasa, expresado como centigramos de yodo absorbidos, por cada gramo de sustancia.

17. MATERIALES

Material	Cantidad
Erlenmeyer de 100 mL	4
probeta de 50 mL	1

Pipeta de 10 mL	3
Pro-pipeta	1
Bureta	1
Tapones	4
Papel aluminio	

18. REACTIVOS

Reactivo	Cantidad
Ciclohexano: ácido acético 1:1	40 mL
Reactivo de wijs	50 mL
Solución de yoduro de potasio al 15 %	35 mL
Agua hervida y fría	200 mL
Tiosulfato de sodio 0,1 N ($Na_2S_2O_3$)	100 mL
Almidón al 1%	10 mL

19. EQUIPOS

Equipo	Cantidad
Balanza analítica	1
Plancha de calentamiento	1

20. PROCEDIMIENTO.

20.1. Toma de muestras

- Agitar la muestra para obtener una muestra representativa

20.2. Preparación de muestra

- Si la muestra es líquida y presenta aspecto claro y sin sedimento, homogeneizar y tomar la muestra.
- Si la muestra es líquida y presenta aspecto turbio o con sedimento o es sólida, calentar la muestra a 50°C hasta desaparición del sedimento, si el sedimento no desaparece filtrar, homogenizar y tomar la muestra.

20.3. Preparación de reactivos

- **Solución de ciclohexano: ácido acético 1:1.** Adicionar 20 mL ciclohexano y 20 mL de ácido acético un frasco con tapa

- **Solución de yoduro de potasio 15% (KI).** En un frasco ámbar de 50 mL pesar 7,5 g de KI, adicionar 50 mL de agua previamente hervida y bien fría.

Preparar la solución el día de uso

- **Solución de almidón 1%.** Pesar en un beaker de 250 mL 1,0101 g de almidón soluble, adicionar 50 mL de agua destilada caliente y disolver, adicionar 50 mL más de agua destilada y poner en ebullición por dos minutos, dejar enfriar y almacenar en frasco ámbar

- **Tiosulfato de sodio 0,1 N ($Na_2S_2O_3$).** Pesar en un beaker de 100 mL, 2,48 g de $Na_2S_2O_3$, adicionar 50 mL de agua hervida y fría, disolver y transferir la solución a un balón aforado de 100 mL, hacer lavados con agua hervida al beaker y transferir los lavados al balón, completar el aforo.

  Se recomienda preparar la solución con 8 días de anterioridad al uso para garantizar la estabilidad de la solución y estandarizarla.

- **Estandarización de Tiosulfato de sodio.** Secar dicromato de potasio $K_2Cr_2O_7$ a 100ºC por dos horas, colocar en el desecador hasta temperatura ambiente , luego pesar 0,0122 g. y aforar a 25 mL, tomar 2,5 mL de esta solución agregar 2 gramos de yoduro de potasio y 0,8 mL de HCl concentrado. Titular con el tiosulfato de sodio anteriormente preparado hasta coloración verde claro, si se gasta más de 2,5 mL de tiosulfato de sodio, repetir la titulación y adicionar dos gotas de almidón si es necesario.

$$F = \frac{20 * 0{,}01}{V * 0{,}01}$$

$$N = 0{,}01 * F$$

20.4. Procedimiento

1. La determinación se debe realizar por triplicado
2. Pesar en erlenmeyer de 100 mL 0,08g de aceite y forrar los recipientes con papel aluminio.
3. Agregar 8 mL de la solución ciclohexano: ácido acético 1:1, agitar
4. Adicionar 10 mL de solución de wijs.
5. Tapar con tapones y poner en la oscuridad durante 30 min a 25 ºC.
6. Destapar y agregar 8 mL de KI 15 %, mezclar y adicionar poco a poco 40 mL de agua previamente hervida y fría.
7. Titular con tiosulfato de sodio 0,1 N hasta desaparición del color amarillo.
8. Agregar 1 mL de almidón al 1% y continuar titulando hasta desaparición del color azul.
9. Realizar este procedimiento en la campana de extracción.

6.5. Cálculos. El índice de yodo se calcula a partir de la siguiente ecuación.

$$IW = \frac{12{,}69 \times N \times (V1 - V2)}{m}$$

Donde:
IW= índice de yodo de la muestra expresado en cg/g
V1 = volumen de solución de tiosulfato de sodio empleado en la titulación del blanco en mL
V2= volumen de solución de tiosulfato de sodio empleado en la titulación de la muestra en mL
N = normalidad de la solución de tiosulfato de sodio.
m = masa de la muestra analizada, en g

21. DISPOSICIÓN DE RESIDUOS QUÍMICOS Y/O BIOLÓGICOS

Disponer todos los residuos de la titulación en el recipiente número 1, que corresponde a solventes orgánicos halogenados.

BIBLIOGRAFÍA

AOAC 920.159. 18th ed. Gaithersburg, MD: the association, 2005. Iodine Absorption Number of Oils and Fats. En: Official Methods of Analysis.

DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE SAPONIFICACIÓN
Código de Guía: AC-02
GRUPO DE INVESTIGACIÓN ASUBAGROIN
UNIVERSIDAD DEL CAUCA. 2015

ASUBAGROIN
Aprovechamiento de Subproductos Agroindustriales
Grupo de Investigación - Unicauca

22. OBJETIVO

Establecer el procedimiento para la determinación del índice de saponificación en grasas y aceites animales o vegetales de acuerdo a la norma AOAC 920.160.

23. FUNDAMENTO

El índice de saponificación se define como el número de miligramos de hidróxido de potasio necesarios para saponificar un gramo de grasa, y es un valor inversamente proporcional al peso molecular de los ácidos grasos presentes en la grasa o aceite.

24. MATERIALES

Material	Cantidad*

Balón fondo plano de boca esmerilada	4
Condensador	4
manguera	8
Beaker de 500 mL	4
Bureta	1
Probeta de 50 mL	1
Pipeta aforada de 25 mL	1

*La cantidad que se presenta hace referencia a una muestra por triplicado

25. REACTIVOS

Reactivo	Cantidad*
Hidróxido de potasio (KOH) 4% (p/v) etanólico	100 mL
Fenolftaleína 1% (p/v)	5 mL
Etanol 95% pureza	100 mL
Ácido clorhídrico 0,5 N	250 mL
Carbonato de sodio	1 g

*La cantidad que se presenta hace referencia a una muestra por triplicado

26. EQUIPOS

Equipo	Cantidad*
Plancha de calentamiento	2
Balanza analítica	1
Soportes	4
Pinza tres dedos	4

*La cantidad que se presenta hace referencia a una muestra por triplicado

27. PROCEDIMIENTO

27.1. Toma de muestras

- Agitar la muestra para obtener una muestra representativa

27.2. Preparación de muestra

- Si la muestra es líquida y presenta aspecto claro y sin sedimento, homogeneizar y tomar la muestra.
- Si la muestra es líquida y presenta aspecto turbio o con sedimento o es sólida, calentar la muestra a 50°C hasta que alcance dicha temperatura, si el sedimento no desaparece filtrar, homogenizar y tomar la muestra.

27.3. Preparación de reactivos

- **Hidróxido de potasio (KOH) 4% (p/v) etanólica.** En un beaker pesar 4,705g de hidróxido de potasio (KOH), adicionar 60 mL de etanol y agitar con magneto hasta disolución total, transferir la solución anterior a un balón aforado de 100 mL, lavar el beaker utilizado con etanol, asegurándose de que no quede reactivo en este, transfiera los lavados al balón y completar el aforo con etanol.

- **Fenolftaleína 1%.** En un beaker pesar 1,0101g de fenolftaleína, adicionar 60 mL de etanol y agitar hasta disolución total, transferir la solución anterior a un balón aforado de 100 mL, lavar el beaker utilizado con etanol, asegurándose de que no quede reactivo en este, transferir los lavados al balón y completar el aforo con etanol, almacenar en un frasco ámbar con tapa (con gotero preferiblemente).

- **Ácido clorhídrico (HCl) 0,5 N.** Adicionar la cantidad de HCl concentrado (37 % o 12,07N) aproximada que se va a utilizar en un beaker y asegurarse de que el sobrante se deseche o se almacene en un frasco aparte, para evitar la contaminación del reactivo, con una pipeta graduada o la micropipeta de 10 mL tome 10,36 mL de HCl concentrado del beaker, adicione lentamente el volumen medido en un balón aforado de 250 mL que contenga agua destilada, completar hasta el aforo con agua destilada.

  - **Estandarización de HCl**

    1. Poner en una caja de petri aproximadamente 1 g de carbonato de sodio (Na_2CO_3).
    2. Secar por 1 hora a 110 ºC sacar y llevar a desecador hasta que alcance temperatura ambiente.
    3. Pesar en beaker de 100 mL 0,1 g de carbonato de sodio previamente seco.
    4. Adicionar 10 mL de agua destilada y 2 gotas de fenolftaleína.
    5. Titular con el ácido clorhídrico a estandarizar hasta desaparición del color rosa.
    6. Realizar el procedimiento por triplicado.
    7. Calcular la concentración del ácido a partir de la siguiente ecuación:

$$N\ HCl = \frac{g\ Na_2CO_3}{105{,}98\ g\ Na_2CO_3} \times \frac{1000}{mL\ HCl\ gastados}$$

27.4. Procedimiento

8. La determinación se debe realizar por triplicado
9. Pesar en un balón de fondo plano de boca esmerilada de 250 mL, 2,3000 g de muestra, con una aproximación de 0,01g.
10. Adicionar 25 mL de hidróxido de potasio al 4% etanólico.
11. Conectar a reflujo en baño maría 80 ºC durante una hora.

12. Desmonte y agregue inmediatamente 25 mL de etanol y 3 gotas de fenolftaleína al 1%.
13. Titular con HCl 0,5N hasta coloración amarilla.
14. Realizar blanco de reactivos.

27.5. Cálculos

El índice de saponificación se calcula a partir de la siguiente ecuación.

$$IS = \frac{(V1 - V2) \times N \times 56{,}1}{m}$$

Donde:
IS= índice de saponificación del producto, en mg/g.
V1 = volumen de solución de ácido clorhídrico empleado en la titulación del blanco, en mL
V2 = volumen de solución de ácido clorhídrico empleado en la titulación de la muestra, en mL.
N = normalización de la solución de ácido clorhídrico
m = masa de la muestra analizada, en g

28. DISPOSICIÓN DE RESIDUOS QUÍMICOS Y/O BIOLÓGICOS

Disponer todos los residuos de la titulación en el recipiente número 4 que corresponde a solventes orgánicos.

BIBLIOGRAFÍA

AOAC 920.160. 18th ed. Gaithersburg, MD: the association, 2005. Saponification value. Number of Oils and Fats. En: Official Methods of Analysis.