



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE BOGOTÁ

**EVALUACIÓN Y ESCALAMIENTO DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE
ACEITE DE AGUACATE UTILIZANDO TRATAMIENTO ENZIMÁTICO**

MARTHA CECILIA ACOSTA MORENO

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
BOGOTÁ, COLOMBIA
2011**

**EVALUACIÓN Y ESCALAMIENTO DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE
ACEITE DE AGUACATE UTILIZANDO TRATAMIENTO ENZIMÁTICO**

MARTHA CECILIA ACOSTA MORENO

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título
de:

Magister en Ingeniería Química

Director: ANGELICA PIEDAD SANDOVAL ALDANA
PhD. Ing. Química. Investigadora C.I. Nataima CORPOICA

Co-Director: MARTHA CECILIA QUICAZAN
MSc. Ing. Química. Docente ICTA Universidad Nacional de Colombia

Línea de Investigación:
Bioprocesos

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
BOGOTÁ, COLOMBIA
2011

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, (Mayo, 2011)

A Dios por permitirme vivir este momento de culminación. Y a todos sus ángeles que han llegado a mi vida y me han tendido una mano en el momento adecuado.

Resumen

En la fase inicial se llevó a cabo un proceso en laboratorio, donde se analizaron cinco variedades diferentes de aguacate, producidas y comercializadas en el departamento del Tolima. Las variedades de aguacate Lorena, Criollo, Santana, Choquette y Hass, se analizaron de acuerdo al contenido de grasa (Soxhlet), encontrándose que la variedad de aguacate de mayor contenido es la Hass (24,76% b.h.), se procedió a analizar y determinar los parámetros a los cuales se obtuvo el mayor rendimiento en el proceso de la extracción de aceite de aguacate, para ello se usaron tres enzimas comerciales compuestas principalmente por celulasas, hemicelulasas y pectinasas, utilizadas en la industria de alimentos, donde se alcanzó un rendimiento de 95,58%, aplicando agitación.

Palabras clave: aguacate, Hass, enzimas, celulasas, hemicelulasas, pectinasas.

Abstract

In the initial phase was conducted in the laboratory process, which analyzed five different varieties of avocado, produced and marketed in the department of Tolima. Lorena avocado varieties, Criollo, Santana, Choquette and Hass, were analyzed according to fat content (Soxhlet), and found that the variety of avocado is the Hass higher content (24.76% wb), was analyzed and determine the parameters to which the highest yield in the process of extracting avocado oil, for it was used three commercial enzymes composed mainly of cellulases, hemicellulases and pectinases, used in the food industry, which reached a performance at 95.58%, using agitation.

Keywords: avocado, Hass, enzymes, cellulases, hemicellulases, pectinases.

Tabla de contenido

RESUMEN	IX
LISTA DE TABLAS	XV
LISTA DE FIGURAS	XVII
INTRODUCCIÓN	1
1. OBJETIVOS.....	5
1.1 Objetivo general	5
1.2 Objetivos específicos	5
2. MARCO TEÓRICO	7
2.1 Producción y comercialización del aguacate	7
2.2 Características generales del aguacate	10
2.2.1 Clasificación botánica	10
2.2.2 Razas del Aguacate	12
2.2.3 Variedades comerciales.....	12
2.2.4 Propiedades Nutritivas.....	15
2.2.5 Maduración del Aguacate.....	17
2.2.6 Daños por oxidación del fruto de aguacate.....	17
2.3 Generalidades del aceite de aguacate	18
2.3.1 Caracterización y composición del aceite de aguacate.....	18
2.3.1.1 Presencia de ácidos grasos saturados, insaturados y poliinsaturados.....	18
2.3.1.2 Propiedades físicas.....	21
2.3.1.3 Propiedades químicas.....	21
2.3.2 Comparación con otros aceites comestibles.....	23
2.4 Técnicas de extracción del aceite de aguacate.....	26
2.4.1 Extracción con solventes.....	26
2.4.2 Centrifugación.....	27
2.4.3 Extracción por prensado en frío.....	28

2.4.4	Extracción con fluidos supercríticos.....	29
2.4.5	Extracción por medio físico – mecánico con enzimas en frío.....	30
2.5	Aplicación de enzimas industriales para la extracción del aceite de aguacate	31
2.5.1	Importancia y clasificación de las enzimas hidrolasas.....	31
2.5.2	Principales enzimas que se relacionan con los cambios de textura en frutas y vegetales.....	31
3.	METODOLOGÍA.....	35
3.1	Análisis preliminar en laboratorio	35
3.1.1	Selección de materia prima.....	36
3.1.2	Recolección y transporte de la materia prima seleccionada.....	38
3.1.3	Estado de madurez de los frutos.....	39
3.1.4	Acondicionamiento de la pulpa de aguacate.....	40
3.1.5	Adecuación de pH.....	40
3.1.6	Extracción del aceite de aguacate utilizando tratamiento enzimático.....	40
3.1.7	Separación por centrifugación.....	43
3.1.8	Actividad experimental de las enzimas comerciales sobre el sustrato.....	43
3.2	Análisis y desarrollo en planta piloto.....	43
3.2.1	Selección de materia prima.....	44
3.2.2	Estado de madurez de los frutos.....	44
3.2.3	Acondicionamiento de la pulpa de aguacate.....	44
3.2.4	Adecuación del pH.....	45
3.2.5	Extracción del aceite de aguacate utilizando tratamiento enzimático.....	45
3.2.6	Separación por centrifugación.....	45
3.3	Evaluación de las características del aceite de aguacate	47
3.3.1	Parámetros fisicoquímicos medidos al aceite obtenido.....	47
3.3.2	Determinación del perfil de ácidos grasos.....	47
4.	RESULTADOS	49
4.1	Análisis preliminar en laboratorio	49
4.1.1	Selección de materia prima.....	49
4.1.2	Recolección y transporte de la materia prima seleccionada.....	50
4.1.3	Estado de madurez de los frutos.....	50
4.1.4	Acondicionamiento de la pulpa de aguacate.....	51
4.1.5	Extracción del aceite de aguacate utilizando tratamiento enzimático.....	52
4.1.6	Separación por centrifugación.....	54
4.1.6.1	Enzima 1.....	54
4.1.6.2	Enzima 2.....	55
4.1.6.3	Enzima 3.....	56
4.1.7	Actividad experimental de las enzimas comerciales sobre el sustrato.....	58

4.2	Análisis y desarrollo en planta piloto.....	60
4.2.1	Selección de materia prima.....	60
4.2.2	Estado de madurez de los frutos.	60
4.2.3	Acondicionamiento de la pulpa de aguacate.....	60
4.2.4	Adecuación de pH.....	62
4.2.5	Extracción del aceite de aguacate utilizando tratamiento enzimático.....	62
4.2.6	Separación por centrifugación	63
4.2.7	Balances de materia y rendimientos del proceso.....	64
4.2.7.1	Balance de materia para operación manual de despulpado	64
4.2.7.2	Balance de materia en despulpadora	65
4.2.7.3	Balance de materia para marmita.	65
4.2.7.4	Balance de materia para centrifuga	66
4.2.7.5	Rendimiento total	66
4.2.8	Proceso propuesto en la extracción de aceite de aguacate en planta piloto.....	67
4.2.9	Evaluación económica del proceso.....	68
4.3	Evaluación de las características del aceite de aguacate	71
4.3.1	Extracción por solvente, método Soxhlet.	71
4.3.2	Características fisicoquímicas del aceite de aguacate obtenido.	73
4.3.3	Determinación del perfil de ácidos grasos.	73
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	77
5.1	Conclusiones.....	77
5.2	Recomendaciones	79
	BIBLIOGRAFÍA	81
	ANEXOS	89

Lista de tablas

TABLA 2-1: Características de las variedades de aguacate comerciales en el Tolima.....	9
TABLA 2-2: Proyecciones gubernamentales sobre el cultivo de aguacate	10
TABLA 2-3: Composición química aproximada de la pulpa del aguacate.	12
TABLA 2-4: Características de variedades de aguacate de importancia en Colombia.	13
TABLA 2-5: Composición de ácidos grasos (% p/p) para aceite de aguacate.	21
TABLA 2-6: Propiedades físicas y químicas del aceite de aguacate.....	23
TABLA 2-7: Caracterización fisicoquímica de dos aceites comestibles.	25
TABLA 2-8: Composición aceite de aguacate y oliva por la compañía The Grove.....	25
TABLA 3-1: Escala de análisis de comparación de pares.....	36
TABLA 3-2: Resultados respecto a los criterios de evaluación	36
TABLA 3-3: Valoración de los criterios de selección.	37
TABLA 3-4: Determinación del vector principal.....	38
TABLA 3-5: Características de ayudante de cocina.	40
TABLA 3-6: Características de las enzimas comerciales utilizadas en el proceso de extracción de aceite de aguacate en el presente estudio.....	41
TABLA 3-7: Recomendaciones de las casas comerciales para el uso de las enzimas.....	42
TABLA 3-8: Factores estudiados.....	42
TABLA 3-9: Características del equipo de despulpado.....	44
TABLA 3-10: Características del equipo para proceso de hidrólisis enzimática.	45
TABLA 3-11: Características del equipo de separación.	46
TABLA 4-1: Características de las variedades comerciales de aguacate seleccionadas	49
TABLA 4-2: Grado de textura de los aguacates utilizados en el laboratorio después de su cosecha.....	51
TABLA 4-3: Modelo estadístico para el rendimiento en la extracción de aceite de aguacate.....	53

TABLA 4-4: Modelo estadístico ajustado para el rendimiento en la extracción del aceite de aguacate.....	54
TABLA 4-5: Resumen de condiciones estables de las enzimas y sus rendimientos.....	58
TABLA 4-6: Valor de la actividad experimental de las enzimas comerciales	592
TABLA 4-7: Rendimientos del proceso de extracción del aceite de aguacate en planta piloto	67
TABLA 4-8: Condiciones de operación.	68
TABLA 4-9: Descripción de corrientes.	68
TABLA 4-10:Costo total de aguacate	69
TABLA 4-11:Costo agua de lavado y desinfección	69
TABLA 4-12:Costo agua de proceso	69
TABLA 4-13:Costo de enzima	69
TABLA 4-14:Costo de energía de los equipos utilizados	702
TABLA 4-15:Costo mano de obra	70
TABLA 4-16:Cantidad y costo de los envases	70
TABLA 4-17:Otros costos.....	70
TABLA 4-18:Costo total del aceite	71
TABLA 4-19:Comparación de precios de aceite de aguacate en diferentes países.....	71
TABLA 4-20:Resultados de características físicas y químicas del aceite de aguacate	73
TABLA 4-21:Perfil de ácidos grasos (mg ácido graso/g grasa) del aceite de aguacate de las diferentes variedades.....	74

Lista de figuras

FIGURA 2-1: Descripción del fruto del aguacate.....	11
FIGURA 2-2: Aguacate Variedad Hass.	14
FIGURA 2-3: Principales representantes de las familias de los ácidos grasos omega -3 y omega - 6.	19
FIGURA 2-4: Mecanismo de reacción de las pectinasas.	33
FIGURA 3-1: Medición de la textura del aguacate	39
FIGURA 3-2: Montaje para la separación de aceite	46
FIGURA 4-1: Variedades de aguacate en el departamento del Tolima seleccionadas para el proceso de extracción de aceite de aguacate en laboratorio	50
FIGURA 4-2: Pasos de acondicionamiento de la pulpa de aguacate.	52
FIGURA 4-3: Superficie de respuesta para el rendimiento en la extracción del aceite de aguacate con la enzima 1.....	55
FIGURA 4-4: Superficie de respuesta para el rendimiento en la extracción del aceite de aguacate con la enzima 2.....	56
FIGURA 4-5: Superficie de respuesta para el rendimiento en la extracción del aceite de aguacate con la enzima 3.....	57
FIGURA 4-6: Determinación experimental de la actividad enzimática de las enzimas comerciales respecto al sustrato	59
FIGURA 4-7: Seguimiento de la madurez por color del aguacate variedad Hass	60
FIGURA 4-8: Aguacate Hass utilizado en el proceso de extracción.....	61
FIGURA 4-9: Despulpado del aguacate.	62
FIGURA 4-10:Hidrólisis enzimática en marmita	63
FIGURA 4-11:Aceite de aguacate obtenido tras el proceso de separación.	64
FIGURA 4-12:Diagrama operaciones propuesto para la extracción del aceite de aguacate.	67
FIGURA 4-13:Contenido de grasa de las variedades de aguacate por método Soxhlet (b.h).....	72
FIGURA 4-14:Perfil de ácidos grasos insaturados (mg ácido graso/g grasa) del aceite de aguacate.....	75
FIGURA 4-15:Perfil de ácidos grasos saturados (mg ácido graso/g grasa) del aceite de aguacate.....	76

Introducción

El estilo de vida de las personas ha venido cambiando drásticamente, el sedentarismo y el consumo de alimentos poco saludables han ocasionado el aumento de enfermedades cardiovasculares. Bajo estos aspectos se han buscado alternativas alimentarias para el cuidado de la salud, entre ellos los alimentos naturales con el mínimo aporte de carbohidratos y grasas saturadas, por ejemplo, el aceite de oliva que gracias a sus propiedades presenta una alta demanda nacional. Se ha observado que el consumo del aceite de oliva en Colombia ha aumentado durante los últimos años: en 1998, las importaciones fueron de 766,2 t y en el año 2002 alcanzaron las 1600 t. En algunos países como Perú y Chile avanza la industrialización del aceite de aguacate como una opción para competir con el aceite de oliva dadas sus características físicas y organolépticas.

Colombia tiene una extensión de 114'174.800 hectáreas, excluyendo las áreas marítimas, ésta área representa alrededor del 0,7% de la superficie continental en el mundo. Los expertos calculan que el país posee en esta área el 10,4% de la biodiversidad mundial, lo que señala a Colombia como un país "megadiverso".

El mercado mundial es dominado por especies producidas en zonas templadas como manzana, pera, ciruela, cereza, aguacate, entre otras; o especies de las regiones subtropicales como los cítricos. La producción de estos cultivos se realiza en países desarrollados del hemisferio norte o en países con una gran tradición frutícola del hemisferio sur como Brasil, Argentina, Chile o Sudáfrica. La única fruta tropical que compite en el mercado es el banano en el cual Colombia posee un lugar destacado en su producción.

Colombia presenta condiciones altamente favorables para un desarrollo frutícola en el mediano y largo plazo, comparable al desarrollo de la floricultura en el altiplano Cundiboyacense. En este contexto, los Llanos Orientales, Arauca, Casanare, Meta y Tolima, poseen condiciones de clima, suelo, infraestructura vial y disponibilidad de talento humano que le permiten buscar un espacio importante en el mercado de frutas como alternativa que contribuya al desarrollo agrícola.

Del total del área cultivada en frutas en Colombia, el aguacate ocupa un alto porcentaje de aproximadamente el 8,8% correspondiente a 17.084 Ha. Colombia aunque se ubica en la quinta posición en área destinada para el cultivo de aguacate por debajo de Chile, es el cuarto en producción, y es de destacar que el rendimiento de producción lleva al país a estar en segundo lugar a nivel mundial con 10 t/Ha, por debajo de Israel y superando a los grandes productores y exportadores mundiales. Durante los años 1996 y 2005 se observó un aumento de aproximadamente el 6,3% en el rendimiento de la producción nacional, a partir de entonces se han hecho proyecciones de rendimiento del 12,7% para el año 2015 y 13,54% para el año 2019.

Desde el año 2005, el gobierno nacional, ha venido incentivando el cultivo de aguacate variedad Hass en diferentes zonas del país como Antioquía, Huila, Boyacá y Tolima. Estos cultivos en principio estarían encaminados a fortalecer la exportación ya que por sus características organolépticas y su largo tiempo de maduración y conservación es la más comercializada y conocida en el mundo.

El estudio de las características y bondades del fruto han llevado a generar tecnologías que conducen su aprovechamiento en una diferente gama de subproductos, entre los que se encuentran; puré, helado, jugo desarrollados por México y Chile principalmente, y la extracción del aceite desarrollado industrialmente en Nueva Zelanda, México y Chile.

El aguacate, dependiendo de la variedad y madurez alcanza en la pulpa niveles de hasta 25% (b.h.) de aceite, con valores promedios de 17- 19% (b.h.), lo que permite lograr rendimientos de alrededor de 10% de fruta fresca. Este aceite contiene un alto nivel de ácidos grasos insaturados. El aceite de aguacate se ha utilizado principalmente para uso cosmético, ya que contiene un fitoesterol, que posee las mismas habilidades que la lanolina, principalmente por la alta estabilidad y su contenido en vitamina E (alfa-tocoferol). Esta particularidad es muy apropiada para la piel y cremas de masajes.

Sin embargo, la tendencia es a utilizar en forma creciente el aceite de aguacate para uso culinario, por tener entre otras cualidades: un alto punto de humo, excelente sabor y color verde muy atractivo, siendo preferido por la alta gastronomía europea. El aceite de aguacate es una excelente alternativa para sustituir el aceite de oliva ya que es muy similar por ser rico en grasas no saturadas, antioxidantes, vitamina E y baja acidez.

Existen diferentes técnicas para la extracción del aceite de aguacate en la industria, como lo son; extracción con solventes, y fluidos supercríticos, por lo que se usan en la industria cosmética; extracción por prensado, centrifugado y enzimático combinado con procesos mecánicos para

industria alimentaria, este último se ha desarrollado principalmente a nivel de laboratorio y siguen sus investigaciones para su desarrollo industrial.

Aunque Colombia como ya se mencionó, es uno de los principales productores de aguacate en el mundo, existe una baja investigación sobre el fruto y sus subproductos, existen algunos desarrollos como tesis a nivel laboratorio de la Universidad de los Andes donde estudiaron el rendimiento del proceso de extracción de aceite de aguacate por prensado en frío, y la Universidad Nacional donde se desarrollo el proceso por medio enzimático. El C.I. Corpoica Nataima del departamento del Tolima desarrolló ésta investigación en el laboratorio, para caracterizar y determinar el rendimiento de aceite de aguacate para las diferentes variedades del departamento. En este sentido el proceso de extracción más cercano industrialmente es el prensado en frío en el cual se logra rendimientos aproximados del 12% (b.h) en frutos de aguacate que contienen el 18% (b.h) de grasa, por lo general a este proceso se aplican operaciones posteriores como la refinación, blanqueado y desodorización que causa la pérdida de elementos de importante valor nutricional como fenoles, antioxidantes y vitaminas.

Teniendo en cuenta las condiciones favorables de Colombia, en cuanto a la alta producción de aguacate, clima y suelo que favorecen el desarrollo de sus cultivos, el interés de industrializar el fruto y las investigaciones planteadas en diferentes proyectos se puede afirmar que la producción de aceite de aguacate es favorable. El aprovechamiento de este potencial y la implementación de procesos de extracción permitirán la obtención y comercialización interna de un aceite tipo gourmet, similar al aceite de oliva. La producción de este aceite no solo satisface las necesidades actuales de los consumidores, sino que al mismo tiempo incentiva la mano de obra campesina.

La presente investigación buscó establecer un proceso de extracción del aceite de aguacate en frío con el uso de diferentes preparados enzimáticos comerciales como alternativa de industrialización del fruto de aguacate, originando productos viables y benéficos para el consumo humano; para ello se evaluó y seleccionó las variedades de aguacate del departamento del Tolima que presentan un alto contenido de grasa, una alta relación en peso de pulpa respecto a la cáscara y la semilla, una disponibilidad constante y un costo competitivo en el mercado: por ello se seleccionaron las variedades de Choquette, Criollo, Santana, Lorena y Hass. Luego se establecieron los aspectos críticos en la preparación y conservación de la pulpa. Se evaluaron tres enzimas comerciales de las cuales se seleccionó la que permitía mayor rendimiento en la extracción del aceite, la cual se utilizó en el proceso en planta piloto, donde se lograron altos rendimientos de extracción hasta 84,57%. El producto final es un aceite extravirgen de color verde intenso, con aroma y sabor característico.

Las propiedades evaluadas en el producto final de calidad y composición de ácidos grasos confirman que es un producto de características benéficas y que cumple con los requisitos para ser comercializado, además que es un producto de mayor valor agregado del fruto de aguacate. También es de resaltar que el proceso de extracción del aceite utilizando enzimas y en frío permite un desarrollo tecnológico para la agroindustria e implementa un proceso limpio que favorece la protección del medio ambiente, pues se aumenta el rendimiento, respecto a los procesos usados, donde se implementan medios mecánicos y físicos.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Establecer un proceso de extracción del aceite de aguacate en frío con el uso de diferentes preparados enzimáticos comerciales.

1.2 Objetivos específicos

A. Evaluar y seleccionar la/las variedades de aguacate que presenten mayor rendimiento respecto a los siguientes aspectos; Contenido de grasa, relación de pulpa y semilla, disponibilidad y costo del fruto en el mercado.

B. Evaluar entre tres a cuatro preparados enzimáticos comerciales que permitan una alta eficiencia en la extracción del aceite de aguacate.

C. Caracterizar la calidad del aceite obtenido por el proceso de hidrólisis enzimática para la/las variedades seleccionadas con respecto a las Normas Técnicas Colombianas ICONTEC, para aceites comestibles. (NTC 258).

D. Evaluar el proceso estudiado a nivel de planta piloto.

2. Marco teórico

La importancia del aguacate ha crecido en el mercado internacional de forma sostenida, dejando de ser una fruta exótica para incorporarse en la dieta de muchos países. Esta tendencia se ha reforzado por el valor que actualmente tiene el consumo de productos naturales. La importancia económica del aguacate se ve favorecida por sus propiedades nutritivas y la alta aceptación de la que goza en el mercado en países productores y no productores.

2.1 Producción y comercialización del aguacate

En el año 2005 la producción de aguacate en Colombia, registró un incremento del 6,9% en relación con el año 2004, manteniendo el crecimiento sostenido que este sector ha mostrado desde el año 2000. En el medio internacional el mayor crecimiento durante el año 2005 lo alcanzó Estados Unidos con 51,8%, gracias a los mayores niveles de productividad. Israel es otro proveedor de importancia de la fruta a nivel mundial y fue el segundo en el crecimiento de producción con 16,9%, México tercero con 11,4% y Chile apenas creció, en 1,8% [Velásquez, 2006].

En términos de valor de la producción, Colombia ocupa el cuarto lugar a nivel mundial, estimándose ésta por parte de la FAO en 119,4 millones de dólares, por debajo de Estados Unidos, Indonesia y México, en el año 2005 con un valor de producción de 668,6 millones de dólares. Para los siguientes años se prevé un aumento de la producción gracias al aumento de la demanda tanto doméstica como en el mercado mundial, confirmándose así la consolidación de este renglón en el escenario comercial de las frutas en general, dejando de ser una fruta exótica entre las tropicales y subtropicales para engrosar la lista de las de mayor consumo actual y futuro a nivel mundial [Velásquez, 2006].

Por lo anterior resulta importante observar el comportamiento histórico de la producción en los principales países productores y algunos competidores futuros de Colombia en el mercado mundial de esta fruta. En primer lugar está México, mayor productor y exportador mundial. Su producción aumento

17,8% al pasar de 837,8 mil toneladas en 1996 a 987 mil toneladas en el año 2005. Chile mostro un crecimiento de 17,1% en el periodo 1996-2005, estabilizándose en los últimos dos años, y sus perspectivas futuras dependerán de la respuesta que los chilenos le den a la pérdida de buena parte de sus exportaciones hacia los Estados Unidos y a los avances que logren en la conquista de nuevos mercados [Velásquez, 2006].

Colombia por su parte registra para el mismo periodo un crecimiento del 63% al aumentar la producción desde 114 mil toneladas en el 1996 a 185 mil toneladas al año 2005, el último año con un crecimiento importante del 6,9% respecto al inmediatamente anterior.

Es de resaltar que siendo Colombia el cuarto productor mundial no presenta exportaciones de aguacate y por el contrario figura como importador, especialmente de Venezuela y Ecuador.

Respecto al área cultivada, Colombia ocupa una importante posición, quinto en el mundo, por debajo de Chile, al cual Colombia supera en producción. México es el país que más área tiene destinada a la producción de aguacate con 100.000 hectáreas, mientras Colombia tiene 17.084 hectáreas.

En cuanto a rendimientos en toneladas producidas por hectárea, Colombia tiene lugar preponderante a nivel mundial, ocupando el segundo lugar con 10 t/Ha. (promedio de las variedades comerciales a nivel nacional), después de Israel, pero superando a todos los grandes productores y exportadores mundiales. [Velásquez, 2006].

El problema de las exportaciones de aguacate de Colombia, radica básicamente en los requisitos de ingreso exigidos para el producto en los países consumidores, ya que una gran cantidad de producto no cumple con las condiciones apropiadas. El Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, considera el aguacate como fruta “exportable con condición”, es decir que su potencial como producto exportable está sujeto a la superación de las siguientes limitaciones:

- Lograr admisibilidad en el mercado de los Estados Unidos.
- Desarrollar un sistema de trazabilidad para su ingreso al mercado de la Unión Europea.
- Transferir la tecnología necesaria para el cultivo de las variedades exportables: Hass, Lorena, Booth 7, Booth 8, Trinidad y Santana.
- Desarrollar estrategias de mercado que permitan competir con México y Chile.

El aguacate es un producto considerado prioritario y por ello ha sido incluido en la propuesta de Agenda Interna de Productividad y Competitividad y en la Visión 2019 de Colombia.

Sobre el total de 17.084 Ha, destinadas a la producción de aguacate en Colombia, para el año 2004 la producción ascendió a 173.800 t, 7% más que en 2003, destacándose como uno de los mayores productores del mundo. El departamento de Bolívar presentó el mayor volumen de producción nacional con 70.500 t, producidas en un área de 4582 Ha, seguido por los departamentos de Santander con 35.600 t, Tolima con 20.700 t y Cesar con 14.300 t. Posteriormente están los departamentos Valle del Cauca y Antioquia, con una producción de 6.800 t de producción. De otra parte, Las regiones que registran el mayor volumen de compras son Cundinamarca, Bogotá, Medellín y Cali [Velásquez, 2006].

La tabla 2-1 muestra los datos descritos, para las variedades más comerciales, no se toman en cuenta las variedades de aguacate, que por su baja producción no son comercializadas a nivel nacional y que son usadas para el consumo en veredas.

Tabla 2-1: Características de las variedades de aguacate comerciales en el Tolima.

Variedades de aguacate	% (p/p) grasa (b.h.).	Disponibilidad en mercado por cosecha. *	Costo** (pesos)/ kg	% (p/p) pulpa	% (p/p) pérdidas poscosecha
Hass	21,29	Alta	1900	72	35,00
Choquette	18,09	Media	1800	72	40,00
Fuerte	15,31	Baja	1800	74	40,00
Lorena	14,72	Media	1800	82	40,00
Aguatillo	14,43	Baja	1700	72	40,00
Santana	13,20	alta	1800	76	40,00
Timbelio	12,22	Baja	1900	70	40,00
Calabacito	11,76	Baja	2000	72	40,00
Tegua	10,56	Baja	1650	72	40,00
Criollo ó Común	9,98	Alta	1800	76	30,00
Pescuezon	9,47	Baja	1900	71	40,00

* Baja: menos de 3 t/Ha. Media: entre 3 y 10 t/Ha. Alta: Mayor de 10 t/Ha.

** Costo por kilogramo para la cosecha entre enero y febrero del 2008.

Fuente: [Corpoica, 2008]

Las proyecciones gubernamentales sobre el cultivo del aguacate son optimistas. De acuerdo con Planeación Nacional (tabla 2-2), para el año 2010 se esperaba lograr una producción de 238.000 t procedentes de

20.000 Ha dedicadas al cultivo de la fruta, lo que arrojaría para entonces un rendimiento de 11,84 t/Ha y para el año 2015 un rendimiento de 12,7 t/Ha. Estas proyecciones son resultado del trabajo de construcción de Agenda Interna y de Visión 2019.

Tabla 2-2: Proyecciones gubernamentales sobre el cultivo de aguacate

<i>AGUACATE</i>	<i>2006</i>	<i>2010</i>	<i>2015</i>	<i>2019</i>	<i>Relación 2019/2006</i>
Área (Ha)	16.235	20.110	25.938	29.605	13.370
Producción (t)	181.822	238.035	328.989	400.780	218.958
Rendimiento (t/Ha)	11,20	11,84	12,68	13,54	2,34

Fuente: DNP visión 2019 y cálculos MADR.

2.2 Características generales del aguacate

El aguacate al igual que los demás frutos está compuesto por una estructura vegetal. De su conocimiento depende en gran parte el planteamiento de una estrategia que permita procesar el fruto sin causar daños al producto de importancia.

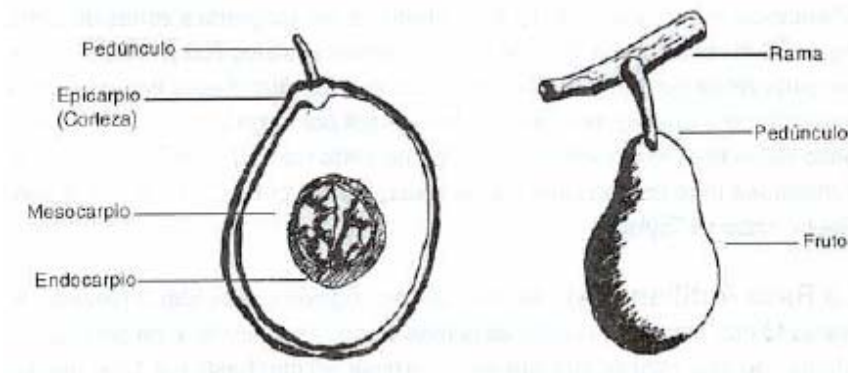
2.2.1 Clasificación botánica

Nombre científico: *Persea gratissima gaertn*, también llamado *Persea americana*.

Nombres vulgares: Avocado en Inglés; Aguacate en español; Abacate en portugués; Avogado o avocado en alemán.

El fruto del aguacate es una baya que posee un endocarpio delgado y un mesocarpio carnoso y oleaginoso, rodeado del epicarpio que puede ser de textura lisa o rugosa, se sostiene a la rama por su pedúnculo, que sobresale del fruto, como se puede observar en la figura 2-1. El aguacate posee tamaño, formas y colores diferentes, según la variedad, predominando las formas; ovalada, cónica, ovoide, redonda y periforme. El color dominante es el verde en diferentes tonalidades tales como brillante, claro, oscuro y amarillento. Cada fruto contiene en su cavidad central una semilla de forma variada, predominando la redonda y la cónica; su color se caracteriza por presentar diferentes tonalidades entre café y negro [PROHACIENDO, 2001].

Figura 2-1: Descripción del fruto del aguacate



Fuente: [PROHACIENDO, 2001]

El cultivo del aguacate se produce adecuadamente en latitudes de 35 a 40 ° y desde el nivel del mar hasta los 2200 msnm. Se requieren que los suelos sean pesados o arcillosos, también es necesario un buen drenaje para asegurar el desarrollo normal del cultivo, puesto que cualquier encharcamiento puede fomentar la presencia de enfermedades radiculares. La propagación del aguacate se hace por injerto para asegurar una fiel reproducción de la variedad, una producción rápida y un parejo desarrollo del cultivo. El mejor patrón que se consigue en Colombia es el criollo o común que se ha adaptado por muchos años a zonas cafeteras y a las áreas bajas cálidas (Sierra Nevada de Santa Marta, Serranía de San Jacinto, Mariquita, Tumaco), que por su rusticidad y adaptación a varias clases de suelos y a diferentes climas, es el más usado en el desarrollo de cultivos comerciales [ATEHORTUA, 1975].

El aguacate tiene todos los elementos nutritivos: glúcidos, proteínas, vitaminas, sales minerales, agua y principalmente lípidos. Se dice que es fisiológicamente asimilable, y su grasa es de composición similar a la del aceite de oliva; alrededor del 95% es digerible y por consiguiente no se deposita en el tejido graso del cuerpo [MADR, 2002].

La calidad de las grasas que se encuentran en el aguacate es buena, ya que son mono insaturadas, como las de los ácidos grasos de las aceitunas, las cuales hacen disminuir el colesterol dañino (LDL) y aumentan el saludable (HDL). El contenido de ácidos grasos saturados varía entre 10,1% y 12,3% (colesterol dañino), mientras que el contenido de ácidos grasos no saturados está entre el 87,7% y el 90%, respecto al peso de la pulpa. En la tabla 2-3 se resumen la composición química aproximada de la pulpa del aguacate colombiano [Atehortua, 1975; Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 1982].

Tabla 2-3: Composición química aproximada de la pulpa del aguacate.

Parte comestible	60%
Calorías	127
Agua	79.7 g
Proteína	1.6 g
Grasa	13.3 g
Carbohidratos	3.0 g
Fibra	1.6 g
Cenizas	0.8 g
Calcio	10 mg
Fósforo	40 mg
Hierro	0.4 mg

Fuente: [Federación Nacional de Cafeteros, 1982]

2.2.2 Razas del Aguacate.

Según las características físicas del aguacate, se han identificado tres razas de acuerdo a su lugar de origen:

- Raza mexicana: provienen de la zona central de México, son árboles altos que se adaptan fácilmente al clima frío (hasta 2800 msnm.) pero la altura óptima es 1000 y 1500m. Sus frutos maduran 7 meses después de la floración, de color verde claro y con un peso entre 90 y 180 gramos.
- Raza guatemalteca: proviene de las tierras altas de Guatemala, árbol de gran tamaño los cuales están adaptados a clima medio (700 y 1500 msnm). Sus frutos maduran 10 meses después de la floescencia. El tamaño del fruto es relativamente grande (125 a 2500 gramos) y posee un color verde opaco.
- Raza antillana: se cree que es originario de la Sierra Nevada de Santa Marta por lo que es la más común en nuestro país. Estas plantas son cultivadas desde el nivel del mar hasta una altura de 1200 msnm. Sus frutos maduran entre 5 a 8 meses después de la floescencia de color verde claro a amarillo rojizo y de peso entre 250 y 2500 gramos [PROHACIENDO, 2001].

2.2.3 Variedades comerciales.

Las variedades comerciales más cultivadas en Colombia, además de las llamadas criollas, pertenecen a las razas antillana y guatemalteca y los cruces entre ellas.

En el país se conocen catorce variedades de aguacate, cuyas características físicas y químicas se resumen en la tabla 2-4:

Tabla 2-4: Características de variedades de aguacate de importancia en Colombia.

Variedad	Raza	Corteza	Forma del fruto	Adaptación - altitud	Peso (g)	Corteza (%)	Pulpa (%)	Semilla (%)	Grasa (%) (b.h.)
Booth 7	Guat x Ant	Verde brillante con apariencia áspera	Redonda ovoidal	0 - 1200	300 - 570	10.6	70.5	18.9	10.5
Booth 8	Guat x Ant	Verde mate, con apariencia áspera	Oblonga ovoide	0 - 1800	360-800	12.0	72.5	15.5	9.0
Choquette	Guat x Ant	Verde oscura rojiza, correosa	Ovalada	0 - 1500	680-1130	3.0	80.0	17.0	13.0
Collinred	Guat x Ant	Verde amarronada, rugosa	Periforme	0 - 1600	500-600	8.0	79.0	13.0	5.0
Collinson	Guat x Ant	Verde oscura, lisa	Ovoide elíptica	0 - 1200	470-600	5.5	83.0	11.5	13.0
Fuerte	Guat x Mex	Verde mate, correosa	Periforme	1200 - 1800	250-450	11.0	74.0	15.0	24.0
Hass	Guat	Púrpura (maduro), correosa, rugosa	Periforme / ovoide	1200 - 2000	170-400	8.5	72.0	11.5	17.8
Lorena	Ant	Verde amarillenta, lisa	Oblonga	400 - 1400	430-750	2.9	87.2	9.9	8.2
Lula	Guat x Ant	Verde clara, punteada, rugosa	Periforme	0 - 1500	400-680	9.5	70.0	20.5	7.0
Monroe	Guat x Ant	Verde oscura, lustrosa	Ovalada	800 - 1600	680-1360	7.7	78.0	14.3	12.0
Ruehle	Ant	Verde brillante, lisa	Periforme	0 - 1200	280-570	6.1	81.7	12.2	11.7
Santana	Ant	Verde amarilla fuerte lisa	Cónica	0 - 1400	340-680	9.0	71.0	20.0	7.0
Trinidad	Guat x Ant	Verde oscura, papilada	Ovoide	0 - 1800	440-560	9.5	76.1	14.4	15.0
Criollo común	Ant	Verde clara, lisa	Ovalada	0 - 1200	400 - 800	8.8	72.3	18.9	7.0

Guat.: Guatemalteca. Ant.: Antillana. Mex.: Mexicana.

Fuente: [PROHACIENDO, 2001]

El fruto más conocido y consumido en Colombia es la variedad Criollo o Común, es un fruto de cuello largo, de cáscara lisa y bajo contenido de aceite. Tiene diferentes nombres dependiendo de su forma, color y sitio de producción. Algunos tipos de aguacate son de excelente producción, presentación y sabor, pero en general la calidad del aguacate común es muy irregular y normalmente tiene un alto contenido de fibra, además de

semilla grande, la producción es tardía y sus árboles son altos lo que dificulta su recolección. La variedad de aguacate Criollo es la variedad utilizada para el desarrollo de los híbridos de las diferentes variedades en el país, gracias a su adaptación en los diferentes pisos térmicos de la región nacional. Los híbridos y las variedades mejoradas son precoces, sus frutos son de buena calidad porque no tienen fibra, sus semillas son pequeñas y el contenido de aceite es alto [PROHACIENDO, 2001].

Uno de estos híbridos es la variedad Hass (figura 2-2) [Federación nacional de cafeteros de Colombia, 1982]. Esta variedad fue originada en la Hebra Heights, California, registrada en 1932. Principal cultivo en el mundo, las características del árbol le permiten dar bastante producción, es auto fértil, aunque se recomienda como polinizador el aguacate variedad Fuerte, sus frutos son de tamaño pequeño, su peso oscila entre 150 a 400 g forma ovoide periforme, la cáscara es rugosa, de color verde que en estado de madurez consumible se torna de color morado intenso, el contenido de grasa de este fruto es de 17 a 21% en base húmeda, en Colombia se cultiva en climas fríos en alturas de 1800 a 2600 msnm, la relación en peso de cáscara: semilla: pulpa es 8,5:11,5; 70% respectivamente. Tiene la piel negra, rugosa y gruesa. Su pulpa es abundante y de color verde claro; la semilla es pequeña. Es la primera variedad del mundo, en cuanto al volumen de producción y comercialización. Ello es debido a su alto nivel de productividad, excelente calidad de la pulpa y a su tardía época de maduración; además, hay que indicar que el fruto puede mantenerse bastante tiempo en el árbol sin disminuir apreciablemente su calidad y se comporta bien en el transporte debido a su corteza tosca y gruesa, y los parámetros de calidad para la exportación del fruto están referidos a esta variedad [PROHACIENDO, 2001].

Figura 2-2: Aguacate Variedad Hass.



Fuente: [Aguacate, 2009]

En lo que respecta a la temperatura, las variedades tienen un comportamiento diferente de acuerdo con la raza. La raza Antillana es poco resistente al frío mientras que las variedades de la raza Guatemalteca son más resistentes y las Mexicanas, las que presentan mayor tolerancia al frío.

En cuanto a precipitación, se considera que 1200 milímetros anuales bien distribuidos son suficientes. Sequías prolongadas provocan la caída de las hojas, lo que reduce el rendimiento; el exceso de precipitación durante la floración y fructificación, reduce la producción y provoca la caída del fruto. El factor precipitación condiciona las horas luz, por ello, es importante que la zona donde se vaya a establecer el cultivo tenga por lo menos un promedio de 1.500 horas luz/año [Agrocadenas Oleoginosas de Colombia, 2009].

El viento produce daño, rotura de ramas, caída del fruto, especialmente cuando están pequeños. También, cuando el viento es muy seco durante la floración, reduce el número de flores polinizadas y por consiguiente de frutos.

El exceso de humedad relativa puede ocasionar el desarrollo de algas o líquenes sobre el tallo, ramas y hojas o enfermedades fúngicas que afecten el follaje, la floración, la polinización y el desarrollo de los frutos. Un ambiente muy seco provoca la muerte del polen con efectos negativos sobre la fecundación y con ello la formación de un menor número de frutos [Bernal, 2008].

2.2.4 Propiedades Nutritivas.

La Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para Europa, está dedicada a la promoción de un enfoque integrado de promoción de la salud y prevención de enfermedades. El Programa Nacional Integrado de Intervención para las Enfermedades no Transmisibles (CINDI) en Europa o su equivalente a la Red CARMEN en América Latina y el Caribe, ha identificado la política de alimentación y nutrición como elemento fundamental para la prevención y el control de enfermedades no transmisibles, para ello han preparado una guía alimentaria que promuevan la adopción de pautas de consumo de alimentos saludables y compatibles con la cultura y las condiciones locales de cada país.

Entre los alimentos mencionados en la guía, se recomiendan aquellos que aparte de que aporten nutrientes, tengan combinaciones de otras sustancias que en mayoría abundan en vegetales y frutas. Estudios epidemiológicos publicados durante los años ochenta y noventa confirman que la prevalencia de enfermedades cardiovasculares, ciertos cánceres y la mayoría de las carencias de micronutrientes, es menor en casos en que la ingesta de frutas y hortalizas supera los 400 g. Oligoelementos y minerales como el potasio, magnesio, calcio, ayudan a reducir el riesgo de hipertensión, además de prevenir carencias micronutricionales; las vitaminas B, vitamina E, ácido fólico ayudan a disminuir el riesgo de contraer enfermedades cardiovasculares al reducir los niveles de homocisteína en el torrente sanguíneo [OMS, 2000].

La OMS recomienda que la energía proveniente de las grasas en un régimen alimentario sano no exceda el 30%. Los tres tipos principales de grasas son: saturadas, monoinsaturadas y no saturadas. Las grasas saturadas deben incorporar menos de 10% del aporte energético total. Las grasas no saturadas deben constituir alrededor de 7% de la energía total. El resto de las grasas en la alimentación deben ser monoinsaturadas. Los alimentos grasos contienen normalmente una mezcla de todas, pero en distintas proporciones, de modo que alrededor de la mitad de la energía proveniente de las grasas en un régimen alimentario sano debe provenir de las grasas monoinsaturadas y el resto de una mezcla de grasas saturadas y no saturadas. Las grasas monoinsaturadas se encuentran principalmente en el aceite de oliva, el aceite de semilla de calza (canola), el aceite de maní y el aguacate. Los aceites monoinsaturados ayudan a mantener el nivel del colesterol protector lipoproteico de alta densidad (HDL) [OMS, 2000].

Por razones como esta, el aguacate ha sido investigado detalladamente y hoy en día se considera como uno de los frutos de mayor aporte nutricional por los elementos que lo componen, entre los que se encuentran:

- **Vitaminas.** Sobresale la vitamina E, el ácido fólico y el glutaniol. Tienen propiedades antioxidantes, protegen contra cáncer y próstata. El glutaniol actúa en la protección de células frente a los radicales libres [Quiles y col., 2003].
- **Ácidos Grasos.** Varios de los cuales son monoinsaturados y poli-insaturados. Estos ayudan a la protección contra el cáncer. El beta-sitosterol que junto con otros fitoesteroles, ayuda a prevenir la acumulación del colesterol porque impide la absorción del mismo en el intestino [Quiles y col., 2003].
- **Aminoácidos esenciales.** arginina, fenilalanina, histidina, isoleucina, leucina, lisina, metionina, treonina, triptófano y valina, necesarios para la síntesis de proteínas y para el metabolismo celular [Quiles y col., 2003].
- **Minerales.** Calcio, Cobre, Fósforo, Magnesio, Hierro, Manganeseo, Potasio, Selenio, Sodio y zinc, esenciales para el buen funcionamiento del metabolismo celular [Quiles y col., 2003].

Todos estos componentes vitalizan el sistema inmunológico, fortalecen los huesos, evitan la formación de gases intestinales, mejoran la visión, protegen a las células de daños causados por estrés y previenen enfermedades cancerígenas y del hígado, por esto el aguacate representa una fuente de alimento completa, sana e inigualable [Quiles y col., 2003].

2.2.5 Maduración del Aguacate.

Al contrario de la mayoría de las frutas, el aguacate no alcanza la madurez en el árbol, sino alrededor de siete a dieciséis días después de ser cosechado dependiendo de la variedad. La madurez del aguacate se determina por sus características externas como color y tamaño, o por el contenido de aceite en la pulpa; la cantidad mínima de aceite que debe tener el aguacate para ser comercializado es del 8% (b.h.) [Ozdemir, 2004]. Sin embargo, reportar la madurez comercial del aguacate es muy difícil debido a que el inicio de la maduración no está acompañado por cambios externos visibles.

En general, la madurez en el aguacate está relacionada con el contenido de aceite en el mesocarpio. El incremento de la cantidad de aceite disminuye en el mismo porcentaje la cantidad de agua, por eso la proporción de agua y aceite se mantiene constante durante la vida útil del fruto [Ozdemir, 2004].

Ozdemir (2004) encontró que la cantidad de aceite y de materia seca aumentan en los frutos con el tiempo de maduración fisiológica, pero que estos cambios no se hacían muy significativos durante el tiempo de maduración en post-cosecha (comercial) [Ministerio de salud, 1964; Jiménez y col., 2001].

La madurez comercial está dado por el cambio externo que experimenta el fruto tanto en su color como en su textura, tiene una duración de aproximadamente ocho días, pero dependiendo la variedad éste tiempo aumenta o disminuye, y se reporta que para ser consumido debe tener un grado de textura entre 4,0 y 3,5 Kg-f/cm². Después de este tiempo se evidencia pérdida de contenido de grasa, cambio de color, y la textura de la pared celular se debilita [BAUDI, 1997].

2.2.6 Daños por oxidación del fruto de aguacate.

El aguacate es un fruto originario de regiones tropicales y por ello es sensible al daño por bajas temperaturas, que se manifiesta en desórdenes fisiológicos.

Las bajas temperaturas producen en los frutos un estrés oxidativo, aumentando la capacidad de lignificación y de peroxidación de lípidos de la membrana lo que produce un desarrollo de manchas en la pulpa activando los sistemas enzimáticos principalmente las enzimas polifenoloxidasas y peroxidasa [Undurraga, 2003].

Undurraga (2003) evaluó la actividad de las enzimas Peroxidasa y Polifenoloxidasas de aguacates variedad Hass cosechados en dos estados

de madurez con contenido de aceite entre 9-11% (b.h.) y 14-16% (b.h.), los cuales se almacenaron a 3 y 7 °C en cámaras de refrigeración. Se concluyó que la fruta almacenada a 3°C presentó una mayor actividad de la enzima polifenoloxidasas que la fruta almacenada a 7°C, lo mismo ocurrió cuando se analizó el tejido que presentó daño fisiológico en relación al tejido sano. Al analizar la enzima peroxidasa, fue en el tejido sano donde la actividad de esta enzima fue mayor. El análisis histológico mostró que frutos con contenido de aceite entre 9-11% (b.h.), tuvieron una mejor estructura y organización celular y una menor lignificación que los aguacates cosechados con 14-16% (b.h.). Por otro lado, la fruta con este último nivel de madurez, presentó durante el almacenaje una creciente desorganización celular, una disminución del grosor y un aumento de la lignificación de la pared celular [Jiménez, 2001; Freitas, 1996].

2.3 Generalidades del aceite de aguacate

El contenido de aceite de la pulpa en el aguacate cambia con la variedad y el tiempo de maduración del fruto. Un fruto arrancado precozmente tiene menor contenido de aceite que el fruto que permanece el tiempo adecuado en el árbol [PROHACIENDO, 2001].

Los análisis químicos del aceite de aguacate demuestran que contiene una amplia gama de compuestos benéficos para la salud. El α -tocoferol, que se ha relacionado con la reducción de las enfermedades cardiovasculares, se encuentra aproximadamente en una cantidad de 12 a 15 mg/g de aceite en el producto obtenido por prensado en frío. Los niveles de β -sitosterol fueron aproximadamente de 4,5 mg/g de aceite. Los fitoesteroles (incluyendo β -sitosterol) inhiben la absorción intestinal de colesterol en el ser humano, disminuyendo los niveles plasmáticos de colesterol total y de LDL, y pueden prevenir el cáncer de colon, mama y próstata [MADR, 2005].

2.3.1 Caracterización y composición del aceite de aguacate

2.3.1.1 Presencia de ácidos grasos saturados, insaturados y poliinsaturados.

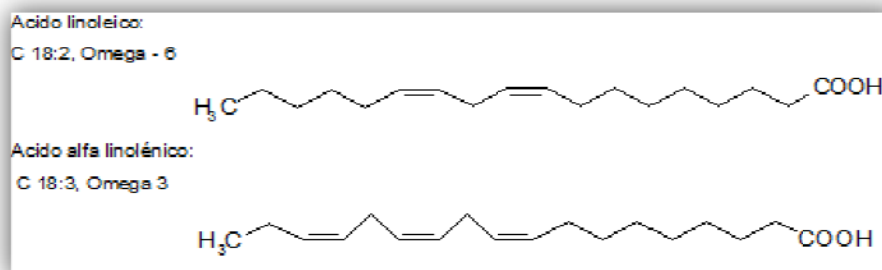
Los ácidos grasos hacen parte de los ácidos orgánicos, en ellos está presente el grupo carboxílico (COOH) y reciben su nombre por encontrarse en las grasas y aceites vegetales. Pueden contener uno o más grupos carboxílicos, ser saturados (enlaces simples entre carbonos C-C) o insaturados (enlaces dobles o triples entre carbonos C=C ó C \equiv C), de cadena abierta o cerrada y además pueden incluir otros grupos funcionales como hidroxilo o amino, entre otros. Si existen dobles enlaces, éstos normalmente tienen la configuración (cis) [Vargas, 1993].

En la naturaleza se conocen aproximadamente unos 40 ácidos grasos distintos. El ácido palmítico (C16) y el ácido esteárico (C18), son los ácidos

saturados más abundantes; los ácidos oleico y linoleico (ambos C18) son los más abundantes entre los insaturados. El ácido oleico es monoinsaturado, puesto que sólo presenta un doble enlace, mientras que los ácidos linoleico, linolénico y araquidónico son ácidos grasos poliinsaturados (AGPI o PUFA, del inglés poliinsaturated fatty acid), ya que presentan más de un doble enlace [Vargas, 1993; Neva, 1997].

Hay dos tipos de ácidos grasos poliinsaturados (AGPI) que se conocen como familia omega – 3 (ácido linolénico) y omega – 6 (ácido linoleico), los cuales se diferencian por la situación del doble enlace con respecto al grupo metilo terminal de la molécula de ácido graso (Figura 2-3). A diferencia de los ácidos grasos saturados y monoinsaturados, que son sintetizados por todos los mamíferos, incluyendo los seres humanos, los AGPI no pueden ser sintetizados fácilmente por el organismo, sino que deben ser aportados en la dieta [Vargas, 1993; Neva, 1997].

Figura 2-3: Principales representantes de las familias de los ácidos grasos omega -3 y omega - 6.



Fuente:[Vargas, 1993]

Los AGPI omega-3, mantienen el equilibrio de las grasas en la sangre, inhiben los mecanismos de agregación plaquetaria, por lo que inciden de manera positiva como agentes preventivos del riesgo vascular y son lípidos fundamentales para el desarrollo y funcionamiento favorable del sistema nervioso central. Se está investigando los posibles beneficios de este ácido graso, en una variedad de enfermedades crónicas incluyendo el cáncer, artritis reumatoide, disfunción cognoscitiva y especialmente en enfermedades cardiovasculares [Vargas, 1993; Neva, 1997].

Los AGPI omega -6 reducen los niveles de colesterol LDL (colesterol malo), pero también los del HDL (colesterol bueno), por lo que debe existir una buena relación en la ingesta entre los ácidos grasos omega-3 y omega-6 de manera que produzcan un efecto favorable en la salud humana. Una proporción adecuada entre los Omega-3 y 6 contiene una baja proporción de ácido linolénico (Omega-3) en relación al ácido linoleico (omega-6). Este equilibrio es básico para el metabolismo de las prostaglandinas que son moléculas importantes para regulación de la función cardíaca,

gastrointestinal, hormonal, nerviosa y el equilibrio de los fluidos en el organismo [Neva, 1997].

El método más usado para la obtención del perfil de ácidos grasos para el aceite de aguacate es por cromatografía de gases: éste método determina la proporción y el contenido de ácidos grasos, saturados e insaturados de la muestra de aceite, además con este método se puede determinar si un aceite se encuentra adulterado. [Finol, 2009]

La presencia de ácidos grasos insaturados es una de las principales características del aguacate. En este fruto, el principal precursor de nuevos ácidos grasos es la coenzima acetyl-CoA; la presencia de insaturaciones es debida a los mecanismos propios de la planta para fijar dobles enlaces y la producción de ácidos grasos poliinsaturados se consigue gracias al retículo endoplasmático. La biosíntesis de ácidos grasos es afectada también por factores ambientales de precosecha como luz, temperatura, riego, constituyentes del suelo, daños físicos y ataque de plagas [Ozdemir y Topuz, 2004].

Ozdemir (2004) evaluó la composición de ácidos grasos durante la postcosecha y maduración del aguacate de las variedades Fuerte y Hass. Las muestras fueron recogidas durante tres meses a intervalos de un mes y se mantuvieron en el laboratorio durante ocho días, período durante el cual se considera la maduración del aguacate. En el aguacate variedad Hass, encontró el siguiente perfil promedio de ácidos grasos: Palmítico con 20,43%; Palmitoléico con 10,41%; Esteárico con 0,16%; Oleico con 52,93%; omega-6 con 15%; omega-3 con 0,18% y Araquídico con 0,73%.

Las muestras de aguacate Hass mostraron un aumento del 20,6% y del 14% en el contenido de ácido oleico y linoleico, respectivamente, durante los tres meses en las que fueron recolectadas. También se presentó una disminución del 28% en el contenido de ácido palmítico y del 16% del ácido palmitoleico, durante el mismo período de tiempo. Durante el la maduración, las muestras de aguacate Hass mostraron un aumento del 5% en el contenido de ácido linoleico y palmitoleico y una disminución del 7% en el contenido de ácido palmítico y del 0,37% del ácido oleico.

Zhong (2007), determinó el perfil de ácidos grasos para el aceite de aguacate por ésteres metílicos utilizando cromatografía de gas y al Helio como la fase móvil a una temperatura de 165°C, durante 10 minutos, reportando el perfil que se presenta en la tabla 2-5.

Tabla 2-5: Composición de ácidos grasos (% p/p) para aceite de aguacate.

Ácidos grasos	Aceites	Aceites	
		Refinado	Prensado en frío
C16:0	Palmítico	16,3	14,1
C16:1	Palmitoleico	7,7	5,7
C18:0	Esteárico	0,6	0,4
C18:1n-9 c/t	Oleico	62,7	69,1
C18:2n-6 c/t	Linoleico	11,4	9,6
C18:3n-3	Linolénico	0,8	0,3
C20:0	Araquídico	0,1	0,1
C20:1n-9 c/t	Eicosanoico	0,2	0,2
C22:0	Behénico	<0,1	<0,1

Fuente [Zhong y col., 2007]

El aceite de aguacate es un aceite “saludable”, posiblemente más que el de oliva, por tanto es adecuado para el consumo humano directo, así como una excelente fuente de grasas para las personas con deficiencias cardiovasculares [Zhong y col., 2007].

2.3.1.2 Propiedades físicas.

Dentro de éstos los más reconocidos son la densidad y la humedad, los cuales pueden ser identificados fácilmente. Los resultados obtenidos a partir de esta evaluación permiten identificar a primera vista si los aceites se encuentran en el estado adecuado para las pruebas posteriores de calidad, o si deben ser rechazados, pues su calidad no es apropiada.

➤ Densidad. La densidad no representa un parámetro directo de calidad del aceite, aunque puede variar con la polimerización o la oxidación. De igual manera es de gran utilidad para las transformaciones masa – volumen y es indispensable para los cálculos involucrados en el diseño de equipos [ICONTEC NTC 336, 2002].

➤ Humedad. Es una medida de la cantidad de agua contenida en el aceite. El agua en exceso es un factor negativo para el aceite debido a que puede formar enlaces químicos y físicos inadecuados, propiciando así reacciones de degradación. El método se basa en la separación por evaporación del agua contenida en la muestra tratándola a temperatura entre los 50 y los 80 ° C, dependiendo de la influencia de la presión [ICONTEC NTC 287, 2002].

2.3.1.3 Propiedades químicas.

Los métodos químicos mencionados a continuación son característicos de todos los aceites y las grasas. Para esto se debe determinar la cantidad

equivalente de compuesto necesaria para reaccionar con los grupos funcionales de los aceites o de sus componentes.

➤ Índice de Acidez. Es una medida del contenido de ácidos grasos libres presentes en grasas y aceites. Este resultado es indispensable como prueba de pureza, ya que permite sacar conclusiones acerca del estado de la materia prima al igual que de las reacciones de degradación que se hayan podido producir a lo largo del tratamiento y almacenamiento del aceite. Metodológicamente este índice representa la cantidad en miligramos de hidroxilo de sodio o de potasio necesario para la neutralización de los ácidos grasos libres presentes en 1 gramo de grasa. Generalmente es expresado en porcentaje de ácidos grasos libres o en porcentaje del ácido graso más abundante en el aceite. El ácido graso teóricamente más abundante en el aceite de aguacate es el oleico. Por tal razón, este índice es expresado en función de este ácido graso [ICONTEC NTC 218, 1999].

➤ Índice de Peróxidos. Es una medida del oxígeno unido a las grasas en forma de peróxido. Se forman especialmente hidroperóxidos como productos de oxidación primarios, además de cantidades reducidas de otro tipo de peróxidos como consecuencia de procesos oxidativos. Por tal motivo, el índice de peróxidos proporciona información acerca del grado de oxidación de la muestra. Esta información es de gran importancia en el análisis físico – químico de cualquier grasa ya que permite hacer estimaciones de hasta qué punto la grasa ha sido alterada. De igual manera debe tenerse en cuenta que si la oxidación está muy avanzada, se producirá un aumento progresivo de la degradación de los peróxidos por lo que el índice descenderá. Metodológicamente este índice es expresado como la cantidad determinable de oxígeno activo contenida en 1 kg de muestra [ICONTEC NTC 236, 1998].

➤ Índice de Yodo. El índice de yodo es una expresión del grado de insaturación de los componentes de una grasa. El índice será tanto mayor cuanto mayor sea el número de dobles enlaces por unidad de grasa. Esta prueba evalúa la identidad y la pureza de las grasas. Al igual que identifica la presencia de ácidos grasos insaturados, identifica las sustancias acompañantes insaturadas, como por ejemplo los esteroides. El yodo, por su parte, no reacciona con los dobles enlaces, pero en su lugar se utilizan halogenados mixtos como ICl o IBr. La adición de halógenos a los dobles enlaces depende de la configuración de los compuestos insaturados al igual que de las condiciones externas por lo que es una prueba rigurosa y debe ser realizada bajo parámetros más estrictos [ICONTEC NTC 283, 1998].

➤ Índice de saponificación. El índice de saponificación es una medida de los ácidos grasos libres y combinados que existen en las grasas y es directamente proporcional a la masa molecular media. No es una medida de

la calidad ni de la identidad del aceite. No es afectado con la polimerización del aceite pero se incrementa rápidamente con la oxidación. Por esta razón es considerado únicamente como medida de pureza, pues un alto índice de saponificación se refiere a un alto nivel de oxidación del aceite. El índice de saponificación en términos químicos representa la cantidad de hidróxido de sodio o de potasio necesaria para la saponificación de 1 gramo de grasa [ICONTEC NTC 335, 1999].

➤ **Rancidez.** Es un método cualitativo basado comúnmente en la llamada reacción de Kreiss. Es una medida de la pureza del aceite, pues identifica si el aceite se encuentra alterado químicamente y determina si se ha producido oxidación en los dobles enlaces de los ácidos grasos insaturados con formación de peróxidos. La prueba se fundamenta en la reacción del aldehído epihidrial con el fluroglucinol adicionado a la muestra, en medio clorhídrico, resultando en la formación de un color rosado. La intensidad del color rosado, en la capa acuosa, es proporcional al grado de enranciamiento oxidativo. El resultado de esta prueba se reporta como negativo o positivo [ICONTEC NTC 219, 1998].

Las propiedades fisicoquímicas típicas del aceite de aguacate se muestran en la tabla 2-6.

Tabla 2-6: Propiedades físicas y químicas del aceite de aguacate

Propiedad	Valor
Densidad (g/ml)	0,91
Índice de refracción a 25 °C	1,468
Índice de saponificación (mg KOH/g)	189
Índice de yodo (cg l/g)	84
Índice de peróxidos (meq/g)	14,9
Índice de acidez (mg KOH/g)	1,07
% ácidos grasos libres como el oleico	0,54

Fuente: [Jiménez y col., 2001]

2.3.2 Comparación con otros aceites comestibles.

Entre los aceites más conocidos están el de girasol, lino, sésamo, almendra, generado de plantas oleaginosas en donde el aceite se forma dentro de la semilla, así como el aceite de olivo, donde el aceite se genera en la pulpa de la fruta, raíz u hojas [Finol, 2009].

Los aceites de más alta calidad y más saludables y con altas propiedades nutricionales para el organismo son sin duda los aceites extra vírgenes (extraídos o prensados en frío). Estos aceites se recomienda tomarlos crudos, ya que de esta forma conservan sus altas propiedades medicinales y alimentarias. También hay que considerar el lugar de donde provienen los

aceites, ya que la calidad del suelo y demás factores intervienen en las propiedades, el aceite de oliva, por ejemplo, se extrae de las aceitunas y dependiendo del tipo de olivo que se use y sus condiciones de crecimiento resultan las características del producto final como lo son el valor nutritivo, el sabor y color [Freitas y col., 1996]

Dependiendo de las diferentes formas de extracción de las semillas o frutos se pueden diferenciar las diferentes calidades de los aceites comestibles vegetales.

- **Aceite Extra Virgen:** Es aquel que se obtiene como resultado de la presión del fruto (una sola presión). Este es el aceite con más alta calidad, además de tener un aroma y un sabor muy natural, es rico en nutrientes y con grandes beneficios para la salud [Finol, 2009].
- **Aceite Virgen:** Este aceite se obtiene en la segunda extracción. Es de mediana calidad [Finol, 2009].
- **Aceite puro:** Se obtiene de extraer más aceite después de la segunda extracción, hay que hacerlo utilizando filtros y procesos, es uno de los aceites de más baja calidad pero sin duda de mejor alternativa saludable respecto a los aceites procesados comercialmente [Finol, 2009].
- **Aceite ligero:** Extraído mediante la extracción por medio de solventes. Este es el aceite de más baja calidad. El empleo de fuertes solventes destruyen las propiedades originales del producto perdiendo sus beneficios y aportes nutricionales, así como su sabor y olor natural [Finol, 2009].

En Colombia existen cuatro cultivos principales a partir de los cuales se obtiene material oleaginoso: palma de aceite, soya, ajonjolí y algodón; de los anteriores, sólo el de la palma de aceite es un cultivo permanente y el de mayor importancia en términos de área, producción y rendimiento.

A continuación en la tabla 2-7, se observan los parámetros físicos y químicos reportados por Kirschenbauer (1964) para el aceite de aguacate y los regulados por las normas técnicas colombianas para el aceite de oliva.

Tabla 2-7: Caracterización fisicoquímica de dos aceites comestibles.

Parámetro	Aceite de aguacate Kirschenbauer	aceite de oliva
Densidad	0.9132	0.91 – 0.916
Índice de refracción	1.4654 – 1.4662	1.4677 – 1.4705
Humedad (%)		0.2
Índice de Acidez		3.3
Índice de Saponificación	185 – 198	20
Índice de Yodo	70.6 – 76.4	75 - 94

Fuente: [Kirschenbauer, 1964]

Se ha detectado una amplia gama de pigmentos liposolubles (carotenoides) en el aceite obtenido por prensado en frío, como carotenos, xantófilas y una cantidad importante de clorofila. También es importante, desde el punto de vista sanitario, la presencia de luteína (una xantófila), que se ha relacionado con la reducción de trastornos por manchas oculares y el riesgo de cataratas.

En tabla 2-8 se compara las propiedades del aceite de aguacate y de oliva producido en Nueva Zelanda por la compañía The Grove:

Tabla 2-8: Composición aceite de aguacate y oliva por la compañía The Grove.

Característica	aguacate	oliva
Clorofila (ppm)	40-60	4-6
Ácido Oleico (%)	0.08-0.17	0.15-0.25
PV (fresh - mEq/kg fat)	0.1-0.2	1.0-2.0
Gravedad Específica (25°C)	0.915-0.916	0.914-.918
Índice de Yodo (from GLC)	82-84	75-82
Beta-sitosterol (%)	0.45-1.0	0.1-0.2
Vitamina E (mg/kg)	130-200	100-150
Alfa-tocoferol (mg/kg)	130	100
Beta/Gamma-tocoferol	15	10
Delta-tocoferol	5	10
Cobre (ppm)	<0.05	0.05-0.1
Pesticidas	Not detected	ND

Fuente [Finol, 2009]

El aceite de aguacate, al igual que el aceite de oliva, es rico en ácidos grasos monoinsaturados, lo cual lo convierte en un excelente componente de dietas enriquecidas con ácido oleico, para la disminución de riesgo cardiovascular. [Uceda y col., 2006]

2.4 Técnicas de extracción del aceite de aguacate

Existen diferentes técnicas en la extracción de aceite de aguacate, que a lo largo de la historia se han modificado, dependiendo del uso final del producto. Por ejemplo, el aceite resultado de la extracción con solventes y fluidos supercríticos es usado en la industria cosmética, mientras que los aceites extraídos por métodos mecánicos y físicos, son usados para la industria alimentaria. Actualmente se están investigando y aplicando métodos de extracción con aplicación de enzimas combinados con métodos mecánicos que aumentan el rendimiento en la extracción.

2.4.1 Extracción con solventes.

La extracción permite separar los componentes de una solución debido a la distribución desigual de los componentes entre dos líquidos inmiscibles. En general, la sustancia que se va a tratar se pone en contacto íntimo con un líquido completamente inmiscible capaz de extraer por solubilidad uno o más componentes. Es usual que el aceite obtenido por esta técnica sea utilizado para uso cosmético y farmacéutico.

La extracción por solventes se inició en Europa en procesos batch en 1870. Después de la Segunda Guerra Mundial se desarrollaron técnicas para que la extracción fuera continua y en contracorriente, con el fin de que esta tecnología fuera efectiva inclusive para aquellos materiales con muy bajo contenido de aceite [Rosenthal y col, 1996].

El proceso de extracción con solventes requiere de una posterior purificación para retirar las impurezas solubles e insolubles presentes, esta etapa en general se conoce como refinación, aunque incluye los procesos de refinación, blanqueo y desodorización.

La refinación inicia con el desgomado que permite retirar del aceite material no graso como fosfátidos, gomas, fragmentos de proteínas, y mucílagos que afectan la estabilidad del aceite frente a la oxidación e influyen negativamente sobre los procesos subsecuentes de refinación. El desgomado se puede realizar por hidratación para hinchar los compuestos en solución, formando geles de gravedad específica mayor a la del aceite.

En el país se han desarrollado dos Trabajos de Grado en este tipo de extracción de aceite de aguacate:

Martínez (2002) extrajo aceite de la variedad Hass. El proceso inició con el secado de la pulpa a 105°C, durante 2 horas; el color de la pulpa deshidratada obtenida variaba entre el amarillo ocre y el café claro. Después se realizó la extracción con hexano a 59°C durante 1 hora y con ciclohexano a una temperatura de 71°C durante el mismo período de tiempo

y se obtuvo un rendimiento del 50% (b.s.) para la extracción con hexano y del 48.5 % (b.s.) para el ciclohexano. El proceso continuó con el secado del aceite extraído que se lleva a cabo en dos etapas: la primera, en un rotavapor que recupera el 95% del solvente y la siguiente en un concentrador de muestras a 0.4 bar y a una temperatura de 75°C durante 3 horas. El desgomado, se realizó calentando el agua y el aceite a 100°C y 80°C, respectivamente antes de mezclarlos, agitando vigorosamente durante 10 minutos, se dejó precipitar las gomas y se retiraron por filtración. El siguiente paso es la neutralización que tiene como fin remover los ácidos grasos libres del aceite. Se hizo con NaOH a una temperatura de 70°C durante 15 minutos. Después se realizó el blanqueo con tierras blanqueantes en una proporción del 10% a 90°C y durante 10 minutos. Finalmente se planteó la desodorización con carbón activado a 71°C durante 10 minutos.

Franco y Rodríguez (1998) que también utilizaron la variedad Hass coinciden con Martínez (2002) en las condiciones de secado de la pulpa. La extracción se realizó con hexano utilizando el extractor Soxhlet durante 4 horas y se adicionó tocoferol y ácido cítrico al aceite extraído. El desgomado se realizó con agua en una proporción del 3% a 70°C y con separación centrífuga. Coinciden con Martínez (2002) en las condiciones para la neutralización y el blanqueo. La desodorización se realizó con vapor inerte a 105°C y se adicionaron antioxidantes al finalizar el proceso. El extractor Soxhlet funciona cíclicamente, para extraer las concentraciones necesarias, de algún determinado químico. Cuando se evapora el solvente asciende su vapor, hasta el área donde es condensado, aquí al caer y regresar a la cámara de solvente va separando los químicos, hasta que se llega a una concentración deseada. Este equipo está diseñado para aplicaciones a nivel micro durante el análisis y experimentación en procesos de extracción de grasas.

2.4.2 Centrifugación.

El proceso de centrifugación se realiza en equipos que utilizan la fuerza centrífuga y la diferencia de densidades entre el agua y el aceite para la obtención del aceite, se realiza a temperaturas menores de 45°C, lo que permite que no se modifiquen las propiedades nutricionales del aceite. La empresa mexicana Avoleo S.A. utiliza este método de extracción¹.

Los separadores centrífugos se basan en el principio de que si un objeto gira a gran velocidad en torno a un punto central, a una distancia radial constante del mismo, está sujeto a la acción de una fuerza. El objeto cambia

¹ Tomado de El Aceite de aguacate en México [online] available from Internet <<http://www.farawayfoods.com>> recuperado el 10 de marzo de 2009

constantemente de dirección y, por consiguiente, se acelera incluso cuando la magnitud escalar de su velocidad es constante. Esta “aceleración centrípeta” se debe a la fuerza centrípeta que actúa en la dirección hacia el centro de rotación. Si el objeto es un recipiente cilíndrico, su contenido ejerce una fuerza igual y opuesta, la “fuerza centrífuga”, hacia fuera de las paredes del recipiente. Esta fuerza es la que provoca la sedimentación de las partículas sólidas pesadas a través de una capa de líquido [Perry y col., 1998].

Fawcett (2004), reportó la obtención de un rendimiento del 57,38% (b.s.), en la extracción del aceite de aguacate de la variedad Lorena. El aguacate fue sometido a un pretratamiento que incluye el despulpado manual, en el que se descartan la semilla y la cáscara, la maceración y la homogenización a 35°C por 15 minutos. La pasta obtenida se dispone para la centrifugación a una velocidad 8000 rpm durante 10 minutos. Después se retira la fase oleosa y se coloca en una segunda centrífuga a la misma velocidad y durante 5 minutos, se retira de nuevo la fase oleosa y se repite el proceso hasta que se asegure la remoción de restos de agua y tejido celular que pudieran haberse mezclado con el aceite.

2.4.3 Extracción por prensado en frío.

El prensado es la separación de líquido de un sistema de dos fases (sólido – líquido) que no se puede bombear con facilidad, mediante la compresión en condiciones que permiten que el líquido escape al mismo tiempo que retiene el sólido entre las superficies de compresión. Este método se originó en Europa en 1975 [Rosenthal y col., 1996].

En el proceso las fases sólida y líquida se separan por presión, mientras que la separación final del aceite de la fase acuosa y de otras sustancias, se hace por centrifugación. Este modelo es utilizado por las empresas Razeto de Chile, The Grove en Nueva Zelanda, La Carlotta en México. Además es el modelo más común en la producción del aceite de oliva virgen [Ortiz, 2008].

El proceso inicia con la maceración y el batido de la pulpa hasta lograr una consistencia homogénea. Después se somete a la acción de prensas hidráulicas, generalmente, y se hace pasar a través de una serie de centrifugas. Algunos productores han adicionado durante la molienda o maceración de la pulpa una mezcla de enzimas conocidas comercialmente como oleasas para mejorar la extracción del aceite [Kiritsakis, 1982; Ortiz, 2008].

El prensado también se utiliza como una etapa previa a la extracción con solventes, para facilitar la acción y disminuir la cantidad necesaria del mismo.

Ortiz, Dorantes y Galindez (2005) aplicaron el método combinado de microondas² y prensado para la extracción del aceite de aguacate variedad Hass. Obtuvieron los valores más bajos de enantiómeros trans³ (0.5g/100g) y concluyeron que la aplicación de microondas no afecta las propiedades físicas ni químicas del aceite obtenido. También se encontró en las observaciones microestructurales, que la aplicación de microondas provoca la salida de aceite de las vacuolas sin colapsar su pared celular.

Además determinaron que la concentración energética (cantidad de energía de microondas aplicada por unidad de masa del producto) es una variable de operación muy importante para el escalamiento industrial del proceso. La concentración energética adecuada para el pretratamiento con microondas fue de 1,89 KJ/g.

2.4.4 Extracción con fluidos supercríticos.

Botha (2004) utilizó dióxido de carbono supercrítico (pureza 99,95%) en la extracción de aceite de aguacate de la variedad fuerte y realizó la comparación con la extracción por el método Soxhlet, utilizando como solvente hexano. Para ambos ensayos a la pasta de aguacate se le retiró la humedad a 80°C durante 24 horas, se cortó en trozos de 2 mm y se almacenó en refrigeración a 4°C antes de la extracción.

Las extracciones con dióxido de carbono supercrítico se evaluaron de acuerdo a las siguientes condiciones: 37°C / 350 atm, 37°C/ 540 atm, 81°C/ 350 atm y 81°C/540 atm. El producto de la extracción fue sometido a evaporación al vacío para eliminar cualquier residuo de dióxido de carbono. Se encontró que las mejores condiciones para la extracción son: 81°C y 540 atm en donde se completa el 95% de la extracción en 1 hora. Sin embargo, es importante considerar que a 350 atm se obtiene la misma cantidad de aceite en 2 horas y con la extracción con hexano al cabo de 8 horas. Además la composición de ácidos grasos insaturados es un 10% menor en el producto obtenido de la extracción con dióxido de carbono supercrítico [Botha, 2004; Jiménez, 2001].

² Energía electromagnética de alta frecuencia que al penetrar en el alimento provoca fricción entre las moléculas produciendo calor.

³ Estos compuestos se forman cuando los aceites vegetales líquidos son sometidos a procesos de hidrogenación, con lo cual se solidifican, obteniendo así margarinas y mantecas (shortenings), entre otros. Un buen número de investigaciones han revelado que este tipo de ácidos aumentan los niveles de colesterol malo (LDL), lo que a su vez produce obstrucciones en las arterias.

2.4.5 Extracción por medio físico – mecánico con enzimas en frío.

Buenrostro (1986) obtuvo un rendimiento del 75% (b.s.), en la extracción de aceite de aguacate utilizando α -amilasa únicamente, frente a una recuperación del 65% (b.s.), de aceite utilizando una mezcla de poligalacturonasa, α -amilasa y proteasa.

Costa (2001) estudió la extracción y refinación de aceite de aguacate con el objetivo de conocer el efecto de dos mezclas enzimáticas comerciales, sobre el rendimiento de extracción y sobre algunas de sus características físicas, químicas y sensoriales. Los aguacates frescos se acondicionaron manualmente. La pulpa fue pretratada enzimáticamente con tres complejos enzimáticos: Pectinex, Olivex y la mezcla de ellos, en concentraciones de 0,015%, 0,03% y 0,06% p/p; para luego ser sometida a una presión de 100 Kg/cm² en una prensa hidráulica de laboratorio. La mezcla óleo-acuosa obtenida fue centrifugada a 4750 rpm para separar el aceite crudo. Tanto con la mezcla Pectinex / Olivex (1:1) al 0,06% como sólo con Pectinex a la misma concentración, se logró un rendimiento de extracción del aceite del orden de un 80% (b.s). El uso de Olivex sólo alcanzó un 71% (b.s), de rendimiento para la dosis mencionada. El aceite crudo obtenido con el tratamiento de 0,06% de la mezcla de Pectinex / Olivex, fue refinado.

Ovando (2005) resume el trabajo de varios investigadores en cuanto a la evaluación del uso de enzimas en el rendimiento en la extracción de varios aceites, entre ellos el de aguacate. Se reporta que el rendimiento fue hasta un 30% (b.s.) mayor, después de someter la pulpa de aguacate a un proceso de extracción acuosa enzimática con los preparados comerciales Pectinex y Olivex, comparado con el proceso de extracción térmico tradicional. Ovando encontró que la enzima Pectinex mostró actividades de poligalacturonasa, pectinesterasa y hemicelulasa. Olivex, presentó además actividad galactomanasa y xilanasa.

En Colombia se han comenzado a realizar diferentes estudios de investigación, para extracción del aceite de aguacate extra virgen y a bajas temperaturas.

Rojas y Acosta (2006) estudiaron la extracción del aceite de aguacate en frío, utilizando preparados enzimáticos comerciales para evaluar el rendimiento respecto a las variaciones de concentración de enzima, variación de pH, temperatura, y el tiempo que llevaron a una mayor eficiencia del proceso. Los resultados obtenidos, mostraron un rendimiento de extracción de aceite del 16% en base húmeda y el 78% en base seca, para la variedad de aguacate Hass.

2.5 Aplicación de enzimas industriales para la extracción del aceite de aguacate

Las enzimas son catalizadores muy potentes y eficaces, químicamente son proteínas. Como catalizadores, actúan en pequeña cantidad y se recuperan indefinidamente. No llevan a cabo reacciones que sean energéticamente desfavorables, no modifican el sentido de los equilibrios químicos sino que aceleran su consecución. La característica más sobresaliente de las enzimas es su elevada especificidad.

La producción de enzimas para uso industrial tuvo orígenes en Dinamarca y Japón a finales del siglo XIX. Las enzimas son productos de las células y por lo tanto pueden obtenerse a partir de tejidos animales, tejidos vegetales o mediante procesos de fermentación empleando microorganismos seleccionados. Las plantas han sido la fuente tradicional de ciertas enzimas [Yegres y col., 2000].

En Colombia no hay producción de enzimas a escala industrial, siendo importados de diversos países de Europa, también de Japón, Estados Unidos, Canadá y México. La importación de enzimas en Colombia se hace en su mayor parte a través de representantes o casas comerciales [Carrera, 2003].

2.5.1 Importancia y clasificación de las enzimas hidrolasas.

En el proceso de extracción de aceite de aguacate, las enzimas actúan como biocatalizadores, se usan enzimas hidrolíticas para carbohidratos, su acción en la extracción del aceite de aguacate es hidrolizar la estructura del tejido mesocarpio que es el depósito de lípidos en frutos como el aguacate, que atrapan el aceite en la pulpa. Ello permite liberar aceite extravirgen, es decir que no se altera su calidad y mantiene sus propiedades nutricionales. Las enzimas que se utilizan para este fin son principalmente pectinasas, celulasas y hemicelulasas [Rosenthal y col., 1996; Soriano, 2004].

2.5.2 Principales enzimas que se relacionan con los cambios de textura en frutas y vegetales.

Las pectinasas que se encuentran en frutas y vegetales se clasifican en:

➤ Pectinmetilesterasa. Denominadas pectinmetoxilasas, pectinesterasas pectindesmectosilasas o pectasas. Se encuentran en una gran cantidad de plantas, en raíces, vainas, tallos, semillas, etc. [Deuel y Stutz, 1958]. La pectinmetilesterasa actúan hidrolizando los grupos metoxilos de las sustancias pécticas, liberando metanol y produciendo pectinas de

bajo metoxilo e incluso ácido poligalacturónico [Badui, 1997]. Provocando una disminución en el pH. La PME no actúa sobre el ácido poligalacturónico completamente esterificado, ya que requiere de grupos carboxilos libres en la cadena del ácido pectínico para iniciar el ataque.

➤ Poligalacturonasas. Este grupo de enzimas puede ser subdividido con base en el mecanismo de ataque y la naturaleza del sustrato. Estas se dividen en: Endo y exo poligalacturonasas, las cuales rompen el enlace α -(1-4) de las pectinas tanto en el interior del polímero (endo) como a partir de los extremos (exo). Cuando la pectina se ve atacada por las enzimas endo, la viscosidad se ve reducida rápidamente; en cambio, cuando se activan las exoenzimas esta propiedad se afecta más lentamente debido a que solo se producen moléculas libres de ácido galacturónico [Deuel y Stutz, 1958; Badui, 1997].

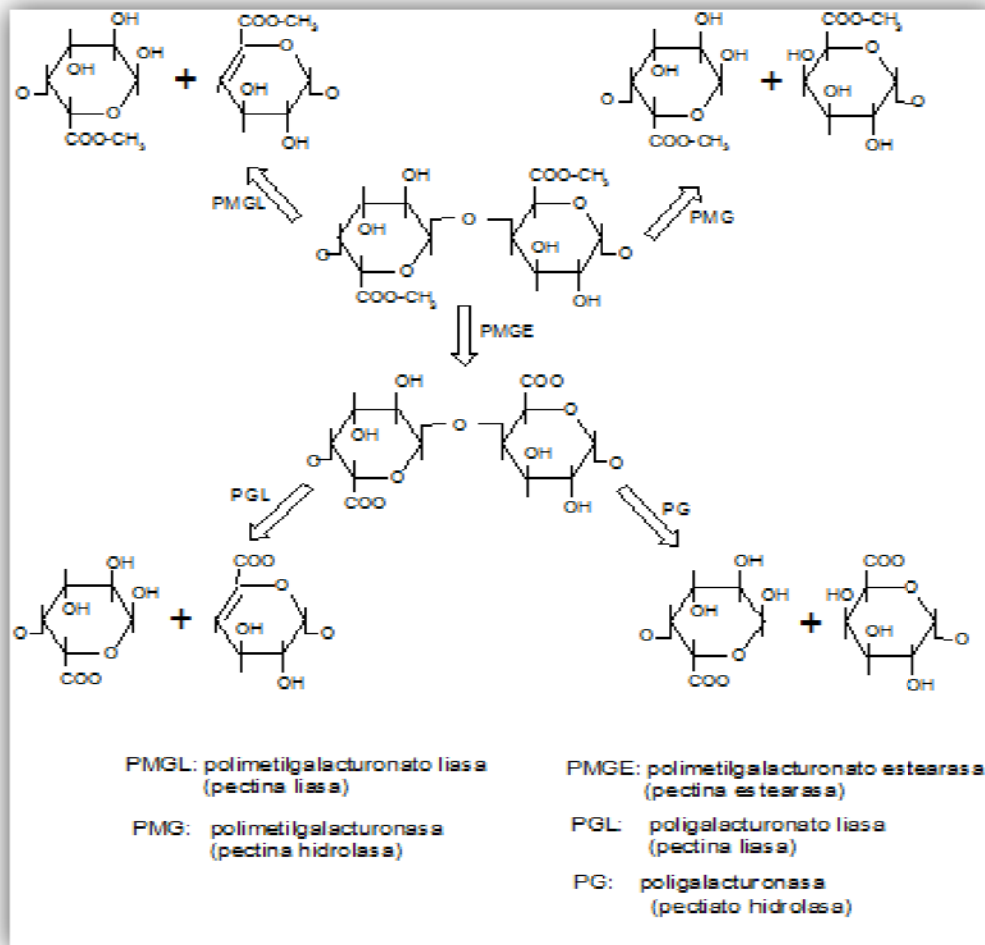
Por otra parte las pectinasas que se encuentran en hongos y bacterias se clasifican en:

➤ Pectinliasas o pectintranseliminadas. Estas son liasas producidas por algunos hongos patógenos de los vegetales y presentan la características de hidrolizar los enlaces oxídicos en puntos específicos de las unidades de ácido galacturónico, originando con esto dobles ligaduras entre los carbonos 4 y 5 en unidades adyacentes a lo largo de la cadena de pectina, teniendo mayor afinidad sobre las de alto metoxilo [Badui, 1993].

➤ Pectatoliasas. Se producen por bacterias y actúan de manera semejante a las pectintraseliminadas de los hongos distinguiéndose de estas últimas por su acción sobre pectinas de bajo metoxilo [Badui, 1993].

A continuación en la figura 2-4, se observa el mecanismo de acción de las pectinasas.

Figura 2-4: Mecanismo de reacción de las pectinasas.



Fuente [Perry y col., 1998]

La mayoría de las enzimas son muy sensibles a los cambios de pH. Desviaciones de pocas décimas por encima o por debajo del pH óptimo pueden afectar drásticamente su actividad. Así, por ejemplo, la pepsina gástrica tiene un pH óptimo de 2, la ureasa lo tiene a pH 7 y la arginasa lo tiene a pH 10. Los ligeros cambios del pH pueden provocar la desnaturalización de la proteína. Los seres vivos por ejemplo, han desarrollado sistemas más o menos complejos para mantener estable el pH intracelular: se conocen como amortiguadores fisiológicos.

Otro factor importante es la influencia de la temperatura en la actividad enzimática. A bajas temperaturas, las enzimas se encuentran en un estado rígido, mientras que a altas temperaturas la actividad cae bruscamente, debido a que la enzima químicamente es una proteína y como tal se

desnaturaliza. Cuando se alcanza un punto óptimo en la temperatura, se logra el máximo de la actividad de la enzima⁴.

Es necesario agregar cierta cantidad de agua a la pasta formada de la molienda de la pulpa de aguacate; las moléculas de agua reaccionan con las enzimas y rompen la estructura del tejido mesocarpio. Dando paso a la reacción enzimática.

⁴ —. *Proteínas y enzimas*. Disponible en <<http://depa.pquim.unam.mx/proteinas/enzimas/index.html>> (último acceso: 08 de Agosto de 2010).

3. Metodología

El desarrollo de la presente investigación se realizó en dos etapas; en la primera se realizó un análisis preliminar del proceso a nivel laboratorio. En una segunda etapa, se llevó el proceso evaluado en laboratorio a planta piloto. El aceite obtenido fue caracterizado de acuerdo con los parámetros de calidad según los requisitos indicados en las normas técnicas colombianas para aceites comestibles (NTC 258); de igual forma se analizó el perfil de ácidos grasos por medio de cromatografía de gases.

3.1 Análisis preliminar en laboratorio

El departamento del Tolima es el tercer productor nacional, después de Bolívar y Santander; se encuentra a una altura que varía entre los 1800 y 2000 msnm. Su mayor mercado en la geografía nacional es Bogotá, Antioquia y Valle del Cauca. Dentro del departamento se considera que se producen cerca de 72 variedades diferentes de aguacate, pero la mayoría son de muy baja producción (menor a 1,0t/Ha, razón por la cual no son muy comercializadas a nivel nacional. Los municipios de Fresno y Mariquita están aproximadamente entre los 1800 y 1900 msnm, y es considerada una zona de alta producción aguacatera. Otros municipios como Alvarado, Rovira y Chaparral cuentan con una menor producción.

La recolección de la información se basó en los resultados del proyecto “Potencial de Transformación agroindustrial de cultivares criollos de aguacate en el departamento del Tolima” realizado por el Centro de Investigación Corpoica Nataima (2006 – 2008).

Los datos observados en la tabla 2-1, muestran la baja variabilidad que hay entre los costos/kg, y %p/p de pérdidas pos-cosecha para las diferentes variedades. Según el estudio hecho por Corpoica, el costo/kg de producción es equitativo entre las diferentes variedades; el valor de las pérdidas pos-cosecha es general para todos los cultivos de frutas en el país y no solo para el cultivo de aguacate. Estos resultados se atribuyen a la precaria inversión en el mejoramiento del embalaje del fruto.

3.1.1 Selección de materia prima.

Para el análisis de la información se utilizó como herramienta la metodología de análisis de comparación de pares, mediante el proceso de análisis jerárquico. Este proceso usa pares de comparación; para ello se asignan pesos relativos a los diferentes criterios que son relacionados entre sí para definir la importancia de uno sobre otro. Es un enfoque complejo, debido a que requiere de una cuidadosa reflexión, ya que el peso asignado depende del juicio de la persona que evalúa cada criterio. Este enfoque se usa cuando el problema a resolver es complejo e importante, e implica muchos factores subjetivos diferentes; de esta forma se llega a una calificación general para cada alternativa. (Tabla 3-1).

Tabla 3-1: Escala de análisis de comparación de pares.

Importancia relativa	valor
Igualdad de importancia y calidad	1,0
Algo más importante a juicio y criterio del evaluador	2,0
Definitivamente más importante a juicio y criterio del evaluador	3,0
Criterio definitivamente mucho más fuerte a juicio y criterio del evaluador	4,0
Criterio que favorece absoluta y totalmente una actividad sobre otra a juicio y criterio del evaluador	5,0

Fuente: Autor

Para iniciar el proceso previamente se parte de los datos relativos a costos/kg, disponibilidad en el mercado, % de pulpa sobre el fruto total, % de pérdidas pos cosecha y % de grasa en la pulpa. Los datos son tomados del proyecto “Potencial de transformación agroindustrial de cultivos criollos de aguacate en el departamento del Tolima”, mencionado anteriormente.

De acuerdo con los datos recopilados en la tabla 2-1, y teniendo en cuenta la escala de análisis de la tabla 3-1 se solicitó a tres personas evaluar con valores entre 1,0 y 5,0 según consideraran, los diferentes criterios. Una vez evaluados, se procedió a determinar el promedio. Los resultados se pueden observar en la tabla 3-2.

Tabla 3-2: Resultados respecto a los criterios de evaluación

Evaluación encuestas	Evaluador 1	Evaluador 2	Evaluador 3	Promedio
% p/p de grasa b.h. por Soxhlet	5,00	4,00	5,00	4,67 ± 0,47
Disponibilidad en mercado	2,00	5,00	4,00	3,67 ± 1,24
Costo/ kg	1,00	2,00	1,00	1,33 ± 0,47
% p/p pulpa	4,00	3,00	3,00	3,33 ± 0,47
% p/p Pérdidas pos-cosecha	3,00	1,00	2,00	2,00 ± 0,81

Fuente: Autor

Con los valores promedio, se procedió a hacer el cociente entre los diferentes criterios, donde el numerador indica el valor dado al criterio de la fila y el denominador indica el valor dado al criterio de la columna; así por ejemplo, para el criterio de % p/p de grasa b.h. por Soxhlet (fila) al que se asigna un valor promedio de $4,67 \pm 0,47$ respecto a disponibilidad en mercado (columna) al que se asigna un valor promedio de $3,67 \pm 1,24$. Este valor refiere que a juicio y criterio de los evaluadores es de mayor relevancia el porcentaje de grasa que contenía la pulpa que la disponibilidad que haya en el mercado. En la tabla 3-3 se observan la relación entre los criterios.

Tabla 3-3: Valoración de los criterios de selección.

	% (p/p) grasa (b.h.).	Disponibilidad en mercado por cosecha. *	Costo/ kg	% (p/p) pulpa	% (p/p) pérdidas poscosecha
% (p/p) grasa (b.h.).	4,67/4,67	4,67/3,67	4,67/1,33	4,67/3,33	4,67/2,00
Disponibilidad en mercado	3,67/4,67	3,67/3,67	3,67/1,33	3,67/3,33	3,67/2,00
Costo/ kg	1,33/4,67	1,33/3,67	1,33/1,33	1,33/3,33	1,33/2,00
% (p/p) pulpa	3,33/4,67	3,33/3,67	3,33/1,33	3,33/3,33	3,33/2,00
% (p/p) pérdidas poscosecha	2,00/4,67	2,00/3,67	2,00/1,33	2,00/3,33	2,00/2,00
	% (p/p) grasa (b.h.).	Disponibilidad en mercado por cosecha. *	Costo/ kg	% (p/p) pulpa	% (p/p) pérdidas poscosecha
% (p/p) grasa (b.h.).	1,00	1,27	3,50	1,40	2,33
Disponibilidad en mercado	0,79	1,00	2,75	1,10	1,83
Costo/ kg	0,29	0,36	1,00	0,40	0,67
% (p/p) pulpa	0,71	0,91	2,50	1,00	0,71
% (p/p) pérdidas poscosecha	0,43	0,55	1,50	0,60	1,00
SUMA	3,21	4,09	11,25	4,50	6,55

Fuente: Autor

Después de la evaluación de la tabla 3-3, se procede a determinar el valor principal. Para ello se toma cada resultado de la relación entre los criterios, y se divide entre el valor de la suma de cada uno de los ellos. Así por ejemplo, el valor de 1,27 de la relación entre % p/p de grasa (b.h.) y disponibilidad en el mercado, se divide entre 4,09 valor de la suma del

criterio disponibilidad en el mercado. Este valor indicó el peso que tiene cada criterio en la toma de una decisión.

Tabla 3-4: Determinación del vector principal

	% (p/p) grasa (b.h.).	Disponibilidad en mercado por cosecha. *	Costo/ kg	% (p/p) pulpa	% (p/p) pérdidas poscosecha	VECTOR PRINCIPAL	Escala de criterios
% (p/p) grasa (b.h.).	0,31	0,31	0,31	0,31	0,36	0,32	Primero
Disponibilidad en mercado	0,24	0,24	0,24	0,24	0,28	0,25	Segundo
Costo/ kg	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,09	Quinto
% (p/p) pulpa	0,22	0,22	0,22	0,22	0,11	0,20	Tercero
% (p/p) pérdidas poscosecha	0,13	0,13	0,13	0,13	0,15	0,14	Cuarto
SUMA	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	

Fuente: Autor

Como se observa en la tabla 3-4, la prioridad del vector principal esta dado por el valor promedio más alto. En este caso el criterio más importante con un 32% es % (p/p) grasa (b.h.), seguido por disponibilidad en el mercado de las diferentes variedades de aguacate con 25%. Luego aparecen los criterios de % (p/p) de pulpa en el fruto con 20%, % (p/p) pérdidas poscosecha con 14% y por último el criterio menos importante según los evaluadores, es el costo/kg.

Este orden establece la prioridad de los criterios; de tal forma que respecto a la tabla 2-1, se seleccionan las cinco primeras variedades que cumplan con estos criterios, para su posterior desarrollo del proyecto en el laboratorio.

3.1.2 Recolección y transporte de la materia prima seleccionada.

La manipulación del fruto en la cosecha es precaria debido a que se recolecta manualmente; para ello el campesino hala el fruto del pedúnculo para que caiga al piso, luego es recogido y transportado en bolsas de lona por bultos a los puntos de acopio, como Mariquita.

En el municipio de Mariquita se ubica el punto de acopio principal en la zona; a este lugar llegan los aguacates de los municipios de Fresno, Alvarado y Mariquita, principalmente. El fruto llega inmaduro, recolectado en fincas con uno o dos días de anterioridad. No existe un adecuado manejo pos-cosecha, debido a que los frutos se golpean entre sí, ya que los

comerciantes no disponen de empaques adecuados que eviten este tipo de daños.

Como los frutos están inmaduros, los daños no son visibles; éstos se hacen visibles en el momento que maduran, en forma de partes blandas que corresponden a los golpes recibidos con anterioridad. Algunos daños interiores por enfermedades solo empiezan a ser visibles hasta el momento en el que van a ser consumidos.

3.1.3 Estado de madurez de los frutos.

La madurez que posean los frutos es crítica, ya que de ella dependen todos los parámetros físicos y químicos. Para el caso de estudio se tomaron los mismos parámetros que los comerciantes consideran como óptimos para el mercado, que en algunos casos se dan entre 8 y 16 días de maduración después de ser recolectados en éstas condiciones el fruto tiene aproximadamente 21% de materia seca; en este estado se considera que se han desarrollado las características organolépticas de color, olor y sabor. Estas determinan la vida de almacenamiento y calidad.

Para este proceso se usa un texturometro de barra, que permite medir la fuerza que se debe aplicar a la fruta para ser penetrada, utiliza medidas de kgf/m^2 , y éste se usa como índice de madurez de la fruta. La medida se toma manualmente, haciendo presión, hasta que la fruta es penetrada, como se observa en la figura 3-1.

Figura 3-1: Medición de la textura del aguacate



Fuente: Autor

3.1.4 Acondicionamiento de la pulpa de aguacate.

El despulpado en el laboratorio se realizó en forma manual y tomando tres muestras de cada variedad. Los frutos fueron cortados por la mitad y se separó la cáscara, la semilla y la pulpa. La pulpa se dispuso en un recipiente para su mezcla homogénea, caracterizada por una textura cremosa. Para ello se utilizó un ayudante de cocina marca Oster (tabla 3-5), durante un tiempo de 15 minutos.

Tabla 3-5: Características de ayudante de cocina.

Características	Batidora de inmersión 2 velocidades
Marca	Oster
Materiales	Eje; acero inoxidable. Mango en plástico
Motor	250 voltios
Capacidad	700 ml

Fuente: Manual del equipo

3.1.5 Adecuación de pH.

El pH general que presenta el fruto está entre $7,0 \pm 0,2$ dependiendo de la variedad. De acuerdo con los estudios anteriores de extracción de aceite utilizando enzimas, [Rojas y Acosta, 2006; Fawcett, 2008], se encontró que el pH en el cual se desarrolló mejor las enzimas se encuentra entre 5,0 y 5,5, por lo que se requiere disminuir el pH del valor de $7,0 \pm 0,2$ a $5,0 \pm 0,2$. Así mismo este, pH ($5,0 \pm 0,2$) favorece más la conservación de la pulpa; para ajustar el pH se adicionó la cantidad necesaria de ácido cítrico disuelto en agua en relación 1:1 (peso/peso).

3.1.6 Extracción del aceite de aguacate utilizando tratamiento enzimático.

Las enzimas utilizadas se seleccionaron de acuerdo con sus características hidrolizan los tejidos de la pared celular del fruto del aguacate.

En la industria se conocen diferentes preparados enzimáticos comerciales que son mezcla de diferentes enzimas hidrolíticas que son usadas en la extracción del aceite de aguacate.

Las enzimas comerciales empleadas poseen las características que se presentan en la tabla 3-6.

Tabla 3-6: Características de las enzimas comerciales utilizadas en el proceso de extracción de aceite de aguacate en el presente estudio.

Nombre	Enzima 1	Enzima 2	Enzima 3
Actividad declarada	65000 AVJP/g (AVJP: activity viscosity juice apple)	100,000 AVJP/g (AVJP: activity viscosity juice apple)	9500 PGU/ml (PGU: unidades de poligalacturonasa)
Color	Café claro.	Ambar.	Marrón. El color puede variar de lote a lote, sin que la intensidad del color sea indicativa de la actividad enzimática.
Forma física	Líquido	Líquido	Líquido
Densidad aproximada	1,14 - 1,18 g/ml	1,14 -1,16 g/ml	1,16 g/ml
Estabilizantes	Glicerol	Glicerol	Glicerol, cloruro de potasio
Conservantes	No contiene preservantes.	No contiene preservantes.	No contiene preservantes.
Olor	Ligero olor a fermentación.	Ligero olor a fermentación.	Ligero olor a fermentación.
Solubilidad	El compuesto activo es fácilmente soluble en agua en todas las concentraciones de uso normal.		El compuesto activo es fácilmente soluble en agua en todas las concentraciones de uso normal. Los compuestos de estandarización pueden causar turbidez en la solución
Organismo de producción	<i>Aspergillus niger</i> , <i>Trichoderma longibrachiatum</i>	<i>Aspergillus niger</i> , <i>Trichoderma longibrachiatum</i>	<i>Aspergillus aculeatus</i>
Método de producción			Producción mediante fermentación sumergida de un microorganismo. Se separa la proteína enzimática del organismo de producción y se purifica.

Fuente: Casas comerciales.

Las condiciones de operación están planteadas de acuerdo con los resultados de proyectos anteriores [Rojas y Acosta, 2006; Fawcett, 2008], y con las recomendaciones dadas por las casas comerciales que garantizan mayor actividad en las enzimas (tabla 3-7).

Tabla 3-7: Recomendaciones de las casas comerciales para el uso de las enzimas

Condiciones	Enzima 1	Enzima 2	Enzima 3
Temperatura (° C)	20 a 55	10 a 55	20 a 50
pH	3,0 a 5,0	3,0 a 5,0	3,0 a 5,5
Dosis (ppm ó g/t)	200 a 450	100 a 200	100 a 200
Tiempo	2-3 h	2-3 h	30 -45 min.

Fuente: Casas comerciales

Fuera de los intervalos de temperatura y pH, las enzimas tienden a inhibirse ó disminuir su actividad, además que puede afectar la calidad físico-química del producto final. Los demás factores como la dosificación y el tiempo de incubación se modificaron con un intervalo más amplio. El pH se mantuvo constante en $5,0 \pm 0,2$.

En la tabla 3-8, se presenta el diseño de experimentos planteado y se observan los intervalos de factores estudiados, se trabajo un diseño de superficie de respuesta utilizando el programa Design Expert 6.0.2 estudiando factores como; tipo de enzima, temperatura, concentración de enzima, tiempo de hidrólisis enzimática y agitación. La variable de respuesta fue el rendimiento en la extracción del aceite de aguacate. Con estas condiciones, el programa propone 34 experimentos (Anexo B).

Tabla 3-8: Factores estudiados

FACTORES		NOMBRES COMERCIALES		
Categoricos	Enzimas	Enzima 1	Enzima 2	Enzima 3
	Agitación	Con	Sin	-
Numéricos		RANGO DE EVALUACIÓN		VARIABLE
		Valor mínimo	Valor máximo	Rendimiento
	Temperatura (°C)	30	50	
	Concentración (g/t)	100	500	
Tiempo (h)	2	5		

Fuente: Autor

El proceso de incubación con enzima en el laboratorio se llevó a cabo sobre una plancha magnética, con control de temperatura; para la agitación se utilizó una barra magnética de 3 cm de longitud, en un vaso de precipitado de 300 ml, con aproximadamente 30 g de la muestra y 90 g de agua y con una velocidad aproximada de 0,2 g.

Los 34 experimentos, son realizados por duplicado con pulpa procedente de frutos de la variedad Choquette; una vez establecidas las condiciones de temperatura, concentración de enzima, tiempo de tratamiento enzimático, y aplicación de agitación, apropiadas para cada enzima comercial utilizada,

luego se realiza el proceso para las otras cuatro variedades (Santana, Lorena, Criollo y Hass).

3.1.7 Separación por centrifugación.

La mezcla óleo-acuosa es traspasada a tubos para centrifuga con capacidad de 50 ml y sometida a un proceso de centrifugación, en un equipo de modelo 4235, marca Tecnovetro, con velocidad de 4200 g durante 30 minutos.

La fase de aceite es separada con una jeringa y traspasada a un envase de vidrio color transparente, que permite ver el color del producto final.

3.1.8 Actividad experimental de las enzimas comerciales sobre el sustrato.

Se evaluó la actividad de las tres enzimas comerciales utilizadas en el proceso, sobre el sustrato (mezcla óleo acuosa de la pulpa de aguacate); para ello se tomó 250g de pulpa acondicionada y con pH de 5,0 \pm 0,2, se adicione tres veces su peso en agua completándose 1000 g de mezcla oleo acuosa. Se dividieron en alícuotas de 100 g y se adicionaron concentraciones a las muestra entre 0 y 500 ppm de enzima, se mantuvo en plancha con agitación constante a una temperatura de 40 °C, durante 3,5 horas (12600 s). Después se procedió a centrifugar las muestras durante 30 minutos a una velocidad de 5000 rpm (5150 g).

Luego para cada concentración de enzima se peso la cantidad de aceite obtenido por tonelada de mezcla oleosa y se dividió entre los 12600 s (3,5 h). Se graficó la concentración de enzima (g. enzima / t. mezcla oleo acuosa) en función de la velocidad de producción de aceite (g. aceite/ t. mezcla oleo acuosa*s); se determinó la ecuación de la recta tangente al inicio de cada una de las curvas. El valor de la pendiente de esta recta corresponde a la actividad de la enzima sobre el sustrato.

3.2 Análisis y desarrollo en planta piloto

Una vez concluido el proceso en el laboratorio, se planteó su desarrollo en planta piloto, con los equipos requeridos para el desarrollo en forma industrial, entre ellos; una despulpadora, una marmita y una ultra centrifuga con alta capacidad lo que permitió establecer los rendimientos y pérdidas a escala planta piloto.

3.2.1 Selección de materia prima

De acuerdo con los resultados obtenidos y teniendo como criterio la selección del método de análisis jerárquico para toma de decisiones, aplicado para el proceso de laboratorio, se seleccionó como materia prima para trabajar en planta piloto el aguacate variedad Hass, dado que ésta variedad presentó un mayor rendimiento, y muy buenas características físicas, químicas y organolépticas en el producto final desarrollado en el laboratorio.

3.2.2 Estado de madurez de los frutos.

Para los frutos de aguacate variedad Hass usados en el desarrollo de planta piloto, el proceso de maduración se evaluó a través del cambio de color de la cáscara. Por esta razón se hizo seguimiento día a día del cambio en el color que va desde un verde fuerte en su estado inmaduro a café oscuro en su estado maduro (16 días de almacenamiento a temperatura de 15 °C).

3.2.3 Acondicionamiento de la pulpa de aguacate.

El fruto se desinfecta con hipoclorito de sodio al 0,5% disuelto en agua durante 10 minutos, se enjuaga con abundante agua y posteriormente se abre manualmente con cuchillo para retirar la cáscara y la semilla de la pulpa.

La pulpa fue transportada a una despulpadora, donde tuvo lugar el proceso de despulpado, el cual se realizó durante 0,5 horas para tratar 65 kg. Durante este proceso la pulpa sale homogénea debido a que pasa por un tamiz de 1,5 mm. Para el proceso se utilizó una despulpadora industrial para frutas con las características como se muestran en la tabla 3-9.

Tabla 3-9: Características del equipo de despulpado.

Despulpadora horizontal marca Langsenkamp			
Capacidad	100-500 kg/h	Motor	
Tensión	220/380 V	Voltaje	220 V
Tmáx.	40 °C	Potencia	3 hp
Tmín.	-5 °C		
Humedad	94%		
Características	Tolva, guarda y tamiz desmontables. Tamiz calibre 16 (1,5 mm)		

Fuente: Manual del usuario.

3.2.4 Adecuación del pH.

Para disminuir el pH de la pulpa de aguacate, se utilizó ácido cítrico en relación 1:2 con agua a temperatura ambiente, se mezcló para asegurar una homogénea distribución del ácido en todas las partes de la mezcla; además de garantizar el pH en $5,0 \pm 0,2$; dado que se encontraba inicialmente en $6,8 \pm 0,2$.

3.2.5 Extracción del aceite de aguacate utilizando tratamiento enzimático.

El tratamiento de hidrólisis enzimática se realizó con la enzima 3, la cual en el laboratorio presentó el mayor rendimiento. Las condiciones determinadas del proceso fueron una temperatura de $40 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, tiempo de $3,5 \pm 0,25 \text{ h}$, con una concentración de enzima de $450 \pm 25 \text{ g/t}$ respecto al peso total de la mezcla óleo-acuosa, pH de $5,0 \pm 0,2$ y provisto de agitación.

Para el proceso se usaron un lote de 30 kg y uno de 35 kg de pulpa y se le adicionó tres veces su peso en agua. La emulsión es llevada a una marmita provista de agitación y con las características como se observan en la tabla 3-10. Se calienta la marmita hasta que alcanza una temperatura de $40 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, se adiciona la enzima en una concentración de $450 \pm 25 \text{ g/t}$ y se mantiene a esta temperatura para acción de la enzima $3,5 \pm 0,25 \text{ h}$. Posteriormente la emulsión se dispuso en baldes, para el posterior proceso de centrifugación.

Tabla 3-10: Características del equipo para proceso de hidrólisis enzimática.

Marmita volcable con agitador móvil			
Materiales	Acero inoxidable	Agitador	Tipo Helicoidal
Capacidad	150 kg		25 rpm;/0,2 g
Chaqueta	40 Psi	Motor	
Diámetro	60 cm		1 Hp
Diámetro chaqueta	26 in/66,04 cm		110v

Fuente: Manual del usuario.

3.2.6 Separación por centrifugación.

El proceso de separación se lleva a cabo en una ultra centrifuga marca Toniatti, conectada mediante una manguera de $3 \frac{1}{2}$ pulgadas que lleva la mezcla de un tanque de almacenamiento a la entrada de la ultra centrifuga por medio de una bomba peristáltica. Las características de la centrifuga y de la bomba utilizada para la alimentación se presentan en la tabla 3-11.

Tabla 3-11: Características del equipo de separación.

Centrifuga Toniatti		Bomba peristáltica	
Velocidad	18100 g	Presión	25 psi
Capacidad del cilindro (líquidos)	3,1 litros	Potencia	3 hp
Capacidad (barros)	2,0 kg	Voltaje	110V
Diámetro cilindro	10 cm	Tanque mezcla	
	220 v	Capacidad 50 kg	

Fuente: Manual del usuario.

Como se observa en la figura 3-2 el montaje del proceso, el alimento ingresa a la centrifuga por la parte inferior, por medio del suministro dado por la bomba peristáltica, ingresa en un orificio cilíndrico en el eje del rotor que tiene dos aperturas en la parte superior para permitir la descarga de los líquidos separados. El rotor genera una fuerza centrífuga superior a 18.100 g. Esta fuerza separa a los dos líquidos de acuerdo con su densidad en capas cilíndricas concéntricas. El líquido más liviano está más cerca del centro del rotor y el más pesado forma la capa más alejada del centro. Al mismo tiempo los sólidos son depositados contra la pared del rotor. El tiempo aproximado para la separación de 50 kg fue de 30 minutos.

Figura 3-2: Montaje para la separación de aceite

Fuente: Autor

La operación de la ultra centrifuga utilizada es continua, con los líquidos separados siendo desplazados hacia arriba por la mezcla entrante y descargados a través de los dos puertos de salida que están en la parte superior del rotor. La capa de sólido acumulada sobre el rotor se limpia cuando la centrifuga está parada. Se requiere presión en la alimentación mientras que la descarga la hace por medio de desborde sobre los puertos de descarga.

3.3 Evaluación de las características del aceite de aguacate

3.3.1 Parámetros fisicoquímicos medidos al aceite obtenido.

Los parámetros físicos y químicos, se midieron por duplicado a cada una de las variedades de aguacate utilizadas en el laboratorio y en planta piloto, teniendo en cuenta la norma técnica colombiana para aceites comestibles NTC 258. (Anexo D).

- Contenido de grasa. Extracción por método Soxhlet. (Anexo C)
- Densidad (NTC 336). (Anexo E)
- Humedad (NTC 287). (anexo F)
- Índice de Acidez (NTC 218). (anexo G)
- Índice de Peróxidos (NTC 236). (anexo H)
- Índice de Yodo (NTC 283). (anexo I)
- Índice de saponificación (NTC 335). (anexo J)
- Rancidez (NTC 219). (anexo K)

3.3.2 Determinación del perfil de ácidos grasos.

El perfil de ácidos grasos del aceite de aguacate se determinó por cromatografía de gases, para tal fin fue empleado un cromatógrafo digital Agilent Technologies, modelo 7890A equipado con detector de ionización de llama y un auto muestreador XL. El cromatógrafo cuenta adicionalmente con un software Chemstation versión B.04.01 empleado para la adquisición de datos y la integración de los picos. El volumen de inyección de las grasas derivatizadas del aceite de aguacate (anexo L), es de 1 μ L y se utilizó un split de 1:20. La columna capilar empleada es una BPX-70, 60 mm \times 0.25mm ID, 70% Cianopropilpolisilfenil-siloxano. El programa de temperatura implementado comenzó a 60°C por 6 min, luego subió hasta 190°C a razón de 20°C/min y se mantuvo a 190°C durante 32,5 min, para un tiempo total de análisis de 45 min. Las temperaturas del inyector y el detector fueron de 250°C (Shanthaet *al.*, 1995). El gas de arrastre fue helio a un flujo de 2,0mL/min.

La composición de ácidos grasos fue determinada por comparación de los tiempos de retención de los picos obtenidos con los de patrones de FAMES de ácidos grasos C4-C32 y CLAs, (Sigma Chemical Co., St Louis, MO, USA).

4. Resultados

4.1 Análisis preliminar en laboratorio

4.1.1 Selección de materia prima.

De acuerdo con los resultados de la tabla 3-5 el criterio de mayor importancia es % (p/p) de grasa (b.h.). En la tabla 4-1 se observa que las variedades están organizadas de mayor a menor contenido de grasa, la disponibilidad es el segundo criterio de importancia, razón por la cual las variedades de aguacate que tienen una disponibilidad menor a 3 t/Ha en el mercado son descartadas; es lógica esta razón, ya que si se piensa en un desarrollo industrial es de vital importancia contar con la materia prima necesaria. El tercer criterio, %(p/p) de pulpa, cierra más aún el grupo de variedades seleccionadas, los criterios % pérdidas pos-cosecha y costo/kg, pueden ser descartados dada la poca diferencia entre las diferentes variedades para ellos. Con estos resultados las variedades que cumplen en mayor grado los criterios, fueron: Hass, Choquette, Santana, Lorena y Criollo (tabla 4-1).

Tabla 4-1: Características de las variedades comerciales de aguacate seleccionadas

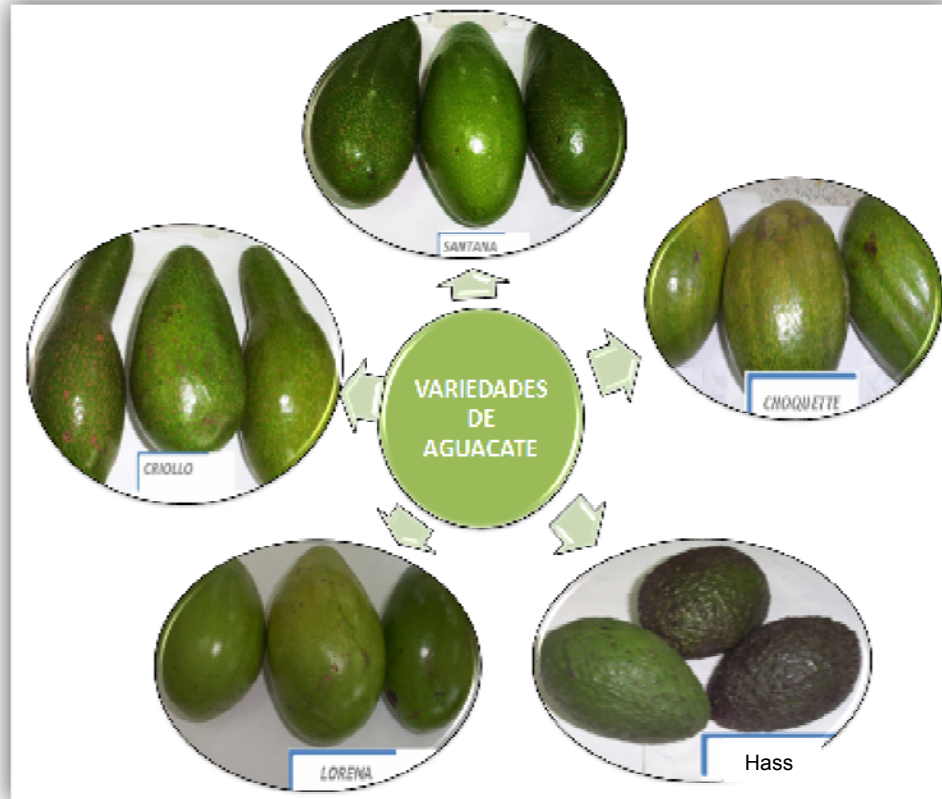
Variedad	% grasa (b.h) Soxhlet*	Disponibilidad	Costo/ kg	%p/p pulpa	% Pérdidas poscosecha
Hass	21,29	Alta	1900	72	40
Choquette	18,09	Media	1800	72	40
Lorena	14,72	Media	1800	82	40
Santana	13,2	alta	1900	76	40
Criollo	9,98	Alta	1800	76	30

* Baja: menos de 3 t/Ha. Media: entre 3 y 10 t/Ha. Alta: Mayor de 10 t/Ha.

Fuente: Autor

En la figura 4-1, se observan las diferentes variedades seleccionadas, y sus características físicas.

Figura 4-1: Variedades de aguacate en el departamento del Tolima seleccionadas para el proceso de extracción de aceite de aguacate en laboratorio



Fuente: Autor

Las variedades de aguacate seleccionadas, son principalmente de los municipios de Fresno y Mariquita. Pertenecen a la primera cosecha del año desarrollada entre enero y febrero del año 2010.

4.1.2 Recolección y transporte de la materia prima seleccionada.

En el punto de acopio del municipio de Mariquita, se adquieren muestras de las variedades Criollo y Lorena posterior a 2 días de recolección. Las variedades Hass, Santana, y Choquette, fueron directamente recogidas de la finca, “La Marsella” del municipio de Fresno.

4.1.3 Estado de madurez de los frutos.

El estado de madurez comercial con temperatura ambiente en el municipio de El Espinal de 25 °C a 28 °C en el día y 20 °C a 25 °C en la noche, se logra en el séptimo u octavo día después de su recolección en la mayoría de las variedades como Lorena, Santana, y Criollo. Otras variedades como

la Choquette maduran al día 12, y la variedad Hass madura en el día 16 aproximadamente.

En la tabla 4-2, se muestra los cambios en la textura de las diferentes variedades de aguacate, los datos son tomados a partir del día 3 después de la cosecha. No se muestran datos de los días 5 y 6, ya que el cambio no es aparente. El color de las variedades Lorena, Criollo y Choquette en su estado inmaduro es verde brillante y cambia a un verde pálido (amarillento) cuando alcanzan la madurez comercial.

Tabla 4-2: Grado de textura de los aguacates utilizados en el laboratorio después de su cosecha

Variedad	Firmeza kg-F/cm ² (+/-0,5)							
	Día 3	Día 4	Día 7	Día 8	Día 12	Día 14	Día 15	Día 16
Hass	7,5	7,5	7,5	7,5	6,0	5,5	4,0	3,5
Lorena	6,0	5,0	4,5	4,0	*	*	*	*
Santana	6,5	5,5	4,0	3,5	*	*	*	*
Choquette	7,0	6,5	6,0	5,0	4,0	*	*	*
Criollo	6,0	5,0	4,0	3,5	*	*	*	*

* El fruto se encuentra sobremaduro y no es apto para el estudio.

Fuente: Autor

4.1.4 Acondicionamiento de la pulpa de aguacate.

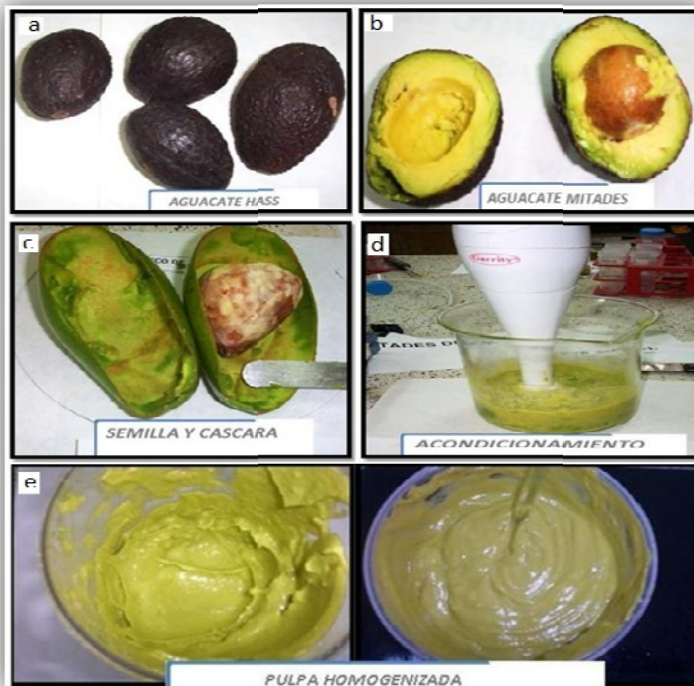
El acondicionamiento de la pulpa se realizó para cada una de las cinco variedades de aguacate seleccionadas y en su estado de madurez comercial de 3,5 Kg-f/cm²; para el caso de las variedades Hass, Santana, y Criollo y de 4,0 Kg-f/cm²; para las variedades Lorena y Choquette. Se encontró que la pulpa de cada variedad es diferente, por ejemplo; la variedad criollo tiene una pulpa color amarillo pálido y su textura es acuosa, por lo que se oxida con facilidad; la variedad Santana es de color verde claro al igual que la variedad Lorena; estas dos tienen una textura más cremosa que la variedad Criollo y se oxidan con menor facilidad. La variedad Choquette presenta una pulpa de color amarillo pálido y es de textura cremosa, y no se oxida fácilmente. La variedad Hass tiene una pulpa color verde y es muy suave, es la que presenta físicamente una mayor textura cremosa respecto a las demás variedades.

Durante el acondicionamiento de la pulpa, ésta tiende a presentar pardeamiento, dependiendo la variedad; en variedades como Criollo es difícil controlar el pardeamiento, para ello se deja sumergida la semilla en la pulpa, y se adiciona ácido cítrico, que aparte de disminuir el pH, ayuda a disminuir la oxidación de la pulpa.

Variedades como la Hass, tiene una pulpa con características poco igualables por otras variedades; presenta una alta estabilidad al pardeamiento, conservando así su característica de color en el producto final.

En la figura 4-2, se presentan los pasos para el acondicionamiento de la pulpa de aguacate:

Figura 4-2: Pasos de acondicionamiento de la pulpa de aguacate.



a) Aguacates variedad Hass. b) Aguacates en mitades. c) Semilla y cascara separadas. d) Acondicionamiento de la pulpa con ayudante de cocina. e) Pulpa de aguacate homogenizada.

Fuente: Autor

4.1.5 Extracción del aceite de aguacate utilizando tratamiento enzimático.

Se evaluaron y analizaron los resultados para cada una de las tres enzimas utilizadas; también se estudió el efecto de aplicar agitación durante el tratamiento enzimático.

De acuerdo con el diseño de experimentos se realizó un análisis estadístico, utilizando el modelo 2FL, el cual es estadísticamente significativo en un nivel de confianza al 95%, al cual se ajustan el 87,84% de los datos y cuenta con una desviación estándar de 0,02%.

Para el modelo de superficie de respuesta estadístico planteado por el programa Design Expert, la ecuación modelo para el rendimiento de extracción de aceite de aguacate por vía enzimática general, es de la forma:

$$y = B_0 + B_1x_1 + B_2x_2 + B_3x_3 + B_4x_1x_2 + B_5x_1x_3 + B_6x_2x_3$$

Donde:

$B_0, B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6$:	Son los coeficientes de la ecuación.
x_1 :	Concentración de enzima (g/t).
x_2 :	Tiempo (h).
x_3 :	Temperatura (°C).
y :	Rendimiento de producción.

El programa Design Expert genera valores asignados a los coeficientes de la ecuación determinada para cada una de las tres enzimas estudiadas y a la vez para cada proceso con agitación y sin agitación como se puede observar en la tabla 4-3.

Tabla 4-3: Modelo estadístico para el rendimiento en la extracción de aceite de aguacate.

Enzima	Agitación	B_0	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6
Enzima 1	con	-61,6486	0,0739	20,9659	3,2987	0,0033	-0,0026	-0,6019
	sin	-52,0982	0,0495	16,9274	2,9944	0,0033	-0,0026	-0,6019
Enzima 2	con	-72,4544	0,2365	21,0106	2,2120	0,0033	-0,0026	-0,6019
	sin	-39,6953	0,2121	16,9722	1,9076	0,0033	-0,0026	-0,6019
Enzima 3	con	-101,5060	0,1344	25,8065	4,0982	0,0033	-0,0026	-0,6019
	sin	-101,4150	0,1100	21,7680	3,7939	0,0033	-0,0026	-0,6019

Fuente: Autor

Los factores (Temperatura, Concentración, tiempo, aplicación de agitación y enzima) estudiados individualmente fueron todos estadísticamente significativos al 95% de confianza. Existe una fuerte interacción entre los factores de tiempo-temperatura, y una débil interacción entre los factores concentración-tiempo y concentración-temperatura.

Eliminando del modelo las interacciones débiles, el ajuste de los datos disminuye a 85,02% al 95% de confianza. La variabilidad del ajuste es pequeña con respecto al modelo original que como se mencionó anteriormente se ajustó al 87,84% de los datos. Con el anterior ajuste el

valor de los coeficientes B4 y B5 son cero, por lo que el modelo ajustado es como se muestra en la tabla 4-4.

Tabla 4-4: Modelo estadístico ajustado para el rendimiento en la extracción del aceite de aguacate.

Enzima	Agitación	B ₀	B ₁	B ₂	B ₃	B ₆
Enzima 1	con	-61,6486	0,0739	20,9659	3,2987	-0,6019
	sin	-52,0982	0,0495	16,9274	2,9944	-0,6019
Enzima 2	con	-72,4544	0,2365	21,0106	2,2120	-0,6019
	sin	-39,6953	0,2121	16,9722	1,9076	-0,6019
Enzima 3	con	-101,5060	0,1344	25,8065	4,0982	-0,6019
	sin	-101,4150	0,1100	21,7680	3,7939	-0,6019

Fuente: Autor

4.1.6 Separación por centrifugación.

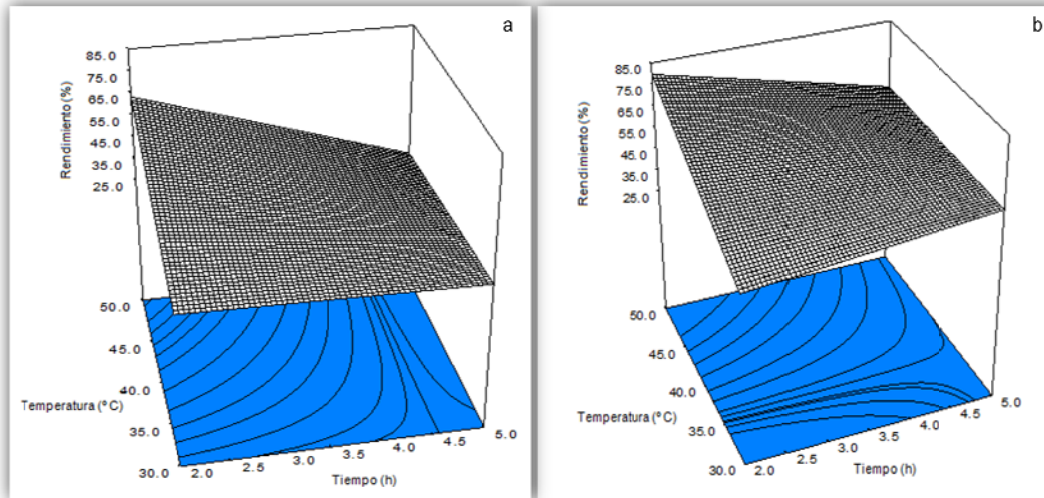
Se utilizó una centrifuga de laboratorio, durante un tiempo de operación de 30 minutos a una velocidad de 4200 g, en los cuales se logra la separación de la capa sólida.

Los resultados de los rendimientos después de la separación manual para cada una de las enzimas se muestran a continuación:

4.1.6.1 Enzima 1.

En la figura 4-3, para la variable rendimiento respecto a los factores de temperatura y tiempo, en la extracción del aceite de aguacate con enzima 1, se observa que el rendimiento se favorece en temperaturas mayores de 40 °C y tiempos entre 2 y 3 h. Cuando el tiempo es largo y la temperatura es baja el rendimiento disminuye considerablemente. Cabe anotar que cuando el tiempo aumenta, el rendimiento tiende a ser constante en el rango de temperatura empleado.

Figura 4-3: Superficie de respuesta para el rendimiento en la extracción del aceite de aguacate con la enzima 1.



a) Sin agitación. b) Con agitación.

Fuente: Autor

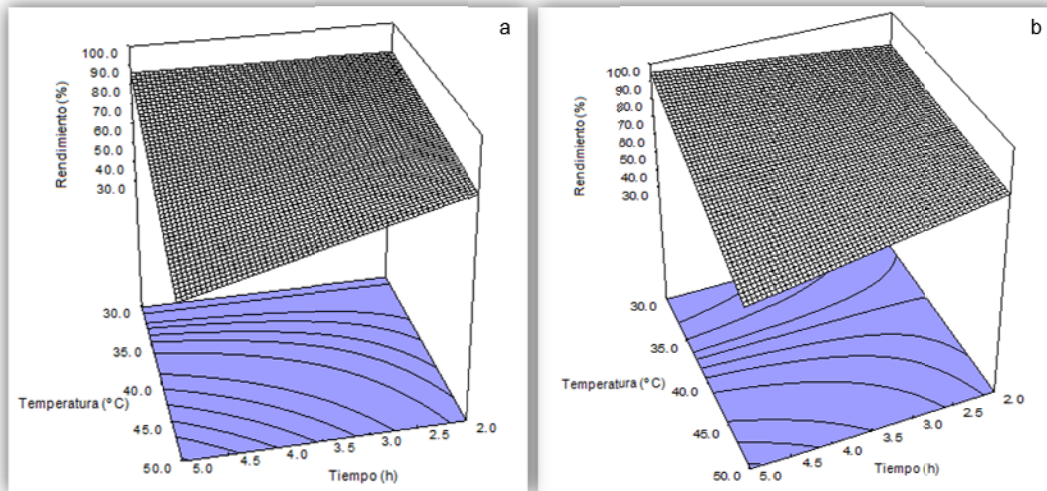
Con la enzima 1 se alcanzan rendimientos hasta de un $79,88 \pm 0,02\%$ cuando al proceso se le aplica agitación constante (figura 4-3b), y rendimientos de $63,69 \pm 0,02\%$ cuando no se le aplica agitación (figura 4-3a). El mayor rendimiento se alcanza en un tiempo de $2,00 \pm 0,25$ h con temperatura de 40 ± 2 °C, y aunque el rendimiento varía poco con respecto a la concentración de enzima, se favorece en forma superior a una concentración de 250 ± 25 g/t.

Es interesante encontrar que cuando al proceso se le aplica agitación durante hidrólisis enzimática aumenta aproximadamente un $16,19 \pm 0,02\%$ el rendimiento, respecto al proceso al cual no se aplica la agitación.

4.1.6.2 Enzima 2.

En la figura 4-4 para la variable rendimiento respecto a los factores de temperatura y tiempo en la extracción del aceite de aguacate con la enzima 2, se observa que se favorece a temperaturas bajas, cercanas al límite inferior de 30 ± 2 °C, y por el contrario se empieza a inhibir a temperaturas superiores y cercanas a los 45 ± 2 °C.

Figura 4-4: Superficie de respuesta para el rendimiento en la extracción del aceite de aguacate con la enzima 2.



a) Sin agitación. b) Con agitación.

Fuente: Autor

Con la enzima 2, se alcanzan rendimientos hasta de un $86,91 \pm 0,02\%$ cuando al proceso se le aplica agitación constante durante el tratamiento enzimático (figura 4-4b), y rendimientos de $79,36 \pm 0,02\%$ cuando al proceso no se le aplica agitación (figura 4-4a). El mayor rendimiento se alcanza en un tiempo de $2,0 \pm 0,25$ h, con temperatura de 35 ± 2 °C, y aunque el rendimiento varía poco con respecto a la concentración de enzima, se favorece en concentraciones altas de aproximadamente de 450 ± 25 g/t.

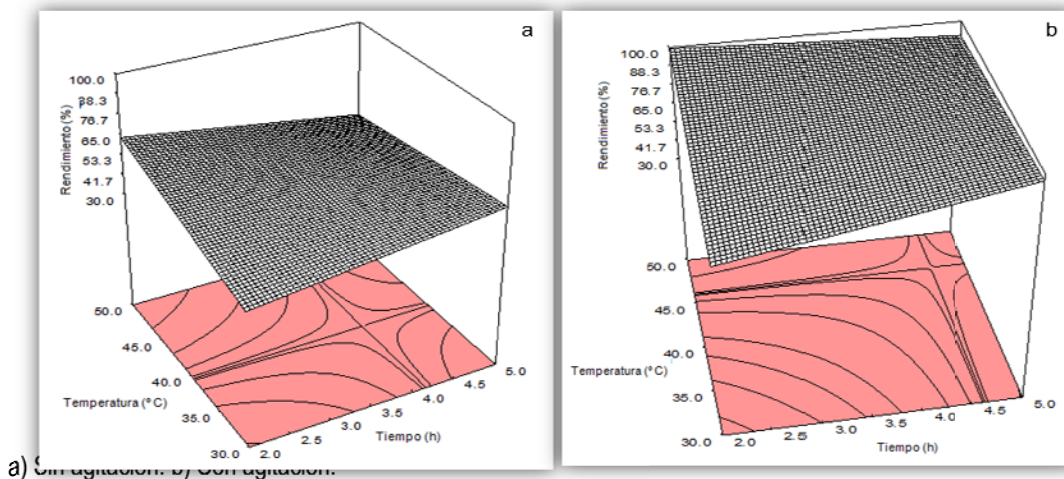
El proceso con la enzima 2 varía muy poco al aplicarle agitación durante la hidrólisis enzimática, en general su aumento en el rendimiento entre $7,55 \pm 0,02\%$ respecto al proceso al cual no se aplica la agitación.

4.1.6.3 Enzima 3.

En la figura 4-5 para la variable de rendimiento respecto a los factores de temperatura y tiempo en la extracción del aceite de aguacate con la enzima 3, se observa que se favorece a temperaturas altas, cercanas a 50 ± 2 °C. En temperaturas bajas se observa una disminución en el rendimiento.

Con la enzima 3, se alcanzan rendimientos hasta de un $98,41 \pm 0,2\%$ cuando al proceso se le aplica agitación constante durante el tratamiento enzimático (figura 4-5b), y rendimientos de $65,44 \pm 0,02\%$ cuando al proceso no se le aplica agitación (figura 4-5a). El mayor rendimiento se alcanza en un tiempo de $2,5 \pm 0,25$ h, con temperatura de 50 ± 2 °C, y aunque el rendimiento varía poco con respecto a la concentración de enzima, se favorece a concentraciones altas de aproximadamente de 475 ± 25 g/t.

Figura 4-5: Superficie de respuesta para el rendimiento en la extracción del aceite de aguacate con la enzima 3.



Fuente: Autor

El proceso con la enzima 3, varía drásticamente al aplicarle agitación durante la hidrólisis enzimática, en general su aumento en el rendimiento está en $32,97 \pm 0,02\%$.

Con la enzima 3, se desarrolló el proceso más constante, se puede observar en la figura 4-5b, que la variación del rendimiento respecto al tiempo varía en un porcentaje muy pequeño, como por ejemplo a una temperatura de $50 \pm 2^\circ\text{C}$ y un tiempo de $5,0 \pm 0,25$ h es de $88,90 \pm 0,02\%$.

Siendo así la enzima 3, la que mejor resultado presenta, y la más estable a los diferentes cambios.

Después de repetir por duplicado los ensayos para el modelo planteado por el programa Design Expert, y luego de optimizarlo, y con las características exactas para las tres enzimas, se determinó que la enzima más apropiada en cuanto a su eficiencia en la extracción del aceite de aguacate es la enzima comercial 3, aplicando agitación al proceso.

El resultado de la eficiencia de la extracción es ampliamente óptimo, pero la temperatura juega un papel importante en la calidad del aceite, debido a que a temperaturas mayores y cercanas a 50°C el aceite degrada su calidad en la estabilidad de los ácidos grasos saturados e insaturados, además el color del producto también es degradado de un verde esmeralda a verde amarillento, y su sabor cambia sintiéndose sabor amargo.

Dadas estas razones es necesario encontrar otros puntos estables donde se disminuya la temperatura y haya una alta eficiencia en la extracción, este

punto generado estadísticamente es a una temperatura de 40 ± 2 °C, con un tiempo aproximado de $3,5 \pm 0,25$ h, y con una concentración de 450 ± 25 g/t, donde se alcanza un rendimiento de $95,58 \pm 0,62\%$.

En la tabla 4-5 se observa el resumen de los resultados de las condiciones estables encontradas para el desarrollo del proceso, utilizando las tres enzimas comerciales.

Tabla 4-5: Resumen de condiciones estables de las enzimas y sus rendimientos

Enzima	Concentración de la enzima (g/t) .	Tiempo de hidrólisis enzimática (h).	Temperatura aplicada (°C).	Agitación	Rendimiento del proceso (%).
Enzima 1	250	2	40	sin	63,69 ±0,75
				con	79,88±0,52
Enzima 2	450	2	35	sin	79,36±0,88
				con	86,91±0,35
Enzima 3	475	2,5	50	sin	65,44±0,37
	450	3,5	40	con	98,41±0,25
		5	40		95,58±0,62
	450	5	40		88,9±0,43

Fuente: Autor

De los resultados resumidos en la tabla 4-5, se encuentra que los mayores beneficios en el rendimiento de producto son resultado del efecto de la aplicación de agitación durante el proceso de la hidrólisis enzimática. La enzima 3 presenta los mayores rendimientos, aunque algunas de las condiciones no son las más benéficas para el producto, como por ejemplo; una temperatura de 50 °C, la que puede degradar el aceite, o un tiempo de 5 h, debido a que es un tiempo extenso para un desarrollo industrial, lo que puede presentar pérdidas económicas.

4.1.7 Actividad experimental de las enzimas comerciales sobre el sustrato.

En la figura 4-6, se puede ver el desarrollo gráfico para las tres enzimas comerciales utilizadas, se determinó la ecuación de la recta tangente a la curva generada de los datos de concentración de aceite de aguacate producido, respecto a la concentración de la enzima en un tiempo de 3,5 h. La ecuación tiene la forma;

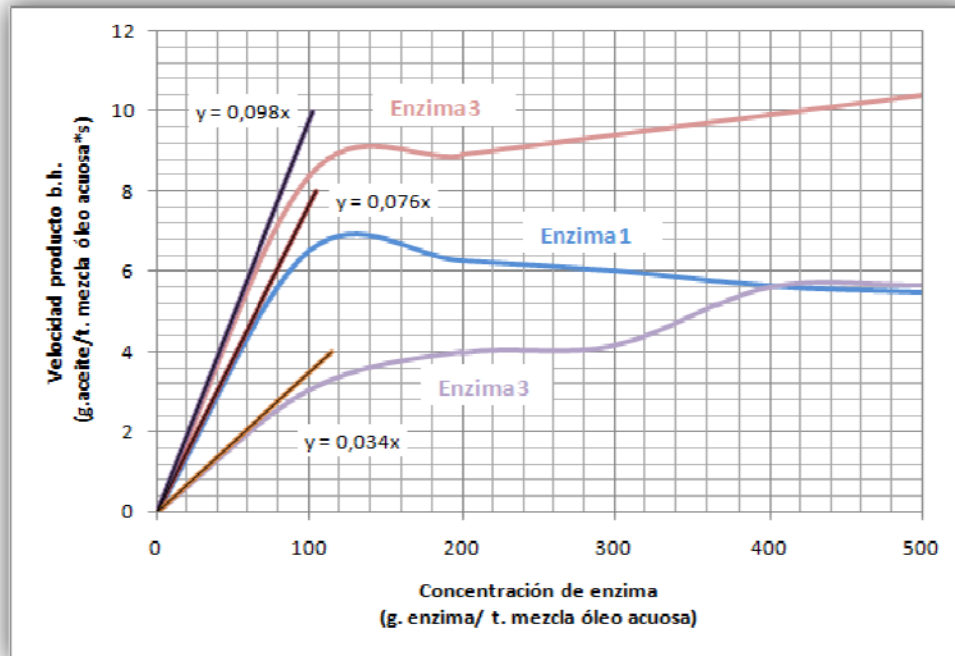
$$Y(t) = mx + b$$

Donde;

$$b=0$$

x= Concentración de enzima
 y m= pendiente de la recta = Actividad de la enzima

Figura 4-6: Determinación experimental de la actividad enzimática de las enzimas comerciales respecto al sustrato



Fuente: Autor

En la tabla 4-6 se observa el valor de la actividad experimental de cada enzima aplicada directo sobre el sustrato empleado (mezcla óleo acuosa de aguacate).

Tabla 4-6: Valor de la actividad experimental de las enzimas comerciales

Enzima	Actividad experimental (g. aceite/ g. enzima*s)
Enzima 3	0,098
Enzima 1	0,076
Enzima 2	0,034

Fuente: Autor

Según los resultados obtenidos, se encuentra que la enzima 3 posee el mayor valor de la actividad (0,098 g. aceite/g. enzima*s), seguido por la enzima 1 (0,076 g. aceite/g. enzima*s) y luego la enzima 2 (0,034 g. aceite/g. enzima*s)

4.2 Análisis y desarrollo en planta piloto

4.2.1 Selección de materia prima

La variedad de aguacate utilizada para el proceso de desarrollo en planta piloto es la variedad Hass, dado los resultados óptimos obtenidos en laboratorio. Se utiliza 97,17 kg de fruto de aguacate, de la segunda cosecha del año.

El fruto es recolectado de la finca La Perla el 11 de Octubre del año 2010, debido a que es un fruto climatérico se acondiciona en un lugar seco, y fresco dentro de la planta del ICTA, para evitar cualquier tipo de daño o enfermedad, se deja durante 16 días que son el tiempo óptimo de maduración. Pasado este tiempo se hace un proceso de limpieza y desinfección al fruto.

4.2.2 Estado de madurez de los frutos.

En la figura 4-7 se observan los cambios físicos que sufre el aguacate variedad Hass durante su tiempo de maduración, los primeros 8 días no se observa cambio aparente, el fruto tiene una textura dura y su cascara es verde sobre toda su superficie, a partir del día 12 se comienza a observar los cambios en el color hasta el día 16, donde su color cambia a café oscuro, casi negro.

Figura 4-7: Seguimiento de la madurez por color del aguacate variedad Hass



Fuente: Autor

Para el fruto variedad Hass, es importante conocer, que la maduración se debe dar en forma homogénea en toda su superficie, en algunos casos no sucede así, lo cual está dado por los cuidados agrícolas que se dan a los cultivos del fruto.

4.2.3 Acondicionamiento de la pulpa de aguacate.

Siguiendo el decreto 3075 de 1998, de Buenas Prácticas de Manufactura, inicialmente el fruto es sometido a limpieza y desinfección, con abundante

agua y con una concentración de 200 g/t de hipoclorito de sodio. Esto ayuda a evitar que se desarrolle cualquier tipo de daño en el producto.

En la figura 4-8, se observa el fruto con el estado de madurez comercial apropiado (día 16) para ser procesado.

Figura 4-8: Aguacate Hass utilizado en el proceso de extracción.



Fuente: Autor

Al fruto limpio y en el estado de maduración apropiado (día 16 ó 3,5 Kg-f/cm²) se le retira la cáscara y la semilla manualmente. La pulpa es transportada a la despulpadora, se agrega en la tolva y se inicia el proceso de despulpado, allí pasa por un tamiz desmontable de 16 mm de diámetro donde alcanza la textura cremosa que se observa en la figura 4-9.

Figura 4-9: Despulpado del aguacate.



Fuente: Autor

Dada la alta estabilidad del fruto durante el proceso, no se observan cambios de color en la pulpa. La pulpa no presenta oxidación, lo que favorece el proceso.

4.2.4 Adecuación de pH.

La pulpa es recogida en un recipiente en el que se adiciona el ácido cítrico y se mezcla hasta que todas las partes de la masa alcanzan el pH de $5,0 \pm 0,2$. Este pH además de ser el determinado para el proceso, favorece su conservación, en cuanto que retrasa el ataque microbiano, al igual que su oxidación.

4.2.5 Extracción del aceite de aguacate utilizando tratamiento enzimático.

La pulpa es llevada a una marmita durante $3,5 \text{ h} \pm 0,25$ a una temperatura de $40 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, con una concentración de enzima de $450 \pm 25 \text{ g/t}$, con aplicación de agitación continua. La temperatura es controlada para evitar la inactivación de la enzima por altas temperaturas. Durante este proceso es necesario agregar agua, la cual se determinó en proyectos anteriores que debe ser en relación 1:3 de pulpa: agua.

Figura 4-10: Hidrólisis enzimática en marmita



Fuente: Autor

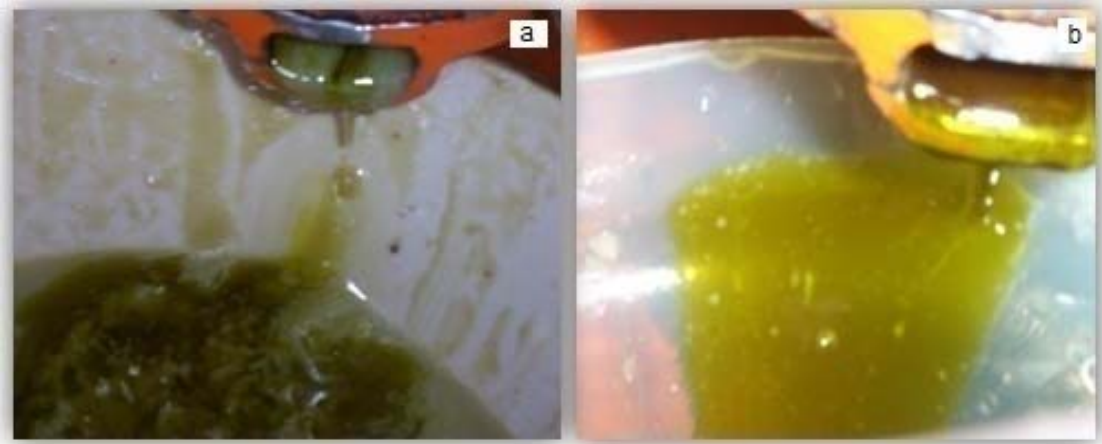
Durante este proceso y después de aproximadamente una hora, se empieza a observar la separación de una fina capa de grasa en la superficie. La agitación empleada es constante durante toda la operación, y permite que la enzima se mezcle bien y la temperatura permanezca invariable durante el proceso.

4.2.6 Separación por centrifugación

Tiempos menores de 30 minutos de centrifugación, no permiten una separación apropiada de tal forma que no se alcanza a eliminar el total del agua y su resultado es una mezcla de agua y aceite (figura 4-11a), además de que la torta de sólido retenida en el rotor queda con trazas de aceite.

La ultra centrifuga tiene una capacidad de retención de sólido aproximadamente de 2,0 kg que dada la cantidad de muestra se debe desocupar el rotor constantemente, por lo que es un procedimiento desgastante.

Figura 4-11: Aceite de aguacate obtenido tras el proceso de separación.



a.) tiempos menores de 30 minutos. b) tiempo de 30 minutos

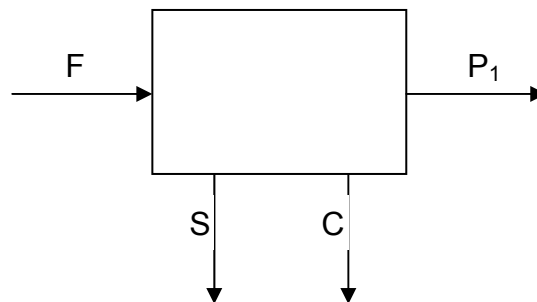
Fuente: Autor

Se observa en la figura 4-11b, el producto como resultado del proceso de separación empleando la centrifugación. El aceite tiene su color, olor y sabor característicos de la materia prima. El sólido que queda en el cilindro de la ultra centrifuga tiene una humedad baja (15%).

4.2.7 Balances de materia y rendimientos del proceso.

A continuación se presentan los balances de materia en cada etapa del proceso realizado a nivel planta piloto para determinación de los respectivos rendimientos.

4.2.7.1 Balance de materia para operación manual de despulpado



$$F = P_1 + S + C$$

$$F - S - C = P_1$$

$$P_1 = 97,15\text{kg} - 12,4\text{kg} - 20\text{kg}$$

$$= 64,75 \text{ kg trozos de aguacate a homogenizar}$$

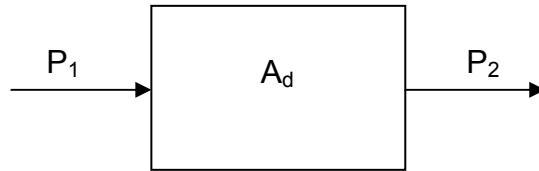
Donde:

F: fruto que ingresa al proceso.

P₁: Trozos de aguacate.

S: semilla del aguacate.
C: cáscara del aguacate

4.2.7.2 Balance de materia en despulpadora



$$P_2 = P_1 - A_d$$

$$P_2 = 64,75kg - 2,5kg = 62,25 \text{ kg de pulpa recuperada y homogenizada}$$

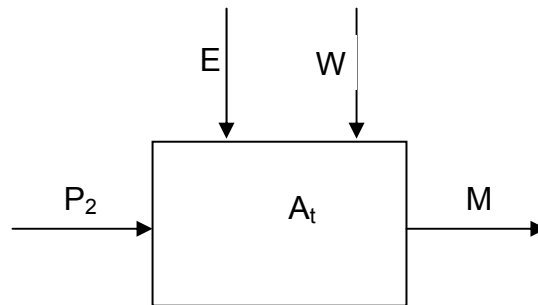
Donde:

P_2 : Pulpa de aguacate que sale de la despulpadora.

P_1 : Trozos de aguacate que entran en la despulpadora.

A_d : Pulpa de aguacate acumulada en la despulpadora.

4.2.7.3 Balance de materia para marmita.



$$P_2 + E + W - A_t = M$$

$$62,25kg + 0,11kg + 186,75kg - 3kg = M$$

$$M = 246,11 \text{ kg de Material tratado}$$

Donde:

P_2 : pulpa de aguacate que entra a la marmita.

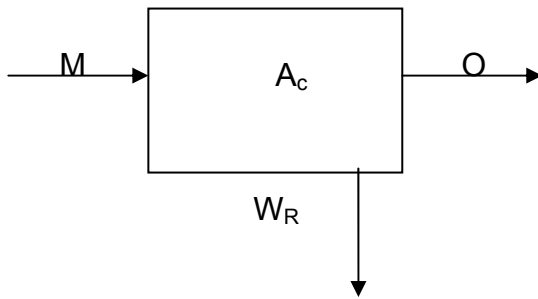
E: enzima 3.

W: agua (3 veces P_2).

A_t : material acumulado en la marmita.

M: Emulsión tratada.

4.2.7.4 Balance de materia para centrifuga



$$M = W_R + O + A_c$$

$$A_c = 246,11\text{kg} - 210,87\text{kg} - 13,30\text{kg} \\ = 21,94 \text{ kg de sólido retenido en el equipo}$$

Donde:

M: emulsión tratada.

W_R : agua residual.

O: aceite resultante del proceso

4.2.7.5 Rendimiento total

Porcentaje de aceite teórico extraído en el proceso:

Por método Soxhlet, se tiene que el aceite variedad Hass empleada en planta piloto contiene un 25,27% (b.h) de aceite de aguacate, por lo que se esperaría tener:

$$\text{Kg aceite teórico} = \frac{25,27\text{g aceite obtenido} * 62,25 \text{ kg pulpa tratada}}{0,1 \text{ Kg pulpa tratada}} * 100 \\ = 15,73 \text{ Kg aceite (b. h.)}$$

Porcentaje de aceite real extraído en el proceso:

$$\% \text{ de aceite} = \frac{13,30 \text{ kg aceite obtenido}}{62,25 \text{ kg pulpa tratada}} * 100 = 21,36\% \text{ aceite (b. h.)}$$

El aceite real obtenido (13,30 Kg) corresponde a una recuperación del 84,54% del total esperado de 15,73 Kg de aceite contenido en la pulpa tratada durante el proceso. El porcentaje recuperado en el desarrollo de planta piloto resultó variable respecto al rendimiento obtenido en el laboratorio (95,58%); tales resultados se debieron a las pérdidas que se presentaron en los equipos utilizados.

Se determinaron también los rendimientos para cada operación en planta piloto; sus resultados se presentan en la tabla 4-7.

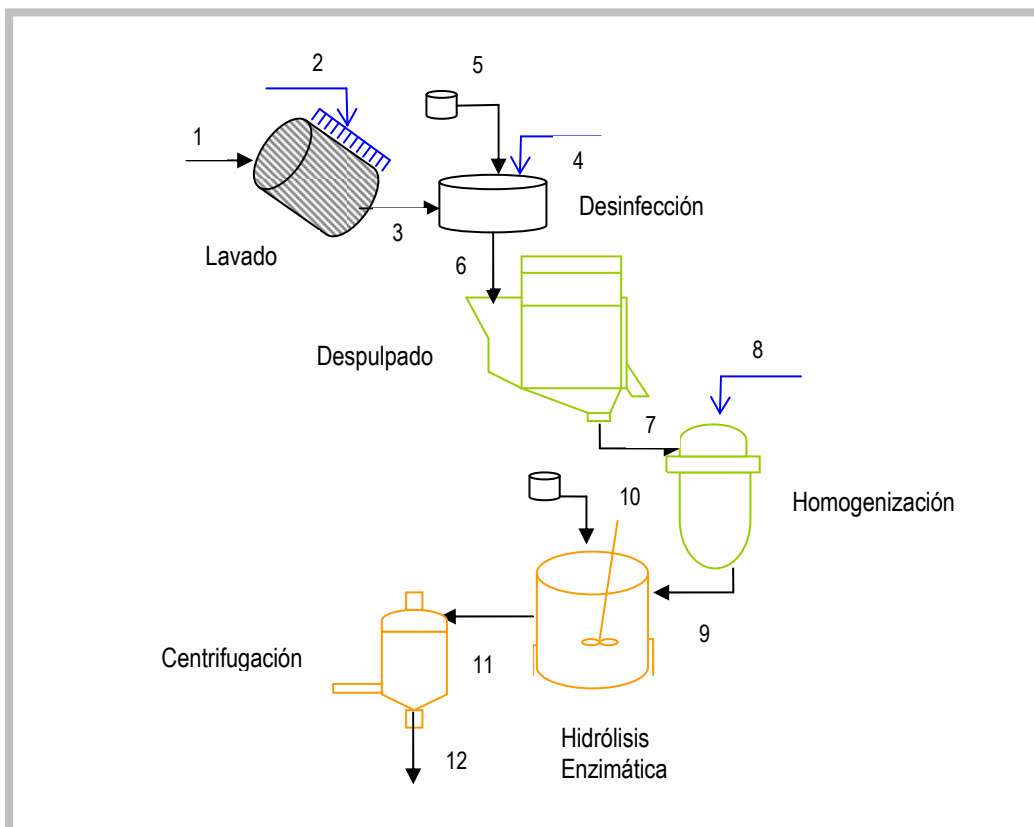
Tabla 4-7: Rendimientos del proceso de extracción del aceite de aguacate en planta piloto

Operación	% Rendimiento
Despulpado	66,65
Homogenizado	96,14
Tratamiento térmico	98,78
Separación	91,08
Proceso completo	84,54

Fuente: Autor

4.2.8 Proceso propuesto en la extracción de aceite de aguacate en planta piloto.

En la figura 4-12 se observa el diagrama propuesto para el proceso de extracción de aceite de aguacate en planta piloto.

Figura 4-12: Diagrama operaciones propuesto para la extracción del aceite de aguacate.

Fuente: Autor

En la tabla 4-8 se observan las condiciones de operación utilizadas durante el proceso, y en la tabla 4-9, están descritas las corrientes correspondientes a la figura 4-12.

Tabla 4-8: Condiciones de operación.

<i>OPERACIÓN</i>	<i>CONDICIONES</i>
<i>Lavado</i>	<i>T = 20°C</i>
<i>Desinfección</i>	<i>T = 20°C</i> <i>Solución de hipoclorito de sodio 200 g/t</i> <i>t = 5 min</i>
<i>Despulpado</i>	<i>T = 20°C</i>
<i>Homogenización</i>	<i>T = 20°C</i>
<i>Hidrólisis Enzimática</i>	<i>T = 40°C</i> <i>pH = 5,0</i> <i>t = 3,5 h</i> <i>Concentración de Enzima = 450 g/t</i>
<i>Centrifugación</i>	<i>V = 18000 gravedades</i> <i>T = 20°C</i> <i>t = 30 min</i>

Tabla 4-9: Descripción de corrientes.

<i>CORRIENTE</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>
<i>1</i>	<i>Aguacate entero</i>
<i>2</i>	<i>Agua</i>
<i>3</i>	<i>Aguacate lavado</i>
<i>4</i>	<i>Agua</i>
<i>5</i>	<i>Hipoclorito de sodio comercial</i>
<i>6</i>	<i>Aguacate lavado y desinfectado</i>
<i>7</i>	<i>Pulpa de aguacate</i>
<i>8</i>	<i>Agua</i>
<i>9</i>	<i>Pulpa de aguacate homogenizada</i>
<i>10</i>	<i>Enzimas Pectolíticas</i>
<i>11</i>	<i>Pulpa de aguacate hidrolizada</i>
<i>12</i>	<i>Aceite de aguacate</i>

4.2.9 Evaluación económica del proceso

A continuación se evalúa el costo del proceso desarrollado en planta piloto para 97 kg de aguacate de los cuales 65 kg son de pulpa.

El costo/kg de aguacate es tomado de la tabla 3-5.

Tabla 4-10: Costo total de aguacate

Descripción	cantidad (kg)	costo/kg (pesos)	costo total (pesos)
Aguacate Hass	97	1900	184300

Para el inicio del proceso es necesaria una cantidad de agua para lavado y desinfección del fruto, se tomó un promedio de 200 L de agua con un costo de 2,5 pesos por litro (valor tomado del acueducto y alcantarillado de Bogotá).

Tabla 4-11: Costo agua de lavado y desinfección

Cantidad fruto	Cantidad agua (l)	precio/litro (pesos)	Costo total (pesos)
97	200	2,5	500

En el tratamiento de hidrólisis enzimática, se adicionó tres veces el peso de la pulpa en agua (relación pulpa – agua).

Tabla 4-12: Costo agua de proceso

Cantidad fruto	pulpa (kg)	Cantidad agua (l)	precio/litro (pesos)	Costo total (pesos)
97	65	195	2,5	487,5

Durante la hidrólisis se adiciona 112 g de enzima correspondientes a una concentración de 450 g/t de mezcla.

Tabla 4-13: Costo de enzima

pulpa (kg)	cantidad agua (kg)	Total mezcla oleosa (kg)	Enzima (ppm)	cantidad enzima (g)	Precio enzima (pesos)
62,25	186,8	250	450	112,0	30253,5

Durante el proceso se usaron los equipos que a continuación se presentan, cada uno de ellos de acuerdo a su potencia (hp), y su consumo (Kw), el costo del Kw está referido a los precios empleados por la empresa Codensa para el sector industrial.

Tabla 4-14: Costo de energía de los equipos utilizados

Equipo	Potencia (hp)	Consumo (Kw)	precio/Kw	tiempo duración	costo total (pesos)
despulpadora	3	2,2	242,4	0,5	271,3
marmita (hidrólisis enzimática)	1	0,8	242,4	7,5	1.356,6
centrifuga	3	2,2	242,4	5,0	2.713,3
bomba peristáltica	3	2,2	242,4	5,0	2.713,3
Total					7.054,6

La mano de obra de un operario está referido al salario mínimo legal vigente en el país, y de acuerdo al tiempo empleado del proceso.

Tabla 4-15: Costo mano de obra

sueldo operario	Costo/hora	Total horas empleadas	Total costo mano de obra
535600	2231,7	13	29012,0

A continuación se presenta el costo total de los envases utilizados para el aceite total obtenido de 13,3 kg, correspondientes a un rendimiento de 84,54%. Se cotizaron envases en vidrio, color ámbar, de un volumen de 750 ml.

Tabla 4-16: Cantidad y costo de los envases

Pulpa (kg)	Cantidad aceite obtenido (kg)	Densidad (kg/l)	Aceite (l)	Aceite (ml)	Unidades envases de 750 ml	Costo unidad	Costo total
65	13,3	0,91	14,7	14700	20	325	6500

Durante el proceso se llevan a cabo otros costos, como el ácido cítrico, utilizado para disminuir el pH e hipoclorito de sodio utilizado para la desinfección del fruto.

Tabla 4-17: Otros costos

Descripción	Unidad	Total
acido cítrico	1500	1500
Hipoclorito de sodio		90

A continuación se resume el costo del proceso total, para la producción de 14,7 l de aceite de aguacate extra virgen, durante el proceso de planta piloto.

Tabla 4-18: Costo total del aceite

Descripción	Costos totales (pesos)
Aguacates	184.300,0
Cloro/desinfección	90,0
Envases 750 ml	6.500,0
agua (proceso + lavado)	987,5
enzima	30.253,5
acido cítrico	1.500,0
equipos	7.055,0
M.O	29.012,0
TOTAL PROCESO	259.698,0

El costo del proceso para una botella de aceite de aguacate extra virgen de 750 ml es de \$12.985. A continuación se presenta la comparación en precios con aceite de aguacate comercializado en Chile, México y España, en la misma presentación.

Tabla 4-19: Comparación de precios de aceite de aguacate en diferentes países

Costo proceso en planta piloto	Colombia	Chile (pesos)	México (pesos)	España (pesos)
12985	25.200	24.700	25.300	26.100

En Colombia se comercializa aceite virgen con un costo de \$13.200 en presentación de 750 ml, el costo de aceite extra virgen se incrementa a \$25.200 en el país, pero su comercialización es baja.

4.3 Evaluación de las características del aceite de aguacate

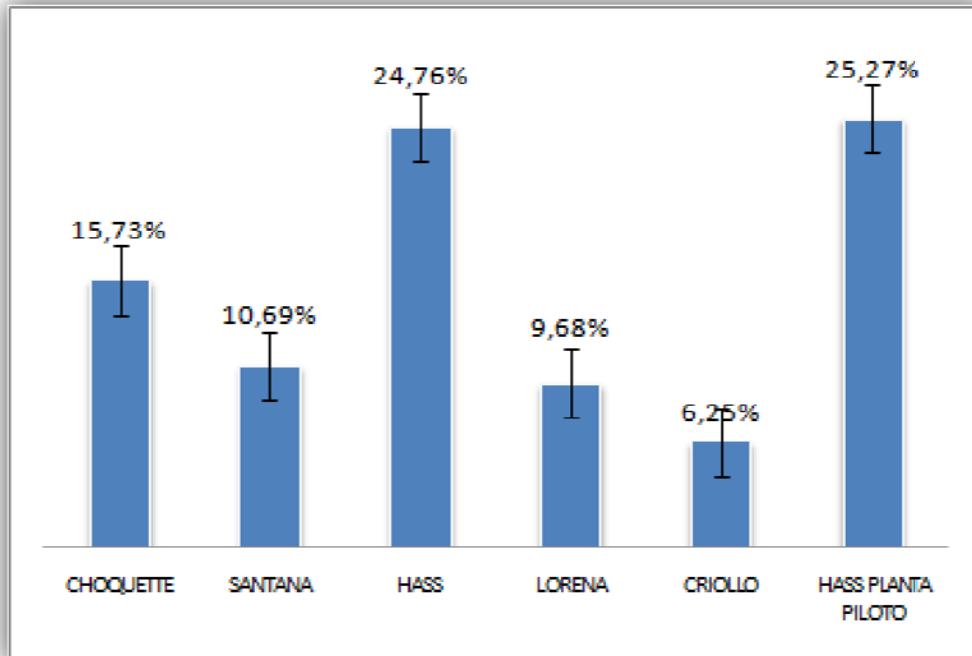
A continuación se presentan las características fisicoquímicas del aceite extraído a nivel laboratorio y planta piloto.

4.3.1 Extracción por solvente, método Soxhlet.

En la figura 4-13 se observa los resultados para el método Soxhlet, realizado a las muestras acondicionadas y con su madurez comercial adecuada e indicada en la tabla 3-5 para el caso del desarrollo en el laboratorio; y la madurez comercial del aguacate variedad Hass evaluada mediante color en la figura 4-7, utilizada en planta piloto. El aguacate de variedad Hass es la variedad que presentó un mayor contenido de grasa con un $24,76 \pm 0,2\%$ b.h. (75,22% b.s.) en peso, seguido por la variedad Choquette con un $15,73 \pm 0,2\%$ b.h. (56,23% b.s.) de contenido de grasa, y

con valores más bajos están Santana (10,69 \pm 0,2% b.h. - 34,52% b.s.), Lorena (9,68 \pm 0,2% b.h. - 33,6% b.s.) y Criollo (6,25 \pm 0,2% b.h. - 30,11% b.s.).

Figura 4-13: Contenido de grasa de las variedades de aguacate por método Soxhlet (b.h).



Fuente: Autor

El aguacate de variedad Hass es la variedad que presentó un mayor contenido de grasa con un 24,76% b.h. en peso, seguido por la variedad Choquette con un 15,73% b.h. de contenido de grasa, y con valores más bajos están Santana (10,69% b.h.), Lorena (9,68% b.h.) y Criollo (6,25% b.h.).

El aguacate Hass usado en planta piloto tiene un 25,27 \pm 0,2% b.h. (83,72% b.s.) de contenido de grasa, valor más alto con respecto al aguacate Hass utilizado en el laboratorio (24,76 \pm 0,2% b.h. - 75,22% b.s.). Esto se puede atribuir a la época de la cosecha de cada muestra, la primera corresponde a la cosecha en época de verano y la segunda en época de invierno, otra posible causa puede atribuirse a la cosecha en diferente maduración fisiológica del fruto en el momento de la recolección.

4.3.2 Características fisicoquímicas del aceite de aguacate obtenido.

La caracterización físico química del aceite de aguacate hace referencia al cumplimiento de las Normas Técnicas Colombianas para aceites comestibles (NTC 258).

Tabla 4-20: Resultados de características físicas y químicas del aceite de aguacate

Parámetro de calidad	Kirschenbauer (1964) (Aceite de Aguacate)	Aceite de Oliva	Valor Experimental Aceite de Aguacate Laboratorio variedad Choquette	Valor Experimental Aceite de Aguacate Planta piloto variedad Hass +/- 0,002
Densidad Relativa	0,91	0,91– 0,92	0,92	0,91
Humedad (%)	0,20-0.35	0,20-0,30	0,55	0,31
Índice de refracción	1,46 – 1,47	1,46– 1,47	1,47	1,47
Índice acidez (%m/m)	3,15-3,28	3,30-3,35	3,27	3,13
Índice peróxidos (meq. de oxígeno peróxido/ Kg)		19,50-20,50	20,50	19,90
Índice de yodo (g/g)	82,00-84,00	75,00 – 94,00	84,00	82,00
Índice de saponificación (%)	152-164	155-168	156	147

Fuente: Autor

Como se observa en la tabla 4-20, en general los datos de densidad, índice de refracción, índice de acidez, índice de peróxido, e índice de yodo están dentro de los parámetros establecidos para la NTC 258, si se compara con los datos reportados por Kirschenbauer se puede ver que son muy cercanos o en algunos casos están dentro de los intervalos establecidos.

4.3.3 Determinación del perfil de ácidos grasos.

Se obtuvo el perfil de ácidos grasos para el aceite de aguacate obtenido para cinco variedades diferentes del fruto.

En la tabla 4-21, se observa los resultados en la determinación de la cantidad de ácidos grasos que se encuentran en cada gramo de grasa, para los aceites obtenidos a partir de las variedades de aguacate utilizadas en el laboratorio y en planta piloto; a su vez se comparan con los datos obtenidos mediante cromatografía de gases para un aceite de aguacate comercial y los reportados por Zhong Haiyan.

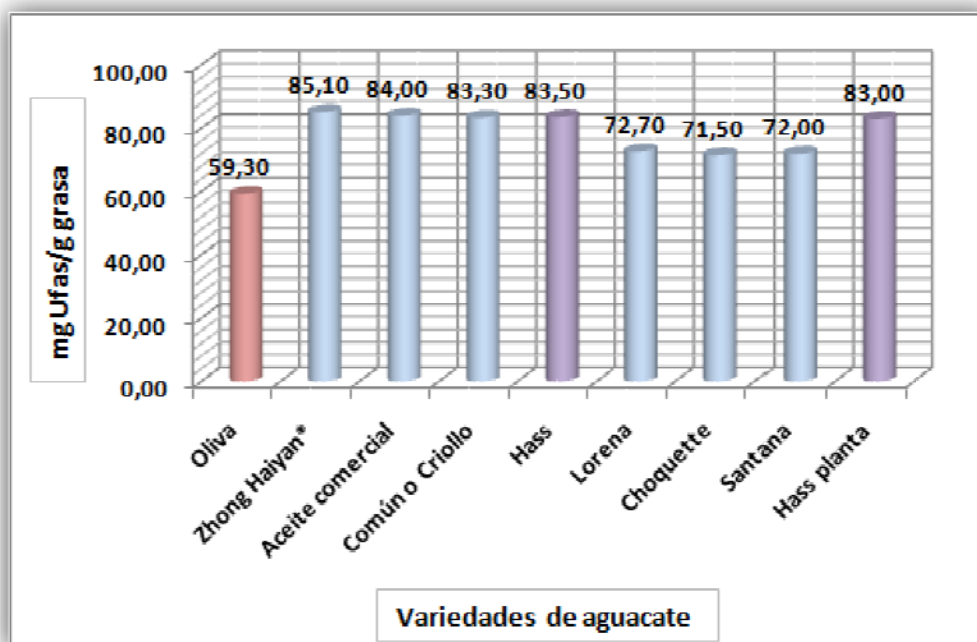
Tabla 4-21: Perfil de ácidos grasos (mg ácido graso/g grasa) del aceite de aguacate de las diferentes variedades

PICO	ACIDOS GRASOS	Oliva	Zhong Haiyan*	Aceite de aguacate comercial	Laboratorio					Planta piloto
					Común o Criollo	Hass	Lorena	Choquette	Santana	Hass
C16:0	Palmitico	32,11	14,10	14,56	15,10	15,60	24,38	26,20	26,01	16,49
C16:1	Palmitoleico	4,54	5,70	6,26	4,90	13,44	7,86	9,60	9,95	11,51
C18:0	Estearico	1,91	0,40	0,72	0,81	0,60	1,19	1,14	1,10	0,40
C18:1n-9 c/t	Oleico	48,5	69,10	66,94	64,45	54,70	44,65	41,84	43,00	58,17
C18:2n-6 c/t	Linoleico	5,44	9,60	10,25	12,10	13,20	17,18	17,21	16,48	11,13
C18:2n -9 c/t	octadecadienoico		0,20	0,18	0,93	1,12	1,12	1,02	0,94	1,03
C18:3n-3	Linolénico	0,79	0,30	0,32	0,96	1,03	1,92	1,87	1,72	0,93
C20:0	Araquídico		0,10	0,14	0,24	0,27	0,38	0,31	0,30	0,10
C20:1n-9 c/t	Eicosanoico		0,20							0,21
C22:0	Behenico	0,12	0,10							
No identificados	N.I.	6,59	0,20	0,63	0,51	0,04	1,32	0,81	0,50	0,03
	Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Acidos grasos poliinsaturados	Pufas	6,23	10,10	10,75	13,99	15,35	20,22	20,10	19,14	13,09
Acidos grasos monoinsaturados	Mufas	53,04	75,00	73,20	69,35	68,14	52,51	51,44	52,95	69,89
Acidos grasos saturados	Sfas	34,14	14,70	15,42	16,15	16,47	25,95	27,65	27,41	16,99
Omega 3	n-3	0,79	0,30	0,32	0,96	1,03	1,92	1,87	1,72	0,93
Omega 6	n-6	5,44	9,60	10,25	12,10	13,20	17,18	17,21	16,48	11,13
Relación omegas	n-6/n-3	6,89	32,00	32,03	12,60	12,82	8,95	9,20	9,58	11,97

Fuente: Autor

En la figura 4-14, se puede observar la comparación del perfil de los ácidos grasos insaturados (poliinsaturados y monoinsaturados) presentes en el aceite de aguacate para las variedades de aguacate utilizadas; los ácidos grasos poliinsaturados identificados en el aceite son linoleico, linolénico y octadecadienoico. Los ácidos grasos monoinsaturados identificados en el aceite son, palmitoleico, oleico y eicosanoico.

Figura 4-14: Perfil de ácidos grasos insaturados (mg ácido graso/g grasa) del aceite de aguacate.



Fuente: Autor

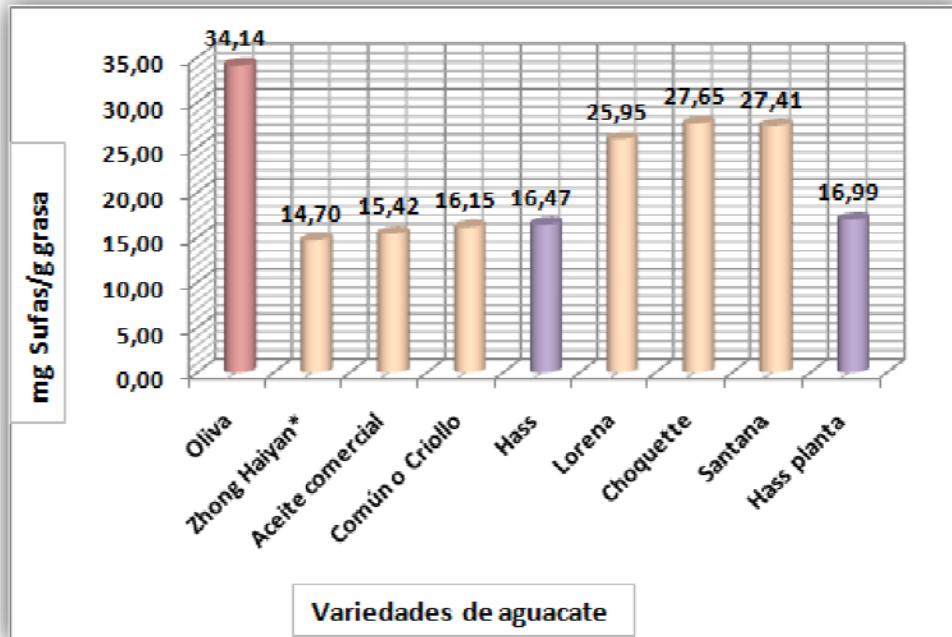
El contenido en general de ácidos grasos insaturados está sobre el 70%, pero las variedades Hass (83,49 %) y Criollo (83,34 %) tienen un mayor contenido y cercano al reportado por Zhong y Haiyan (85,10 %), y al obtenido para el aceite comercial (83,95 %). Aquellos que presentan menores valores son Lorena (72,73%), Santana (72,09 %) y Choquette (71,54 %).

El contenido de ácidos grasos insaturados de los aceites de aguacate evaluados es mucho mayor que el contenido de estos mismos ácidos en el aceite de oliva comercial.

En la figura 4-15, se puede observar la comparación del perfil de los ácidos grasos saturados presentes en el aceite de aguacate para las variedades de aguacate utilizadas; los ácidos grasos saturados identificados en el aceite

son palmítico (C16:0), esteárico (C18:0), araquídico (C20:0) y behénico (C22:0).

Figura 4-15: Perfil de ácidos grasos saturados (mg ácido graso/g grasa) del aceite de aguacate.



Fuente: Autor

Se observa que las variedades Lorena (25,95 %), Santana (27,41 %) y Choquette (27,65 %) reportan un mayor valor de ácidos grasos saturados con respecto a Criollo (16,15 mg ufas/g grasa) y Hass (16,47 %).

En general el bajo contenido de ácidos grasos saturados y alto contenido de insaturados refieren una excelente calidad del aceite; según los resultados la variedad Hass y Criollo, son las variedades de aguacate que refieren mejores propiedades en cuanto su contenido de ácidos grasos medidos por cromatografía de gases.

Comparando el contenido de ácidos grasos saturados de los aceites de aguacate se observa un menor contenido que en el aceite de oliva, lo cual favorece sus características nutraceuticas y cumple las exigencias de la OMS de disminuir el consumo de grasas saturadas.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

Se evaluaron y seleccionaron cinco variedades de aguacate, producidas en el departamento de Tolima por medio de análisis jerárquico, donde se determinó; el porcentaje de grasa en las variedades de aguacate es el criterio más importante con un 32%, seguido de la disponibilidad en el mercado, y el porcentaje de pulpa respecto al fruto. Con éstos resultados se concluyó que de las variedades presentes en el mercado las que más tienen posibilidad de aplicación para la extracción de aceite en su orden son: Hass, Choquette, Santana, Lorena y Criollo las cuales se analizaron a escala laboratorio encontrándose diferencias en su perfil de ácidos grasos presentes y en la cantidad de aceite en la pulpa.

El manejo del cultivo del aguacate durante su cosecha y poscosecha determinan en alta proporción la calidad que puede tener el producto final. El aguacate madura fuera del árbol, sin embargo el grado de madurez fisiológico durante el proceso de cosecha determina el contenido de grasa presente en el momento de procesar; es necesario por lo tanto cosechar en el punto adecuado y permitir la adecuada maduración en poscosecha para su procesamiento, todo lo anterior determina la posibilidad de la extracción del aceite presente en la pulpa. Entre menor sea el estado de madurez de los frutos, estos tienen menor contenido de aceite. El tiempo aproximado de maduración está entre 8 días para las variedades Lorena, Santana y Criollo, 12 días para la variedad Choquette y 16 días para la variedad Hass. El grado de madurez adecuado está relacionado con la firmeza del fruto y se encuentra entre valores de firmeza de 3,5 y 4,0 kg-f/cm². En la variedad Hass se puede también medir el grado de madurez mediante el cambio de color, el cual varía de un verde intenso en su estado inmaduro a un café oscuro en su estado maduro.

La enzima 3 es la enzima con mayor factibilidad de uso en la extracción de aceite de aguacate, ya que tiene un rendimiento aproximado en el laboratorio de 96% y de 85% en planta piloto.

Fueron determinadas las características físicas y químicas del aceite de aguacate obtenido en el laboratorio y planta piloto; sus valores fueron comparados con los requisitos exigidos por las normas técnicas colombianas para el aceite de oliva NTC. 258 y por los valores teóricos reportados por Kirschenbauer, tal y como se observa en la tabla 4-20. Los resultados obtenidos son equiparables con los parámetros exigidos, lo que permite verificar la excelente calidad del aceite de aguacate obtenido.

El perfil de ácidos grasos muestra que el contenido de ácidos grasos insaturados en el aceite de aguacate son comparables y mayores a los del aceite de oliva, mientras los ácidos grasos saturados están en menor proporción respecto al mismo. Tales cualidades favorecen su alta calidad, permitiendo una mayor digestión del producto en el organismo favoreciendo el aumento de colesterol bueno y disminución del colesterol malo.

Se evaluó el contenido de grasa de la pulpa de aguacate por método Soxhlet; se realizó a las cinco variedades inicialmente seleccionadas en el laboratorio (Hass, Santana, Choquette, Lorena, Criollo) y luego a una muestra de aguacate utilizada para el desarrollo de planta piloto (Hass). La variedad que presenta mayor contenido de grasa es la variedad Hass con un $24,76 \pm 0,02\%$ (b.h.), seguido de la variedad Choquette con un $15,73 \pm 0,02\%$ (b.h.), Santana ($10,69 \pm 0,02\%$ b.h.) Lorena ($9,68 \pm 0,02\%$ b.h.) y Criollo con ($6,25 \pm 0,02\%$ b.h.). La variedad Hass utilizada en planta piloto presentó un mayor porcentaje de grasa que la variedad Hass usada en el laboratorio con un $25,27\%$ b.h.

Se puede considerar que la adición de enzimas durante la extracción del aceite permite eliminar la extracción con solvente y por tanto la emisión de compuestos orgánicos volátiles, se disminuye el daño a la proteína y se implementan procesos más seguros, pues se reduce el riesgo de explosión, así como se eliminan la presencia de residuos químicos en el producto terminado, lo que determina que no pueden ser consumidos. Con todo esto disminuyen también los costos y la utilización de energía siendo un proceso más amigable con el medio ambiente.

Con los resultados obtenidos, el desarrollo del proceso de extracción de aceite de aguacate utilizando enzimas en la industria, tiene altas oportunidades, debido a que es un producto de mayor valor agregado que permitiría que los costos del fruto permanecieran estables en la época de mayor cosecha del fruto, y dado que el producto cumple con las características fisicoquímicas, tiene una alta posibilidad de ser comercializado a nivel nacional e internacional.

De acuerdo al análisis de costos realizados es factible el montaje de una planta de extracción de aceite de aguacate, pues el producto presenta una alta rentabilidad la cual se incrementaría al aumentar la escala. El costo de

producción es bajo comparado con los costos de productos de la misma calidad que se ofrecen a nivel internacional. Lo anterior confirma la posibilidad de iniciar nuevos procesos de transformación que permitan que los productores cuenten con nuevos mercados para sus productos y de esta forma cambiar la dinámica de demanda y oferta cuando se presentan las épocas de cosecha del fruto.

5.2 Recomendaciones

Implementar un proyecto que tenga como objetivo el diseño de una planta de extracción de aceite de aguacate, cuyo aspecto crítico sea el diseño de una centrífuga teniendo en cuenta las características de viscosidad y densidad del material oleoso a tratar.

Bibliografía

Ácidos grasos insaturados [online]. Disponible en <<http://www.scielo.com.cl>> (último acceso: 14 de Mayo de 2010).

Agrocadenas Oleoginosas de Colombia [online]. Disponible en <<http://www.agrocadenas.gov.co>> (último acceso: 12 de Agosto de 2009).

Aguacate. [online]. Disponible en <<http://www.cci.org.co/Manual/Productos/Frutas/Aguacate/aguacate03.htm>> (último acceso: 19 de Marzo de 2009).

ALIAKBARIAN, B. DE FAVERI, D. CONVERTI, A. PEREGO, P. «Optimization of Olive Oil extraction by means of enzyme processing aids using response surface methodology.» *Biochemical Engineering Journal Elsevier*. Vol. 42 (2008): Págs. 34-40.

ATEHORTUA, M. *Aguacates*. Medellín: Secretaria de Agricultura y Fomento de la Gobernación de Antioquia (1975).

BAUDI, S. *Química de los alimentos*. México: Pearson Educación (1997).

BAUDI, S. *Química de los Alimentos*. México: Alhambra Mexicana (1993).

BERNAL, J. DIAZ, C. «Tecnología para el cultivo del aguacate.» CORPOICA, La selva (2008): Pág. 29.

BOTHA, B. «Supercritical fluid extraction of avocado oil.» *South African Avocado Grower's Association*. Vol. 27 (2004): Págs. 24-27.

BOURNE, M.C. «Effect of temperature on firmness of raw fruits and vegetables.» *Journal of Food Science*. Vol. 47 (1982): Págs. 440-444.

BREKKE, J. MACKINNEY, G. «Aldehydes from Rancid Corn and Avocado Oils.» *Journal of the American Oil Chemist's Society* Vol. 27, nº 6 (1950): Págs. 238-240.

BUENROSTRO, M. LOPEZ, A. «Enzymatic extraction of avocado oil.» *Biotechnology Letters*. Vol. 8, nº 7 (1986): Págs. 505-506.

CARRERA, J. Módulos de Biotecnología. «Producción y Aplicación de Enzimas Industriales.» Editado por Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad del Cauca. Vol. 1, nº 1 (2003): Págs. 9-15.

CHRISTOPOLOU, E. LAZARAKI, M. KOMAITIS, M. KASELIMIS, K. «Effectiveness of determinations of fatty acids and triglycerides for the detection of adulteration of olive oils with vegetable oils.» *Food Chemistry*. Vol. 84 (2004): Págs. 463-474.

CLARK, C. WHITTE, A. JORDAN, R. WOOLF, A. «Challenges associated with segregation of avocados of differing maturity using density sorting at harvest.» *Postharvest Biology and Technology*. Vol. 46, nº 2 (2007): Págs. 119-127.

CORPORACIÓN COLOMBIANA DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA. C.I. CORPOICA. «Potencial de Transformación agroindustrial de cultivos criollos de aguacate en el departamento del Tolima.» El Espinal, Tolima (2008).

COSTA, V. «Extracción Enzimática y Caracterización del Aceite de Palta.» Trabajo de grado, para optar al título de Ingeniería en Agronomía, Facultad de Ciencias Agronómicas. Escuela de Agronomía, Universidad de Chile, Santiago-Chile (2001).

DANE. «Encuesta anual manufacturera.» Bogotá (1998-2002).

DEUEL, H. y STUTZ, E. «Pectic substances and pectic enzymes.» *Advances in enzymology*. Vol. 20. (1958): Págs. 341-348.

FAWCETT, I. «Análisis de Extracción de Aceite de Aguacate por Métodos Físicos y evaluación de una producción a gran Escala.» Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico, Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química, Universidad de los Andes, Bogotá (2004).

FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. *El cultivo de aguacate*. Cali: Segunda edición (1982).

FENNEMA, O. *Química de los Alimentos*. Zaragoza, España: Editorial Acibia, (1993).

FINOL, H. «Alimentos. Aceites y generalidades de los aceites. [online].» (2005). Disponible en <[http:// www.mailxmail.com](http://www.mailxmail.com)> (último acceso: 15 de Julio de 2009).

FINOL, H. «Curso alimentos. Técnicas y procesos de conservación. [online].» (2007). Disponible en <[http:// www.mailxmail.com](http://www.mailxmail.com)> (último acceso: 09 de Julio de 2009).

FRANCO, J. RODRÍGUEZ, S. «Extracción y purificación del aceite de aguacate.» Tesis para optar al título de Químico., Departamento de Ciencias. Facultad de Química, Corporación Autónoma de Colombia, Bogotá (1998).

FREITAS, S. DA SILVA, F. LAGO, R. QASSIM, R. «Rheological behaviour of processed avocado pulp emulsions.» *International Journal of Food Science and Technology*. Vol. 31 (1996): Págs. 319 – 325.

GONZALEZ, M. «Diseño de una planta para extracción y procesamiento de aceite de aguacate en la zona norte del Tolima.» Tesis de grado para optar al título de Ingeniera Agroindustrial., Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Universidad del Tolima, Ibagué - Tolima (2008), 162 h.

HAIYAN, Z. BEDGOOD, D. BISHOP, A. PRENZLER, P. ROVARDS, K. «Endogenous Biophenol, fatty acid and volatile profiles of selected oils.» *Food Chemistry* (2005): 1544-1551.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN . *Método de Determinación de Densidad*. Bogotá : ICONTEC (NTC 336), (2002).

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN . *Método de Determinación de Humedad y Sustancias Volátiles*. Bogotá : ICONTEC (NTC 287), (1998).

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN . *Método de Determinación del índice de Yodo*. Bogotá : ICONTEC (NTC 283), (1998).

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. *Aceite de Oliva*. Bogotá: ICONTEC (NTC 258), (1998).

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN . *Método cualitativo para la Determinación de Rancidez por medio de la reacción de Kreiss*. Bogotá: ICONTEC (NTC 219), (1998).

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN . *Método de Determinación del Índice de Peróxido*. Bogotá: ICONTEC (NTC 236), (1998).

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN . *Método de Determinación del Índice de Refracción*. Bogotá: ICONTEC (NTC 289), (2002).

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN . *Método de determinación índice de acidez*. Bogotá: ICONTEC (NTC 218), (1999).

JIMENEZ, E. AGUILAR, M. ZAMBRANO, L. KOLAR, E. «Propiedades físicas y químicas del aceite de aguacate obtenido de puré deshidratado por microondas.» *Journal of the Mexican Chemical Society* Vol. 45, nº 2 (2001): 89-92.

KIRITSAKIS, A. *El aceite de Oliva*. Madrid: Vicente Ediciones (1982).

KIRSCHENBAUER, H. *Grasas y aceites, Química y Tecnología. Segunda edición*. México: Editorial Continental (1964).

LINARES, H. MENDOZA, J. MOYANO, M. JACKISCH, B. «Influencia del uso de complejos enzimáticos en la segunda centrifugación de pastas de aceituna.» *Grasas y Aceites*. Vol. 57, nº 3 (2006): Págs. 301-307.

LOGARAJ, T. BHATTACHARYA, S. UDAYA, S. VENKATESWARAN, G. «Rheological behaviour of emulsions of avocado and watermelon oils during storage.» *Food Chemistry*. Vol. 106 (2008): Págs. 937-943.

MARTÍNEZ, M. «La Refinación del Aceite de Aguacate.» Tesis para optar al título de Ingeniero Químico, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá, (2002): 148 h.

MC MURRY, J. *Química Orgánica*. México: Grupo Editorial Iberoamérica (1993).

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL. *Anuario estadístico del sector Agropecuario [online]*. (2002). Disponible en <<http://www.avocadosource.com/congresomundial/Resumenes>>.

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL. Observatorio Agrocadenas Colombia. «La Cadena de Oleaginosas, grasas y aceites en Colombia [online].» (1991-2005). Disponible en <<http://www.avocadosource.com/congresomundial/Resumenes>> (último acceso: 12 de Junio de 2009).

MINISTERIO DE SALUD. *Resolución 000126*. Bogotá (1964).

MURKOVIC, M. LECHNER, S. PIETZKA, S. BRATACOS, M. KATZOGIANNOS, E. «Analysis of minor components in olive oil.» *Journal of biochemical and biophysical methods*. Vol. 61 (2004): Págs. 155-160.

NEVA, E. «Mitos y Realidades de los Alimentos Funcionales.» Trabajo de Grado, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá (1997).

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. OMS. << Guía de alimentación; una vida sana>>. Copenhagen, 1998.

ORTIZ, A. DORANTES, L. GALINDEZ, C. «Desarrollo de un proceso para la obtención de aceite de aguacate de alta calidad empleando una tecnología emergente [online].» (2005). Disponible en <http://www.pncta.org.co/investigaciones_03> (último acceso: 12 de Agosto de 2009).

ORTIZ, J. *Aceite de Palta o Aguacate Hass [online]*. (2008). Disponible en <<http://www.paltas.com>> (último acceso: 26 de Noviembre de 2009).

ORTIZ, J. *Proteínas y enzimas [online]*. Disponible en <<http://depa.pquim.unam.mx/proteinas/enzimas/index.html>> (último acceso: 08 de Agosto de 2010).

OVANDO, C. WALISZEWSKI, K. «Preparativos de Celulasas comerciales y aplicaciones en procesos extractivos.» *Universidad y Ciencia* Vol. 21, n° 42 (2005): Págs. 113-122.

OZDEMIR, F. TOPUZ, A. «Changes in dry matter, oil content and fatty acids composition of avocado during harvesting time and post-harvesting ripening period.» *Food Chemistry*. Vol. 86 (2004): Págs. 79-83.

PERRY, R. CHILTON, H. *Biblioteca del Ingeniero Químico*. Vol. V, Pág. 19. México: Mc Graw Hill (1998).

POTTER, N. HOTCHKISS, J. «Food Science.» *An Aspen Publication* 5th Ed. (1995).

Producto Palta [online]. Disponible en <<http://www.razeto.com-cl>> (último acceso: 15 de Junio de 2009).

PROHACIENDO. Corporación para la promoción del desarrollo rural y agroindustrial del Tolima. «El cultivo de aguacate.» Módulo para el desarrollo tecnológico de la comunidad rural, Ibagué (2001).

QUILES, J. HUERTAS, J. OCHOA, J. BATTINO, M. MATAIX, J. MAÑAS, M. «Dietary Fat (Virgin Olive Oil or Sunflower Oil) and Physical Training Interactions on Blood Lipids in the Rat: Basic nutritional investigation.» *Nutrition. Elsevier Science Inc.* Vol. 19, nº 4 (2003): Págs. 363-368.

ROJAS, D. ACOSTA, M. «Evaluación de la Extracción Vía Enzimática del Aceite de Aguacate.» Tesis como prerrequisito para optar al título de Ingeniero Químico, Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá (2006): 95 h.

ROSENTHAL, A. PYLE, D. NIRANJAN, K. «Aqueous and enzymatic processes for edible oil extraction.» *Enzyme and Microbial Technology.* Vol. 19 (1996): Págs. 402 –420.

SCHWARTZ, M. OLEATA, J. UNDURRAGA, P. COSTA, V. «Mejoramiento del rendimiento de extracción del aceite de palta (Aguacate).» Actas VI Congreso Mundial del Aguacate, Viña del Mar, Chile (2007).

SERRANO, M. MARTÍNEZ, D. GUILLÉN, F. VALVERDE, JI. ZAPATA, P. CASTILLO, S. VALERO, D. «The addition of essential oils to MAP as a tool to maintain the overall quality of fruits.» *Food Science and Technology* Vol. 19 (2008): Págs. 464-471.

SIVAKUMAR, G. BRICCOLI, B. PERRI, E. UCCELLA, N. «Gas chromatography screening of bioactive phytosterols from mono-cultivar olive oils.» *Food Chemistry* Vol. 95, nº 3 (2006): Págs. 525-528.

SKOOG, D. HOLLER, J. NIEMAN, T. *Principios de análisis instrumental. Quinta edición.* Editado por Concepción Fernández Madrid. Madrid: McGRAW-HILL, (2001).

SORIANO, M. «Análisis de sistemas pectinolíticos bacterianos. Aislamiento y caracterización de las pectinasas PeLA de *Paenibacillus* sp. BP - 23 e YvPA de *Bacillus Subtilis*.» Tesis Doctoral, Departamento de Microbiología. Facultad de Biología., Universidad de Barcelona, Barcelona (2004).

UCEDA, M. JIMÉNEZ, A. BELTRAN, G. «Olive oil extraction and quality.» *Grasas y Aceites.* Vol. 57, nº 1 (2006): Págs. 25-31.

UNDURRAGA, P. OLAETA, J.A. OPAZO, G. «Determinación de la evolución y caracterización de los aceites en palta, *Persea americana* cv.

Fuerte y Hass cultivados en Chile .» *Revista Chapingo Serie Horticultura* Vol. 5 (1999): Págs.117-122.

VAN BUREN, J. KLEAN, W.P. y WILKINSON, M. «Influence of salts and pH on the firmness of cooked snap beans in relation to the properties of pectin.» *J. Texture Stud.* Vol. 19 (1988): 15-25.

VARGAS, J. «Los ácidos grasos omega - 3.» Trabajo final para optar al título de Especialista en Farmacología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá (1993).

VELÁSQUEZ, J. «Identificación del aguacate como un rubro importante de grandes oportunidades comerciales, según los acuerdos de integración, los nuevos tratados comerciales y el comercio mundial globalizado.» Editado por Secretaria de Productividad y Competitividad. Gobernación de Antioquia (2006).

WEERMAN, M.J. MOKADY, S. NEEMAN, I. «A simple and sensitive method for detecting avocado seed oil in various avocado oils.» *Journal of the american oil chemist's* Vol. 73, nº 5 (1996): Págs. 665-667.

WERMAN, M.J. NEEMAN, I. «Oxidative stability of avocado oil.» *Journal american oil chemist's society* Vol. 63, nº 3 (1986): Págs. 355-360.

WERMAN, M.J. NEEMAN, L. «Avocado oil production and chemical characteristics.» *Journal american oil chemist's society* Vol. 64, nº 2 (1987): Págs. 229-232.

YEGRES, S. SANCHEZ, J. BELMAR, M. RIVEROS W. BELMAR, D. «Producción de enzimas pécticas a escala piloto.» Departamento de Bioanálisis. Escuela de Ciencias, Universidad de Oriente, Caracas, Venezuela (2000), Págs. 54-56.

ZHONG, H. BEDGOOD, D. BISHOP, PI. ROBARDS, K. «Endogenous biophenol, fatty acid and volatile profiles of selected oils.» *Food Chemistry* Vol. 100, nº 4 (2007): Págs. 1544-1551.

Anexos

Anexo A. Porcentaje de cascara, pulpa, semilla

Estos parámetros son muy útiles a escala industrial ya que determinan los rendimientos esperados, generalmente se buscan relaciones altas de pulpa, que garanticen un nivel de calidad determinado, por esta razón a cada fruto se le separa la cáscara, pulpa y semilla, para cada una de las muestras, teniendo cuidado de no confundirlas, respetando la marcación inicial de las mismas.

En la balanza analítica, se pesa cada uno de los componentes, registrando el peso en gramos, para posteriormente, calcular el porcentaje de cada uno. Registrando la relación Semilla: Cascara: Pulpa

$$\% \text{ Cáscara} = \frac{\text{Peso cáscara}}{\text{Peso total}} * 100$$

$$\% \text{ Semilla} = \frac{\text{Peso semilla}}{\text{Peso total}} * 100$$

$$\% \text{ Pulpa} = \frac{\text{Peso pulpa}}{\text{Peso total}} * 100$$

Anexo B. Diseño de experimentos que propone el programa Design Expert.

Diseño de experimentos por respuesta de superficie mediante el programa Design Expert

Experimento	Concentración de enzima g/t	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Agitación	Enzima
1	100	50	2,00	con	Enzima 1
2	100	50	3,50	sin	Enzima 3
3	400	40	2,75	sin	Enzima 2
4	100	50	5,00	con	Enzima 2
5	100	30	2,00	con	Enzima 2
6	100	50	2,00	con	Enzima 1
7	500	50	3,50	sin	Enzima 3
8	500	30	2,00	con	Enzima 1
9	500	30	5,00	sin	Enzima 1
10	500	30	2,00	sin	Enzima 3
11	100	40	2,00	sin	Enzima 3
12	500	30	5,00	con	Enzima 2
13	100	50	2,00	sin	Enzima 2
14	500	40	2,00	con	Enzima 3
15	500	50	5,00	sin	Enzima 2
16	300	30	5,00	sin	Enzima 3
17	300	50	2,00	con	Enzima 3
18	100	30	2,00	con	Enzima 2
19	300	40	3,50	con	Enzima 1
20	100	30	5,00	con	Enzima 1
21	100	50	5,00	sin	Enzima 1
22	100	50	5,00	con	Enzima 3
23	500	30	5,00	sin	Enzima 1
24	500	50	2,00	sin	Enzima 1
25	500	40	5,00	con	Enzima 3
26	100	30	2,00	sin	Enzima 1
27	500	50	2,00	sin	Enzima 1
28	500	50	2,00	con	Enzima 2
29	100	30	5,00	sin	Enzima 2
30	100	30	2,00	sin	Enzima 1
31	100	30	3,50	con	Enzima 3
32	100	40	5,00	sin	Enzima 3
33	500	30	3,50	con	Enzima 3
34	500	50	5,00	con	Enzima 1

Fuente: Autor

Anexo C. Extracción del aceite método Soxhlet

FUNDAMENTO Una cantidad previamente homogeneizada, seca y pesada del aguacate se somete a una extracción con éter de petróleo o éter etílico, libre de peróxidos o mezcla de ambos. Posteriormente, se realiza la extracción total de la materia grasa libre por Soxhlet.

MATERIAL Y EQUIPO

Sistema extractor Soxhlet
 Balanza analítica
 Papel filtro o dedal de celulosa
 Horno microondas
 Tamiz de malla de 1 mm
 Material usual de laboratorio

REACTIVOS

Éter de petróleo P.E. 40-60°C

PROCEDIMIENTO

Preparación de la muestra: pesar 100g de pulpa de aguacate y secar la muestra por 20 minutos, potencia 9 en el horno microondas.

Luego pesar nuevamente, colocarle en el papel filtro y ponerla en el dedal. Pesar el matraz o balón de extracción.

Poner el matraz de extracción en el sistema Soxhlet el dedal en el tubo de extracción y adicionar el solvente al matraz, aproximadamente 140 ml de éter de petróleo. Extraer la muestra con el solvente por 6 a 8 horas a una velocidad de condensación de 3-6 gotas/s. Una vez terminada la extracción eliminar el solvente por evaporación en rota vapor o baño María bajo campana. Hasta que no se detecte olor a éter. Secar el matraz con la grasa en estufa a 103± 2°C por 10 min, enfriar en desecados y pesar.

CALCULOS:

$$\% \text{ Aceite} = \frac{W_b - W_{b+a}}{m}$$

Donde: W_b : Es el peso del balón o matraz.
 W_{b+a} : Es el peso del balón más el aceite extraído.
 m: Peso de la muestra.

Los resultados se informan en % de materia grasa en base seca o húmeda.

Anexo D. NTC 258. Aceite de oliva

OBJETIVO

Requisitos y métodos de ensayo que deben cumplir los aceites comestibles de oliva virgen, refinado y las mezclas de ambos.

DEFINICIONES

Aceite de oliva virgen: Aceite obtenido del fruto de olivo por medios mecánicos u otros medios físicos en condiciones especiales de Temperatura, que no alteren su composición, puede consumirse en su estado natural.

Aceite de oliva refinado: Obtenido del aceite de oliva virgen, cuyas características organolépticas lo hacen inadecuado para el consumo en su estado natural, se obtiene por métodos de refinado que no alteren su estructura glicérica inicial.

REQUISITOS

Requisitos generales:

- ❖ Tener aspecto limpio a 25 ° C, tener sabor y olor característico no objetable.
- ❖ Libre de rancidez, materiales extraños de sustancias empleadas en su extracción y refinación.
- ❖ Fabricado en condiciones higiénicas de acuerdo con BPM.
- ❖ Los residuos de plaguicidas no deben exceder los límites indicados en el CODEX.
- ❖ El aceite de oliva se puede comercializar virgen, refinado o en mezclas de ambos. No se admite el uso de aditivos, se exceptúa el uso de mezclas de tocoferoles naturales como antioxidante, en cantidad máxima de 500 mg/Kg.

Requisitos específicos:

- ❖ Requisitos de identificación
- ❖ Requisitos de Tabla 1.
- ❖ Requisitos de tabla 2.
- ❖ Cuando se determina el perfil de ácidos grasos, no es necesario hacer los demás requisitos de identificación.
- ❖ Contenido de esteroides (% respecto a la suma de betasitosterol, canpesterol y stigmasterol) en el aceite de oliva con lo indicado en la tabla 3.
- ❖ Toma de muestras y criterios de aceptación o rechazo.
- ❖ Toma de muestras según NTC 217.

Criterios de aceptación o rechazo:

Si la muestra ensayada no cumple con uno ó más requisitos indicados en esta norma se rechazarán el lote. En caso de discrepancia se repetirán los

ensayos sobre la muestra reservada para tales efectos. Cualquier resultado no satisfactorio en este segundo caso será motivo para rechazar el lote.

ENSAYOS

- Densidad. (NTC 336).
- Índice de yodo. (NTC 283).
- Acidez. (NTC 218).
- Índice de refracción (NTC 289).
- Aceite mineral (NTC 400).
- Contenido de jabón residual (NTC 1147).
- Índice de peróxido (NTC 236).
- Cantidad de humedad y materia volátil (NTC 287).
- Materia insaponificable (NTC 235).
- Determinación de sustancias contaminantes. (absorción atómica).
- Composición de ácidos grasos (cromatografía gas/líqu. (CODEX alimentarius)).
- Impurezas insolubles (NTC 240).
- Identificación AC. Algodón (NTC 458).
- Identificación aceite ajonjolí (NTC 457).
- Semillas de té.

Tabla 1. Requisitos para aceite de oliva

Requisitos	Aceite virgen de oliva		Aceite de oliva refinado		Mezcla de aceites de oliva	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
ρ relativa (20 ° C/20 °C)	0.91	0.916	0.91	0.916		
I. yodo.	75	94				
I. saponificación.	184	196				
I. refracción.	1.4677	1.4705				
I. de Beldiel.	-	17				
Ácidos grasos saturados.	-	1.5		1.8		1.8
POSICION 2						
Reacción Halpher			Negativa			
R. Villavechia			Negativa			
Identificación de aceites semisecantes.			Negativa			
Identificación de aceite semilla de té.			Negativa			

Posición 2: Ácido palmitito (C₁₆:O) sumado con esteárico (C₁₈:O), expresada en % m/m₂, del total de ácidos grasos en posición.

Tabla 3. Contenido de esteroides en aceite de oliva (%).

Aceite	B - sitosterol	Campesterol	Colesterol
Aceite oliva virgen	>= 93	<= 4.0	<= 0.5
Aceite de oliva refinado	>= 93	<= 4.0	<= 0.5

Tabla 2. Perfil de ácidos grasos del aceite de oliva.

	% m/m
Ácido Mirístico (C14: 0)	< 0.1
Ácido palmitito (C16: 0)	7.5 – 20
Ácido palmitoleico (C16: 1)	0.3 – 3.5
Ácido heptadecanoico (C17: 0)	<0.5
Ácido heptadecenoico (C17: 1)	<0.6
Ácido esteárico (C18:0)	0.5 – 5.0
Ácido oleico (C18: 1)	55.0 – 83.0
Ácido linoleico (C18: 2)	3.5 – 21.0
Ácido linolénico (C18: 3)	<1.5
Ácido alquidico (C20: 0)	<0.8
Ácido benico (C22: 0)	<0.3
Ácido crucito (C22: 1)	No detectable
Ácido lignocérico (C24: 0)	<1.0

Tabla 4. Requisitos de calidad del aceite de oliva

Requisitos	Aceite de oliva virgen	Aceite de oliva refinado
Material insaponificable (%)	1.5	1.5
Acidez expresada en ácido oleico (%m/m)	3.3	0.3
Humedad y material volátil (%)	0.2	0.1
Índice de peróxido (meq. de oxígeno peróxido/ Kg)	20	10
Identificación de aceite mineral	Negativa	
Contenido jabón residual	Negativa	

Anexo E. NTC 336. Determinación de la densidad.**Materiales:**

- 1 Picnómetro.
- 2 Baño de agua $T^{\circ} = 25 \pm 0.20 \text{ }^{\circ}\text{C}$.
- 3 Termómetro.
- 4 Balanza analítica.

Procedimiento:

1. Para la calibración se limpia y seca cuidadosamente el picnómetro y se llena con agua destilada ($\pm 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Se coloca la tapa y se sumerge en un baño de agua a $25 \pm 0.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 30 minutos.
2. Se extrae el picnómetro del baño, se seca perfectamente y se deja enfriar a temperatura ambiente durante 30 minutos. Se pesa.
3. Se vacía el picnómetro, se enjuaga varias veces con alcohol y después con éter y se deja secar perfectamente. Se pesa.
4. El peso del agua contenida en el picnómetro se calcula restando el peso del picnómetro del peso del picnómetro con agua.
5. Se enfría la muestra aproximadamente $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y se llena el picnómetro evitando la formación de burbujas de aire, se coloca la tapa y se sumerge en un baño de agua a $25 \pm 0.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 30 minutos.
6. Se extrae el picnómetro con su contenido del baño, se seca y se pesa. Se resta el peso del picnómetro vacío del picnómetro con muestra y se halla la densidad.

Anexo F. NTC 287. Determinación de humedad y sustancias volátiles.

Materiales:

1. Estufa vacío, preferentemente pequeña a fin de obtener una temperatura uniforme en todos sus puntos.
2. Cristalizador ó capsula de aluminio.
3. Baño Maria.
4. Desecador, provisto de un deshidratante apropiado.
5. Balanza analítica.

Procedimiento:

1. Se homogeniza la porción de la muestra y se pesa con exactitud en el cristalizador tarado aproximadamente 5 gramos de la muestra preparada y se seca en la estufa de vacío hasta obtener un peso constante a una temperatura uniforme no menor de 20 °C ni mayor de 25 °C sobre el punto de ebullición del agua a la presión a la que se realizó el ensayo.

Presión (mm Hg)	Punto de ebullición del agua (°C).	Temperatura de la estufa (°C).
100	52	72-77
90	50	70-75
80	47	67-72
70	45	65-72
60	42	62-67
50	38	58-63
40	34	54-59

2. El peso constante se obtiene cuando pesadas consecutivas realizadas a intervalos de 1 hora muestran una pérdida de peso adicional no superior al 0.05%.

Interpretación de resultados:

El índice de humedad y de sustancias volátiles se calcula con la siguiente fórmula:

$$P_c = \frac{M - M1}{M} * 100$$

Donde:

P_c: Contenido de humedad y sustancias volátiles como porcentaje.

M: Peso en gramos de la muestra.

M1: Peso en gramos de la muestra después del ensayo.

Anexo G. NTC 218. Método de determinación del índice de acidez

Reactivos

- 1 Etanol 95% (volumen).
- 2 NaOH normalizada (0.05 M, 0.1M, 0.25 M, 0.5M).
- 3 Fenolftaleína, 10 g/l en solución etanólica al 95%.
- 4 Azul álcali 6B, solución etanólica de 20 g/l al 95%.

Materiales

- 1 Micro bureta de 10 ml. De capacidad, con subdivisiones de 0.02 ml.
- 2 Balanza analítica.
- 3 Erlenmeyer de 250 cm³.

Procedimiento

1. Se pesa en el matraz una muestra según lo indicado en la tabla a continuación dependiendo del índice de acidez esperado.

% acidez esperado	Masa de muestra de ensayo (g).	Concentración de solución de álcali.	Precisión de la pesa.
< 1	28	0.05	0.02
1 a 4	7	0.10	0.02
4 a 15	2.5	0.25	0.01
15 a 75	0.5	0.50	0.001
> 75	0.1	0.50	0.0002

En un segundo matraz se calientan a ebullición 50 ml de etanol que contienen 0.5 ml del indicador de fenolftaleína mientras la temperatura de etanol está aún sobre 0 °C, se neutraliza cuidadosamente con una solución de NaOH de 0.1 mol/l. El punto final de la titulación se alcanza cuando la adición de una gota de álcali produce un cambio de color ligero pero definitivo que permanece por lo menos 15 segundos. Se agrega etanol neutralizado a la porción de ensayo en el primer matraz y se mezcla muy bien. Se lleva el contenido a ebullición y se titula con la solución de NaOH adecuada, dependiendo de la acidez esperada, agitando el contenido del matraz vigorosamente durante la titulación.

Interpretación de resultados. El índice de acidez se encuentra según la siguiente fórmula:

$$(56.1 \cdot V \cdot C) / M$$

Donde:

V: Volumen en ml de la solución volumétrica de NaOH utilizado.

C: Concentración exacta en mol/litro de la solución volumétrica normalizada de NaOH.

M: Masa de la muestra en gramos.

56.1: Masa molar de KOH.

Anexo H. NTC 236. Método de determinación del índice de peróxido

Reactivos:

- 1 Solución saturada de yoduro de potasio.
- 2 Solución de almidón.
- 3 Tiosulfato de sodio 0.01 N, normalizada antes de ser empleada.
- 4 Ácido acético glacial.
- 5 Cloroformo.

Materiales

Erlenmeyer con capacidad de 250 ml provisto con tapa de vidrio esmerilada completamente seco.

Bureta de divisiones de 0.001 ó 0.002 ml.

Procedimiento

1. Se asegura que la muestra sea tomada y almacenada en ausencia de luz, mantenida en frío y contenida en un matraz con tapa de vidrio esmerilada.
2. Se toma la muestra de la parte media del producto, se transfiere al erlen meyer y se tapa el frasco.
3. El procedimiento debe realizarse bajo luz natural difusa o bajo luz artificial.
4. Se pesa en el matraz una masa de la muestra teniendo en cuenta el índice de peróxido esperado de acuerdo con:

I. de peróxido (meq/Kg)	Masa de la porción de ensayo (g)	Precisión de la pesada
0 a 6	2 a 5	0.01
6 a 10	1.2 a 2	0.01
10 a 15	0.8 a 1.2	0.01
15 a 25	0.5 a 0.8	0.001
25 a 45	0.3 a 0.5	0.001

5. Se adicionan 30 ml de solución de ácido acético/ cloroformo en relación 3:2 para disolver la muestra de ensayo, rápidamente mediante agitación se añaden 0.5 ml de solución de KI, se tapa el matraz y se agita. Se mantiene en reposo por 1 minuto a una temperatura entre 15 y 25 °C y se adiciona inmediatamente 30 ml de agua.

6. Se titula la solución con tiosulfato de sodio agitando vigorosamente la muestra hasta que el color amarillo desaparezca. A continuación se adicionan 0.5 ml de solución de almidón y se continua la titulación con agitación constante, especialmente cerca del punto final, con el fin de liberar todo el yodo. Se adiciona la solución de tiosulfato gota a gota hasta que el color azul desaparezca.

7. Si en la titulación se gasta menos de 0.5 ml de solución de tiosulfato, se repite la determinación empleando una solución diluida al 0.01 mol /litro y con agitación constante y vigorosa.

8. Se lleva a cabo un blanco junto con la determinación, si el resultado del

blanco excede en 0.1 ml de tiosulfato de sodio 0.01 N se reemplazan los reactivos y se repite la determinación.

Interpretación de datos:

Índice de peróxido:

$$\frac{\text{mmol..oxígeno..activo}}{\text{Kg.muestra}} = \frac{(V1 - V0) * T * 1000}{2M}$$

$$\frac{\text{mequivalente..oxígeno..activo}}{\text{Kg.muestra}} = \frac{(V1 - V0) * T * 1000}{M}$$

Donde:

T: Normalidad de la solución de tiosulfato de sodio.

V1: Valor numérico del volumen en ml de la solución de tiosulfato de sodio empleado en la determinación.

V0: Valor numérico del volumen en ml del sulfato de sodio utilizado para el blanco.

M: Masa de la porción de ensayo en gramos.

Anexo I. NTC 283. Método de determinación del índice de yodo

Reactivos

- 1 KI (15%).
- 2 Solución de almidón (Se mezclan 10 gramos de almidón soluble en 30 ml de agua en ebullición y se adiciona agua hasta completar 1000 ml, se mantiene en ebullición por 3 minutos y se deja enfriar.)
- 3 Tiosulfato de sodio, solución volumétrica de 0.1 mol/l.
- 4 Cloroformo o tetracloruro de carbono.
- 5 Reactivo de WIJS: Contiene monoclóruo de Yodo en ácido acético. La relación de I/Cl debe estar entre los límites de 1 y 120.

Materiales

Erlenmeyer con capacidad de 500 ml provisto con tapa de vidrio esmerilada.
Bureta 25 ml.

Procedimiento

1. Se pesa la muestra de acuerdo al valor de yodo esperado según la siguiente tabla.

Índice de yodo esperado (g/100g).	Masa de la muestra de la porción de ensayo (g).	Volumen del solvente (ml)
< 1.5	15	25
1.5 a 2.5	10	25
2.5 a 5	3	20
5 a 20	1	20
20 a 50	0.4	20
50 a 100	0.2	20
100 a 150	0.13	20
150 a 200	0.10	20

La masa de la muestra puede ser tal que el exceso del reactivo de WIJS se encuentre entre 50 y 60% de la cantidad adicionada.

2. El matraz cónico de 500 ml se adiciona el volumen del solvente especificado en la tabla. Luego se adiciona con una pipeta 25 ml del reactivo de WIJS, se tapa el matraz y se mantiene en un lugar oscuro.
3. Simultáneamente se prepara un blanco.
4. Para las muestras que tienen un índice de yodo por debajo de 150 se deja el matraz en un sitio oscuro por 30 minutos.
5. Opcionalmente se puede emplear como catalizador de la reacción 10 ml de una solución de acetato de mercurio al 2.5% en ácido acético glacial. En este caso la muestra se deja en reposo en un sitio oscuro durante 5 a 10 minutos.
6. Al final del tiempo de reacción se adicionan 20 ml de KI y 100 ml de agua.

7. Se titula con una solución normalizada de tiosulfato de sodio 0.1 N hasta obtener una coloración amarilla producida por la casi desaparición del yoduro. Se adicionan unas gotas de la solución de 1 amidos del 15% y se continúa la titulación hasta que el color azul desaparezca después de una agitación vigorosa.
8. Paralelamente se lleva a cabo la determinación empleando el blanco en las mismas condiciones.

Interpretación de resultados:

El índice de yodo se expresa en gramos por 100 gramos de grasa, utilizando la fórmula:

$$I = (12.69 \cdot C \cdot (V1 - V2)) / M$$

Donde

C: Valor numérico de la concentración de la solución de tiosulfato de sodio en mol/litro.

V1: Valor numérico del volumen en ml de la solución de tiosulfato de sodio empleado en el blanco.

Anexo J. NTC 335. Índice de saponificación.

Reactivos:

Etanol al 96%

Fenolftaleína al 1% en alcohol

HCl 0,5 N KOH 0,5 N

Materiales:

Balanza analítica

Matraz de 250

Condensador

Procedimiento:

Pesar 0,5 gramos de aceite, adicionar 40 ml de solución de KOH alcohólica 0,5, poner en el condensador por 15 minutos hasta que la solución hierva y se saponifique la grasa.

Luego adicionar 1 ml de fenolftaleína 1% en alcohol, y titular con HCl 0,5 N hasta que desaparezca el color rosa del indicador Leer y calcular datos .

Cálculos:

$$\text{Índice de saponificación} = \frac{(v1-v2) \cdot N \cdot 56}{pm}$$

Donde:

V1: volumen del blanco

V2: volumen gastado en la muestra

N: normalidad de la soda

Pm: peso de la muestra

Anexo K. NTC 219. Método cualitativo para determinación de la rancidez por medio de la reacción de Kreiss.

Reactivos:

HCL.

Fluoroglucinol (solución al 0.1% en éter etílico).

Materiales

- 1 Tubo de ensayo.

Procedimiento:

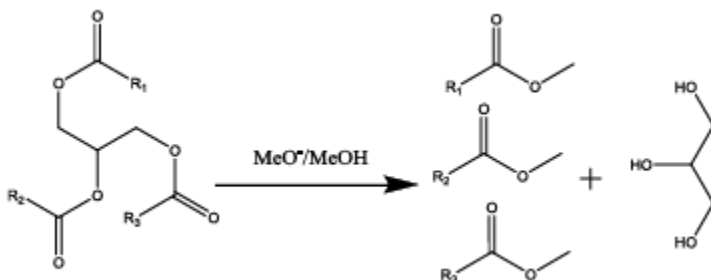
En el tubo limpio y seco se colocan 5 a 10 ml de aceite. Se tapa con un tapón de caucho limpio y en buen estado. Se agita fuertemente durante 30 segundos y se añaden 5 ó 10 ml de solución de fluoroglucinol y se agita fuertemente por 30 segundos. Se deja en reposo durante 10 minutos para que decante y se observa la coloración en la fase clorhídrica.

Interpretación de resultados:

La aparición de la coloración amarilla, anaranjada o ligeramente rosada es indicación de reacción negativa. La aparición de coloración roja es indicación de reacción positiva.

Anexo L. Derivatización de los ácidos grasos.

Para el análisis de ácidos grasos por cromatografía gaseosa, se debe preparar un derivado de los ácidos grasos de interés, usualmente se prepara un éster metílico del respectivo ácido con el fin de tener el analito con un punto de ebullición bajo. Debido a que los ácidos grasos se encuentran como ésteres del glicerol (triglicéridos) deben convertirse a ésteres metílicos para su identificación y cuantificación usando, por ejemplo, metóxido de sodio en metanol a través de una reacción de transesterificación.



Objetivos:

- Familiarizarse con los métodos químicos de derivatización de grasas para análisis cromatográfico.
- Obtener los ésteres metílicos de los ácidos grasos extraídos de la bebida láctea.

Materiales

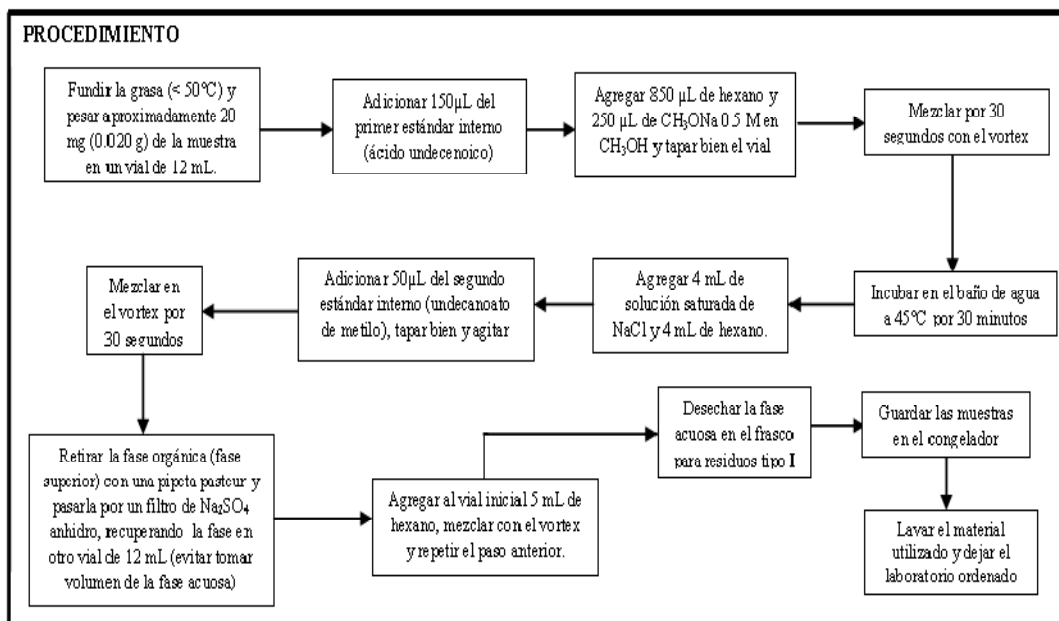
Viales de 12 mL con tapa
 Pipetas Pasteur
 Pipeta graduada de 5 mL
 Pipeteador

Reactivos

Metóxido de Sodio (CH₃ONa) 0.5 M en Metanol (CH₃OH)
 Hexano
 Cloruro de Sodio (NaCl)
 Sulfato de sodio anhidro (Na₂SO₄)
 Ácido undecenoico (Estándar interno)
 Undecanoato de metilo (Estándar interno)

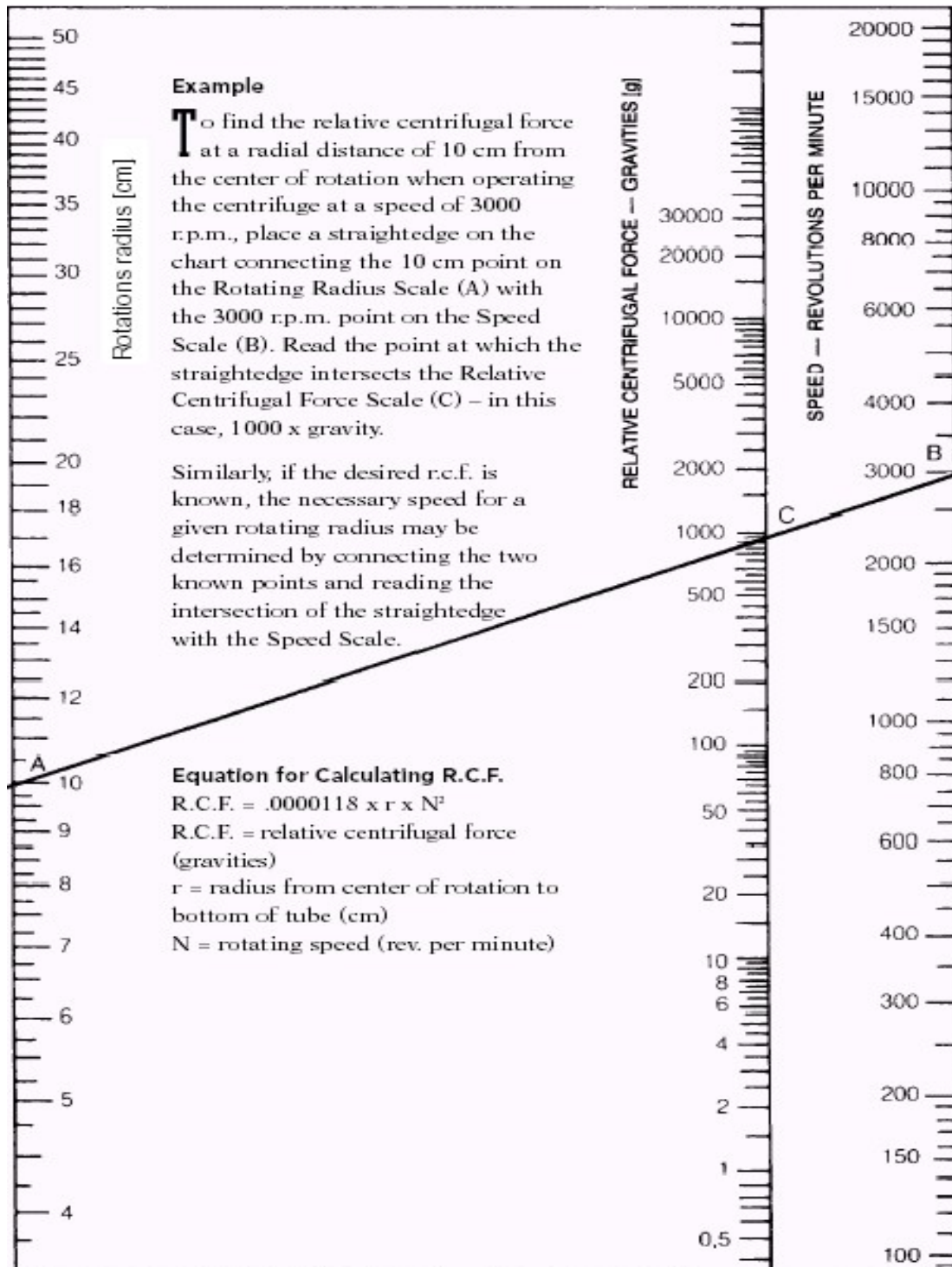
Equipos:

Balanza Analítica
 Vortex
 Baño maría



NOTA: Es importante durante toda la práctica usar guantes, gafas y tapabocas. Se deben marcar todos los viales que contengan la muestra para evitar confusiones con los otros grupos.

Anexo M. Nomograma para determinar velocidades



Determinación matemática de la fuerza centrífuga relativa:

El movimiento circular uniforme se produce cuando una fuerza externa constante actúa formando ángulos rectos respecto a la trayectoria de una partícula en movimiento. La fuerza resultante produce una aceleración que altera la dirección del movimiento manteniéndose la rapidez constante.

Aceleración normal o centrípeta:

$$a_c = \frac{v^2}{R}$$

La fuerza dirigida hacia el centro necesaria para mantener el movimiento circular uniforme se conoce como fuerza centrípeta:

$$F_c = ma_c = m \frac{v^2}{R}$$

El periodo T es el tiempo requerido para realizar una vuelta completa o revolución. La velocidad lineal puede calcularse dividiendo el área de la circunferencia en el periodo:

$$v = \frac{2\pi R}{T}$$

La frecuencia es el número de revoluciones por unidad de tiempo:

$$f = \frac{1}{T}$$

Entonces,

$$v = 2\pi fR$$

Y,

$$F_c = ma_c = m \frac{v^2}{R} = m \frac{4\pi^2 f^2 R^2}{R} = 4\pi^2 f^2 Rm$$

Fuerza centrífuga relativa:

En un campo de centrifugación g se reemplaza la aceleración centrífuga:

$$a_{cf} = 4\pi^2 f^2 R$$

De esta manera, se puede expresar la fuerza originada por una centrífuga como múltiplos de la fuerza de gravedad. Para ello se utiliza F.C.R. que relaciona la Fuerza centrífuga con la fuerza de gravedad. El poder de separación de dos centrifugas distintas será igual si sus F.C.R. son idénticas.

$$FCR = \frac{f_c}{f_g} = \frac{ma_{cf}}{mg} = \frac{a_{cf}}{g} = \frac{4\pi^2 f^2 R}{g}$$

$$FCR = \frac{39,48f^2 R}{980 \text{ cm /seg}^2} = 0,0403 f^2 (r.p.m) R(cm)$$

Como f se expresa en r.p.m se debe convertir a segundos:

$$f^2 = (r.p.m)^2 = (1/seg)^2 = (1/3600seg^2)$$

Se reemplaza en la ecuación anterior:

$$FCR = \frac{39,48f^2 R}{980 \text{ cm /seg}^2} = 0,0403 f^2 (1/3600seg^2) R(cm) = 1,119 \times 10^{-5} x R x f^2$$

$$FCR = 1,119 \times 10^{-5} x R x f^2$$

Donde:

FCR: Fuerza centrífuga relativa en unidades de g.

R: radio expresado en centímetros entre el eje de rotación y el centro del tubo de la centrífuga.

f: frecuencia de rotación expresada en revoluciones por minuto.