



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

TÍTULO DE TESIS:

**DISEÑO EXPERIMENTAL DE LA ETAPA DE
EXTRUSIÓN EN EL PROCESO DE
EXTRACCIÓN DE ACEITE EXTRA VIRGEN
DE AGUACATE**

**TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE LICENCIATURA EN
INGENIERÍA QUÍMICA**

PRESENTA:

OSIRIS CAMPOS TANDI

ASESOR:

M.C. JOSÉ DOMINGO ACUÑA PARDO

MORELIA MICHOACAN; JUNIO DE 2016

AGRADECIMIENTOS:

Por los recursos económicos aportados para desarrollar esta investigación se agradece a la Junta Local de Sanidad Vegetal de Nuevo Parangaricutiro, a la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), a través del Programa de Desarrollo de Capacidades, Innovación Tecnológica y Extensionismo Rural y a la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Y por el apoyo incondicional brindado por mi asesor José Domingo Acuña Pardo, y por el apoyo desinteresado de I.Q. Rodolfo Pacheco Escalera.

A mis padres María Elena Tandi Morales y Juan De Jesús Campos Cortés; y a todos los que aportaron un granito de arena, porque gracias a su apoyo incondicional culminamos con éxito el trabajo de tesis para recibir el título como Ingeniera Química.

ÍNDICE

RESUMEN	4
I. INTRODUCCIÓN	6
I.I. JUSTIFICACIÓN	6
I.II. HIPÓTESIS	7
I.III. OBJETIVOS	7
II. GENERALIDADES	8
II.I. PRODUCCIÓN	8
II.II. COMERCIO INTERNACIONAL	10
II.III. PRODUCCIÓN DEL MERCADO NACIONAL	12
II.IV. DESCRIPCIÓN DE UN PROCESO TÍPICO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE EXTRA VIRGEN DE AGUACATE	14
III. METODOLOGÍA	18
III.I. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO GLOBAL DE EXTRACCIÓN DE ACEITE EXTRA VIRGEN DE AGUACATE	18
III.II. DISEÑO EXPERIMENTAL DE LA ETAPA DE EXTRUSIÓN	26
III.III. OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN	29
III.IV. DISEÑO DE EXPERIMENTO	32
III.V. DESARROLLO EXPERIMENTAL	34
IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	36
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	49
ANEXO 1	52
ANEXO 2	53
ANEXO 3	54
ANEXO 4	55
REFERENCIAS	60

RESUMEN

Este trabajo forma parte de un proyecto global donde el objetivo general consiste en desarrollar un nuevo proceso para la obtención de aceite extra virgen de aguacate, con la finalidad de ser materia prima para la industria cosmética y para consumo humano.

Una parte muy importante del nuevo proceso consiste en reducir los costos de producción y evitar el uso de procesos químicos o físicos que alteren la composición original de ácidos grasos no saturados; en este sentido se ha desarrollado un proceso de extrusión eficaz en este trabajo; el cual se logró adquiriendo y optimizando un equipo de extrusión y calentamiento que opera por lotes, con capacidad de procesar hasta 10 Kg de pasta de aguacate, la cual procede de un despulpador de aguacate, desarrollado en un trabajo anterior y de donde se obtiene pasta con cantidades menores al 1% de cáscara y hueso de aguacate.

Una vez adquirido el equipo, se realizó un análisis de variables, primero para identificar las condiciones de referencia a las cuales opera actualmente la industria de extracción de aceite de aguacate, posteriormente se identificaron las condiciones ambientales, las variables a bloquear, las variables de ruido, las variables independientes y las variables dependientes; todo ello permitió investigar las mejores condiciones de operación en cuanto a la temperatura, el tiempo y la velocidad de extrusión para minimizar costos y tiempos de operación; teniendo como objetivo obtener una pasta lista para ser centrifugada donde el índice de acidez sea menor a 1.0, para lograr la denominación de extra virgen, y lograr un aceite con un porcentaje menor al 1.0% de ácido esteárico.

Durante el desarrollo del proceso se diseñó un experimento Señal/Ruido, con la finalidad de obtener resultados robustos.

Los resultados obtenidos, muestran que el diseño el extrusor propuesto logra ahorros significativos en los costos de operación y gastos energéticos, por ejemplo una reducción del 50% del tiempo de operación y una disminución del 33.3% en los requerimientos energéticos.

Optimización extrusor aceite virgen aguacate

ABSTRACT

This work is part of a global project where the overall objective is to develop a new process for the production of extra virgin avocado oil, in order to be raw material for the cosmetics industry and for human consumption.

A very important part of the new process is to reduce production costs and avoid using chemical or physical processes that alter the original composition of unsaturated fatty acids; in this sense it has developed an effective extrusion process in this work; which it was achieved by acquiring and optimizing extrusion equipment and heating operating batch, with capacity to process up to 10 kg of avocado paste, which comes from a pulp avocado, developed in a previous job and where paste is obtained with smaller amounts of 1% avocado shell and bone.

Once purchased the computer, an analysis of variables was performed first to identify the reference conditions to which currently operates the mining industry avocado oil, then the environmental conditions were identified, variables block, noise variables, the independent variables and the dependent variables; This enabled research the best operating conditions in terms of temperature, time and the extrusion rate to minimize operating costs and times; aiming for a list to be spun paste where the acid is less than 1.0, to achieve the designation of extra virgin oil and achieve a lower percentage to 1.0% stearic acid.

During the development process a Signal / Noise experiment was designed, in order to get robust results.

The results show that the proposed extruder design achieves significant savings in operating costs and energy costs, for example a 50% reduction of operating time and a decrease of 33.3% in energy requirements.

Optimization extruder avocado virgin oil

I. INTRODUCCIÓN

I.I. JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de esta tesis constituye una etapa del proceso global de la extracción de aceite extra virgen de aguacate, el cual se puede desglosar en las siguientes etapas:

1. Almacenamiento de materia prima;
2. Lavado y desinfección;
3. Secado;
4. Despulpado;
5. Extrusión a temperatura contralada;
6. Centrifugado y decantado;
7. Almacenamiento de producto terminado.

La etapa de extrusión se inicia tratando la pulpa de aguacate, idealmente libre de cáscara y hueso; y se desea diseñar un equipo que permita la separación física del aceite, el agua y la fibra, investigando la temperatura óptima, la velocidad de extrusión y el tiempo de residencia adecuado como los principales factores de separación para posteriormente pasar a la etapa de centrifugado y decantado; para lograr la separación física de estos tres pseudo componentes.

Es importante mencionar que no existe evidencia de que se haya diseñado y se encuentre operando un extrusor con estas características, ya que los procesos tradicionales muelen el aguacate completo (hueso cascara y pulpa) y luego lo pasan al proceso de extrusión donde se inicia la separación del aceite de aguante, incluyendo cáscara, hueso y pulpa, sin tomar en cuenta las normas de inocuidad, tal como la NOM-127-SSA-1994. Después utilizan procesos físicos y químicos para separar las impurezas y los olores desagradables al paladar que aportan la cáscara y el hueso al aceite, alcanzando temperaturas de operación de hasta 190°C, convirtiendo algunos ácidos grasos insaturados en ácidos grasos saturados; perdiendo algunas de las propiedades químicas del aceite extra virgen del aguacate.

I.II. HIPÓTESIS

Es posible reducir los consumos de energía y el tiempo de operación del proceso de extrusión en comparación con el procedimiento que se realiza actualmente en la industria local.

I.III OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo es diseñar, adquirir y optimizar un extrusor de aguacate para la implementación de una planta piloto que tenga la capacidad de iniciar la separación del aceite, el agua y la fibra, ya que el objetivo es obtener aceite extra virgen de aguacate.

El objetivo específico es optimizar el funcionamiento del extrusor, es decir encontrar los niveles adecuados de las variables independientes (La temperatura, la velocidad y el tiempo de residencia), para maximizar la función objetivo (separación de los ácidos grasos no saturados), manteniendo el adecuado funcionamiento, a pesar de las variables necesarias de bloquear (Las condiciones de presión, altitud, temperatura, presencia de oxígeno y humedad del ambiente), todo ello realizado cuando la pulpa tengan los niveles adecuados del porcentaje de materia seca e identificando en que niveles debemos trabajar para minimizar la variabilidad y mantener la media donde los requerimientos del proceso nos indique.

II. GENERALIDADES

El aguacate es el fruto de una planta dicotiledónea del orden Ranales y la familia Laurácea. La variedad de mayor consumo a nivel mundial es el aguacate Hass (*Persea americana*; FAO, 2005), aunque se tiene evidencia de que hay más de 400 variedades originarias de tres razas de aguacate: mexicana, guatemalteca y antillana. Otras variedades de importancia en México son: fuerte, criollo, bacón, pinkerton, gwen y Reed; datos obtenidos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura en 2010, por sus siglas en inglés Food and Agriculture Organization (FAO).

Su sabor, textura y propiedades alimenticias han cautivado a innumerables países que lo han adoptado, como: Estados Unidos de Norte América, Canadá, Israel, Nuevo Zelanda, España, Francia y otros tan lejanos como Japón y recientemente Rusia y China; conquistando todos los paladares del mundo.

II.I. PRODUCCIÓN

El aguacate es un fruto que forma parte de la dieta diaria de la población, su presencia mundial cobra mayor importancia debido a las tendencias en consumo de productos naturales con gran aporte de beneficios a la salud.

Datos estadísticos tomados de The Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database (FAOSTAT) en el 2010:

El aguacate se produce en 67 países del mundo, se destinan alrededor de 459 mil hectáreas para su cultivo y se obtienen un poco más de ocho toneladas por hectárea cosechada (ver Tabla 1). América es el continente en donde más se produce este fruto (71 %), África ocupa el segundo lugar en importancia (13 %) seguida de Asia (11 %), por último se encuentra Europa (3 %) y Oceanía 2 %.

La producción mundial del periodo 2000 – 2010 registró una tasa de crecimiento medio anual (TCM) de 3.6 %. Cada año los países productores destinan una mayor superficie para el cultivo del aguacate, el crecimiento del área cosechada en el mundo reportó una tasa promedio de 3.1 % al año para el periodo considerado; ver tabla 1.

PRINCIPALES PAÍSES PRODUCTORES DE AGUACATE EN 2010								
País	Producción (toneladas)	Participación (%)	TCM (%) 2000-2010	Superficie cosechada (ha)	Participación (%)	TCM (%) 2000-2010	Rendimiento (ton/ha)	TCM (%) 2000-2010
México	1,107,140	28.8	2.0	123,403	26.9	2.7	8.97	-0.7
Chile	330,000	8.6	12.9	34,057	7.4	4.9	9.69	7.7
República Dominicana	275,569	7.2	12.9	10,600	2.3	5.7	26.00	6.9
Indonesia	224,278	5.8	4.4	17,400	3.8	2.7	12.89	1.6
Colombia	201,869	5.3	4.4	30,511	6.6	8.7	6.62	-4.0
Perú	184,370	4.8	8.2	17,750	3.9	7.3	10.39	0.8
Brasil	152,181	4.0	5.9	11,637	2.5	-0.9	13.08	6.8
Estados Unidos de América	149,300	3.9	-3.7	24,252	5.3	-0.8	6.16	-2.9
Kenya	113,206	2.9	8.1	6,125	1.3	4.0	18.48	3.9
China	105,400	2.7	4.2	15,000	3.3	6.5	7.03	-2.2
Total Mundial	3,840,905	100	3.6	459,252	100	3.1	8.36	0.5

Fuente: Elaborado por la DGIB de la Secretaría de Economía con datos de FAOSTAT.

Tabla 1: Principales países productores de aguacate del mundo en 2010.

Por su parte, la superficie cosechada en México representó el 26.9 % del total mundial, fue el primer lugar a nivel mundial en ese periodo, aunque su crecimiento promedio al año fue menor en comparación con el de otros países; ver Tabla 1. De acuerdo con datos de la FAO (De la base de datos estadísticos online de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, FAOSTAT) en el 2012.

La producción mundial de aguacate fue de 3.9 millones de toneladas y el principal país productor de dicho periodo fue México con el 28.4% del mercado mundial, seguido de Chile con el 8.5%, República Dominicana con el 7.4%, Indonesia con el 5.8% y Colombia con el 5.2%. Actualmente, estos cinco países concentran poco menos del 60% de la producción de aguacate en el mundo; Ver figura 1.

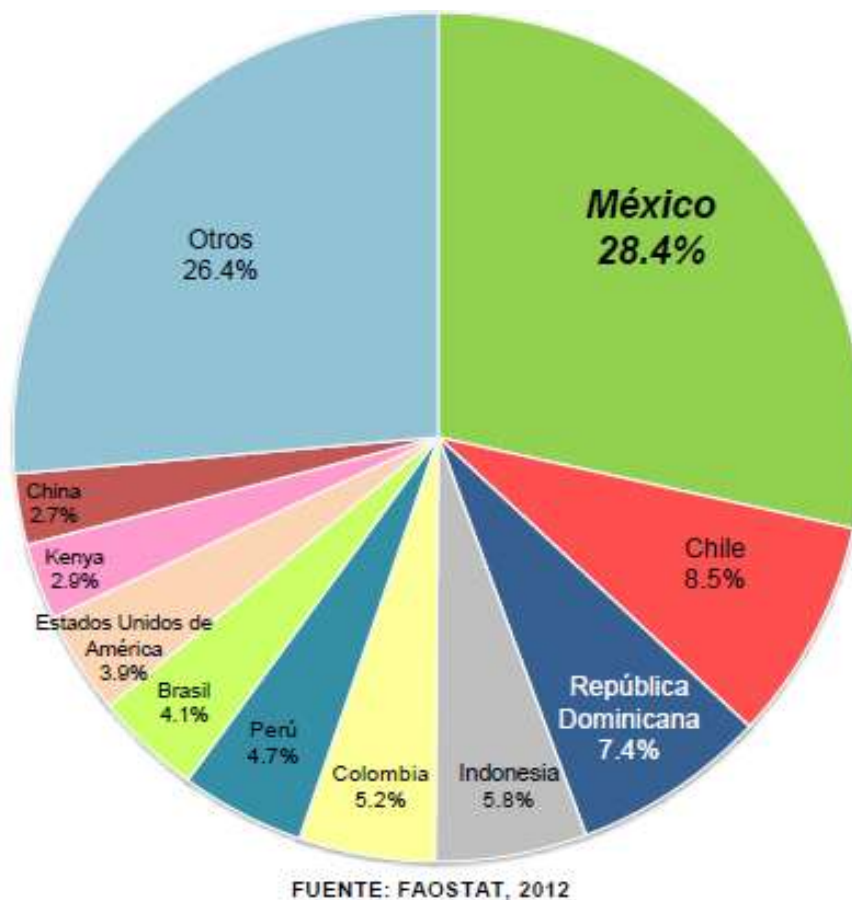


Figura 1: Producción mundial de aguacate.

II.II. COMERCIO INTERNACIONAL

Base de datos del comercio de productos de la división de estadísticas de la ONU, United Nations Commodity Trade Statistics Database (UN COMTRADE), 2010:

En el periodo comprendido entre 2000 – 2010, el volumen de exportaciones equivale el 23% de la producción mundial y se exportaron en promedio 589 mil toneladas de aguacate al año, mostrando incrementos anuales.

Como se aprecia en la figura 2, México no sólo es el mayor productor de aguacate en el mundo, también es el principal exportador de este fruto, aporta con el 37% de las exportaciones mundiales y su crecimiento medio anual es de 14% en volumen y 23% en valor. Los exportadores más importantes después de México son Chile con una participación del 12%, seguido de Israel con el 8%, Países Bajos y Perú, ambos con el 7%;

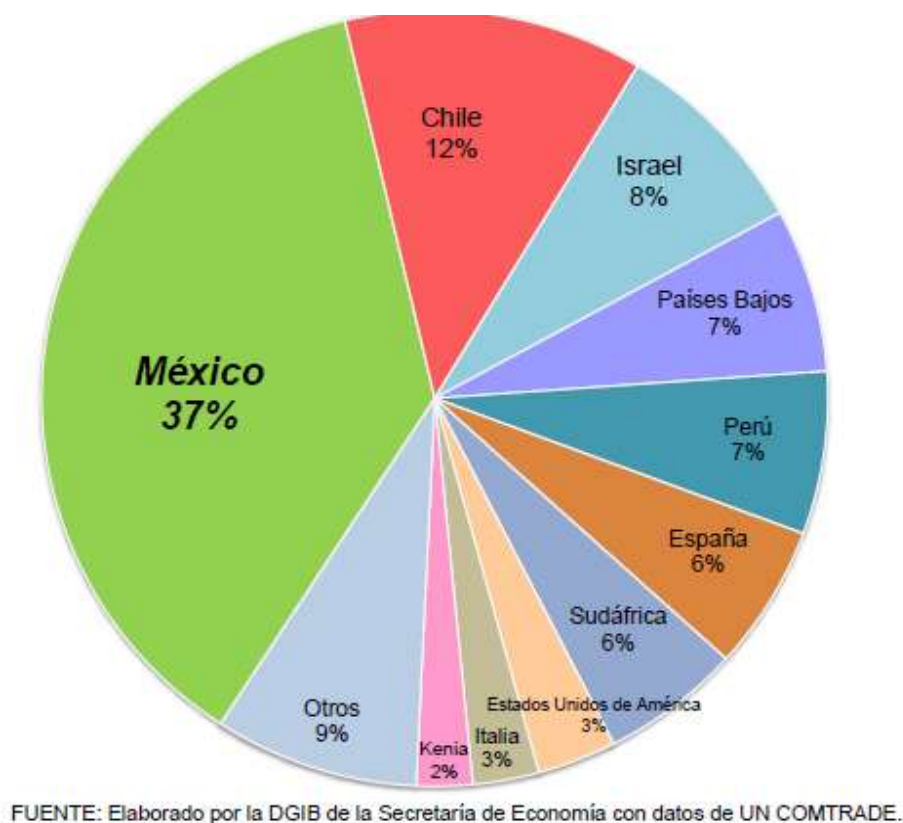


Figura 2: Exportación mundial de aguacate, 2010.

En el comercio internacional del aguacate se identifican algunos flujos de mayor importancia como son:

- 1) México concentra más del 70% de sus exportaciones con Estados Unidos y secundariamente hacia Japón, alrededor del 18% se dirige hacia el resto de América y Canadá.
- 2) Chile destina más del 50% de sus exportaciones hacia Estados Unidos y el resto se dirigen a países de Europa como España, Reino Unido y Países Bajos;
- 3) Perú concentra sus exportaciones hacia Europa;
- 4) España, Países Bajos e Israel dirigen sus exportaciones principalmente a la Unión Europea; Ver figura 3.

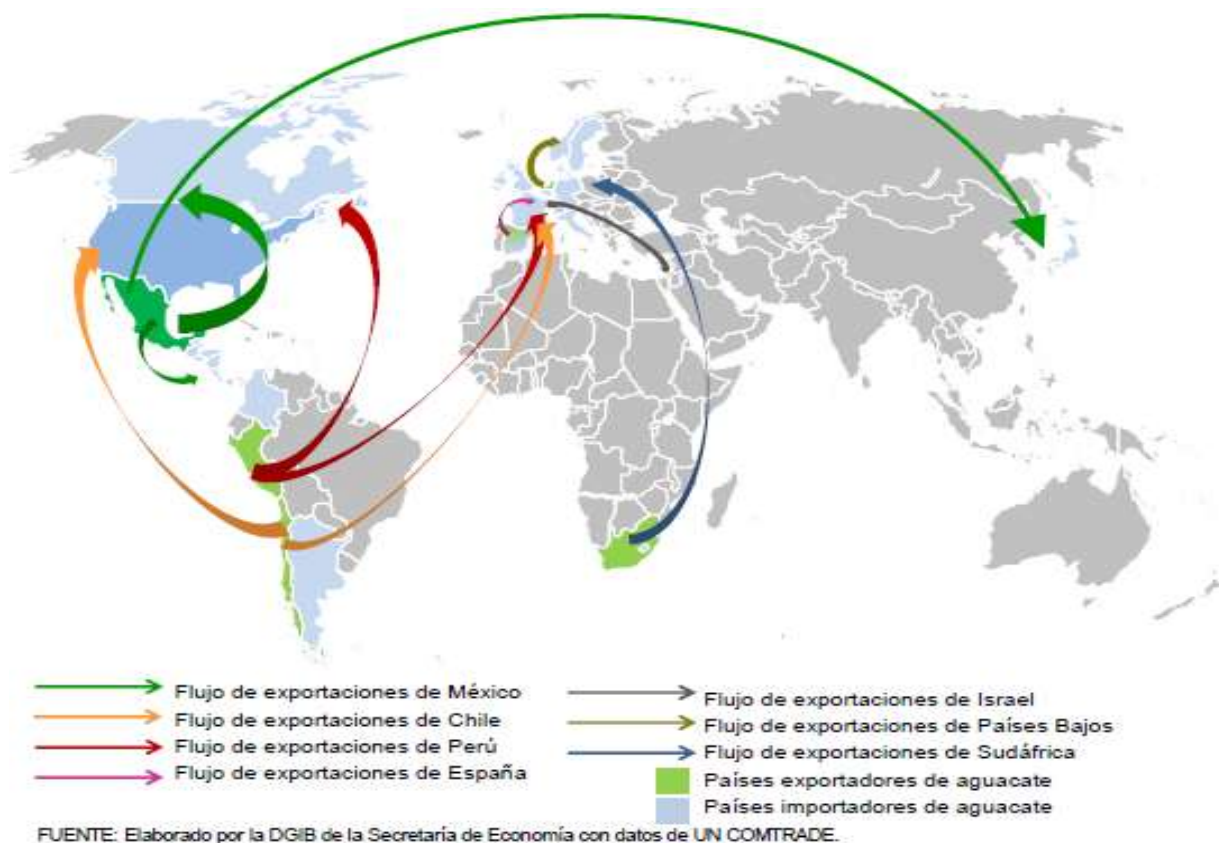


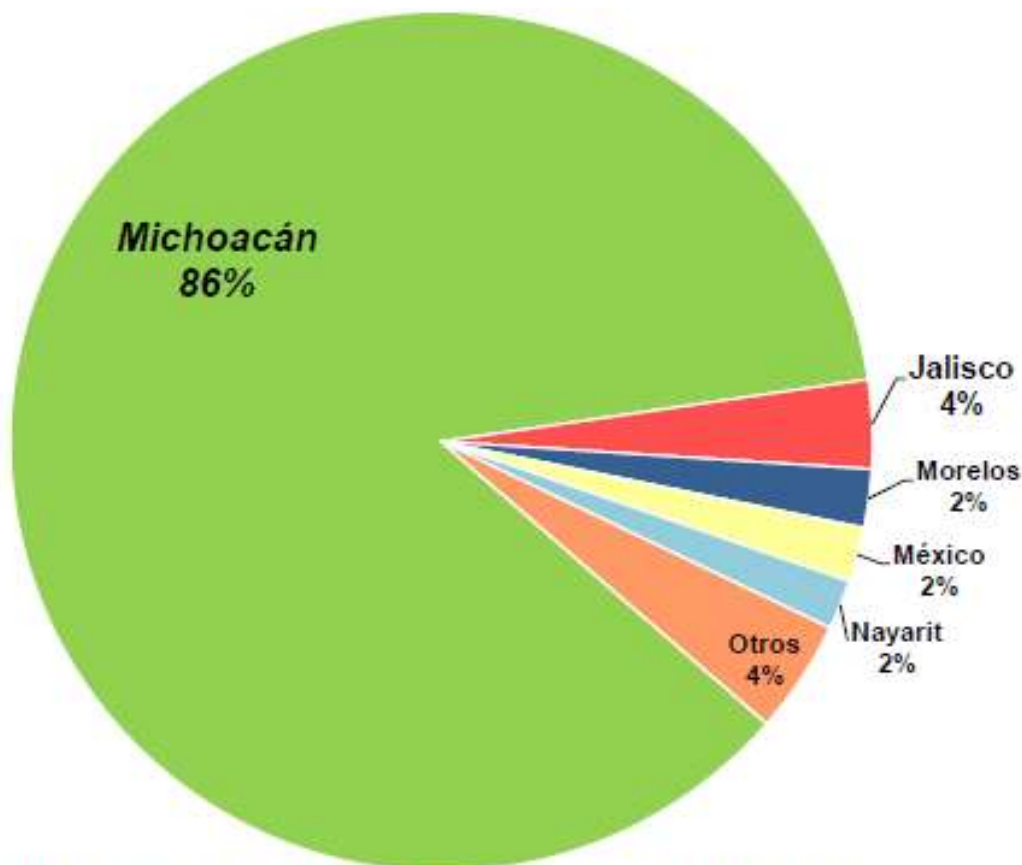
Figura 3: Flujo de Comercio Mundial de Aguacate, 2010.

II.III. PRODUCCIÓN DEL MERCADO NACIONAL

El aguacate es un fruto de gran importancia económica en México, ya que representa el 22% del valor total de la producción dentro del grupo de las frutas que se cultivan en el país.

Según los datos del Servicio de información agroalimentaria y pesquero (SIAP), en el 2010 la producción nacional de aguacate se estimó en más de 1 millón de toneladas con un valor de \$14,166 millones de pesos, y el principal estado productor a nivel nacional es Michoacán que aporta el 86%; ver figura 4. Dada la concentración en la producción nacional de aguacate en un solo estado, las demás entidades participan con un porcentaje poco representativo en el volumen total; sin embargo, han mostrado un mayor crecimiento en términos de producción y superficie cosechada, con el interés de posicionarse en el

mercado nacional, como es el caso de Jalisco, Morelos, Estado de México y Nayarit, que en conjunto producen más de 161 mil toneladas.



FUENTE: Elaborado por la DGIB de la Secretaría de Economía con datos de SIAP.

Figura 4: Producción Nacional de Aguacate, 2010.

En el año 2011, SIAP reportó que la producción nacional de aguacate ha aumentado en los últimos años, ya que la suma total de la producción superó los 12 millones de toneladas, con un crecimiento medio anual de 3.1%, ver tabla 2.

La producción promedio de aguacate en el estado de Michoacán osciló alrededor del millón de toneladas con un crecimiento medio anual de 2.9% durante los años 2000-2011, su volumen de producción es tres veces mayor al de Chile, uno de los principales países productores después de México, por ello se le considera la capital mundial del aguacate, ver tabla 2.

PRINCIPALES ESTADOS PRODUCTORES DE AGUACATE EN 2011								
Estado	Producción (toneladas)	Participación (%)	TCM (%) 2000-2011	Superficie cosechada (ha)	Participación (%)	TCM (%) 2000-2011	Rendimiento (ton/ha)	TCM (%) 2000-2011
Michoacán	1,092,322	86.3	2.9	104,802	82.1	2.7	10.4	0.3
Jalisco	42,210	3.3	20.9	6,474	5.1	23.8	6.5	-2.3
Morelos	27,716	2.2	3.4	3,034	2.4	2.3	9.1	1.1
México	25,955	2.1	4.9	2,362	1.9	1.3	11.0	3.6
Nayarit	23,587	1.9	2.4	2,920	2.3	2.1	8.1	0.2
Guerrero	13,410	1.1	7.1	1,943	1.5	7.9	6.9	-0.7
Yucatán	11,508	0.9	4.6	540	0.4	0.0	21.3	4.6
Puebla	7,933	0.6	-3.6	1,672	1.3	-3.3	4.7	-0.3
Chiapas	5,851	0.5	8.9	712	0.6	6.2	8.2	2.5
Oaxaca	3,464	0.3	-2.5	693	0.5	-1.5	5.0	-1.1
Nacional	1,265,669	100	3.1	127,668	100	2.8	9.9	0.3

Fuente: Elaborado por la DGB de la Secretaría de Economía con datos de SIAP.

Tabla 2: Principales Estados Productores de Aguacate, 2011.

La superficie cosechada de aguacate a nivel nacional ha crecido, en el 2011 fue de 127.7 mil hectáreas. Michoacán fue el de mayor superficie cosechada de aguacate en el país, durante el periodo 2000-2011 esta variable registró una tasa media anual de crecimiento de 2.7%, mientras que, a nivel nacional fue de 2.8%. Michoacán, Jalisco, Morelos, México y Nayarit fueron los de mayor superficie cosechada, aportando entre los cinco el 93.7% del total nacional; ver tabla 2.

II.IV. DESCRIPCIÓN DE UN PROCESO TÍPICO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE EXTRA VIRGEN DE AGUACATE

Primero se revisa el proceso actual de extracción de aceite; esto se hace con la intención de comparar las diferencias y los beneficios que se obtienen con el proyecto global.

En la actualidad el objetivo fundamental de la refinación de aceites y grasas es hacerlos aptos para el consumo humano, al eliminarle todas las sustancias que tienen un efecto desfavorable en aroma, apariencia, sabor, color y estabilidad. El proceso de Refinación, se puede realizar de varias formas que son: Química, Física o combinados.

En la figura 5 que se muestra en seguida se puede apreciar las etapas que tiene el proceso de refinación física, las cuales se describen enseguida.



Figura 5: Proceso de Refinación física.

Se inicia por un filtrado que limpia el aceite crudo de las partículas indeseables, después se evapora la humedad que pueda traer el aceite crudo. Posteriormente se somete el aceite a un proceso de desgomado para eliminar las sustancias no deseables del hueso y la cascara, en el cual se usa ácido cítrico, ácido fosfórico o ambos, para eliminar las gomas, resinas y proteínas, para permitir la remoción por métodos gravitacionales. Si las gomas son hidratables, se remueven, como su nombre lo indica, con agua. Se adicionan tierras de blanqueo que adsorben sustancias colorantes; el proceso culmina con la desodorización, en donde se separan los ácidos grasos libres presentes en el aceite y las sustancias que ocasionan mal olor.

La refinación física basa su técnica en utilizar los desodorizadores para destilar por vapor no sólo los productos causantes del mal olor, sino también los ácidos grasos libres. De esta forma se elimina el tratamiento con sosa cáustica, disminuyendo las pérdidas de aceite (el

Soapstock arrastra algo de aceite) y la consecuente eliminación de los efluentes contaminantes. Además, la refinación física proporciona ácidos grasos de mayor pureza, que son un subproducto del proceso.

Etapas de refinación química de aceite a nivel industrial, de acuerdo con FAO, 2010:

- 1ª etapa** Desgomado con agua para eliminar los fosfolípidos fácilmente hidratables y los metales.
- 2ª etapa** Adición de pequeñas cantidades de ácido fosfórico o cítrico para convertir los restantes fosfolípidos no hidratables (sales de Ca, Mg) en fosfolípidos hidratables.
- 3ª etapa** Neutralización de los ácidos grasos libres con un ligero exceso de solución de hidróxido sódico, seguida de la eliminación por lavado de los jabones y de los fosfolípidos hidratados.
- 4ª etapa** Blanqueo con tierras minerales naturales o activadas con ácido para adsorber los compuestos coloreados y para descomponer los hidroperóxidos.
- 5ª etapa** Deodorización para eliminar los compuestos volátiles, principalmente aldehídos y cetonas, con bajos umbrales de detección por el gusto y el olfato. La Deodorización es fundamentalmente un proceso de destilación con vapor que se lleva a cabo a bajas presiones (2-6 bares) y elevadas temperaturas (180-220 °C).

El proceso de neutralización alcalina tiene importantes inconvenientes, el rendimiento es relativamente bajo y se producen pérdidas de aceite debido a la emulsión y saponificación de los aceites neutros. También se genera una cantidad considerable de efluente líquido. Los jabones se disocian generalmente con ácido sulfúrico, recuperándose los ácidos grasos libres junto con sulfato sódico y vapor de agua ácida que contiene grasa.

En el refinado físico, los ácidos grasos se eliminan mediante un procedimiento de destilación al vapor (por arrastre) similar a la desodorización. La baja volatilidad de los ácidos grasos (que depende de la longitud de la cadena) requiere temperaturas más elevadas que las requeridas sólo para la desodorización.

En la figura 6 se describe el proceso de refinado químico clásico, este nivel se consigue fácilmente en la etapa de neutralización, pero se requiere un proceso especial de desgomado para el refinado físico del aceite con alto contenido en fosfátidos. Estos procedimientos se basan en una hidratación mejorada de los fosfolípidos mediante un contacto íntimo entre el aceite y una solución acuosa de ácido cítrico, ácido fosfórico y/o hidróxido sódico, seguida de blanqueo (Segers y van de Sande, 1988).

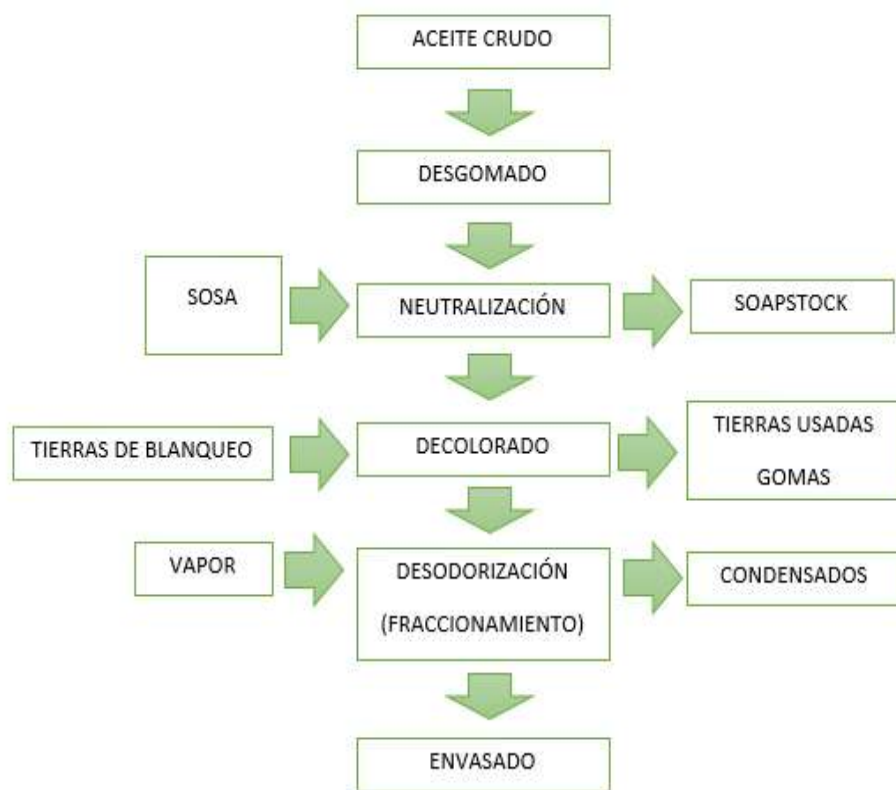


Figura 6: Proceso de Refinación Química

Algunas impurezas, incluidos compuestos oxidados, trazas de metales y materiales coloreados se eliminan parcialmente por arrastre con los fosfolípidos y con el depósito de jabón. Estas impurezas se reducen posteriormente durante la decoloración.

La neutralización también contribuye considerablemente a eliminar contaminantes. Los plaguicidas organoclorados y los hidrocarburos aromáticos poli cíclicos, si están presentes, deben eliminarse durante la etapa de desodorización/arrastre y mediante un tratamiento con carbón activo.

En la deodorización se eliminan los olores y sabores que pueden ser desagradables para el paladar, ya que se utiliza todo el contenido del aguacate (cáscara, pulpa y hueso). Este proceso termina siendo una destilación con vapor a bajas presiones y temperaturas entre 180° y 220°C.

Sin embargo; en casos como el aceite de aguacate extra virgen en el que se trabajó, dentro del proyecto global no son aplicables esta serie de pasos antes mencionados de la refinación química y física, ya que se busca mantener todas las propiedades químicas del aguacate que brindan al humano grandes beneficios a la salud.

III. METODOLIGÍA

A continuación, se muestran las etapas del proyecto global para la obtención del aceite extra virgen de aguacate; en el cual se ha trabajado años atrás en colaboración con mi asesor José Domingo Acuña Pardo, con la finalidad de encontrar un proceso capaz de conservar las propiedades químicas del aguacate que aportan valor nutrimental al cuerpo humano.

III.I. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO GLOBAL DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE AGUACATE

En la figura 7, se muestran las etapas del proceso global de extracción del aceite de aguacate, las cuales fueron de estudio para la realización de esta tesis y se describen a continuación.

Figura 7: PROCESO GLOBAL DE EXTRACCIÓN DE ACEITE EXTRA VIRGEN DE AGUACATE



III. I. I.- Almacenamiento de materia prima:

Se recibe la fruta proveniente del huerto “Rancho viejo” ubicado en Zacandaro, municipio de Nuevo Parangaricutiro, Michoacán, México. Aquí se clasifica la fruta en grupos según el grado de madurez. La maduración se lleva acabo de manera inducida a temperatura ambiente (20 a 25°C), sin adición de productos químicos promotores de la maduración; esto con la finalidad de obtener el aceite con la mejor calidad. Este huerto se encuentra bajo la certificación se SAGARPA cumpliendo todos los requerimientos de las normas IUSA.

Es necesario conocer la maduración del fruto para el cual se realiza un análisis del índice de materia seca; cabe señalar que existen intervalos para su corte y para el procesamiento como se indican en la NOM-066-FITO-2002. Para conocer su valor tenemos la siguiente técnica:

- A. Se lava el fruto, se pesa en la balanza analítica la capsula de porcelana.
- B. Se toma el fruto, al cual se le realiza un corte en el área del pedúnculo y otro longitudinal separando el fruto en dos, a uno de las partes se le retira el hueso y se quita la membrana que lo protege, con el rebanador se pela el aguacate por completo, con el propósito de exponer únicamente la pulpa (mesocarpio).
- C. Ahora que fue pelado el aguacate se rebanan pequeñas porciones del mismo y se colocan sobre la capsula de porcelana pesando un promedio de 10.0 a 10.5 gramos de mesocarpio, posteriormente la muestra es llevada al horno de microondas para deshidratar la pulpa por completo con un tiempo aproximado de 4 a 4.5 minutos. Este procedimiento se le realiza a las todas las muestras.
- D. Una vez que la muestra se encuentra deshidratada se pesa. Por ultimo con los datos obtenidos se sustituyen en la ecuación 1 y se calcula el porcentaje de materia seca.

$$\text{Índice de materia seca} = 1 - \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso final}}{\text{Peso inicial}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

III. I. II.- Selección de la fruta

En esta etapa se selecciona la fruta apropiada para ser procesada. Existen varios daños en el aguacate que impiden su exportación directa como fruta fresca pero que sin embargo, la fruta puede procesarse para obtener aceite con calidad extra virgen y de igual manera existen algunos daños que no permiten el procesamiento de la fruta.

A) Daños en el aguacate que permiten su procesamiento en la obtención de aceite:

1) Daño físico

En este rubro se incluyen la fruta que se cae por la intervención de las aves, los animales silvestres o por un corte inadecuado del humano durante la cosecha o por madurez. Esto provocara un daño físico al entrar en contacto con el suelo; pero solo daña la cascara y no la pulpa. También el daño puede ser provocado por la rozadura durante el manejo por lluvia o por un corte incorrecto del gancho; sin embargo no daña la pulpa, permitiendo su

procesamiento; siempre y cuando se recoja del suelo a más tardar 24 hrs después de su caída.

2) Daño por el sol o insolación

Este se provoca por la falta de hojas en el árbol, por lo tanto el sol llega directo al fruto y cambia en primera instancia el color de verde a amarillo y en segunda de amarillo a café oscuro. Esto provoca el endurecimiento de la pulpa en el árbol, pero no daña la pulpa al madurar, permitiendo su procesamiento.

3) Daño por Roña

Este defecto es causado por la presencia de acaros que oscurecen la cascara y la hacen áspera, cambian su color de verde a café oscuro; sin embargo, la pulpa no se daña y puede ser procesada.

4) Daño por Viruela

Este daño lo provoca la antracnosis, por exceso de humedad y falta de ventilación; que deja al aguacate literalmente como si le diera sarampión o viruela, es decir el fruto está lleno de puntos con daño físico y de color oscuro; sin embargo, no daña la pulpa para procesarla y obtener aceite de aguacate.

5) Daño por Trips

Este daño lo provocan en la etapa de floración y amarre de la fruta y físicamente provoca unas protuberancias venosas que dan una apariencia desagradable y por esa razón no es aceptado como fruto fresco durante el proceso de exportación. Sin embargo, la pulpa no tiene ningún daño y puede usarse para obtener aceite.

6) Daño por Producto caído

El producto caído ocurre o bien por madurez en la etapa de corte, este producto no se daña, sin embargo, el contacto con el suelo que generalmente es abono orgánico puede provocar crecimiento bacteriológico que impide al producto ser comercializado como producto fresco; sin embargo, con un proceso de lavado puede ser utilizado para la obtención de aceite, siempre y cuando no transcurran 24 horas de estar en el suelo.

7) Daño por producto con acidez provocado por las heces de las aves o por los animales silvestres

Este producto según las normas de inocuidad no puede ser exportado, sin embargo mediante un proceso de lavado puede ser usado para la extracción de aceite al desinfectar la superficie externa.

8) Daño por mancha por chapopote

Es una mancha provocada por el crecimiento de un hongo, debido al exceso de humedad y por falta de ventilación, que se desarrolla en la cascara; sin embargo no afecta a la pulpa y por ello permite su procesamiento.

9) Daño por granizo

Este daño es provocado por las granizadas prematura o tempranas, provocando un daño físico aunado a una quemadura en la cascara; incluso puede acabar con la cosecha. De no acabar con ella solo ocurre un daño físico que no impide que la pulpa sea procesada.

B) Daños que no permiten el procesamiento:

1) Daño por clavo

Este daño se provoca por la presencia del gusano barrenador de ramas y hueso por ello el daño ocurre desde cascara hasta el hueso impidiendo su procesamiento.

2) Daño por aguacate podrido

El aguacate que dura más de 24 horas en el suelo desarrolla un crecimiento bacteriológico imposible de ser desinfectado con el lavado y secado por ello no es deseable para obtener aceite.

3) Daño por Toxicidad

Si los análisis técnicos de toxicidad de la fruta no cumplen con la norma IUSA y GLOBAL GAP, no puede ser procesada para la obtención de aceite.

III. I. III.- Lavado y secado

a) Lavado

Para la implementación de Buenas Prácticas Agrícolas y Buenas Prácticas de Manejo en los procesos de producción, cosecha y empacado de Aguacate variedad *Hass* y experiencias previas de nuestros equipo de trabajo en campo, se considera el agua para su uso en post

cosecha en la que se asegure sea apta de acuerdo a las características microbiológicas y químicas referidas en la Modificación de la Norma de Carácter Obligatorio (NOM-127-SSA-1994), en donde la determinación de la carga microbiana es fundamental utilizando el número más probable (NMP) como herramienta de cuantificación.

Para la desinfección de las superficies en contacto con los frutos se recomienda la utilización de sales cuaternarias de amonio con concentraciones en el orden de los 150 a 200 p.p.m. (Primer equipo de lavado, previo al contacto con los frutos y al agua a utilizar para su lavado, solo las superficies de contacto).

Retomando el proceso de lavado, una vez seleccionada y separada, la fruta pasa por un proceso de lavado con un agente químico, esto con el fin de eliminar cualquier agente microbiano sobre la superficie del fruto de aguacate, que pudiera producir una alteración o represente un riesgo a la inocuidad alimentaria de la pulpa virgen al momento de manipularla, en esta etapa la fruta tiene un índice de materia seca de entre 0.21 y 0.28.

El equipo de lavado es de acero inoxidable, contiene un sistema de rodillos de PVC los cuales están sumergidos sobre la solución de lavado para los aguacates, dicho sistema se acciona por medio de un sistema de cadena y engranes.

Con el fin de mantener un sistema de recirculación de agua y poder controlar la concentración del agente químico encargado de lograr la desinfección, se cuenta con una bomba de recirculación localizada en la parte inferior izquierda del sistema, dicha bomba toma agua del fondo y la transporta otra vez al sistema, por medio de unas boquilla ubicadas en la parte de la alimentación de la tina de acero inoxidable.

El nivel de agua que se debe mantener dentro del sistema de lavado está marcado por un dren y finalmente la entrada del agua fresca que permite enjuagar la materia orgánica se encuentra localizada en la parte posterior del equipo por medio de un tubo conductor de acero inoxidable que contiene varias boquillas en la parte inferior de dicho tubo permitiendo el acceso del agua.

b) Secado

El aguacate que han sido procesado para la eliminación de la carga microbiana y humedad provenientes de la etapa de lavado, se descargan en la etapa de secado.

Por medio de una tolva con pendiente nos ayudará a desplazar los aguacates a esta etapa. Posteriormente pasan por un sistema de rodillos con cerdas, con la finalidad de conducirlos a la parte frontal del proceso y a la vez ir eliminando el exceso de agua que contienen. El exceso de agua es eliminado y cae a una tina de recuperación de agua localizado en la parte inferior del sistema de rodillos, los rodillos se presentan en dos colores, los primeros son de color azul (cerdas finas) y los últimos de color amarillo (cerdas duras). Finalmente se tiene un sistema de cadenas y poleas para poder hacer girar los rodillos que se accionan mediante un motor.

III.IV.- Despulpado

Los aguacates desinfectados, lavados y secados se transportan al área de almacenamiento. Posteriormente cuando el índice de materia seca oscile entre 0.30 y 0.34 se transportan a la etapa del despulpado con la finalidad de retirar toda la cáscara negra y el hueso de la pulpa mediante un equipo de acero inoxidable.

Los aguacates se colocan en una bandeja que los guiará a la alimentación del equipo por medio de una tolva, caerán a un helicoide o gusano con la finalidad de lograr la ruptura y extrusión, y la presión del mismo lo transporta a un cilindro, el cual contiene mallas que nos ayudan a separar la pulpa del hueso y la cáscara. Todo esto se acciona mediante un sistema de bandas.

La etapa de despulpado fue desarrollada en una investigación previa por el P.I.Q. Andrés Quintero; los resultados que él obtiene en cuanto a las características de la pulpa que se alimenta al extrusor corresponden a los resultados obtenidos en su experimentación.

III. I. V.- Extrusión

En la etapa de extrusión se trata la pulpa de aguacate, libre de cáscara y hueso (provenientes de la etapa antes mencionada); para ello se diseñó un equipo que permite

iniciar la separación física del aceite con relación al agua y a la fibra, utilizando la temperatura, la velocidad de extrusión y el tiempo de residencia como los principales variables considerados para la separación.

Esta etapa se realiza con un extrusor de acero inoxidable, el cual cuenta con un tornillo que es accionado por un motor, el sistema tornillo - cilindro que prensa la masa de la pulpa a procesar hasta que se extrae el aceite contenido en la masa original.

Entonces lo que se obtiene a la salida del extrusor es una mezcla de aceite extra virgen de aguacate, agua y fibra.

III. I. VI.- Centrifugación

La centrifugación consiste en la separación física del aceite, agua y fibra del aguacate mediante el uso de la fuerza centrífuga del sólido y los líquidos.

El sistema de centrifugación consta de una canasta donde se vierte dicha mezcla y la fibra queda atrapada en un sistema de mallas, el agua y el aceite salen por conductos diferentes.

III. I. VII.- Decantado

En este proceso se deja reposar el aceite extruido y centrifugado con la finalidad de sedimentar cualquier partícula sólida, incluyendo el excedente de agua que forma parte de la extrusión, para separarlo y obtener el aceite puro.

III. I. VIII.- Almacenamiento de producto terminado

El aceite obtenido del proceso de centrifugación y decantado se almacena en recipientes de color ámbar u oscuro para impedir las reacciones de fotólisis, debido a la interacción entre el aceite extra virgen y la radiación solar para conservar al máximo los ácidos grasos contenidos en el aceite de aguacate.

III.II.- DISEÑO EXPERIMENTAL DE LA ETAPA DE EXTRUSIÓN

En consecuencia de que los constructores de equipo difícilmente elaboran equipo de laboratorio con dimensiones específicas, ya que son tan más costosos como los similares de nivel industrial, pues requieren mayor precisión en el ensamblaje; y resulta casi imposible construir un equipo con las dimensiones para la construcción de la plata piloto, ya que los equipos base como las bombas, los calentadores y los motores son fácil de conseguirse de tamaño estándar, pero no de las dimensiones calculadas o escaladas. Por lo tanto, se contrató a una empresa experimentada en la construcción de este tipo de equipos para que se desarrollara el extrusor.

El equipo se construyó de acero inoxidable y las dimensiones que se presentan son el resultado de las medidas más pequeñas que el constructor pudo dimensionar.

En la figura 8, se presenta el extrusor donde se visualiza el recorrido que tiene la pulpa dentro del extrusor (área gris), así como el recorrido del agua de calentamiento en la chaqueta del extrusor (área rojo).

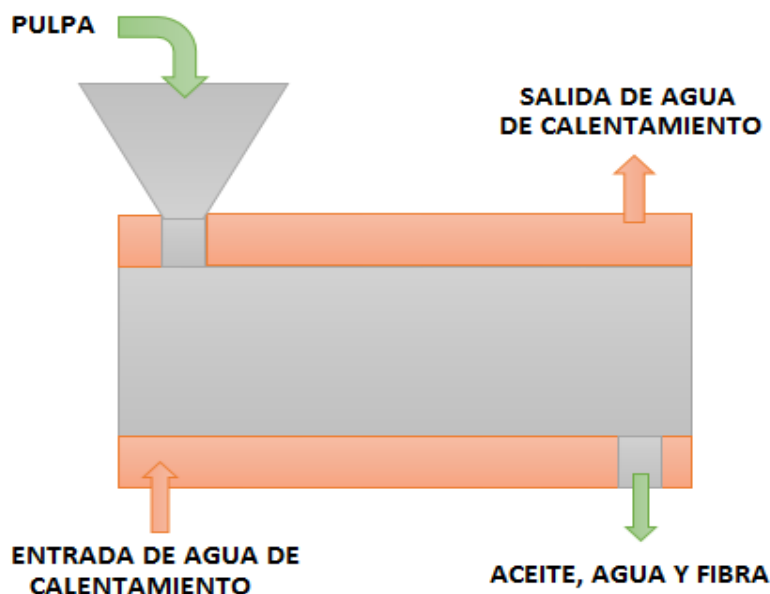
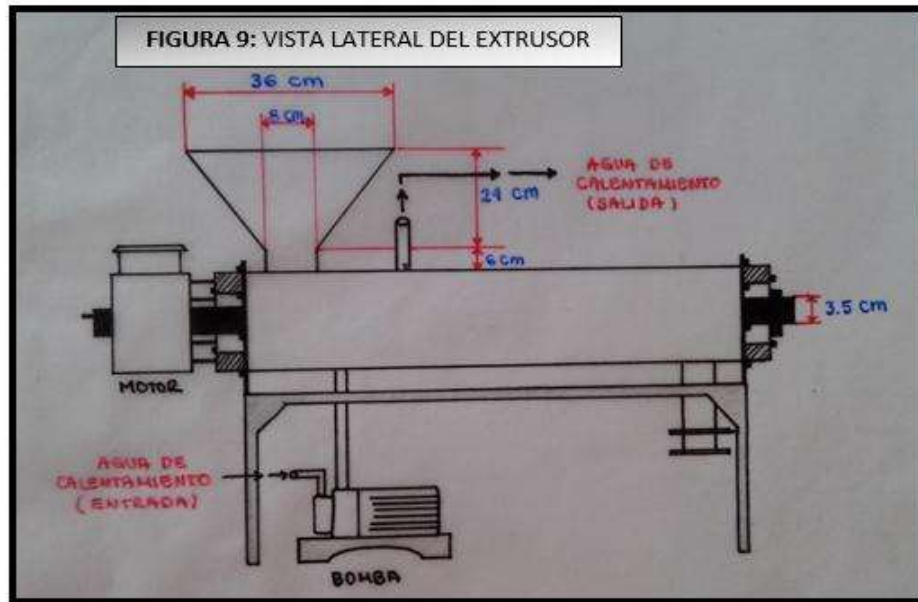


Figura 8: Corte transversal del extrusor.

III.II.I. Dimensionamiento.

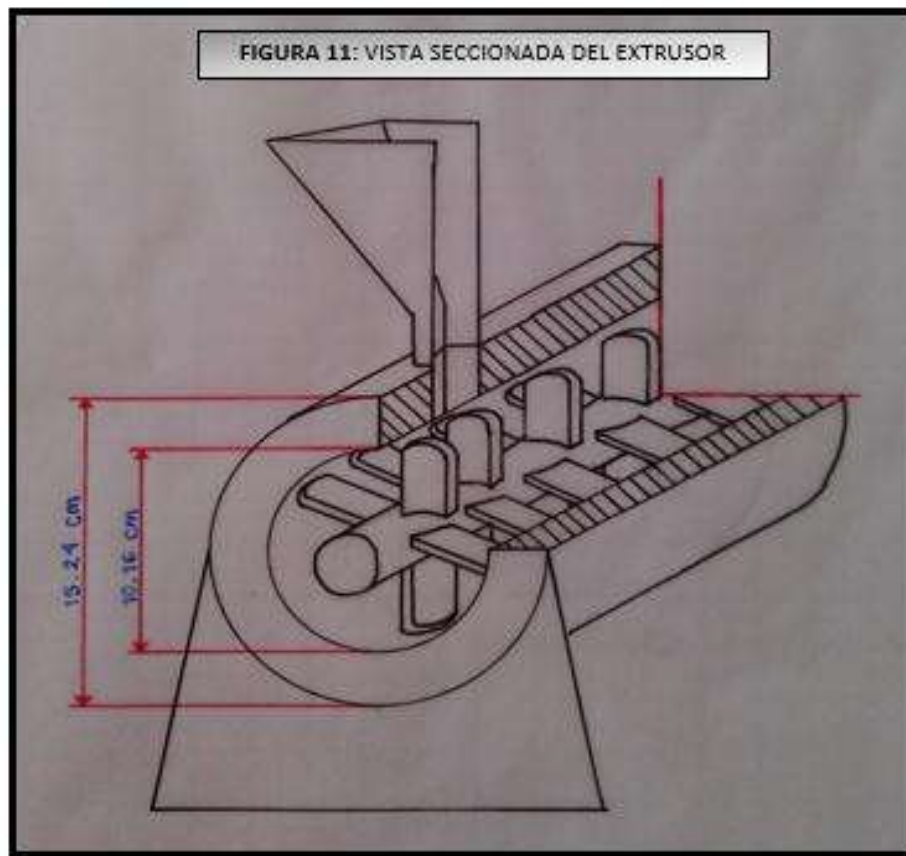
En la figura 9 se muestra la vista lateral del extrusor, indicandose donde es la entrada del agua de calentamiento y su salida. Así como también las medidas de la tolva, y el eje del gusano.



En la figura 10 se presenta la vista superior del extrusor.



En la figura 11 se aprecia la parte interna del extrusor, con un corte seccional del equipo justo por el centro.



III.II.II. Selección de materiales.

Las normas oficiales mexicanas como la NOM-120-SSA1-1994 y NOM-093-SSA1-1994 establecen que el equipo y los utensilios empleados en las áreas de manipulación de productos y que puedan entrar en contacto con ellos, deben ser de un material inerte que no transmita sustancias tóxicas, olores ni sabores, que sea inabsorbente, resistente a la corrosión y capaz de resistir repetidas operaciones de limpieza y desinfección.

En nuestro caso, se eligió usar acero inoxidable para las partes internas del extrusor que se encuentran en contacto directo con el material a procesar.

III.III. OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN

Los diseños ortogonales (Genichi Taguchi, 1990) permiten evaluar un experimento de manera más completa que el diseño de experimento clásico (Douglas C. Montgomery, 1996). En los diseños ortogonales es posible identificar las variables independientes (de las cuales se sospecha que tienen un efecto significativo en el proceso), las variables de ruido (aquellas que son muy costosas evaluar en forma continua), las condiciones ambientales (aquellas de las cuales son imposible de tener control), las variables no significativas (las que permiten abatir los costos del proceso), y sobre las variables independientes que nos permite identificar cuales tienen un efecto significativo sobre la variabilidad el proceso y cuales sobre el valor deseado de la variable dependiente o sea, sobre la media; las variables independientes son aquellas que determinan el valor de comercialización (José Domingo Acuña Pardo, 2014).

En consecuencia de lo antes expuesto y para los fines de este proyecto se han identificado tres variables independientes y tres interacciones binarias; también se han identificado variables de ruido: el índice de materia seca, el tamaño y el peso de la fruta; se bloquearan las variables ambientales como son: la humedad y las condiciones de temperatura y presión. Por otro lado, las variables dependientes son la cantidad de aceite obtenido (CA), el índice de acidez y el porcentaje de ácidos grasos como saturados e insaturados; en consecuencia de que el diseños de experimentos clásico no contemplan la evaluación de las variables de ruido en este experimento se ha optado por elegir un diseño de experimento ortogonal de L8 que permite evaluar hasta 7 efectos significativos; en este proyecto se requiere evaluar 6 variables (tres variables independientes y tres interacciones) y se seleccionó un arreglo ortogonal L4 para la asignación de las variables de ruido, donde se contempla la distribución de las variables de ruido antes mencionadas.

Este diseño permite identificar cuáles son las variables independientes que tienen efecto significativo sobre la variabilidad y cuales sobre la media y en qué porcentaje afectan a ambas sobre las variables independientes. Es por ello que se ha elegido un arreglo ortogonal L8 x L4.

1) Variables dependientes: variables que afectan al proceso:

- Cantidad de aceite obtenido (CA):

$$CA = \text{Cantidad de aceite obtenido} = \frac{\text{Masa de aceite}}{\text{Masa de pulpa total}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Masa de Pulpa total = masa de pulpa limpia + masa de inertes

Masa Inertes = masa de cáscara y hueso en la pulpa.

Masa de aceite = masa de aceite crudo libre de pulpa y agua.

En el caso de este experimento se desea maximizar a CA.

- Índice de acidez: mide la acidez de los ácidos grasos insaturados sobre la base del ácido oleico. Se consideran extra virgen es un nivel del índice de acidez menor a 1.0 para la comercialización del aceite en el mercado mundial.
- Es deseable minimizar el contenido de ácidos que son saturados < 1.0 %.

2) Variables independientes.

A = Temperatura de la pulpa en el extrusor (°C).

B = Tiempo de la pulpa en el extrusor (min).

C = Velocidad del motor de extrusión (rpm).

A continuación, en la tabla 3 se muestran los niveles alto (2) y bajo (1) de las variables independientes; los niveles alto corresponden a las máximas condiciones de operación del extrusor y los niveles bajos son los que corresponden a las condiciones mínimas a las que opera el extrusor.

Tabla 3: Condiciones de operación del extrusor experimental.

	Variable	Nivel bajo (1)	Nivel alto (2)
A	Temperatura (°C)	60	90
B	Tiempo (Min)	60	120
C	Velocidad (rpm)	3	18

3) Condiciones de referencia.

- Estas condiciones de referencia se obtuvieron investigando a que niveles que se trabaja dentro de la industria local actualmente (Media aguacate de calidad, Tacámbaro, Michoacán):

A = Temperatura de la pulpa en el extrusor = 90°C

B = Tiempo de residencia = 120 min

C = Velocidad del motor = 50 rpm

En estas condiciones se reporta una cantidad de aceite obtenido: **CA = 0.0981**

- 4) Para iniciar el diseño de experimentos se generó una corrida experimental que sirviera de base o referencia para la evaluación de las variables dependiente; esas Condiciones de referencia en las cuales se operó la experimentación se reportan a continuación:

A = Temperatura = 70°C

B = Tiempo = 90 min

C = Velocidad = 3 rpm

$$CA = \frac{0.1174 + 0.1348 + 0.1365 + 0.1365}{4} = \overline{CA} = 0.1313$$

(Condiciones de operacion referencia promedio)

En la tabla 4 se muestran las condiciones en que se trabajó las corridas de la experimentación.

Tabla 4: Niveles de operación en la experimentación.

	Variable	Nivel bajo (1)	Nivel alto (2)
A	Temperatura (°C)	45	60
B	Tiempo (Min)	60	120
C	Velocidad (rpm)	3	18

5) Condiciones ambientales:

Presión = 603 mmHg

Temperatura = 20 °C

Humedad Relativa = 72 % – 80 %

6) Variables de ruido:**Al tamaño de la fruta se le asigna la “H”****Peso de la fruta**

Nivel bajo = 45 gr – 120 gr

Nivel alto = 140 gr - 425 gr

Índice de materia seca:

Al recibir = 25.58 %

Al procesar 30-32 %

7) Datos obtenidos de la experimentación:

Densidad de la pulpa fresca = 1.062 gr / ml

Densidad del aceite de aguacate = 0.90 gr / ml

III.IV. -DISEÑO DEL EXPERIMENTO

Se diseñó un experimento señal/ruido ortogonal L8 para las variables independientes y ortogonal L4 para las variables de ruido; esto nos permite estudiar de manera completa las tres variables independientes que nos interesan, así como tres interacciones binarias de las cuales sospechamos tienen un efecto significativo sobre la variabilidad del proceso y tres variables de ruido que se han identificado, por ello se eligió el diseño más pequeño es un L8XL4.

A continuación, en la figura 5 se presenta la asignación de las variables independientes, las interacciones binarias para la asignación de factores en el arreglo ortogonal y la columna del error (e).

Interacciones seleccionadas entre las variables:

AB = Interacción de la temperatura y el tiempo.

AC = Interacción de la temperatura y la velocidad.

BC = Interacción del tiempo y la velocidad.

Abreviaturas:

e = error

La asignación de las variables independientes las interacciones y el error en la tabla 5 se realizaron utilizando la matriz de interacciones del arreglo L8 de Taguchi (Esta matriz se presenta en la figura 12).

Tabla 5: Arreglo L8 X L4 (Genichi Taguchi, 1990):

Corrida	A	B	AB	C	AC	BC	e	Prueba 2	e	1	2	2	1
									e	2	2	1	2
H	1	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1	2	2
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	4
2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	3	4
3	1	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	3	4
4	1	2	2	2	2	1	1	1	1	1	2	3	4
5	2	1	2	1	2	1	2	2	2	2	2	3	4
6	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	3	4
7	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	3	4
8	2	2	1	2	1	1	2	2	2	2	2	3	4

Figura 12: Matriz de interacciones del arreglo L8.

	Columna no.					
Columna no.	2	3	4	5	6	7
1	3	2	5	4	7	6
2	--	1	6	7	4	5
3	--	--	7	6	5	4
4	--	--	--	1	2	3
5	--	--	--	--	3	2
6	--	--	--	--		1

III.IV.- DESARROLLO EXPERIMENTAL

En la tabla 5 se presenta la asignación de las variables independientes:

A = Temperatura (°C)

B = Tiempo (min)

C = velocidad (rpm)

Y las interacciones binarias, de igual manera se han asignado una columna para evaluar el error.

La asignación de la tabla 5 fue extraída de Taguchi, 1988. En el interior de la tabla se asigna “1” al nivel bajo de las variables independientes y a “2” nivel alto de las variables independientes.

La parte superior de la tabla 5 representa la asignación de las variables de ruido, de igual manera se asigna “1” al nivel bajo y “2” para el nivel alto; recordemos que las variables de ruido son el tamaño de la fruta, el peso y el índice de materia seca.

La columna “corrida” se refiere a las corridas experimentales del arreglo L8 y la columna de “Pruebas 2” que va desde 1 a 4 se refiere a las cuatro corridas según el arreglo L4 para evaluar a las variables de ruido; por lo tanto se realizaron 32 pruebas experimentales que se presentan en la tabla 6.

Cada uno de los 32 resultados mostrados en la tabla 6 representa el valor individual de la cantidad de aceite obtenido (CA) de las corridas y las pruebas realizadas.

Tabla 6: Resultados de la cantidad de aceite obtenido (CA) en la experimentación.

								e	1	2	2	1
								e	2	2	1	2
								H	1	1	2	2
Corrida	A	B	AB	C	AC	BC	E	Prueba 2	1	2	3	4
1	1	1	1	1	1	1	1	0.1735	0.1704	0.1717	0.1728	
2	1	1	1	2	2	2	2	0.1601	0.1675	0.1589	0.1700	
3	1	2	2	1	1	2	2	0.1684	0.1805	0.1670	0.1677	
4	1	2	2	2	2	1	1	0.1688	0.1873	0.1705	0.1802	
5	2	1	2	1	2	1	2	0.1506	0.1364	0.1485	0.1401	
6	2	1	2	2	1	2	1	0.1920	0.1886	0.1905	0.1900	
7	2	2	1	1	2	2	1	0.1768	0.1861	0.1789	0.1824	
8	2	2	1	2	1	1	2	0.1890	0.1999	0.1944	0.1882	

Para todas las corridas experimentales se realizaron pruebas cromatográficas con la finalidad de conocer los contenidos porcentuales de los ácidos grasos insaturados y saturados, así como las pruebas de olor, humedad y el índice de acidez (VA). De cada una de las 8 corridas experimentales, se obtuvo una muestra homogénea mezclando las cuatro pruebas realizadas; dichos resultados se muestran en la tabla 7.

Para dichas evaluaciones se utiliza un cromatógrafo PerkinElmer, Claurus 580. Usando una columna empacada degs 20 %, long 3m x 1/8 ss, 20% s/cromosorg waw hmds 20/100.

En el anexo 1 se describe la técnica para la evaluación del índice de acidez.

En el anexo 2 se presenta la técnica de evaluación de la humedad.

El olor se evaluó a través de los sentidos; nos apoyamos en un experto con experiencia de 28 años en la industria y comercialización de aceites comestibles.

En el anexo 3 se describe la técnica para la evaluación de la composición de ácidos grasos por cromatografía de gases. (Pacheco; Experto de Quimic. S.A. de C.V., 2015).

Tabla 7: Resultados experimentales de las pruebas cromatográficas, índice de acidez, humedad y pruebas de sensibilidad.

Corrida	VA	% HUMEDAD	ACIDOS GRASOS INSATURADAS			ACIDOS GRASOS SATURADAS		PRUEBA DE SENSIBILIDAD
			% OLEICO	% LINOLEICO	% PALMITOLEICO	% PALMITICO	% ESTEARICO	OLOR
1	0.42	0.28	61.4	10.30	9.40	18.90	0.48	Aceptable
2	1.82	0.75	61.0	9.99	9.03	18.38	0.49	Aceptable
3	0.58	1.50	61.2	10.00	9.20	18.20	0.49	Aceptable
4	0.18	0.42	60.8	9.80	9.95	19.10	0.43	Sin olor
5	0.40	0.45	60.5	10.20	9.80	18.60	0.50	Aceptable
6	0.48	0.78	60.5	10.10	9.80	19.20	0.51	Desagradable
7	0.12	0.62	62.1	9.82	9.20	17.90	0.50	Desagradable
8	0.55	0.50	59.4	9.76	9.93	19.48	0.48	Tolerable

Los ácidos oleicos, linoleico, palmitoleico son grasos insaturados; el ácido palmítico y el ácido esteárico son saturados, no deseable en el consumo humano y la última columna asignada a la prueba de sensibilidad.

V.- Análisis y discusión de resultados

Con los resultados experimentales obtenidos realizaremos dos tipos de evaluaciones:

- a) Análisis de la variabilidad
- b) Análisis que afectan a la media

Para finalmente obtener las condiciones adecuadas bajo las cuales se obtiene aceite aceptable en cuanto a las variables dependientes.

Ecuaciones usadas para el análisis índice Señal / Ruido:

1.- De acuerdo a la metodología Taguchi, T representa la suma de los valores de la variable dependiente (CA) para cada una de las ocho corridas experimentales; y se evalúa con la ecuación 3.

$$T = \sum_1^4 Y_i \quad (\text{Ecuación 3})$$

2.- Sm , es el promedio armónico, y se evalúa con la ecuación siguiente:

$$Sm = T^2/n \quad (\text{Ecuación 4})$$

3.- Vm , evalúa la variabilidad media y se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$Vm = [\sum Y_i^2 - Sm]/(n - 1) \quad (\text{Ecuación 5})$$

4.- SN , es el índice señal/ruido; y se evalúa con la siguiente ecuación:

$$SN = 10 \log_{10}[(Sm - Vm)/(n * Vm)] \quad (\text{Ecuación 6})$$

5.- $\bar{T}$, es el valor promedio para cada una de las ocho corridas experimentales, y se calcula con la siguiente ecuación:

$$\bar{T} = T/n \quad (\text{Ecuación 7})$$

6.- Si , es el contraste y es la suma de todas las condiciones experimentales llevadas a cabo en el mismo nivel, se calcula con las siguientes ecuaciones:

$$Si_1 = \sum_1^4 NS_1 \quad (\text{Ecuación 8})$$

$$Si_2 = \sum_1^4 NS_2 \quad (\text{Ecuación 9})$$

7.- SSi , es la suma de cuadrados del factor y se evaluaron el cuadrado de la diferencia de contrastes entre el número de pruebas, y se evalúa con la siguiente ecuación:

$$SSi = (Si_2 - Si_1)^2/n \quad (\text{Ecuación 10})$$

En la tabla 8 se presentan los resultados de índice señal/ ruido (SN) para una de las 32 resultados de CA.

En el anexo 4 se presentan el cálculos completo para la corrida experimental 1.

Tabla 8: Resultados de los cálculos para la evaluación de la CA.

Corrida	A	B	AB	C	AC	BC	e	Prueba 2	E 1	2	2	1	T	Sm	Vm	SN	$\bar{T}$
									E 2	2	1	2					
									H 1	1	2	2					
									1	2	3	4					
1	1	1	1	1	1	1	1	0.1735		0.1704	0.1717	0.1728	0.6884	0.1185	-7E-06	36.295	0.1721
2	1	1	1	2	2	2	2	0.1601		0.1675	0.1589	0.1700	0.6565	0.1077	-0.183	-4.01	0.1641
3	1	2	2	1	1	2	2	0.1684		0.1805	0.1670	0.1677	0.6836	0.1168	5E-05	27.631	0.1709
4	1	2	2	2	2	1	1	0.1688		0.1873	0.1705	0.1802	0.7068	0.1249	7E-05	26.349	0.1767
5	2	1	2	1	2	1	2	0.1506		0.1364	0.1485	0.1401	0.5756	0.0828	6E-05	25.738	0.1439
6	2	1	2	2	1	2	1	0.1920		0.1886	0.1905	0.1900	0.7611	0.1448	8E-06	36.518	0.1903
7	2	2	1	1	2	2	1	0.1768		0.1861	0.1789	0.1824	0.7242	0.1311	2E-05	31.703	0.1811
8	2	2	1	2	1	1	2	0.1890		0.1999	0.1944	0.1882	0.7715	0.1488	3E-05	30.856	0.1929

En la tabla 9 se presentan los índices señal /ruido (SN) más altos, debemos elegir el valor más alto, por que deseamos optimizar nuestro proceso; ya que buscamos disminuir al mínimo la variabilidad del proceso. Este resultado se encuentra en las corridas 1 y 6, ya que no hay diferencia estadística entre ellas, también se pueden apreciar los niveles adecuados para las variables independientes.

Tabla 9: Índices señal /ruido (SN) más altos

Corrida	SN	A	B	C
1	36.2949	1	1	1
6	36.5181	2	1	2

Para la corrida 1:

Se aprecia que la temperatura adecuada de trabajo debe ser 45°C, el tiempo de residencia 60, y la velocidad de 3 rpm. Bajo estas condiciones se obtiene una CA de 0.1721.

Para la corrida 6:

En ella nos indica que la temperatura debe trabajarse es 60 °C, es el tiempo nos indica que es suficiente trabajar en un nivel bajo que es 60 min y el motor lo podemos trabajar a 18 rpm.

En conclusión de acuerdo al análisis señal/ruido las mejores condiciones se llevaron a cabo en la corrida 6.

Bajo estas condiciones se obtiene una $\overline{CA}$ de 0.1903, que es un valor superior a las condiciones de referencia de la industria local que es de 0.0981, recordemos que el resultado promedio a 70°C, 90 min y 3 rpm se obtuvo de CA = 0.1313

En las corridas 1 y 6 se aprecian valores de índice señal/ruido muy similares; sin embargo, las condiciones de trabajo sugeridas son igual para el tiempo de residencia pero son diferentes para la velocidad y la temperatura; sin embargo, los valores de CA son muy diferentes el de la corrida 1 está por debajo de los resultados promedio y el de la corrida 6 son resultados deseables. Por ello debemos realizar un análisis estadístico para tomar decisiones consistentes.

A) Análisis de los factores que afectan la variabilidad

Para realizar este análisis debemos realizar la tabla anova (tabla 10) que incluye a los factores que afectan la variabilidad para ello ocupamos las siguientes ecuaciones:

8.- la suma de cuadrados medios (**MSi**): esto nos permite calcular la suma de cuadrados ponderada (respecto a un mismo tamaño) y se evalúa con la siguiente ecuación:

$$MSi = \frac{SSi}{GL} \quad \text{(Ecuación 11)}$$

GL significa los grados de libertad y se refiere a la información independiente que se cuenta u operación matemática posible de realizar.

9.- **F_o** es el estadístico experimental y se evalúa con la ecuación:

$$F_o = \frac{MS_i}{MS_e} \quad (\text{Ecuación 12})$$

10. – **F_T** es el estadístico teórico, está definido como el doble del tamaño del error según la filosofía de Taguchi, por ello:

$$F_T = 2.0$$

Es importante señalar que “i” es el factor que puede ser individual o una interacción.

11.- El porcentaje de variabilidad (%), nos permite evaluar cuál es el grado de confianza de la prueba al observar el % del error; de igual forma podemos conocer en qué porcentaje contribuye cada uno de los efectos y sus interacciones estudiadas y se evalúa con la ecuación siguiente:

$$\% = \frac{SS_i}{SS_T} \quad (\text{Ecuación 13})$$

A continuación, en la tabla 10 se presenta el análisis de varianzas para evaluar la variabilidad del experimento que se diseñó.

Tabla 10: Tabla anova. Análisis de los factores que afectan la variabilidad.

Factor	SS	GL	MS	F _o	F _T	%
A	185.7724	1	185.7724	0.5793	2	15.8100
B	60.4846	1	60.4846	0.1886		5.1500
AB	57.1969	1	57.1969	0.1784		4.8700
C	125.2391	1	125.2391	0.3906		10.6600
AC	331.7888	1	331.7888	1.0347		28.2400
BC	93.8190	1	93.8190	0.2926		7.9800
e	320.6727	1	320.6727			27.2900
Total	1174.9735	7				100.0000

Al observar la tabla 10, comparamos F_o contra F_T , y observamos que ningún F_o es mayor a F_T o a 2.0, lo cual nos indica estadísticamente que ninguno de los factores e interacciones estudiados afectan a la variabilidad; sin embargo, podemos apreciar que el porcentaje de error es de 27.29 %; este es un error altísimo, lo cual nos indica que seguramente diseñamos mal nuestro experimento o hicimos una asignación incorrecta de las interacciones; por inspección visual podemos observar que los valores más altos de SN corresponde a las corridas 1 y 6: tal como se aprecian en la tabla 9. En la cual se puede apreciar que hay contradicciones respecto a las variables de la temperatura y la velocidad; si elegimos la corrida 1 obtenemos un $\overline{CA}$ de 0.1721 y se observamos la corrida 6 $\overline{CA}$ de 0.1903, no olvidemos que buscamos maximizar CA respecto a un valor de 0.1313 que se obtiene con las condiciones de operación de referencia, por lo tanto, la corrida 6 un poco mejor, pero estadísticamente no están justificadas.

Al tener una error tan alto como 27.29 % podemos inferir que la columna del error está mal asignada y por inspección visual de la figura 12; es decir analizando la matriz de interacciones del arreglo L8 podemos inferir que la columna asignada al error en la tabla 5 realmente pertenece a la interacción ABC, por ello debemos realizar el análisis de los resultados incluyendo al efecto de la interacción ABC; este análisis se presenta en la tabla 11.

A continuación se presenta un análisis más completo.

Tabla 11: Análisis de los factores que afectan a la variabilidad incluyendo la interacción ABC.

Factor	SS	GL	MS	Fo	FT	%
A	185.7724	1	185.7724	3.1572	2	15.8100
B	60.4846					
AB	57.1969					
C	125.2391	1	125.2391	2.1284		10.6600
AC	331.7888	1	331.7888	5.6388		28.2400
BC	93.8190	1	93.8190	1.5945		7.9800
ABC	320.6727	1	320.6727	5.4498		27.2900
(e*)	117.6815	2	58.8408			10.0200
Total	1174.9735	7				

El efecto (e*) se obtiene sumando los dos efectos menos significativos, que en este trabajo corresponden al factor A y a la interacción AB y de esta manera estos dos efectos se les asignaran al error estimado (e*); y por lo tanto los efectos A y AB ya no deben continuar estudiándose por separado.

En la tabla 11 puede apreciarse que el error estimado de la variabilidad es ahora del 10.02 %, resultado razonable según la filosofía de Taguchi.

Ahora podemos apreciar en la tabla 11, al comparar la columna Fo vs FT, que todas, menos el efecto BC, las Fo son mayor a 2, por lo tanto, los efectos significativos son:

Individuales: A y C

Interacción: AC y ABC

Como los factores A y C aparecen en las interacciones significativas, la elección de las condiciones adecuadas nos obliga a resolver de manera simultánea, dicho análisis, el cual se presenta a continuación.

Análisis de la interacción AB:

$$A_1B_1 = 36.2949 - 4.0098 = 32.2851$$

$$A_1B_2 = 27.6305 + 26.3487 = 53.9792$$

$$A_2B_1 = 25.7380 + 36.5181 = 62.2561$$

$$A_2B_2 = 31.7029 + 30.8563 = \mathbf{62.5591}$$

Análisis de la interacción AC:

$$A_1C_1 = 36.2949 + 27.6305 = 63.9254$$

$$A_1C_2 = -4.0098 + 26.3487 = 22.3389$$

$$A_2C_1 = 25.7380 + 31.7029 = 57.4409$$

$$A_2C_2 = 36.5181 + 30.8563 = \mathbf{67.3744}$$

Análisis de la interacción BC:

$$B_1C_1 = 36.2949 + 25.7380 = \mathbf{62.0329}$$

$$B_1C_2 = -4.0098 + 36.5181 = 32.5083$$

$$B_2C_1 = 27.6305 + 31.7029 = 59.3334$$

$$B_2C_2 = 26.3487 + 30.8563 = 57.2050$$

Para el análisis de la interacción terciaria $A_2B_2C_2$; observando que en la tabla 8 podemos reproducir los siguientes valores:

Y est = 0.1439	Corrida (5)	$A_2B_1C_1$
Y est = 0.1903	Corrida (6)	$A_2B_1C_2$
Y est = 0.1811	Corrida (7)	$A_2B_2C_1$
Y est = 0.1929	Corrida (8)	$A_2B_2C_2$

Como puede apreciarse en los valores anteriores la mejor decisión es: A_2C_2 con B_1 o B_2 ; B no queda estadísticamente resuelta ya que no hay un resultado significativo entre B_1 o B_2 :

$$\% \text{ de diferencia} = ((0.1929 - 0.1903) / 0.1929) * 100 = 1.35$$

$$\% = |1.35| \ll 10.02 \text{ error}$$

La operación anterior nos indica que la diferencia estadística entre elegir el nivel alto o el nivel alto es mucho menor que el porcentaje del error; es posible elegir B en cualquiera de sus niveles, por economía, la mejor decisión es: $A_2B_1C_2$ (la corrida 6)

$$A = 60^\circ \text{ C}$$

$$B = 60 \text{ min}$$

$$C = 18 \text{ rpm}$$

$$Y_{\text{est}} = 0.1903$$

B) Análisis de los factores que afectan a la Media

A continuación, se presentan las ecuaciones 14 y 15 para el cálculo de los contrastes de los niveles alto (2) y bajo (1), y la ecuación 16 nos permite calcular la suma de cuadrados para generar la tabla de varianzas:

$$Si_1 = \sum_{i=1}^4 T_1 \quad (\text{Ecuación 14})$$

$$Si_2 = \sum_{i=1}^4 T_2 \quad (\text{Ecuación 15})$$

$$SSi = \frac{(Si_2 - Si_1)^2}{8} \quad (\text{Ecuación 16})$$

$$SA_1 = 0.6838$$

$$SA_2 = 0.7082$$

$$SSA = 7.442 \times 10^{-5}$$

$$SB_1 = 0.6704$$

$$SB_2 = 0.7216$$

$$SSB = 3.2768 \times 10^{-4}$$

$$S(AB)_1 = 0.7102$$

$$S(AB)_2 = 0.6818$$

$$SS(AB) = 1.0082 \times 10^{-4}$$

$$SC_1 = 0.6680$$

$$SC_2 = 0.7240$$

$$SSC = 3.920 \times 10^{-4}$$

$$S(AC)_1 = 0.7262$$

$$S(AC)_2 = 0.6658$$

$$SS(AC) = 4.5602 \times 10^{-4}$$

$$S(BC)_1 = 0.6856$$

$$S(BC)_2 = 0.7064$$

$$SS(BC) = 5.4080 \times 10^{-5}$$

$$Se_1 = 0.7202$$

$$Se_2 = 0.6718$$

$$SSe = 2.9161 \times 10^{-4}$$

Tabla 12: Análisis de los factores que afectan a la media

Factor	SS	GL	MS	Fo	FT	%
A	7.442 EXP-5	1	7.442 EXP-5	0.2552	2.0	4.39
B	3.2768 EXP-4	1	3.2768 EXP -4	1.1237		19.30
AB	1.0082 EXP-4	1	1.0082 EXP -4	0.3457		5.94
C	3.920 EXP-4	1	3.920 EXP-4	1.3443		23.11
AC	4.5602 EXP-4	1	4.5602 EXP-4	1.5638		26.88
BC	5.4080 EXP-5	1	5.4080 EXP-5	0.1854		3.19
e	2.9161 EXP-4	1				17.19
Total	1.69663 EXP-3	7				100.00

En la tabla 12 se aprecia que estadísticamente ningún efecto es significativo, ya que el error es muy grande (17.19 %) y visualmente los factores más significativos serán:

Factor	%
AC	26.88
C	23.11
B	19.30

Con estos resultados, y observando la tabla 8, podemos concluir los resultados que a continuación se presentan ya que el valor más alto de $\bar{T}$ lo encontramos en la corrida número 8 con un valor de 0.1929.

Factor	Nivel	Valor
A	2	60 °C
B	2	120 min
C	2	18 rpm

De manera similar al análisis de la variabilidad, en este caso para evaluar los factores que afectan a la media, incluiremos al efecto significativo a la interacción ABC que corresponde a la columna 7 (la columna del error) por ello, ahora estimaremos el efecto del error y le llamaremos error estimado (e^*); los resultados se presentan a continuación en la tabla 13.

Tabla 13: Análisis de los factores que afectan a la Media

Factor	SS	GL	MS	Fo	FT	%
A	7.442 EXP-5				2.0	
B	3.2768 EXP-4	1	3.2768 EXP-4	5.1001		19.30
AB	1.0082 EXP-4	1	1.0082 EXP-4	1.5692		5.94
C	3.5200 EXP-4	1	3.5200 EXP-4	5.4786		23.11
AC	4.5602 EXP-4	1	4.5602 EXP-4	7.0976		26.88
BC	5.4080 EXP-5					
ABC	2.9161 EXP-4	1	2.9161 EXP-4	4.5387		17.19
(e)*	1.2850 EXP-4	2	6.4250 EXP-5			7.58
Total	1.69663 EXP-3	7				100.00

Al comparar los valores de F_o vs F_T de la tabla 13, podemos apreciar que los efectos significativos son:

Individuales: B, C

Interacciones: AC, ABC

Como el efecto C se encuentra en ambas interacciones significativas y el efecto B en una de ellas requerimos resolver estadísticamente de forma simultánea nuestro problema:

Análisis de la interacción AB:

$$A_1B_1 = \frac{0.1721 + 0.1641}{2} = 0.1681$$

$$A_1B_2 = \frac{0.1709 + 0.1767}{2} = 0.1738$$

$$A_2B_1 = \frac{0.1439 + 0.1903}{2} = 0.1671$$

$$A_2B_2 = \frac{0.1811 + 0.1929}{2} = 0.187$$

Análisis de la interacción AC:

$$A_1C_1 = \frac{0.1721 + 0.1709}{2} = 0.1715$$

$$A_1C_2 = \frac{0.1641 + 0.1767}{2} = 0.1704$$

$$A_2C_1 = \frac{0.1439 + 0.1811}{2} = 0.1625$$

$$A_2C_2 = \frac{0.1903 + 0.1929}{2} = 0.1916$$

Análisis de la interacción BC:

$$B_1C_1 = \frac{0.1721 + 0.1439}{2} = 0.1580$$

$$B_1C_2 = \frac{0.1641 + 0.1903}{2} = 0.1772$$

$$B_2C_1 = \frac{0.1709 + 0.1811}{2} = 0.1760$$

$$B_2C_2 = \frac{0.1767 + 0.1929}{2} = 0.1846$$

Como lo muestran los resultados anteriores la mejor solución parece ser $A_2B_2C_2$; sin embargo estadísticamente evaluaremos este resultado contra $A_2B_1C_2$; a continuación, se presentan los resultados:

$$Y_{est} = (A_2B_2C_2) = 0.1929$$

$$Y_{est} = (A_2B_1C_2) = 0.1903$$

$$\% \text{ de diferencia} = ((0.1929 - 0.1903) / 0.1929) * 100 = 1.35$$

$$\% \text{ de diferencia} = 1.35 \% \ll 7.58 \% \text{ error}$$

Como puede apreciarse no hay diferencia estadísticamente significativa entre B a nivel alto y B a nivel bajo; por economía las mejores condiciones se presentan a continuación:

A₂	60 °C
B₁	60 min
C₂	18 rpm
$Y_{est} = (A_2B_1C_2) = 0.1903$	

VI.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Según los resultados de esta investigación las condiciones de operación óptimas para el equipo de extrusión son:

A₂	60 °C
B₁	60 min
C₂	18 rpm

$$Y_{est} = (A_2 B_1 C_2) = 0.1903$$

En estas condiciones se obtiene un rendimiento más alto que las de las condiciones de operación de la industria local y nacional y desde el punto de vista de la economía se han logrado reducir los tiempos de calentamiento de 120 min a 60min, la temperatura de proceso de 90° C a 60°C y la velocidad de extrusión de 50 a 18 rpm, lo cual implica una importante reducción en los costos de operación y en los costos de energía.

También es de gran importancia observar que los rangos del índice de acidez (VA) obtenidos en las corridas experimentales se encuentran bastante por debajo del máximo permitido (1.0) y dentro del mercado para la comercialización en el mundo; de hecho las condiciones de operación seleccionadas coinciden con la corrida 6 donde el índice de acidez es de 0.48, un valor bastante menor al máximo permitido.

Sin embargo; no todas las noticias son buenas, pues el aceite después de tres semanas de almacenamiento presenta sedimentos de pulpa y olor característico a terpenos, contenidos en hueso y cáscara, lo cual nos indica que parte de la pulpa alimentada contiene diminutas partículas de hueso y cáscara, que están liberando aceite con olor desagradable y las velocidades de la centrífuga utilizada (3,400 rpm) son insuficientes para separar la totalidad de la pulpa; por lo cual se propone modificar del equipo original, para evaluar condiciones que puedan entregar una mejor calidad del aceite obtenido; como lo son las siguientes modificaciones:

1. Realizar una etapa de centrifugado de la pulpa al salir del despulpador, con la finalidad de eliminar las diminutas partículas de cáscara y hueso;

2. Realizar vacío en el extrusor para abatir la temperatura de calentamiento de la pulpa y con ello eliminar el agua de la pulpa;
3. Incrementar la velocidad del extrusor para reducir los tiempos de operación;
4. Instalar un sistema de control de temperatura en el extrusor para mantener uniforme la cantidad de calor suministrada al proceso de extrusión;
5. Centrifugar el producto de la extrusión para extraer el aceite con un equipo de mayor velocidad.
6. Realizar un segundo centrifugado para eliminar pequeñas partículas sedimentables.

ANEXO 1: Técnica para la evaluación del índice de acidez (Pacheco, 2015)

Definición

El índice de acidez es el número de miligramos de hidróxido de potasio necesarios para neutralizar los ácidos grasos libres en 1 gr de la muestra.

i.- Alcance

Este método es aplicable al alto hidrogeno (AH) y al Hidroquim-20

ii.- Material

Matraces Erlenmeyer de 250 ml

iii.- Soluciones

Alcohol etílico 95 %

Solución indicadora de fenolftaleína (Se disuelven 1 gr de fenolftaleína en 1000 ml de alcohol etílico).

Hidróxido de sodio en solución 0.1 N.

iv.- Procedimiento

- A)** Pesar 7.05 +/- 0.2 gr de muestra.
- B)** Adicionar la muestra en un matraz de 250 ml el cual debe contener 50 ml de alcohol etílico.
- C)** Calendar a ebullición ligera para lograr una Buena dilución.
- D)** Se deja enfriar un poco y se adicionan de 3 a 5 gotas de fenolftaleína,
- E)** Se procede a titular la muestra con NaOH hasta lograr el cambio de color a color rosa anotando el gasto de NaOH en la titulación.

v.- Cálculos

% de ácidos grasos libres como ácido oleico = $(F * G) / W$

Donde:

F = cte. = normalidad de NaOH *56.1

G = gasto de NaOH 0.1 N en ml.

W = gramos de la muestra.

ANEXO 2: Técnica para la evaluación de la humedad (Pacheco, 2015)

Definición

Este método determina la humedad y otros materiales volátiles bajo las condiciones de esta prueba.

i.- Alcance

Este método es aplicable a la grasa y aceites empleados como materias primas.

ii.- Aparatos

Plato caliente eléctrico, con control de temperatura.

Vaso de precipitado de vidrio de 100 ml, bien otros similares.

iii.- Procedimiento

- A)** el agua tiende a establecerse en el fondo de las muestras las cuales han sido ablandadas o fundidas, hay que tener cuidado en mezclar la muestra para que toda el agua este distribuida uniformemente.
- B)** Se pesa un vaso de precipitados de 100 ml limpio y seco, anotándose su peso.
- C)** Se adiciona la muestra a analizar al vaso (debe adicionarse 18 +/- 2 gr de la misma) y se pesa nuevamente anotándose su peso.
- D)** Se pone la muestra a calentar rotando el vaso con frecuencia hasta que se deje observar la presencia de burbujas o vapor en el vaso de precipitados, se enfría y se vuelve a pesar.

Nota: regular el calentamiento, colocar el botón de calentamiento hasta 120°C.

iv.- Cálculos

$$\% \text{ de humedad y materias volátiles} = (\% \text{ HMV})$$

$$(\% \text{ HMV}) = (\text{pérdida de peso} * 100) / \text{peso muestra}$$

ANEXO 3: Técnica para la evaluación de la composición de los ácidos grasos por cromatografía de gases (Pacheco, 2015).

Definición

Los esteres metílicos de ácidos grasos son separados y determinados cuantitativamente por GLC usando una columna empacada.

i.- Alcance

Este método es aplicable a esteres metílicos de ácidos grasos teniendo de 8 a 24 átomos de carbono y para grasas animales y ácidos grasos después de su conversión a esteres metílicos.

ii.- Aparatos

- 1) Cromatógrafo de gases con detector de ionización deflame (FID).

	Rango
Horno de columna	-99 a 450 °C
Inyector	0 a 450 °C
Detector	0 a 450 °C
FID	100 a 450 °C (incrementos de 1 °C)

- 2) Columna empacada con cromosorb waw, lavado de HMDS (Hexametil disilano), malla

ANEXO 4: Cálculo completo para la corrida experimental 1

Tabla 6: Resultados de la cantidad de aceite obtenido (CA) en la experimentación para la corrida 1.

								e	1	2	2	1							
								e	2	2	1	2							
								H	1	1	2	2							
								Prueba											
								2	1	2	3	4							
Corrida	A	B	AB	C	AC	BC	E						T	Sm	Vm	SN		T̄	
1	1	1	1	1	1	1	1	0.1735		0.1704	0.1717	0.1728	0.6884	0.1185	-7E-06	36.295		0.1721	

- Para el cálculo T , que representa la suma de los valores de la variable dependiente (CA) de ecuación 3:

$$T = \sum_{i=1}^4 Y_i$$

$$T = (0.1735 + 0.1704 + 0.1717 + 0.1728) = 0.6884$$

- Para cálculo del promedio armónico (Sm), y se evalúa con la ecuación 4:

$$Sm = T^2/n$$

$$Sm = \frac{(0.6884)^2}{4} = 0.1185$$

- La variabilidad media y se puede calcular con la siguiente ecuación 5:

$$Vm = [\sum Y_i^2 - Sm]/(n - 1)$$

$$Vm = \frac{[(0.1735)^2 + (0.1704)^2 + (0.1717)^2 + (0.1728)^2] - 0.1185}{4 - 1}$$

$$Vm = -7E - 06$$

- El cálculo del índice señal/ruido (SN); y se evalúa con la siguiente ecuación 6:

$$SN = 10 \log_{10}[(Sm - Vm)/(n * Vm)]$$

$$SN = 10 \log_{10}[(0.1185 - (-7E - 06))/(4 * (-7E - 06))]$$

$$SN = 36.295$$

- Por último el cálculo del promedio de la suma de los valores de la variable dependiente (CA), con la siguiente ecuación:

$$\bar{T} = \frac{\sum_1^4 Y_i}{4}$$

$$\bar{T} = \frac{(0.1735 + 0.1704 + 0.1717 + 0.1728)}{4} = 0.1721$$

B) Análisis de los factores que afectan la variabilidad para el factor A

- Para calcular el contraste (Si) y es la suma de todas las condiciones experimentales llevadas a cabo en el mismo nivel, se calcula con las siguientes ecuaciones 8 y 9:

$$Si_1 = \sum_1^4 NS_1$$

$$SA_1 = \sum_1^4 (36.295 - 4.01 + 27.631 + 26.349) = 86.265$$

$$SA_2 = \sum_5^8 NS_2$$

$$SA_2 = \sum_1^4 (25.738 + 36.518 + 31.703 + 30.856) = 124.8153$$

- Cálculo de la suma de cuadrados del factor (SSi) y se evaluaron el cuadrado de la diferencia de contrastes entre el número de pruebas, y se evalúa con la siguiente ecuación 10:

$$SSA = (SA_2 - SA_1)^2/n$$

$$SSA = \frac{124.8153 - 86.265}{8} = 185.7724$$

- Cálculo de la suma de cuadrados medios (**MSi**): esto nos permite calcular la suma de cuadrados ponderada (respecto a un mismo tamaño) y se evalúa con la siguiente ecuación 11:

$$MSA = \frac{SSA}{GL}$$

$$MSA = \frac{SSA}{GL} = \frac{185.7724}{1} = 185.7724$$

- Cálculo del estadístico experimental (**Fo**) y se evalúa con la ecuación 12:

$$Fo = \frac{MSA}{MS_e}$$

$$Fo = \frac{185.7724}{320.6727} = 0.5793$$

- Cálculo del porcentaje de variabilidad (%), con la ecuación 13:

$$\% = \frac{SSA}{SS_T} * 100$$

$$SS_T = \text{Es la suma de cuadrados de los factores} = \sum SS_i$$

$$\% = \frac{185.7724}{1174.9735} * 100 = 15.8100$$

C) Análisis de los factores que afectan a la Media

- A continuación, se presentan el cálculo para el cálculo de los contrastes de los niveles alto (2) y bajo (1) con ecuaciones 14 y 15; y la ecuación 16 nos permite calcular la suma de cuadrados para generar la tabla de varianzas:

$$SA_1 = \sum_1^4 T_1 = 0.1721 + 0.1641 + 0.1709 + 0.1767 = 0.6838$$

$$SA_2 = \sum_1^4 T_2 = 0.1439 + 0.1903 + 0.1811 + 0.1929 = 0.7082$$

$$SSA = \frac{(SA_2 - SA_1)^2}{8} = \frac{(0.7082 - 0.6838)^2}{8} = 7.442 \text{ EXP} - 5$$

- Cálculo de la suma de cuadrados medios (**MSi**): esto nos permite calcular la suma de cuadrados ponderada (respecto a un mismo tamaño) y se evalúa con la siguiente ecuación 11:

$$MSA = \frac{SSA}{GL}$$

$$MSA = \frac{SSA}{GL} = \frac{7.442 \text{ EXP} - 5}{1} = 7.442 \text{ EXP} - 5$$

- Cálculo del estadístico experimental (**Fo**) y se evalúa con la ecuación 12:

$$Fo = \frac{MSA}{MS_e}$$

$$Fo = \frac{7.442 \text{ EXP} - 5}{1.69663 \text{ EXP} - 3} = 0.2552$$

- Cálculo del porcentaje de variabilidad (%), con la ecuación 13:

$$\% = \frac{SSA}{SS_T} * 100$$

$$SS_T = \text{Es la suma de cuadrados de los factores} = \sum SS_i$$

$$\% = \frac{7.442 \text{ EXP} - 5}{1.69663 \text{ EXP} - 3} * 100 = 4.39$$

- Calculo del contraste para el error estimado, para tabla 13:

$$\begin{aligned} SSe &= SSA + SSBC = 7.442 \text{ EXP} - 56 + 5.4080 \text{ EXP} - 5 \\ &= 1.2850 \text{ EXP} - 4 \end{aligned}$$

REFERENCIAS

ACUÑA PARDO JOSE DOMINGO, NOTAS DISEÑO DE EXPERIMENTOS, UMSNH, MEXICO, 2014;

AGUACATES DE CALIDAD, VISITA INDUSTRIAL, TACAMBARO, MICH. 2014;

BASE DE DATOS DEL COMERCIO DE PRODUCTOS DE LA DIVISIÓN DE ESTADÍSTICAS DE LA ONU, UN COMTRADE, 2010. <http://comtrade.un.org/db/>;

BASE DE DATOS DE LA SAGARPA, (2000, 2010);

<http://www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Documents/pablo/Documents/Monografias/Monograf%C3%ADa%20del%20aguacate.pdf>;

BASE DE DATOS DEL SERVICIO DE INFORMACIÓN AGROALIMENTARIA Y PESQUERO (SIAP), 2010. <http://www.siap.gob.mx/agricultura-produccion-anual/>;

CONSULTA FAO/OMS DE EXPERTOS, GRASAS Y ACEITES EN LA NUTRICIÓN HUMANA, 16 DE OCTUBRE DE 1993;

DOUGLAS C. MONTGOMERY, DESIGN AND ANALYSIS OF EXPERIMENTS, JOHN WILEY AND SONS, SINGAPORE, 1983;

FAOSTAT (2010), (2011) En <http://www.fao.org/>

NOM-066-FITO-2002: “ESPECIFICACIONES PARA EL MANEJO FITOSANITARIO Y MOVILIZACION DEL AGUACATE”.

NOM-093-SSA1-1994: “BIENES Y SERVICIOS. PRÁCTICAS DE HIGIENE Y SANIDAD EN LA PREPARACIÓN DE ALIMENTOS QUE SE OFRECEN EN ESTABLECIMIENTOS FIJOS”.

NOM-120-SSA1-1994: “BIENES Y SERVICIOS. PRÁCTICAS DE HIGIENE Y SANIDAD PARA EL PROCESO DE ALIMENTOS, BEBIDAS NO ALCOHÓLICAS Y ALCOHÓLICAS”.

NOM-127-SSA1-1994, "SALUD AMBIENTAL, AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO-LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACION".

PACHECO ESCALERA RODOLFO, INGENIERO QUÍMICO, QUIMIC SA DE CV, PLATICAS DIVERSAS, MORELIA, 2015;

QUINTERO SANCHEZ, ANDRES; DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UN DESPULPADOR DE AGUACATE, UMSNH, MEXICO, 2016;

SEGRS, J.C. AND VAN SANDE, DEGUMMING THEORY AND PRACTICE. PROCEEDING AOCS WORLD CONFERENCE ON EDIBLE FALS AND OILS PROCESSING. MAASTRICHT, PP 83-88. 1988.

TAGUCHI, G. Y KANISHI, ARREGLOS ORTOGONALES Y GRAFICAS ORTOGONALES, AMERICAN SUPPLIER INSTITUTE AND CENTER FOR TAGUCHI METHODS, ETESM, 1988;

TAGUCHI, INTRODUCCION TO QUALITY ENGINEERING, DESIGNING QUALITY INTO PRODUCS AND PROCESSES, ASIAN PRODUCTIVITY ORGANIZACIÓN, TOKYO, 1990.