

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA



**EXTRACCIÓN DE ACEITE ESENCIAL DE LA CÁSCARA DE
NARANJA**

Por:

DANIEL GUALBERTO BENÍTEZ VEGA

**Modalidad de graduación Investigación Aplicada, presentado a
consideración de la “UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL
SARACHO”, como requisito para optar el grado académico de Licenciatura
en Ingeniería Química.**

Agosto de 2016

TARIJA – BOLIVIA

Resumen del trabajo

Los aceites esenciales son mezclas de varias sustancias químicas, son líquidos más o menos viscosos, con una densidad inferior al agua de coloración variante, a veces incoloros, a ellos se debe el aroma característico de las flores, plantas, semillas, frutos y hierbas. El uso de los aceites esenciales data desde los 3.500 a.C., los pioneros en el uso de los aceites esenciales fueron los egipcios luego los griegos y los árabes, estos cada vez fueron perfeccionando las técnicas de extracción de los aceites esenciales. Actualmente los aceites esenciales tienen una fuerte dinámica económica en el mundo, las exportaciones mundiales de los aceites esenciales el 2014 generaron 4.453 millones de US\$, y las importaciones 4.078 millones de US\$. En Bolivia actualmente se exporta aceite de limón y molle, el 2014 recaudó de exportaciones la suma de 3,5 millones de US\$.

La naranja es un fruto del árbol de naranjo dulce pertenece al género Citrus; su nombre científico es Citrus Sinensis, es un fruto abundante en vitamina C, flavonoides y aceites esenciales. La naranja está conformada por Epicarpio que es la parte externa de la naranja, Mesocarpio es la capa intermedia es esponjosa y de color blanco, Endocarpio es la parte comestible de la naranja y Semillas. Del epicarpio se extrae el aceite esencial que es un líquido intensamente amarillo anaranjado a naranja oscuro, que posee el olor y sabor característico de la parte externa de la cáscara fresca de las naranjas, es volátil e inmiscible con el agua. Para extraer los aceites esenciales se cuenta con métodos como el de prensado, extracción con solvente volátil, Método de enfleurage, extracción con fluido supercrítico y por arrastre con vapor de agua. El aceite esencial de naranja es muy utilizado en la aromaterapia por sus propiedades antidepresivas y relajantes, en la industria de cosméticos, en la industria de bebidas como saborizante, como también en la industria de fármacos.

En este trabajo la extracción del aceite esencial de la cáscara de naranja se realizó mediante el método de arrastre de vapor; esta técnica de destilación permite la separación de sustancias insolubles en H₂O y ligeramente volátiles, de otros productos no volátiles. El método consiste en generar vapor en una cámara y hacer que este pase por medio de la materia vegetal solubilizando los componentes volátiles y arrastrarlos hasta un condensador para obtener un condensado de dos fases aceite- agua y así poder separarlos. Es uno de los principales procesos utilizados para la extracción de aceites esenciales.

Se planteó un diseño factorial de 3² es decir dos variables (tamaño de partícula y masa de cáscara), de tres niveles cada variable (tamaños 2; 4-3 y 5 mm; Masa 600; 450 y 300 gr).

El proceso de extracción en cada experimento del diseño factorial se realizó triturando la cáscara de naranja fresca, posteriormente se tamizó, la materia prima tamizada se pesó y se introdujo en la torre de destilación para la extracción; el aceite esencial que se obtiene se separa del agua, se envasa y almacena.

El aceite esencial obtenido se somete a análisis fisicoquímicos, los cuales dan como resultado un índice de refracción de 1,4748, la densidad relativa 0,8469 el pH 6,98, en la composición química se identifica 5 componentes: el limoneno en un 98,1%, mirceno 0,92%, linalol 0,4%, pineno 0,3%, terpinoleno 0,14 y un 0,19% de compuestos no identificados. Se analiza estos resultados y se concluye que el aceite esencial sí tiene las características propias del aceite esencial de cáscara de naranja.

CAPÍTULO I
MARCO TEÓRICO

1.1. La naranja

El naranjo procede de las regiones sudorientales de Asia, concretamente de la zona sureste de China y el archipiélago malayo. Las naranjas se cultivan en el Sur de China desde hace miles de años, desde donde se extendió por el Sudeste asiático. Luego, el naranjo dulce y el naranjo amargo se expandieron por todo Oriente por la Ruta de la Seda. Las naranjas dulces son muy apreciadas por su sabor y por sus propiedades curativas.

Las naranjas son el fruto del naranjo dulce, árbol perteneciente al género Citrus de la familia de las Rutáceas. Esta familia comprende más de 1.600 especies. El género botánico Citrus es el más importante de la familia y consta de unas 20 especies con frutos comestibles, todos abundantes en vitamina C, flavonoides y aceites esenciales. Tienen la pulpa formada por muchas vesículas llenas de jugo. El naranjo dulce se considera la especie más importante y es el más cultivado de todos los cítricos. Le siguen: las mandarinas, los limones, los pomelos, limeros y kumquats. El naranjo amargo es cultivado como árbol ornamental utilizado para obtener fragancias, este no se debe confundir con el naranjo dulce. (Directo del campo, 2015)

1.2. Variedades de naranjas

La especie más importante del género citrus es la naranja dulce (*Citrus sinensis*). La clasificación hortícola de los naranjos puede realizarse en base a los diferentes tipos de caracteres; generalmente se distinguen cuatro tipos. (Cardozo, J. Y., 2003)

- Naranjos comunes
- Naranjos de ombligo
- Naranjos pigmentados
- Naranjos no ácidos

1.2.1. Naranjos comunes

Los naranjos comunes pueden clasificarse como precoces, intermedios y tardíos de acuerdo a la estación de producción. A continuación se dan algunos ejemplos de cultivares de los diferentes grupos.

- Precoces: Hamlin, Cadenera, Salustiana
- Intermedios: Jaffa, Homosassa, Shamouti
- Tardíos: Valencia, Pera, Selecta.

La naranja de variedad “Valencia”, es el principal cultivar de este grupo, sus árboles son vigorosos, grandes y muy productivos, sus frutos pueden permanecer largo tiempo en el árbol sin deteriorarse y sin perder su calidad organoléptica, es considerado excelente para la industrialización, ya que tiene buen comportamiento el almacenamiento y transporte.

Frutos: son de tamaño mediano a grande, redondeado a oblongo.

- Cáscara: suave, coloreada y a veces finamente rugosos.
- Pulpa: de buen color, alto contenido de jugo, buen sabor aunque un poco ácida excepto cuando madura.
- Semillas: prácticamente carece de semillas.

(Cardozo, J. Y., 2003)

1.2.2. Naranjos ombligos

Su nombre le viene por su forma (en inglés, ombligo). Muy valoradas por los agricultores ya que crecen robustas y sus frutos son de gran tamaño, muy precoces y muy ricos y tienen, en general, buen vigor, No tienen semillas debido a que presenta esterilidad respecto al polen. (Herrera, 2010)

Estas variedades se han adaptado muy bien a climas subtropicales y tienen en común que son frutos de gran tamaño, con un ombligo en la zona opuesta al pedúnculo. Como frutas frescas son de excelente calidad, pero no resultan adecuadas para

elaborar zumos, pues les confieren un desagradable sabor amargo, aparte de que proporcionan menor cantidad de jugo que otras variedades. El sabor amargo solo se aprecia cuando son exprimidas, ya que durante esta operación se desprende la limonina, compuesto responsable de ese amargor característico. Algunos cultivares de este grupo son:

- Navelate: ombligo poco aparente, jugosa, muy dulce. Se mantiene en el mercado desde finales de febrero hasta finales de mayo.
- Navelina: variedad muy productiva, de sabor dulce, es ideal para tomar como postre. Aparece en el mercado en los primeros días de octubre y se mantiene hasta mediados de febrero.
- Newhall: variedad que se suele confundir con la anterior, puesto que sus características son prácticamente idénticas, excepto el índice de madurez que es más adelantado.
- Navel: corteza de color rojo vivo. Su presencia en los mercados es muy amplia, ya que aparece en la primera quincena de noviembre y se mantiene hasta los últimos días de abril.
- Washington o Bahía: buena coloración y excelente calidad. El periodo de consumición suele ser desde principios de febrero hasta mediados de abril.
- Lane Laten: con piel fina y acanaladuras longitudinales alrededor del fruto, menor cantidad de limonina. Su recolección se produce a partir de enero y perdura en los mercados hasta finales de mayo.

(Eroski Consumer, 2015)

1.2.3. Naranjos pigmentados

Son variedades muy similares a los naranjos comunes, pero se diferencian en que sintetizan pigmentos rojos (antocianinas) en la pulpa y a veces en la piel. Este proceso solo se produce si se dan bajas temperaturas nocturnas, y los frutos no adquieren la tonalidad rojiza hasta el otoño o invierno, adquiriendo el zumo un sabor

especial que recuerda al de las cerezas o las frambuesas. Estas variedades solo se cultivan en la región mediterránea.

- Doble Fina: antigua variedad española que fue la naranja de sangre más importante, frutos con nula o intensa pigmentación tanto en la cáscara como en la pulpa. Son frutas de poco zumo pero con un característico sabor.
- Maltaise: variedad de gran calidad, frutos con la coloración externa naranja o algo rojiza y pulpa poco coloreada. Tiene un sabor dulce extraordinario con toque ácido, sin semillas y con alto contenido en zumo.
- Moro: el color de su pulpa va desde el amarillo al burdeos, con o sin semillas y es fácil de pelar.
- Sanguinelli: variedad española muy cultivada antiguamente. Tiene la corteza brillante y pigmentada, su pulpa contiene vetas rojas con un alto contenido en jugo también rojizo muy dulce y algo ácido. Aparece en el mercado desde mediados de enero a principios de marzo.
- Sanguinello: variedad muy cultivada en Italia. Frutos sin tanta coloración como otras variedades y desprenden olor a aceite esencial cuando se pelan.

(Eroski Consumer, 2015)

1.2.4. Naranjos no ácidos

Constituyen un pequeño grupo de cultivares cuya fruta tiene muy bajo contenido en ácido, más o menos una décima parte del contenido de los naranjos comunes, por lo que su sabor es un poco insípido. Estos frutos son muy apreciados en los países árabes. Algunos cultivares de este grupo son: Succari, Maltes Meski, Shamouti Meski. (Morín, Ch. 1980)

1.3. La planta

El naranjo dulce es un árbol cuyo tronco es cilíndrico y se ramifica desde la parte inferior. Por lo general son espinosos, de ramas delgadas, con hojas perennes lanceoladas y follaje denso de un verde generalmente muy oscuro en las plantas jóvenes y los brotes de un verde más claro. (Cardozo, J. Y, 2003).

- Los tipos de suelos que requiere son franco y franco arcilloso fértil profundo bien drenado medianamente tolerante a la salinidad y poco tolerante a la acidez (pH 6.5-7).
- El clima debe ser subtropical y templado, a una altitud de 500 a 1000 msnm, las temperaturas óptimas van de 23°C a 32°C la máxima y la mínima es de -3°C, no soporta las heladas. (CAINCO-IBCE, 2014)

Figura 1-1 Planta de la naranja dulce



Fuente: Página web, 2010. Disponible en herbolaria.altervista.org

1.3.1. La floración

Las flores son regulares, de color blanco o rosado que aparecen en primavera y en otoño. Las flores se ubican en las axilas de las hojas, solitarias o en pequeños grupos los estambres son en general cuatro y algunas veces superiores a los pétalos. (EMEGE)

Figura 1-2 Flor del naranjo dulce

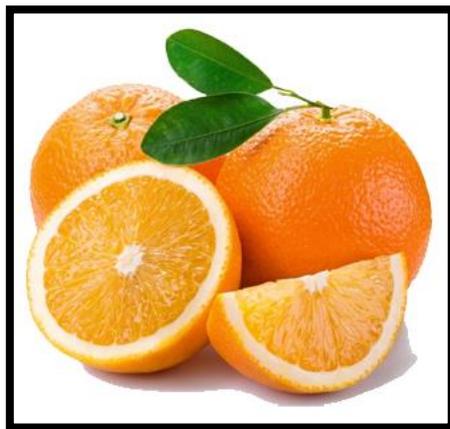


Fuente: página web, 2010. Disponible en www.lanaranjadevalencia.es

1.3.2. Fruto

El fruto tiene un diámetro de 6 a 10 cm, su peso está entre los 150 a 200 g sin piel. Tiene forma de esfera y chatas por los polos, la cáscara de la naranja es muy coloreada de amarillo anaranjado, puede ser lisa o rugosa dependiendo de la variedad, Tiene un sabor dulce con matices a ácido más o menos fuerte dependiendo de la variedad. (Directo del campo, 2015)

Figura 1-3 Fruto del naranjo dulce



Fuente: página web www.infoagro.com

1.3.2.1. Características fisicoquímicas de la naranja

Las características fisicoquímicas de la naranja dependen de varios factores algunos de ellos son las condiciones climáticas, el tipo de suelo, los fertilizantes utilizados, la variedad, la edad de la planta, tiempo de cosecha. En la tabla I-1 se muestra un ejemplo de la composición fisicoquímica de la naranja valencia.

Tabla I-1 Características fisicoquímicas de la naranja valencia

Característica	Unidades	Valor promedio
Peso entera	g	283.21
Peso sin cáscara	g	224.06
Corteza	%	20.8
pH		4.2
Acidez	%	0.91
Sólidos solubles totales	°Brix	11.76
Agua	%	87
Cenizas	g	1.2
Vitamina C	mg/100g	71

FUENTE: Datos obtenido de documentos de la *Caracterización de naranja* de la Universidad de las Américas de Puebla (UDELAP).

Tabla I-2 Composición fisicoquímica aproximada de la cáscara de naranja

Parámetro	Valor
Sólidos Solubles °Brix	7;1 ± 1;2
pH	3;93 ± 0;03
Total de acidez g	0;29 ± 0;03
Índice de formol	34 ±2;4
Humedad%	85;9 ± 1;6
Grasa% (DM)	1;55 ±0;17
Ceniza% (DM)	3;29 ± 0;19
Proteína% (DM)	6;16 ±0;23
Carbohidratos% (DM)	89;0 ±1;1
Azúcares Neutrales	3;8 ±0;3
Ácido irónico	7;1 ±0;9
Lignina	3;2 ±0;4
Pectina% (DM)	17 ±5

DM, materia seca

Fuente: I. Cerón, C. Cardona (2010).

Evaluación del proceso integral para la obtención de aceite esencial y Pectina Partir de cáscara de naranja. Universidad EAFIT

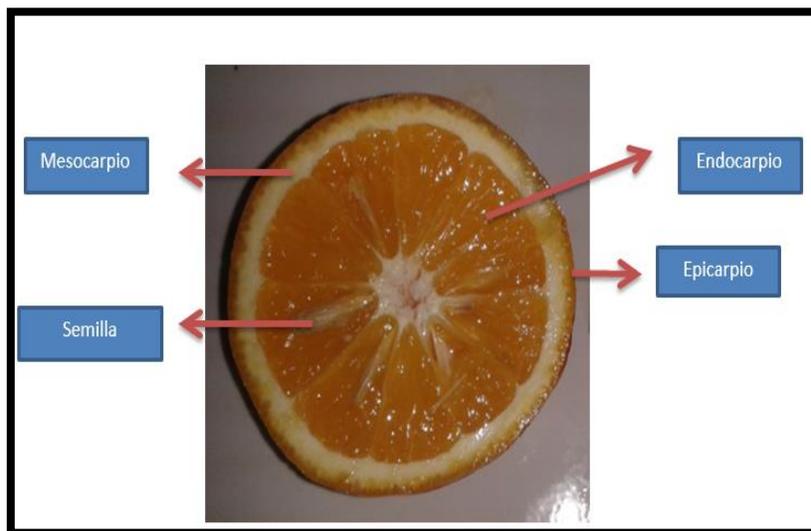
1.3.2.2. Partes de la naranja

La naranja consta de una porción comestible y una porción no comestible, ambas porciones son variables, por lo que una estimación basada en promedio indica de 55 a 60 % de porción comestible y 40 a 45 % de porción no comestible. (Cardozo, J. Y., 2003)

La naranja consta de las siguientes partes:

- Epicarpio
- Mesocarpio
- Endocarpio
- Semillas

Figura 1-4 Partes de la naranja



Fuente: Elaboración propia, fotografía obtenida de la práctica de Botánica General de la Carrera de Ingeniería Agronómica.

Acosta (2015),

1.3.2.2.1. Epicarpio

La corteza está constituida por una capa delgada, llamada epicarpio conocida también como flabelo, el cual contiene la mayor parte de los pigmentos y aceite esencial de la naranja. Los pigmentos son carotenoides; la cantidad de carotenoides, en el flabelo de las naranjas es muy grande (20-30 mg /100 g) y también los aceites esenciales (0.5 a 1 ml por cada 100 cm² de superficie). (Cardozo, J. Y.,2003)

1.3.2.2.2. Mesocarpio

Es un tejido esponjoso, blanco y celulósico que se encuentra en la parte interna de la piel de la naranja, conocido también como albedo, está constituido principalmente por celulosa, hemicelulosa y pectina. (Cardozo, J. Y., 2003).

1.3.2.2.3. Endocarpio

Es la parte comestible de la naranja que está formada por los carpelos o gajos, compuesto por vesículas en forma de huso que contiene el jugo y están separados por la membrana intercarpelares. (Cardozo, J. Y., 2003).

1.3.2.2.4. Semillas

Las semillas son de cubierta dura, lignocelulosa, contienen una importante cantidad de aceite. (Cardozo, J. Y., 2003).

1.4. Productores de naranja en Bolivia - Tarija

En Bolivia se tiene 14474 hectáreas cultivadas de naranja con un rendimiento del 7291 kg/ha. (CAINCO-IBCE, 2014)

En el país los mayores productores de naranja son los departamentos de: La Paz (Yungas), Cochabamba (Chapare), Santa Cruz y Tarija; las variedades que son mayormente cultivadas a nivel nacional son: Criolla, Navel, Bahía Thompson, Washington Navel, Hamlin, Jaffa, Pera Bahianiana, Valencias, Late, Lúe.

Según datos de la Cámara Agropecuaria de Tarija, el 2015 la producción de naranja en el departamento se aproxima a 2521 hectáreas con un rendimiento de 1500 centenas por hectárea. Las provincias productoras de naranja son:

- Provincia Arce con 1758 ha
- Provincia O`Connor con 216 ha
- Provincia Gran Chaco 547 ha

1.5. Aceite esencial de naranja

El naranjo, es un árbol, del cual se puede obtener distintos tipos de productos aromáticos, según la parte que sea utilizada. De sus flores se obtiene la esencia de nerolí o azahar, de sus hojas se obtiene la esencia de petit-grain y de la cáscara de sus frutos se obtiene la esencia o el aceite esencial de naranja. Estas esencias tienen una variedad de aplicaciones en la industria de sabores y fragancias.

El aceite esencial de naranja se encuentra principalmente en sacos de forma ovalada en el flavedo o en la porción anaranjada de la cáscara y actúa como una barrera toxica natural para muchos microorganismos e insectos. La recuperación del aceite se efectúa generalmente por métodos mecánicos “presión en frío de la cáscara”; sin embargo también se realiza el proceso de extracción del aceite por medio de hidrodestilación, destilación con vapor, hidrodestilación asistida por microondas, extracción con solvente y extracción con fluidos supercríticos (CO₂). La calidad del aceite depende de factores que influyen sobre la composición como las condiciones geobotánicas del medio (clima, altitud, tipo de suelo, cantidad de lluvias, etc.), edad de la planta y estado fenológico, método de cultivo (uso de fertilizantes, abono, pesticidas, otros químicos, etcétera.), época de recolección, modo de manejo y almacenamiento del material vegetal (fresco, seco, fermentado, etc.) y método de obtención del aceite. (Cerón S. I., Cardona A.C., 2010)

Es un líquido intensamente amarillo anaranjado a naranja oscuro, que posee el olor y sabor característico de la parte externa de la cáscara fresca de las naranjas dulces; tiene una densidad de 0.842 a 0.846 g/ml. Es volátil, miscible con el alcohol deshidratado o con di Sulfuro de carbono; se disuelve en un volumen igual de ácido acético glacial. Conservado en las condiciones habituales, es muy propenso a la descomposición y adquiere rápidamente olor a trementina. (Gennaro, A. R., 2003)

Tabla I-3 Propiedades fisicoquímicas de aceite esencial de la cáscara de naranja

Propiedad	Valor
Índice de refracción	1,458±0,12
Gravedad específica	0,843±0,1
pH	4,3±0,01

Fuente: I. Cerón, C. Cardona (2010). *Evaluación del proceso integral para la Obtención de aceite esencial y Pectina a Partir de cáscara de naranja*. Universidad EAFIT

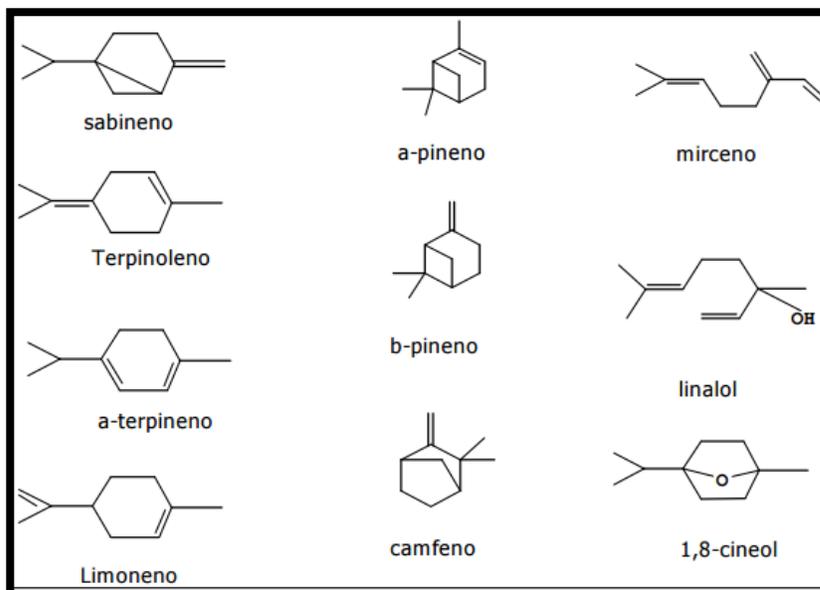
1.5.1. Composición del aceite esencial de naranja

Los compuestos mayoritarios del aceite esencial corresponden a los monoterpenos, es decir unidades terpenicas de 10 carbonos (C-10), y los sesquiterpenos, unidades terpenicas de 15 carbonos (C-15) no oxigenados, tal como los monoterpenos limoneno, β - mirceno, α -pineno, γ -terpinoleno son los más representativos. (Cerón S. I., Cardona A.C., 2010)

Los monoterpenos son sustancias lipófilas, volátiles, responsables del olor característico de muchas plantas. Estos compuestos se han encontrado en cerca de cincuenta familias de angiospermas y suelen ser los constituyentes principales de los aceites y resinas gimnospermas. La gran mayoría son compuestos cíclicos que pueden tener uno o dos ciclos. Asimismo, hay monoterpenos acíclicos como el mirceno o linalol. Los monoterpenos son muy apreciados en la industria de los saborizantes y aromas. (Romo, V., 2006)

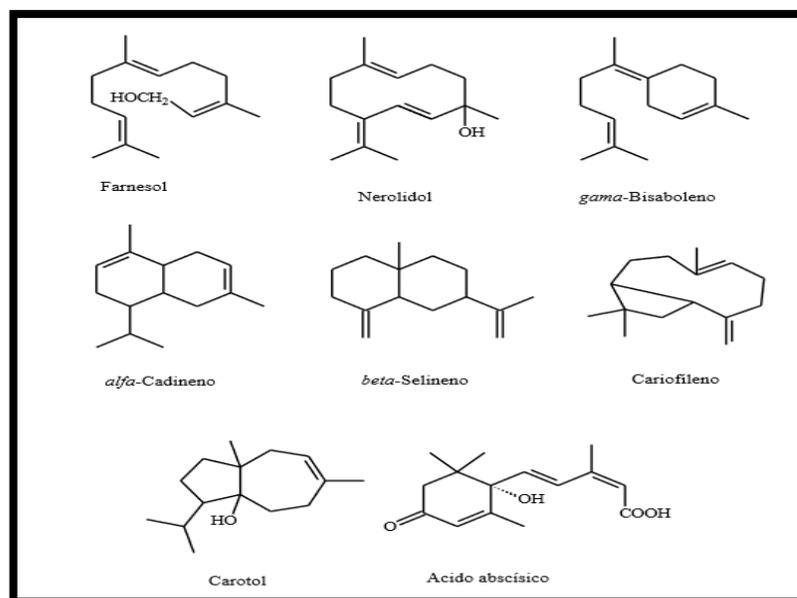
Los sesquiterpenos o sesquiterpenoides son los terpenos de 15 carbonos (es decir, terpenoides de un monoterpenoide y medio). Como los monoterpenoides, muchos sesquiterpenoides están presentes en los aceites esenciales. Que aparecen al final de la destilación de los aceites, su concentración suele ser mínima. (Aromas Que Curan, 2014)

Figura 1-5 Estructuras moleculares de algunos monoterpenos



Fuente: Pagina web, disponible e www.tdx.cat

Figura 1-6 Estructuras moleculares de algunos sesquiterpenos



Fuente: A. Martínez (2001) *Aceites esenciales* disponible en <http://farmacia.udea.edu.co/~ff/esencias2001b.pdf>

Tabla I-4 Cantidad relativa (%) e identificación de los compuestos volátiles, aislados de las cáscaras de naranja por destilación con vapor

Nombre Compuesto	Cantidad relativa %
α -Pinoeno	0,532
β -felandreno	0,492
β -mirceno	1,753
D-Limoneno	90,967
γ - terpinoleno	1,649
Octanal	0,199
Decanal	0,230
Linalol	1,267
Octanol	0,532
Compuestos no identificados	2,379

Fuente: I. Cerón, C. Cardona (2010). *Evaluación del proceso integral para la Obtención de aceite esencial y Pectina a Partir de cáscara de naranja.* Universidad EAFIT

1.6. Métodos de extracción

Los aceites esenciales se pueden extraer mediante diferentes métodos como: prensado, destilación con vapor de agua, extracción con vapor de agua, extracción con solventes volátiles, enfleurage y con fluidos supercríticos. (Rodríguez, Á. M., Alcaraz, M. L., Real, C. S. M., 2012)

1.6.1. Extracciones por prensado

El material vegetal es exprimido mecánicamente para liberar el aceite y este es recolectado y filtrado. Este método es utilizado para la extracción de esencias cítricas. (Rodríguez, Á. M., Alcaraz, M. L., Real, C. S. M., 2012)

También se le conoce con “expresión”. El material vegetal es sometido a presión, bien sea en prensas tipo Bach o en forma continua; dentro de éstos se tienen los equipos: Tornillo sin fin de alta o de baja presión, extractor expeller, extractor

centrífugo, extractor decanter y rodillos de prensa. Para los cítricos antiguamente se empleó el método manual de la esponja, especialmente en Italia, que consiste en exprimir manualmente las cáscaras con una esponja hasta que se empapa de aceite, se exprime entonces la esponja y se libera el aceite esencial. Otros métodos corresponden a raspado, como el del estilete o “ ecuelle”, donde la fruta se pone a girar en un torno y con un estilete se raspa la corteza únicamente; permanentemente cae un rocío de agua que arrastra los detritos y el aceite liberado. Otro proceso emplea una máquina de abrasión similar a una peladora de papas, la “pellatrice” y también hace uso del rocío de agua. En estos procesos la mezcla detritos-agua-aceite se centrifuga a 5000 rpm durante 40 minutos y el aceite esencial recuperado se coloca en una nevera a 3°C durante 4 horas, para solidificar gomas y ceras que se localizan en la superficie. El aceite esencial se guarda en recipientes oscuros a 12°C. Los aceites obtenidos por prensado y/o raspado, se lo comercializa como “expresión en frío” y cumplen la funciones de odorizantes (smell oils) y saborizantes (taste oils).

(Paredes, P. D., Quinatoa, Ch. F., 2010).

1.6.2. Método de extracción con solventes volátiles

La muestra seca y molida se pone en contacto con solventes como alcohol o cloroformo. Estos compuestos solubilizan el aceite esencial, pero también extraen otras sustancias como grasas y ceras, obteniéndose al final una esencia impura. Se utiliza a escala de laboratorio, pues a nivel industrial resulta costoso por el alto valor comercial de los solventes y porque se obtienen esencias mezcladas con otras sustancias. (Rodríguez, Á. M., Alcaraz, M. L., Real, C. S. M., 2012)

1.6.3. Método de enfleurage

El material vegetal (generalmente flores) se pone en contacto con una grasa. La esencia es solubilizada en la grasa que actúa como vehículo extractor. Se obtiene inicialmente una mezcla (el concreto) de aceite esencial y grasa la cual es separada posteriormente por otros medios físico-químicos.

En general se recurre al agregado de alcohol caliente a la mezcla y su posterior enfriamiento para separar la grasa (insoluble) y el extracto aromático (absoluto). Esta técnica es empleada para la obtención de esencias florales (rosa, jazmín, azahar, etc.), pero su bajo rendimiento y la difícil separación del aceite extractor la hacen costosa. (Rodríguez, Á. M., Alcaraz, M. L., Real, C. S. M., 2012)

Figura 1-7 Método de enfleurage



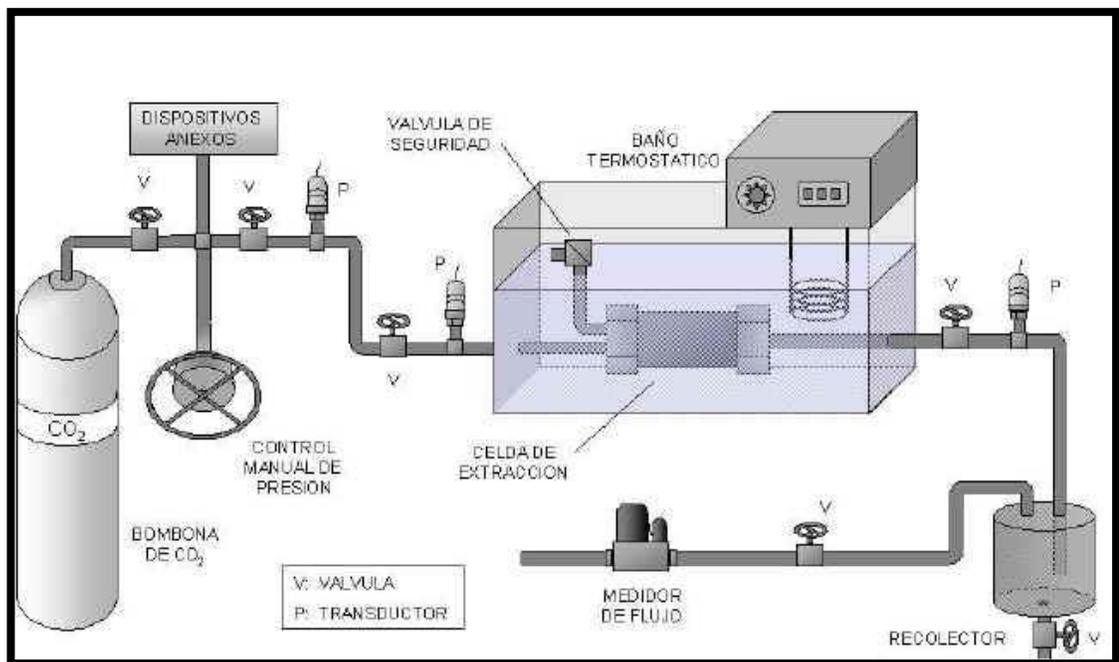
Fuente: Pagina web, 2013. Disponible en: www.umdiewelt.de

1.6.4. Método de extracción con fluidos supercríticos

El principio básico de esta técnica se basa en el cambio de propiedades de transporte y de solubilidad que presenta un solvente en este estado. Para el caso de dióxido de carbono como fluido en estado supercrítico dos factores compiten en la influencia de la solubilidad de los solutos. Al incrementar la temperatura se incrementa la presión de vapor del soluto y por lo tanto su solubilidad; sin embargo, simultáneamente a un incremento en la temperatura se disminuye la densidad del CO₂ con lo cual tiende a decrecer la solubilidad del soluto. Conforme la presión se incrementa por encima del punto crítico del dióxido de carbono (7.38 MPa), la densidad del fluido se vuelve menos dependiente de la temperatura y la presión de vapor del soluto se vuelve dominante, de manera que la solubilidad del soluto se incrementa con la temperatura.

Es de desarrollo más reciente. El material vegetal cortado en trozos pequeños, licuado o molido, se empaca en una cámara de acero inoxidable y se hace circular a través de la muestra un fluido en estado supercrítico (por ejemplo CO_2). Las esencias son así solubilizadas y arrastradas mientras que el fluido supercrítico, que actúa como solvente extractor, se elimina por descompresión progresiva hasta alcanzar la presión y temperatura ambiente. Finalmente se obtiene una esencia cuyo grado de pureza depende de las condiciones de extracción. Este procedimiento presenta varias ventajas: alto rendimiento, fácil eliminación del solvente (que además se puede reciclar), no se alteran las propiedades químicas de la esencia por las bajas temperaturas utilizadas para su extracción. Sin embargo el equipo requerido es relativamente costoso, ya que se requieren bombas de alta presión y sistemas de extracción también resistentes a las altas presiones. (Rodríguez, Á. M., Alcaraz, M. L., Real, C. S. M., 2012)

Figura 1-8 Extracción por fluido supercrítico



Fuente: Pagina web, disponible en:

<http://pendientedemigracion.ucm.es/info/leffs/instalaciones/supercriticos.htm>

1.6.5. Destilación con agua o hidrodestilación

Consiste en poner a hervir agua, bien sea por fuego directo, camisa de vapor o camisa de aceite, en la cual se ha sumergido previamente el material vegetal, preferiblemente en polvo, con el objeto de que el vapor de agua ejerza su acción en el mayor número posible de partículas vegetales.

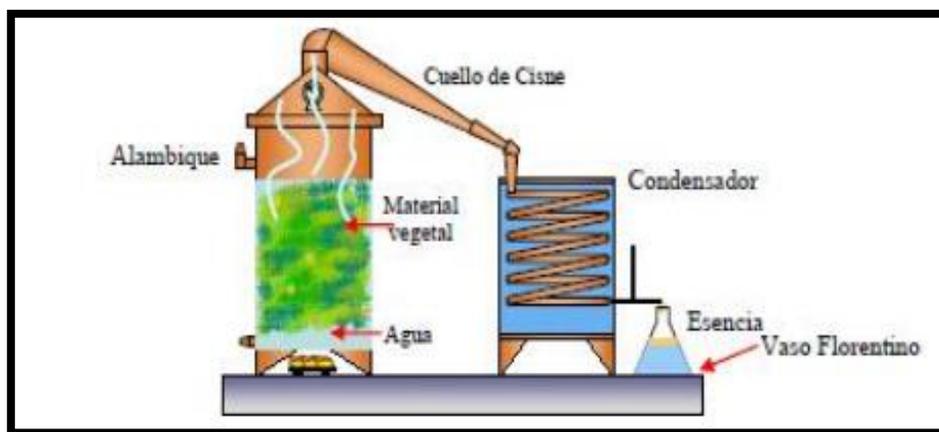
Similar al arrastre con vapor, el vapor producido arrastra los aceites esenciales hasta otro recipiente donde se condensan y se separan.

Este sistema de extracción tiene el inconveniente de que la temperatura que se emplea provoca que algunos compuestos presentes en las plantas se degraden y se pierdan.

El material vegetal aromático siempre debe encontrarse en contacto con el agua, para así evitar el sobrecalentamiento y la carbonización del mismo. Debe mantenerse en constante agitación para evitar que se aglomere o sedimente al adherirse a las paredes del recipiente, lo cual puede provocar también su degradación térmica.

Dado que generalmente no es posible colocar suficiente agua para sostener todo el ciclo de destilación, se han diseñado equipos que presentan un tubo de cohobación lateral que permite el retorno de agua hacia el recipiente de destilación.

Figura 1-9 Equipo para la extracción de aceite esencial por hidrodestilación



Fuente: Márquez D., 2011. *Evaluación del rendimiento en la obtención del aceite “piper aurutum kunth” mediante la hidrodestilación asistida por microondas.*

Ventajas: Involucran un bajo costo de fabricación del equipo y su operación no requiere de servicios de energía eléctrica, instalaciones auxiliares para la generación de vapor, aire u otros.

Desventajas: La extracción del aceite volátil es incompleta, ofrece una menor eficiencia energética con respecto a la destilación con vapor o vapor/agua y es aplicable solo cuando las cargas son relativamente pequeñas. Por ser un sistema particularmente empleado en zonas rurales, se realiza como un arte y normalmente no se opera bajo condiciones óptimas de tiempo y temperatura. (Sistema de bibliotecas SENA., 2012)

1.6.6. Destilación por arrastre con vapor de agua

La destilación por arrastre con vapor se emplea con frecuencia para separar aceites esenciales de tejidos vegetales. Los aceites esenciales son mezclas complejas de hidrocarburos, terpenos, alcoholes, compuestos carbonílicos, aldehídos aromáticos y fenoles y se encuentran en hojas, cáscaras o semillas de algunas plantas.

En el vegetal, los aceites esenciales están almacenados en glándulas, conductos, sacos, o simplemente reservorios dentro del vegetal, por lo que es conveniente desmenuzar el material para exponer esos reservorios a la acción del vapor de agua. (Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey Campus Puebla. 2006).

Es el proceso más común para extraer aceites esenciales, más no es aplicable a flores ni a materiales que se apelmazan. En esta técnica se aprovecha la propiedad que tienen las moléculas de agua en estado de vapor de asociarse con moléculas de aceite.

La extracción se efectúa cuando el vapor de agua entra en contacto con el material vegetal y libera la esencia, para luego ser condensada. Con el fin de asegurar una mayor superficie de contacto y exposición de las glándulas de aceite, se requiere picar el material según su consistencia.

El vapor puede ser inyectado desde una caldera externa o desde una cámara en la parte inferior del tanque extractor.

Desventaja: Pueden ocurrir procesos colaterales como polimerización y resinificación de los terpenos; así como hidrólisis de esteres y destrucción térmica de algunos componentes.

Ventajas: Energéticamente es más eficiente, se tiene un mayor control de la velocidad de destilación, existe la posibilidad de variar la presión del vapor, y el método satisface mejor las operaciones comerciales a escala, al proveer resultados más constantes y reproducibles.

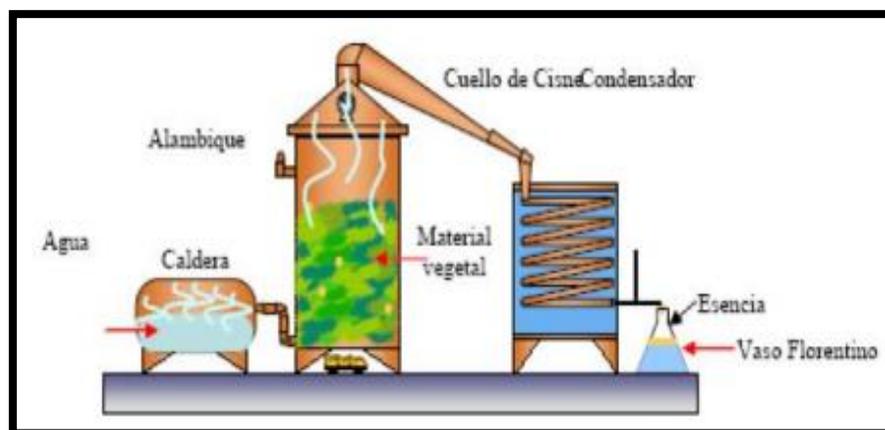
(Sistema de bibliotecas SENA., 2012)

1.6.6.1. Tanque extractor con caldera

El vapor de agua se inyecta desde una caldera externa por medio de tubos difusores, ubicados en la parte inferior de la masa vegetal que se coloca sobre una parrilla interior de un tanque extractor.

El vapor de agua provoca que los aceites esenciales se difundan desde las membranas de la célula hacia fuera. Los vapores de agua y aceite esencial que salen, se enfrían hasta regresar a la fase líquida, y se separan en un decantador. (Sistema de bibliotecas SENA., 2012)

Figura 1-10 Tanque extractor con caldera

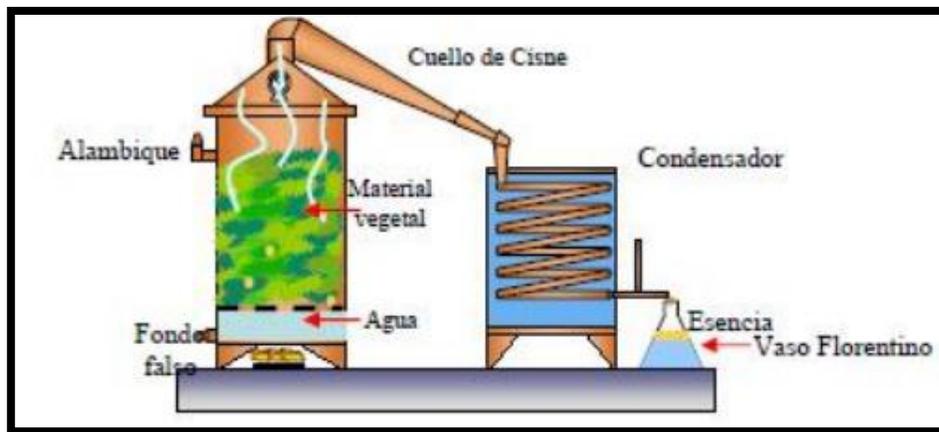


Fuente: Márquez D., 2011. *Evaluación del rendimiento en la obtención del aceite "piper aurutum kunth" mediante la hidrodestilación asistida por microondas.*

1.6.6.2. Tanque extractor con cámara de agua.

Es un método mejorado, donde la carga el material vegetal se coloca sobre una malla que sirve como un fondo falso y no permite el contacto directo con el agua. Una vez iniciado el proceso, el agua dentro del alambique se lleva hasta ebullición y el vapor generado, pasa a través del material vegetal. Consecuentemente, se evita que el material vegetal se queme ya que la cámara de agua lo protege del calentamiento directo. Es importante que el vapor de agua generado pase a través de la materia cargada uniformemente para garantizar la una extracción completa.

Figura 1-11 Tanque extractor con cámara de agua



Fuente: Márquez D., 2011. *Evaluación del rendimiento en la obtención del aceite “piper aurutum kunth” mediante la hidrodestilación asistida por microondas.*

1.7. Cuidado del aceite esencial de naranja

Los aceites esenciales son sustancias delicadas que deben ser almacenados o envasados en la forma ideal para asegurar que los componentes químicos esté bien conservados o para evitar convertirlo en un material tóxico que podría poner en peligro la salud cuando se consume por los seres humanos.

- Los aceites esenciales son sensibles a los rayos ultravioletas y al calor :
Los AEs son altamente sensibles a la luz y al calor, por tanto se deben conservar alejados del paso de la luz y protegidos en frascos de cristal oscuro o de aluminio que no permitan el paso de los rayos UV. Idealmente

en un lugar oscuro y fresco (la temperatura ideal es entre 5 hasta 35°C). Para una máxima durabilidad, pueden guardarse en el refrigerador.

- Los aceites esenciales son volátiles:

Para evitar la pérdida molecular por volatilización, es conveniente minimizar su contacto con el aire; para ello se debe ser extremadamente cuidadosos al manipularlos y mantener sus envases siempre muy bien cerrados, se debe usar tapones de gomas que permitan un cierre hermético.

Los envases de vidrio ámbar de color oscuro son la forma ideal de almacenar estos aceites naturales. El plástico es poco aconsejable ya que la exposición al aceite durante un largo período de tiempo podría causar que los productos químicos del aceite se mezclen con los compuestos encontrados en el material plástico; por lo tanto, los componentes de aceite se contaminan. Si realmente no puede encontrar cualquiera de los envases de vidrio de color oscuro las botellas de aluminio son una alternativa aceptable.

Los aceites esenciales se deben envasar al vacío para evitar que este se oxide con el tiempo por lo cual se usa tapones de goma o tapas a rosca con sellos de plástico.

El almacenamiento en lugares oscuros se asegurará de que no hay exposición a la luz mínima y evitar que el aceite se convierta rancio rápidamente.

Las áreas frías ayudan a mantener la forma natural del aceite esencial, a diferencia de las áreas calientes que pueden dañar su composición química; por lo que se debe evitar el almacenamiento de aceites esenciales cerca de una fuente de calor o en áreas que expuestas directamente al sol.

Aun cuando algunos aceites esenciales han sufrido oxidación y/o han estado expuestos a temperaturas elevadas durante un lapso corto (insisto sobre esta palabra) de tiempo se puede seguir utilizándolo sin que haya la más mínima modificación del producto.

Esta regla vale para los aceites esenciales pero no para las esencias de cáscara de los cítricos (limón bergamota etc.). Para estos está admitido que la conservación es

estable durante un periodo de 3 años. Estas esencias y los aceites esenciales que tienen monoterpeno, una vez abiertos, se conservan entre 6 meses a 1 año. Reaccionan fácilmente a las fuentes de aire y calor. Son frágiles. Hay que tener más cuidado con ellos. (Tu taller natural, 2015) (radikewl)

1.8. Usos del aceite esencial de naranja

Aromaterapia:

El aceite de naranja es una característica normal de casi todos los tipos de masajes y tratamientos de aromaterapia. Ofrece antidepresivos, alivia la tensión, hace que la persona se sienta tranquila y pacífica. El aroma del aceite esencial de naranja puede refrescar la mente y hace sentir relajado. Esta es la razón por la que también se utiliza para aliviar dolores de cabeza severos. Añadir unas gotas de aceite de naranja en la mano y frotar en el área de la frente puede proporcionar alivio de los dolores de cabeza.

Industria de cosméticos y fármacos:

Se utiliza en la industria de fármacos y como cosméticos porque limpia y revive la piel opaca, ayudando la eliminación de excesos de fluidos y toxinas, también es usado por sus propiedades germicidas, antioxidantes y anticancerígenas en la producción de fármacos

Industria Alimentaria

Se emplean para condimentar carnes preparadas, embutidos, sopas, helados, queso, etc. Los aceites más empleados por esta industria son el Cilantro, Naranja y Menta, entre otros. También son utilizados en la preparación de bebidas alcohólicas y no alcohólicas, especialmente refrescos. Con respecto a esta utilidad podemos citar las esencias extraídas del naranjo, limón, mentas e hinojo, entre otros. Estas esencias también se emplean en la producción de caramelos, chocolates y otras golosinas.

(Universidad Politécnica de Madrid, 2010).

1.9. Selección del método para la extracción del aceite esencial de cáscara de naranja

Para la elección del método más conveniente se elabora la siguiente matriz de decisión:

Tabla I-5 Selección del método de extracción de aceite esencial de la cáscara de naranja

Necesidades		Métodos de extracción									
		Extracción por prensado		Extracción con fluido supercrítico		Extracción por arrastre con vapor		Extracción por hidrodestilación		Extracción por solvente	Método de enflorado
Aplicable a la cáscara de naranja		SI		SI		SI		SI		NO	NO
Costo	40%	alto	2	muy alto	0	bajo	6	medio	4		
Calidad del aceite obtenido	30%	Buena	6	Muy buena	8	Buena	6	Regular	4		
Rangos de P y T accesibles.	30%	SI	10	NO	0	SI	10	SI	10		
TOTAL	100		560		240		720		580		

Fuente: Elaboración propia, 2016

Los rangos de valores empleados en la matriz de decisión de la tabla 1-5 son los siguientes:

- Costo: Muy alto = 0; Alto = 2; Medio = 4; Bajo = 6; Muy bajo = 8; Sin costo = 10.
- Calidad del aceite obtenido: Pésima = 0; Mala = 2; Regular = 4; Buena = 6; Muy buena = 8; Excelente = 10.
- Rangos de presión y temperatura accesibles: SÍ = 0; NO = 10.

El cálculo de la puntuación para cada método en la matriz de decisión se calcula, multiplicando el valor que se da a cada necesidad por el porcentaje de importancia que tiene cada necesidad y posteriormente se suman los resultados de la multiplicación, por ejemplo:

Multiplicando para costo se tiene $40 \times 6 = 240$

Multiplicando para calidad de aceite obtenido $30 \times 6 = 180$

Multiplicando para rangos de temperatura y presión $30 \times 10 = 300$

Sumando: $240 + 180 + 300 = 720$.

Según estos parámetros y los resultados obtenidos en la matriz de decisión, el método más conveniente para extraer el aceite esencial de la cáscara de naranja es el método de arrastre por vapor, con una puntuación de 720, debido a que este método es de bajo costo, se obtiene un aceite de buena calidad y los rangos de temperatura y presión son accesibles.

1.9.1. Factores que influyen en la extracción por arrastre con vapor.

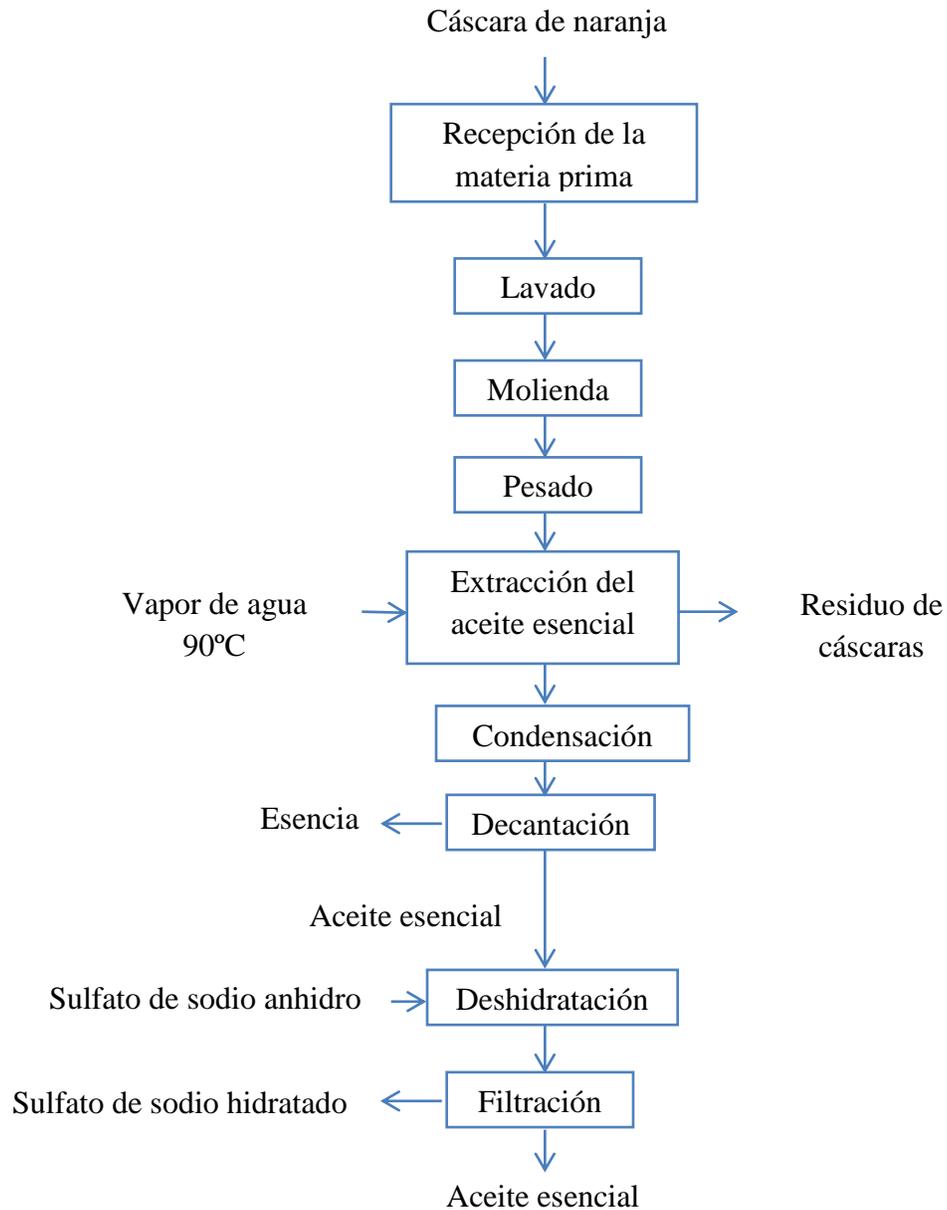
Los Factores que influyen en la extracción por arrastre con vapor son los siguientes:

- Tiempo de secado del material. La materia prima vegetal genera hongos que transfieren un olor terroso mohoso al aceite, debido a la formación de ácidos grasos; por esto si el material no se procesa pronto (3 días) se dispone en literas para su oreo.

- Tiempo de extracción. Pasado un tiempo ya no sale más aceite y el vapor posterior causa el arrastre por solubilidad o emulsión del aceite, presentando una disminución en el rendimiento.
- Factor de empaquetamiento. Si el material queda muy suelto, el proceso termina muy pronto, presentando un alto consumo energético; si queda muy apretado, el vapor se acanala disminuyendo el rendimiento del aceite, debe de estar entre el 0.15 a 0.25 % Distribución interior del vapor.
- Eficiencia del condensador. Condensación interior. Se evita realizando una purga previa a los 30 minutos de iniciado el proceso y además, manteniendo el tanque bien aislado.
- Tiempo de residencia en el florentino. Sobre todo si el diámetro es muy pequeño se produce arrastre del aceite. (VERA, I. O., 2012)

1.10. Etapas de la extracción del aceite esencial de la cáscara de naranja por el método de arrastre por vapor

Figura 1-12 Diagrama de flujo. Extracción de aceite esencial de naranja



Fuente: (Cerón I.; Cardona C.) *Evaluación del proceso integral para la obtención de aceite esencial y pectina a partir de cáscara de naranja.* (2010)

CAPÍTULO II
PARTE EXPERIMENTAL

2.1 Selección de la Materia prima para la extracción del aceite esencial

La materia prima para la obtención del aceite esencial son la cáscara de la naranja que contiene el aceite esencial en sacos o reservorios capilares, se estima que mientras más gruesa es la cáscara de naranja más aceite tiene esta. El color, textura, tamaño, peso y grosor de cáscara dependen del tipo de variedad de naranja. Para seleccionar la variedad de naranja a utilizar en la extracción del aceite esencial se realiza un estudio comparativo de la apariencia de las variedades de naranja criolla, jaffa y valencia tempranera, de la temporada del mes de mayo y julio, que se consumen en el departamento de Tarija.

Para el estudio comparativo se selecciona tres naranjas al azar de cada variedad, y se hace un control de color, textura, diámetro, peso con y sin cáscara, peso de las cáscaras y grosor, con datos obtenidos se saca un promedio para cada variedad.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el estudio comparativo se selecciona la naranja de variedad criolla porque se estima que esta tiene más aceite en su cáscara por ser más grande, tener cascar gruesa, además que es la más común en los mercados. Ver resultados en el capítulo III que corresponde a resultados y discusiones.

Figura 2-1 Variedades de naranja



Fuente: Elaboración propia, 2016

2.2. Morfología de la cáscara de naranja

Para determinar la ubicación del aceite esencial en la cáscara de naranja se realizó un estudio morfológico. Para la observación del tejido del epicarpio y del mesocarpio de la naranja se utilizó la guía práctica de Botánica General de la Carrera de Ingeniería Agronómica. *Acosta (2015)*, adaptada a las necesidades de la presente investigación.

Para observar el tejido parenquimatoso de la naranja se corta tangencialmente con una hoja de gillet un trozo lo más fino posible de epicarpio del fruto, luego se coloca el corte con la aguja histológica en el porta objeto. Posteriormente se agrega una gota de agua destilada y se cubre con el cubre objeto. La muestra es llevada a un microscopio donde se observa la estructura del tejido, se trabaja con un lente de 10X.

Para el tejido del mesocarpio se corta todo el epicarpio hasta llegar al mesocarpio del cual se saca una porción fina. Se coloca este tejido sobre el portaobjeto y se sigue el mismo procedimiento que para el epicarpio.

Después de realizar la observación de los tejidos del epicarpio y mesocarpio se determinó que solo el epicarpio contiene aceite esencial debido a que en su estructura cuenta con sacos o espacios lísienos que contiene al aceite esencial. En el capítulo III que corresponde a resultados y discusión se muestra las imágenes donde se ven estos espacios.

2.3. Caracterización de la materia prima

Para la extracción del aceite esencial se recolecta cáscara de naranja desechada por las señoras que venden jugo de naranja en sus carritos. Aprovechando la materia prima de bajo costo y que las maquinas (cuchillas) que usan para pelar la naranja corta el epicarpio con arrastre mínimo de mesocarpio, 2 mm de grosor, al realizar el pelado se pierde aceite esencial pero esta pérdida es mínima.

La cáscara de naranja a usar para la extracción de aceite esencial es de la variedad criolla, de color naranja, sabor amargo picante, textura externa rugosa al tacto. De cada naranja pelada a 2 mm de grosor se obtiene un promedio de 16.23 g de cáscara.

Se realiza un análisis fisicoquímico de la cáscara en el Centro de Análisis Investigación y Desarrollo (CEANID), para determinar sus propiedades fisicoquímicas más importantes.

2.4. Pruebas preliminares

Se realizaron dos pruebas preliminares para familiarizarse con el equipo de extracción y determinar cómo afecta al rendimiento la extracción con epicarpio puro o epicarpio con rastros de mesocarpio.

Porque para separar el epicarpio de mesocarpio en su totalidad, se debe pelar la naranja lo más fino posible pero esto rompe los sacos del epicarpio que contiene el aceite esencial haciendo que el aceite se libere y se desperdicie.

2.4.1. Extracción con epicarpio

Se picó en una licuadora 600 g de epicarpio para disminuir el tamaño de partícula y aumentar el área de contacto con el vapor de agua. Se cargó el epicarpio al tanque extractor y se realizó la extracción durante 3 horas de la cual se obtuvo 1.5 ml de aceite esencial.

2.4.2. Extracción con epicarpio y rastros de mesocarpio

Se utilizó cáscara de naranja tratando de eliminar todo el mesocarpio posible sin dañar o cortar el epicarpio para evitar que el aceite se pierda al realizar el pelado.

Se pesó 600 g, se picó en una licuadora y se cargó al tanque extractor, se realizó la extracción durante 2 horas y se recogió 12.5 ml de aceite esencial.

Por lo que se optó utilizar epicarpio con una capa fina de mesocarpio para evitar pérdidas de aceite esencial al pelar la naranja y obtener un buen rendimiento.

2.5. Diseño Factorial

El diseño factorial constituye la estructura de cualquier trabajo científico. Brinda dirección y sistematiza la investigación, Los diseños factoriales son ampliamente

utilizados en experimentos en los que intervienen varios factores (variables) para estudiar el efecto conjunto de estos sobre una respuesta.

Los experimentos factoriales permiten manipulaciones sutiles de un número mayor de factores o variables interdependientes. Si bien el método presenta limitaciones, es útil para una investigación más eficiente y para permitir que los métodos estadísticos fuertes expongan todas las correlaciones. (Shuttleworth, 2009)

2.5.1. Conceptos básicos del diseño factorial

Factores. Son los fenómenos que potencialmente causan variación, y que son controlados por el experimentador, se denominan factores o variables.

Niveles de un factor. Son los valores que toman un factor o variable. En general toman valores que se miden en escala categórica, aunque a veces suelen ser medidos en escalas numéricas.

Combinación de Tratamientos. Es cada una de las combinaciones de niveles de todos los factores involucrados en el experimento.

Respuesta. Es la respuesta que se mide como resultado de la experimentación, no es controlada por el experimentador. Es una variable medida en escala numérica.

2.5.2. Clasificación del diseño factorial por criterio

Según la cantidad de niveles o valores por factor, el diseño factorial se clasifica en diseño factorial con cantidad de valores constantes o variables.

La notación del diseño es más sencilla cuando la cantidad de niveles por factores es igual. Así, el diseño factorial de dos factores a dos niveles se representa por 2^2 , el de tres factores a dos niveles por 2^3 , etc. En términos generales, los diseños a dos niveles y con k factores se representan por 2^k ; a tres niveles, por 3^k ; a cuatro niveles por 4^k , etc. Si el diseño factorial es completo, se realizan todas las posibles combinaciones entre los valores de las variables. Así, cada combinación de tratamiento determina un grupo experimental (grupo de tratamiento o casilla). Por ejemplo, el diseño factorial

completo 2x2 determina cuatro grupos de tratamiento; un diseño 3x3 nueve grupos, etc. (Quecaña, E., 2012)

2.5.3. Diseño factorial para la extracción del aceite esencial de la cáscara de naranja por arrastre de vapor.

Factores o variables consideradas

- **Cantidad de materia (cáscara)**

La cantidad de materia en la torre de extracción, influye en la cantidad de energía necesaria para calentar la materia vegetal y lograr así la extracción del aceite, logrando de esta manera el desprendimiento de los aceites esenciales y su incorporación a la corriente de vapor de agua.

- **Tamaño de partícula**

El vapor debe ejercer su acción extractora en el mayor número posible de partículas. Por ello se debe tomar en cuenta el tamaño de partícula, por cuanto más pequeño es su tamaño, mayor es la superficie expuesta y habrá más contacto vapor líquido, con el consiguiente aumento en la extracción del aceite.

Variables respuesta

- **Volumen**

La cantidad de aceite esencial que se obtiene en ml.

El tiempo es la variable independiente a través de la cual se realizarán las evaluaciones para determinar el rendimiento, el cual está asociado al tamaño y cantidad de materia que sea tratada para la extracción.

2.5.3.1. Determinación Niveles del proceso de extracción del aceite esencial de la cáscara naranja

Para el diseño factorial se tomará 3 niveles y dos variables por lo que tendremos un diseño de 3^2 , es decir que se realizará 9 experimentos.

Para mejorar los resultados se hará dos repeticiones con lo que se tendrá un total de 18 experimentos.

2.5.3.1.1. Niveles de la variable tamaño de partícula

Para determinar los tres niveles de la variable tamaño de partícula se realiza un análisis granulométrico por tamizado a la masa molida de cáscara de naranja.

Para el análisis granulométrico se hace uso de un tamiz vibratorio de norma española, que cuenta con un juego de tamices de 5; 4; 2; 1; 0.5; 0,25; 0,063 mm y una bandeja receptora.

Figura 2-2 Tamiz vibratorio de norma española



Fuente: Elaboración propia, 2016

El procedimiento es el siguiente:

- Picar con una licuadora la cáscara de naranja hasta conseguir 300 g de cáscara picada.
- Pesar cada tamiz y la bandeja receptora.
- Cargar la muestra al tamiz superior y colocar la tapa y asegurar el tamiz.
- Encender el tamiz vibratorio colocando la perilla de velocidad a 60 rpm y la de tiempo en 10 minutos.

- Al detenerse el tamiz después del tiempo seleccionado, separar los tamices y pesar, registrando los datos obtenidos.

Para determinar el tamaño de partícula a usar se selecciona los que tienen mayor rechazo.

De acuerdo a los resultados obtenidos del análisis granulométrico se establece que los tres niveles de tamaño de partícula son: 5 mm, 4-3 mm y 2 mm.

2.5.3.1.2. Niveles para la cantidad de materia

Para la determinación de cantidad de materia se ve conveniente trabajar con 600, 450 y 300 g, para poder tener un buen empaquetamiento y permitir que el vapor se distribuya uniformemente y haya mayor área de contacto

2.5.3.1.3. Combinaciones del diseño factorial

En la tabla II-1 se muestra los niveles del diseño factorial, mínimo que se representa con (-1), medio con (0) y máximo con (+). En la tabla II-2 se hace una combinación de estos niveles. La variable respuesta se expresa con Y_{ijk} donde i toma valores, de 1 cuando la variable masa está en el nivel mínimo, 2 cuando está en el nivel medio y 3 cuando está en el máximo, lo mismo pasa con j que representa los niveles de la variable tamaño, y k define el número de repetición 1 cuando es la primera repetición y 2 cuando es la segunda.

Tabla II-1 Niveles de las variables para la extracción del aceite esencial de naranja

Nº	Nivel	MASA (g)	TAMAÑO (mm)
1	Mínimo (-1)	300	2
2	Medio (0)	450	4-3
3	Máximo (+1)	600	5

FUENTE: Elaboración propia, 2016

Tabla II-2 Diseño factorial para el proceso de extracción de aceite esencial de naranja

N° Experimento	Variables		Respuesta (ml)
	Masa (g)	Tamaño (mm)	
1	-1	-1	Y ₁₁₁
2	0	-1	Y ₂₁₁
3	+1	-1	Y ₃₁₁
4	-1	0	Y ₁₂₁
5	0	0	Y ₂₂₁
6	+1	0	Y ₃₂₁
7	-1	+1	Y ₁₃₁
8	0	+1	Y ₂₃₁
9	+1	+1	Y ₃₃₁
10	-1	-1	Y ₁₁₂
11	0	-1	Y ₂₁₂
12	+1	-1	Y ₃₁₂
13	-1	0	Y ₁₂₂
14	0	0	Y ₂₂₂
15	+1	0	Y ₃₂₂
16	-1	+1	Y ₁₃₂
17	0	+1	Y ₂₃₂
18	+1	+1	Y ₃₃₂

FUENTE: Elaboración propia, 2016

La ecuación genérica para este el diseño factorial es:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

$$i = 1,2, \dots, a \quad j = 1,2, \dots, b \quad k = 1,2, \dots, n$$

Donde:

μ Es la media general

α_i Es el efecto del i-ésimo nivel del factor A (variable Masa).

β_j Es el efecto del j-ésimo nivel del factor B (variable Tamaño).

$(\alpha\beta)_{ij}$ Representa el efecto de interacción en la combinación ij

ε_{ijk} Es el error aleatorio

Con esta ecuación se puede estudiar todos los efectos de los niveles de los factores y su interacción. Y la ecuación se puede expresar para las combinaciones de todos los niveles de la siguiente forma:

Factor A																			
Factor B		-1	0		1		-1	0		1		-1	0		1		-1	0	1
	-1	Y_{111}	Y_{211}	Y_{311}	=	-1	μ	μ	μ	+	-1	α_1	α_2	α_3	+	-1	β_1	β_1	β_1
	0	Y_{121}	Y_{221}	Y_{321}		0	μ	μ	μ		0	α_1	α_2	α_3		0	β_2	β_2	β_2
	1	Y_{131}	Y_{231}	Y_{331}		1	μ	μ	μ		1	α_1	α_2	α_3		1	β_3	β_3	β_3

+		-1	0	1	+		-1	0	1
	-1	$(\alpha\beta)_{11}$	$(\alpha\beta)_{21}$	$(\alpha\beta)_{31}$		-1	ϵ_{111}	ϵ_{211}	ϵ_{311}
	0	$(\alpha\beta)_{12}$	$(\alpha\beta)_{22}$	$(\alpha\beta)_{32}$		0	ϵ_{121}	ϵ_{221}	ϵ_{321}
	1	$(\alpha\beta)_{13}$	$(\alpha\beta)_{23}$	$(\alpha\beta)_{33}$		1	ϵ_{131}	ϵ_{231}	ϵ_{331}

Las hipótesis que se desean probar con esta ecuación son:

Hipótesis nula

$H_0: \alpha_i = 0$ (no hay efecto significativo del factor A sobre la variable de respuesta).

$H_0: \beta_j = 0$ (no hay efecto del factor B sobre la variable de respuesta)

$H_0: (\alpha\beta)_{ij} = 0$ (no hay efecto de interacción de los factores A y B sobre la variable de respuesta).

Hipótesis experimental

$H_1: \alpha_i \neq 0$ (sí hay efecto significativo del factor A sobre la variable de respuesta).

$H_1: \beta_j \neq 0$ (sí hay efecto del factor B sobre la variable de respuesta)

$H_1: (\alpha\beta)_{ij} \neq 0$ (sí hay efecto de interacción de los factores A y B sobre la variable de respuesta).

Resolviendo la matriz de combinaciones se encuentra una ecuación de regresión que estudia todos los efectos del diseño factorial en una sola expresión.

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_3 \text{Factor A} + \beta_3 \text{Factor B} + (\alpha\beta)_{33} \text{Factor A} * \text{Factor B} + \epsilon_{ijk}$$

Donde:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 Y_{ij}}{9}$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{9} (Y_{11} + Y_{21} + Y_{13}) - (Y_{31} + Y_{32} + Y_{33}) - (Y_{21} + Y_{22} + Y_{23})$$

$$\beta_3 = \frac{1}{9} (Y_{11} + Y_{21} + Y_{13}) - (Y_{31} + Y_{32} + Y_{33}) - (Y_{21} + Y_{22} + Y_{23})$$

$$(\alpha\beta)_{33} = Y_{33} - (\mu + \alpha_3 + \beta_3)$$

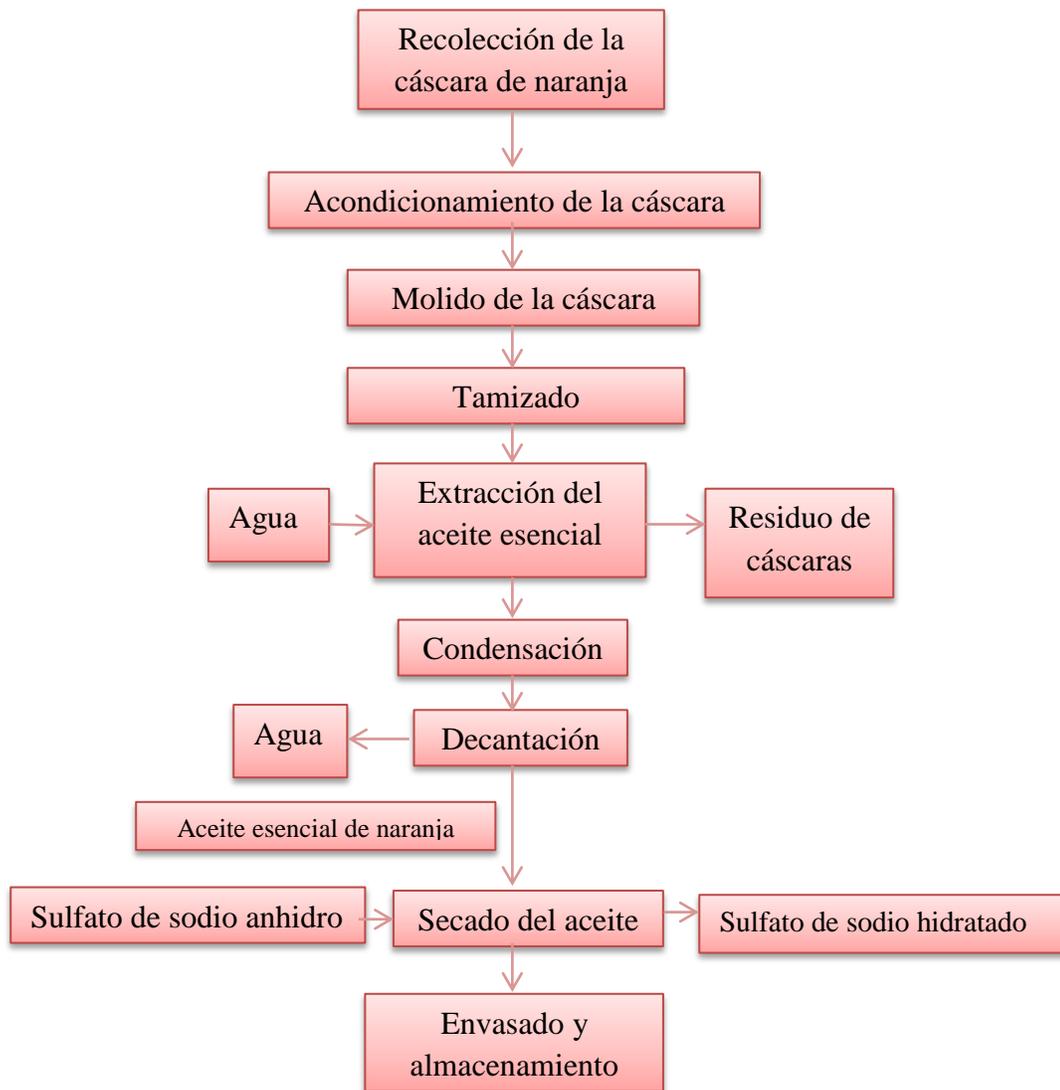
Los coeficientes de la ecuación de regresión se encuentran realizando un análisis estadístico del diseño factorial con el programa estadístico SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) para Windows. Los resultados de este análisis se muestran en el capítulo III que corresponde a resultados y discusiones.

2.6. Extracción del aceite esencial de cáscara de naranja

Una vez determinadas las variables de operación se procede a extraer el aceite esencial de acuerdo al diseño experimental planteado.

Para la extracción del aceite esencial de cáscara de naranja, en la figura 2-3 se ve las etapas a seguir, y a continuación se describe cada una de ellas.

Figura 2-3 Diagrama de flujo. Extracción del aceite esencial de cáscara de naranja por el método de arrastre de vapor



Fuente: Elaboración propia, 2016

2.6.1. Recolección de la materia prima

Para la extracción del aceite esencial se emplea cáscara de naranja fresca y con la finalidad de tener una materia prima homogénea y de la variedad criolla se realizó la recolecta únicamente de una señora que vende jugos de naranja. La naranja que utiliza para la producción de jugos es de la variedad Criolla producida en el departamento de Tarija, en la región de la Corporación.

La cáscara se almacena en bolsas nylon, para evitar que el sol la seque y dañe el aceite esencial. Luego es refrigerada hasta realizar su acondicionamiento para la extracción del aceite.

Figura 2-4 Recolección de la cáscara de naranja



Fuente: Elaboración propia, 2016

2.6.2. Acondicionamiento de la cáscara

Se separa las cáscaras que estén podridas, tengan puntos negros, estén muy delgadas y que no sean de naranja, para ser desechadas por defectos.

Las cáscaras que están aptas para la extracción son lavadas dos veces solo con agua, las cáscara se sacan del agua y se sacuden varias veces para eliminar el agua que arrastran y se trasladan a una fuente seca.

Al realizar el lavado se tiene una pérdida mínima de aceite esencial ya que al realizar el pelado se deja sacos abiertos que hacen contacto con el agua.

2.6.3. Molido de la cáscara

Para la molienda de las cáscaras se utilizó una licuadora de marca PREMIER, modelo ED-3317GL de cuatro velocidades. El proceso de molienda es el siguiente:

- Se llena la jarra con cáscara hasta la cuarta parte de su volumen y se tapa, como se ve en la figura 2-5.
- Se da inicio a la molienda presionando el botón de la primera velocidad durante 15 segundos, para disminuir el tamaño de las cáscaras y no forzar el motor de la licuadora.
- Una vez pasado este tiempo se presiona el botón de la tercera velocidad para mejorar la molienda, el tiempo de licuado en esta velocidad varía de acuerdo al mayor porcentaje de tamaño de partícula que se quiera obtener según el número de experimento que se esté realizando. Para las partículas de 5 mm se deja 10 segundos, para la de 4 mm se deja 30 segundos y para la de 2 mm se deja 1 minuto.
- La molienda se realiza hasta completar la cantidad de materia prima requerida.

Figura 2-5 Licuadora para el molido de la cáscara



Fuente: Elaboración propia, 2016

2.6.4. Tamizado

El tamizado se realiza en un tamiz vibratorio de norma española que cuenta con un juego de tamices de 5; 4; 2; 1; 0,5, 0,25; 0,063 mm y una bandeja receptora con el objetivo de separar el tamaño de partícula a usar para el experimento de las demás partículas que no son requeridas presentes en el material molido. El proceso se realiza de la siguiente manera:

- Pesar 300 g de cáscara molida.
- Cargar el tamiz superior con la materia prima pesada y asegurar el tamiz.
- Encender el tamiz vibratorio colocando la perilla de velocidad a 60 rpm y la de tiempo en 10 minutos.
- Pasado el tiempo indicado se saca el seguro y se selecciona el tamiz que contenga la partícula del tamaño requerido ya sea de 5, 4-3, 2 mm.
- Pesar en una bandeja la cáscara del tamaño requerido.
- Realizar el tamizado hasta completar la cantidad requerida de materia prima ya sea 600, 450, 300 g.

Figura 2-6 Cargado del tamiz vibratorio

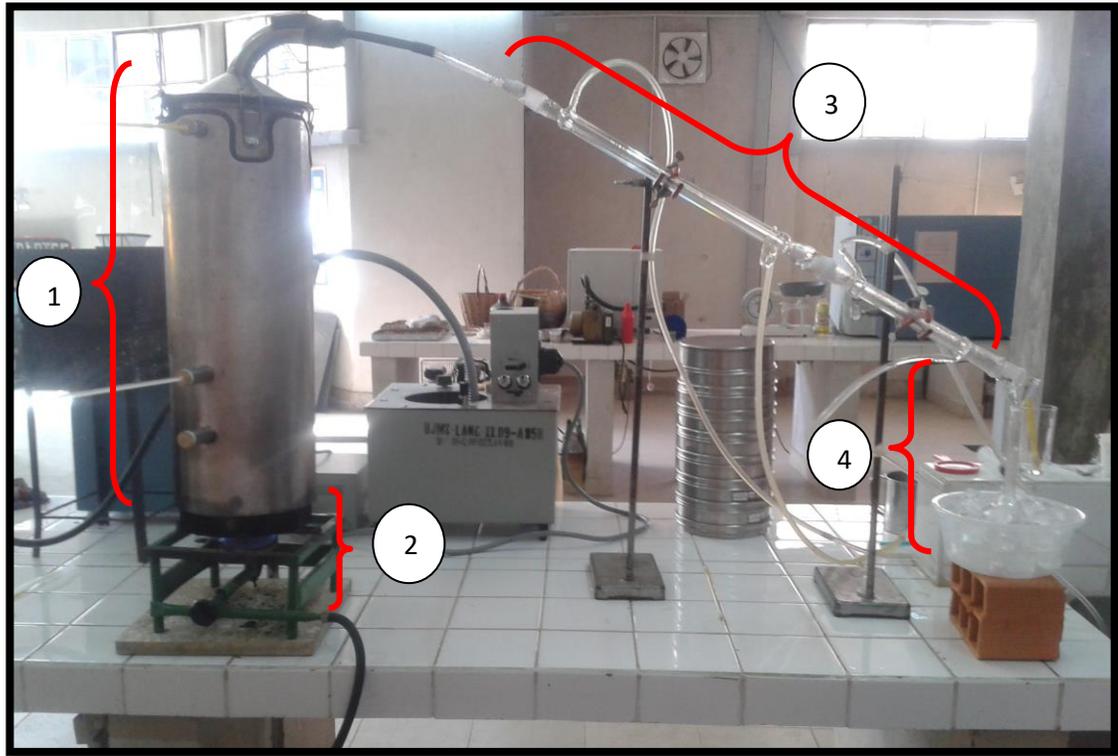


Fuente: elaboración propia, 2016

2.6.5. Extracción del aceite esencial

La extracción del aceite esencial de cáscara de naranja se realiza en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la carrera de ingeniería química, El método que se utiliza es el de arrastre por vapor o también llamado agua-vapor; en la figura 2-7 se muestra la estructura del equipo y sus componentes.

Figura 2-7 Equipo de extracción por arrastre de vapor



1. Torre o alambique de extracción, 2. Fuente generada de energía, 3. Sistema de condensación, 4. Recolector de condensado.

Fuente: Elaboración propia, 2016

2.6.5.1. Torre de extracción

Es de acero inoxidable recubierta con una capa intermedia de lana de vidrio y una capa externa de calamina aluminizada para evitar las pérdidas de calor hacia el ambiente. Tiene una tapa que se sujeta a la torre de una bisagra y tres seguros a presión para ajustarla y evitar fugas; en el cuerpo de la torre hay tres entradas dos de ellas son para introducir termómetros y poder medir la temperatura del vapor en la parte inferior y en la superior der la torre, la última es para introducir agua si es que se agota el nivel agua. También cuenta con un tubo de vidrio para poder medir el nivel de agua.

Para cargar la materia prima en la torre, se tienen tres fuentes de acero inoxidable con orificios en sus bases para permitir el paso del vapor, las fuentes se acomodan una sobre de otra, la primera fuente asienta su base en cuatro soportes ubicados a $\frac{1}{4}$ de la base de la torre, de modo que deje un espacio entre el nivel de agua y la base de la primera fuente.

Figura 2-8 Torre de extracción y fuentes de acero inoxidable



Fuente: Elaboración propia, 2016

2.6.5.2. Fuente generadora de energía

Para calentar el agua y generar el vapor de arrastre en el interior de la torre, se usa una cocina pequeña de una sola hornalla conectada de una garrafa de gas.

Figura 2-9 Cocina y garrafa de gas



Fuente: Elaboración propia, 2016

2.6.5.3. Condiciones de operación

Las condiciones de operación del equipo de extracción por arrastre de vapor o también llamado extracción agua-vapor, opera bajo las siguientes condiciones:

- **Presión**
El equipo de extracción trabaja a la presión atmosférica, ya que el sistema se encuentra abierto a la atmósfera.
- **Temperatura**
La torren de destilación trabaja con vapor de agua generado en su interior. Durante toda la etapa de extracción la temperatura del vapor se mantiene constante y se registra con los termómetros conectados a la torre de extracción. La temperatura de operación es la de temperatura de ebullición del agua en Tarija que va de 93°C.

- Potencia de la hornalla de la cocina

La potencia de la hornalla de calentamiento afecta al caudal de vapor en la torre, a mayor potencia mayor será el caudal del vapor en la torre y viceversa. Los mismos efectos tiene el caudal de vapor sobre el rendimiento de extracción del aceite esencial.

La hornalla tiene tres niveles: bajo, medio y alto. Al trabajar con el nivel bajo el rendimiento de extracción es mínimo por lo que queda descartado, con el nivel alto se tiene mayor caudal y por ende aumenta el rendimiento, pero el refrigerante no abastece para condensar todo el vapor generado provocando pérdidas y bajo rendimiento. Por tales efectos se trabaja con la potencia media de la hornalla de calentamiento.

- Volumen de agua cargada en la torre

En la primera prueba preliminar realizada se carga a la torre de extracción 4,5 litros de agua, la extracción se realiza durante 3 horas; al finalizar la extracción se mide el volumen de agua que sobra en la torre, siendo este volumen 1,7 litros, por lo tanto el volumen de carga de agua a la torre es de 4 litros.

- Masa a cargar en las fuentes de la torre

En el diseño factorial para la extracción del aceite esencial se planteó realizar los experimentos con 300; 450; 600 gramos, estas cantidades se dividen en tres partes iguales para cargar a cada fuente de la torre. Es decir si se trabaja con 300 gramos, se cargaran 100 gramos a cada fuente.

2.6.6. Condensación

Una vez que ebulle el agua dentro de la torre se inicia la etapa de extracción; la mezcla de vapores de agua y el aceite esencial sale de la torre a la temperatura de 93°C, Para condensarla se utiliza dos refrigerantes de vidrio recto, conectados entre sí, sujetos por dos pinzas de doble nuez a dos soportes universales.

El fluido refrigerante es agua por lo que se conecta los refrigerantes por medio de mangueras de plástico a la pileta de agua, como se ve en la figura 2-10.

La mezcla de vapor de agua y aceite esencial hace un intercambio de calor con la corriente de agua fría cambiando a la fase líquida.

Figura 2-10 Sistema de refrigeración



Fuente: Elaboración propia, 2016

2.6.7. Decantación

La mezcla condensada que sale del sistema de condensación se recibe en un matraz de 500 ml, debido a la diferencia de densidades y a que el aceite esencial es inmisible con el agua, la mezcla se va separando en dos fases, el aceite forma la capa superior y el agua la inferior. Para mejorar la separación de fases el matraz donde se recolecta la muestra se sumerge en un baño de hielo como se muestra en la figura 2-11. Con la finalidad de hacer un control del ml de aceite esencial extraído vs tiempo se retira el matraz y se coloca uno nuevo cada media hora.

Figura 2-11 Recolección y decantación de la mezcla condensada



Fuente: Elaboración propia, 2016

El aceite esencial obtenido se extrae del matraz con una jeringa de 5 ml, midiendo su volumen para calcular el rendimiento.

2.6.8. Secado del aceite esencial

Al extraer el aceite esencial con la jeringa, por más meticulosamente que se lo realice se arrastran diminutas gotas de agua, lo que afecta la pureza del aceite esencial por lo que es necesario eliminar el agua; para tal efecto se usa un desecante llamado sulfato de sodio anhidro.

El sulfato de sodio anhidro es una sal cuya fórmula química es Na_2SO_4 , es una sustancia incolora, cristalina con buena solubilidad en el agua y mala solubilidad en la mayoría de los disolventes orgánicos con excepción de la glicerina, por lo que se utiliza como desecante, (ver figura 2-12.)

Figura 2-12 Sulfato de sodio anhidro



Fuente: Elaboración propia, 2016

Para secar el aceite esencial, se añade sulfato de sodio anhidro en un vaso precipitado, agitando con una varilla de vidrio hasta saturar las moléculas de agua, obteniendo la formación de cristales de sulfato de sodio hidratado, luego dejar reposar 10 minutos, como muestra la figura 2-13.

Figura 2-13 Secado del aceite esencial de cáscara de naranja



Fuente: Elaboración propia, 2016

Para separar los cristales de sulfato de sodio hidratado del aceite esencial se filtra la mezcla con papel filtro y un embudo de vidrio en un matraz Erlenmeyer, (ver figura 2-14.)

Figura 2-14 Filtrado del aceite esencial de cáscara de naranja



Fuente: Elaboración propia, 2016

2.6.9. Envasado y almacenamiento

El aceite esencial de cáscara de naranja es muy volátil, sensible a la luz, al aire y al calor, al igual que los demás aceites esenciales, por lo que para su envasado se usa un frasco de vidrio oscuro color ámbar, y una tapa hermética a rosca, y etiquetado con su nombre. Se almacena en un lugar fresco y oscuro.

Figura 2-15 Envasado del aceite esencial de cáscara de naranja



Fuente: Elaboración propia, 2016

2.6.10. Procedimiento para la extracción

Para realizar la extracción del aceite esencial se sigue los siguientes pasos:

- Armar el equipo de extracción como se muestra en la figura 2-7.
- Llenar la torre con 4 litros de agua.
- Pesar y cargar la cáscara de naranja molida a cada fuente de acuerdo al experimento que se esté realizando.
- Introducir las fuentes cargadas a la torre de extracción.
- Tapar y colocar los termómetros a la torre
- Encender la hornalla en la potencia media y registrar la hora de inicio.
- Controlar la temperatura en el termómetro inferior de la torre y registrar la hora cuando esta llegue al punto de ebullición del agua, que significa el fin de la etapa de calentamiento y comienza la etapa de extracción.
- Hacer circular el agua por los refrigerantes.
- Quitar el matraz con condensado y colocar otro vacío cada media hora a partir del inicio de la etapa de extracción hasta el final de la extracción.
- Separar el aceite esencial del agua y medir los ml de aceite y de agua recogidos cada media hora.
- Secar el aceite esencial con sulfato de sodio anhidro
- Envasar y almacenar el aceite esencial.

2.7. Caracterización del aceite esencial de cáscara de naranja

Para la caracterización del aceite esencial de cáscara de naranja se hace un análisis de sus propiedades fisicoquímicas, determinando su densidad, índice de refracción, pH, y composición química.

La determinación de los parámetros densidad, pH e índice de refracción del aceite esencial se realiza en el Centro de Análisis Investigación y Desarrollo (CEANID).

El análisis de composición química del aceite esencial se realiza en el Centro de Investigaciones Químicas (C.I.Q.), del departamento de Cochabamba. Para que realicen el análisis se envía 10 ml de muestra de aceite, en un frasco de vidrio color ámbar, herméticamente cerrado. El método utilizado para determinar la composición química es el de cromatografía acoplada a espectrometría de masa GC/MS.

2.8. Balance de materia y energía

En el proceso de extracción del aceite esencial de cáscara de naranja, es necesario realizar un balance de materia y energía para poder contabilizar los flujos de materia y energía, con la finalidad de tener conocimiento de los caudales máxicos de todas las corrientes que intervienen en el proceso de extracción como así las necesidades energéticas del mismo.

Durante el proceso de extracción de los 18 experimentos planteados en el diseño factorial se registraron una serie de datos que nos servirán para realizar el balance de materia y energía. Pero se utilizará solo los datos del experimento en el que se obtuvo mayor rendimiento de aceite esencial, con el fin de tener resultados óptimos.

El experimento de mayor rendimiento es el de 24.5 ml de aceite esencial obtenidos con 600 g de cáscara de naranja molida de 2 mm de diámetro.

Tabla II-3 Datos de la extracción de aceite esencial con mayor rendimiento

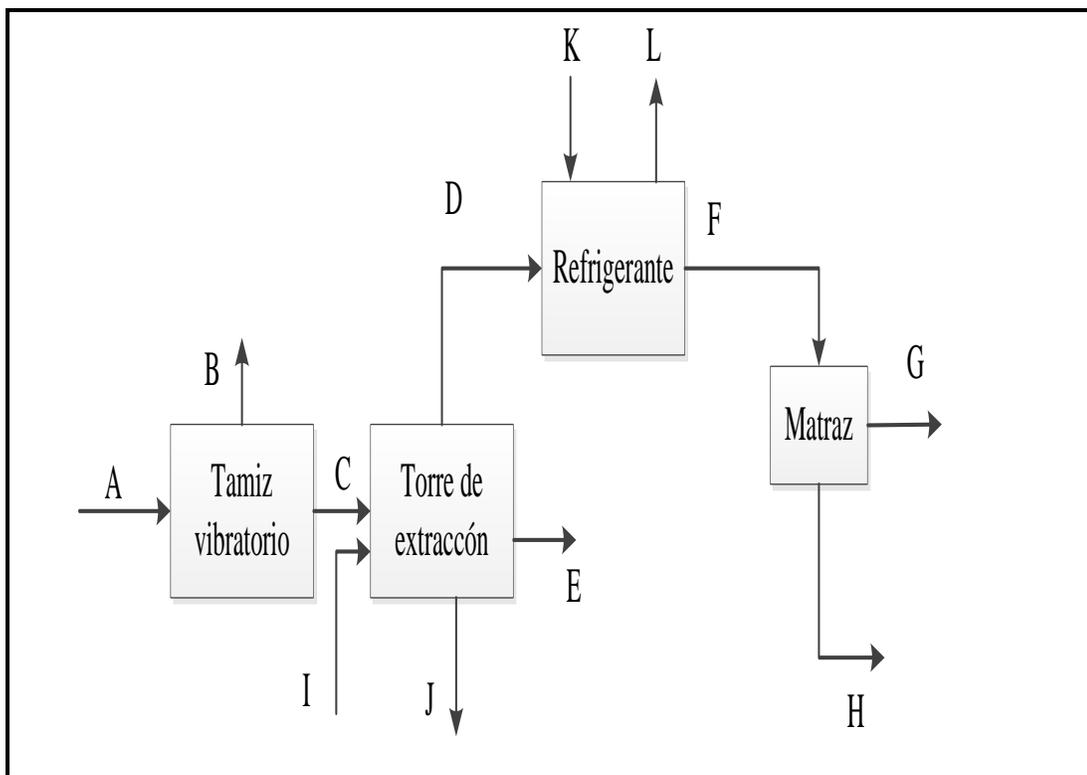
Datos registrados en la torre de extracción		
Masa de agua cargada a la torre	4.000	g
Masa de cáscara cargada a la torre	600	g
Masa de residuos de cáscara	681,33	g
Masa de agua no evaporada	1195	g
Temperatura inicial del agua en la torre (T_o)	13	°C
Temperatura del vapor en la torre (T_v)	93	°C
Datos registrados en el condensador		
Flujo másico de agua de refrigeración (f_1)	73,6	g/s
Masa de agua condensada	2.721,68	g
Masa de aceite esencial obtenido	20,75	g
Temperatura del condensado (T_{Con})	36	°C
Temperatura de entrada del agua de refrigeración ($T_{entrada}$)	13	°C
Temperatura de salida del agua de refrigeración (T_{salida})	15	°C
Datos registrados de los equipos		
Rendimiento del rechazo para partículas de 2mm (η_t)	67,57	%
Tiempo de acondicionamiento (t_c)	35	min
Tiempo de extracción (t_e)	180	min

Fuente: Elaboración propia, 2016

2.8.1. Balance de materia

El balance de materia del proceso de extracción se realiza para poder determinar el valor de las corrientes que no se conocen, la cantidad total de agua que se queda en la torre, el flujo másico de vapor que nos servirá para realizar el balance de energía. En la figura 2-16 presenta un diagrama de bloques del proceso, el que ayudará a identificar y calcular los valores para cada corriente.

Figura 2-16 Diagrama de bloques de proceso de extracción del aceite esencial de cáscara de naranja



Fuente: Elaboración propia, 2016

Con el diagrama de bloque se identifica las corrientes que intervienen en el proceso y se las describe en la tabla II-4.

Tabla II- 4 Corrientes del proceso de extracción de aceite esencial de cáscara de naranja

Corrientes del proceso	
Corriente	Nombre
A	Cáscara de naranja molida
B	Rechazos de cáscara no requeridos
C	Cáscara cargada a la torre
D	Mescla de vapores
E	Residuos de cáscara
F	mezcla de condensados
G	Masa de aceite esencial obtenido
H	Agua condensada
I	Agua cargada a la torre
J	Agua no evaporada
K	Agua de refrigeración que entra
L	Agua de refrigeración que sale

Fuente: Elaboración propia, 2016

Tabla II- 5 Corrientes a calcular

Corrientes a calcular	
Corriente	Nombre
A	Cáscara de naranja molida
B	Rechazos no requeridos
F	Mezcla de condensado
D	Mezcla de vapores
K	Agua de refrigeración
$M_{\text{agua residuos}}$	Agua que queda en los residuos
$M_{\text{total en la torre}}$	Agua que queda en la torre
$M_{\text{vapor generado}}$	Masa de vapor generado en la torre
F_{vapor}	Flujo másico de vapor

Fuente: Elaboración propia, 2016

2.8.2. Balance de energía

Se realiza un balance de energía en la torre de destilación y en el sistema de refrigeración, para poder determinar cuánto de energía se requiere para la extracción del aceite esencial, cuánto de calor intercambia los vapores y el agua de refrigeración y cuánto de gas natural se gasta. En los cálculos se desprecia la pérdida de calor hacia el exterior.

2.8.2.1. Balance de energía en la torre de extracción

En la torre de extracción se presentan dos tipos de calores, el calor sensible que es el encargado de calentar el agua hasta el punto de ebullición y el calor latente que es el que se requiere para evaporar el agua. La energía requerida es la suma de estos calores.

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{Sensible}} + Q_{\text{Latente}} \quad (\text{Ec. 2-2})$$

Para el cálculo del calor sensible se usan datos de la tabla II-3, y el calor latente se calcula multiplicando la potencia de la hornalla con el tiempo de extracción; la potencia de la hornalla se calcula dividiendo el calor sensible entre el tiempo de acondicionamiento, dato que se encuentra en la tabla II-3.

Los cálculos se presentan en el capítulo III resultados y discusiones.

2.8.2.2. Balance de energía en el sistema de refrigeración

En el sistema de refrigeración hay transferencia de calor, desde la mezcla de vapores hacia el agua de refrigeración, es decir, hay calor cedido y calor recibido.

Para calcular el calor cedido es necesario el dato del calor de vaporización del agua a 93°C; para obtener este dato se divide el calor latente calculado en el balance de energía de la torre entre la masa de vapor generada en la torre. Los dos calores se calculan utilizan datos de la tabla II-3.

2.8.2.3. Gas consumido

Para el cálculo del gas consumido se multiplica la potencia de la hornalla por el tiempo que se utiliza el gas, luego se divide el resultado entre el poder calorífico del gas natural.

CAPÍTULO III
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Selección de la metería prima para la extracción del aceite esencial

Los resultados del estudio comparativo de las variedades de naranja de la temporada del mes de mayo y julio que se consumen en el departamento de Tarija se presentan en la tabla III-1.

Tabla III - 1 Resultados del estudio comparativo de las variedades de naranja

Parámetros	Variedad de naranja		
	Criolla	Jaffa	Valencia tempranera
Color	naranja	naranja claro	naranja oscuro
Textura	rugosa	rugosa	Lisa
Peso* (g)	234,6	189,393	154,846
Diámetro* (cm)	7,71	7,25	6,85
Peso sin cáscara* (g)	190,531	146,678	131,434
peso de la cáscara* (g)	48,23	32,71	28,843
Grosor de la cáscara * (mm)	4,5	3,16	2,76
Grosor del epicarpio*(mm)	1,5	1	0,88

* Valores promedio

Fuente: Elaboración propia, 2016

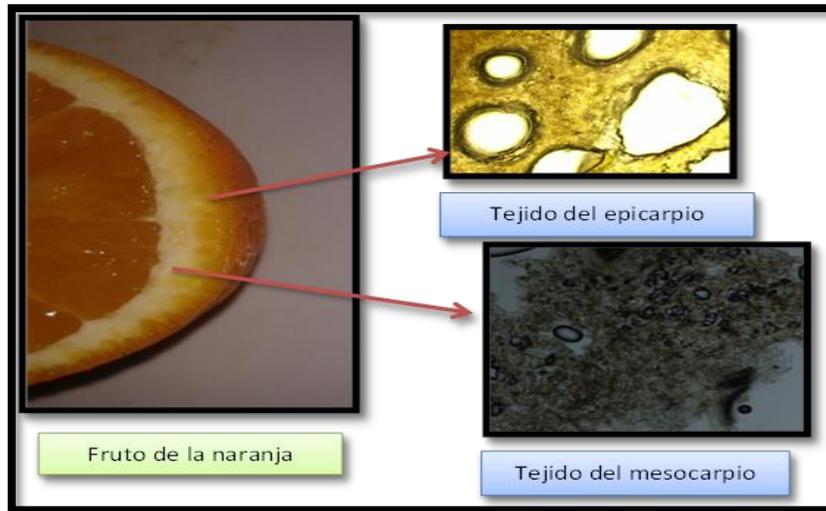
En la tabla se observa que la naranja de la variedad criolla tiene un diámetro promedio de 7,71 cm, un peso de 234,6 g y que de cada naranja se obtiene 48,23 g de cáscara con un grosor de 4,5 mm. La naranja de variedad jaffa tiene un diámetro promedio de 7,25 cm, un peso de 189,393 g y de cada naranja se obtiene 32,71 g de cáscara de un grosor de 3,16 mm. La naranja valencia tiene un diámetro promedio de 6,58 cm, un peso de 154,846 g y se obtiene 28,843 g de cáscara de 2,76 mm de grosor.

Comparando estos parámetros se determina que la naranja empleada para la extracción del aceite esencial, es la naranja de la variedad criolla, porque se estima que tiene más aceite esencial porque su cáscara es gruesa y es de mayor tamaño comparada con las otras variedades.

3.2. Morfología de la cáscara de naranja

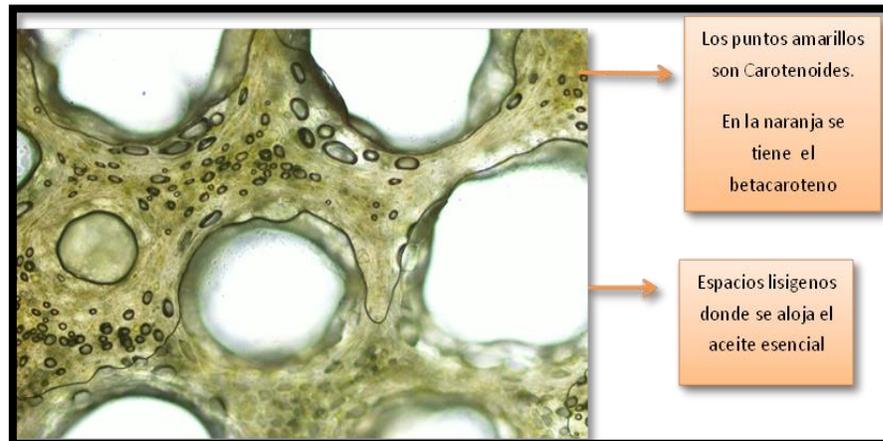
En la figura 3-1 se muestra los tejidos de la cáscara de naranja y en la figura 3-2 se muestra los espacios lisígenos del epicarpio.

Figura 3-1 Estructura de del epicarpio y mesocarpio de la naranja



Fuente: Elaboración propia, 2016

Figura 3-2 Espacios lisígenos del epicarpio



Fuente: Elaboración propia, 2016

En la figura 3-2 se muestra los espacios lisígenos o sacos del epicarpio en los que se aloja el aceite esencial; estos espacios se forman debido a la muerte de células en el epicarpio. También podemos observar que las partes amarillas son los carotenoides (colorantes), para poder extraer el aceite esencial es necesario romper los espacios lisígenos.

3.3. Caracterización de la materia prima

En la tabla III-2 se muestran los resultados del análisis fisicoquímico de la cáscara de naranja realizados por el Centro de Análisis Investigación y Desarrollo (CEANID).

Tabla III-2 Composición fisicoquímica de la cáscara de naranja

Composición fisicoquímica de la naranja criolla	
Parámetro	valor
Humedad%	70,87
Grasa%	0,5
Ceniza%	1,25
Proteína%	1,01
Carbohidratos%	21,89
Azúcares totales	8,92
Fibra	4,48

Fuente: Elaboración propia, 2016

En la tabla se puede observar las propiedades fisicoquímicas de la cáscara de la naranja criolla la cual tiene alto contenido de agua ya que la humedad es del 70 %, y un contenido bajo en grasa de 0,5 %, el total de cenizas de 1,25 %, los carbohidratos están presentes en un 21,89 %, la proteína en un 1,01 %, los azúcares totales presentes son del 8,92 % y la fibra en un 4,48 %.

3.4. Determinación de los niveles para la variable tamaño de partícula.

Los resultados del análisis granulométrico, realizado con el tamiz vibratorio de norma española se presentan en la tabla III-3.

Tabla III-3 Análisis granulométrico

Nº de Tamiz (mm)	Peso de tamiz (g)		Peso del rechazo (g)	% De Rechazo
	Vacío	Con rechazo		
5	494,20	543,76	49,56	16,52
4	456,19	485,64	29,46	9,82
2	435,30	529,38	94,08	31,36
1	434,43	540,72	106,29	35,43
0.5	444,70	465,31	20,62	6,87
0.25	418,25	418,25	0	0
0.63	390,07	390,07	0	0
Fuente	464,87	464,87	0	0
Masa cargada al tamiz vibratorio			300,00	

Fuente: Elaboración propia, 2016

En la tabla se observa los porcentaje de partículas rechazadas en los tamices, en el tamiz de 1mm se tiene 35,43 %, es decir partículas de 2 mm de diámetro; en el tamiz de 2 mm se tiene 31,36 %, que corresponde a partículas de 3 y 4 mm de diámetros; en el tamiz de 5 mm 16,52 % y en el de 4mm se tiene 9,82%. Para el diseño factorial se selecciona los tres tamaños de partículas con mayor porcentaje de rechazo en los tamices; en el caso de las partículas rechazadas por el tamiz de 5mm no se las toma en cuenta por que el tamaño de las partículas rechazadas por este tamiz no es uniforme por lo que se seleccionar el rechazo del tamiz de 4 mm (9,82 %), que corresponde a partículas de 5 mm.

3.5. Rendimiento de la extracción del aceite esencial de cáscara de naranja.

En la tabla III-4 se muestra los resultados de los experimentos realizados de acuerdo al diseño factorial.

Tabla III-4 Rendimiento de aceite esencial obtenido en los experimentos

N° Experimento	Variables		Respuesta	Rendimiento % (p/p)
	Masa (g)	Tamaño (mm)	volumen (ml)	
1	300	2	5,2	1,47
2	450	2	12,3	2,31
3	600	2	24,5	3,46
4	300	4-3	4,6	1,3
5	450	4-3	7,9	1,49
6	600	4-3	10,64	1,5
7	300	5	3,9	1,1
8	450	5	6,2	1,17
9	600	5	9,2	1,3
10	300	2	6,6	1,86
11	450	2	13,7	2,58
12	600	2	22,6	3,19
13	300	4-3	5,3	1,50
14	450	4-3	8,3	1,56
15	600	4-3	13,3	1,88
16	300	5	4	1,13
17	450	5	6,8	1,28
18	600	5	10	1,41

Fuente: Elaboración propia, 2016.

El rendimiento porcentual se calcula para cada experimento, multiplicando los ml de aceite esencial obtenidos con la densidad del aceite esencial, para convertir los ml a gramos; por último, los datos en gramos se dividen con la masa utilizada en cada experimento y se multiplica por 100.

En la tabla se puede ver que los rendimientos son mayores en los experimentos de 2 mm y se va obteniendo rendimientos bajos a medida que se aumenta el tamaño de partícula obteniendo rendimientos medios con las partículas de 4-3 mm y mínimo con las de 5 mm. También se observa que los rendimientos incrementan, para el mismo tamaño de partícula, a medida que se aumenta la cantidad de masa de cascara.

Se observa que los rendimientos más altos se obtienen en los experimentos realizados con las partículas de 2 mm y 600 g de cáscara, en la primera repetición se obtuvo 24,5 ml y en la segunda 22,6 ml.

3.5.1. Análisis estadísticos del diseño experimental

El análisis estadístico del diseño factorial se realiza con el programa estadístico SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) para Windows.

Con el análisis de varianza ANOVA se determina la influencia de las variables masa y tamaño de partícula sobre la variable respuesta rendimiento. Para el análisis se utiliza los datos de rendimientos obtenidos en la extracción del aceite esencial.

Tabla III -5 Datos para el cálculo del análisis de varianza

Nº Experimento	variables		Respuesta
	Masa (g)	tamaño (mm)	Volumen (ml)
1	-1	-1	5,2
2	0	-1	12,3
3	1	-1	24,5
4	-1	0	4,6
5	0	0	7,9
6	1	0	10,64
7	-1	1	3,9
8	0	1	6,2
9	1	1	9,2
10	-1	-1	6,6
11	0	-1	13,7
12	1	-1	22,6
13	-1	0	5,3
14	0	0	8,3
15	1	0	13,3
16	-1	1	4
17	0	1	6,8
18	1	1	10

Fuente: Elaboración propia, 2016

A continuación, en la tabla III-6, se muestran las variables del diseño experimental y el número de experiencias para cada variable registradas por el programa y realizadas en la parte experimental para el diseño 3^2 con dos repeticiones y un total de 18 experimentos.

Tabla III-6 Factores inter-sujetos

		N
Masa	-1	6
	0	6
	1	6
Tamaño	-1	6
	0	6
	1	6

Fuente: Elaboración propia, 2016

En la tabla III-7 se detalla el análisis de varianza, para probar la significancia estadística de cada factor sobre el rendimiento.

Tabla III-7 Análisis de varianza ANOVA

Variable dependiente: Volumen

Origen	Suma de cuadrados tipo III	df	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	581,291 ^a	8	72,661	79,363	0,000
Intersección	1701,389	1	1701,389	1858,313	0,000
Masa	308,484	2	154,242	168,468	0,000
Tamaño	184,614	2	92,307	100,821	0,000
Masa * Tamaño	88,192	4	22,048	24,082	0,000
Error	8,240	9	0,916		
Total	2290,920	18			
Total corregida	589,531	17			

a. R cuadrado =0,986 (R cuadrado corregido= 0,974)

Fuente: Elaboración propia, 2016

En el análisis de varianza, un nivel de significancia menor a 0,05 expresa que la variable influye en la variable respuesta. En la tabla III-7 las variables Masa y Tamaño y sus interacciones Masa*tamaño son significativas porque tienen un 0 en la significancia para un nivel de confianza del 95 %.

Cuando los factores son significativos se procede al cálculo del modelo matemático que mejor represente la experiencia realizada, para ello se hace una regresión lineal y se introducen las variables significativas y la interacción entre estas, y el programa calcula los coeficientes para el modelo matemático presentes en la tabla III-8.

Tabla III-8 Coeficientes

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	Intervalo de confianza para B al 95,0%		
	B	Error tip.	Beta			Límite inferior	Límite superior	
1	(Constantes)	9,722	0,419		23,202	0,000	8,823	10,621
	Masa	5,050	0,513	0,720	9,840	0,000	3,949	6,151
	Tamaño	-3,733	0,513	-0,533	-7,275	0,000	-4,834	-2,633
	Masa*Tamaño	-3,000	0,629	-0,349	-4,773	0,000	-4,348	-1,652

a. Variable dependiente: Rendimiento

Fuente: Elaboración propia, 2016

De la tabla se sabe que el modelo matemático es el siguiente:

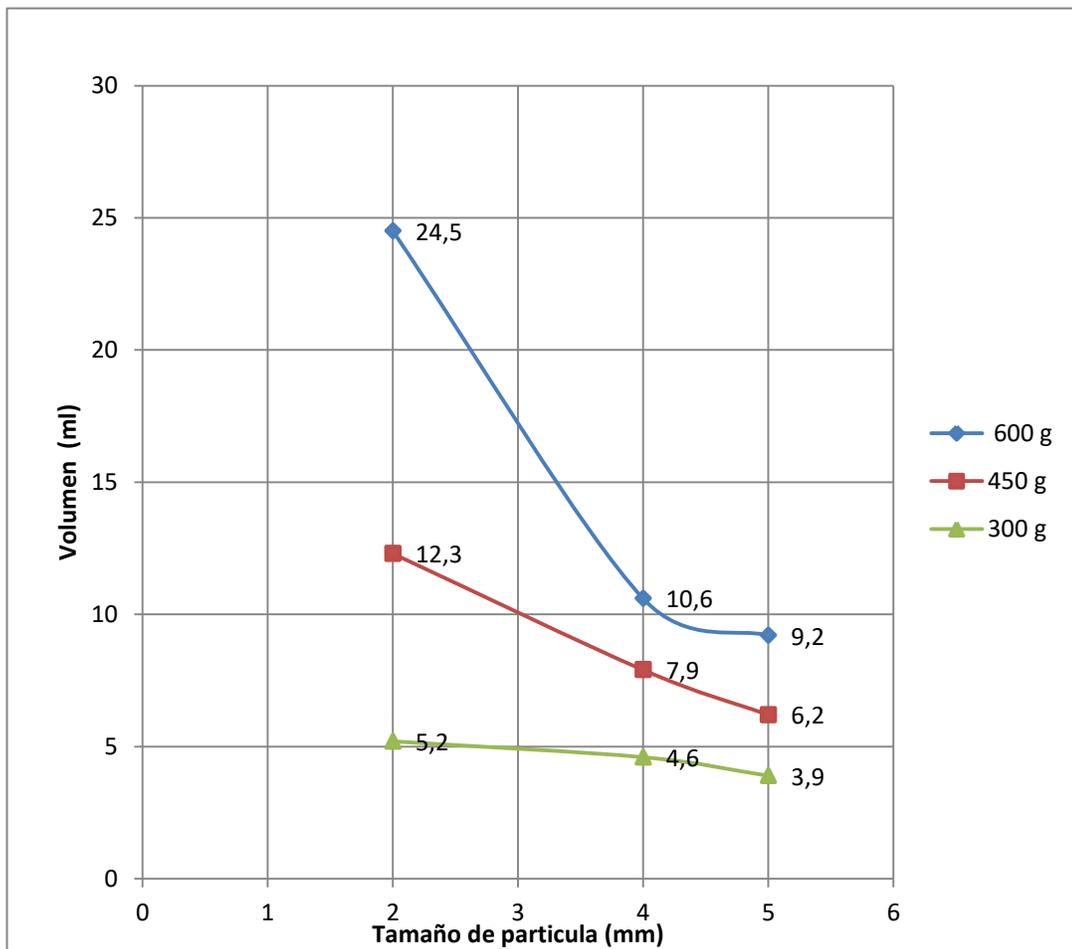
$$R = 9,722 + 5,050Masa - 3,733Tamaño - 3,000MasaTamaño$$

Este modelo matemático nos sirve para poder determinar las interacciones significativas de las variables masa y tamaño para la extracción del aceite esencial de cáscara de naranja.

3.5.2. Variación del volumen de aceite esencial con el tamaño de partícula

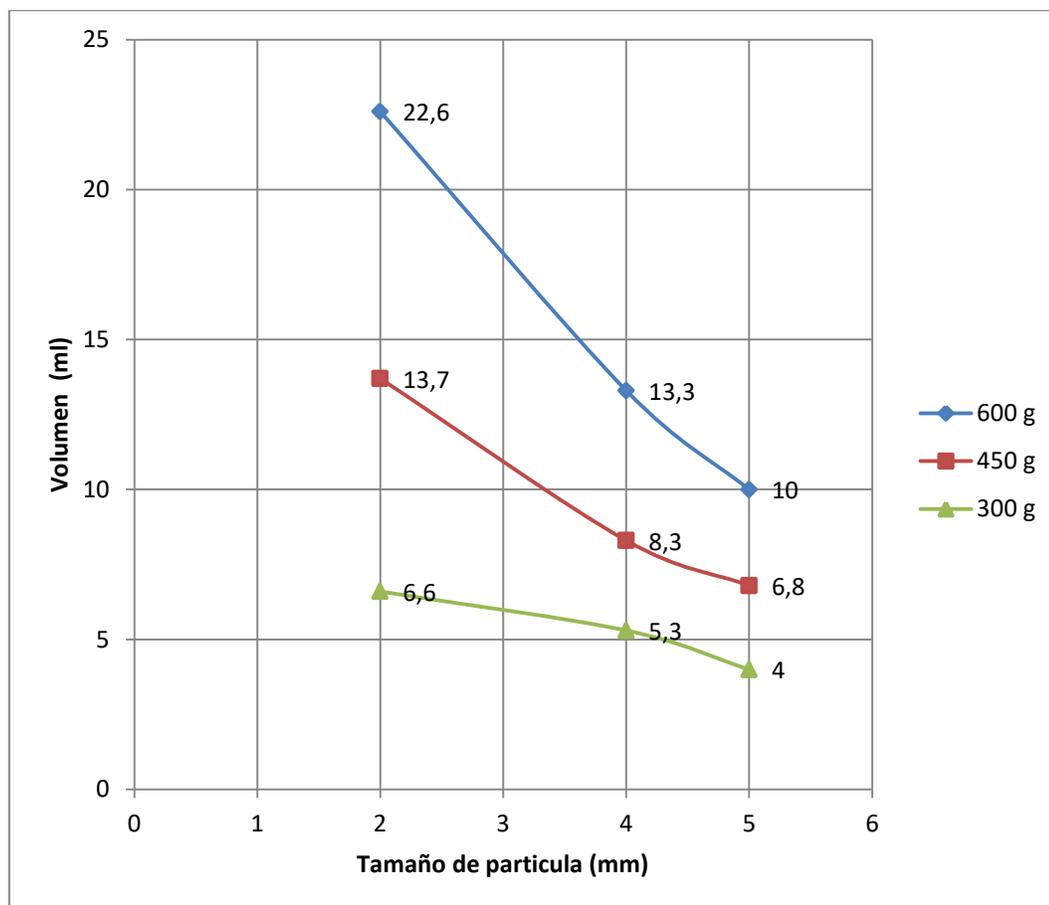
El volumen de extracción del aceite esencial varía de acuerdo al tamaño de partícula; en las figuras 3-3 y 3-4 se muestra la variación para cada repetición del diseño factorial.

Figura 3-3 Variación del volumen de aceite obtenido con el tamaño de partícula para la primera repetición



Fuente: elaboración propia, 2016

Figura 3-4 Variación del volumen de aceite obtenido con el tamaño de partícula para la segunda repetición



Fuente: Elaboración propia, 2016

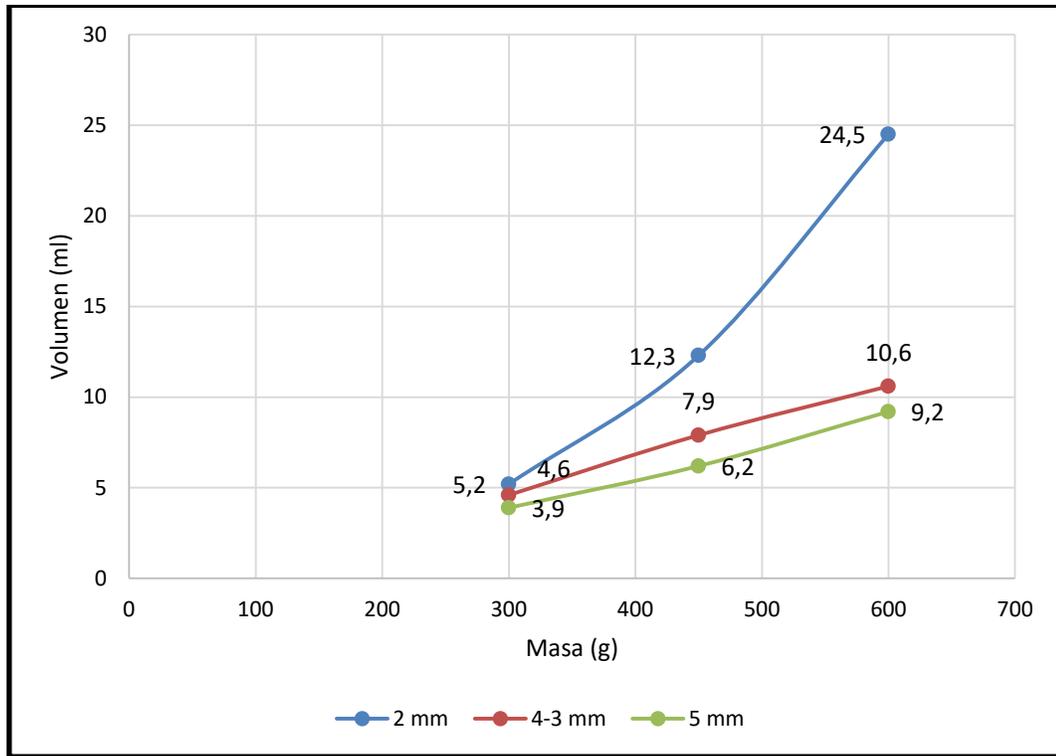
En las dos figuras se observa que las curvas tienen menor pendiente a medida que la partícula incrementa en tamaño; el volumen de aceite esencial obtenido aumenta cuando se reduce el tamaño de partícula.

Esto se debe a que con partículas más pequeñas se libera más aceite esencial que está contenido en los sacos o espacios lisígenos, pues al reducir el tamaño el vapor de agua puede llegar a solubilizar más fácilmente al aceite esencial, pues se tiene una mayor superficie libre expuesta, de manera que es más fácil que se rompan los sacos capilares que contienen al aceite y este se solubilice en el vapor de agua y se evapore junto a este.

3.5.3. Variación del volumen de aceite obtenido con la masa de materia prima

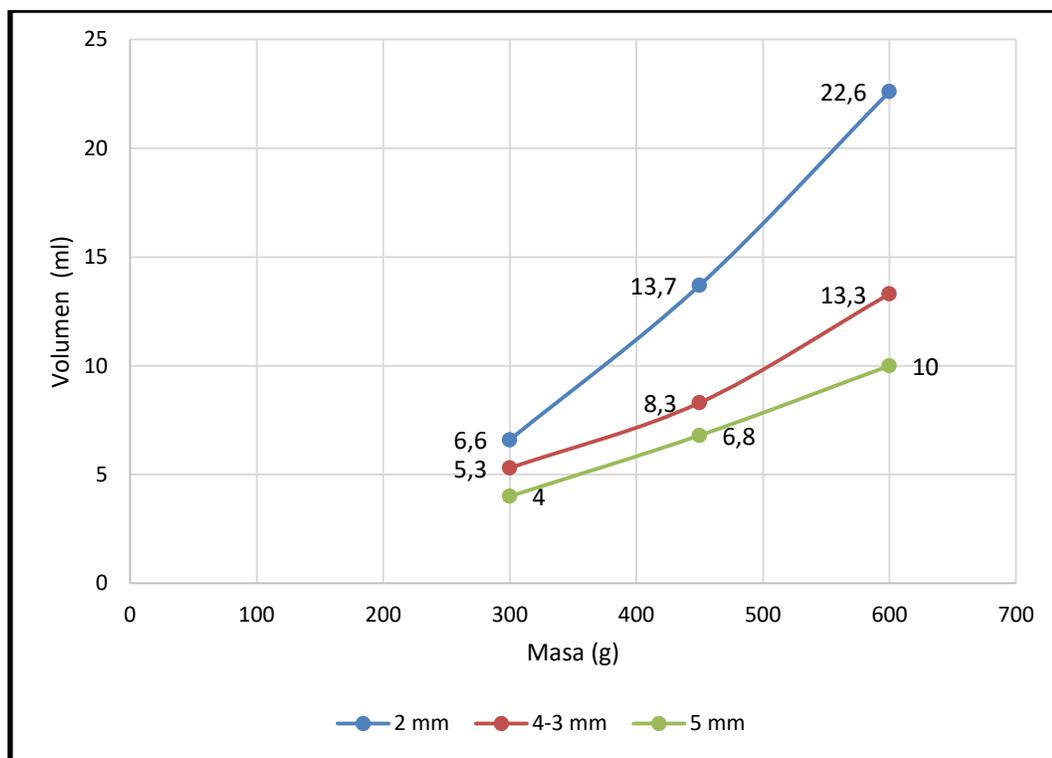
El volumen de extracción del aceite esencial varía con la cantidad de materia prima utilizada en la extracción, en la figura 3-5 y la figura 3-6 se muestra la variación para cada repetición del diseño factorial.

Figura 3-5 Variación del volumen de aceite obtenido con la masa de materia utilizada en la primera repetición.



Fuente: Elaboración propia, 2016

Figura 3-6 Variación del volumen de aceite obtenido con la masa de materia utilizada en la segunda repetición.



Fuente: Elaboración propia, 2016

En las dos figuras se observa que el volumen de aceite extraído incrementa al aumentar la masa empleada para la extracción, en las extracciones con 600 g se obtienen volúmenes altos y para las de 300 g volúmenes bajos. Esto se debe a que al aumentar la masa se tiene mayor cantidad de aceite que extraer.

3.5.4. Intervalos de tiempo de extracción

En el proceso de extracción del aceite esencial se mide los ml obtenidos, por intervalos de tiempo de media hora cada uno; en la tabla III- 9 se muestra los intervalos de tiempo y volúmenes para la extracción del aceite esencial y la hora total de extracción para cada experimento del diseño factorial.

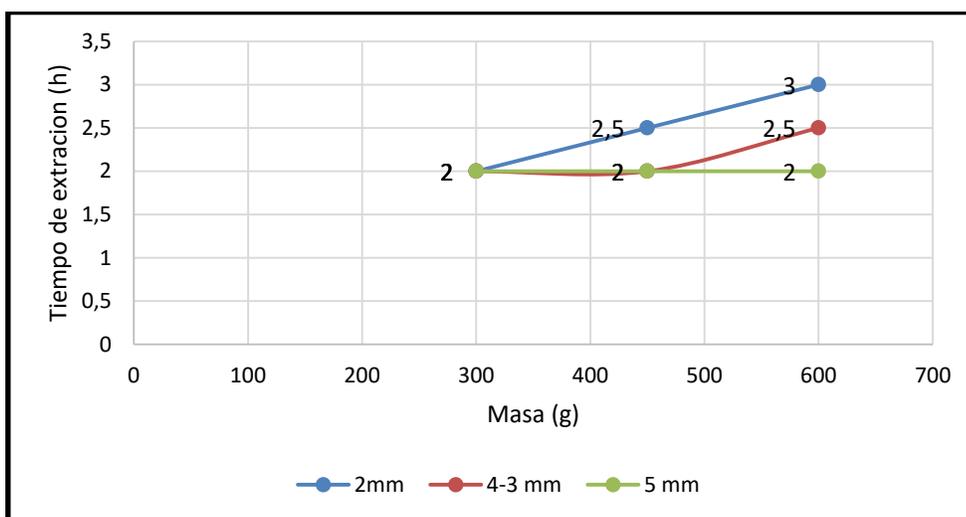
Tabla III-9 Rendimiento de extracción por intervalo de tiempo

N° Experimento	Variables		Intervalos de tiempo (min)						Total ml	Tiempo de extracción (h)
	Masa (g)	Tamaño (mm)	0-30	30-60	60-90	90-120	120-150	150-180		
1	600	2	10,9	6	3,6	2	1,2	0,8	24,5	3
2	450	2	7	3	1,5	0,5	0,3	0	12,3	2,5
3	300	2	3	1,5	0,5	0,2	0	0	5,2	2
4	600	4	5,3	3	1,5	0,6	0,2	0	10,6	2,5
5	450	4	5	1,5	1	0,3	0	0	7,8	2
6	300	4	2,5	1,2	0,7	0,2	0	0	4,6	2
7	600	5	6	2,3	0,7	0,2	0	0	9,2	2
8	450	5	4,4	1,2	0,4	0,2	0	0	6,2	2
9	300	5	2,2	1	0,5	0,2	0	0	3,9	2
10	600	2	10,2	5,7	3,4	1,8	0,9	0,6	22,6	3
11	450	2	6	4	1,8	1	0,6	0,3	13,7	3
12	300	2	5,1	1	0,4	0,1	0	0	6,6	2
13	600	4	7,4	3,7	1,6	0,5	0,1	0	13,3	2,5
14	450	4	6	1,6	0,5	0,2	0	0	8,3	2
15	300	4	3,2	1	0,7	0,4	0	0	5,3	2
16	600	5	6,4	2,6	0,7	0,3	0	0	10	2
17	450	5	4,5	1,4	0,8	0,1	0	0	6,8	2
18	300	5	2,4	1,2	0,3	0,1	0	0	4	2

Fuente: Elaboración propia, 2016

En la tabla se observa que la mayor cantidad de aceite se obtiene en el intervalo de la primera media hora de extracción, después de la media hora comienza a descender para todos los experimentos. También se observa que el tiempo total de extracción varía en los experimentos, siendo de 3 horas para los experimentos realizados con 600 g de cáscara de 2 mm, 2,5 horas para los experimentos realizados con 600 g de cáscara de 4-3 mm y dos 2 horas para los demás experimentos, excepto en el experimento realizado con 450 g de cáscara de 2 mm, en la primera repetición el tiempo de extracción es de 2,5 horas y en la segunda es 3 horas.

Figura 3-7 Influencia de la variable masa y tamaño de partícula sobre el tiempo de extracción



Fuente: Elaboración propia, 2016

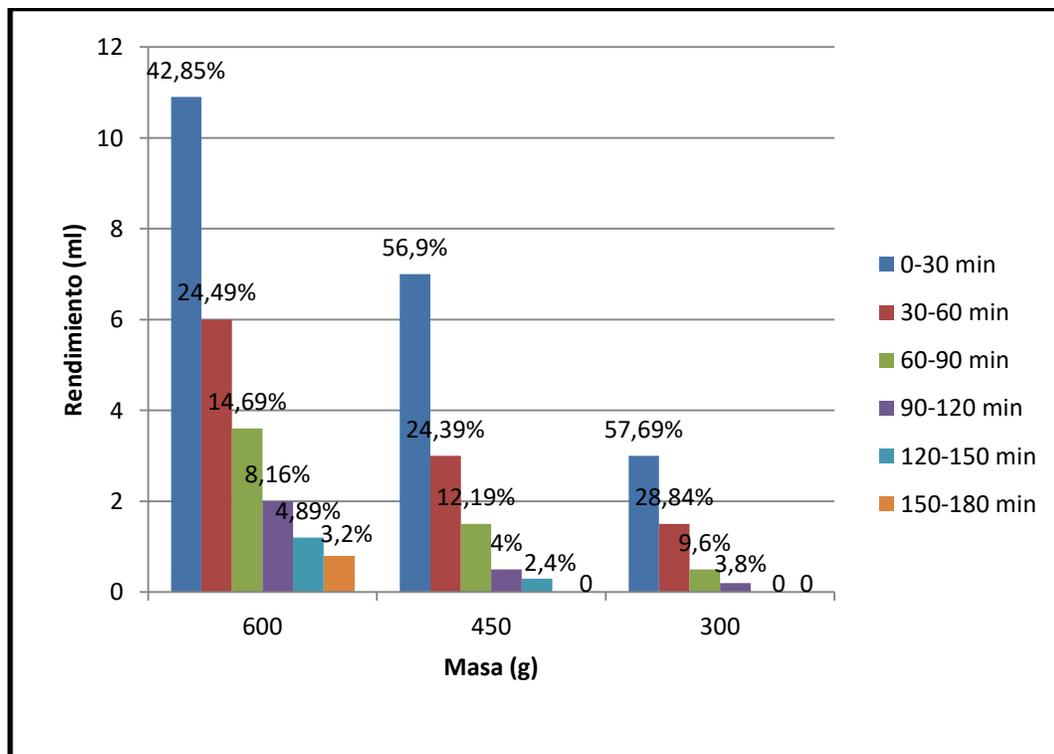
Esta variación de tiempo de extracción se debe a que cuando se tiene partículas grandes no se logra romper todos los espacios lisígenos del epicarpio y teniendo menos aceite expuesto y el vapor volatiliza solo lo que está expuesto, por lo que el tiempo de extracción es menor y los rendimientos son bajos, y para las partículas de menor tamaño se obtiene más aceite pero se requiere mayor tiempo de extracción debido a que hay más aceite esencial expuesto a la acción del vapor.

La masa de material presente en la torre, incrementa el tiempo de extracción debido a que como el aceite se encuentra contenido en el tejido del epicarpio, cuando se usa cantidades mayores de masa, el empaque es más alto por lo que se necesita mayor cantidad de energía y tiempo para extraer el aceite, ya que el vapor de agua tarda más en hacer contacto con todas las partículas de cáscara y poder volatilizar el aceite esencial. Esto se nota más en las partículas de menor tamaño porque estas forman un empaque más compacto y para partículas de mayor tamaño se requiere menos tiempo ya que el empaque no es compacto debido a que las partículas no se apilan ordenadamente dejando espacios libres facilitando el paso del vapor.

3.5.4.1. Rendimientos de extracción para cada intervalo de tiempo

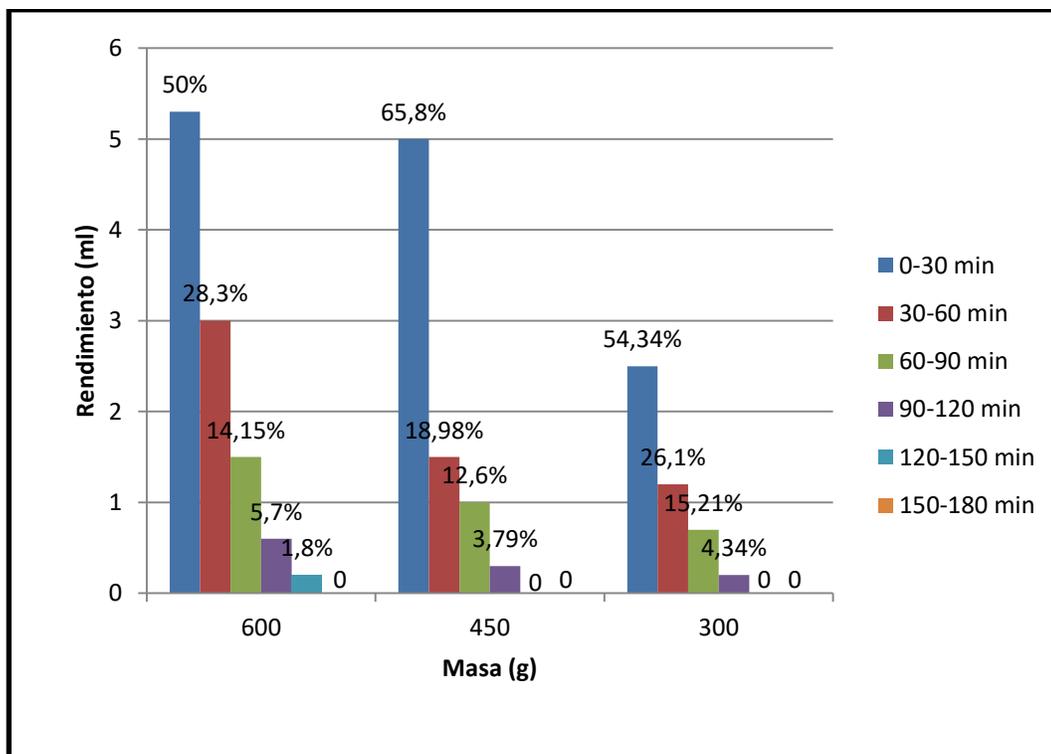
El rendimiento de extracción va disminuyendo a medida que aumentan los intervalos de tiempo; en las figuras 3-8, 3-9 y 3-10 se muestra como disminuye para cada experimento de la primera repetición.

Figura 3-8 Rendimiento de los intervalos de tiempo - partículas de 2 mm



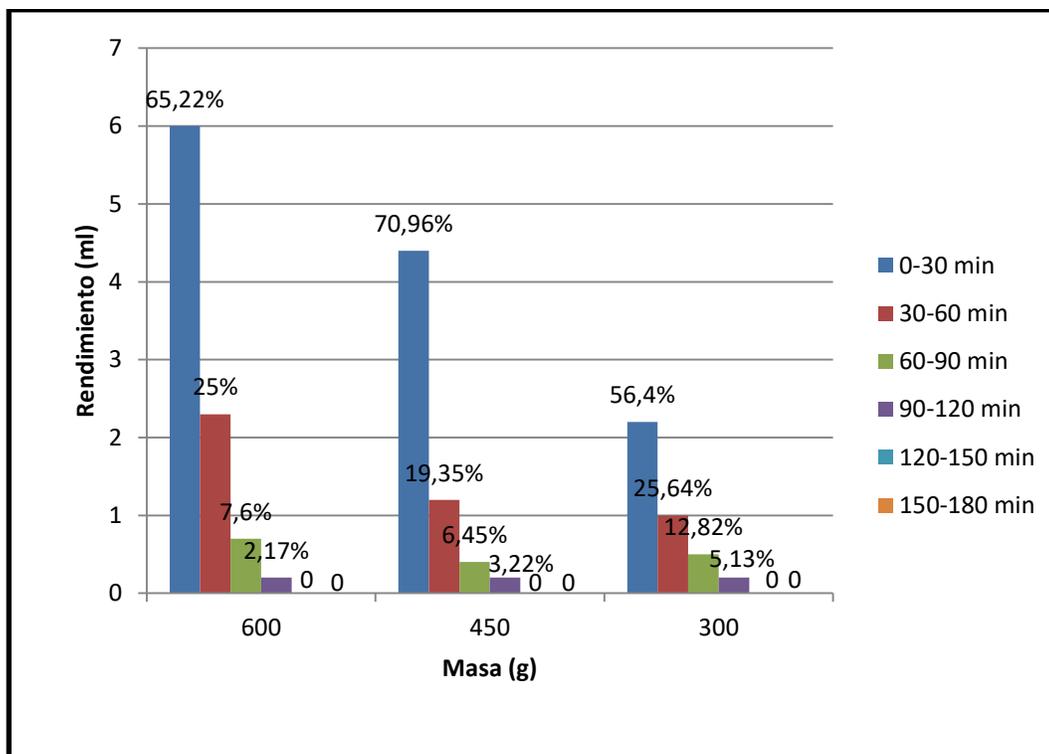
Fuente: Elaboración propia, 2016

Figura 3-9 Rendimiento de los intervalos de tiempo - partículas de 4-3 mm



Fuente: Elaboración propia, 2016

Figura 3-10 Rendimiento de los intervalos de tiempo – partículas de 5 mm



Fuente: Elaboración propia, 2016

En los gráficos se muestra 6 barras de diferentes colores, cada color representa un intervalo de tiempo. Las barras están ordenadas del primer intervalo al sexto y se agrupan según la cantidad masa de cáscara. En la parte superior de cada barra se puede ver el rendimiento obtenido en ese intervalo de tiempo.

En los gráficos se puede observar que en la primera media hora se extrae la mayor cantidad de aceite que hay en la cáscara, también se observa que el tiempo óptimo de extracción es de 1,5 horas ya que después de pasar este tiempo se recoge cantidades menores de aceite esencial que no justifica el gasto energético.

3.6. Análisis fisicoquímico del aceite esencial obtenido

El aceite esencial obtenido es un líquido ligeramente amarillo, con olor característico al de la naranja.

Los resultados del análisis fisicoquímico del aceite esencial realizado por el Centro de Análisis Investigación y Desarrollo (CEANID), se presentan en la tabla III-10 donde se comparan con los datos obtenidos de bibliografías presentes en la tabla I-3 del capítulo I que corresponde al marco teórico.

Tabla III-10 Propiedades fisicoquímicas del aceite esencial

Propiedad	Análisis fisicoquímico	Propiedades según datos bibliográficos de Cerón y Cardona (2010)
Índice de refracción (20°C)	1,4748	1,458±0,12
Gravedad específica (20°C)	0,8469	0,843±0,1
pH	4,75	4,3±0,01

Fuente: Elaboración propia, 2016

Comparando los resultados reportados en el informe del CEANID, con los datos bibliográficos, se observa que el índice de refracción del aceite obtenido es mayor, (1.4748), la densidad es mayor, (0.8469), que los valores del aceite de la bibliografía, pero no se salen de los rangos de error; con el pH no pasa lo mismo, ya que el aceite obtenido tiene un pH de 4,75 que es mayor que el dato de pH de la bibliografía y se sale del rango de error. Pero como las propiedades fisicoquímicas de los aceites esenciales pueden variar según las características de materia prima utilizada, el método de extracción, se considera admisible la variación del pH del aceite obtenido.

Una vez analizados los resultados se considera que el aceite esencial de cáscara de naranja cumple con los parámetros para este tipo de aceite.

3.6.1 Composición química del aceite esencial

En el informe del análisis de composición química por cromatografía gaseosa GC/MS realizado por el Centro de investigaciones químicas C.I.Q. reportan 5 compuestos presentes en el aceite esencial de cáscara de naranja los cuales compararemos con los datos bibliográficos de I. Cerón y C. Cardona presentes en la tabla I-4 del capítulo 1 que corresponde al marco teórico.

Tabla III-11 Composición química del aceite esencial de cáscara de naranja

Composición química		Composición según datos bibliográficos de Cerón y Cardona (2010)	
Compuesto	(%) relativo	Compuesto	(%) relativo
Limoneno	98,1	D-limoneno	90,967
Mirceno	0,92	β -mirceno	1,753
Linalool	0,40	Linalol	1,267
Pineno	0,30	α -Pineno	0,532
Terpinoleno	0,14	γ - terpinoleno	1,649
N/I	0,19	β -felandreno	0,492
		Octanal	0,199
		Decanal	0,23
		Octanol	0,532
		N/I	2,379

(N/I. No identificado)

Fuente: Elaboración propia, 2016

En la tabla se observa que hay 5 compuestos de los datos bibliográficos, que son isómeros de los compuestos del aceite esencial obtenido, y que hay 4 compuestos más que no están presentes: el β -felandreno, octanal, decanal y el octanol. Esto se debe a que la composición del aceite esencial de cáscara de naranja es compleja y varía según el lugar de donde proviene la materia prima, las características que tenga, la variedad, etc.

En ambos datos el compuesto de mayor porcentaje relativo es el limoneno con 98,1 % para el aceite obtenido y 90,967 para el aceite de los datos bibliográficos, el aceite

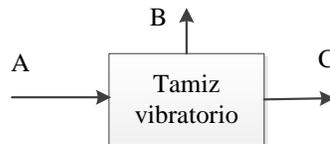
esencial de cáscara de naranja se caracteriza por tener un alto porcentaje de limoneno. Por lo que el aceite esencial obtenido tiene la composición química característica para este tipo de aceite.

3.7. Balance de materia y energía

Para realizar el cálculo del balance de materia y energía en el proceso de extracción del aceite esencial se usan los datos de la tabla Tabla II-3.

3.7.1. Balance de materia

Balance en el tamiz:



Se realiza un balance en el tamiz, se tiene que $C=600$ g, y el rendimiento del tamiz para separar partículas de 2mm $\eta_t= 67,57$ %. Entonces se calcula

Masa de cáscara de naranja molida cargada al tamiz (A).

$$A = B + C \quad (\text{Ec. 3-1})$$

$$B = (1 - 0,6757)A \quad (\text{Ec. 3-2})$$

Remplazando (Ec. 3-2) en (Ec. 3-1), despejando A y remplazando datos se tiene

$$A = \frac{600 \text{ g}}{(1 - 0,3243)}$$

$A = 887,96$ g de cáscara de naranja molida

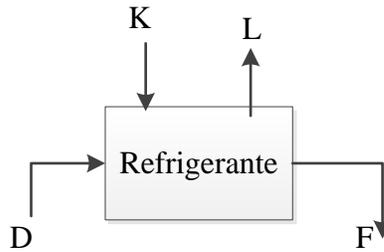
Masa de rechazo no requerido en el tamiz (B).

De la (Ec. 3-1) se despeja B y se remplaza los datos de A y C

$$B = 887,96 - 600$$

$B= 287,96$ g de rechazo no requerido.

Balance en el sistema de refrigeración:



Masa del agua de refrigeración (K).

Se tiene que el caudal de agua de refrigeración es $f_1=73,6$ g/s y el tiempo de la etapa de extracción $t_e = 180$ min. La masa del agua de refrigeración se calcula multiplicando el caudal con el tiempo de extracción.

$$K = f_1 * t_e \quad (\text{Ec. 3-4})$$

Convirtiendo los minutos a segundos y reemplazando datos en la ecuación (Ec. 3-4)

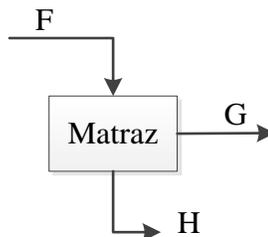
$$K = 73,6 \text{ gr/s} * 10800 \text{ s}$$

$$K = 794880 \text{ g de agua de refrigeración}$$

Como el condensador no tiene pérdidas se tiene que $K = L$

$$L = 794880 \text{ g de agua de refrigeración}$$

Balance en el matraz recolector:



Masa de condensados (F).

Se suma la masa de aceite obtenida $G = 20,75$ g más la masa de agua condensada

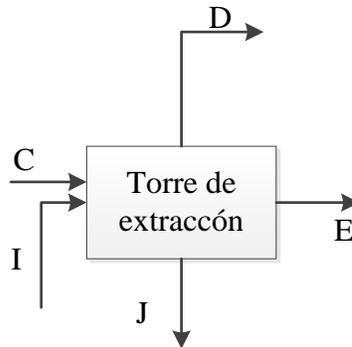
$$H = 2721,68 \text{ g.}$$

$$F = G + H \quad (\text{EC. 3-3})$$

$$F = 20,75 \text{ g} + 2721,68 \text{ g}$$

$$F = 2742,43 \text{ g de mezcla condensada}$$

Balance en la torre:



Se tiene los datos de las corrientes $C = 600 \text{ g}$, $I = 4000 \text{ g}$, $J = 1195 \text{ g}$ y $E = 681,33 \text{ g}$

Masa de mezcla de vapores (D).

La masa de vapores que sale de la torre es la misma masa que sale del condensador entonces $F = D$

$$D = 2742,43 \text{ g de mezcla de vapores}$$

Masa de agua en los residuos.

La masa de agua en el residuo es la resta entre la masa de los residuos $E = 681,33 \text{ g}$ y la masa de cáscara cargada a la torre $C = 600 \text{ g}$.

$$M_{\text{agua residuos}} = E - C \quad (\text{Ec. 3-5})$$

$$M_{\text{agua residuos}} = 681,33 \text{ g} - 600 \text{ g}$$

$$M_{\text{agua residuos}} = 81,33 \text{ g de agua que queda en el residuo.}$$

Masa total de agua que se queda en la torre.

Para calcular la masa total que queda en la torre se suma la masa de agua no evaporada $J = 1195 \text{ g}$ más la masa de agua en los residuos $M_{\text{agua residuos}} = 81,33 \text{ g}$

$$M_{\text{total agua en la torre}} = J + M_{\text{agua residuos}} \text{ (Ec. 3-6)}$$

$$M_{\text{total agua en la torre}} = 1195 \text{ g} + 81,33 \text{ g}$$

$$M_{\text{total agua en la torre}} = 1276,33 \text{ g}$$

Masa de vapor generado en la torre:

La masa de vapor generado en la torre es la suma de la de la masa de agua condensada $H = 2721,68 \text{ g}$ más la masa de agua que queda en los residuos $M_{\text{agua residuos}} = 81,33 \text{ g}$

$$M_{\text{vapor generado}} = H + M_{\text{agua residuos}} \text{ (Ec. 3-7)}$$

$$M_{\text{vapor generado}} = 2721,68 \text{ g} + 81,33 \text{ g}$$

$$M_{\text{vapor generado}} = 2803,01 \text{ g}$$

Flujo másico del vapor generado

Para calcular el flujo másico del vapor generado se divide la masa del vapor generado

$M_{\text{vapor generado}} = 2803,01 \text{ g}$ entre el tiempo de la etapa de extracción $t_e = 180 \text{ min}$.

$$F_v = \frac{M_{\text{vapor generado}}}{t_e} \quad \text{(Ec. 3-8)}$$

$$F_v = \frac{2803,01 \text{ g}}{10800 \text{ s}}$$

$$F_v = 0,259 \text{ g/s}$$

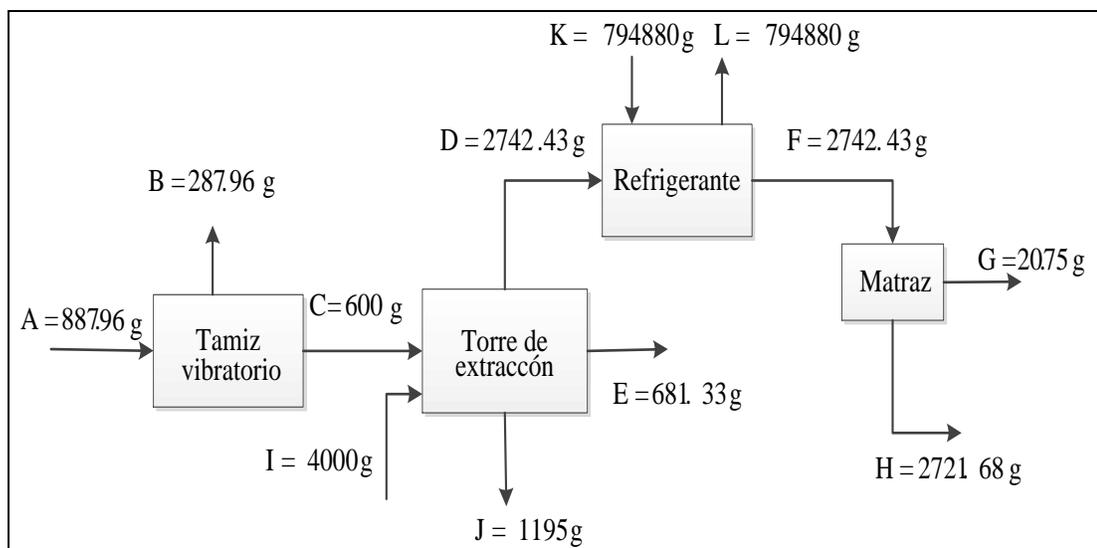
Los resultados del balance de materia se prestan en la tabla III- 12 y en la figura 3-11 se muestra el valor de cada corriente del proceso de extracción del aceite esencial.

Tabla III-12 Resultados del balance de materia

Corrientes a calcular		Valores
Corriente	Nombre	
A	Cáscara de naranja molida	887,96g
B	Rechazos no requeridos	287,96 g
F	Mezcla de condensado	2742,43 g
D	Mezcla de vapores	2742,43 g
K	Agua de refrigeración	794880g
M _{agua residuos}	Agua que queda en los residuos	81,33g
M _{total en la torre}	Agua que queda en la torre	1276,33g
M _{vapor generado}	Masa de vapor generado en la torre	2803,01g
F _{vapor}	Flujo másico de vapor	0,259 g/s

Fuente: Elaboración propia, 2016

Figura 3- 11 Valores de las corrientes del Diagrama de bloques del proceso de extracción

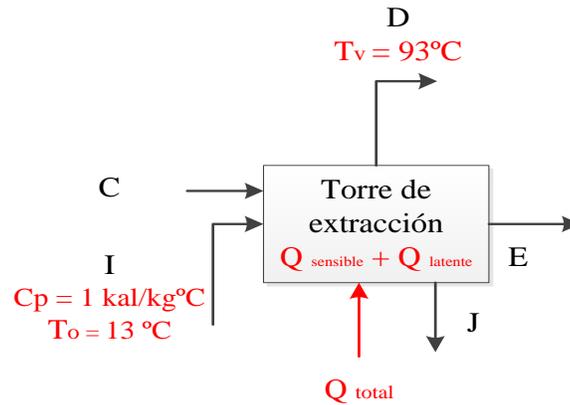


Fuente: Elaboración propia, 2016

3.7.2. Balance de energía

Para el balance de energía en la torre se realiza los siguientes cálculos:

Balance en la torre.



Calor sensible para subir la temperatura del agua hasta el punto de ebullición,

$$Q_{\text{Sensible}} = m * c_p * (\Delta T) \quad (\text{Ec. 3-9})$$

Para calcular el calor sensible se requiere el dato de la masa de agua cargada a la torre, $I = 4000 \text{ g}$, la capacidad calorífica del agua, $c_p = 1 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$ y la temperatura inicial del agua en la torre $T_o = 13^\circ\text{C}$ y la del vapor $T_v = 93^\circ\text{C}$.

$$Q_{\text{Sensible}} = 4 \text{ kg} * 1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} * (93^\circ\text{C} - 13^\circ\text{C})$$

$$Q_{\text{Sensible}} = 320 \text{ kcal}$$

Calor latente para evaporar el agua; para calcular este dato se calcula primero la potencia de la hornalla para lo cual se requiere el dato del tiempo de la etapa de acondicionamiento, $t_c = 31 \text{ min} = 0,52 \text{ h}$.

$$P = \frac{Q_{\text{Sensible}}}{t_c} \quad (\text{Ec. 3-10})$$

$$P = \frac{320 \text{ kcal}}{0,52 \text{ h}}$$

$$P = 615,38 \text{ kcal/h}$$

Para calcular el calor latente se multiplica la potencia de la hornalla con el tiempo de la etapa de extracción, $t_e = 180 \text{ min} = 3 \text{ h}$.

$$Q_{\text{Latente}} = P * t_e \quad (\text{Ec. 3-11})$$

$$Q_{\text{Latente}} = 615,38 \text{ kcal/h} * 3 \text{ h}$$

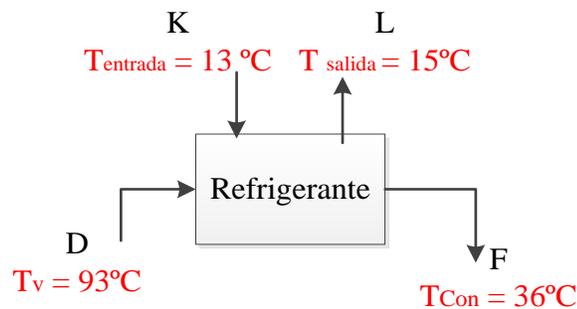
$$Q_{\text{Latente}} = 1846,14 \text{ kcal}$$

El calor requerido para la extracción es la suma del calor sensible, $Q_{\text{Sensible}} = 320 \text{ kcal}$ más el calor latente, $Q_{\text{Latente}} = 1846,14 \text{ kcal}$.

$$Q_{\text{Total}} = 320 \text{ kcal} + 1846,14 \text{ kcal}$$

$$Q_{\text{Total}} = 2166,14 \text{ kcal}$$

Balance en el Sistema de refrigeración.



Para el balance de energía en el sistema de refrigeración los dos refrigerantes se considera como si fuera solo un condensador ya que están conectados como si fuera uno solo. Los cálculos a realizar son los siguientes:

Calor de vaporización del agua a 93°C . Se calcula con el calor latente, $Q_{\text{Latente}} = 1846,14 \text{ kcal}$, y la masa del vapor generada, $M_{\text{vapor generado}} = 2803,01 \text{ g}$.

$$\lambda_{\text{vaporizacion}} = \frac{Q_{\text{Latente}}}{M_{\text{vapor generado}}} \quad (\text{Ec. 3-12})$$

$$\lambda_{\text{vaporizacion}} = \frac{1846,14 \text{ kcal}}{2,80301 \text{ kg}}$$

$$\lambda_{\text{vaporizacion}} = 658,581 \text{ kcal/kg}$$

Con el calor de vaporización se calcula el calor cedido por el vapor de agua

Para ello se requiere el dato de la masa de vapor que entra al condensador que es igual a la masa condensada $H = 2721,68$ g, la temperatura del condensado $T_{\text{Con}} = 36^{\circ}\text{C}$ y la temperatura del vapor $T_{\text{v}} = 93^{\circ}\text{C}$. Los datos de masa se transforman a kilos y la ecuación es la siguiente:

$$Q_{\text{Cedido}} = m_{\text{vapor}} * \lambda_{\text{vaporizacion}} + m_{\text{vapor}} * c_p * (\Delta T) \quad (\text{Ec. 3-13})$$

$$Q_{\text{Cedido}} = 2,72168 \text{ kg} * 658,581 \text{ kcal/kg} + 2,72168 \text{ kg} * 1 \text{ kcal/kg}^{\circ}\text{C} * (36^{\circ}\text{C} - 93^{\circ}\text{C})$$

$$Q_{\text{Cedido}} = 1637,31 \text{ kcal}$$

El calor recibido se calcula con la masa del agua de refrigeración, $L = 794880$ g, la temperatura de entrada del agua de refrigeración, $T_{\text{entrada}} = 13^{\circ}\text{C}$, y la temperatura de salida del agua $T_{\text{salida}} = 15^{\circ}\text{C}$. No se requiere un calor latente de vaporización ya que no cambia de fase.

$$Q_{\text{Recibido}} = m_{\text{Agua de refrigeración}} * c_p * (\Delta T) \quad (\text{Ec. 3-14})$$

$$Q_{\text{Recibido}} = 794,88 \text{ kg} * 1 \text{ kcal/kg}^{\circ}\text{C} * (15^{\circ}\text{C} - 13^{\circ}\text{C})$$

$$Q_{\text{Recibido}} = 1589,76 \text{ kcal}$$

Cálculo del consumo de combustible para la extracción

El dato del poder calorífico del gas GLP se saca del internet, el tiempo total de la extracción es la suma de los tiempos, de la etapa de acondicionamiento y la etapa de extracción y la potencia de la hornalla se calcula en el balance de energía.

Los datos son los siguientes

$$\text{Poder calorífico del gas} = 9300 \text{ kcal/m}^3$$

$$\text{Tiempo total de la extracción} = 3.58 \text{ h}$$

$$\text{Potencia de la hornalla} = 615,38 \text{ kcal/h}$$

Ecuación para el cálculo:
$$\text{Gas}_{\text{consumido}} = \frac{P \cdot \text{Tiempo}_{\text{total}}}{\text{Poder calorífico}} \quad (\text{Ec. 3-15})$$

$$\text{Gas}_{\text{consumido}} = \frac{615,38 \text{ kcal/h} \cdot 3,58 \text{ h}}{9300 \text{ kcal/m}^3}$$

$$\text{Gas}_{\text{consumido}} = 0,236 \text{ m}^3$$

En la tabla III- 13 se muestra los resultados del balance de energía.

Tabla III-13 Resultados del balance de energía

Balance de energía en la torre		
Calor Sensible	Q sensible	320 kcal
Calor Latente	Q latente	1846,14 kcal
Calor Requerido	Q total	2166, 14 kcal
Balance de energía en el sistema de refrigeración		
Calor Cedido	Q cedido	1637,31 kcal
Calor recibido	Q recibido	1589,76 kcal
Consumo del combustible		
Volumen de gas consumido	Gas consumido	0,236 m ³

Fuente: Elaboración propia, 2016

3.8. Costos de proyecto

Los costos del estudio para la extracción del aceite esencial se presentan en las siguientes tablas:

Tabla II-14 Costos de materia prima

Ítem	Detalle	Unidades	Precio unitario (Bs)	Cantidad	Costo (Bs)
1	Cáscara de naranja	Kg	5	30	150
2	Naranja	Unidad	0,4	100	40
3	Transporte	bs	----	----	120
Total					310

Fuente: Elaboración propia, 2016

Tabla III-15 Costos de materiales y equipos

Ítem	Detalle	Unidades	Precio unitario (Bs)	Cantidad	Costo (Bs)
4	Licadora	Unidad	150	1	150
5	Termómetro (100 °C)	Unidad	30	1	30
6	Frascos de vidrio ámbar de 30 ml	Unidad	8,5	5	42,5
7	Fuentes de plástico medianas	Unidad	17,5	2	35
8	Jeringas de 5 y 20 ml	Unidad	1 y 2	8 y 5	28
9	Hielo	Bolsa	5	24	120
Total					405,5

Fuente: Elaboración propia, 2016

Tabla III-16 Costos de análisis fisicoquímicos de la materia prima

Ítem	Detalle	Unidades	Precio unitario (Bs)	Cantidad	Costo (Bs)
10	Humedad	Análisis	25	1	25
11	Cenizas	Análisis	50	1	50
12	Grasa	Análisis	60	1	60
13	Proteína	Análisis	85	1	85
14	Fibra	Análisis	75	1	75
15	Carbohidratos	Análisis	5	1	5
16	Azúcares totales	Análisis	85	1	85
Total					385

Fuente: Elaboración propia, 2016

Tabla III-17 Costos de análisis fisicoquímico del aceite esencial

Ítem	Detalle	Unidades	Precio unitario (Bs)	Cantidad	Costo (Bs)
17	Densidad relativa (20°C)	Análisis	25	1	25
18	Índice de refracción (20°C)	Análisis	10	1	10
19	pH	Análisis	10	1	10
20	Cromatografía GC-MS	Análisis	1200	1	1200
21	Envío de muestra a Cochabamba	Courier	10	1	10
Total					1255

Fuente: Elaboración propia, 2016

Tabla III-18 Costo de insumos

Ítem	Detalle	Unidades	Precio unitario (Bs)	Cantidad	Costo (Bs)
22	Agua	m ³	0,7	16,88	11,82
23	Gas	Garrafa	35	1	35
Total					46,82

Fuente: Elaboración propia, 2016

Tabla III-19 Consumo eléctrico de los equipos utilizados

Ítem	Detalle	Cantidad	Potencias (kW)
24	Licadora	Molido de materia prima	0,35
25	Tamiz vibratorio	Tamizado de materia prima	0,09
26	Balanza analítica	Pesado de materia prima y residuos	0,22

Fuente: Elaboración propia, 2016

Tabla III-20 Costo energético de los equipos

Ítem	Potencia (kW)	Tiempo (h)	Energía (kwh)	Costo (Bs)
24	0,35	35	12,25	7,35
25	0,09	24	2,2	1,32
26	0,22	18	3,96	2,38
Total				11,05

Fuente: Elaboración propia, 2016

Los costos están calculados sobre la base de 0.60bs/kwh que cobra SETAR

Tabla III-21 Costos indirectos

Ítem	Detalle	Unidades	Precio unitario (Bs)	Cantidad	Costo (Bs)
27	Internet	Horas	3	400	1200
28	Transporte	Pasaje	1	320	320
29	Impresión del trabajo	Hoja	0.5	1040	520
30	Anillado del trabajo	Anillado	6.5	5	32.5
31	Empastado del trabajo	Empastado	50	3	150
32	Mano de obra	Hora	130	500	65000
Total					67.222,5

Fuente: Elaboración propia, 2016

Tabla III-22 Costo total del proyecto

Costos	(Bs)
Costos de materia prima	310
Costos de materiales y equipos	405,5
Costos de análisis fisicoquímicos de la materia prima	385
Costos de análisis fisicoquímico del aceite esencial	1255
Costo de insumos	46,82
Costo energético de los equipos	11,05
Costos indirectos	67.222,5
Total Costos	69.635,87

Fuente: Elaboración propia, 2016

El estudio de la extracción del aceite esencial tiene un costo total de **69.635,87 Bs**

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

De acuerdo a los objetivos planteados para el presente trabajo de investigación y a los resultados obtenidos, se llega a las siguientes conclusiones:

- La naranja de mejores características es la de la variedad criolla, ya que comparadas con las demás variedades es más grande, tiene un diámetro promedio de 7,71 cm, la cáscara tiene 4,5 mm de grosor, el epicarpio tiene un grosor de 1,5 mm y de cada naranja que se pela con un grosor de 2 mm se obtiene un promedio de 16,23 g de cáscara, por lo se selecciona esta variedad para la extracción, ya que se estima que contiene más aceite esencial.
- La cáscara de naranja criolla tiene las siguientes propiedades fisicoquímicas: humedad en un 70,87 %, azúcares totales 8,92 %, cenizas 1,25 %, fibra 4,48 %, materia grasa 0,5 %, carbohidratos 21,89 % y proteínas totales 1,01 %; estas propiedades pueden variar ya que dependen de muchos factores como ser el lugar de cultivo, las condiciones climatológicas, tiempo de cosecha, químicos insecticidas y abonos utilizados.
- Las variables de operación utilizadas para la extracción del aceite esencial por el método de arrastre por vapor son: para el diseño factorial, tamaño de partícula y cantidad de masa de cáscara de naranja, después de realizar los análisis granulométricos y empaque se selecciona los tamaño de 2 mm, 3-4 mm y 5 mm, y la cantidad de masa a utilizar son 300 g y 450 g y 600 g. El equipo de extracción de aceite esencial trabaja a presión atmosférica, a la temperatura de 93°C, el agua para la refrigeración en el condensador entra a 13°C. La hornalla de la cocina trabaja a potencia media.
- En la extracción del aceite esencial empleando 600 g de cáscara de naranja de 2 mm de tamaño se obtiene un rendimiento de 3,46 %, con partículas de 4-3 mm se obtiene 1,5 % y con las de 5 mm 1,3 %, en las extracciones que se trabaja con 450 g de cascara empleando los mismos tamaños se obtiene rendimientos de 2,31 %, 1,49 % y 1,17 %. y en las extracciones empleando 300 g de cáscara se

obtiene rendimientos de 1,47 %, 1,3 % y 1,1 %. De estos resultados se concluye que reducir el tamaño de partícula mejora el rendimiento de la extracción del aceite esencial, esto se debe a que al reducir el tamaño se aumenta el área de contacto con el vapor, y que al aumentar la masa se tiene mayor cantidad de aceite por lo que hace que incremente el rendimiento.

- Las variables óptimas para la extracción del aceite esencial son: tamaño de partículas de 2mm y masa de 600 g, ya que con estas variables se obtiene mayor cantidad de aceite esencial (3.46%) y el tiempo óptimo de extracción es de 1,5 horas porque es el tiempo en el que se extrae aproximadamente el 90 %; luego se extrae pequeñas cantidades que no justifican el gasto energético.
- La metodología utilizada para extraer el aceite esencial es adecuada ya que no presentó problemas pero se puede mejorar ya que al pelar y lavar la cáscara se tiene pérdidas mínimas de aceite esencial que reducen en cierta manera el rendimiento de extracción.
- El aceite obtenido tiene un color ligeramente amarillo, con olor característico de la parte externa de la naranja, por lo que se concluye que cumple con las características propias del aceite esencial de naranja descritas en la bibliografía.
- Las propiedades del aceite esencial obtenidas son: Densidad relativa 0,8469, Índice de refracción 1,4748 y pH 4,75; los resultados no varían significativamente de los datos reportados en la bibliografía. En conclusión, se considera que el aceite esencial está dentro del rango esperado para este tipo de aceites.
- En la composición del aceite esencial se identificó 5 componentes mayoritarios: el limoneno, pineno, mirceno, terpinoleno, y linalol, los cuales son característicos de este tipo de aceites, y que el limoneno es uno de los más abundantes con un 98,1 %. por lo que se concluye que la composición del aceite cumple con las características propias para el aceite esencial de naranja.

4.2. Recomendaciones

- En futuros trabajos de investigación de extracción de aceites esenciales por método de arrastre de vapor, estudiar la influencia de la variación del flujo de vapor en la torre sobre el rendimiento.
- Utilizar un condensador más grande que permita mayor intercambio de calor y así tener condensados con temperaturas menores a las de 30°C, Y que se pueda trabajar con mayores potencias en la hornalla.
- Realizar estudios con cáscara de naranja seca, y con diferentes variedades de naranja.
- Realizar un estudio de pre-factibilidad para la implementación de una planta productora de aceite esencial de naranja en nuestra región.
- Realizar trabajos de investigación sobre el aprovechamiento y aplicaciones del aceite esencial en la industria de insecticidas orgánicos, industrias farmacéuticas, e industria de bebidas.

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía

Aguilar, M. (2015, Noviembre 3). *Aceites esenciales: todo lo que tienes que saber.* Fecha de consulta 10 de abril del 2016, **de:** [www.enfemenino.com: http://www.enfemenino.com/tratamientos/como-utilizar-los-aceites-esenciales-s484338.html](http://www.enfemenino.com/tratamientos/como-utilizar-los-aceites-esenciales-s484338.html)

Aromas Que Curan. (2014). *Aromaterapia y aceites esenciales.* Fecha de consulta: 25 junio de 2016, **de:** <http://aromasquecuran.es/index.html>

Cardozo, J. Y. (2003). *Extracción de pectina de la cáscara de naranja.* Investigación aplicada (Licenciado en Ing. de Alimentos). Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, Facultad de Ciencias y Tecnología. Tarija (Bolivia).

CAINCO-IBCE. (2014). *Biocombustibles sostenibles en Bolivia.* Editorial SIMMER.1ª ed. Santa Cruz-Bolivia.

CETHA EMBOROZÚ. (2001). *Proyecto a nivel de Factibilidad Técnica Planta Comunitaria Procesadora de Frutas cítricas.* Tarija-Bolivia.

Carrera de Ingeniería Agrónoma (UAJMS). (2013). *Determinación del potencial productivo de cítricos de tres comunidades de la prov O`Connor 2012.* Tarija - Bolivia.

Cerón S. I., Cardona A.C. (2010). *Evaluación del proceso integral para la obtención de aceite esencial y pectina a partir de cáscara de naranja.* Fecha de consulta 9 de mayo del 2016, Disponible en: [file:///C:/Users/IBM/Downloads/Dialnet-EvaluacionDelProcesoIntegralParaLaObtencionDeAceit-3912862%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/IBM/Downloads/Dialnet-EvaluacionDelProcesoIntegralParaLaObtencionDeAceit-3912862%20(2).pdf)

Directo del campo. (2015). *Definición y origen de naranja.* Fecha de consulta 16 de mayo de 2015, **de:** <http://www.directodelcampo.com/noticias/origen-de-la-naranja--txt--2j3h8af42.html>

Echart, R. K. (2014). *Extracción y caracterización de aceite esencial de semillas de molle en Tarija.* Investigación aplicada (Licenciado en Ing. Química). Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, Facultad de Ciencias y Tecnología. Tarija (Bolivia).

Eroski Consumer. (2015). *Guía práctica de frutas: Naranja*. Fecha de consulta 25 de julio 2016, **de:** <http://frutas.consumer.es/naranja/propiedades>

Gennaro, A. R.(2003). *Remington Farmacia*. [Libro en línea]. 20ª ed. Editorial médica Panamericana. Fecha de consulta 20 de mayo de 2015. Disponible en: <https://books.google.com.ar/books?id=Av4IIsyH-qcC&pg=PA1187&dq=que+contiene+la+cascara+de+naranja&hl=es&sa=X&ei=Yw1dVeTdk4bfsAWbioO4BA&ved=0CBsQ6AEwAA#v=onepage&q=que%20contiene%20la%20cascara%20de%20naranja&f=false>

Herrera, A. S. (2010). *La Naranja, La Reina del Invierno*. Fecha de consulta: 25 de julio de 2016, disponible en: <http://www.cofco.org/ficheros/Naranja2.pdf>

Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey Campus Puebla. (2006). *Equipo Química Experimental 6, Destilación por Arrastre de Vapor*. Fecha de consulta: 17 de mayo de 2015. Disponible en:

<https://sites.google.com/site/equipoquimicaexperimental6/practica-5-destilacion-por-arrastre-de-vapor>

Morín, Ch. (1980). *Cultivo de Cítricos*. Editorial ILCA., 2ª ed. Lima-Perú.

Naturícima. (2013, Diciembre 12). *¿Qué son los aceites esenciales*. Fecha de consulta: 20 de mayo de 2015, **de:** <http://www.naturisima.org/que-son-los-aceites-esenciales/>

Plazas, E. (2011, octubre). *Curso de aceites esenciales: Química y proceso de producción. Proyecto Uso sostenible de los recursos vegetales del Distrito Capital*. Fecha de consulta: 5 de abril de noviembre de 2016. Disponible en: <http://www.ps.org.uy/correo/correo040701p13.htm>

Paredes, P. D., Quinatoa Ch. F. (2010). *Desarrollo de un sistema de extracción de aceites esenciales*. Tesis de grado (Ingeniero Mecánico). Escuela superior politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica. Riobamba (Ecuador).

Quecaña, E. (2012). *Extracción de aceite esencial a partir de la cascara de limón, a escala laboratorio.* Investigación aplicada (Licenciado en Ing. Química). Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, Facultad de Ciencias y Tecnología. Tarija (Bolivia).

Romo, V. (2006). Química de la flora mexicana, Investigaciones en el Instituto de Química de la UNAM. . [Libro en línea]. 1ª ed. Editado por Alfonso Romo. Fecha de consulta 25 de junio de 2016. Disponible en:

<https://books.google.com.ar/books?id=2rZKFmqYfSIC&printsec=frontcover&dq=Quim%C3%ADca+de+la+Flora+Mexicana&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiD4oqoyoPOAhXFdR4KHytC8gQ6AEIHDA#v=onepage&q=Quim%C3%ADca%20de%20la%20Flora%20Mexicana&f=false>

Rodríguez, Á. M., Alcaraz, M. L., Real, C. S. M. (2012). *Procedimientos para la extracción de aceites esenciales en plantas aromáticas.* Fecha de consulta: 23 de mayo de 2015. Disponible en: <http://intranet.cibnor.mx/personal/bmurillo/docs/manual-aceites-esenciales.pdf>

Sistema de bibliotecas SENA.(2012). *Introducción de los aceites esenciales de plantas medicinales y aromáticas.* Fecha de consulta 16 de mayo de 2015, **de:** http://repositorio.sena.edu.co/sitios/introduccion_industria_aceites_esenciales_plantas_medicinales_aromaticas/#

Shuttleworth, M. (10 de Agosto de 2009). *Diseño factorial.* Fecha de consulta: 19 de mayo de 2016, de: <https://explorable.com/es/disenio-factorial?gid=1606>

TRADEMAP. (2014). *Lista de los exportadores e importadores para el producto seleccionado: 3301 Aceites esenciales (deterpenados o no), incluidos los concretos o abs.* Fecha de consulta: 10 septiembre de 2015.

De: http://www.trademap.org/Country_SelProduct_TS.aspx

Tu taller natural. (2015). *La calidad y conservación de los aceites esenciales.* Fecha de consulta: 5 de abril de 2016, de:

<http://www.tutallernatural.com/blog/la-calidad-y-conservacion-de-los-aceites->

esenciales/

Universidad Politécnica de Madrid. (2010). *Open course ware, Aceites esenciales.*

Fecha de consulta: 10 de abril 2016, disponible en: <http://ocw.upm.es/>:
<http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/uso-industrial-de-plantas-aromaticas-y-medicinales/contenidos/material-de-clase/tema7.pdf>

VERA, I. O. (2012). *Extracción por arrastre con vapor.* Fecha de consulta: 17 de mayo de 2015, Disponible en: <http://es.slideshare.net/RRALO/extraccion-por-arrastre-con-vapo>.

