

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL



TESIS

**PARÁMETROS ÓPTIMOS DE OPERACIÓN EN LA EXTRACCIÓN
DE ACEITE ESENCIAL DE EUCALIPTO (*Eucalyptus globulus*) CON
EL EQUIPO MODULAR DE EXTRACCIÓN DE ACEITES
ESENCIALES**

Para optar el título de Ingeniera Agroindustrial

PRESENTADO POR

Bach. GIANELLA SWETTANA BERMUDO CRESPO

AYACUCHO – PERÚ

2019

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía y brindarme la oportunidad de cumplir mis metas.

A mis padres maravillosos Edwin Bermudo y Mercedes Crespo, por su amor, guía y apoyo incondicional en todos los momentos de mi vida.

A mi tía Marleny Bermudo por ser mi segunda madre quien me apoya, alienta y aconseja siempre.

A mis hermanas Anggie y Kiria, quienes son mi motivación a seguir y ser el mejor ejemplo para ellas.

A mis abuelas, tíos, primos y amigas, por ser parte de mi vida y brindarme su apoyo.

AGRADECIMIENTO

A Dios por permitirme lograr esta meta tan anhelada y por todas las bendiciones que me ha dado.

A mi familia por el amor y apoyo incondicional que me ofrecen, por la confianza que depositaron en mi para llevar a cabo este sueño.

A mi alma mater la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, en especial a la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia, por brindarme la oportunidad de tener un futuro mejor.

Al M.Cs.Ing. Edgar Aronés Medina, asesor de esta investigación, por la orientación, el seguimiento y la supervisión y el apoyo recibido a lo largo de la ejecución de este trabajo.

A los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial, a quienes les debemos gran parte de mis conocimientos, gracias a su paciencia, enseñanza y dedicación.

Mi gratitud a mis compañeros de estudio de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial, a los auxiliares de laboratorio que con su ayuda han colaborado en la realización del presente trabajo.

ÍNDICE

	Pag.
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
ÍNDICE	iv
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE ANEXOS	xi
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
INTRODUCCIÓN	xiv
I. EL PROBLEMA	01
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	01
1.1.1. Descripción del problema	02
1.1.2. Delimitación del problema	02
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	03
1.2.1. Problema general	03
1.2.2. Problemas específicos	03
1.3. Justificación	03
1.4. OBJETIVOS	04
1.4.1. Objetivo general	04
1.4.2. Objetivos específicos	04
II. MARCO TEÓRICO	06
2.1. ANTECEDENTES	06
2.1.1. Internacional	06
2.1.2. Nacional	07
2.1.3. Local	09
2.2. MATERIA PRIMA	11

2.2.1.	El eucalipto	11
2.2.2.	Clasificación botánica	15
2.2.3.	Composición química	15
2.3.	OTRAS VARIETADES DE EUCALIPTO	17
2.4.	ACEITES ESENCIALES	20
2.4.1.	Definición	20
2.4.2.	Composición química de los aceites esenciales	21
2.4.3.	Propiedades fisicoquímicas de los aceites esenciales	22
2.4.4.	Clasificación de los aceites esenciales	22
2.4.4.1.	Por su composición elemental	23
2.4.4.2.	Por su punto de ebullición	23
2.4.4.3.	Por su origen	23
2.4.5.	Constitución de los aceites esenciales	24
2.4.6.	Bioquímica de los aceites esenciales	26
2.4.7.	Aplicaciones de los aceites esenciales	26
2.4.8.	Localización en las plantas	28
2.4.9.	Constituyentes del aceite esencial	29
2.5.	ACEITE ESENCIAL DE EUCALIPTO	30
2.5.1.	Composición química del aceite esencial de eucalipto	31
2.5.2.	Propiedades físico químicas del aceite esencial de eucalipto	31
2.5.3.	Aplicaciones y usos del aceite esencial de eucalipto	32
2.5.4.	Toxicología del aceite esencial de eucalipto	33
2.6.	MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE ACEITES ESENCIALES	33
2.6.1.	Destilación con vapor de agua	34
2.6.2.	Desventajas y ventajas de destilación con vapor de agua	35
2.7.	FACTORES QUE INFLUYEN EN LA EXTRACCIÓN	36
2.8.	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN POR ARRASTRE DE VAPOR	37
III.	METODOLOGÍA	39
3.1.	UBICACIÓN Y LUGAR DE INVESTIGACIÓN	39
3.2.	NATURALEZA DE ESTUDIO	39
3.3.	POBLACIÓN Y MUESTRA	40
3.4.	MATERIALES Y EQUIPOS	40

3.4.1.	Materiales	40
3.4.2.	Equipos	40
3.4.3.	Materia prima e insumos	41
3.5.	DISEÑO METODOLÓGICO	41
3.5.1.	El método de la Sección Dorada	41
3.6.	DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA METODOLOGÍA	43
3.6.1.	Actividades de obtención de la muestra	45
3.6.2.	Determinación de los parámetros óptimos de operación	45
3.6.3.	Reporte y análisis de los resultados	45
3.7.	DESCRIPCIÓN DE LAS OPERACIONES PARA LA EXTRACCIÓN DE ACEITE ESENCIAL DE EUCALIPTO	46
3.8.	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO MODULAR DE EXTRACCIÓN DE ACEITES ESENCIALES	48
3.8.1.	Generador de vapor	49
3.8.2.	Recipiente destilador	49
3.8.3.	Condensador	50
3.8.4.	Florentino separador de gases	51
3.8.5.	Suministro de servicios	52
3.8.6.	Sistema de control de proceso	52
3.9.	OPERACIÓN DEL EQUIPO DE EXTRACCIÓN	53
3.9.1.	Puesta en marcha y parada de generador de vapor	53
3.9.2.	Puesta en marcha de unidad de extracción de aceites esenciales	55
3.10.	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN	56
IV.	RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIONES	58
4.1.	CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA	58
4.2.	EVALUACIÓN DE VARIABLES DE OPERACIÓN	59
4.2.1.	Efecto del adecuado acondicionamiento de las hojas de eucalipto	59
4.2.2.	Efecto del flujo de vapor de agua	60
4.2.3.	Efecto de la altura de carga del lecho	62
4.2.4.	Tiempo óptimo de extracción de aceite esencial de eucalipto	64
4.3.	CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL ACEITE ESENCIAL DE EUCALIPTO	65
4.4.	BALANCE DE MATERIA	66
4.4.1.	Balance de materia en la columna de extracción de aceite esencial	66

4.4.1.1. Composición fraccional de las hojas de eucalipto a la entrada del extractor	68
4.4.1.2. Balance de materia en la salida de columna del extractor de aceite esencial	69
4.4.1.3. Balance de materia en fondo de la columna del extractor de aceite esencial	70
4.5. BALANCE DE ENERGÍA	72
4.5.1. Evaluación de flujo de vapor de agua generado	72
4.5.1.1. Evaluación de flujo de vapor de agua generado	72
4.5.1.2. Evaluación de pérdidas de flujo y energía térmica de vapor	75
4.5.2. Cálculo de pérdida de energía térmica en el recipiente destilador	77
4.5.3. Balance de energía en el condensador	78
V. CONCLUSIONES	83
VI. RECOMENDACIONES	84
VII. BIBLIOGRAFÍA	85
VIII. ANEXOS	90

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 : Grupos funcionales de las moléculas constituyentes de los aceites esenciales	21
Tabla 2 : Industrias usuarias de productos aromáticos naturales y aceites esenciales	27
Tabla 3 : Composición del aceite esencial del eucalipto	31
Tabla 4 : Diseño en la extracción de aceite esencial de eucalipto	42
Tabla 5 : Ensayos preliminares para la destilación de aceite esencial de eucalipto	43
Tabla 6 : Características fisicoquímicas de la materia prima	58
Tabla 7 : Extracción de aceite esencial en función al tamaño de partículas (hojas)	59
Porcentaje de flujo de vapor inyectado a la columna de extracción de	
Tabla 8 : aceites esenciales	61
Efecto de la altura de lecho sobre el rendimiento de la extracción de	
Tabla 9 : aceite esencial de eucalipto	62
Resultados de evaluación del tiempo óptimo de extracción de aceite	
Tabla 10 : esencial de eucalipto	64
Tabla 11 : Propiedades físicas del aceite esencial de eucalipto	65
Tabla 12 : Evaluación de porcentaje de pérdida de flujo de vapor inyectado en el sistema	76

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 : Flores de eucalipto (<i>Eucalyptus globulus labill</i>)	12
Figura 2 : Frutos de eucalipto (<i>Eucalyptus globulus labill</i>)	13
Figura 3 : Hojas jóvenes de eucalipto (<i>Eucalyptus globulus labill</i>)	14
Figura 4 : Hojas maduras de eucalipto (<i>Eucalyptus globulus labill</i>)	14
Figura 5 : Eucalipto aromático (<i>Eucalyptus citrodora</i> Hook)	17
Figura 6 : Eucalipto rojo	18
Figura 7 : Eucalipto decorativo (<i>Eucalyptus gunni</i> Hook F.)	19
Figura 8 : Diversos grupos químicos presentes en aceites esenciales	30
Figura 9 : Diagrama cualitativo en la extracción de aceite esencial de eucalipto	46
Figura 10 : Módulo de extracción de aceites esenciales	48
Figura 11 : Generador de vapor del equipo de extracción de aceites esenciales	49
Figura 12 : Recipiente de destilador del equipo de extracción de aceites esenciales	50
Figura 13 : Ensamblado de condensador de tubos y coraza del equipo modular	51
Figura 14 : Florentador de 35 mL de capacidad. Posee capa de enfriamiento externo	52
Figura 15 : Suavizador de agua que se suministra al generador de vapor	54
Figura 16 : Curva de evolución en el tamaño de partícula	60
Figura 17 : Efecto del flujo de vapor de agua inyectado en el rendimiento	61
Figura 18 : Curva de efecto de la altura de carga del lecho sobre el rendimiento	63
Figura 19 : Efecto del tiempo óptimo sobre el peso en la extracción de aceite esencial de eucalipto	64
Figura 20 : Generador de vapor del equipo de extracción de aceites esenciales	66
Figura 21 : Intercambiador de calor de tubos y carcasa de un paso empleado para condensar la mezcla de vapor de agua y aceite esencial	78
Figura 22 : Gráfica de las ecuaciones de la recta tangente a la curva	91
Figura 23 : Gráfica de la bisectriz y la recta perpendicular al eje	92
Figura 24 : Equipo modular de extracción de aceites esenciales	95
Figura 25 : Planta de eucalipto en el barrio de Huatatas	95
Figura 26 : Recolección de hojas de eucalipto	96
Figura 27 : Acondicionamiento de la materia prima	96
Figura 28 : Materia prima para los ensayos correspondientes	97

Figura 29 :	Extracción de aceite esencial de eucalipto	97
Figura 30 :	Separación del aceite y agua floral	98
Figura 31 :	Aceite esencial de eucalipto	98
Figura 32 :	Aceite esencial de eucalipto envasado	99
Figura 33 :	Hojas de eucalipto después de la extracción	99
	:	

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1 : Determinación de la máxima extracción por el método de optimización de la sección dorada	89
Tabla 2 : Caracterización de la materia prima	92
Tabla 3 : Galería de fotos	94

RESUMEN

La extracción de aceite esencial de eucaliptos a partir de sus hojas, se llevó a cabo utilizando el método de arrastre con vapor de agua. La extracción se realizó empleando el equipo modular de extracción de aceites esenciales en el laboratorio de Transferencia de Masa de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. Para el estudio de los efectos de las variables óptimas de operación de extracción de aceite esencial de eucalipto a partir de sus hojas determinando la máxima extracción por el método de optimización de la sección dorada con una secuencia experimental de estos cuatros factores:

1) porcentaje de flujo de vapor de agua inyectado, en cuatro niveles (50%, 60%, 80% y 90%)
2) Altura de carga de lecho, en cuatro niveles (15 cm, 30cm, 45cm y 60 cm) 3) tamaño de partícula en cuatro niveles (10 cm, 5 cm, 2,5 cm, 1,25 cm) 4) determinación del tiempo óptimo de extracción en 30 minutos, 45 minutos. 60 minutos y 75 minutos. En cada uno de las combinaciones se realizó un análisis exhaustivo e interpretación individual de los resultados experimentales. Las variables óptimas para la extracción del aceite esencial del eucalipto por arrastre con vapor de agua a nivel planta piloto para un lote 3,00 kg/batch son: porcentaje de flujo de vapor de agua al 81.4%, tamaño de partícula 1,25 cm equivalente al tamaño de hojas cortado en ocho partes, altura de carga de lecho equivalente a la mitad del diámetro del tanque de extracción (32 cm, columna vertical) y el tiempo óptimo de operación fue de 60 minutos. Finalmente se presenta el balance de materia donde se obtuvo 0,033kg/batch de aceite esencial en la hoja de eucalipto y 4,79 kg/batch de agua en la salida de la columna del extractor de aceite esencial, el balance de energía obteniéndose una energía absorbida por el flujo de agua en el condensador de kJ/h, la caracterización física de la materia prima para la obtención de aceite esencial y caracterización física del aceite esencial

de eucalipto obteniendo una densidad de 0,921 g/mL y el índice de refracción de 1,456 bajo condiciones industriales.

ABSTRACT

The extraction of eucalyptus essential oil from its leaves, was carried out using the method of steam drag. The extraction was carried out using the modular equipment for the extraction of essential oils in the Mass Transfer laboratory of the Faculty of Chemical Engineering of the National University of San Cristóbal de Huamanga. For the study of the effects of the optimal variables of extraction operation of eucalyptus essential oil from its leaves, determining the maximum extraction by the method of optimization of the golden section with an experimental sequence of these four factors:

1) percentage of water vapor flow injected, in four levels (50%, 60%, 80% and 90%) 2) Bed load height, in four levels (15 cm, 30 cm, 45 cm and 60 cm) 3) particle size in four levels (10 cm; 5 cm; 2,5 cm; 1,25 cm) 4) determination of the optimal extraction time in 30 minutes, 45 minutes. 60 minutes and 75 minutes. In each of the combinations a comprehensive analysis and individual interpretation of the experimental results was carried out. The optimal variables for the extraction of the eucalyptus essential oil by steam steam trawl at the pilot plant level for a 3,00 kg / batch are: percentage of water vapor flow at 81,4%, particle size 1,25 cm equivalent to the size of leaves cut into eight parts, bed load height equivalent to half the diameter of the extraction tank (32 cm, vertical column) and the optimum operating time was 60 minutes. Finally, the material balance is presented where 0,033 kg / batch of essential oil was obtained in the eucalyptus leaf and 4,79 kg / batch of water in the outlet of the column of the essential oil extractor, the energy balance obtaining an energy absorbed by the flow of water in the condenser of kJ/h, the physical characterization of the raw material for obtaining essential oil and physical characterization of eucalyptus essential oil obtaining a density of 0,921 g / mL and the refractive index of 1,456 under industrial conditions.

INTRODUCCIÓN

El estudio de los aceites esenciales viene transformándose en una de las áreas de investigación y de desarrollo agroindustrial con la tendencia global de comercio sostenible y su aprovechamiento. Por otro lado, la producción de eucalipto en nuestro departamento es comercializada sin darle valor agregado, siendo necesario otorgarle mayor valor comercial. Los países con mayores índices de desarrollo son aquellos que pueden agregar más valor a sus productos.

Nuestro país produce importante cantidad de hierbas aromáticas las cuáles en su mayoría cuentan con beneficios para la salud especialmente como antioxidantes.

El cuidado de la salud es una preocupación cada vez más importante para la mayoría de las personas a nivel nacional y mundial. Actualmente, la industria de aceites esenciales extraídos de plantas aromáticas viene transformándose en una de las áreas de investigación y de desarrollo agroindustrial importante por su gran utilidad en diversos ámbitos tales como la fabricación de los perfumes, productos cosméticos, saborizantes, en la industria alimentaria y farmacéutica. Además, existe una creciente demanda por parte del consumidor, ya que exige alimentos de calidad con mayor capacidad de conservación, por lo que se hace cada vez más necesaria la eliminación de aditivos sintéticos sustituyéndolos por productos naturales con menor impacto contra el ambiente, siendo los aceites esenciales una alternativa a esta situación.

Para la obtención de estos aceites esenciales se pueden usar diferentes métodos de extracción, en esta investigación se utilizó el equipo modular de extracción de aceites esenciales, con la finalidad de evaluar sus parámetros y encontrar el rendimiento óptimo.

El equipo modular de extracción por arrastre de vapor nos permitirá conocer el control

operacional donde determinaremos el efecto de las variables operacionales en el rendimiento para así mejorar la eficiencia y disminuir el consumo energético en extracción del aceite esencial de eucalipto (*Eucalyptus globulus*), la muestra vegetal generalmente fresca cortada en trozos pequeños, se coloca en un recipiente cerrado y sometida a una corriente de vapor de agua, la esencia así arrastrada es posteriormente condensada, recolectada y separada de la fracción acuosa. Esta técnica es muy utilizada especialmente para esencias fluidas, especialmente las utilizadas para perfumería.

I. EL PROBLEMA

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los avances científicos y agrícolas han generado consigo diversas opciones de consumo de alimento en la población, en especial aquellos que tienen propiedades beneficiosas para la salud. El cuidado de la salud es una preocupación cada vez más importante para la mayoría de las personas a nivel mundial.

Un problema común en la producción de los aceites esenciales radica en la diversidad de los rendimientos obtenidos para una misma planta aromática. Lo cual se debe al nivel de producción, al tipo de equipo usado, a las condiciones térmicas del vapor de agua usado, contenido de agua en la planta, variables de operación y a otros factores adicionales. De este hecho se reconoce la necesidad de adelantar más investigación a nivel planta piloto sobre el impacto de las variables de operación en el rendimiento para optimizar la tecnología de extracción de aceite esencial de eucalipto y establecer una metodología que permita realizar pruebas experimentales confiables y reproducibles a nivel industrial y estas a su vez puedan servir para una futura generación de una industria de aceites esenciales de eucalipto en la Región Ayacucho.

En nuestro país se han desarrollado un buen número de industrias que procesan los aceites esenciales; en este caso el eucalipto no ha sido aprovechado racionalmente. Pues la utilizan

en un mínimo porcentaje en infusiones o como hierbas medicinales. Es decir, no se aprovecha debidamente el producto presente en las hojas, que son los aceites esenciales, los cuales tendrían una gran demanda en nuestro país. (Cárdenas, 2014)

Por otro lado, se sabe que nuestro territorio presenta una naturaleza favorable en muchas zonas para el desarrollo de esta planta. El presente estudio fue motivado por éstas y por otras consideraciones; y estuvo orientado hacia la búsqueda de un mejor aprovechamiento industrial del eucalipto, así como de la determinación de parámetros óptimos de operación con el equipo modular de extracción de aceites esenciales requeridos para la correcta obtención del aceite esencial del eucalipto (*Eucalyptus globulus*).

1.1.1. Descripción del problema

Se han realizado varios trabajos de investigación en la extracción de aceite esencial de diferentes plantas en el equipo modular de extracción de aceites esenciales, pero no se tienen los parámetros óptimos para la extracción de aceite esencial de eucalipto para este equipo, ya que en la actualidad se viene extrayendo el aceite esencial de eucalipto casi en forma empírica dejando de lado la comprensión de los fenómenos controlantes y la optimización de variables de operación, por lo cual se quiere realizar este trabajo de investigación y poder conocer las variables que influyen y realizar evaluaciones que permitan obtener un alto rendimiento, calidad del producto y ahorro de energía.

1.1.2. Delimitación del problema

La investigación de la determinación de los parámetros óptimos de operación de la extracción del aceite esencial por arrastre de vapor del eucalipto, se realizará utilizando como materia prima las hojas de eucalipto en un proceso simple, en los laboratorios de la Facultad

de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema general

¿Cuáles serán los parámetros óptimos de operación en la extracción de aceite esencial de eucalipto (*Eucalyptus globulus*) con el equipo modular de extracción de aceites esenciales?

1.2.2. Problemas específicos

- a) ¿Cuáles son los parámetros óptimos para obtener un buen rendimiento de aceite esencial de las hojas de eucalipto respecto a los factores de acondicionamiento de materia prima, flujo de vapor inyectado y altura de carga del lecho de extracción por arrastre con vapor de agua?
- b) ¿Cuál es la energía requerida para la extracción de aceite esencial de eucalipto durante la operación del equipo?
- c) ¿Cuál es el tiempo óptimo de operación del equipo en la extracción del aceite esencial de eucalipto?
- d) ¿Cuál es el rendimiento óptimo de extracción del aceite esencial del eucalipto?

1.3. JUSTIFICACIÓN

Existen varios aceites esenciales de acuerdo a la necesidad o requerimiento que son utilizados como insumos en la elaboración de productos agroindustriales tales como: licores, desinfectantes, etc. En tal sentido promover la extracción de aceite esencial de eucalipto, es importante para su aprovechamiento. Hay que mencionar que, en el mercado nacional, los

aceites esenciales de eucalipto son difíciles de encontrar por el uso limitado de técnicas de extracción y desconocimiento del beneficio de los mismos. Los resultados obtenidos en esta investigación serán un aporte técnico y científico, para futuros estudios en el campo de las esencias aromáticas.

La investigación nos permitirá conocer el control del equipo modular de extracción de aceites donde determinaremos el efecto de las variables operacionales en el rendimiento para así mejorar la eficiencia y disminuir el consumo energético en extracción del aceite esencial de eucalipto (*Eucalyptus globulus labill*), la muestra vegetal generalmente fresca cortada en trozos pequeños, se coloca en un recipiente cerrado y sometida a una corriente de vapor de agua sobrecalentado, la esencia así arrastrada es posteriormente condensada, recolectada y separada de la fracción acuosa. Esta técnica es muy utilizada especialmente para esencias fluidas, especialmente las utilizadas para perfumería.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General

Determinar los parámetros óptimos de operación en la extracción de aceite esencial de eucalipto (*Eucalyptus globulus*) con el equipo modular de extracción de aceites esenciales

1.4.2. Objetivos Específicos

- a) Determinar los parámetros óptimos para obtener un buen rendimiento de extracción de aceite esencial de hojas de eucalipto por arrastre de vapor respecto los factores de acondicionamiento de la materia prima (tamaño de partícula), porcentaje flujo de vapor inyectado y altura de carga del lecho.
- b) Determinar la energía requerida en la extracción de aceite esencial durante la operación del equipo.

- c) Determinar el tiempo de operación óptimo del equipo modular en la extracción del aceite esencial de eucalipto.
- d) Determinar el rendimiento óptimo de extracción del aceite esencial del eucalipto en el equipo modular de extracción de aceites esenciales.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES

2.1.1. Internacional

- NAVARRETE C. (2009) en su tesis “EXTRACCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE ESENCIAL DE MANDARINA OBTENIDO DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES” para optar título profesional de Ingeniero Agroindustrial, indica que:

CONCLUSIONES: Mediante la variación de parámetros de extracción como la presión, el número y espesor de capas de material vegetal, se logró incrementar significativamente el rendimiento del proceso de extracción del AE de mandarina, pasando del 0,07% al 0,29 %. Los valores de trabajo recomendados son: 3 capas de material, un espesor de capa de 12 cm, y una presión de vapor de agua de 1,2 psi. Además de aprovecharse al máximo la capacidad del equipo y obtenerse un excelente rendimiento, se logró conservar adecuadamente las características químicas del producto final.

- DI LEO P. (2016) en su tesis: “CARACTERIZACIÓN FITOQUÍMICA DEL CEDRÓN (*Aloysia tripylla*) EN ARGENTINA PARA SU NORMALIZACIÓN” para optar título profesional de Farmacóloga, indica que:

CONCLUSIONES: Para llevar a cabo los objetivos propuestos y conocer la variabilidad

fitoquímica de la fracción volátil del cedrón nacional, se determinó el contenido de AE en 135 muestras provenientes de muy diversos orígenes, y de materiales cultivados y silvestres o muestras comerciales del mercado local. En todas las muestras analizadas el rendimiento obtenido fue mayor a 0,2% V/P, límite exigido por la Farmacopea Europea. El valor promedio fue de 0,8% V/P. Para dar mayor precisión a su caracterización, se determinó cuáles pueden ser los marcadores positivos y negativos y sus rangos de aceptación, dando las bases para la redacción de futuras normas de AEC. Después de revisar todos los AEC analizados, se observó que sería recomendable modificar el valor especificado inicialmente para el limoneno (10%-30%), ya que de las muestras de AE de composición típica, solo el 71% de las muestras se encontró dentro de ese rango. El 25% de las muestras analizadas arrojó un valor menor a 10%.

2.1.2. Nacional

- GARCÍA J. (2017) en su tesis: “EXTRACCIÓN DE ACEITE ESENCIAL POR FLUIDOS SUPERCRÍTICOS Y ARRASTRE CON VAPOR DE CEDRÓN (*Aloysia tripylla*) EN LA REGIÓN AREQUIPA”, para obtener título profesional de Ingeniera en Industrias Alimentarias, indica que:

CONCLUSIONES: Se realizó el análisis fisicoquímico de las hojas de cedrón, el resultado fue que en el rendimiento por el tamaño de hojas presentó 25,6% la hoja grande a comparación de las hojas medianas (12,4%) y de inflorescencia (10,6%). Respecto a los análisis presentó la Humedad (10,01%), Proteína (5,2%), Fibra (10,29%). Se determinó los parámetros óptimos de extracción para el método de arrastre con vapor los cuales fueron: Presión 8,3876 psi, Temperatura $85 \pm 1^{\circ}\text{C}$, capacidad 7 kg y para el método de fluidos supercríticos se trabajó a una Presión de 4350 psi, Temperatura de extracción 40°C ,

Flujómetro 5 mL/min y un tiempo de extracción de 120 minutos. Se evaluó las características fisicoquímicas al aceite esencial de cedrón obtenido mostrando una densidad de 0,92 g/mL, solubilidad del 96%, índice de refracción 1,490.

- CRUZADO A. (2012) en su tesis: “EFECTO DE LA PRESIÓN DE VAPOR Y TIEMPO DE EXTRACCIÓN EN EL RENDIMIENTO Y CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DE ACEITE ESENCIAL DE CEDRÓN (*Aloysia triphylla*)”, para obtener título profesional de Ingeniero Agroindustrial, indica que:

Las pruebas fueron llevadas a cabo en un equipo de extracción por arrastre de vapor, el cual permite controlar los parámetros operacionales de extracción, como son: presión y temperatura.

Para el planeamiento experimental se planteó el Diseño Compuesto Central Rotacional (DCCR) empleándose dos variables operacionales: Presión manométrica y tiempo de extracción del aceite de cedrón, obteniéndose 11 tratamientos de los cuales 4 son factoriales, 4 axiales y 3 centrales.

Se trabajó con presiones en el rango de 101,325 a 202,650 kPa y tiempos entre 50 y 100 minutos. Los resultados fueron evaluados en el software STATISTIC 7,0 mediante el diseño de Superficie de Respuesta empleándose un nivel de significancia de 0,05 para ambas respuestas, donde se obtuvieron los modelos matemáticos de segundo orden para el rendimiento (R), índice de refracción (IR) e índice de carbonilo (IC) los cuales fueron validados estadísticamente a través del análisis de regresión ($R^2 R = 0,9348$; $R^2 IR = 0,9628$ y $R^2 IC = 0,8745$) y ANVA (significativo en cada caso), lo cual permitió generar las superficies de respuesta y gráficos de contorno para cada variable, comprobándose que existe influencia de la presión y el tiempo, donde a mayor presión y tiempo se tiene un mayor

rendimiento e índice de refracción del producto, pero a menor presión y tiempo se tiene mayor índice de carbonilo.

Por otro lado, utilizando la técnica de superposición de los gráficos de contorno se determinaron los valores adecuados para el rendimiento, índice de refracción e índice de carbonilo (Presión = 140 a 160 kPa, tiempo 95 a 100 min); (Presión = 180 a 200 kPa, tiempo 80 a 100 min) y (Presión = 100 a 120 kPa, tiempo 50 a 60 min).

2.1.3. Local

- MARCIAL E. (2014) en la tesis: “DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE OPERACIÓN PARA LA DESTILACIÓN POR ARRASTRE DE VAPOR DE AGUA DEL ACEITE ESENCIAL DE MOLLE (*Schinus molle linneo*) EN EL EQUIPO MODULAR DE EXTRACCIÓN DE ACEITES ESENCIALES DE LA FIQM – UNSCH”, para obtener título profesional de Ingeniero Químico, indica que:

RESUMEN: Para el estudio de los efectos de las variables de operación de extracción de aceite de molle a partir de su semilla se ha seguido un diseño experimental de tres factores:

- 1) Caudal de flujo de vapor de agua inyectado, en cuatro niveles
- 2) Altura de carga de lecho, en dos niveles
- 3) Grado de molturación de la semilla de molle, en dos niveles; determinándose el tiempo óptimo de extracción. En cada uno de las combinaciones factoriales se hace un análisis exhaustivo e interpretación individual de los resultados experimentales.

Las variables óptimas para la extracción del aceite esencial de molle por arrastre con vapor de agua a nivel planta piloto para un lote 20,00 kg/batch son: flujo másico de vapor de agua mayor a 5,51 kg/h, tamaño de partícula 1,73 mm equivalente a diámetro promedio de semilla

y altura de carga de lecho equivalente a dos veces el diámetro de columna del extractor (0,54 m, columna vertical). Finalmente se presenta ecuaciones modelo para calcular el flujo másico de vapor de agua necesario bajo condiciones industriales.

- CISNEROS A.; MEDRANO T. (2009) en la tesis: “DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN DESTILADOR DE ACEITE ESENCIAL DE EUCALIPTO (*Eucalyptus globulus labill*) POR ARRASTRE DE VAPOR A NIVEL DE PLANTA PILOTO, indica que:

RESUMEN: El eucalipto se encuentra en gran cantidad en el departamento de Ayacucho, sus hojas contienen de 1,5% a 3% de aceite esencial, siendo uno de los componentes más importantes el 1,8-cineol o comúnmente llamado eucaliptol (70%-80%).

El dimensionamiento del equipo se hizo con datos experimentales de laboratorio y del taller mecánico “Holger K. Hansen”, obteniéndose para el destilador un volumen de 183 L, para el generador de vapor 57,7 L y para el condensador 4,376 L en la coraza y 1,16 L en los 13 tubos. Para la construcción del equipo se usó acero inoxidable AISI-304, se realizó en el taller mecánico “Holger K. Hansen” y las pruebas experimentales en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga. Para la metodología de evaluación se midió las temperaturas, el flujo de vapor de gas y de agua, para determinar la eficiencia del equipo.

El rendimiento del equipo utilizando 10 kg de hojas de eucalipto en la prueba experimental para la combinación de hojas jóvenes (70%) y hojas adultas (30%) con cantidad la eficiencia energética global de todo el equipo reflejó un 56,2%. El aceite esencial resultante es de color amarillo claro transparente, de olor mentolado, sabor amargo, picante y de textura aceitosa. Sus propiedades fisicoquímicas como densidad (0,907 g/ml), índice de acidez (0,92), índice

de refracción (1,4641), espectro UV, espectro R; se encuentran dentro de los parámetros designados en INDECOPI.

En cuanto a la evaluación económica el equipo costó S./ 4123,00 y el costo de producción para un batch de aceite esencial de eucalipto fue de S./ 20,10.

2.2. MATERIA PRIMA

2.2.1. El Eucalipto

El *Eucalyptus globulus labill*, con simbología “Eu” y “kalypto” vocablos de origen griego significan “bien” y “cubierto” por alusión a sus estambres y “globulus” significa “bola pequeña” refiriéndose a la forma de botón de las frutas, cuya principal característica es su perfume, se emplea habitualmente con fines medicinales. (Farga, 1988)

El eucalipto es un gran árbol originario de Australia y Tanzania. Posteriormente se expandió en toda Europa y los españoles lo trajeron a Perú. Crecen en climas cálidos y lluviosos, soporta temperaturas bajas. En cuanto a las hojas son simples y persistentes, suelen presentar un heteromorfismo de gran importancia sistemática. (Farga, 1988)

Las hojas jóvenes suelen ser opuestas por mas o menos pares y sentadas con más frecuencia que pecioladas, incluso abrazadoras o trabadas, y con el limbo perpendicular al plano definido por el tallo y su nervio medio. Su coloración suele diferenciarse de las hojas adultas debido a recubrimientos glauco-céreos o a su distinta coloración. Su consistencia es más tenue. (Farga, 1988)



Figura 1. Flores del eucalipto (*Eucalyptus globulus labill*). Fuente: Montoya (1995)

En cuanto a las flores, el género *Eucalyptus* se caracteriza por la falta de diferenciación de caliza y corola, estando sus piezas soldadas y formando un receptáculo con opérculo caedizo en la floración. A la protección que el opérculo presta a las piezas sexuales hace alusión el nombre del género, que significa “bien cubierto”. La caída del opérculo permite la expansión de los estambres que, inicialmente se encuentran doblados hacia adentro, las flores aparecen generalmente en racimos o cimas umbeliformes axilares rara vez aisladas o en pequeños grupos. Montoya (1995)

El fruto de este árbol es muy variable en la forma y tamaño de la cápsula, como en la forma de abrirse, la posición de las valvas y del disco circundante. La producción de semillas es abundante, las semillas fértiles suelen ser poliédricas, más gruesas y de diferente coloración, aunque a veces adquieren formas redondeadas aladas. (Montoya, 1995)



Figura 2. frutos del Eucalipto (*Eucalyptus globulus labill*). Fuente: Montoya (1995)

El tronco del eucalipto es muy variable, existiendo eucaliptos de porte arbóreo y otros de porte arbustivo. El tronco de los eucaliptos arbóreos puede ser recto o flexuoso, alcanzando hasta 2 metros de diámetro en la base del mismo y llegando a medir hasta unos 60 metros de altura. Muchas especies presentan una cepa fuertemente engrosada, formando un tubérculo leñoso de gran importancia en la generación y como reserva de nutrientes. (Montoya, 1995)

El eucalipto es un árbol que ha colonizado gran parte del mundo, debido a su adaptabilidad a diferentes climas. El éxito del eucalipto como especie forestal se debe en gran parte a esta adaptabilidad y también a que en condiciones donde existe gran humedad y agua disponible, este árbol presenta un crecimiento muy rápido. Las especies cultivadas más comunes, son *Eucalytus globulus* y *Eucalytus camaldulensis*, usadas para plantaciones forestales y ocasionalmente como ornamentales. Otras especies se usan más frecuentemente como árboles ornamentales, entre ellas *E. ficifolia*, con flores rojas, *E. citriodora*, con hojas con olor a limón y *E. gunnii*, cuyas ramas se usan para arreglos florales. (Montoya, 1995)



Figura 3. *Hojas jóvenes del Eucalipto (Eucalyptus globulus).*



Figura 4. *Hojas maduras del Eucalipto (Eucalyptus globulus).*

2.2.2. Clasificación botánica

Considerando el género en su posición sistemática, su clasificación botánica en la siguiente:

Reino	:	<i>Vegetal</i>
Tipo	:	<i>Fanerógamas</i>
Sub-tipo	:	<i>Angiospermas</i>
División	:	<i>Caucifloras</i>
Clase	:	<i>Dicotlenódea</i>
Orden	:	<i>Mirtiflorineas</i>
Familia	:	<i>Mirtáceas</i>
Sub-familia	:	<i>Leptospermoideae</i>
Tribu	:	<i>Leptospermeae</i>
Sub tribu	:	<i>Eucalyptenae</i>
Género	:	<i>Eucalyptus (flores apétalas)</i>
Especie	:	<i>Globulus labill</i>

Fuente: Vargas (1985)

2.2.3. Composición química

Toda la planta contiene aceites esenciales las hojas y los botones florales contienen de 1,5 – 3 % de aceites esenciales. Este es generalmente incoloro, soluble en alcohol de 95 grados, éter, cloroformo y sulfuro de carbono. El principal componente del aceite esencial es el éter óxido terpénico 1-8 cineol o eucaliptol, constituyendo el 70 % – 80 %. Farmacopea Nacional Argentina (1992)

Además, contiene:

- Hidrocarburos monoterpénicos con 10 % de a y b-pineno, g-hiperpineno, p-cimeno,

canfeno, a-felandreno, b-felandreno, limoneno, mirceno.

- Hidrocarburos sesquiterénicos con 1 % de aromadendreno, b-cariofileno, a-gurjuneno.
- Alcoholes monoterpénicos de borneol, linalol, terpineno, a-terpienol con 1,2 % de transprocarveol, geraniol.
- Alcohol sesquiterpénico con 6,9 % de globulol; epiglolulol, trazas de eudesmol, ledol, viridflorol.
- Aldehídos alifáticos como butírico, valeriánico, caproico.
- Citronelal
- Carvona
- Acetato de citronelilo
- Acetato de geranilo
- 3,6 % de acetato de a-terpinilo
- Otros fitoconstituyentes de la hoja son:
 - Flavonoides
 - Un heterósdo fenólico
 - Ácidos
 - Taninos

Fuente: Farmacopea Nacional Argentina (1992)

2.3. OTRAS VARIEDADES DE EUCALIPTO

- **Eucalipto aromático**



Figura 5. Eucalipto aromático (*Eucalyptus citrodora* Hook).

Nombre científico: *Eucalyptus citrodora* Hook

Nombre común o vulgar: eucalipto aromático, Gomero de olor a limón.

Es un árbol perennifolio de gran altura, con cortezas blancas y de una tonalidad azulada, de frutos en forma de cápsula urceolada. Las hojas desprenden un olor a limón y es utilizado en perfumería y para la preparación de aceites.

El tipo de cultivo es al aire libre y en pleno sol. El suelo puede ser de tierra silícica o suelo ligero, la siembra directa es en otoño o primavera (Revoredo, 1995).

- **Eucalipto rojo**



Figura 6. Eucalipto rojo. Fuente: Revoredo (1995)

Nombre científico o latino: *Eucalyptus ficifolia* F. J. Muell

Nombre común o vulgar: eucalipto rojo, eucalipto de flores rojas.

Este árbol se origina en el sureste de Australia, su crecimiento se reduce según su género, alcanzando apenas los 9 metros de altura y su porte es redondeado. El crecimiento de estas especies es lento comprobado con otros eucaliptos.

Sus hojas son coriáceas, verde oscuras, lanceoladas, ensanchadas en su base, sobre tallo rojizo. Produce panículas de flores con muchos estambres de color rojo oscuro a pálido, muy llamativas.

El cultivo de esta variedad es mucho más exigente que otros. Su propagación es mediante semillas e injertos de mantener inalterable el color, son árboles decorativos u ornamentales (Revoredo, 1995).

- **Eucalipto cangrejo**

Nombre científico: *Eucalyptus cornuta* Labill

Nombre común o vulgar: eucalipto cangrejo

Su origen se basa en el Sur Oeste de Australia occidental, este árbol puede alcanzar hasta 23 metros de altura. El tronco tiene una corteza persistente oscura casi negra, profundamente surcada. Sus hojas juveniles son opuestas, pecioladas de anchamente lanceoladas a orbiculares, de color verde oscuro. Las hojas adultas son alternas, pecioladas, estrechamente lanceoladas, de color verde oscuro brillante por ambas caras.

Sus flores umbelas axilares de 5-15 flores y sus frutos es una cápsula sentada, campanulada de 8mm de diámetro y con 3 valvas (Revoredo, 1995).

- **Eucalipto decorativo**



Figura 7. Eucalipto decorativo (Eucalyptus gunni Hook. F.). Fuente: Revoredo (1995)

Nombre científico: *Eucalyptus gunni* Hook. f.

Nombre común o vulgar: Gomero de la sidra, Eucalipto decorativo

Su origen es Australia, Tasmania. Es un árbol perennifolio, monoico, que puede sobrepasar los 30 m de talla. Son de corteza lisa, verde y blanca, caediza. Sus hojas son plateadas de jóvenes, azul grisáceas de adultas, las inflorescencias tienen umbelas axilares con 3-10 flores. Los frutos están en una cápsula pedicelada, hemisférico o acampanado de 7-10 mm

de diámetro con 3-5 valvas triangulares. Las hojas jóvenes se utilizan como complemento de ramos florales, como árbol de alineación es muy decorativo. Prospera en casi todo tipo de suelos y resistente a las bajas temperaturas hasta -18°C (Revoredo, 1995).

2.4. ACEITES ESENCIALES

2.4.1. Definición

Los aceites esenciales son mezclas de componentes volátiles, producto del metabolismo secundario de las plantas; en su composición química entran hidrocarburos del grupo de los terpenos, junto con compuestos oxigenados de bajo peso molecular (alcoholes, aldehídos, cetonas, ésteres y ácidos), que son los que les dan a los aceites esenciales el aroma que los caracteriza (Bandoni, 2000).

Los metabolitos secundarios volátiles tienen una distribución restringida en la naturaleza, la cual se limita a ciertas plantas llamadas “aromáticas”, en algunos casos, a solo algunas especies o subespecies, por lo que son consideradas como una manifestación individual del organismo que las contiene y se les atribuye una gran variedad de funciones específicas, por lo que éstos deben tener algún significado biológico, ya que son biosintetizados y biodegradados (Bandoni, 2000).

Los aceites esenciales se acumulan en estructuras secretoras especializadas ubicadas en diferentes partes de la anatomía de las plantas; por ejemplo, se biosintetizan en los tricomas glandulares (hojas) o en glándulas (cáscaras), en las plantas se pueden ubicar en general, en pelos glandulares del tallo y hojas (menta, lavanda, salvia), en las células modificadas del parénquima como en las piperáceas (pimienta), en tubos oleíferos (canela), en tubos esquizógenos (anís, hinojo), o canales lisígenos (pino), entre otros (Bandoni, 2000).

2.4.2. Composición química de los aceites esenciales

La composición química de los aceites esenciales es muy compleja, los metabolitos secundarios volátiles se pueden clasificar en base a los grupos funcionales que contienen sus moléculas, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1

Grupos funcionales de las moléculas constituyentes de los aceites esenciales

GRUPO	NATURALEZA	EJEMPLO
HIDROCARBUROS	Terpénicos	Limoneno, α -terpineno
	Aromáticos	Cumeno, ρ -Cimeno
	Sesquiterpénicos	trans- β -Cariofileno
ALDEHÍDOS	Monoterpénicos	Citral
	Alifáticos	Nonanal, Octadenal
	Aromáticos	Cinamaldehido
ALCOHOLES	Monoterpénicos	Geraniol, Citronelol
	Alifáticos	3-Decanol
	Sesquiterpénicos	Espatulenol, Cedrol
	Aromáticos	Alcohol bencílico
FENOLES	Aromáticos	Timol, carvacrol

Fuente: (Díaz, 2007)

Según Bandoni (2000), respecto a la formación y evolución de los aceites esenciales en las plantas es necesario tener en cuenta algunos aspectos externos, que pueden afectar la composición química de las esencias de manera cualitativa y cuantitativa, entre ellos, se pueden destacar los siguientes: condiciones geobotánicas (clima, altitud, tipo de suelo, pluviosidad), labores culturales (uso de fertilizantes, abonos y pesticidas), parte y estado de

desarrollo fenológico de la planta, época de recolección, modo de almacenamiento y manejo del material vegetal (fresco, seco, fermentado, tratamiento postcosecha), modo de obtención del aceite (destilación o expresión).

2.4.3. Propiedades fisicoquímicas de los aceites esenciales

Tienen la propiedad en común, de generar diversos aromas agradables y perceptibles al ser humano, pero siempre pronunciados y penetrantes, que nos recuerdan el olor del vegetal del que provienen. Poseen un color en la gama del amarillo, hasta ser transparentes en algunos casos. Tienen sabor cáustico, acre e irritante y a veces aromático, dulce y delicado (Cerpa, 2007).

Según su consistencia los aceites esenciales se clasifican en esencias fluidas, bálsamos y oleorresinas. Las esencias fluidas son líquidos volátiles a temperatura ambiente. Los bálsamos son más espesos, son poco volátiles y propensos a sufrir reacciones de polimerización. Las oleorresinas tienen el aroma de las plantas en forma concentrada y son típicamente líquidos muy viscosos o sustancias semisólidas. A condiciones ambientales, son líquidos menos densos que el agua, pero más viscosos que ella. Son solubles en los disolventes orgánicos comunes. Casi inmiscibles en disolventes polares asociados (agua, amoníaco). Tienen propiedades de solvencia para los polímeros con anillos aromáticos presentes en su cadena. (Cerpa, 2007).

Los aceites esenciales no son inocuos mientras la dosis suministrada no supere los límites de toxicidad. Y son aceptados como sustancias seguras (GRAS) por la Agencia de Drogas y Alimentos (FDA) de E.E.U.U. (Cerpa, 2007)

2.4.4. Clasificación de los aceites esenciales

Según Cerpa (2007), los aceites esenciales se pueden clasificar de la siguiente manera:

2.4.4.1. Por su composición elemental

- **Aceites esenciales pobres en oxígeno:** (ricos en terpenos) Como los aceites esenciales de trementina, limón, bergamota, romero, eucalipto, Ciprés (*Cipreses sempervirens*), tomillo, laurel, naranja, etc.
- **Aceites esenciales ricos en oxígeno:** Como los aceites esenciales de anís, hinojo, comino, menta, manzanilla, rosas, violeta, etc.
- **Aceites esenciales sulfurados:** Como los aceites esenciales de ajo, cebolla, mostaza, etc. (Cerpa, 2007).

2.4.4.2. Por su punto de Ebullición

- **Aceites esenciales fijos:** Son comúnmente llamados “fijadores” su frecuencia ondulatoria es muy amplia, y su peso molecular generalmente elevado. Se incluye en este grupo a los productos balsámicos y a los aceites resinosos. (Cerpa, 2007)
- **Aceites esenciales persistentes:** Son más volátiles que los anteriores. Su acción dura varios días e imprime un carácter especial a los perfumes. (Cerpa, 2007)

2.4.4.3. Por su origen

- **Aceites esenciales naturales:** Se obtienen directamente de la naturaleza, generalmente son de origen vegetal, aunque pueden ser de origen animal. Pueden ser productos de secreción o de algunos estados patológicos. (Grunfeld, 1960)
- **Aceites esenciales sintéticos:** Son productos de síntesis orgánicas y pueden obtenerse a partir de los componentes obtenidos de los diversos aceites esenciales, como de compuestos ajenos a estos. Pertenecen a este grupo las yanonas con olor a violeta, que

son muy empleadas en perfumería. (Grunfeld, 1960)

- **Aceites esenciales artificiales:** Son la mezcla de los dos anteriores, son de aroma análogo al de los aceites naturales. Se les clasifica en dos subgrupos: los productos extraídos a partir de aceites esenciales; caso de geraniol, acetol y mentol y los obtenidos por síntesis química, caso de la vainilla, la hemotropina. (Grunfeld, 1960)

2.4.5. Constitución de los aceites esenciales

Según Braverman (1980), los aceites esenciales están constituidos por muchas clases de compuestos químicos, algunos con un solo componente en alto porcentaje y otros por mezclas complejas de compuestos acíclicos, aromáticos, eterocíclicos, y sus derivados oxigenados, etc.

Químicamente la mayor parte de todos los aceites esenciales consisten en terpenoides, sus derivados oxigenados y una pequeña cantidad de residuos no volátiles (estearoptenos).

Dada esta definición, los carotenoides pertenecerían a este grupo, de hecho, numerosos textos clasifican a los carotenoides como un grupo especial de sustancias terpenoides.

Algunos compuestos aromáticos de los aceites esenciales: aldehídos y esteroides tienen una estructura lineal. Pero se da el caso, de que todos los aceites esenciales pertenecen a la clase terpenoides, cuyos miembros más simples son los terpenos de fórmula general $C_{10}H_{16}$.

Según esta clasificación la vitamina A es un diterpeno y los carotenoides, que tienen todos 40 átomos de carbono, tetraterpenos. El caucho, un polímero mayor con estructura isoprenoide, sería un politerpeno (Cerpa, 2007).

2.4.5.1. Terpenoides

Los terpenos forman una amplia familia de compuestos químicos; estrictamente hablando,

son hidrocarburos cíclicos y acíclicos cuyas formulas moleculares son múltiplos del isopreno C_5H_8 .

Generalmente se extiende tal definición para incluir alcoholes, aldehídos, cetonas y otros derivados, que poseen el mismo esqueleto carbonado del hidrocarburo terpenico fundamental; semejantes compuestos son llamados más propiamente terpenoides, término que se aplica también a los terpenos propiamente dichos (Kubeczka, 2002).

- **Monoterpenoides:** Estas sustancias constituyen un importante grupo de hidrocarburos, alcoholes y cetonas, que son los componentes mayoritarios de los aceites esenciales obtenidos de las hojas, raíces y cortezas de varias plantas. Pueden subdividirse en tres clases según posean o no anillos:
- **Monoterpenoides Acíclicos:** La estructura de los compuestos incluidos en este grupo se basa, salvo algunas excepciones, en el esqueleto del 2,6-dimetil octano.
- **Monoterpenoides Monocíclicos:** La gran mayoría de estos compuestos poseen esqueletos carbonados derivados del p-mentano.
- **Monoterpenoides Bicíclicos:** Los principales hidrocarburos y derivados oxigenados monoterpénicos bicíclicos poseen esqueletos bicarbonados del tipo de los hidrocarburos saturados: Tuyano, pinano, canfano, etc. El α -pineno es uno de los más importantes por su gran disponibilidad y el gran número de productos obtenidos a partir de él. Está muy distribuido en la naturaleza y es uno de los componentes principales de los aceites esenciales (Kubeczka, 2002)

2.4.5.2. Sustancias oxigenadas

Son las primeras portadoras de los olores específicos de los aceites esenciales. Se trata principalmente de alcoholes, aldehídos, cetonas y esterés, entre estas sustancias hay

compuestos saturados y no saturados, alifáticos y aromáticos, terpénicos y sesquiterpénicos. (Braverman, 1980)

2.4.5.3. Estearoptenos

Después de su obtención por destilación en vapor en todos los aceites esenciales se encuentra una cantidad considerable de residuo no volátil; dejando en reposo a los aceites mucho tiempo, se separan de las mismas sustancias semejantes a la cera. Estos residuos reciben el nombre de estearoptenos. Algunos de los estearoptenos son probablemente derivados de las sustancias flavonoides normalmente existentes en los tejidos vegetales en íntima proximidad con los sacos o glándulas que contienen aceite. (Braverman, 1980)

2.4.6. Bioquímica de los aceites esenciales

Los aceites esenciales ricos en oxígeno muchas veces llegan a ser inactivos, su índice de refracción es generalmente elevado, recién obtenidos los aceites esenciales son de reacción neutra, pero con el tiempo pasan a ácida. Por lo general los aceites esenciales no se mezclan con el agua, pero se disuelven en ella lo suficiente como para comunicarle su olor, en cambio son solubles en alcohol, éter y la mayoría de disolventes orgánicos. (Braverman, 1980)

2.4.7. Aplicaciones de los aceites esenciales

El tipo de aceite esencial y su calidad, determinan en qué producto final será incorporado un aceite. Los aceites esenciales son ampliamente utilizados como materia prima en diferentes tipos de industria, cosmética, alimenticia, bebidas, textil, etc., mientras que otras industrias pueden usar productos aislados de esencias, como es el caso de la industria farmacéutica (Biocomercio Sostenible, 2003).

La tabla 2 proporciona una visión general del uso del aceite esencial en las diferentes ramas de consumo.

Tabla 2

Industrias usuarias de productos aromáticos naturales y aceites esenciales

INDUSTRIAS	APLICACIONES
Alimenticia	Salsas, condimentos, bebidas refrescantes y enlatados
Licorera	Aperitivos y saborizantes
Cosmética	Perfumes, dentífricos, cremas, lociones
Farmacéutica	Veterinaria, antisépticos, analgésicos, aromaterapia y homeopatía.
Uso doméstico	Desodorantes, desinfectantes del ambiente y jabones.
Agroquímica	Bioinsecticidas y aleloquímicos
Textil	Elaboración de enmascaradores de olores y tratamiento con mordientes después del teñido
Petroquímica y Minería	Utiliza esencias o terpenos derivados de ellas como vehículos flotantes y lubricantes.
Pinturas	Enmascaradores de olores disolvente biodegradable.
Química Fina	Precursores químicos, por ejemplo, citral, safrol, trementina.

Fuente: Díaz (2007).

2.4.8. Localización en las plantas

Los aceites esenciales se extraen de los desechos del metabolismo vital en las plantas. Están localizados en diferentes partes de la planta, variando con ello las cantidades y el tipo de aceite. Se encuentran en raíz, tallo, hojas, frutos, flores, semillas, etc. Otros factores que influyen son la familia, variedad, condiciones de suelo, clima y cultivo, luminosidad, etc. Estas esencias están en células especiales, bolsas o canales de secreción, células terminales de las vellosidades, sobre la superficie de las hojas, también pueden estar en glándulas situados en corteza, hojas, pétalos, tallos, etc. Su olor y sabor es característico de la parte de donde provienen. (Díaz, 2007)

Ejemplo de Localización:

- a) Hojas: Eucalipto, yerba luisa, lúpulo, orégano.
- b) Frutos: Naranja, toronja, fresa.
- c) Semillas: Comino, hinojo, anís.
- d) Flores: Manzanilla, rosas, jazmín.
- e) Raíces: Jengibre, espárrago de Argelia.
- f) Tallo: Canela.

Características físicas:

- a) Olor pronunciado y penetrante.
- b) Sabor caustico, irritante y a veces aromático.
- c) Volátiles, de aspecto oleoso, líquidos a temperatura ambiente, solubles en alcohol absoluto, en éter de petróleo, en el sulfuro de carbono y demás disolventes orgánicos; insolubles en agua.
- d) Peso específico: 0,8 – 2,0 a temperatura de 15°C.
- e) Punto de ebullición: 80 – 300°C.

f) Índice de refracción: 1,45 – 1,46

Se alteran fácilmente bajo la acción de la luz, tornándose oscuros o amarillos y modificándose su perfume. Esto se debe a los terpenos.

Las características físicas de solubilidad y volatilidad de los aceites esenciales son muy importantes, como en el caso de la preparación de mezclas de perfumería donde deben utilizarse esencias que tengan características semejantes. (Díaz, 2007)

2.4.9. Constituyentes de aceite esencial

Los componentes principales de aceites esenciales se muestran en la figura 8, de los cuales es evidente que la mayoría de aceites esenciales consten de hidrocarburos alicíclicos y aromáticos, ésteres, terpenos, fenoles, aldehídos, ácidos, alcoholes, cetonas, y ésteres. Entre estos, los compuestos oxigenados (los alcoholes, los ésteres, éteres, aldehídos, cetonas, fenoles) son la fuente principal de olor. Son más estables porque evitan las influencias de oxidación y resinificación que otros componentes.

Por otra parte, los constituyentes no saturados como monoterpenos (C_w) y sesquiterpenos (C₁₅) tienen la tendencia oxidar o resinificarse en presencia de aire y la luz. Estos compuestos no saturados más frecuentes derivan biológicamente del ácido mevalónico. El conocimiento de componentes individuales y sus características físicas, como punto de ebullición, estabilidad térmica y la relación de temperatura-presión del vapor, es de vital importancia en el desarrollo de tecnología de aceites esenciales (Mantero, 2007).

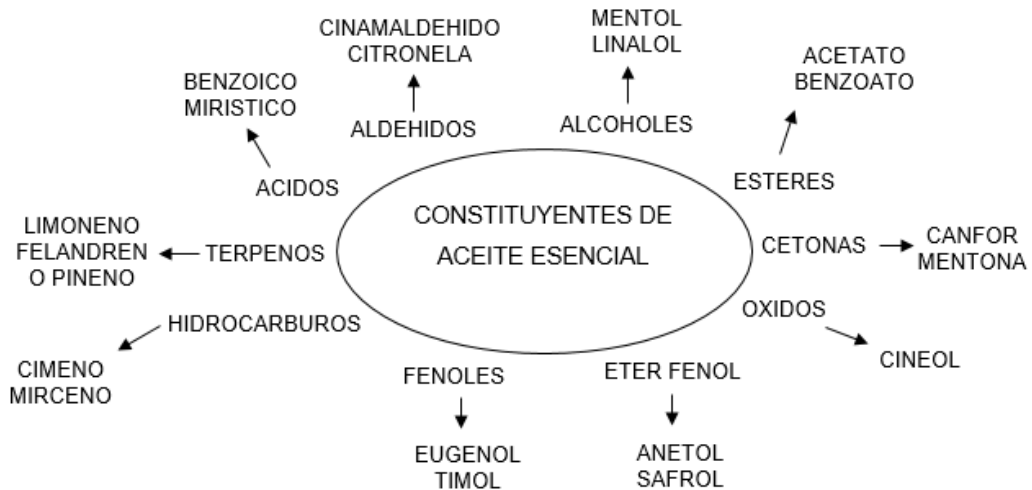


Figura 8. Diversos grupos químicos presentes en aceites esenciales. Fuente: Mantero (2007)

2.5. ACEITE ESENCIAL DE EUCALIPTO

El aceite esencial de eucalipto es extraído a través de la destilación por arrastre de vapor de las hojas de los árboles que crecen de forma silvestre en los andes peruanos, son árboles no cultivados (orgánicos) que viven a más de 2500 m.s.n.m.

Este aceite esencial es un potente antiviral y bactericida, alivia los síntomas de las enfermedades de vías respiratorias. Por eso es un protector durante las epidemias de gripe. La pulverización de una solución del 2% de aceite de eucalipto mata entre un 70 y un 100% de los estafilococos del aire, según precisa Jean Valnet (1990), parece ser que produce ozono en el que las bacterias no pueden vivir. Es antiséptico y regenerativo de los tejidos. Se utiliza en masajes para aliviar dolores reumáticos y musculares.

2.5.1. Composición química del aceite esencial de eucalipto

Tabla 3

Composición del aceite esencial de Eucalipto

COMPONENTE	FORMULA MOLECULAR	% EN MASA
1-valeraldehido	C ₅ H ₁₀ O	1,30
α-pineno	C ₁₀ H ₁₆	1,91
Canfeno	C ₁₀ H ₁₆	0,42
1,8-CINEOL	C ₁₀ H ₁₈ O	77,53
α-fenaldreno	C ₁₀ H ₁₆	8,54
α-terpinol	C ₁₀ H ₁₈ O	8,48
Piperitona	C ₁₀ H ₁₆ O	1,82
		100,00

Fuente: Vargas (1985)

2.5.2. Propiedades físicas del aceite esencial de eucalipto

- Líquidos a temperatura ambiente
- Volátiles
- Recién destilados son incoloros o ligeramente amarillentos
- Densidad inferior a la del agua
- Alto índice de refracción
- Muy poco solubles en agua, pero le comunican el aroma
- Solubles en alcohol de alto porcentaje
- Soluble en aceites fijos o grasas

2.5.3. Aplicaciones y usos del aceite esencial de eucalipto

- En enfermedades de vías respiratorias; eficaz en el tratamiento de catarro, resfriado, gripe, asma, bronquitis, dolor de garganta, faringitis, tos, fiebre, sinusitis, rinitis, tópicos fungicidas (candida); expectorantes, anti-inflamatorios; para la diabetes; desinfectante de heridas y otras afecciones de la piel como aftas bucales, herpes, acné y gingivitis; en el tratamiento de las articulaciones y músculos como artritis, reumatismo, artrosis, distensiones y desgarros y en el tratamiento del mal aliento.
- En la industria cosmética el aceite esencial de eucalipto es utilizado por sus innumerables propiedades. Además de ser un buen antiséptico, es un componente muy aromático lo que determina que aparezca en la composición de numerosos productos como champús para la caspa, dentríficos, jabones, pomadas, lociones, ambientadores, etc.
- En la industria química como un excelente insecticida, fungicida y repelente de insectos y parásitos.
- En el cuidado de la piel, el aceite de eucalipto aumenta la circulación sanguínea cutánea y es formidable para las manchas, los furúnculos y los granos. Se aplica puro en cantidades ínfimas en la zona afectada, aunque si se usa muy concentrado puede irritar la piel. También resulta demasiado fuerte para añadirlo en recetas para el cutis; ahora bien, una gota mezclada con una cucharada de aceite de jojoba constituye un práctico aceite de masaje antiséptico para espalda y cutis con manchas.
- El aceite esencial de eucalipto es un antibiótico y antiinflamatorio por naturaleza y, por tanto, posee una amplia gama de aplicaciones medicinales. En baños e infusiones para casos de cistitis, en compresas para los herpes, friccionado con esponja para reducir la fiebre. Y como analgésico aplicado en compresas en casos de neuralgia, reumatismo y dolores musculares. (Inkanatural, 2008)

2.5.4. Toxicología del aceite esencial de eucalipto

- El consumo prolongado o en forma muy concentrada, provoca irritaciones de las mucosas llegando inclusive a producir lesiones atróficas debido a su efecto vasoconstrictor.
- Un estudio realizado en Queensland, Australia (de donde es originario este árbol) sobre intoxicaciones por aceite de eucalipto en menores de 14 años revela que sería menos tóxico que lo que se creía anteriormente y que los síntomas no están relacionados con las dosis ingeridas. Los principales síntomas fueron vómitos y decaimiento.
- Es muy importante no confundir la hoja de eucalipto con su aceite esencial. Este último es tóxico a dosis elevadas (puede ser fatal en dosis que varían entre los 3,5 y los 21 ml). Lo recomendable es ingerir de 1 a 2 gotas en medio litro de agua. La hoja en cambio no lo es. Pensemos que la hoja contiene un 3 % del aceite esencial como máximo y por lo tanto deberíamos ingerir entre 100 g y 700 g de hoja para producir el efecto tóxico. Un té se prepara con 2 a 3 g de hierba. (Farga, 1988)

2.6. MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE ACEITES ESENCIALES

Los principales métodos extractivos empleados a escala industrial para los aceites esenciales más comunes, se basan en el arrastre del aceite esencial contenido en las plantas con vapor de agua. Existen otros métodos que, si bien en lo referente a la calidad del producto son excelentes, sus costos de inversión y operativos son elevados y no se justifica su aplicación para la gran mayoría de los aceites esenciales.

Los métodos alternativos son: expresión, extracción con solventes volátiles, extracción líquido - sólido asistida por microondas (MWE), enfleurage y extracción con fluidos supercríticos. (Cárdenas, 2014)

2.6.1. Destilación con vapor de agua

La destilación con vapor de agua es un tipo especial de destilación que se basa en el equilibrio de líquidos inmiscibles y es empleado para separar sustancias orgánicas insolubles en agua y ligeramente volátiles de otras no volátiles que se encuentran en la mezcla, como resinas o sales inorgánicas. Cuando se tienen mezclas de líquidos que no son miscibles entre sí, se tiene un tipo de destilación que sigue la ley de Dalton sobre las presiones parciales. (Cárdenas, 2014)

Como resultado de este comportamiento y cuando uno de los componentes es agua, al trabajar a presión atmosférica se puede separar un componente de mayor punto de ebullición que del agua a una temperatura menor de 100 °C. Debido a lo anterior, con esta técnica se pueden separar sustancias inmiscibles en agua y que se descomponen a su temperatura de ebullición o cerca de ella, por lo que se emplea con frecuencia para separar aceites esenciales naturales que se encuentran en hojas, cáscaras o semillas de algunas plantas (té limón, menta, canela, cáscaras de naranja o limón, anís, pimienta, etc). Una descripción general de esta técnica consiste en empacar el material aromático de la planta en el tanque del destilador y una cantidad suficiente de agua es añadida y llevada hasta su punto de ebullición; alternativamente el vapor de la caldera es inyectado en la carga del destilador. Debido a la influencia de agua caliente y vapor, el aceite esencial es liberado de las glándulas de aceite en el tejido fino de la planta. La mezcla del vapor de agua-aceite es arrastrada hacia el condensador donde es condensada por el enfriamiento indirecto con agua de refrigeración. (Cárdenas, 2014)

Del condensador el destilado desemboca en un separador donde el aceite se separa automáticamente del agua del destilado formando dos fases de líquidos inmiscibles, la fase que se encuentra en la parte superior es el aceite esencial y en la parte inferior es agua con

algunos componentes hidrosolubles. (Cárdenas, 2014)

2.6.2. Desventajas y ventajas de destilación con vapor de agua frente a otras técnicas de extracción

2.6.2.1. Ventajas

- Productos libres de solventes orgánicos

El método de destilación con vapor usa agua como el agente de separación. Este tipo de proceso provee productos naturales libres de solventes orgánicos que puede ser usado directamente en otros procesos sin la necesidad de procesos adicionales de separación.

- Alta Capacidad de Procesamiento

En destilación con vapor se puede trabajar con cargas altas de materia prima (Tn/día).

- Bajos Costos de Inversión

El equipo de destilación con vapor de agua es barato, flexible y fácil de construir. Hay una variedad grande de materiales para su construcción porque el equipo de destilación con vapor opera a condiciones ambientales, no es necesario construir recipientes de presión.

- Los conocimientos técnico Disponibles

La destilación con vapor es una tecnología muy conocida. El procedimiento operativo es lo mismo para destilar matrices herbáceos o líquidos. No es necesario pedir licencias o permiso o comprar la tecnología para destilar una matriz herbácea. (Cárdenas, 2014)

2.6.2.2. Desventajas

- Degradación Térmica de Productos

Si no se opera el equipo adecuadamente la temperatura interna del lecho puede superar los 98° C provocando que los aceites esenciales sufran degradación térmica dando lugar a la formación de oligómeros y compuestos químicos complicados que disminuyen la durabilidad, calidad y cambio en la percepción organoléptica. Por ejemplo, en la técnica de

hidrodestilación es común que ocurra la hidrólisis de aceites esenciales porque el material herbáceo está inmerso en agua a diferencia de otras técnicas como destilación con vapor húmedo y seco, el material a extraer está en contacto con vapor de agua. Por esta razón la hidrodestilación es muy pocas veces usada.

- Alto consumo de energía

Como la materia prima debe ser calentado a la temperatura de ebullición, el consumo de energía es alto. La mayor contribución para el consumo de energía es causada por el calentamiento de la masa del equipo. De hecho, la carga real de calor es muy grande cuando es comparado para carga de calor ideal (el aislamiento, reciclado de agua condensado, vacío), y muchas modificaciones mecánicas y operacionales se ha propuesto para reducir el consumo global de energía (la vaporización de aceite esencial). (Cárdenas, 2014)

2.7. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DESTILACIÓN

- Tiempo de secado del material: La materia prima vegetal húmedo generan hongos que transfieren un olor terroso, mohoso al aceite esencial, 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 de destilación, la salida de aceite esencial es insignificante y el exceso de vapor de agua causa una disminución en el rendimiento de extracción por la solubilidad o emulsión del aceite esencial.
- Presión del vapor: Si la presión del vapor de arrastre es muy alta (máximo 6 psi), se presenta hidrólisis en el aceite disminuyendo su calidad y su 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

acanalado disminuyendo el rendimiento del aceite, el factor de empaquetamiento 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.
- Tiempo de residencia en el florentino: Sobre todo, si el diámetro es muy pequeño se produce arrastre del aceite. (Cárdenas, 2014)

2.8. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE DESTILACIÓN POR ARRASTRE DE VAPOR

La materia prima (la matriz inerte) es cargada en la columna del destilador para formar un lecho fijo compacto. Antes de cargar, los materiales sólidos pueden ser cortados o triturados. El vapor es inyectado usando a un distribuidor interno en el fondo del destilador, con la suficiente presión para vencer la resistencia hidráulica del lecho. La caldera de vapor está fuera del destilador. Como el vapor fluye arriba a través del lecho, la materia prima se calienta y libera los solutos volátiles (oils essential). Estos son vaporizados y transportados por el vapor hacia el tope del destilador. Cuando el vapor deja el destilador es condensado y enfriado a la temperatura del ambiente por medio de un condensador (intercambiador de calor).

La mezcla líquida condensada forma dos fases inmiscibles que son separadas en un decantador dinámico. Este decantador es conocido como Florentino en los procesos de destilación de aceite esencial. El agua condensada puede ser recirculada hacia el destilador o a la caldera dependiendo del consumo de vapor. Con materias primas herbáceas, el residuo

puede ser utilizado como combustible para generar vapor en una caldera especial pero la desventaja está en la contaminación del ambiente por los humos generados. La destilación por arrastre con vapor seco es preferida a la escala industrial sobre las otras variantes de destilación con vapor, porque las calderas estándar generan vapor a presiones moderadas fáciles de controlar. Este vapor está saturado, pero cuando es inyectado hacia el destilador, sufre una expansión isoentálpica y se vuelve sobrecalentado. (Cárdenas, 2014)

III. METODOLOGÍA

En los puntos siguientes trataremos aspectos como preparación de la materia prima antes y después de la recolección, evaluación preliminar del equipo modular de extracción de aceites esenciales con enfoque a pérdida de energía térmica; finalmente se hará la evaluación de variables de operación como flujo de vapor de agua inyectado, tamaño de partícula de la muestra y altura de carga del lecho para la extracción de aceite esencial de Eucalipto.

3.1. UBICACIÓN Y LUGAR DE INVESTIGACIÓN

Los estudios de laboratorio del trabajo de investigación se realizaron en los ambientes de los laboratorios de Transferencia de Masa e Hidrocarburos y Tecnología Química; laboratorios que pertenecen a la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, empleando el equipo modular piloto de extracción de aceites esenciales por arrastre de vapor de agua. Dicha área de estudio se encuentra situada en la provincia de Huamanga, departamento de Ayacucho, situada a una altitud de 2850 msnm.

3.2. TIPO Y NIVEL DE ESTUDIO

La investigación realizada fue de tipo aplicativo y el nivel de estudio fue experimental, ya que se realizó induciendo situaciones y se manipularon las variables independientes deliberadamente. En este caso específico, el estudio tiene la finalidad de establecer los

parámetros propicios para obtener el aceite esencial de Eucalipto (*Eucalyptus globulus*), utilizando la operación unitaria de destilación, en un proceso batch. El diseño de investigación es multifactorial porque se manipuló distintas variables en el proceso de obtención del aceite esencial.

3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA

La población está conformada por las hojas de *Eucalyptus Globulus* “Eucalipto”, y la muestra seleccionada para la presente investigación se tomó por muestreo aleatorio simple en el Barrio de Huatatas distrito de Andrés Avelino Cáceres Dorregaray, provincia de Huamanga, departamento de Ayacucho.

3.4. MATERIALES Y EQUIPOS

3.4.1. Materiales

- Embudo de decantación, 1000 mL
- Soporte universal, 1 unidad
- Pinzas, 2 unidades
- Espátula, 1 unidad
- Pipeta volumétrica de 10 mL, 1 unidad
- Probetas de 25mL, 50 mL, 100 mL, 250 mL.
- Botellas color ámbar de 100 mL, 10 Unidades.

3.4.2. Equipos

- Equipo modular de extracción de aceites esenciales
- Generador de vapor
- Compresora
- Balanza analítica: Capacidad 120 g, precisión 0,0001 g, burbuja de nivel y pies regulables,

urna de cristal con puertas deslizables y pesada en gramos.

- Balanza mecánica: Marca Adam Equipment, modelo PGW 2 502 e, capacidad 2500 g, precisión 0,01 g, burbuja de nivel y pies regulables.
- Estufa: Marca VWR International, eléctrica por convección forzada, interior de acero inoxidable, incorpora 2 bandejas (rejillas), tensión 220 VAC, frecuencia 50 Hz, Regulador de lectura digital.
- Cronómetro, 1 unidad.

3.4.3. Materia prima e insumos

- Eucalipto
- Agua

3.5. DISEÑO METODOLÓGICO

3.5.1. El método de la sección dorada

Uno de los métodos más efectivos para optimizar problemas de una o más variables es conocido como sección dorada o sección Aurea. El método se basa en la colocación de puntos de búsqueda simétricos, de tal manera que, en cada iteración, el punto que se conserva sirve como base para la selección del nuevo punto, el cual a su vez debe conservar la simetría original, pero acotando la solución óptima dentro de un intervalo de búsqueda menor.

La idea básica es economizar el número de evaluaciones de función y acotar la solución óptima en intervalos anidados sucesivos. Esto se logra evaluando la función objetivo $f(x)$ en dos puntos interiores de cada intervalo: l (lado izquierdo) y r_i (lado derecho) contenidos en $[a,b]$ y eliminando ya sea $[a,l]$ o $[r_i,b]$ del problema, dependiendo de que zona sea la que contenga el punto de los evaluados. La clave del método es que el punto interior que permanece sin eliminar, l o r_i , puede usarse para la siguiente iteración. (Jiménez, 2003)

Tabla 4

Diseño de la extracción de aceite esencial de eucalipto

FACTOR (X)	TAMAÑO DE PARTICULA	ALTURA DEL LECHO	PORCENTAJE DE FLUJO DE VAPOR DE AGUA	TIEMPO
1	10 cm	15 cm	50 %	30 minutos
2	5 cm	30 cm	60 %	45 minutos
3	2,5 cm	45 cm	80 %	60 minutos
4	1,25 cm	60 cm	90 %	75 minutos

Donde:

X: representa las variables independientes

Y: los niveles en cada variable evaluada

La estrategia del método a utilizar consiste en la búsqueda univariada, que consiste en trabajar sólo con una variable a la vez, mientras que las otras se mantienen constantes. En cuanto al nivel de las variables independientes fueron consignadas:

TAMAÑO DE PARTICULA: Para el acondicionamiento de la materia prima, aproximadamente el tamaño de las hojas enteras es de 10 cm entonces se utilizó hojas enteras, hojas cortadas a la mitad, hojas cortadas a la tercera parte y cortadas a la cuarta parte.

ALTURA DEL LECHO: El equipo modular de extracción de aceites esenciales tiene un tanque de aproximadamente 60 cm y de acuerdo a las limitaciones se tomó la como la máxima altura (60 cm), la mitad de la altura (30 cm), la cuarta parte de la altura (15 cm), y las $\frac{3}{4}$ partes de la altura máxima (45 cm).

PORCENTAJE DE FLUJO DE VAPOR: Evidentemente una buena circulación de flujo de vapor de agua a través de los intersticios del lecho es determinante sobre el rendimiento, es decir a mayor flujo de vapor de agua, mayor es la velocidad de extracción. En este punto se evaluó el efecto sobre el rendimiento del flujo de vapor de agua alimentado a la columna de extracción en cuatro niveles.

TIEMPO: El tiempo óptimo de operación en la extracción de aceite esencial de eucalipto desde la perspectiva económica se determinó en cuatro tiempos (30 min, 45 min, 60 min, 75 min). Seguir extrayendo por encima de ese tiempo no es beneficioso económicamente porque el incremento de rendimiento de proceso de extracción es insignificante.

3.6. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La metodología que se utilizó en la investigación es la siguiente:

- Actividades de obtención de la muestra
- Ensayos preliminares.

Tabla 5

Ensayos preliminares para la destilación de aceite esencial de Eucalipto

ENSAYO	TAMAÑO DE PARTÍCULA	ALTURA DE LECHO	PORCENTAJE DE FLUJO DE VAPOR DE AGUA	TIEMPO	VOLUMEN
1	10 cm	30 cm	50 %	45 minutos	22 mL
2	10 cm	30 cm	60 %	45 minutos	22 mL
3	10 cm	30 cm	80 %	45 minutos	25 mL
4	10 cm	30 cm	90 %	45 minutos	26 mL
5	5 cm	30 cm	50 %	45 minutos	23 mL
6	5 cm	30 cm	60 %	45 minutos	24 mL

7	5 cm	30 cm	80 %	45 minutos	27 mL
8	5 cm	30 cm	90 %	45 minutos	27 mL
9	2,5 cm	30 cm	50 %	45 minutos	25 mL
10	2,5 cm	30 cm	60 %	45 minutos	24 mL
11	2,5 cm	30 cm	80 %	45 minutos	29 mL
12	2,5 cm	30 cm	90 %	45 minutos	29 mL
13	1,5 cm	30 cm	50 %	45 minutos	27 mL
14	1,5 cm	30 cm	60 %	45 minutos	29 mL
15	1,5 cm	30 cm	80 %	45 minutos	31 mL
16	1,5 cm	30 cm	90 %	45 minutos	30 mL
17	10 cm	30 cm	50 %	60 minutos	26 mL
18	10 cm	30 cm	60 %	60 minutos	27 mL
19	10 cm	30 cm	80 %	60 minutos	29 mL
20	10 cm	30 cm	90 %	60 minutos	29 mL
21	5 cm	30 cm	50 %	60 minutos	27 mL
22	5 cm	30 cm	60 %	60 minutos	27 mL
23	5 cm	30 cm	80 %	60 minutos	30 mL
24	5 cm	30 cm	90 %	60 minutos	31 mL
25	2,5 cm	30 cm	50 %	60 minutos	27 mL
26	2,5 cm	30 cm	60 %	60 minutos	28 mL
27	2,5 cm	30 cm	80 %	60 minutos	32 mL
28	2,5 cm	30 cm	90 %	60 minutos	33 mL
29	1,5 cm	30 cm	50 %	60 minutos	28 mL
30	1,5 cm	30 cm	60 %	60 minutos	30 mL
31	1,5 cm	30 cm	80 %	60 minutos	35 mL
32	1,5 cm	30 cm	90 %	60 minutos	32 mL

De acuerdo a los resultados preliminares realizados en el equipo modular se ha determinado que, al realizar los ensayos para un mismo tamaño de partícula, altura de lecho y diferentes porcentajes se ha determinado que el mejor porcentaje de flujo de vapor es de 80%, debido a que se obtiene mayor rendimiento y de acuerdo a esto se obtienen los demás parámetros obtenidos en las tablas posteriores.

- Ensayos para determinar la carga de materia prima adecuada
- Ensayos para determinar parámetros óptimos de operación.
- Reporte y análisis de los resultados.

3.6.1. Actividades de obtención de la muestra

El muestreo utilizado fue aleatorio simple, se redujo el tamaño de partícula en diferentes tamaños para los ensayos preliminares.

3.6.2. Determinación de los parámetros óptimos de operación

Para cada variable independiente se trabajó en diferentes niveles con la finalidad de observar la cantidad de aceite extraído. Con esos datos obtenidos a través de la búsqueda univariada, que consiste en trabajar sólo con una variable a la vez, mientras que las otras se mantienen constantes y utilizando el método de optimización de gradientes y la búsqueda de la sección dorada, que nos permite obtener el mejor resultado del rendimiento de extracción de aceite esencial de eucalipto (*Eucalyptus globulus*).

3.6.3. Reporte y análisis de los resultados

Se muestra a detalle las figuras y tablas con los datos obtenidos durante los ensayos de la investigación que determinaran los parámetros óptimos de la extracción de aceite esencial de eucalipto (*Eucalyptus globulus*). Esta parte se desarrolla en el capítulo de resultados.

3.7. DESCRIPCIÓN DE LAS OPERACIONES PARA LA EXTRACCIÓN DE ACEITE ESENCIAL DE LAS HOJAS DEL EUCALIPTO

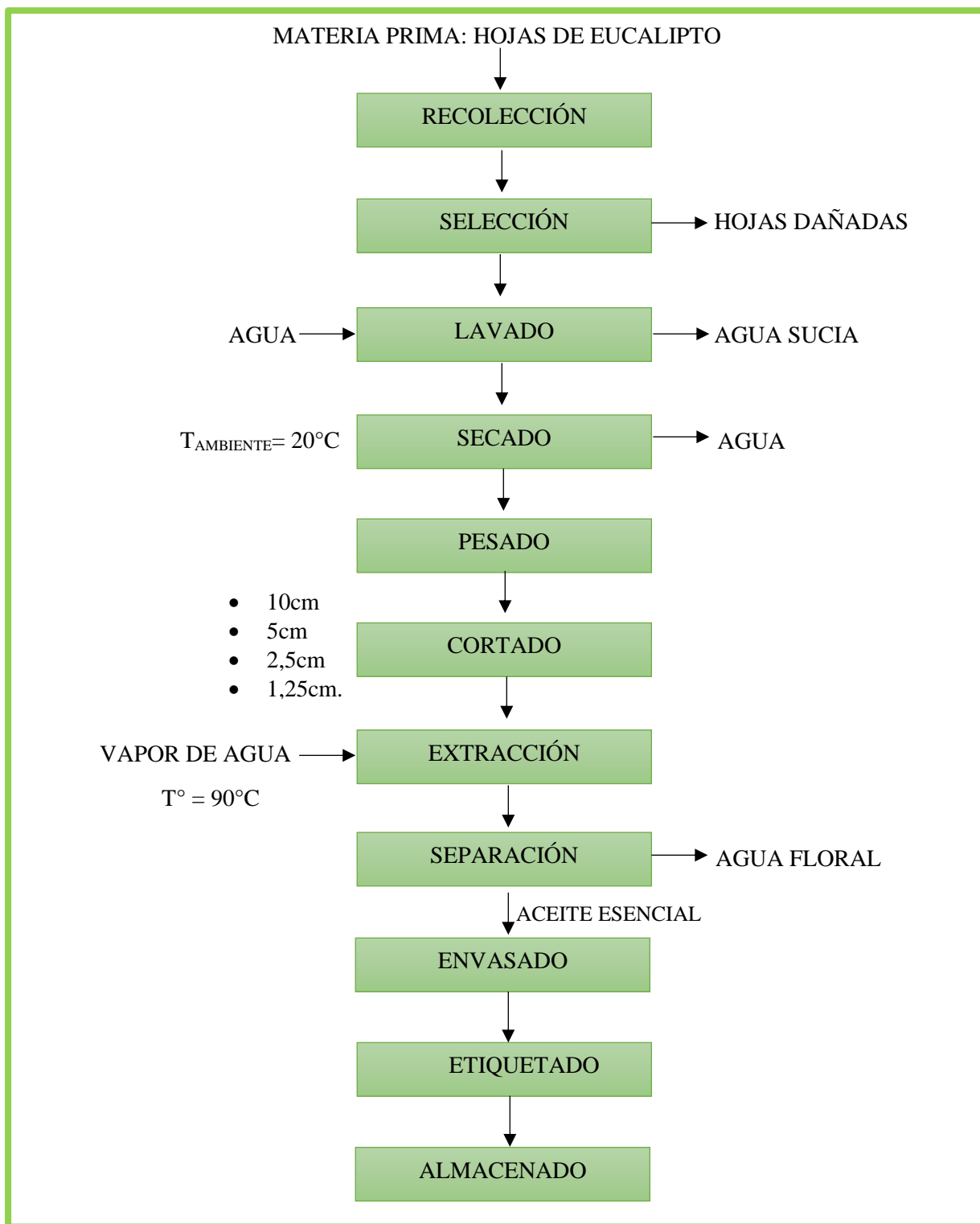


Figura 9. Diagrama Cualitativo en la extracción de aceite esencial de eucalipto

1. **Materia prima:** Para el desarrollo experimental de evaluación de parámetros óptimos de destilación de aceite esencial del eucalipto por arrastre con vapor de agua, la recolección de las hojas se realizó de los alrededores de Huatatas a las primeras horas de la mañana, el cual presentaba hojas jóvenes de diferente tamaño.
2. **Recolección:** se recolectó las hojas de eucalipto desde los terrenos de cultivo y transportado en costales con el debido cuidado.
3. **Selección:** En esta operación se procedió a la limpieza de la materia prima (hojas), eliminando las materias extrañas (tierra), las hojas marchitas o dañadas por insectos.
4. **Lavado:** las hojas ya seleccionadas pasaron por un lavado para quitar las impurezas que se encontraron en las hojas de eucalipto.
5. **secado:** En esta operación las hojas de eucalipto fueron secadas bajo sombra y dejadas a temperatura ambiente durante un día para su secado y estar en condiciones óptimas para su posterior extracción.
6. **Pesado:** El pesado fue en forma directa, utilizando una balanza de mano, en donde la hierba cosechada y previamente acondicionada es introducida en sacos para su posterior pesado. Siempre evitando alguna acción mecánica que pueda llevar el deterioro.
7. **Cortado:** Una vez pesada las hojas de la materia prima, está lista para ser cortada con tijeras (previamente limpias y desinfectadas) por tamaños con la finalidad de determinar con que tamaño se obtiene mayor rendimiento de aceites esenciales y de esta manera especificar cuál de ellos es recomendable utilizar para la extracción.
8. **Extracción:** Una vez cortada la muestra se procedió a cargarla al equipo modular de extracción a una determinada altura de lecho, posteriormente se realizó el cierre de las válvulas ubicadas en la entrada y salida de la cámara de extracción. Una vez alcanzado la presión manométrica requerida por el ensayo se abrió la válvula de entrada hacia la cámara de extracción, manteniendo cerrada la válvula de salida de esta cámara, estando

bajo estas condiciones se controló el tiempo extracción para cada ensayo.

9. Separado: La cantidad extraída de agua floral-aceite esencial fue añadida en un embudo de decantación de 1000mL para su separación por diferencia de densidades.

10. Envasado: El aceite extraído de cada tratamiento fue depositado en un frasco de color oscuro para su mejor almacenamiento, previamente pesado en una balanza analítica.

11. Etiquetado

12. Almacenado

3.8. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO MODULAR DE EXTRACCIÓN DE ACEITES ESENCIALES

El equipo de extracción de aceite esencial por arrastre de vapor de agua que se va emplear para evaluar los parámetros óptimos de operación en la extracción de aceite esencial de eucalipto (*Eucalyptus globulus*), cuenta con toda la instrumentación de control que permite el fácil acondicionamiento del equipo a las necesidades del diseño experimental que se requiere evaluar.



Figura 10. Módulo de extracción de aceites esenciales de laboratorio de Transferencia de masa de la Facultad de Ingeniería Química de la UNSCH empleado en la corrida experimental a escala planta piloto.

3.8.1. Generador de vapor de agua

El generador de vapor que se empleó con suavizador o ablandador de agua en la entrada cuya finalidad es ablandar el agua que ingresa al generador de vapor a través de una bomba de activación automática. El generador de vapor opera a una presión máxima de 5 bar; la peculiaridad de este generador es que ante el decaimiento de la presión hay que estar atento para activar la resistencia eléctrica girando la perilla “RESET” del tablero de control con la finalidad de mantener la presión de operación en 4 bar, es decir opera de forma intermitente.



Figura 11. Generador de vapor del equipo de extracción de aceites esenciales

3.8.2. Recipiente destilador

El recipiente destilador tiene una capacidad útil de 40.84 litros y está fabricado de vidrio, en la parte inferior está provista de resistencia de calentamiento de 15 Kw y difusor del flujo de vapor de agua. Por encima del difusor de vapor posee un disco de acero perforado cuya finalidad es mantener suspendido la materia prima empleada por encima del punto de inyección de vapor. Dentro de la columna del destilador posee un sensor de temperatura con código “TI1” cuya finalidad es determinar la temperatura interna del lecho.



Figura 12. Recipiente de destilador del equipo de extracción de aceites esenciales

3.8.3. Condensador

El condensador original de fábrica es de tipo serpentín y carcaza de acero inoxidable. Al evaluar el condensador se determinó su ineficiencia, dando una temperatura de salida de agua floral-aceite esencial por encima de los 40° C. por la necesidad de obtener el producto por debajo de los 25° C se reemplazó el condensador original por uno de tubos y carcaza construido en el taller mecánico electromecánico “HOLGER HANSEN” de la facultad de Ingeniería Química que demostró mayor eficiencia por tener mayor área de transferencia de calor. En todas las corridas experimentales con este condensador se obtuvo aproximadamente 21 °C de temperatura promedio de salida de condensados (agua floral – aceite esencial).



Figura 13. Ensamblado de condensador de tubos y coraza en el equipo modular de extracción de aceite esencial.

3.8.4. Florentino separador de fases

Está hecho de vidrio borosilicato de dos tubos concéntricos, por la región anular entre el tubo externo e interno fluye agua de refrigeración y por el tubo interior fluye la mezcla líquida agua-aceite esencial de eucalipto que sale del condensador. Tiene una capacidad de 25 mL, el tamaño del diseño estaría adecuado para matrices herbáceas con poco contenido de aceite esencial, la capacidad del separador de fases es insuficiente para separar adecuadamente la magnitud de flujo de mezcla vapor condensado agua-aceite esencial de eucalipto.

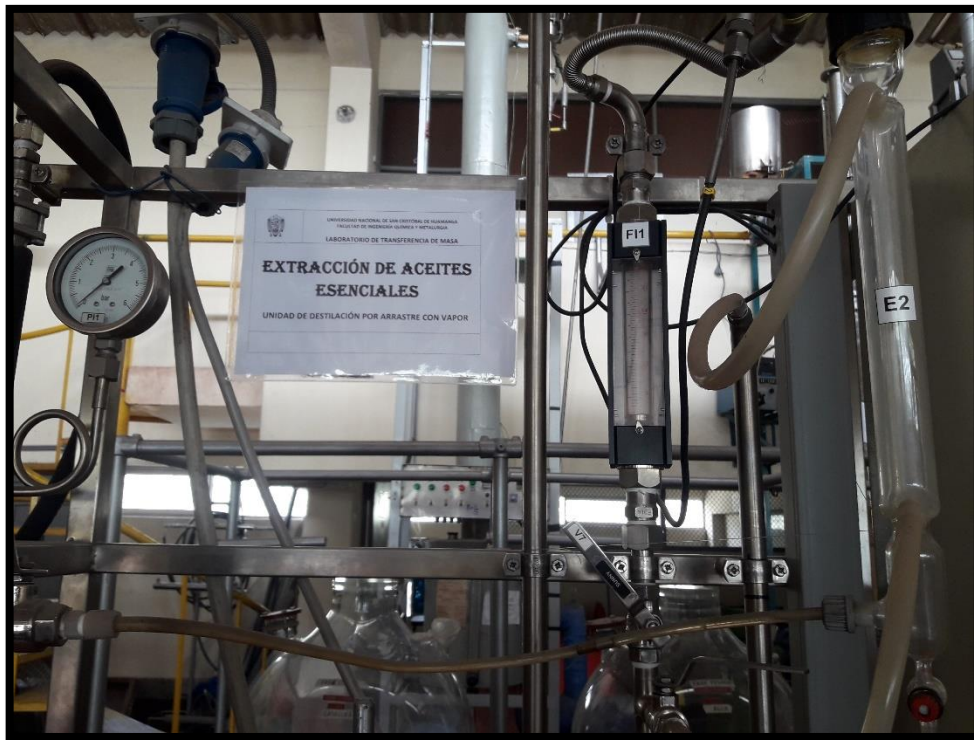


Figura 14. Florentador de 25 mL de capacidad, posee una capa de enfriamiento externo por donde circula agua para enfriamiento de mezcla líquida condensada de agua-aceite.

3.8.5. Suministro de servicios

Los suministros de servicio para el funcionamiento del equipo modular de extracción de aceites esenciales son: energía eléctrica, aire comprimido para el funcionamiento de la válvula neumática para regular el flujo de vapor de agua a la caldera, agua de alimentación a la caldera, agua de refrigeración del condensador de tubos-carcaza y el florentador.

3.8.6. Sistema de control de proceso

El equipo modular de extracción de aceite esencial cuenta con un tablero eléctrico de control, que consta de:

- 4 indicadores digitales de temperatura
- Válvula de control de flujo de vapor, % de apertura

- Pulsadores de marcha y parada
- interruptor automático diferencial

3.9. OPERACIÓN DEL EQUIPO DE EXTRACCIÓN

3.9.1. Puesta en marcha y parada de generador de vapor

Instalación:

- Conectar el suavizador entre el agua de la red y el tubo de descarga usando el tubo de goma y las abrazaderas metálicas suministradas con el equipo. conectar la válvula V8 del generador de vapor a un tubo de descarga
- Abrir las válvulas V₄, V₅, V₆ y V₇.
- Cerrar las válvulas V₁, V₂, V₃ y V₈.
- Conectar el suavizador a la alimentación eléctrica monofásica.
- Conectar el generador de vapor a la alimentación eléctrica trifásica.
- Desaguar el generador abriendo las válvulas V₈ y V₉ hasta que el nivel del agua llegue a mitad de la mirilla del medidor del nivel LG1.
- Cerrar las válvulas V₈ y V₉.



Figura 15. Suavizador de agua que se suministra al generador de vapor

Puesta en marcha

- Apretar el pulsador “RESET”.
- Girar el selector de la bomba G1 a la posición “AUT”.
- Encender los calentadores.
- Esperar que la presión del manómetro aumente hasta 1 bar.
- Sacar el aire del generador abriendo parcialmente la válvula V₉.
- Repetir esta operación hasta que el vapor salga a través de la válvula V₉.
- Cerrar la válvula V₉.
- Cuando la presión en el manómetro PI1 alcanza los 4 bar, abrir la válvula V₁.

Parada

- Cerrar la válvula V₁.
- Apagar la bomba G₁.
- Apagar los calentadores.
- Para paradas de emergencia, apretar el pulsador de emergencia rojo.

3.9.2. Puesta en marcha de unidad de extracción de aceites esenciales

Puesta en marcha

- Conectar el grupo reductor de presión incorporados en la planta piloto a la red del aire comprimido utilizando la manguera para aire comprimido suministrada y regular la presión con el reductor a 1.5 bares, como se indica en la etiqueta.
- Situar el interruptor de la resistencia J₁ en la posición “Ø”
- Activar el interruptor automático diferencial.
- Apretar el pulsador START.
- Cerrar las válvulas V₁, V₂, V₃, V₆, FV₁. La válvula FV₁ puede ser abierta y cerrada utilizando el regulador neumático ubicado en el cuadro de control: girando el reductor en sentido horario la válvula se abre proporcionalmente; la válvula está completamente abierta cuando el manómetro ubicado en el cuadro de control indica 1 bar.
- Abrir las válvulas V₄ parcialmente.
- Regular el caudal del agua a través del caudalímetro FI₁ a alrededor de 200L/h utilizando la válvula V₇.
- Introducir el producto que hay que tratar en la columna del destilador “C₁”.
- Abrir la válvula V₁.
- Abrir la válvula FV₁ de modo que el porcentaje de apertura de flujo de vapor FI₂ sea

alrededor de 80%.

- La válvula V_5 debe ser regulada (parcialmente cerrada) de forma tal que en el fondo del separador E_2 queden siempre aproximadamente 3 cm de H_2O , para que el aceite no regrese a la caldera a través de válvula V_5 .
- Situar el selector de la resistencia J_1 en la posición 1: la resistencia se encenderá solamente cuando estar completamente sumergido en el agua producida por la condensación del vapor.
- A este punto es posible proceder utilizando el agua contenida en la forma del extractor a ciclo cerrado. Cerrar la válvula FV_1 y dejando encendida la resistencia J_1 . El agua y el aceite se separarán en el intercambiador/separador E_2 ; el agua del fondo del separador se desbordará a través de la válvula V_5 , nuevamente a la caldera.
- Cuando el separador E_2 esté lleno, abrir la válvula V_6 , descargar el hidrolato en uno de los Beaker de 5 litros y el esencial en el otro.

3.10. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN

La materia prima es cortada en cuatro tipos de tamaño de partícula (10 cm, 5 cm, 2,5 cm, 1, 25 cm) posteriormente pesada para conocer exactamente la cantidad de materia prima empleada. Se coloca dentro del recipiente destilador distribuyendo uniformemente, se inyecta vapor de agua a 5 Psi presión y a un flujo de vapor determinado. El vapor de agua tarda un intervalo tiempo en atravesar desde el fondo hasta la superficie del lecho, esto se debe a que en ese tiempo el vapor de agua inyectado entra en equilibrio térmico con las hojas y las paredes del recipiente destilador, cediendo parte de su calor latente y condensándose. En este intervalo de tiempo existe mayor reflujo de vapor de agua condensado hacia el fondo del lecho. Una vez que se alcance el equilibrio térmico el flujo de vapor de agua logrará

atravesar en mayor proporción todo el lecho arrastrando consigo gotas microscópicas vaporizadas de aceite esencial del eucalipto, esta mezcla de vapor atraviesa el condensador enfriándose de 70 °C hasta 20 °C - 23 °C formando una mezcla líquida inmiscible que sale a través del florentador.

La mezcla líquida se recibe en una probeta de 500 mL para dar lectura del volumen obtenido y determinar el flujo en un intervalo de tiempo; finalmente se vierte la mezcla líquida en una pera decantadora dejando reposar y separar la fracción de aceite esencial del hidrosol o hidrolato. (Cárdenas, 2014)

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIONES

4.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

Tabla 6

Características fisicoquímicas de la materia prima

Caracterización	Valor
Humedad (%)	34,8 ± 2
Ceniza (%)	7,2 ± 2
Densidad real (kg/m ³)	430
Porosidad (%)	0,55 ± 2
Aceite esencial (%)	1,5

En la Tabla 6 se presentan las características de la materia prima con la que se trabajó en todos los tratamientos. La humedad se mantuvo constante (34,8 ± 2%), ya que, si varía la humedad, el rendimiento de aceite esencial se vería afectado. El % humedad nos indica que la materia prima ha sido acondicionada favorablemente, ya que según Van-Arsdel y Copley (1979) la humedad promedio en forrajes para procesos de extracción es 30%-35%.

4.2. EVALUACIÓN DE VARIABLES DE OPERACIÓN

4.2.1. Efecto del adecuado acondicionamiento de las hojas de eucalipto

Para un mejor rendimiento las hojas de eucalipto fueron lavadas con la finalidad de quitar las impurezas y polvillos finos (tierra) y secadas bajo sombra a temperatura ambiental, si las hojas de eucalipto no se acondicionan al ser introducidas conjuntamente al lecho pueden causar mayor resistencia a la libre circulación de flujo de vapor a través de intersticios del lecho, originando mayor caída de presión, incremento de tensión superficial de los poros del lecho y disminución de la difusión por convección de aceite esencial hacia la corriente de flujo de vapor de agua.

Tabla 7

Extracción de aceite esencial en función al tamaño de partículas (hojas) de extracción

Ensayos	Tiempo	Carga	Temperatura				tamaño de partícula	flujo de vapor	Presión en el caldero	volumen extraído	Peso Extraído
			T ₁ °C	T ₂ °C	T ₃ °C	T ₄ °C					
1	60 min	3 kg	90	19,3	21,1	22,2	10 cm	80%	5 bar	29 mL	26,709 g
2	60 min	3 kg	90	21	23	24	5 cm	80%	5 bar	32 mL	29,472 g
3	60 min	3 kg	90	19,5	21,6	22,2	2,5 cm	80%	5 bar	33 mL	30,393 g
4	60 min	3 kg	90	19,6	21,5	22,8	1,25 cm	80%	5 bar	35 mL	32,235 g

Donde:

T₁: Temperatura de entrada del agua

T₂: Temperatura de entrada del condensador

T₃: Temperatura de salida del condensador

T₄: Temperatura de salida del agua floral + aceite esencial

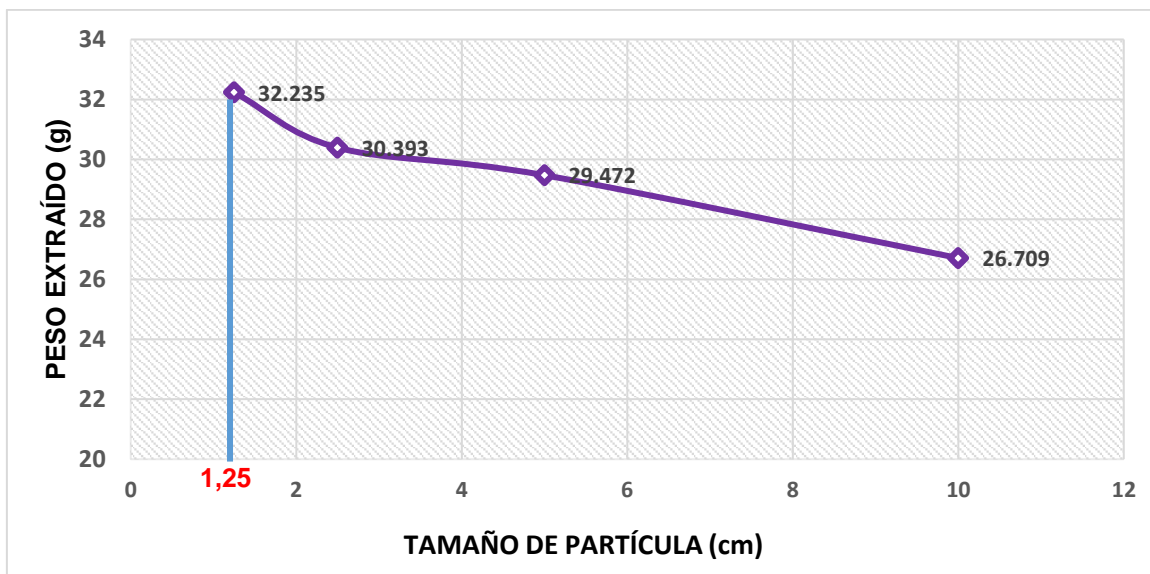


Figura 16. Curva de evolución en el tamaño de partícula. El punto más alto representa la extracción con hojas de menor tamaño.

En la figura 16 muestra que la extracción realizada con hojas acondicionadas a 1,25 cm presenta un mejor desempeño, es decir, en un mismo tiempo de operación (60 minutos) y realizada la curva correspondiente a la variable evaluada se determinó las ecuaciones de los intervalos de las líneas de la pendiente, se graficó las ecuaciones de la recta tangente a la curva en las respectivas secciones, por lo tanto, donde se muestra que al tamaño de partícula (1,25 cm) mayor rendimiento de extracción de aceite esencial. (ver anexo 1)

4.2.2. Efecto del flujo de vapor de agua

Evidentemente una buena circulación de flujo de vapor de agua a través de los intersticios del lecho es determinante sobre el rendimiento, es decir a mayor flujo de vapor de agua, mayor es la velocidad de extracción. En este punto se va a evaluar el efecto sobre el rendimiento del flujo de vapor de agua alimentado a la columna de extracción en cuatro niveles.

Tabla 8

Porcentaje de flujo de vapor inyectado a la columna de extracción de aceites esenciales a la altura de carga de lecho, tiempo de extracción y tamaño de partículas constantes

Ensayos	Tiempo	Carga	Temperatura				tamaño de Partícula	flujo de Vapor	presión	Volumen Extraído	Peso Extraído
			T1 °C	T2 °C	T3 °C	T4 °C					
5	60 min	3 kg	90	19	22,7	22,3	1,25 cm	50 %	5 bar	28 mL	25,79 g
6	60 min	3 kg	90	21	23	24	1,25 cm	60 %	5 bar	30 mL	27,63 g
7	60 min	3 kg	90	22,5	23,8	15,5	1,25 cm	80 %	5 bar	35 mL	32,23 g
8	60 min	3 kg	90	22,5	23,8	24	1,25 cm	90 %	5 bar	32 mL	30,39 g

En cada uno de los cuatro bloques experimentales realizados se ha variado el caudal de flujo de vapor de agua inyectado a la columna de extracción manteniendo constante la altura del lecho (32 cm), el tiempo de extracción y tamaño de partícula. Los resultados se muestran en la tabla 8 de su respectivo gráfico de flujo de vapor versus peso extraído.

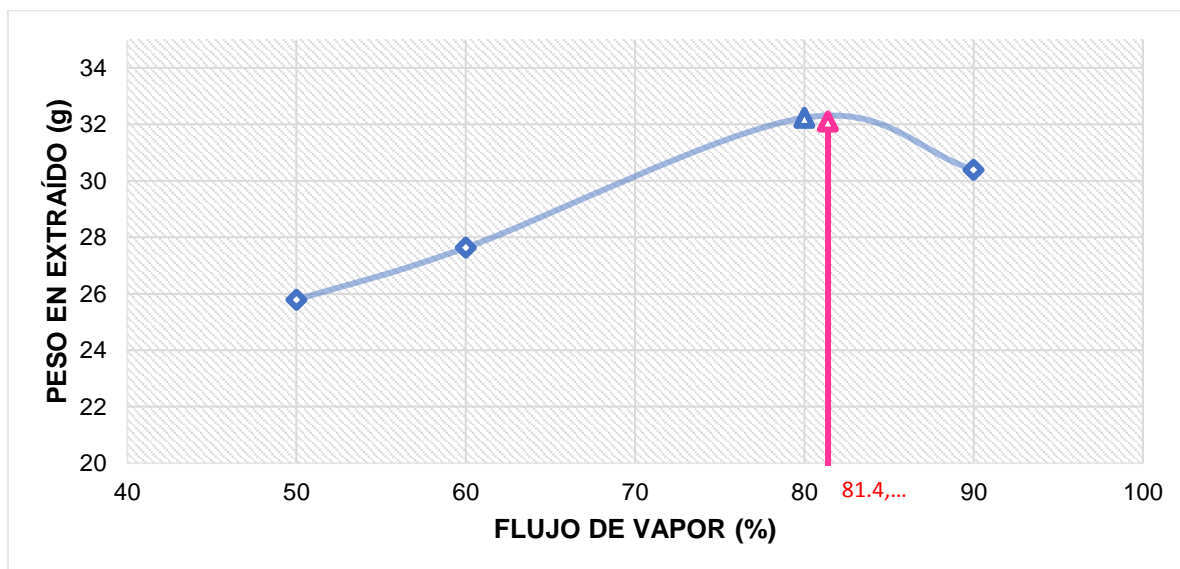


Figura 17. Efecto del flujo de vapor de agua inyectado en el rendimiento de extracción de aceite esencial de eucalipto, a la altura de carga de lecho, tiempo de extracción y tamaño de partículas constantes.

Manteniendo todas las variables constantes (altura de carga de lecho, tiempo de extracción y tamaño de partículas constantes), y realizada la curva correspondiente a la variable evaluada se determinó las ecuaciones de los intervalos de las líneas en el punto de modificación de la pendiente, se graficó las ecuaciones de la recta tangente a la curva en las respectivas secciones se determina que al flujo de vapor de agua inyectado al 80% se obtiene mayor peso en la extracción (32,23 g), tal como se muestra en la figura 17. (ver anexo 1)

4.2.3. Efecto de la altura de carga del lecho

Para determinar el efecto de la altura de carga de lecho sobre el rendimiento de la extracción de aceite esencial de eucalipto, se ha evaluado en cuatro alturas de carga (15 cm, 30 cm, 45 cm y 60 cm) en las combinaciones de variables como se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 9

Efecto de altura de lecho sobre el rendimiento de extracción de aceite esencial de eucalipto con tiempo de 60 min, porcentaje flujo de vapor y tamaño de partícula extracción constantes.

Ensayo	Materia prima	Altura del lecho	Temperatura				tamaño de partícula	porcentaje de flujo de vapor	presión	volumen extraído	Peso extraído	Rendimiento
			T1 °C	T2 °C	T3 °C	T4 °C						
09	1,5 kg	15 cm	90	15,7	20,4	17,7	1,25 cm	80%	5 bar	15,3 mL	14,09 g	0,94 %
10	3 kg	30 cm	90	15,2	26,4	34	1,25 cm	80%	5 bar	36 mL	33,16 g	1,105 %
11	4,5 kg	45 cm	90	14,6	18,9	16,4	1,25 cm	80%	5 bar	47,8 mL	43,28 g	1,028 %
12	6 kg	60 cm	90	14,7	19,6	17	1,25 cm	80%	5 bar	63 mL	58,02 g	0,967 %

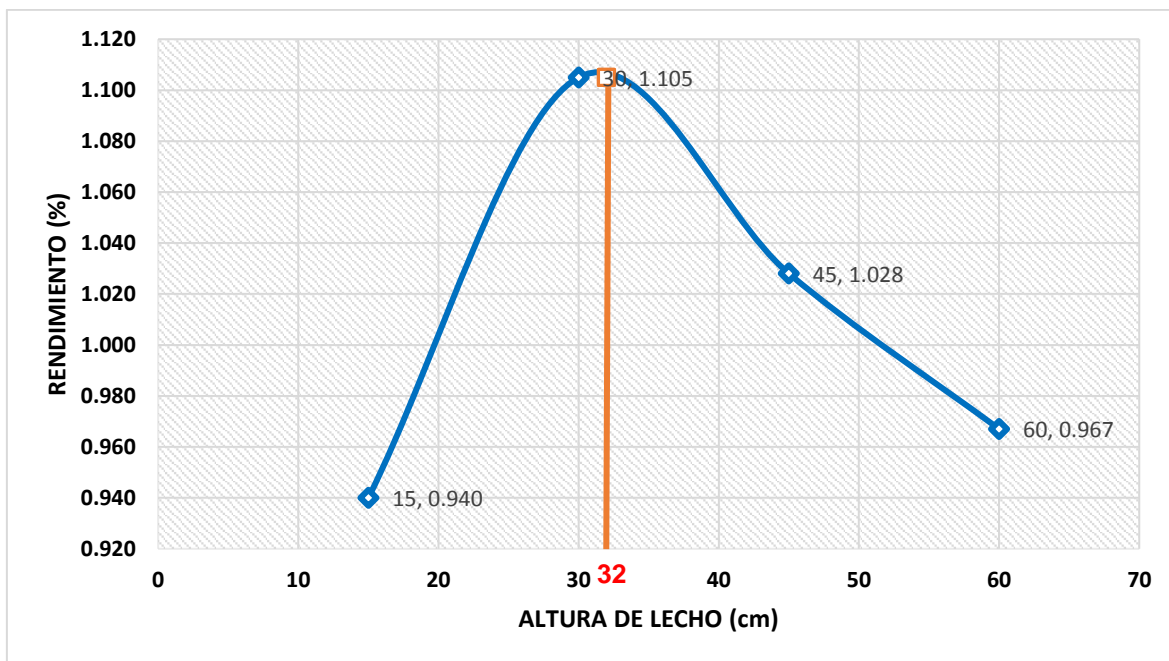


Figura 18. Curva de efecto de la altura de carga del lecho sobre el rendimiento de extracción de aceite esencial de eucalipto.

En la figura 18 se observa que, para un tiempo constante de 60 minutos, el punto más alto de la curva corresponde a la altura de carga del lecho de 32 (cm), lo cual nos da a conocer que en ese punto se obtiene mayor rendimiento, lo cual se explica, en dicha altura de carga hay mayor recorrido de flujo de vapor de agua y realizada la curva correspondiente a la variable evaluada se determinó las ecuaciones en la intersección de rectas y se graficó las pendientes a las curvas respectivas según el método de la sección dorada. (ver anexo 1)

4.2.4. Tiempo óptimo de extracción de aceite esencial de eucalipto

Tabla 10

Resultados de evaluación del tiempo óptimo de extracción de aceite esencial de eucalipto con una altura de lecho de 32 cm, con flujo de vapor de agua, tamaño de partícula constantes

Ensayo	Tiempo	Temperatura				tamaño de partícula	porcentaje de flujo de vapor	presión	volumen extraído	Peso extraído	Rendimiento
		T1 °C	T2 °C	T3 °C	T4 °C						
13	30 min	90	15,7	20,4	17,7	1,25 cm	80%	5 bar	20 mL	18.42 g	0,61 %
14	45 min	90	15,2	26,4	34	1,25 cm	80%	5 bar	28 mL	25.79 g	0,86 %
15	60 min	90	14,6	18,9	16,4	1,25 cm	80%	5 bar	36 mL	33.16 g	1,16 %
16	75 min	90	14,7	19,6	17	1,25 cm	80%	5 bar	36 mL	33.16 g	1,16 %

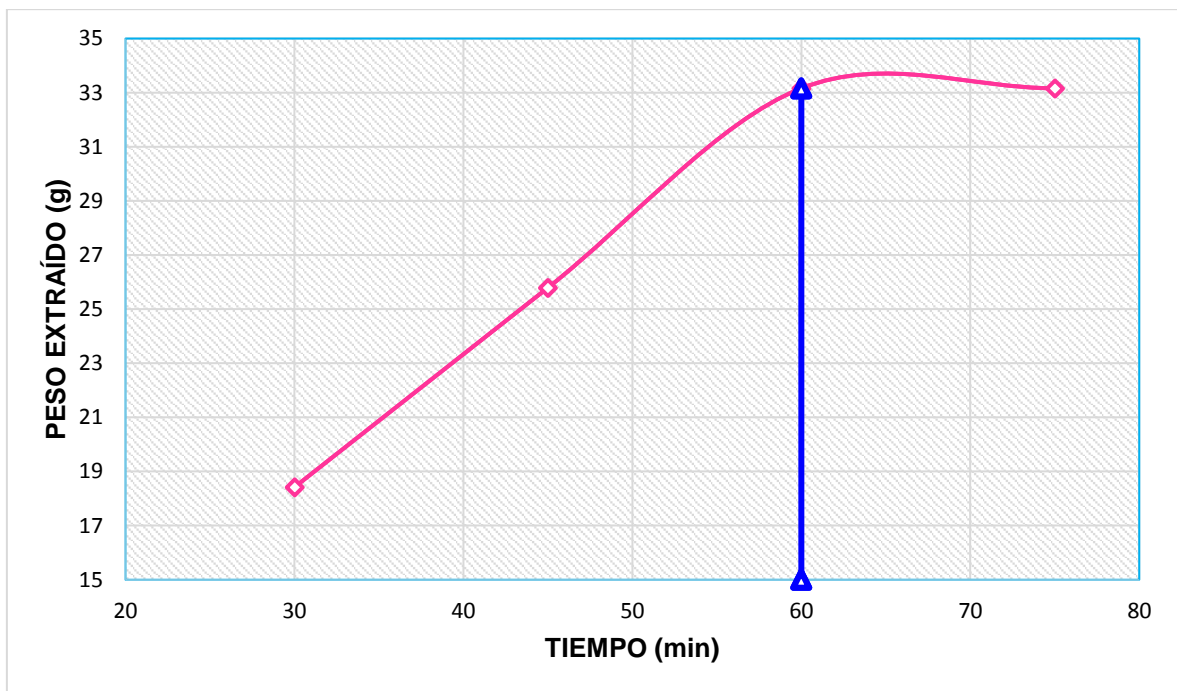


Figura 19. Efecto del tiempo óptimo sobre el peso en la extracción de aceite esencial de eucalipto

El tiempo óptimo de operación en la extracción de aceite esencial de eucalipto se determinó por medio de 4 ensayos y cual se muestra en la figura 19, se determinó que el tiempo óptimo de operación es de 60 minutos, obteniéndose el peso de extracción de 33,16 g, con un

rendimiento de 1, 16 % como se observa en la figura seguir extrayendo por encima de ese tiempo no es beneficioso económicamente porque el incremento de rendimiento de proceso de extracción para 75 minutos es el mismo en cuanto al peso extraído.

4.3. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL ACEITE ESENCIAL DE EUCALIPTO (*Eucalyptus globulus*)

Estado	:	líquido (a temp. ambiente)
color	:	inoloro
olor	:	Alcanforado
Densidad	:	0,921g/mL (20°C)
Índice de refracción	:	1,456 (20°C)

Granados (2015), en su artículo composición química y evaluación de la actividad antioxidante del aceite esencial de *Eucalyptus globulus* de norte de Santander (Colombia), indica que:

Tabla 11

Propiedades físicas del aceite esencial de eucalipto

ANÁLISIS	RESULTADO
Densidad (20°C)	0,92 g/mL
Índice de refracción a 20° C	1,464

Fuente: Granados (2015).

Haciendo la comparación con los análisis realizados y la bibliografía consultada, se corroboró que las características físicas realizadas están dentro de los parámetros establecidos lo cual indica que el aceite esencial extraído cumple los estándares de calidad.

4.4. BALANCE DE MATERIA

4.4.1. Balance de materia en la columna de extracción de aceite esencial

Realizando balance de materia para la operación de extracción de aceite esencial de eucalipto, se obtiene:

$$m_{\text{entrada}} - m_{\text{salida}} + m_{\text{generada}} = \text{masa}_{\text{acumulada en el lecho}} \dots \dots \dots (1)$$

En este tipo de operación de extracción no hay reacción química por lo tanto no existe generación, parte de flujo de vapor de agua inyectado al lecho sufre condensación y reflujos hacia el fondo acumulándose. Puesto que la operación de extracción es Batch, se puede realizar el Balance de materia por componente.

▪ Agua

Al iniciar la operación de extracción el flujo de vapor de agua inyectado pasa a través de los poros del lecho, a medida que se desarrolla la extracción parte de este flujo se condensa debido a la diferencia inicial de temperatura entre él y las hojas de eucalipto; luego de alcanzar el equilibrio térmico el vapor condensado es evaporado para luego pasar como mezcla aceite esencial-vapor hacia el condensador. El vapor de agua flujo de vapor de agua al sufrir una expansión súbita en el punto de inyección.

Tiempo de extracción: 60 minutos

Flujo de vapor de agua inyectado: 6,19 kg/h

Flujo de vapor agua acumulado en fondo: 1 kg/h

Flujo de vapor de agua a salida del lecho: 4,79 kg/h

Masa de vapor de agua absorbida por las hojas de eucalipto (lecho): 0,4 kg/h

$$m_{\text{entrada}} - m_{\text{salida}} + m_{\text{generada}} = \text{masa}_{\text{acumulada en el lecho}}$$

$$m_{\text{generada}} = 0$$

$$m_{\text{acumulada}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{bach}} \right) = 6,19 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 1 \frac{\text{h}}{\text{bach}} - 4,79 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 1 \frac{\text{h}}{\text{bach}} + 0$$

$$m_{\text{acumulada}} = 1,4 \frac{\text{kg}}{\text{bach}}$$

$$m_{\text{agua acumulada}} = m_{\text{agua retenida en fondo}} + m_{\text{agua absorbida por hojas}}$$

$$m_{\text{agua absorbida por las hojas}} - m_{\text{agua acumulada}} + m_{\text{agua retenida en fondo}}$$

$$m_{\text{agua absorbida por las hojas}} = 1,4 \frac{\text{kg}}{\text{bach}} - 1 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 1 \frac{\text{h}}{\text{bach}}$$

$$m_{\text{agua absorbida por las hojas}} = 0,4 \frac{\text{kg}}{\text{bach}}$$

- **Aceite esencial de eucalipto:**

Contenido de aceite esencial en las hojas de eucalipto: 1,5 %

Contenido de humedad en las hojas de eucalipto: 34,8 %

Cantidad de hojas empleada: 3 kg

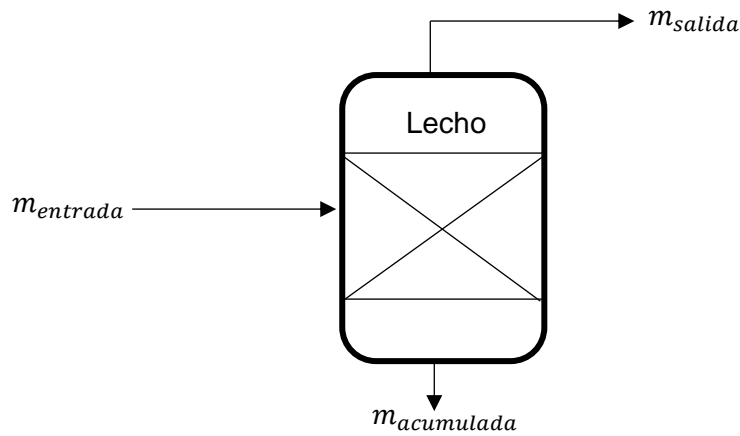
Tiempo de extracción: 1 h

Masa de vapor de agua absorbida por las hojas de eucalipto (lecho): 0,4 kg/h

Producción por Bach de aceite esencial: 0,036L = 0,033kg

Rendimiento de extracción de aceite esencial de eucalipto: 1.2 %

Porcentaje de recuperación de aceite esencial contenida en las hojas de eucalipto: 73,3%



$$m_{\text{acumulada en el lecho}} = m_{\text{entrada}} - m_{\text{salida}}$$

$$m_{\text{entrada}} = m_{\text{hojas de eucalipto}} - m_{\text{vapotr de agua}}$$

$$m_{\text{entrada}} = 3 \frac{\text{kg}}{\text{bach}} + 6,19 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 1 \frac{\text{h}}{\text{bach}}$$

$$m_{\text{entrada}} = 9,19 \frac{\text{kg}}{\text{bach}}$$

4.4.1.1. Composición fraccional de las hojas de eucalipto a la entrada del extractor

Dato:

Rendimiento máximo de extracción = 1,5% (según bibliografía)

El peso total de aceite esencial que se puede obtener de 3 kg de hojas de eucalipto es:

$$\% \text{ rendimiento} = \frac{\text{mL a. e}}{\text{g}_{\text{muestra}}} * 100 \dots (2)$$

$$V_{\text{a.esencial}} = \frac{\% \text{ rend.} * m_{\text{hoja}}}{100}$$

$$V_{\text{a.esencial}} = 0,015 \frac{\text{ml}}{\text{g}} * 3000 \text{ g}$$

$$V_{\text{a.esencial}} = 45 \text{ mL}$$

$$\rho_{\text{a.esencial}} = 0,921 \frac{\text{g}}{\text{mL}}$$

$$m_{a.esencial} = 45 \text{ mL} * 0,921 \frac{\text{g}}{\text{mL}}$$

$$m_{a.esencial} = 41,45 \text{ g}$$

Donde:

$V_{a.esencial}$: volumen de aceite esencial de eucalipto que se puede extraer completamente

$P_{a.esencial}$: densidad del aceite esencial de eucalipto

$m_{a.esencial}$: peso de aceite esencial de eucalipto inicial que entra al extractor

Con los datos anteriores se puede calcular la composición fraccional de las hojas de eucalipto:

$$X_{\text{agua}} = 0,348 \text{ g}$$

$$X_{a.esencial} = \frac{41,45 \text{ g}}{3000 \text{ g}} = 0,014$$

$$X_{\text{materia restante}} = 0,786$$

Donde:

X_{agua} : fracción de humedad de las hojas al inicio de extracción

$X_{a.esencial}$: fracción de aceite en las hojas de eucalipto al inicio de extracción

$X_{\text{materia restante}}$: fracción de materia de las hojas de eucalipto

4.4.1.2. Balance de materia en la salida de columna del extractor de aceite esencial

Agua

$$m_{\text{agua h.ext}} = 4,79 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 1 \frac{\text{h}}{\text{bach}}$$

$$m_{\text{agua h.ext}} = 4,79 \frac{\text{kg}}{\text{bach}}$$

Aceite esencial

$$m_{\text{aceite esencial}} = V_{\text{ext.Bach}} * \rho_{\text{a.esencial}}$$

$$m_{\text{aceite esencial}} = 0,036 \frac{L}{\text{Bach}} * 0,921 \frac{kg}{L}$$

$$m_{\text{aceite esencial}} = 0,033 \frac{kg}{\text{Bach}}$$

4.4.1.3. Balance de materia en fondo de la columna del extractor de aceite esencial

$$m_{\text{hoja agot}} = m_{\text{hoja in}} - m_{\text{a.e.ext}} + m_{\text{agua r.f}} \dots \dots \dots (3)$$

Donde:

$M_{\text{hoja. agot}}$: peso de las hojas de eucalipto agotada al finalizar la extracción

$M_{\text{hoja. in}}$: peso de las hojas de eucalipto inicial

$M_{\text{a.e.ext}}$: peso de aceite esencial residual en las hojas de eucalipto agotadas

$M_{\text{agua.r.}}$: peso de vapor de agua retenido en las hojas de eucalipto agotada

$$m_{\text{hoja agot}} = 3.000 \frac{kg}{\text{bach}} - 0,033 \frac{kg}{\text{bach}} + 0,4 \frac{kg}{\text{bach}}$$

$$m_{\text{hoja agot}} = 3,367 \frac{kg}{\text{bach}}$$

Agua acumulada en el fondo del destilador

$$m_{\text{hoja agot}} = 1 \frac{kg}{h} * 1 \frac{h}{\text{bach}}$$

$$m_{\text{hoja agot}} = 1 \frac{kg}{\text{bach}}$$

Componentes fraccionales de las hojas de eucalipto agotadas

$$m_{\text{a.e.r}} = m_{\text{a.e.e}} - m_{\text{a.e.s}}$$

$$m_{\text{a.e.r}} = 0.04145 \frac{kg}{\text{Bach}} - 0,033 \frac{kg}{\text{Bach}}$$

$$m_{\text{a.e.r}} = 0,0085 \frac{kg}{\text{Bach}}$$

Donde:

$M_{a.e.r}$: peso de aceite esencial retenido en las hojas de eucalipto agotadas

$M_{a.e.e}$: peso de aceite esencial de eucalipto a la entrada del destilador

$M_{a.e.s}$: peso de aceite esencial de eucalipto a la salida del destilador

Al reemplazar los datos anteriores calculados, se tiene las fracciones:

$$X_{\text{agua}} = 0,1340 \text{ (humedad retenida en las hojas al finalizar la extracción)}$$

$$X_{a.\text{esen.h.a}} = \frac{m_{a.e.r}}{m_{\text{hoja agot.}}} = \frac{0,0085 \frac{kg}{Bach}}{1 \frac{kg}{bach}}$$

$$X_{a.\text{esen.h.a}} = 0,0085$$

$$X_{m.h.a} = 1 - X_{\text{agua.h.a}} - X_{a.\text{esen.h.a}}$$

$$X_{m.h.a} = 1 - 0,1340 - 0,0085$$

$$X_{m.h.a} = 0,8575$$

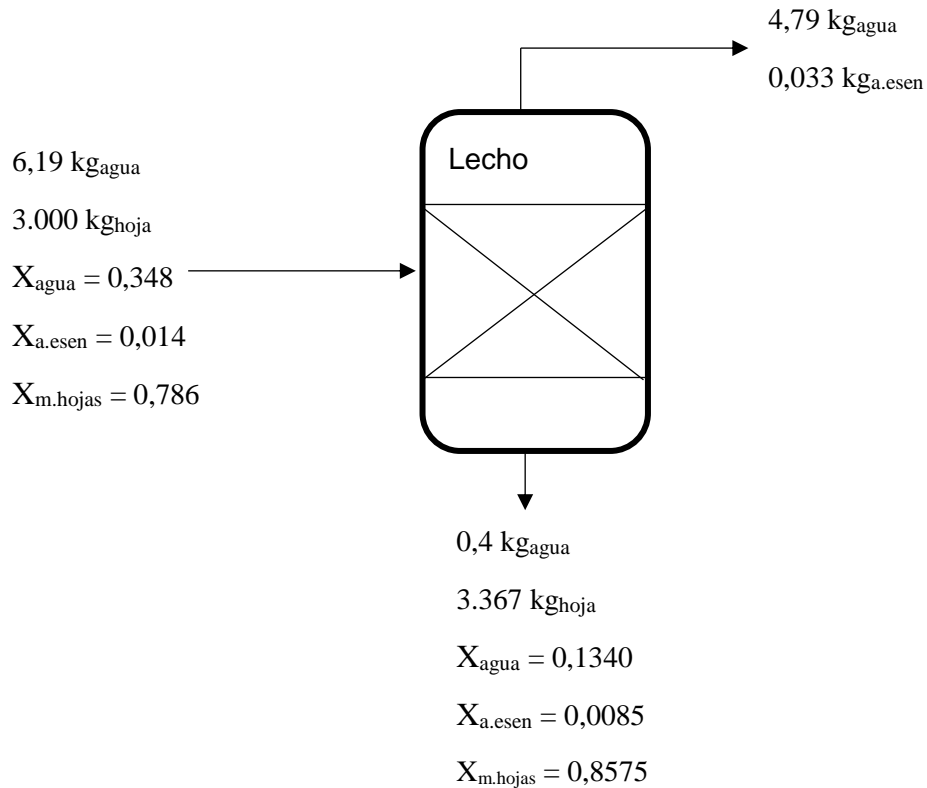
Donde:

$X_{\text{agua.h.a}}$: fracción de agua en hoja agotada

$X_{a.\text{esen.h.a}}$: fracción de aceite en la hoja de eucalipto agotada

$X_{m.h.a}$: fracción de materia restante de la hoja de eucalipto agotada

Resumen esquemático de balance de materia en la columna de extractor para aceite esencial de eucalipto por batch:



4.5. BALANCE DE ENERGÍA

4.5.1. EVALUACIÓN DEL EQUIPO MODULAR DE EXTRACCIÓN

4.5.1.1. Evaluación de flujo de vapor de agua generado

Para evaluar la eficiencia del generador de vapor el equipo modular de extracción de aceites esenciales, quedando sólo generador de vapor y condensador. Se apertura la válvula de control de vapor al 100% de apertura, se recoge el vapor condensado y se toma la lectura de volumen recogido y temperatura del condensado.

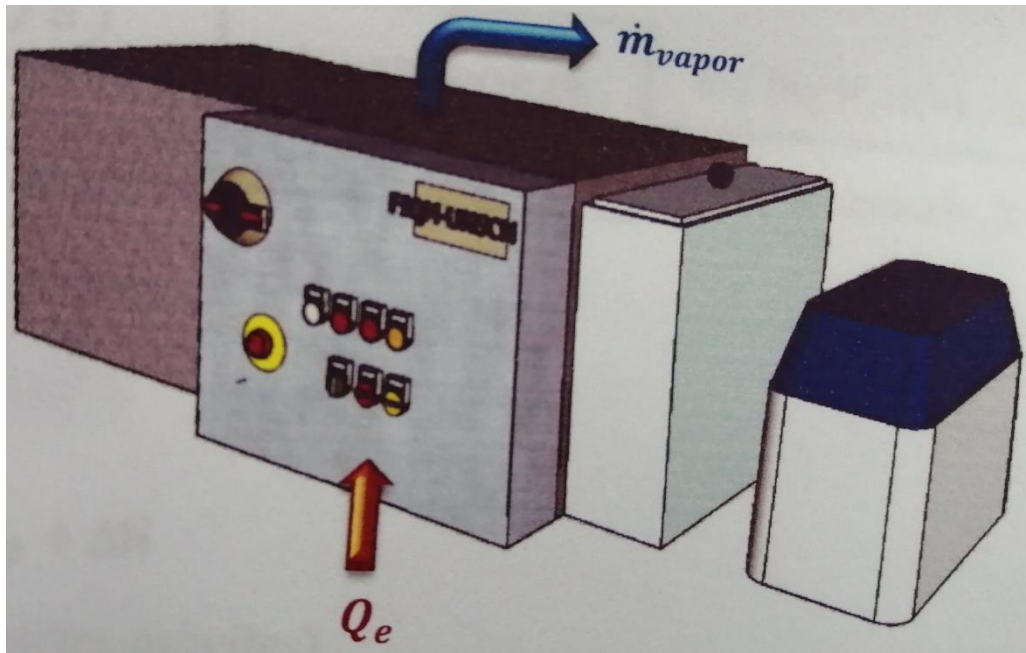


Figura 20. Generador de vapor del equipo de extracción de aceites esenciales. Fuente: Cárdenas (2014)

Primero se determina el flujo de vapor teórico según las especificaciones técnicas del generador de vapor después se relacionan con el flujo de vapor experimental obtenido directamente, tal como se ha descrito en el párrafo anterior. La siguiente fórmula es para determinar el flujo teórico de vapor generado.

$$Q_e = m_v * \lambda_{H_2O} \dots \dots (1)$$

Donde:

Q_e = Potencia eléctrica suministrada

m_v = flujo másico de vapor suministrado

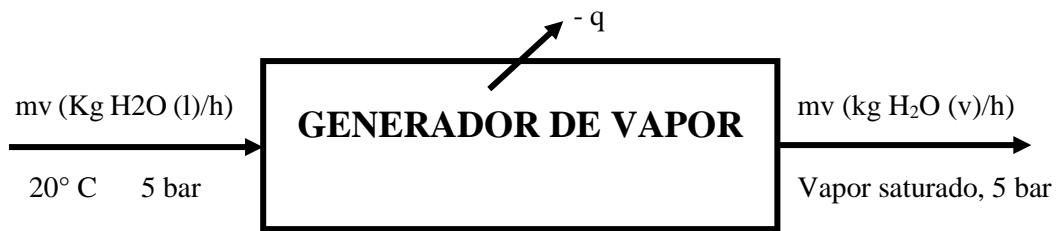
λ_{H_2O} = calor de vaporización de agua

Datos del equipo:

Potencia eléctrica de suministro: 15 kW

Temperatura máxima: 158° C

Presión PS en el caldero: 5 bar



Balance de energía

$$Q - W_s = \Delta E_k + \Delta E_p + \Delta H$$

$$W_s = 0 \text{ (No hay partes móviles)}$$

$$\Delta E_k = 0 \text{ (Energía cinética despreciable)}$$

$$\Delta E_p = 0 \text{ (energía potencial despreciable)}$$

Se tiene la relación

$$Q = mv * \Delta H \dots\dots\dots (2)$$

▪ **Potencia neta para la evaporación**

Para el cálculo de potencia neta para la evaporación se asume que la resistencia eléctrica de 15kW especificada en el equipo tiene una eficiencia de 90% despejando la relación de eficiencia de la resistencia eléctrica se tiene:

$$n = \frac{P_{evap}}{P_{teor}} \dots\dots\dots (3)$$

$$P_{evap} = n * P_{teor}$$

$$P_{evap} = 0,90 * 15 \text{ kW}$$

$$P_{evap} = 13,5 \text{ kW}$$

Donde:

P_{evap} : potencia neta para la evaporación

P_{teor} : potencia teórica

n: eficiencia de la resistencia eléctrica

▪ **Flujo de vapor teórico**

A partir de los cálculos anteriores se puede obtener el flujo de vapor teórico de vapor de agua generado en el equipo, para lo cual se emplea los siguientes datos:

$$Q = 13,5 \text{ kW} = 13.5 \text{ kJ/s}$$

H1 = 83,9 kJ/kg (Agua líquido saturado a 20°C, suponiendo la entalpía independiente de la temperatura)

$$H2 = 2747,5 \text{ kJ/kg (vapor de agua saturado a 5 bar)}$$

$$V2 = 0,375 \text{ m}^3/\text{kg (volumen específico de agua, vapor saturado a 5 bar)}$$

$$m_{v.t} = Q/\Delta H \dots\dots (4)$$

$$m_{v.t} = \frac{(13,5 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} * \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}})}{(2747,5) - 83,9) \text{ kJ/kg}} = 18,25 \text{ kg/h}$$

▪ **Pérdida de energía térmica**

$$\% \text{ pérdida E.T} = \left(\frac{m_{v.t} - m_{v.exp}}{m_{v.t}} \right) * 100 \dots\dots (5)$$

Donde:

m_{v.t}: flujo másico de vapor de agua generado teóricamente

m_{v.exp}: flujo másico de vapor de agua determinado experimentalmente

4.5.1.2. Evaluación de pérdidas de flujo y energía térmica del vapor de agua en columna de extractor

Para la evaluación de pérdida de flujo de vapor en el sistema se hace circular vapor a un determinado flujo a través del lecho sin carga, recibiendo por el florentador el condensado en una probeta volumétrica en un periodo de tiempo y tomando la lectura de temperatura del condensado. Con estos datos obtenidos se determina el flujo en kg/h de vapor de agua que

llega al tope del destilador y el flujo de agua condensada que retorna al fondo del destilador por pérdida térmica.

Los resultados presentados son el promedio de cuatro lecturas tomadas para cada condición de flujo de vapor al que se evaluará al equipo extractor.

En la siguiente tabla se resumen los datos.

Tabla 12

Evaluación de porcentaje de pérdida de flujo de vapor inyectado en el sistema

% apertura de válvula	m_{vap} (kg/h) inyectado	m_{vap} (kg/h) tope	m_{vap} (kg/h) fondo	% pérdida de flujo	Pérdida de energía térmica
60	3,539	1,833	1,706	48,2	-0,634

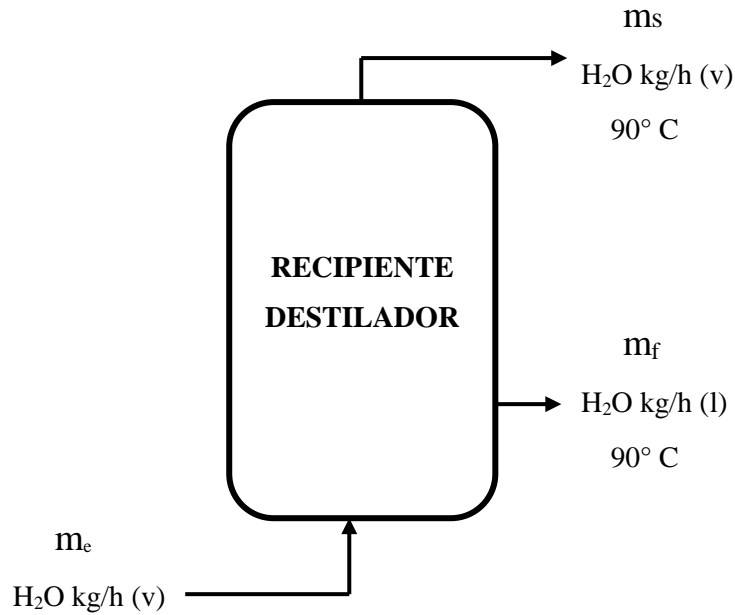
Donde:

m_{vap} (kg/h) inyectado, flujo másico de vapor inyectado desde el generador de vapor.

m_{vap} (kg/h) fondo, flujo de vapor condensado en fondo del destilador.

m_{vap} (kg/h) tope, flujo de vapor que llega al condensador después de sufrir pérdidas.

4.5.2. Cálculo de pérdida de energía térmica en el recipiente destilador



Ecuación general del balance de energía

$$[(H + E_k + E_p)\delta_m]_e - [(H + E_k + E_p)\delta_m]_s + \delta_Q - \delta_w = \frac{d(mu)}{dt}$$

Se tiene la relación:

$$m_e H_e - m_s H_s + Q = m_f U_f - m_i U_i$$

$$Q = m_f U_f - m_s H_s + m_e H_e$$

Datos:

$H_e = 2737,6$ kJ/kg (vapor de agua saturado a 548 mmHg)

$U_f = 377,0$ kJ/kg (Agua líquido saturado a 90° C)

$H_s = 2659$ kJ/kg (vapor de agua saturado a 90° C)

$m_f = 0,4$ kg_{agua} (agua condensada en el destilador)

$m_s = 4,79$ kg_{agua} (vapor + aceite esencial)

$m_e = 6,19$ kg_{agua} (vapor del caldero)

Reemplazando los flujos másicos respectivos se calcula la pérdida de energía del vapor de agua inyectado al lecho.

$$Q = 0,4 \text{ kg} * 377 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 6,19 \text{ kg} * 2737,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 4,79 \text{ kg} * 2659 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$
$$Q = -3958.34 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = -1,099 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

El signo negativo indica la pérdida térmica del vapor inyectado ocasionando que una parte del flujo de vapor inyectado se condense y retorne hacia el fondo del destilador.

4.5.3. Balance de energía en el condensador

Para el balance de energía en el condensador se considera el cambio de fase que sufre la mezcla de flujo de vapor y aceite esencial. El condensador empleado en la siguiente figura y tiene las siguientes características:

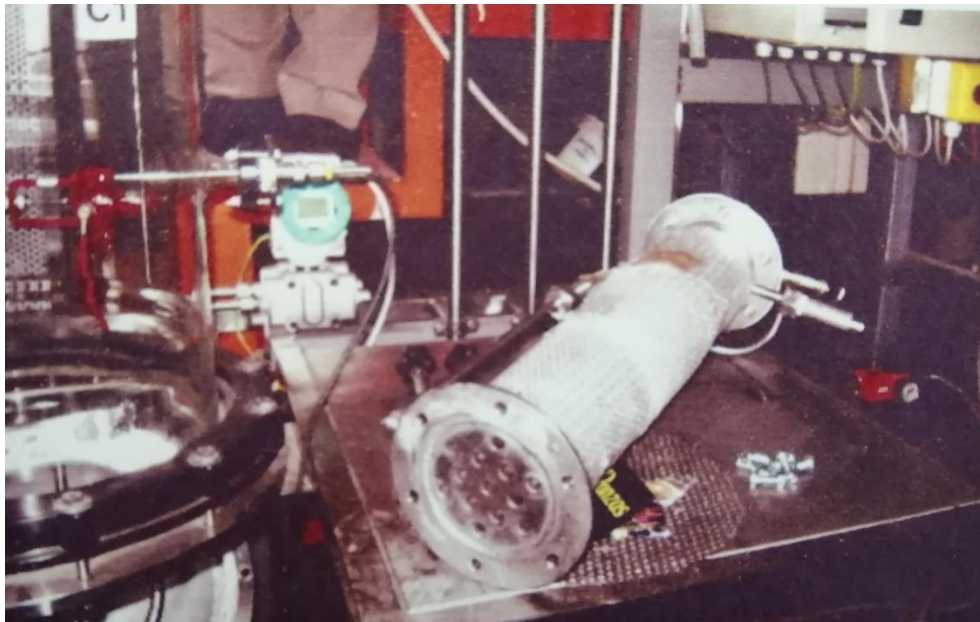


Figura 21. intercambiador de calor de tubos y carcasa de un paso empleado para condensar la mezcla de vapor de agua y aceite esencial. Fuente: Cárdenas (2014)

TUBO

Número de tubos: 13

Longitud: 0,505 m

Diámetro externo: 0,0127 m

Espesor: 1,5 mm

CARCAZA

longitud: 0,505 m

longitud del casco: 0,045 m

Diámetro externo: 0,1016 m

Espesor: 1,65 mm

Para el cálculo se ha hecho la suposición de transferencia de calor insignificante entre el intercambiador y los alrededores, y cambios de energía cinética y potencial despreciables.

Para las propiedades físicas, la mezcla del flujo de vapor de agua y aceite esencial se supuesto como flujo únicamente de vapor de agua debido a que la proporción de flujo de aceite esencial es mínimo en comparación al flujo de agua.

- **Energía transferida desde el lado de flujo de vapor calenté hacia la superficie externa de los tubos.**

$$q_{total.c} = q_1 + q_2 \dots \dots \dots (a)$$

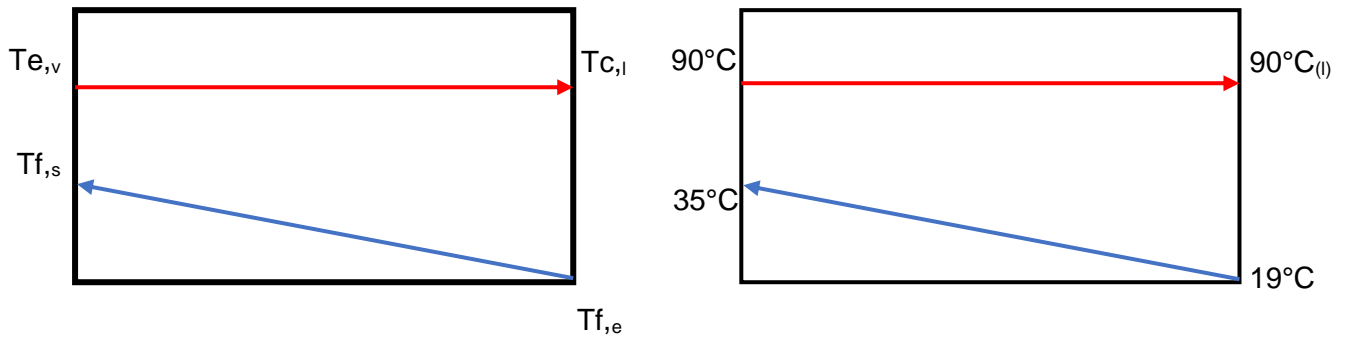
Donde:

$q_{total.c}$: Energía total transferida por el vapor de agua caliente

q_1 : Energía transferida por la condensación de vapor a 90° C

q_2 : Energía transferida por el enfriamiento de vapor condensado de 90° C a 21° C

▪ **Energía transferida por la condensación de vapor de agua a 90°C**



Condición especial del intercambiador donde ocurre la condensación del flujo de vapor de mezcla de aceite esencial y agua a 90°C, la línea azul representa al agua de refrigeración y la línea roja al flujo de vapor caliente de la mezcla agua-aceite esencial.

$$q_1 = m_c * (h_{fg}) \dots \dots \dots (b)$$

$$q_1 = m_c * (h_{fg}) \dots \dots \dots (b)$$

$$q_1 = 4,36 \frac{kg}{h} * 2342 \frac{kJ}{kg} \dots \dots \dots (b)$$

$$q_1 = 10211,12 \frac{kJ}{h}$$

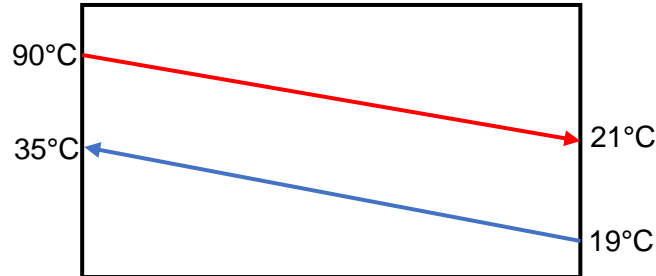
Donde:

q1: Energía latente transferida por la condensación

mc: flujo másico de vapor de agua que atraviesa la superficie del lecho

hfg: Entalpía de vaporización de agua

**Energía transferida por el enfriamiento de vapor condensado de 90°C a 21°C
de vapor de agua a 90°C**



$$q_2 = m_e * C_{p,c} * (T_{c,e} - T_{c,s}) \dots \dots \dots (c)$$

$$q_2 = 4,36 \frac{kg}{h} * 4,179 \frac{kJ}{kg^{\circ}C} * (90 - 21)^{\circ}C$$

$$q_2 = 1257,21 \frac{kJ}{h}$$

Donde:

me: Flujo másico de vapor de agua

Cp,c: Calor específico de agua

Tc,e: Temperatura de entrada de flujo de vapor caliente

Tc,s: Temperatura de salida de flujo de vapor caliente

Energía total transferida del flujo de vapor de agua caliente

$$q_{total,c} = q_1 + q_2 = 11468,33 \frac{kJ}{h}$$

- **Energía absorbida por el flujo de agua refrigerante alimentado al condensador**

Como el área de transferencia de calor entre los fluidos caliente y frío es la misma se puede comprobar que la energía absorbida por el agua de enfriamiento es la misma cantidad de energía que libera el fluido caliente:

$$q_f = m_f * C_{p,f} * (T_{r,s} - T_{r,e}) \dots \dots \dots (d)$$

$$q_f = 165.50 \frac{kg}{h} * 4,20 \frac{kJ}{kg^{\circ}C} * (35 - 19,5)^{\circ}C$$

$$q_3 = 11469,00 \frac{kJ}{h}$$

Donde:

mf: Flujo másico de agua refrigerante

Cp,f: Calor específico de agua

Tr,e: Temperatura de entrada de flujo de agua refrigerante

Tr,s: Temperatura de salida de flujo de agua refrigerante

V. CONCLUSIONES

1. Bajo las condiciones de operación de extracción se determinó los parámetros óptimos para la extracción de aceite esencial de eucalipto obteniéndose un mayor rendimiento con las siguientes variables:

Variables	Valor
Tamaño de partícula	1,25 cm
Flujo de vapor de agua	81,4 %
Altura de carga del lecho	32 cm
Tiempo de extracción	60 minutos

2. Manteniendo el mismo tamaño de partícula, al incrementar el flujo de vapor de agua al 81,4 % se concluye que se obtiene 32,23 g, es decir; mayor extracción de aceite esencial de Eucalipto.
3. Al evaluarse la altura de carga de lecho se logró el mayor rendimiento con una altura de 32 cm, obteniéndose un mayor peso de aceite esencial de eucalipto con 33,16 g, la cuál es mayor en comparación a otros ensayos obtenidos en el laboratorio.
4. El tiempo óptimo de extracción de aceite esencial de eucalipto está comprendida en un tiempo 60 minutos con un flujo de vapor de agua inyectado al 81,4 %, se obtiene mayor extracción de aceite esencial de 33,16 g, seguir extrayendo por encima de este tiempo no beneficiaría económicamente.
5. Se requiere 11468,33 kJ/h de energía total transferida para la operación de extracción de aceite esencial de eucalipto a partir de sus hojas en el equipo modular de extracción de aceites esenciales, con los parámetros óptimos determinados para cada ensayo se obtiene un rendimiento máximo de 1,20 %.

VI. RECOMENDACIONES

1. Se necesita profundizar más en el estudio de otras variables o factores que afectan el rendimiento y producción del aceite esencial de eucalipto (*Eucalyptus globulus*), variables como el estado vegetativo y manejo agronómico, de esta forma ofrecer un producto de alta calidad, con buen rendimiento de aceite y económicamente viable.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Albarracín, G. y gallo, S. (2003). *Comparación de dos métodos de extracción de aceite esencial de Piper aduncum (cordoncillo) procedente de la zona cafetera*. Universidad Nacional de Colombia Cerpa, M. G. 2007.
- "HIDRODESTILACIÓN DE ACEITES ESENCIALES". Doctoral diss., Department of Chemical Engineering and Environmental Technology, University ofValladolid, Spain.
- Arteaga, (2012). *Efecto de la presión de vapor y tiempo de extracción en el rendimiento y características fisicoquímicas de aceite esencial de cedrón (Aloysia triphylla)*. Universidad Nacional de Trujillo – Perú.
- Bandoni, A. (2000). *Los recursos vegetales aromáticos en Latinoamérica. Su aprovechamiento industrial para la producción de aromas y sabores*. 1ª Ed, Editorial U. Nacional de la Plata, La Plata. p.p. 13 – 42.
- Braverman, J.B.S. (1980). *Bioquímica de los alimentos*. Nueva Edición. Z. Berd Editorial Manual Moderno.
- Biocomercio Sostenible. (2003). *Estudio del mercado nacional de aceites esenciales*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos “Alexander von Humboldt”. Bogotá, Colombia, 85 p.
- Cárdenas M. (2004). *“Determinación de parámetros de operación para la destilación por arrastre con vapor de agua del aceite esencial de molle (Schinus molle Linneo) en el equipo modular de extracción de aceites esenciales de la FIQM - UNSCH”* Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga – Ayacucho.

- Cerpa, M. G. (2007). *"Hidrodestilación de aceites esenciales"*. Doctoral diss., Department of Chemical Engineering and Environmental Technology, University of Valladolid, Spain.
- Cisneros, A; Medrano T. (2009) *"Diseño, construcción y evaluación de un destilador de aceites esencial de eucaliptol (eucalyptus globulus labill) por arrastre de vapor a nivel de planta piloto"*. Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga.
- Cruzado, A. (2012). *"Efecto de la presión de vapor y tiempo de extracción en el rendimiento y características fisicoquímicas de aceites esencial de cedrón (Aloysia triphylla)"*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- De León, M. (2008). *"Comparación del rendimiento del aceite esencial de dos especies de eucalipto (Eucalypto citriodora Hook y Eucalypto camaldulensis Dehnh), aplicando el método de hidrodestilación a nivel de laboratorio"*. Universidad de San Carlos de Guatemala Facultad de Ingeniería-Escuela de Ingeniería Química. Guatemala.
- Di Leo P. (2016). *"Caracterización fitoquímica del cedrón (Aloysia triphylla) en Argentina para su normalización"*. Universidad de Buenos Aires.
- Díaz, O. (2007). *"Estudio comparativo de la composición química y evaluación de la actividad antioxidante del aceite esencial de Aloysia triphylla cultivada en 3 regiones de Colombia"*. Universidad de Medellín
- Fair, J.R. (1987). *Distillation. En R.W. Rousseau (Ed). Handbook of separation Process technology. Wiley. Nueva York. Estados Unidos de América. pp. 229-339.*
- Farga C., Lastra J. y Hoffmann A., (1988) plantas medicinales de uso común en Chile,

Santiago de Chile.

Fernandez, C.; Catrinescu, C.; Castillo, P.; Russo, P. Y Carrott, M. (2006) Catalytic conversion of limonene over acid activated serra de Dentro (SD) bentonite. Appl. Catal, A. 318, p.p. 108-120.

García J. (2017) “*Extracción de aceite esencial por fluidos supercríticos y arrastre de vapor de cedrón (Aloysia triphylla) en la región Arequipa*”. Universidad Nacional San Agustín de Arequipa.

Granados, C.; Santafé, G.G.; Acevedo, D. (2015). Composición química y evaluación de la actividad antioxidante del aceite esencial de *Eucalyptus globulus* de Norte de Santander (Colombia).

Grunfeld R. (1960). Composition of the essential oil of four medicinal plants from Ecuador. Flavour and Fragrance Journal pag. 527- 531.

Jiménez A. (2003). Diseño de procesos en ingeniería Química. México Editorial Revent S.A. Pag. 81-83

Kubecska L. (2002). Destilación de aceites esenciales. Cadena Alimentaria. Revista para el procesamiento de alimentos a pequeña escala. National Lottery Charities Board. ITDG. pag. 8-11.

Lima, S. (2005). “*Análisis de los rendimientos obtenidos de dos especies de eucalipto trabajados en seco a nivel laboratorio y a nivel planta piloto en la extracción de su aceite esencial*”, Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería química Universidad de San Carlos de Guatemala.

Marcial E. (2014). ”*Determinación de parámetros de operación para la destilación por arrastre de vapor de agua del aceite esencial de molle (schinus molle linneo) en*

el equipo modular de extracción de aceites esenciales de la FIQM-UNSCH.
Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga.

Martínez, A. (2003). *Aceites esenciales*. Universidad de Antioquia. Medellín.
Colombia <http://farmacia.udea.edu.co/-ff/esencias2001b.pdf>

Masuda, H.; Ueno, T. Y Muranishi, S. (2002). *Inhibition of citral deterioration*. ACS
Symp. Ser. Free radicals in Food Chemistry, Nutrition and Health Effects, 807,
p.p. 176-187.

Mantero C. et al (2007). "*Potencialidad para la producción de aceites esenciales en
especies de Eucaliptus cultivadas en Uruguay*". Proyecto de Bioproducción de
terpenos a partir de desechos de la industria forestal agrociencias, vol XI N° 2

Montoya, O., El eucaliptol. Ed. Mundi-Prensa, Madrid, España; 1995

Muñoz, L. (2002). *Plantas medicinales y aromáticas; estudio, cultivo y procesado*. Ed.
Mundi-Prensa, Madrid, 4a Ed.

Navarrete, C. (2009). *Extracción y caracterización del aceite esencial de mandarina
obtenido de residuos agroindustriales*. Universidad Nacional de Colombia Sede
Medellin.

Pensiero, J.; Muñoz, J.; Martínez, V. (2002). *Proyectos de Investigación aplicada a los
recursos forestales nativos (PIARFON)*. Alternativas de sustentabilidad del
bosque nativo del Espinal. Proyecto Bosques Nativos y Áreas Protegidas. Área
Etnobotánica. Argentina.

Revista de fitoterapia. Sociedad Española de Fitoterapia. España. 3 (1). 2003. p.19-
25.

Revoredo NL. (1995). *Acción Hipoglucemígena de Eucaliptus citriadora Hook.*

Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima-Perú.

Sefidkon, F., Abbasi, K. Y Khaniki, G. B. (2006). *Influence of drying and extraction methods on ginger (Zingiber officinale)*, Revista Amazónica de Investigación Alimentaria, 1 (1):38 - 42. Universidad Nacional Amazónica del Perú. Perú.

Stashenko, E.; Combariza, J. Y Puertas, M. (1998). *Aceites esenciales: Técnicas de extracción y análisis*. Laboratorio de Cromatografía, UIS, 30 p.

Valnet J. (1990). Destilación de aceites esenciales. Cadena Alimentaria. Revista para el procesamiento de alimentos a pequeña escala. National Lottery Charities Board. ITDG.

Vargas, M., (1985) *Proyecto de instalación de una planta piloto para la determinación de eucaliptol en el departamento de Junín*. Universidad Nacional San Cristobal de Huamanga.

Wankat, P.C.(1988). Equilibrium Staged Separations. Separations in Chemical yield and chemical composition of the essential oil of *Satureja hortensis*. Food Chemistry. 99:19-23.

Farmacopea Nacional Argentina VI Edición, 1992

ANEXOS

ANEXO 1. DETERMINACIÓN DE LA MÁXIMA EXTRACCIÓN POR EL MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN DE LA SECCIÓN DORADA

La función objetivo para un problema de optimización debe ser unimodal para que el valor óptimo global se garantice al resolver el problema mediante algún método numérico, funciones no unimodales conducen a soluciones que no garantizan un valor óptimo global. Cabe mencionar que las funciones unimodales no necesariamente continuas o diferenciables.

La optimización es decisiva porque disminuye el número de elecciones posibles hasta reducirlas a una sola, la mejor. Además, proporciona información sobre la sensibilidad de las condiciones óptimas.

Procedimiento:

- Una vez realizada la curva correspondiente a la variable evaluada, determinar las ecuaciones de los intervalos de las líneas en el punto de modificación de pendiente.
- Establecer y graficar las ecuaciones de la recta tangente a la curva en las respectivas secciones.

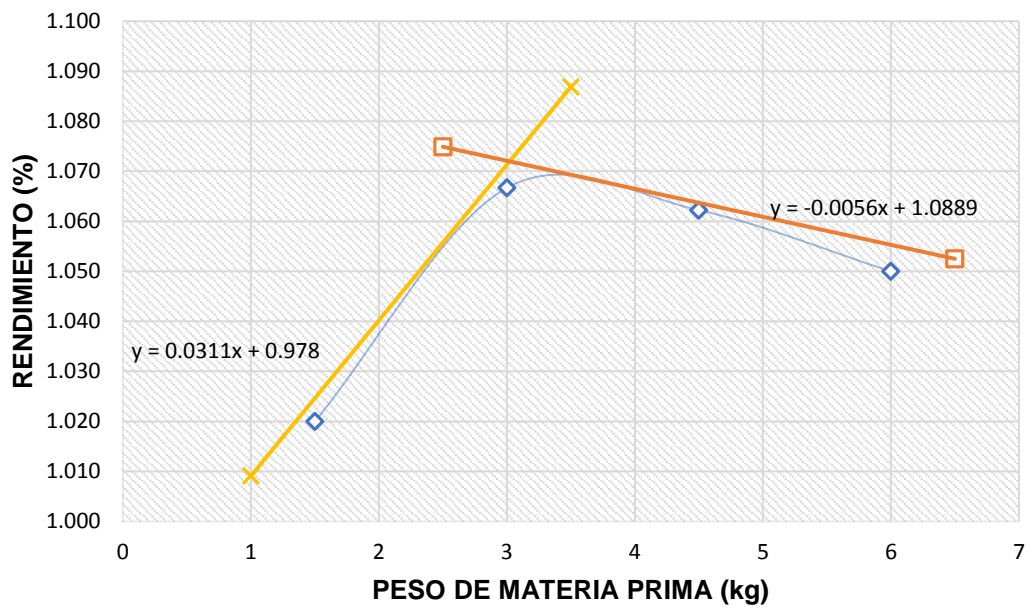


Figura 22. Gráfica de las ecuaciones de la recta tangente a la curva

- Ecuación de la recta: $y = m * x - b$

Donde:

m: pendiente

b: intercepto

1. $y = 0.0311x + 0.978$
2. $y = -0.0056x + 1.0889$

- Estas rectas son graficadas hasta que se intercepten, como se hizo en la figura anterior.

- Para determinar la sección dorada, resulta de calcular la recta bisectriz:

$$L_1 = A_1x + B_1y + C_1 = 0$$

$$L_2 = A_2x + B_2y + C_2 = 0$$

- Las bisectrices de los ángulos suplementarios formados por L1 y L2 al intersectarse está dado por la siguiente ecuación:

$$\frac{|A_1x + B_1y + C_1|}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2}} = \frac{|A_2x + B_2y + C_2|}{\sqrt{A_2^2 + B_2^2}}$$

- De la intersección entre la recta bisectriz y la curva, proyectar una recta perpendicular al eje "X" correspondiente al rendimiento máximo a esa relación (F/D).

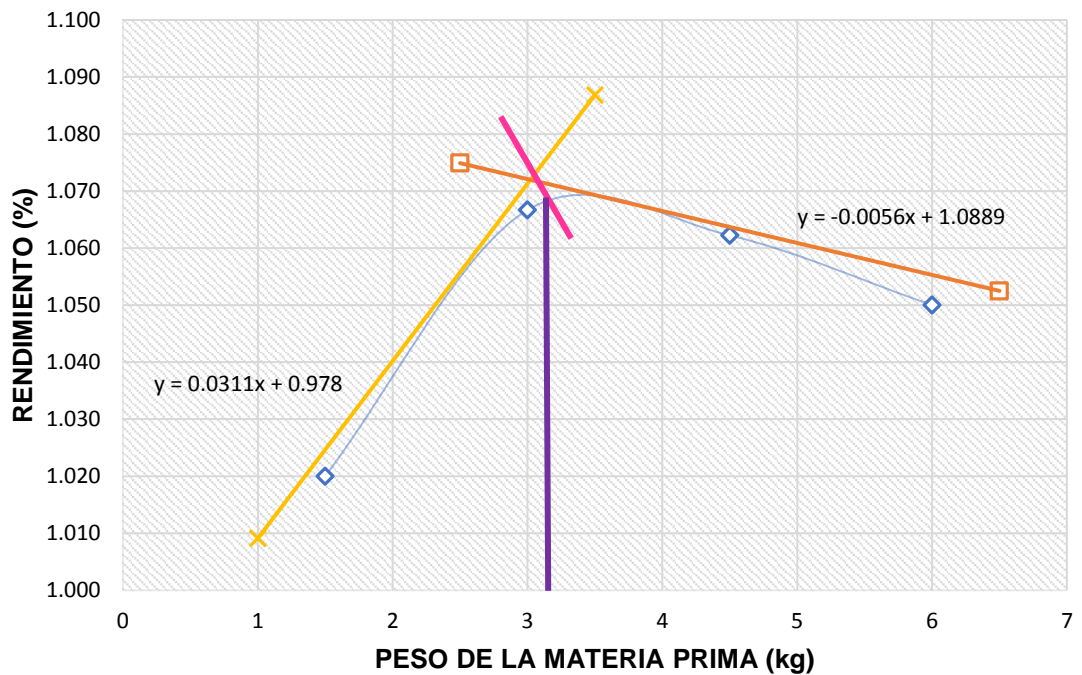


Figura 23. Gráfica de la bisectriz y la recta perpendicular al eje "x"

ANEXO 2. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

a. Humedad (método gravimétrico de la estufa)

Se coloca 5g de hojas de Eucalipto en una placa petri previamente pesada, luego se introducirá en una estufa a 105°C por 4 horas. Finalmente se pesará la placa y la muestra seca, y se calculará la humedad usando la fórmula (1).

$$\% \text{ humedad} = \frac{\text{peso muestra inicial (g)} - \text{peso muestra seca (g)}}{\text{peso muestra inicial (g)}} \times 100 \dots \dots (1)$$

b. Cenizas (método por incineración directa)

Se coloca 5g de hojas de Eucalipto en un crisol previamente pesado, luego se introducirá en la mufla a 500 °C por 8 horas. Finalmente se pesó el crisol con las cenizas y se calculó la humedad usando la formula (2)

$$\% \text{ cenizas} = \frac{\text{peso cenizas (g)}}{\text{peso muestra inicial (g)}} \times 100 \dots \dots (2)$$

c. Porosidad

Se llenó una probeta con el producto Hasta los 100 mL y luego se completó los espacios con agua. El agua se vació a otra probeta y se midió su volumen. La porosidad se calculó de la siguiente formula.

$$\epsilon = \frac{\text{volumen}_{\text{agua}} \text{ (mL)}}{100 \text{ mL}} \times 100 \dots \dots (3)$$

d. Densidad aparente

Se llenó 100 mL del producto en una probeta de peso conocido. Luego se pesará la probeta con el producto, y se aplicó la siguiente fórmula:

$$\rho_{aparente} = \frac{W_{pdto+probeta} - W_{probeta}}{100 \text{ mL}} \dots \dots (4)$$

Donde W = peso en gramos

e. Densidad real

Teniendo la densidad aparente y la porosidad, la densidad real se calculó con la siguiente fórmula:

$$\rho_{real} = \rho_{aparente} (1 - \epsilon) \dots \dots (5)$$

ANEXO 3. GALERÍA DE FOTOS



figura 24. Equipo modular de extracción de aceites esenciales



figura 25. Planta de Eucalipto en el barrio de Huatatas



figura 26. Recolección de hojas de Eucalipto



figura 27. Acondicionamiento de la materia prima



figura 28. Materia prima para los ensayos correspondientes



figura 29. Extracción de aceite esencial de eucalipto



figura 30. Separación del aceite y el agua floral

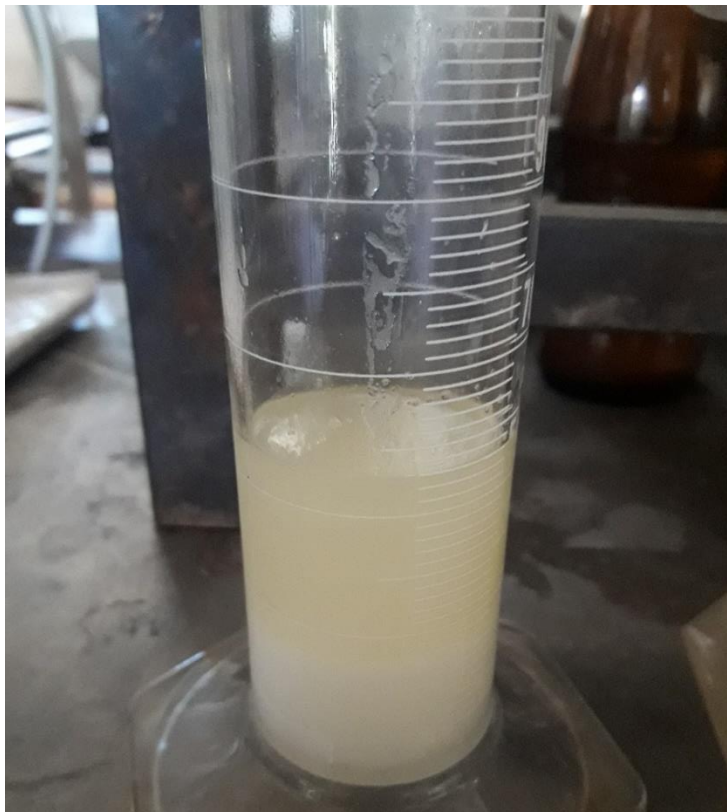


figura 31. Aceite esencial de eucalipto



Figura 32. Aceite esencial de eucalipto envasado



figura 33. Hojas de eucalipto después de la extracción