



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**Aprovechamiento del raleo y poda del bosque del pinabete (*Abies guatemalensis* Rheder), para la extracción y caracterización del aceite esencial a nivel planta piloto y su escalonamiento industrial, para elaboración un producto de limpieza y una esencia**

Juan Carlos Castañeda Molina  
Asesorado por: Ing. José Eduardo Calderón García

Guatemala, febrero de 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**APROVECHAMIENTO DEL RALEO Y PODA DEL BOSQUE DEL  
PINABETE (*ABIES GUATEMALENSIS* RHEDER), PARA LA  
EXTRACCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE ESENCIAL A  
NIVEL PLANTA PILOTO Y SU ESCALONAMIENTO INDUSTRIAL,  
PARA ELABORACIÓN UN PRODUCTO DE LIMPIEZA Y UNA ESENCIA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTA DE  
INGENIERÍA

POR  
**JUAN CARLOS CASTAÑEDA MOLINA**

**ASESORADO POR: ING. JOSÉ EDUARDO CALDERÓN GARCÍA**

**AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, FEBRERO DE 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



### **NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL I	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez

### **TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

Decano	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
Examinador	Dr. Ing. Adolfo Narciso Gramajo Antonio
Examinador	Ing. Víctor Herberth De León Morales
Examinador	Ing. Jorge Rodolfo García Carrera
Secretario	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

APROVECHAMIENTO DEL RALEO Y PODA DEL BOSQUE DEL PINABETE (*Abies guatemalensis* Rheder), PARA LA EXTRACCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE ESENCIAL A NIVEL PLANTA PILOTO Y SU ESCALONAMIENTO INDUSTRIAL, PARA ELABORACIÓN UN PRODUCTO DE LIMPIEZA Y UNA ESENCIA.

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Química, con fecha 11 de agosto de 2004.

Juan Carlos Castañeda Molina

# ÍNDICE

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XV
OBJETIVOS	XVII
HIPÓTESIS	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. DESCRIPCIÓN DEL Abies guatemalensis Rehder	1
1.1 Biogeografía: Características ecológicas de los bosques de pinabete	3
1.1.1 Distribución de los abetos	3
1.1.2 Distribución de los abetos en el mundo	3
1.2 El pinabete en Guatemala	4
1.2.1 Asociaciones vegetales de la especie	5
1.3 Estado actual de las poblaciones de pinabete en Guatemala	6
1.3.1 Área y distribución	6
1.4 Tipos de bosque	7
2. ACEITES ESENCIALES	9
2.1 Extracción por arrastre de vapor	11
2.1.1 Extracción por calentamiento de agua	12
2.1.2 Extracción con vapor y caldillo (vapor húmedo)	12
2.1.3 Extracción por arrastre con vapor directo (vapor seco)	13

3. DISEÑO DE EQUIPO PARA LA EXTRACCIÓN DE ACEITE ESENCIAL A PARTIR DE EXTRACCION POR ARRASTRE CON VAPOR	15
3.1 El cambio de escala	16
3.1.1 Similitud y cambio de escala	17
3.1.2 Números adimensionales y cambio de escala	15
3.1.3 Ecuaciones diferenciales y similitud	19
3.1.4 Similitud y descripción física	19
3.1.5 La comparación de sistemas con distintas formas	20
3.1.6 El concepto de régimen en el cambio de escala	21
4. PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE ESENCIAL DE PINABETE POR MEDIO DE ARRASTRE CON VAPOR A NIVEL PLANTA PILOTO	23
5. RESULTADOS	27
5.1 Datos óptimos de extracción a nivel planta piloto	27
5.2 Caracterización del aceite esencial de pinabete	27
5.3 Escalonamiento de la extracción de aceite esencial de pinabete por medio de arrastre con vapor a partir de una escala de planta piloto	28
5.3.1 Macerador	28
5.3.1.1 Parámetros de diseño	29
5.3.1.2 Ecuaciones de diseño	29
5.3.2 Platos	30
5.3.2.1 Parámetros de diseño	31
5.3.2.2 Ecuaciones de diseño	31
5.3.3 Intercambiador de calor	32
5.3.3.1 Parámetros de diseño	32
5.3.3.2 Ecuaciones de diseño	33
5.3.4 Vaso florentino	36

5.3.4.1	Parámetros de diseño	37
5.3.5	Diagrama de flujo del proceso	37
5.4	Diseño de la formulación óptima para la elaboración de una esencia de pinabete a partir de su aceite esencial	38
5.4.1	Formulación	38
5.4.2	Preparación	38
5.5	Diseño de la formulación óptima para la elaboración de un desinfectante para limpieza.	38
5.5.1	Formulación	38
5.5.2	Preparación	39
5.6	Tiempo económico de pago para la inversión de una planta de extracción de aceite esencial con arrastre de vapor, así como algunos aspectos económicos	39
6.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	41
	CONCLUSIONES	51
	RECOMENDACIONES	53
	BIBLIOGRAFÍA	55
	APÉNDICE	57
	APÉNDICE A. Datos originales	59
	APÉNDICE B. Datos calculados	63
	APÉNDICE C. Gráficas de tendencia y comportamiento de los lotes.	67
	APÉNDICE D. Análisis de error	71
	ANEXOS	73
	ANEXO 1. Fotografías	75
	ANEXO 2. Cromatograma	79







# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1. Distribución de los abetos en el mundo	3
2. Distribución del pinabete en Guatemala	5
3. Estado del pinabete en Guatemala	7
4. Extracción con agua y vapor (vapor húmedo)	12
5. Extracción directa con vapor (vapor seco)	13
6. Macerador	23
7. Distribución de la materia prima en los platos dentro del macerador	24
8. Platos	24
9. Distribución equitativa de la materia prima	24
10. Aceite esencial con hexano en el vaso florentino	25
11. Decantación y separación del aceite esencial del hexano	25
12. Dimensiones del macerador	28
13. Dimensiones, arreglo y distribución de los platos	30
14. Dimensiones del condensador de contacto indirecto de concha y tubos de calor, así como arreglo de los tubos	32
15. Dimensiones del vaso florentino, dimensiones del embudo que va sobre el vaso florentino	36
16. Diagrama de flujo del proceso	37
17. Variación del rendimiento en función del lugar de donde proviene la ramilla	67
18. Variación del rendimiento en función del lugar del tamaño de partícula	67
19. Variación del rendimiento en función del tiempo de extracción	68
20. Variación del rendimiento en función del tamaño del lote	68

21. Variación del rendimiento en función del flujo de vapor	69
22. Materia prima agotada después de la extracción	75
23. Intercambiador de calor	75
24. Caldera	75
25. Extracción por arrastre de vapor de aceite esencial de pinabete a nivel laboratorio	76
26. Caracterización del aceite. Determinación de la densidad	76
27. Caracterización del aceite. Determinación del índice de refracción	76
28. Esencia	77
29. Desinfectante	78
30. Cromatograma del aceite esencial crudo de pinabete	79

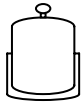
### **TABLAS**

I. Simbología de los flujos en el diagrama de flujo	37
II. Rendimiento y volumen de aceite obtenido para cada uno de los lotes realizados, así como las variables para cada lote	59
III. Volumen de hidrolato obtenido para cada uno de los lotes realizados, así como las variables para cada lote	60
IV. Temperaturas de entrada y salida para cada flujo para cada uno de los lotes realizados	61
V. Variación del rendimiento según el lugar de donde proviene la ramilla	63
VI. Variación del rendimiento según el tamaño de partícula	63
VII. Variación del rendimiento según el tiempo de extracción	64
VIII. Variación del rendimiento según el tamaño del lote	64
IX. Variación del rendimiento según el flujo de vapor	65

# LISTA DE SÍMBOLOS



Caldera



Macerador



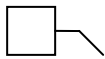
Intercambiador de calor



Enfriador (chiller)



Bomba centrífuga



Vaso florentino



Tanque



Válvula de bola



Válvula de globo



Termómetro

# GLOSARIO

- Aceite esencial** Aceite que comúnmente proviene de las flores, hojas y partes blandas o delgadas de vegetales. El aceite esencial posee olor característico bastante fuerte, es volátil y comúnmente es menos denso que el agua.
- Análisis dimensional** Es la técnica que permite obtener el modelo matemático de un fenómeno físico, químico o fisicoquímico al analizar las dimensiones de las variables involucradas; se parte de la premisa de que toda ecuación que describe a un fenómeno debe ser dimensionalmente homogénea.
- Bactericida** Cualquier agente que destruye las bacterias.
- Caldera** Aparatos tubulares calentados directamente, que por principio convierten la energía del combustible en calor latente de vaporización.
- Cambio de escala** Técnica que permite predecir los comportamientos de sistemas físicos, químicos o fisicoquímicos, a diferentes escalas, partiendo de los comportamientos obtenidos a nivel de planta piloto o a nivel de laboratorio.

<b>Correlación</b>	Regresión matemática, que determina la variación y la exactitud de la interpretación de datos numéricos a partir de modelos. La precisión del modelo aumenta en forma que la correlación se acerque a uno.
<b>Cromatografía</b>	Método fisicoquímico de análisis que permite separar los componentes de una mezcla de sustancias por su distinta distribución entre una fase estacionaria que tiende a retenerlos, y una fase móvil que los desplaza.
<b>Cromatograma</b>	Diagrama donde se obtienen los resultados de una cromatografía.
<b>Densidad</b>	Relación entre la masa de un cuerpo y el volumen que éste ocupa.
<b>Desinfectante</b>	Agente, por lo general producto químico, que mata las forma vegetativas de los organismos patógenos, pero no necesariamente las formas residentes o esporas.
<b>Destilación</b>	Separación de dos o más estancias miscibles entre sí, por medio de sus distintos puntos de ebullición.
<b>Dimensión</b>	Código para expresar cómo cambia el valor numérico de una cantidad cuando son aplicadas ciertas transformaciones a las unidades básicas de medición.
<b>Condensador</b>	Intercambiador de calor latente, cuya función es condensar vapor a líquido.
<b>Diagrama de flujo</b>	El diagrama de flujo o flujograma, es la representación gráfica de un proceso utilizando para los equipos la simbología química. Los equipos se unen por medio de líneas que representan el flujo de los materiales.

<b>Flujo másico</b>	Cantidad de masa por unidad de tiempo.
<b>Grado reactivo</b>	Grado de un reactivo químico, en el cual está a una pureza similar al 100% o condiciones de máxima pureza, habiéndose sometido a un alto grado de control de calidad.
<b>Grupo adimensional</b>	Reunión de dos o más variables, multiplicadas, divididas o elevadas a exponentes y cuya estructura final carece de dimensiones.
<b>Intercambiador de calor</b>	Equipo de intercambio de energía térmica, en el cual un fluido caliente le cede energía térmica a un fluido frío.
<b>Macerador</b>	Es un tanque con chaqueta para calentamiento con vapor, en el cual se introduce la materia prima para sufrir algún proceso.
<b>Modelo</b>	Replica a escala del sistema estudiado.
<b>Modelo matemático</b>	Modelo en el cual se relaciona datos numéricos en una ecuación de dos o más variables.
<b>Neoclavenger</b>	Equipo para realizar extracciones con arrastre de vapor a nivel laboratorio.
<b>Parábola</b>	Curva abierta, simétrica respecto a un eje, con un foco y que resulta de cortar un cono circular recto por un plano paralelo o una generatriz que cortará a todas las otras en una sola hoja del cono.

<b>Planta piloto</b>	Es una planta a escala pequeña (100-1000L) con los mismos parámetros de diseño de una planta industrial.
<b>Proceso</b>	Conjunto de operaciones unitarias, que mediante pasos ordenados, da lugar a la transformación de materias primas en productos terminados.
<b>Rendimiento</b>	Relación de masa del aceite extraído en comparación de la masa de materia prima inicial.
<b>Similitud cinemática</b>	Se presenta cuando entre dos sistemas, las relaciones entre las velocidades en puntos correspondientes de ambos sistemas son las mismas y existe similitud geométrica.
<b>Similitud dinámica</b>	Se da cuando además de haber similitud geométrica, las relaciones entre las fuerzas en puntos correspondientes en ambos sistemas son iguales.
<b>Similitud natural</b>	Similitud que se obtiene independientemente de la variación de los parámetros característicos del sistema.
<b>Similitud geométrica</b>	Dos sistemas guardan similitud geométrica si las razones entre sus longitudes correspondientes son iguales.
<b>Solvente</b>	Sustancia que está en mayor cantidad en una solución y que tiene la capacidad de distribuir en su seno, homogéneamente, otro material que se llama soluto.



<b>Sotobosque</b>	Vegetación leñosa que crece bajo el estrato arbustivo superior de un bosque.
<b>Propiedad extensiva</b>	Es la propiedad de la sustancia que depende de la cantidad de materia que se mida.
<b>Propiedad Intensiva</b>	Es la propiedad de la sustancia que depende de la cantidad de las mismas y siempre esta dada por la relación o multiplicación de 2 ó 3 de ellas.





# RESUMEN

En el presente trabajo se extrajo aceite esencial crudo de pinabete a partir de las ramillas de pinabete provenientes de la poda y el raleo de la producción agrícola del árbol. La extracción de aceite esencial crudo de pinabete, se llevó a cabo utilizando el método de arrastre con vapor. La extracción se realizó en la planta piloto de extracción-destilación del Centro de Investigaciones de Ingeniería, de la Universidad de San Carlos de Guatemala

El aceite esencial se caracterizó fisicoquímicamente y cromatográficamente. Así mismo, de dicho aceite, se diseñaron y formularon dos productos. Estos son, una esencia con olor a pinabete y un desinfectante con olor a pinabete.

Se determinaron las variables óptimas de extracción del aceite esencial por medio de arrastre con vapor a nivel planta piloto, para su posterior escalonamiento. Las variables de proceso óptimas determinadas son el flujo de vapor, el tamaño de partícula, el tiempo de extracción y el tamaño del lote. Dichas variables se determinaron con modelos matemáticos que describieron su comportamiento a partir de datos experimentales. A partir de las variables óptimas, se determinaron las ecuaciones de diseño para el escalonamiento (scale-up), así como el diseño del equipo en función del aumento de escala. Las variables óptimas para la extracción de aceite son un tiempo de extracción de 110.63 minutos; 6.26 Kg de tamaño de lote; 16.42 kg/s de flujo másico de vapor; un tamaño de partícula de 2x4 cm, para un rendimiento máximo de 0.79%.



# OBJETIVOS

## General

- Caracterizar el aceite esencial del pinabete, así como determinar su proceso de extracción del aceite esencial de pinabete a partir del raleo a nivel planta piloto, para su escalonamiento industrial en la elaboración y formulación de un material de limpieza y una esencia.

## Específicos

1. Determinar las variables de proceso, para la extracción de aceite esencial de pinabete a partir de las ramas de este a nivel planta piloto.
2. Caracterizar fisicoquímicamente el aceite esencial de pinabete.
3. Determinar el rendimiento del proceso y diseño a escala industrial a partir de datos de planta piloto.
4. Diseñar la formulación óptima para la elaboración de una esencia de pinabete a partir de su aceite esencial.
5. Diseñar la formulación óptima para la elaboración de un desinfectante para limpieza a partir de su aceite esencial.



# HIPÓTESIS

A partir de las ramas del pinabete, se puede extraer aceite esencial. Con este aceite esencial, se pueden realizar varios productos, como una esencia y un desinfectante para limpieza. Tanto la extracción de aceite esencial, como la elaboración de productos a partir de él, puede hacer rentable un bosque de pinabete.





# INTRODUCCIÓN

El pinabete (*Abies guatemalensis* Rheder) es una especie endémica de Guatemala, distribuida entre 2,400 a 3,400 msnm, con una forma y olor que le hace un excelente árbol navideño. En la actualidad, se encuentra amenazado debido al cambio del suelo, el pastoreo en el sotobosque, la extracción de madera y los incendios. En la temporada de fin de año, la demanda del pinabete para árbol de navidad es bastante grande, debido a que el consumidor prefiere que su hogar tenga una aroma agradable, el cual no brinda un árbol artificial.

Para fortalecer la sensación de olor agradable que ofrece el pinabete, se propone la formulación de una esencia de pinabete a partir de sus ramas proveniente del raleo y la formulación de un desinfectante de limpieza con olor a pinabete, como un ejemplo del uso del aceite esencial.

Para la extracción del aceite esencial del pinabete, se utilizó como materia prima ramas de pinabete. Un buen manejo y uso de los recursos del bosque de pinabete evitará su destrucción y más bien, puede fomentar su plantación y manejo de bosques naturales. Una de las razones por la cual el desramado para árboles de navidad es una amenaza para el bosque de pinabete, es porque no se hace con fundamentos científicos por lo que se debilita al árbol y debido a que la actividad se realiza en la época en la que los árboles están produciendo semillas, reduce la capacidad de la regeneración natural de la especie. En un bosque bien manejado, el corte de ramas no debilitará el árbol y no contribuirá a su destrucción.

En el presente trabajo se obtuvo el aceite esencial crudo del pinabete, así como la caracterización fisicoquímica del aceite esencial a nivel planta piloto y se realizó un escalonamiento industrial.

Los resultados de este proyecto permiten fomentar la industrialización del aceite esencial de pinabete, estimulando el buen manejo de plantaciones y bosques naturales. Así mismo, debido a la rentabilidad que puede ocasionar la comercialización de la esencia del pinabete, crea una tendencia de reforestación y buen manejo del bosque de pinabete, ayudando a la preservación del mismo.

# 1. DESCRIPCIÓN DEL *Abies guatemalensis* Rehder

**Familia:** Pinaceae

**Sinónimos:** *Abies tacanensis* Lundell, *Abies guatemalensis* variedad *tacanensis*<sup>1</sup>  
(Lundell, Martínez)

**Nombre común:** Pinabete, Tzin'chaj (Quiche), Pachac (Mam), Pashaque.

**Características:** conífera de hoja perenne con el tronco generalmente fuerte y recto que alcanza una altura de 45 metros. La copa es piramidal, en los ejemplares jóvenes de manera regular, y más aplanada en los ejemplares adultos. Es una especie monoica.

**Ramas:** las ramas principales están dispuestas casi horizontalmente. En los ejemplares que crecen libremente el tronco está ramificado desde la base. En la copa, las ramas se mantienen erguidas. Ramitas jóvenes peludas y brotes algo brillantes.

**Corteza:** la corteza oscura es lisa, de color gris, y adquiere con la edad algunas grietas con vejigas resinosas.

**Hojas:** aciculares, de hasta 3 ó 4 cm de longitud y 2 mm de ancho, romas en la punta, con un eje transversal y una línea de color claro en el envés, de color verde oscuro por la cara superior, flexibles, ubicadas sobre numerosos puntos y dispuestas en dos hileras.

**Conos:** de color azulado, ovalados y resinosos. Los conos masculinos tienen hojas escumiformes en su parte interior. Los femeninos generalmente de unos diez cm, erguidos, cilindricos, insertados en el eje. Orientados hacia lo alto cuando están a punto de ser polinizados, en un principio de color azulado, más tarde de color pardo rojizo y maduro, de color pardo más claro.

---

<sup>1</sup> (El *A. guatemalensis*) "Porta sus hojas con el ápice enmarginado, la hendidura longitudinal del limbo en la cara superior está levemente marcada y los haces fibrovasculares se ven contiguos en los cortes transversales característicos que no presenta la especie original." Esta descripción la hizo Máximo Martínez en 1963 para distinguirlo del *Abies tacanensis* descrito anteriormente por Lundell.

**Semillas:** de 8 a 10 milímetros de color castaño claro, provistas de un ala membranosa de hasta 15 mm de largo. Fructifica en octubre. Se pueden recoger entre diciembre y enero.

**Flores:** unisexuales, la femenina de color rojo o púrpura. Se observan en abril y mayo.

**Hábitat:** especie que suele crecer asociada a *Pinus ayacahuite*, *Cupressus lusitanica* y *Quercus* spp. También en rodales solos. Vegetación acompañante del reino holártico típica de bosques templados. Formando a menudo extensiones en altitudes comprendidas entre los 2,400 y 3,400 msnm, sobre suelos frescos y de mediana profundidad. En el piso altitudinal subalpino<sup>2</sup>, con temperaturas muy bajas de noche y altas de día. Exposición al norte y noroeste.

**Distribución:** en las montañas del altiplano guatemalteco y en algunas montañas de México. Se ha reportado pero sin evidencias en Honduras y El Salvador.

**Generalidades:** el pinabete puede alcanzar edades de más de doscientos años y grandes tamaños. En Guatemala, ha estado amenazado por el pastoreo, por el desramado en Navidad y por el cambio de uso del suelo. Tradicionalmente, algunas comunidades indígenas lo han utilizado para hacer el tejado de sus casas, la tejamanil, apreciada por su resistencia a las condiciones climáticas a la intemperie. En el siglo XVIII, Fray Francisco Ximénez ya hablaba de las condiciones *incompactibles* de la madera de pinabete. Muy apreciado por su olor balsámico y agradable, las comunidades indígenas usan las ramas de pino y pinabete en sus fiestas tradicionales, para adornar el suelo de las casas e iglesias.

---

<sup>2</sup> Este piso bioclimático es el que se usa para la clasificación de los bosques templados. En Guatemala, es usual la clasificación Holdridge, que lo sitúa en el piso muy húmedo subtropical montano.

## 1.1 Biogeografía: Características ecológicas de los bosques de pinabete

### 1.1.1 Distribución de los abetos

El género *Abies* se desarrolla en la zona templada del Hemisferio Norte, en la franja climática situada entre el bosque boreal hasta los bosques de montaña de los trópicos, la cual se caracteriza por ser una zona de heladas frecuentes.

**Figura 1. Distribución de los abetos en el mundo**



### 1.1.2 Distribución de los abetos en el mundo

Comparte muchos rasgos morfológicos con *Picea* spp., aunque *Abies* es menos tolerante al mal drenaje y a los incendios y más a climas cálidos y secos, por lo que se presentan en rangos montañosos menos húmedos.

Los géneros de abeto más meridionales en su distribución mundial son *Abies guatemalensis* (Guatemala), *A. Religiosa* (México), *A. pinsapo* (sur de España), *A. cephalonica* (Grecia), *A. numidica* (África del N), *A. cilicea* (Asia Menor), *A. pinar ovo* (Norte de Indochina) y *A. coreana* (Corea). Junto con los cipreses, pinos y juníferos es la especie más importante de los bosques de coníferas de la zona templada de la tierra.

Los lugares donde crece el pinabete han sufrido los efectos de una explotación humana abusiva. Talas, corte de ramas y árboles, incendios, pastoreo y destrucción del hábitat para usos agrícolas que han hecho disminuir sus antiguos dominios y deteriorado los restos existentes.

Esta acción destructora ha sido especialmente grave por la reducida extensión de su área, limitada a las montañas más húmedas, hasta el punto de haber colocado a la especie y a las comunidades a las que preside en peligro de extinción desde hace menos de medio siglo.

## **1.2 El pinabete en Guatemala**

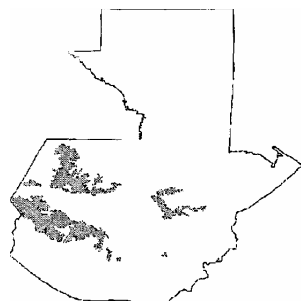
Los pinabetes son árboles de gran tamaño, de forma piramidal, conos erguidos y hojas estrechas y aciculares, que crean bosques densos y bien estructurados. El *Abies guatemalensis* es una especie de amplia distribución por las montañas guatemaltecas, poco exigente en calor, resistente al frío y exigente en humedad.

Se sitúa en el piso subalpino, preferentemente en su parte superior, formando asociaciones con *Pinus ayacahuite* y *Cupressus lusitanica* y, en su límite inferior, con *Quercus* spp. En las áreas más lluviosas y con mayores fríos, se suele imponer a estas especies, y las rebasa en altura formando bosques puros. El pinabete es endémico de las montañas del sur de México y de Guatemala.

Pertenece al grupo de los abetos meridionales de las montañas del trópico norte, que mantienen condiciones de clima templado, con una época seca marcada por la retirada de los vientos alisios. En las áreas que ocupa, las precipitaciones no suelen ser inferiores a 1,000 mm anuales. Esta exigencia de humedad podría ser un factor que limita la extensión del pinabete en otros lugares altos, aunque menos lluviosos. Se localiza preferentemente en las vertientes septentrionales y en las umbrías y los valles húmedos. En Guatemala, prospera entre los 2,400 msnm y los 3,400 msnm, en el límite superior de las nieblas más abundantes pues, a diferencia de los bosques nubosos, es sensible al encharcamiento. Cabe preguntarse si el pinabete podría alcanzar un límite altitudinal mayor.

Indudablemente las cumbres pueden recibir precipitaciones suficientes, pero el viento puede ejercer un efecto inhibidor-efecto de cumbre, sobre el crecimiento de los árboles por su poder desecante, que es especialmente marcado en la época seca. Es posible que la temperatura no suponga una limitante tan marcada como el viento para que la especie se distribuya a mayor altura, pues en otras latitudes los abetos crecen con temperaturas medias de 5°C, mientras que en Guatemala la media se sitúa entre 11°C y 15°C.

**Figura 2. Distribución del pinabete en Guatemala**



### **1.2.1 Asociaciones vegetales de la especie**

A pesar de la limitada extensión en que se desarrolla el *Abies guatemalensis* en Guatemala, muestra una notable capacidad de adaptación a situaciones diversas, en las que el substrato y la sombra varían considerablemente. En los lugares en los que la humedad es menor, la vegetación acompañante suele ser de especies propias del bosque latifoliado, mientras que en las más húmedas y frescas son más abundantes en su vegetación epífita, de musgos y líquenes. Cuando la densidad del estrato arbóreo proporciona una intensa sombra, la humedad favorece el desarrollo de los musgos, que pueden llegar a cubrir casi completamente el suelo. El estrato arbustivo suele estar poco desarrollado en los bosques más densos, pero en los claros y formaciones menos sombrías son frecuentes los *Sambucus mexicana*, *Baccharis vaccinioides*, *Cestrum guatemalense*, *Rubus trilobus*, y *Salvia cinnabarina*, *Arbutus xalapensis* y *Litsea glaucescens*, dependiendo del tipo de suelo y la humedad del terreno.



Sin embargo, en los casos en los que los ecosistemas han sido fuertemente alterados, es normal que se encuentre una abundante representación de las diversas etapas de la sucesión ecológica, como matorrales heliófilos.

### **1.3 Estado actual de las poblaciones de pinabete en Guatemala**

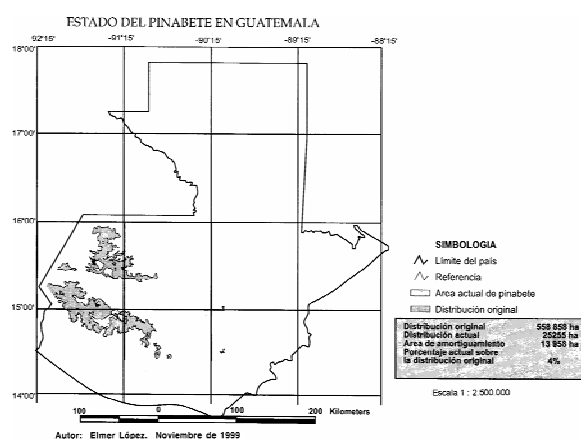
#### **1.3.1 Área y distribución**

En la actualidad, el área poblada por bosques de pinabete en Guatemala ocupa una extensión de 25,255 hectáreas. A pesar de que a primera vista podría parecer una superficie de distribución grande, es importante tener en cuenta que los bosques no están unidos en uno solo, sino que se encuentran en áreas fragmentadas, en su mayoría en pequeños rodales. El pinabete está distribuido en más de 60 bosques, de los cuales el 80% tiene un tamaño menor de 100 ha y el 55% no alcanza las 25 ha. Con respecto al área boscosa de Guatemala, el pinabete representa aproximadamente el 0,3% del total. En ocasiones, los bosques de pinabete son contiguos a otras áreas boscosas en donde el *Abies guatemalensis* aparece en cantidades de un individuo por hectárea o menores. Estos ecosistemas, a los se les llama áreas de influencia o zonas de amortiguamiento de los bosques de pinabete, ocupan un total de 13,953 hectáreas, que no aparecen en todos los bosques. Con base en la experiencia de campo, el área de influencia se ha definido con los siguientes criterios:

- Ambos tipos de bosque forman el ecosistema del pinabete, y sumados abarcan 39,208 hectáreas, repartidas en todo el territorio nacional.
- El *Abies guatemalensis* se distribuye en las altas montañas de Guatemala, en un rango altitudinal que va desde los 2,400 msnm, en la Sierra de las Minas, hasta los 3,400 msnm, en Cotzic, San Marcos. En alturas más altas o más bajas es muy raro encontrarla creciendo de manera espontánea.

Cabe destacar que los estudios que se han hecho en años anteriores en los ecosistemas de pinabete se han centrado casi exclusivamente en el Altiplano Occidental guatemalteco, encontrándose muy poca información en los bosques que se sitúan fuera de este lugar.

**Figura 3 Estado del pinabete en Guatemala**



## 1.4 Tipos de bosque

El pinabete en Guatemala se puede encontrar en tres tipos de bosque:

- Bosque puro, en donde la presencia de otros árboles es muy ocasional y en consecuencia el pinabete es el árbol predominante. Existen varios, aunque por su extensión y estado de conservación el bosque de Todos Santos se puede tomar como el ejemplo representativo de esta formación. Actualmente, estos bosques se encuentran únicamente en los departamentos de Huehuetenango y San Marcos. La mayoría están situados entre los 3,100 y 3,400 msnm.
- Bosque mixto de coníferas, en donde el pinabete se encuentra asociado con *Cupressus lusitanica* y *Pinus ayacahuite*, entre otras coníferas.

El pinabete suele ocupar el primer o segundo lugar de dominancia, alternando su posición con *Pinus ayacahuite*. Se suele encontrar en alturas situadas entre los 2,800 y 3,200 msnm, aunque también se encuentran fuera de estos límites.

- Bosque mixto con latifoliadas, en donde al *Abies guatemalensis* aparece asociado a especies de hoja ancha, generalmente *Quercus* spp. La dominancia la puede tener cualquiera de las dos especies, pero habitualmente la posee el género *Quercus*.

## 2. ACEITES ESENCIALES

En el material vegetal, los aceites esenciales se almacenan o sitúan en glándulas, conductos, sacos o pelos glandulares o simplemente reservorios dentro del vegetal, por lo que conviene hacer un desmenuzamiento del material a extraer para exponer esos reservorios a la acción del vapor de arrastre.

El espesor del material, reducido, permite también una mejor vaporización y destilación, así como una aceleración del proceso. En lo que respecta a las partes de la planta que se va a destilar, las flores, hojas y partes blandas o delgadas pueden tratarse sin ningún tratamiento previo.

Las semillas o frutos deben ser triturados con rodillos lisos, cuya separación en la máquina depende del grosor de aquellos y también del grado de desmenuzamiento que se necesite. Las raíces, tallos y otros materiales leñosos, se cortarán en trozos pequeños o en astillas.

Los aceites esenciales se pueden extraer de las muestras vegetales mediante diferentes métodos como expresión, arrastre con vapor de agua, extracción con solventes volátiles, *enfleurage* y con fluidos supercríticos.

En la expresión, el material vegetal es exprimido mecánicamente para liberar el aceite y éste es recolectado y filtrado. Este método es utilizado para el caso de las esencias de cítricos.

En la extracción por arrastre con vapor de agua, la muestra vegetal generalmente fresca y cortada en trozos pequeños, se coloca en un recipiente cerrado y es 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. Se utiliza a nivel industrial debido a su alto rendimiento, la pureza del aceite obtenido y porque no requiere tecnología sofisticada.

En el método de extracción con solventes volátiles, la muestra seca y molida se pone en contacto con solventes tales como alcohol, cloroformo, hexano, etc. Estos solventes solubilizan la esencia pero también solubilizan y extraen otras sustancias tales como grasas y ceras, obteniéndose al final una esencia impura. Se utiliza a escala de laboratorio pues a nivel industrial, resulta costoso por el valor comercial de los solventes, porque se obtienen esencias impurificadas con otras sustancias, y además por el riesgo de explosión e incendio característicos de muchos solventes orgánicos volátiles.

En el método de enflorado o *enfleurage*, el material vegetal (generalmente flores) es puesto en contacto con una grasa. La esencia es solubilizada en la grasa que actúa como vehículo extractor. Se obtiene inicialmente una mezcla (concreto) de aceite esencial y grasa, la cual es separada posteriormente por otros medios fisico-químicos, como por ejemplo una destilación o mediante una extracción líquida. En general, se recurre al agregado de alcohol caliente a la mezcla y su posterior enfriamiento para separar la grasa (insoluble) y el extracto aromático (absoluto). Esta técnica es empleada para la obtención de esencias florales (rosa, jazmín, azahar, etc.), pero su bajo rendimiento y la difícil separación del aceite extractor, la hacen costosa.

El método de extracción con fluidos supercríticos, es de desarrollo más reciente. El material vegetal cortado en trozos pequeños, licuado o molido, se empaca en una cámara de acero inoxidable y se hace circular a través de la muestra un fluido en estado supercrítico (por ejemplo CO<sub>2</sub>) , las esencias son así solubilizadas y arrastradas y el fluido supercrítico, que actúa como solvente extractor, se elimina por descompresión progresiva hasta alcanzar la presión y temperatura ambiente, y finalmente se obtiene una esencia cuyo grado de pureza depende de las condiciones de extracción. Aunque presenta varias ventajas como rendimiento alto, es ecológicamente compatible, el solvente se elimina fácilmente e inclusive se puede reciclar, y las bajas temperaturas utilizadas para la extracción no cambian químicamente los componentes de la esencia, sin embargo, el equipo requerido es relativamente costoso, ya que se requieren bombas de alta presión y sistemas de extracción también resistentes a las altas presiones.

Dentro de la práctica, dos tipos o métodos son los más utilizados para la extracción de aceite esencial:

- Extracción por arrastre de vapor:
  - Extracción por calentamiento de agua
  - Extracción con vapor con caldillo (vapor húmedo)
  - Extracción directa con arrastre con vapor (vapor seco)
- Fluidos supercríticos

## **2.1 Extracción por arrastre de vapor**

Esta metodología consiste en poner a hervir agua, en la cual se ha colocado previamente el material vegetal. El vapor producido arrastra los aceites esenciales presentes en las plantas, a través de un conducto, hasta otro recipiente con una temperatura más fría.

El cambio de temperatura ocasiona que el vapor se condense, quedando líquidos otra vez el agua y el aceite, el cual queda sobre la superficie, lo que hace más fácil su recolección.

Esta técnica tiene el inconveniente de que la temperatura empleada provoca que algunos compuestos presentes en las plantas se degraden y se pierdan.

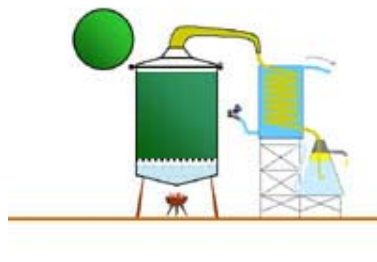
### **2.1.1 Extracción por calentamiento de agua**

Las hierbas entran en contacto directo con el agua hirviente, es una especie de cocimiento donde el material cargado flota o se sumerge según la densidad. El sistema de calentamiento del agua puede ser a fuego directo, camisa de vapor, serpentinas cerradas con circulación de vapor o serpentinas abiertas o perforadas, también con vapor. Este método no es el conveniente.

### **2.1.2 Extracción con vapor y caldillo (vapor húmedo)**

Las hierbas se colocan sobre un fondo perforado o criba ubicado a cierta distancia del fondo de un tanque llamado retorta. La parte más baja de ésta contiene agua hasta una altura algo menor que el nivel de la criba. El calentamiento se produce con vapor saturado que se provee de una fuente de calor que compone el equipo, fluye mojado y a presión baja, penetrando a través del material vegetal.

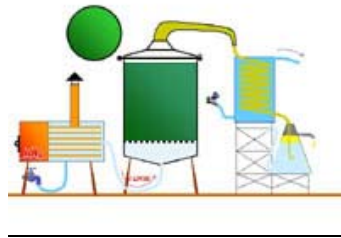
**Figura 4. Extracción con agua y vapor (vapor húmedo)**



### 2.1.3 Extracción por arrastre con vapor directo (vapor seco)

La extracción directa con vapor es similar al anterior, pero en el fondo de la retorta no hay agua. El vapor saturado o sobre calentado es provisto por una caldera y a presiones más elevadas que la atmosférica, se inyecta por medio de serpentinas cribadas que están debajo de la carga y se dirige hacia arriba, atravesando la masa vegetal colocada sobre una parrilla interior.

**Figura 5. Extracción directa con vapor (vapor seco)**







### **3. DISEÑO DE EQUIPO PARA LA EXTRACCIÓN DE ACEITE ESENCIAL A PARTIR DE EXTRACCIÓN POR ARRASTRE CON VAPOR**

El equipo para la extracción debe ser tal que permita la operación más conveniente cualquiera sea el material vegetal del que se quieran extraer sus esencias.

En cambio, las dimensiones del equipo siempre deberán estar en concordancia con las cantidades de hierbas producidas y del tiempo disponible para su destilación.

El primero, la retorta, macerador o alambique, es donde se deposita el material a destilar. Consiste en un tanque cilíndrico de un diámetro igual o algo inferior a la altura, que tiene en la parte superior una tapa que debe poder ser asegurada y su cierre hermético, así debe tener una chaqueta para el paso de vapor.

Preferentemente del centro de esta tapa, sale un tubo llamado "cuello de cisne" que es el conductor de los vapores hacia el condensador.

El macerador se construye en diversos materiales de chapa, cuyo espesor es también variable según el trabajo, pero es preferible que sea de acero inoxidable. En el fondo de la retorta, se coloca la criba que soporta el material por destilar.

Los tubos de conexión deben ser amplios y de acuerdo a la rapidez de destilación, más grandes cuanto más veloz sea ésta.

Debajo de la parrilla, canasta o criba, se encuentra el tubo de entrada de vapor, cuidando que entre el fondo y el tubo la distancia sea lo suficientemente grande, como para que se produzca aquí la condensación de agua. La distribución del vapor se asegura por la disposición en espiral o en cruz, de la prolongación del tubo alimentador, que tiene también, una serie de agujeros chicos en la parte superior y a lo largo del mismo, lo que le da así uniformidad a la distribución. En el fondo de la marmita, hay una válvula de drenaje de capacidad suficiente como para permitir que cualquier cantidad de agua que se condense dentro de la carga y gotee hacia el fondo, pueda ser descargada durante la extracción.

El condensador más usado es el tubular, en el cual corre agua fría que entra por la parte inferior y asciende en sentido contrario a los vapores de agua y aceite esencial que circulan por los tubos.

Los tubos que forman este aparato se colocan en forma vertical u horizontal, su forma, longitud y diámetro dependen de la condensación de las esencias que se procesan.

El agua de enfriamiento debe ser potable en lo posible, porque se eliminan así las probables incrustaciones y depósitos, cuando están cargadas con sales. Los tubos mejores son los construidos en acero inoxidable, pues evitan coloraciones indeseables en la esencia obtenida.

### **3.1 El cambio de escala**

Cambio de escala en ingeniería química es la técnica que permite predecir el comportamiento que presentará un fenómeno al cambiar las dimensiones de la unidad de proceso. Este cambio de escala puede ser de dos tipos:

- Aumentar el tamaño de un reactor a nivel de laboratorio o a nivel de planta piloto. En este caso, se denomina *scale-up*.
- Disminuir el tamaño de una unidad de proceso para analizar su comportamiento a nivel de laboratorio. En este caso, se denomina *scale-down* o teoría de modelos.

### 3.1.1 Similitud y cambio de escala

La herramienta principal en que se basa el cambio de escala es la teoría de la similitud que se resume en el principio de similitud de Newton que puede ser enunciado matemáticamente en la siguiente forma:  $P = f(Q, R, \dots, Z)$ , donde P, Q, . . . Z son números adimensionales. Este principio dice que la descripción matemática de un fenómeno físico o químico puede ser hecho por medio de una función "f" entre variables naturales o números adimensionales. La forma de la función "f" se determinará experimentalmente con ayuda del análisis; dimensional del fenómeno.

Existe también el principio de similitud ampliado que puede ser expresado de la siguiente manera:  $P = C(Q)^a (R)^b \dots (Z)^n$ , el presenta al grupo adimensional "P" como función de *los* grupos adimensionales Q, . . . , Z elevados a las potencias a, b, . . . c. La constante C es considerada como un factor de forma ya que depende de la geometría del sistema y deberá ser determinada experimentalmente.

Las ecuaciones estándar de transferencia de momentum, calor y masa tienen la forma de la ecuación anterior. Estas ecuaciones son formuladas con ayuda del análisis dimensional, pero las constantes son determinadas experimentalmente.

En la mecánica de fluidos, se consideran tres tipos de similitudes

- geométrica
- cinemática
- dinámica

Existe similitud geométrica entre dos sistemas cuando la relación entre las dimensiones geométricas del primer sistema son iguales a las del segundo sistema.

La similitud cinemática se presenta entre dos sistemas cuando además de existir similitud geométrica, en relaciones de velocidades los puntos correspondientes de ambos sistemas son iguales.

La similitud dinámica existe entre dos sistemas cuando además de haber similitud geométrica, las relaciones entre fuerzas en puntos correspondientes en ambos sistemas son iguales.

Respecto de la similitud geométrica puede decirse que no se requiere que el sistema en pequeña escala sea una réplica en miniatura del sistema en gran escala. En general, puede existir similitud geométrica entre el modelo a gran escala y:

- Un modelo que es una réplica a escala del sistema estudiado.
- Un elemento que es una réplica exacta de una parte del sistema estudiado.
- Un elemento modelo que es un modelo a escala de un elemento del sistema estudiado.

Los modelos y los elementos modelos pueden ser divididos en dos clases:

- Regulares: si todos los factores de escala son los mismos en todas las coordenadas.

- Distorsionados: si los factores de escala son diferentes en cada coordenada.

### **3.1.2 Números adimensionales y cambio de escala**

Los números adimensionales involucrados en la descripción de un fenómeno pueden ser derivados por medio del análisis dimensional, el teorema de Buckingham. Este método presupone que se conocen las variables sustanciales que influyen en el fenómeno. Esta suposición constituye el punto débil del análisis dimensional en aquellos casos en donde se desconoce la ecuación que describe el fenómeno. Si se omite una variable importante, todo el análisis dimensional resulta equivocado.

El segundo punto de vista para derivar números adimensionales, es la descripción de la ecuación diferencial que se refiere al fenómeno estudiado. Se conocen casi todas las ecuaciones diferenciales fundamentales para los procesos químicos aunque la mayoría no puede ser integrada. Al inspeccionar la ecuación diferencial, se puede conocer cuáles son las variables involucradas y de allí partir para conocer cuales son los números adimensionales aplicando los métodos antes mencionados.

### **3.1.3 Ecuaciones diferenciales y similitud**

Básicamente, similitud se refiere a la condición de tener igual forma o proporciones. De manera más general, similitud se define como una condición en la cual las variables naturales involucradas en cierta situación permanecen fijas. En otras palabras, buscar la similitud de un fenómeno significa identificar las variables naturales perteneciente al sistema estudiado.

### **3.1.4 Similitud y descripción física**

Los parámetros que establecen la similitud son sinónimos con las variables naturales independientes que forman parte de la relación física, dado que la naturaleza de la similitud corresponde a la naturaleza de la relación. Como se ha podido ver, se necesita sólo un parámetro, el número de Reynolds, para asegurar similitud en el patrón de velocidad, aunque exista la acción de la gravedad, pero en ausencia de superficies libres. Por lo tanto, cualquier velocidad adimensional o cualquier función del flujo será función únicamente de esta variable. Un estudio de las ecuaciones es una técnica segura para descubrir las variables naturales involucradas, pero se debe tener cuidado al proceder de esta manera ya que se puede llegar a conclusiones erróneas debido a análisis superficiales.

La noción de la similitud permite analizar a las relaciones físicas de una manera un poco especial. Debido a la similitud, el comportamiento total de un sistema físico puede ser visualizado como la sucesión de estados similares, cada uno de los cuales representa un rango de condiciones. Describir el comportamiento es, entonces, establecer la sucesión de estados similares a través de las variables adimensionales. La similitud es en sí la manifestación de una ley de la naturaleza. Dos estados diferentes muestran similitud porque ambos están influenciados por las mismas leyes fundamentales.

### **3.1.5 La comparación de sistemas con distintas formas**

Las relaciones adimensionales consideradas hasta ahora no contienen ningún parámetro que represente a la forma física del sistema considerado.

Para resolver el problema de comparar sistemas con diferentes formas, primero se debe seleccionar una longitud característica. Esta longitud característica es difícil de hallar ya que no existen reglas que orienten tal búsqueda. Ocasionalmente, estas longitudes se determinan empíricamente, aunque la teoría puede proporcionar algunas pistas.

### **3.1.6 El concepto de régimen en el cambio de escala**

Cuando se desconocen las ecuaciones diferenciales de un proceso, es esencial descubrir cual es el factor determinante de la velocidad o régimen del proceso antes de que se pueda continuar con el proceso de cambio de escala. Existen tres tipos principales de régimen en Ingeniería química:

El régimen dinámico en sistemas fluidos, que se clasifica de la siguiente manera:

- Controlado por la gravedad
- Controlado por la viscosidad
- Controlado por la tensión superficial

El régimen térmico que se clasifica de la siguiente forma:

- Controlado por la conducción
- Controlado por la convección
- Controlado por la radiación

El régimen químico que se divide en:

- Homogéneo
- Heterogéneo

Con interfase fija

Con interfase móvil



Una vez identificado el régimen, se puede determinar cuáles son los números adimensionales involucrados en la descripción del fenómeno. Algunas veces existen dos o más procesos determinantes de la velocidad, cada uno de los cuales cambia de escala de acuerdo a diferentes reglas o leyes, esto se denomina régimen mixto. En estos casos, predecir los efectos de cambio de escala puede ser imposible, dado que cada número adimensional que representa a cada régimen resulta contradictorio con los demás números adimensionales involucrados en el modelo matemático.

## **4. PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE ESENCIAL CRUDO DE PINABETE POR MEDIO DE ARRASTRE CON VAPOR A NIVEL PLANTA PILOTO**

Se selecciona la materia prima y se corta a un tamaño de partícula de 2x4 cm. Se determina la masa de un tamaño de lote de materia prima, dividiendo el lote en 4 partes equitativamente. Se introduce el sostenedor de los platos y el primer plato en la marmita, agregando sobre el primer plato la primera parte de la materia prima; se agrega el segundo plato, agregando la segunda parte de materia prima, hasta terminar en el último plato, como se muestra en la figura 7. La marmita se cierra procurando no dejar ninguna pequeña abertura, para que la presión del vapor no haga salir el. Habiéndose cerciorado de que no hay ninguna fuga, se procede a pasar vapor por la chaqueta de la marmita durante 5 minutos. El vapor, es vapor saturado proveniente de la caldera. Si la marmita no posee chaqueta, se evita dicho paso. Antes de hacer pasar el vapor directo por la marmita de calentamiento, para que proceda la transferencia de masa, se hace recircular por lo menos 5 minutos el agua de enfriamiento por el intercambiador de calor (condensador).

**Figura 6. Macerador**



**Figura 7. Distribución de la materia prima en los platos dentro del macerador**



**Figura 8. Platos**



**Figura 9. Distribución equitativa de la materia prima**



Al haber dejado recircular el agua de enfriamiento por el intercambiador, se procede a dejar pasar vapor dentro del macerador, para que se realice la transferencia de masa y por ende, la extracción de aceite esencial. Se toma los valores de las temperaturas de entrada y salida para los dos flujos. El vapor se deja pasar a un flujo másico constante de 16.42 Kg/h. El vapor se deja fluir por un tiempo de extracción determinado. El vapor se condensa en el intercambiador de calor latente (condensador) y se recupera en el vaso florentino.

El vaso florentino siempre tiene que estar lleno de agua y si se desea utilizar un solvente para recuperar el aceite, como el hexano, el vaso florentino debe tener 300 mL de solvente antes de cada extracción.

**Figura 10. Aceite esencial con hexano en el vaso florentino**



Al haber terminado la extracción, se descarga el lote agotado de la marmita y se vuelve a cargar para realizar otra extracción. Igualmente que el macerador, se descarga el hexano con el aceite del agua del vaso florentino. El aceite esencial se separa del hexano por medio de un rotavapor. El hexano destilado del aceite esencial crudo, se reutiliza en extracciones posteriores.

**Figura 11. Decantación y separación del aceite esencial crudo del hexano**





## **5. RESULTADOS**

### **5.1 Datos óptimos de extracción a nivel planta piloto**

Tiempo óptimo: 110.63 min = 1h 40 min

Tamaño de lote óptimo: 2.84 kg (6.26 lb)

Flujo másico de vapor óptimo: 16.42 kg/h

Tamaño de partícula óptimo: 2x4 cm

Rendimiento máximo: 0.79 %

Costo de producción del aceite esencial: 6.00 Q/mL

Precio del aceite esencial sugerido: 10.00 Q/mL

Tiempo de recuperación de la inversión para una planta piloto: 1.02 años

### **5.2 Caracterización del aceite esencial de pinabete**

Densidad: 0.7689 g/mL

Índice de refracción: 1.38

Punto de ebullición:  $\approx 60^{\circ}\text{C}$

Punto de fusión:  $\leq 0^{\circ}\text{C}$

Solubilidad con agua: 0 mL/L

Solubilidad con hexano:  $\infty$  mL/L

Rendimiento con arrastre de vapor a nivel laboratorio: 0.986%

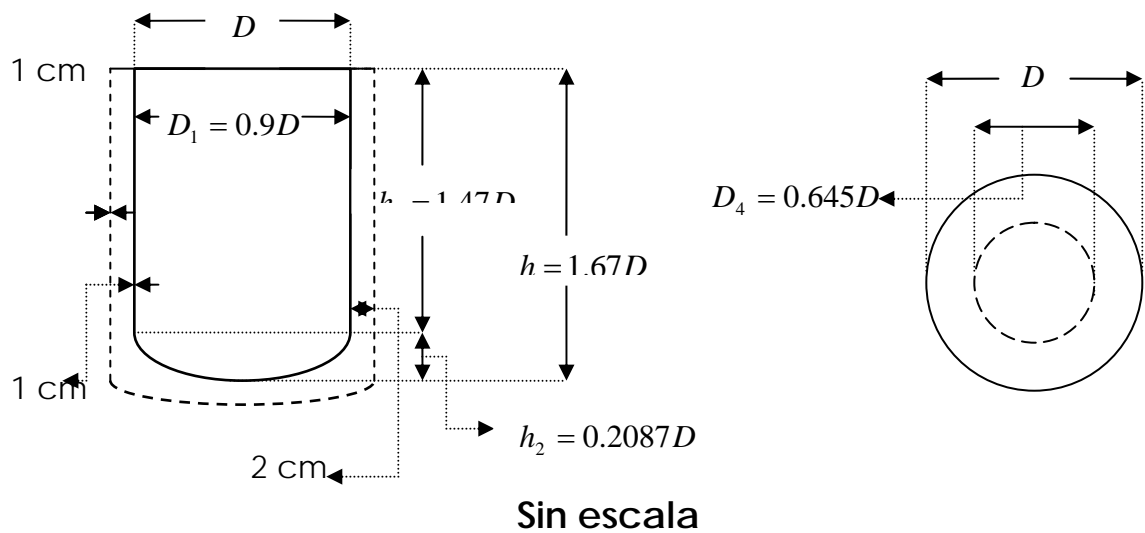
Composición cualitativa y cuantitativa de los componentes del aceite esencial de pinabete:

- $\alpha$  -pineno: 53.65%
- Mirceno: 5.10%
- Limoneno: 28.86%
- Canfeno: 1.07%
- No identificado: 11.32%

### 5.3 Escalonamiento de la extracción de aceite esencial de pinabete por medio de arrastre con vapor a partir de una escala de planta piloto.

#### 5.3.1 Macerador:

Figura 12. Dimensiones del macerador



### 5.3.1.1 Parámetros de diseño:

Tipo de material de fabricación del macerador: Acero inoxidable

Espesor de la chaqueta: 2 cm

### 5.3.1.2 Ecuaciones de diseño:

- Ecuación de relación de volúmenes.

$$\frac{V_{total}}{V_{materia prima}} = 1.7519 \quad (1)$$

- Ecuación para determinar el diámetro a partir de la masa de materia prima.

$$D = 22.91M_p^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

- Ecuación para determinar el tiempo de extracción a partir de la masa de materia prima.

$$t = 17.67M_p \quad (3)$$

- Ecuación para determinar el flujo de vapor a partir del de la masa de materia prima.

$$\dot{m}_v = 2.621M_p \quad (4)$$

- Ecuación para determinar el volumen a obtener aceite esencial a partir de la masa de materia prima.

$$V_a = 4.84M_p \quad (5)$$



Donde:

$D$  = diámetro (cm)

$M_p$  = Masa de materia prima (lb)

$t$  = tiempo de extracción (min)

$\dot{m}_v$  = Flujo másico de vapor (kg/h)

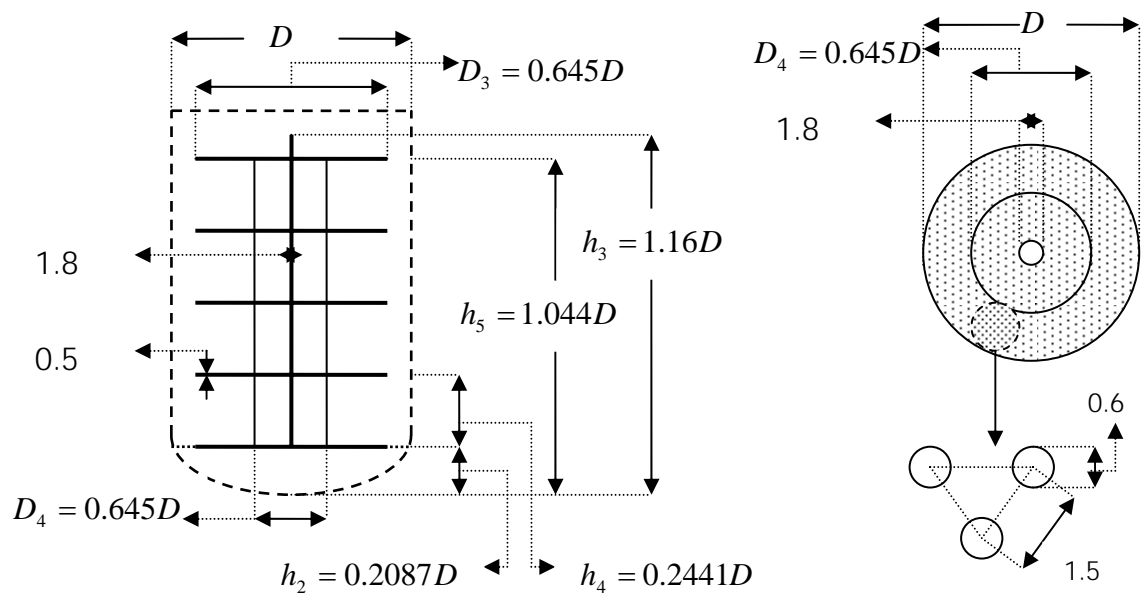
$V_{total}$  = Volumen total de la marmita ( $cm^3$ )

$V_{materia prima}$  = Volumen que ocupa la materia prima en la marmita ( $cm^3$ )

$V_a$  = Volumen de aceite esencial obtenido ( $cm^3$ )

### 5.3.2 Platos

Figura 13. Dimensiones, arreglo y distribución de los platos



Sin escala

### 5.3.2.1 Parámetros de diseño

Diámetro de los agujeros en los platos: 0.6 cm

Espaciamiento entre los agujeros de centro a centro: 1.5 cm

Arreglo de los agujeros: arreglo en triángulo equilátero

Espesor de cada plato: 0.5 cm

Diámetro del sujetador de los platos: 1.8 cm  $\approx 0.418D$

Número de platos: 5 platos

Platos con materia prima: 4 platos

### 5.3.2.2 Ecuaciones de diseño

Las ecuaciones se presentan en el sistema inglés, debido a la facilidad y uso de las unidades de medida.

- Ecuación para determinar la masa de materia prima por plato a partir de la masa de materia prima.

$$M_{p/p} = \frac{M_p}{4} \quad (6)$$

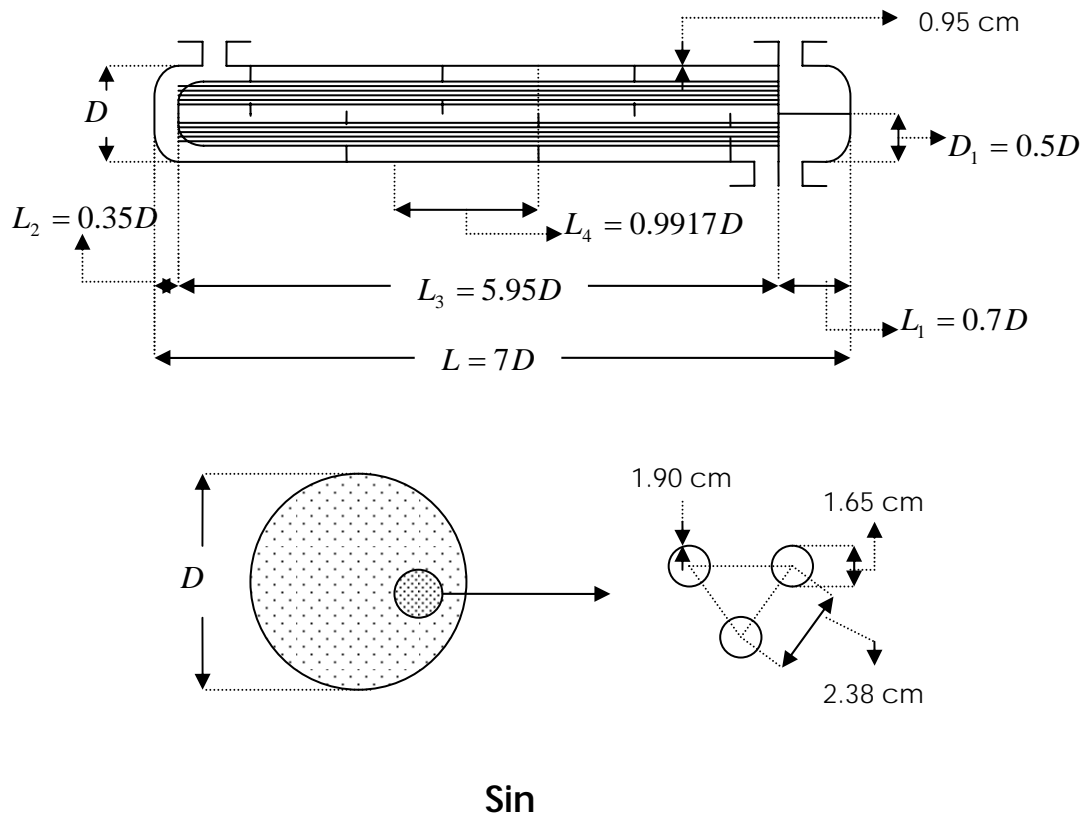
Donde:

$M_p$  = Masa de materia prima (lb)

$M_{p/p}$  = Masa de materia prima por plato (lb)

### 5.3.3 Intercambiador de calor

Figura 14. Dimensiones del condensador de contacto indirecto de concha y tubos de calor, así como arreglo de los tubos



#### 5.3.3.1 Parámetros de diseño

Tipo de intercambiador de calor: de coraza y tubos

Espesor de la coraza:  $0.95 \text{ cm}$

Número de deflectores: 6

Arreglo de los tubos: arreglo triangular de  $2.38 \text{ cm}$

Espaciamiento entre los tubos ( $c'$ ):  $0.48 \text{ cm}$

Líquido de enfriamiento: agua

Temperatura de salida del vapor con aceite esencial: 15-20 °C

Diseño de los tubos: tubos de ¾ plg de diámetro exterior, 18 BWG

Fluido en la coraza: fluido caliente (vapor con aceite esencial)

Fluido en los tubos: fluido frío (agua de enfriamiento)

Número de pasos en la coraza: 1

Número de pasos en los tubos: 2

### 5.3.3.2 Ecuaciones de diseño

Las ecuaciones se presentan en el sistema ingles, debido a que la mayoría de variables y constantes de transferencia de calor se encuentran en el sistema ingles.

- Ecuación para determinar el flujo másico del agua de enfriamiento a partir de la masa de materia prima, así como de la temperatura de entrada y salida del agua de enfriamiento.

$$\dot{m}_a = \frac{181.84M_p}{T_{sa} - T_{ea}} \quad (7)$$

- Ecuación para determinar el diámetro de la coraza a partir de la masa de materia prima, así como temperaturas de entrada y salida del agua de enfriamiento.

$$D_1 = \left[ \frac{237.2M_p \left( \ln \left[ \frac{199.4 - T_{as}}{68 - T_{ae}} \right] \right) \left( 28.1838 \left( \frac{181.84M_p}{T_{sa} - T_{ea}} \right)^{0.518811} + 89.40M_p^{0.518811} \right)}{1637.84(131.4 - T_{as} + T_{ae}) \left[ \left( \frac{181.84M_p}{T_{sa} - T_{ea}} \right)^{0.518811} M_p^{0.518811} \right]} \right]^{0.508878} \quad (8)$$

- Ecuación para determinar coeficiente de transferencia de calor para la coraza a partir del diámetro de la coraza y la masa de materia prima.

$$h_o = 89.4041 \frac{M_p^{0.518811}}{D_1^{1.0376}} \quad (9)$$

- Ecuación para determinar el número de tubos en el intercambiador de calor a partir

$$N_T = 0.69074 D_1^2 \quad (10)$$

- Ecuación para determinar el coeficiente de transferencia de calor en los tubos a partir del diámetro de la coraza y masa de materia prima, así como temperaturas de entrada y salida del agua de enfriamiento.

$$h_{io} = 28.1838 \frac{\left( \frac{181.84 M_p}{T_{sa} - T_{ea}} \right)^{0.515511}}{D_1^{1.0376}} \quad (11)$$

- Ecuación para determinar el coeficiente de transferencia de calor limpio en el intercambiador de calor a partir del diámetro de la coraza y masa de materia prima, así como temperaturas de entrada y salida del agua de enfriamiento.

$$U_C = \frac{2519.75 \left( \frac{181.84 M_p}{T_{sa} - T_{ea}} \right)^{0.51881} D_1^{1.0376} M_p^{0.518811}}{D_1^{2.0752} \left[ 28.1838 \left( \frac{181.84 M_p}{T_{sa} - T_{ea}} \right)^{0.518811} + 89.40 M_p^{0.518811} \right]} \quad (12)$$

- Ecuación para determinar el coeficiente de transferencia de calor de diseño en el intercambiador de calor a partir del diámetro de la coraza y masa de materia prima, así como temperaturas de entrada y salida del agua de enfriamiento.

$$U_D = \frac{1637.84 \left( \frac{181.84 M_p}{T_{sa} - T_{ea}} \right)^{0.51881} D_1^{1.0376} M_p^{0.51881}}{D_1^{2.0752} \left[ 28.1838 \left( \frac{181.84 M_p}{T_{sa} - T_{ea}} \right)^{0.51881} + 89.40 M_p^{0.51881} \right]} \quad (13)$$

Donde:

$m_a$  = Flujo másico de agua de enfriamiento (lb/h)

$T_{sa}$  = Temperatura de salida del agua de enfriamiento (°F)

$T_{ea}$  = Temperatura de entrada del agua de enfriamiento (°F)

$h_o$  = Coeficiente de transferencia de calor en la coraza  $\left( \frac{\text{Btu}}{\text{h}(\text{p}^2)\text{°F}} \right)$

$h_{io}$  = Coeficiente de transferencia de calor en los tubos  $\left( \frac{\text{Btu}}{\text{h}(\text{p}^2)\text{°F}} \right)$

$M_p$  = Masa de materia prima (lb)

$N_T$  = Número de tubos

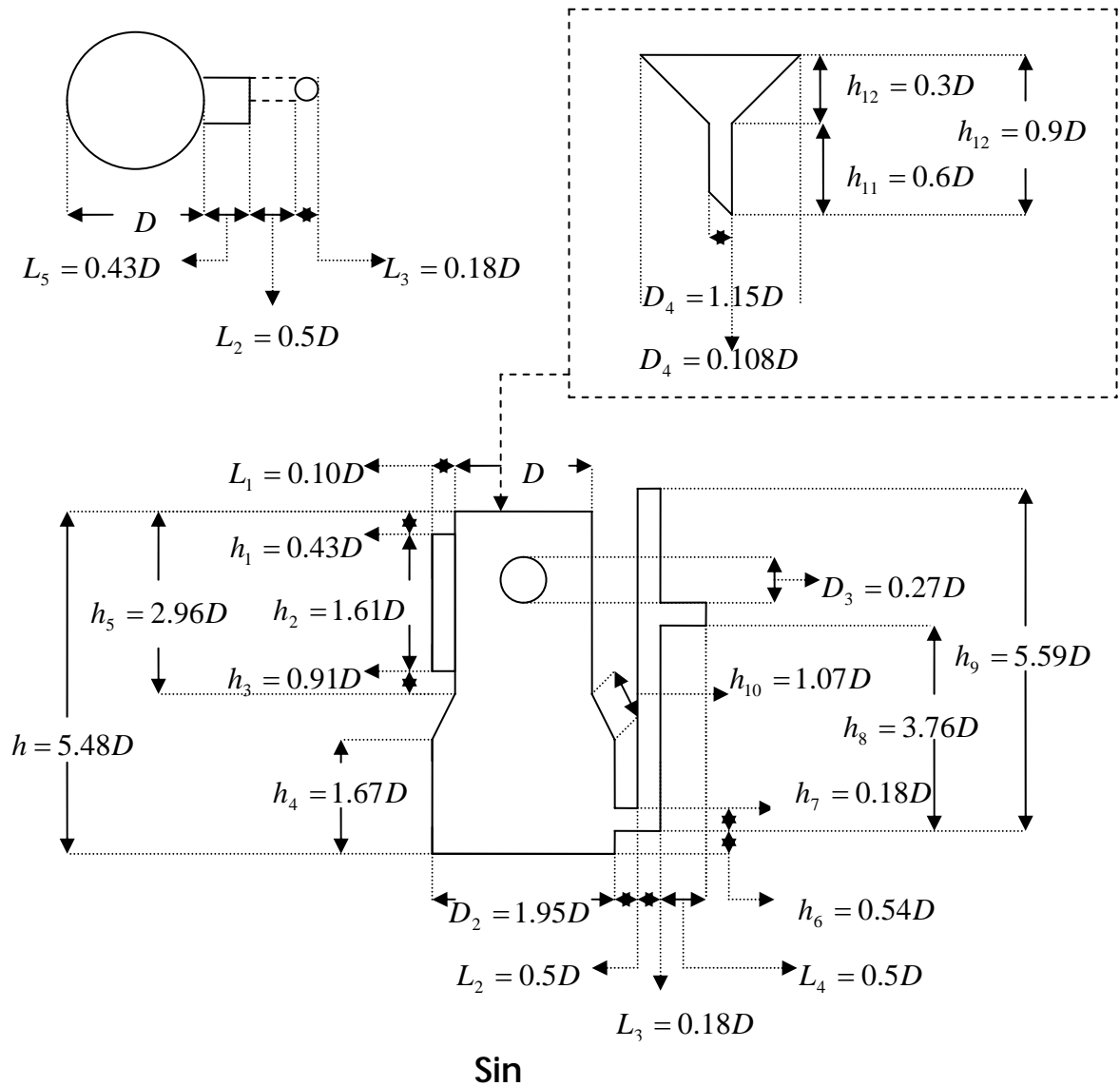
$D_1$  = Diámetro de la coraza (plg)

$U_C$  = Coeficiente de transferencia de calor limpio  $\left( \frac{\text{Btu}}{\text{h}(\text{p}^2)\text{°F}} \right)$

$U_D$  = Coeficiente de transferencia de calor de diseño  $\left( \frac{\text{Btu}}{\text{h}(\text{p}^2)\text{°F}} \right)$

### 5.3.4 Vaso florentino

Figura 15. Dimensiones del vaso florentino, dimensiones del embudo que va sobre el vaso florentino.



### 5.3.4.1 Parámetros de diseño

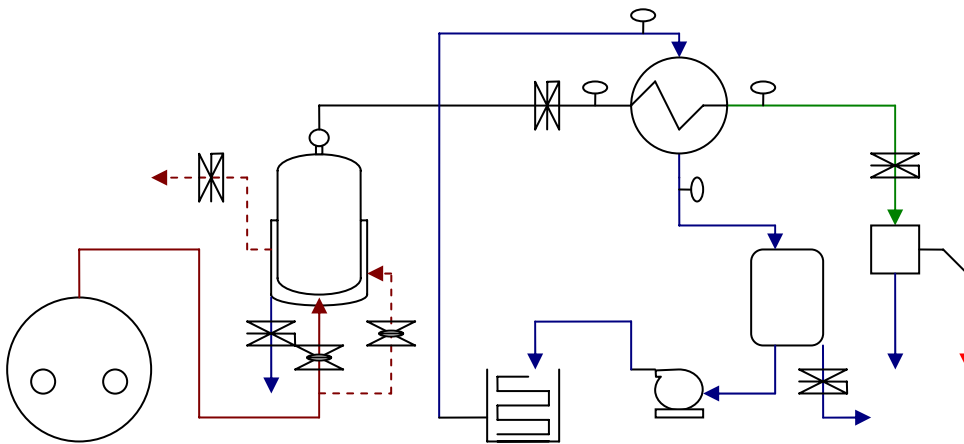
Diámetro del vaso florentino ( $D$ ) = 9.3-15 cm

Solvente a utilizar en el vaso para aumentar el rendimiento: Hexano

Volumen de hexano: 300 mL

### 5.3.5 Diagrama de flujo del proceso

Figura 16. Diagrama de flujo del proceso.



Flujos:

Cuadro I. Simbología de los flujos en el diagrama de flujo

Flujos	Simbología
Vapor	—
Vapor si se agrega chaqueta al diseño	- - -
Aceite esencial con vapor de agua	—
Aceite esencial y agua	—
Aceite esencial	—
Agua	—



## **5.4 Diseño de la formulación óptima para la elaboración de una esencia de pinabete a partir de su aceite esencial**

### **5.4.1 Formulación**

Propilen glicol: 10%

Aceite esencial de pinabete: 10%

Alcohol etílico anhidro: 80%

### **5.4.2 Preparación**

Se mezclan los 3 ingredientes, teniendo por orden de preferencia primero el aceite esencial de pinabete, luego el alcohol etílico anhidro y por último el propilen glicol. Los compuestos no son tóxicos, por lo cual no es necesario el uso de una campana de extracción. La mezcla no es exotérmica.

Costo de producción por mL de esencia a nivel planta piloto: 0.65 Q/mL

## **5.5 Diseño de la formulación óptima para la elaboración de un desinfectante para limpieza**

### **5.5.1 Formulación**

Esencia de pinabete: 3%

Compuesto desinfectante (hipoclorito de sodio al 5.10%): 1%

Propilen glicol: 3%

Agua: 93%

Colorante Verde: 0.1g/L

### 5.5.2 Preparación

Se mezcla la esencia de pinabete, el compuesto desinfectante y el propilen glicol. A la mezcla anterior, se le agrega agua y por último se le agrega el colorante color verde.

Costo de producción por mL desinfectante a nivel planta piloto: 0.12 Q/mL

## 5.6 Tiempo de recuperación de la inversión de una planta de extracción de aceite esencial con arrastre de vapor, así como algunos aspectos económicos

- Ecuación para determinar el costo de producción por mililitro de aceite esencial de pinabete a nivel industrial

$$V = \frac{CF + CV + d}{n} \quad (13)$$

- Ecuación para determinar el precio sugerido de venta por mililitro de aceite esencia a nivel industrial.

$$S = \frac{1.66(CF + CV + d)}{n} \quad (14)$$

- Ecuación para determinar el tiempo económico de pago de una planta a nivel industrial para la extracción de aceite esencial de pinabete por medio de arrastre con vapor.

$$n = \frac{\log(i)}{\left( \frac{0.48C_F + 0.48C_V + 1.48d}{C_o} \right) \left( \frac{\log(1+i)}{\log(i)} \right) - \log(i)} \quad (15)$$

Donde:

$n =$  *Tiempo económico de pago (años)*

$C_v =$  *Costo variable de producción (Q/año)*

$C_f =$  *Costo fijo (Q/año)*

$d =$  *Depreciación del equipo (Q/año)*

$i =$  *Interés (%)*

$S =$  *Precio de venta (Q/mL)*

$V =$  *Costo de producción unitario (Q/mL)*

## 6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la extracción de aceite esencial crudo de pinabete, para determinar las variables óptimas a nivel planta piloto y su posterior escalonamiento, se utilizó como método de extracción, arrastre con vapor. Dicha extracción se llevó a cabo en la planta piloto de extracción-destilación del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos.

Para la extracción de aceite esencial de pinabete, se utilizó vapor saturado proveniente de una caldera de 10 hp, que se hace pasar horizontalmente sobre un macerador con o sin chaqueta de precalentamiento. A este macerador, se le agrega la materia prima distribuida en cada uno de los 4 platos. El vapor que pasa por la materia prima extrae el aceite esencial de esta, haciendo una mezcla de vapor de agua con aceite esencial de pinabete volatilizado. La marmita puede tener o no una chaqueta para el paso de vapor para precalentamiento, pero se recomienda que posea una chaqueta, para el precalentamiento de materia prima. El tiempo de precalentamiento no debe ser mayor de 7 minutos. Esta mezcla de aceite esencial con vapor de agua es pasada por un intercambiador de calor (condensador) que condensa el vapor a forma líquida. El condensado es una mezcla de agua con aceite. La mezcla insoluble de aceite con agua, es recolectada en un vaso florentino que por la diferencia de densidades, decanta el agua de la mezcla, obteniendo solamente el aceite. El vaso florentino es un decantador en estado no estable, con un diseño para decantar mezclas que utiliza la diferencia de alturas y densidades. El vaso florentino consta de un recipiente donde se recibe el líquido y con un brazo vertical que sale por la parte inferior del recipiente, que tiene una abertura horizontal a una altura menor a la que se encuentra el aceite, haciendo posible la decantación únicamente del agua.

El diseño y forma del vaso florentino se puede observar en la figura 15. Antes de empezar una extracción, el vaso florentino debe estar lleno de agua para evitar pérdidas del aceite inicial.

Para el agua de enfriamiento, es una muy buena opción tener un sistema de recirculación, debido a que se economiza el costo del proceso a largo plazo. Se sugiere que si se cuenta con un sistema de recirculación, las tuberías estén aisladas para evitar pérdidas de calor. También se sugiere que el agua de enfriamiento sea impulsada por una bomba centrífuga y se cuente con un sistema de enfriamiento de agua que la mantenga a aproximadamente 10 °C, como se muestra en el diagrama de flujo del proceso, figura No. 16

Las variables de proceso a determinar son el flujo de vapor, el tamaño de lote, el tamaño de partícula, el tiempo de extracción y la diferencia de rendimiento entre pinabetes de plantación o regenerados naturalmente.

Las primeras extracciones se realizaron para determinar si el tipo de pinabete afecta en el rendimiento de la extracción. Se realizó un total de 3 extracciones para pinabete de plantación y regenerado naturalmente. Cada extracción tuvo variables de tamaño de partícula, flujo de vapor y tamaño de los lotes constante, la variable de tiempo se varió 3 veces en un período de 30 minutos comenzando con un tiempo base de 1 hora. Los resultados que se obtuvieron se detallan en el tabla II (*Pag. No. 48*), el rendimiento del aceite no varía notablemente en función de cómo se haya sembrado el pinabete. Por lo cual en las variables de proceso y el escalonamiento, se puede utilizar ya sea la ramilla proveniente de una plantación o un pinabete regenerado naturalmente, ya que el rendimiento es muy parecido. La figura 17 muestra más detalladamente el comportamiento de los lotes en función del rendimiento.

Después de determinar que la forma en como se haya sembrado el pinabete no afecta en el rendimiento, se determinó el tamaño de partícula óptimo. Se realizaron diversos cortes a la materia prima y se procedió a su extracción. Se realizaron 4 cortes diferentes utilizando la ramilla completa, media ramilla, realizando un corte de 2x3 cm y un corte de 1x2 cm. Se realizaron 4 extracciones variando en cada lote el tamaño de partícula, dejando constantes las variables de tiempo de extracción, tamaño de partícula y flujo de vapor. Se determinó el rendimiento a cada lote, obteniéndose los mejores rendimientos con tamaño de partícula de 2x4 cm y 1x2 cm. Esto se debe a que la reducción de tamaño aumenta el área superficial y por ende el área de contacto para la transferencia de masa. Los rendimientos tuvieron variaciones notables entre cada lote, excepto entre el lote con tamaño de partícula de 1x2 cm y el 2x4 cm, esto debido que se llegó a un punto donde la disminución de tamaño no aumenta notablemente el área de contacto entre el vapor y la materia prima. Los resultados obtenidos se tabularon en la tabla III. Se determinó como tamaño óptimo de partícula el de 2x4 cm, debido a que el cambio de rendimiento entre un tamaño de partícula pequeño no es tan notable y la reducción a un tamaño de partícula de 1x2 cm aumenta considerablemente el tiempo de preparación de la materia prima en comparación a la preparación de un tamaño de partícula de 2x4 cm. La tendencia del rendimiento en función al tamaño de partícula se observa en la figura 18.

Para la determinación del tiempo óptimo, se realizaron 6 corridas utilizando el tamaño de partícula ya determinado, el tamaño del lote y el flujo de vapor constantes. Para la extracción, la variable de tiempo se varió 3 veces en un período de 30 minutos comenzando con un tiempo base de 1 hora, cada tiempo teniendo dos corridas para corroborar los datos obtenidos. Con los resultados obtenidos que se muestran en la tabla IV, se procedió a trazar un modelo matemático que correlacionara los datos de rendimiento obtenidos en función del tiempo de extracción. Como se puede observar en la figura 19, tiende a ser una parábola cóncava hacia abajo, con un punto máximo en la curva.

Al realizar la extracción, conforme avanza el tiempo, el rendimiento es mayor, debido a que hay mayor tiempo de contacto entre la materia prima y el vapor, pero llega un momento en que se agota la materia prima y el tiempo empieza a ser constante. La extracción del aceite en el período donde el cambio de rendimiento no llega a ser muy significativo, es tiempo óptimo de extracción. Al llegar al período en que el rendimiento empieza a mostrarse constante, el aceite recuperado no es económicamente rentable en comparación al costo de extraer esa pequeña cantidad de aceite en ese periodo. Por lo tanto, es preferible no extraer el aceite en el período donde empieza a volverse constante y determinar el tiempo óptimo de extracción justamente antes de que los cambios de rendimiento sean parecidos. Se encontró un modelo matemático que toma la tendencia de los resultados, determinando a este modelo matemático su punto máximo a partir de la primera derivada, dando como resultado el tiempo óptimo de extracción que es de 110.63 minutos.

Para la determinación del tamaño óptimo de lote, se realizaron 6 corridas utilizando el tamaño de partícula ya determinado, el tiempo de extracción y el flujo de vapor constantes. La variable de tamaño de lote se varió 3 veces en un intervalo de dos libras comenzando con un tamaño de lote base de 4 libras, cada tamaño de lote teniendo dos corridas para corroborar los datos obtenidos. Con los resultados obtenidos que se tabulan en la tabla V, se procedió a trazar un modelo matemático que correlacionara los datos de rendimiento obtenidos en función del tamaño del lote. Como se puede observar en la figura 20, tiende a ser una parábola cóncava hacia abajo, con un punto máximo. Conforme se aumenta el tamaño de la materia prima, el rendimiento aumenta, esto debido a que hay más materia prima y por ende más área de contacto, que aumenta el rendimiento. Pero llega un punto en cual el rendimiento disminuye al aumentar el tamaño del lote, esto debido que disminuye el área porosa entre si, impidiéndole paso al vapor y disminuyendo el área superficial de contacto entre el vapor y la materia prima.

Se encontró un modelo matemático que toma la tendencia de los resultados, determinando a este modelo matemático su punto máximo a partir de la primera derivada, dando como resultado el tamaño óptimo de lote que es de 2.84 Kg (6.26 lb).

La última variable de proceso a determinar fue el flujo másico del gas, que en este caso fue vapor saturado proveniente de una caldera. Para determinar dicha variable se realizaron 4 corridas variando el flujo másico de vapor y dejando constante las demás variables de proceso. Con los resultados obtenidos que se tabulan en la tabla VI, se procedió a trazar un modelo matemático que correlacionara los datos de rendimiento obtenidos en función del flujo másico del vapor. Como se puede observar en figura 21, tiende a ser una función cóncava con un punto máximo. El aumento del flujo máximo tiende a elevar el rendimiento de extracción debido a que aumenta la velocidad de extracción, pero al llegar a un punto máximo el rendimiento disminuye, debido a que el tiempo de contacto resulta ser muy pequeño. Se encontró un modelo matemático que toma la tendencia de los resultados, determinando a este modelo matemático su punto máximo a partir de la primera derivada, dando como resultado flujo másico de vapor óptimo que es de 16.42 Kg./h.

Para aumentar el rendimiento de extracción, se utilizó hexano como solvente para recibir la mezcla de aceite esencial crudo con agua en el vaso florentino, proveniente del condensador. El hexano, insoluble en agua, atrapa un porcentaje muy grande de aceite de la mezcla condensada, separándolo por completo del agua y evitando grandes pérdidas de aceite en el hidrolato. Se escogió hexano como solvente, debido a que es un disolvente insoluble en agua, muy soluble en el aceite esencial de pinabete, con una densidad menor que la del agua, bastante volátil, barato y con una volatilidad más alta que la del aceite esencial de pinabete. Debido al uso que se le da, el hexano a utilizarse para bajar costos de producción, no debe ser grado reactivo. Económicamente, el producto de aceite recuperado, por usar como solvente hexano para atrapar el aceite del condensado, justifica el uso y costo del hexano.



Todas estas variables de proceso, son las óptimas para encontrar un máximo rendimiento económicamente rentable para la extracción de aceite esencial de pinabete. El rendimiento máximo a estas condiciones y por ende, por ser las óptimas a nivel planta piloto es de 0.79 %.

La mezcla de hexano con aceite esencial fue separada por medio de un rotavapor a nivel laboratorio. Debido a que las muestras son pequeñas (300 mL), la separación del aceite esencial del hexano se puede realizar en un rotavapor a nivel laboratorio. El hexano separado del aceite esencial, se puede reutilizar en extracciones posteriores para disminuir costos. Esta reutilización del hexano no disminuye la calidad del aceite obtenido.

El aceite esencial se caracterizó cromatográfica y fisicoquímicamente. Se determinó que los compuestos siguientes se encuentran en el aceite esencial de pinabete:  $\alpha$ -pineno (53.65 %), mirceno (5.10 %), Limoneno (28.86 %), canfeno (1.07 %), no identificado (11.32 %). El compuesto no identificado, no se pudo determinar en el cromatograma, pero regularmente estos compuestos no identificados en los cromatogramas, son una mezcla pequeña de varios compuestos pesados.

Al realizar 2 extracciones con arrastre vapor a nivel laboratorio, se encontró un rendimiento del 0.986 %. La extracción a nivel laboratorio se realizó en un neoclavenger. El rendimiento a nivel planta piloto varía en un 80 % en comparación al rendimiento a nivel laboratorio, esto se debe a la escala a la que se trabaja y la exactitud del equipo a nivel laboratorio en comparación con el equipo a nivel planta piloto. Al realizar el escalonado a nivel industrial a partir de planta piloto, se espera que el rendimiento no varíe mucho, debido a la similitud de la escala industrial y planta piloto en comparación de una escala a nivel laboratorio.

Para el escalonado a nivel industrial se utilizaron las variables óptimas de proceso obtenidas a nivel planta piloto. A partir de estas variables, se procedió a encontrar ecuaciones de diseño adecuadas para cada uno de los equipos y a partir de éstas, se determinó el diseño de cada uno del equipo involucrado directamente en el proceso de extracción de aceite esencial de pinabete a partir de arrastre con vapor.

Para el escalonado a nivel industrial, primero se diseñó ordenadamente el proceso que debe seguir la extracción de aceite esencial a partir de arrastre con vapor. Se elaboró un diagrama de flujo donde se muestra el diseño del proceso y a partir de ahí, se tomó como punto de partida el escalonado. Los equipos que tienen que ver directamente con la extracción y a estos equipos fue a los que se le realizó el escalonado son la marmita, los platos para la marmita, el intercambiador de calor y el vaso florentino. Estos equipos dependen directamente de las variables de proceso. Los demás equipos auxiliares no necesitan un escalonamiento, porque su diseño depende del escalonamiento de los equipos principales.

Con atención a la similitud y describiendo los resultados en función de grupos adimensionales para el escalonamiento, se trabajó con tres tipos de similitud para el diseño de equipo y de ecuaciones de diseño para el escalonado la similitud geométrica, la similitud cinemática y similitud dinámica. Las tres similitudes se trabajaron en función de cada una de ellas; es decir, al cambiar en uno la escala de la similitud cinemática, también cambió en uno la escala de la similitud geométrica y dinámica.

A partir de los datos obtenidos a nivel planta piloto y estos criterios, se desarrolló el escalonamiento industrial, que consiste en todas las especificaciones y variables de diseño, así como ecuaciones de diseño y ecuaciones para determinar las variables de proceso. Con estas ecuaciones, se puede escalar y montar una planta de extracción de aceite esencial de pinabete.

Las ecuaciones de diseño en el condensador, se encuentran en el sistema inglés, debido a que la mayoría de constantes de transferencia de calor, se encuentran en este sistema. Los resultados del escalonamiento se detallan en las ecuaciones 1 a la 13 y el diseño del equipo se muestra en las figuras 12 a la 16 que, no se encuentran a escala. Todo el diseño depende directamente del tamaño del lote que se desea tener como base de producción. La única observación para dicho escalonado, es que las dimensiones físicas del vaso florentino se pueden mantener constantes a las de planta piloto si la escala no es muy grande, para lotes menores de 13.6 kilogramos (30 libras). Para lotes mayores de 13.6 kilogramos (30 libras), se debe cambiar las dimensiones físicas del vaso florentino a partir de datos experimentales encontrados a partir del diseño de la escala.

El aceite esencial tiene un costo de producción de 6.00 Q/mL a nivel planta piloto. El costo se pronostica que disminuirá a nivel que se aumente la escala, debido a que los costos fijos de producción se mantienen casi constantes conforme se aumenta la escala. Para determinar el precio a nivel industrial, primero se debe determinar la escala a la que se desea poner en marcha la planta, para luego determinar el precio de producción y el tiempo de recuperación de la inversión de una planta de extracción de aceite esencial a partir de arrastre con vapor. Debido a la demanda que podría tener dicho producto y el costo bajo de producción en comparación con otros aceites esenciales, se sugiere que el precio de venta sea del 166 % del costo de producción. Las ecuaciones planteadas para determinar el costo de producción, el precio de venta y el tiempo económico de pago para una planta de extracción de aceite esencial de pinabete, se muestran en las ecuaciones 13 a la 15.

Para que el aceite sea rentable, se deben diseñar ciertos productos que lo utilicen como materia prima, debido a que en la actualidad no hay ningún producto que lo utilice. Los productos que se diseñaron son una esencia con olor a pinabete y un desinfectante para pisos con olor a pinabete.

Para la determinación de la esencia, se realizaron varias pruebas con el olor óptimo y con la menor cantidad de aceite esencial de pinabete posible. Realizando varias pruebas y tomando en cuenta directamente el tiempo en que permanecieron las muestras con el mayor olor a pinabete, la formulación de la esencia es la siguiente: Propilen glicol (10 %) Aceite esencial de pinabete (10 %) y Alcohol etílico anhidro (80 %). El aceite esencial se utilizó como el medio que da el aroma a la esencia, el alcohol etílico anhidro como solvente y el propilen glicol como un retenedor de aroma. Para realizar la esencia, se debe de mezclar los tres componentes en el siguiente orden de preferencia: aceite esencial, alcohol etílico anhidro y propilen glicol. El cambio de orden para realizar la esencia puede provocar el que se formen dos fases o pequeñas burbujas en la mezcla. La mezcla no es exotérmica y las condiciones de temperatura y presión no la afectan en nada. A nivel planta piloto, el precio de producción para una esencia con olor a pinabete es de 0.65 Q/mL. El aceite esencial debe guardarse en frascos color ámbar y en refrigeración, alrededor de unos 10 °C. Dicho aceite puede empacarse para su venta o puede utilizarse como materia prima, para producir esencia de pinabete o desinfectante para pisos con olor a pinabete.

Para la determinación del desinfectante de limpieza, se realizaron varias pruebas con el olor óptimo y con la menor cantidad de esencia de pinabete posible. Al tomar en cuenta el tiempo en que permanecieron las muestras con el mayor olor a pinabete, la formulación del desinfectante de limpieza es el siguiente, esencia de pinabete (3 %), compuesto desinfectante (1 %), propilen glicol (3 %), agua (93 %), colorante verde (0.1g/L). El compuesto desinfectante utilizado para la formulación fue hipoclorito de sodio al 5.10 %, pero puede utilizarse cualquier otro compuesto bactericida. Para realizar el desinfectante se debe mezclar la esencia de pinabete, el compuesto desinfectante y el propilen glicol. A la mezcla anterior se le agrega agua y por último se le añade el colorante verde. A nivel planta piloto, el precio de producción para un desinfectante de pisos con olor a pinabete es de 0.12 Q/mL.

Tanto el costo de producción de la esencia como del desinfectante para pisos, es a nivel planta piloto, entonces al escalonarse una planta para extracción de aceite esencial de pinabete por medio de arrastre con vapor, el costo de aceite esencial disminuirá, debido a que los costos fijos se mantienen constantes cuando se aumenta la escala; por lo tanto, se espera que los costos de producción de la esencia y el desinfectante para piso a una escala más grande disminuyan considerablemente.

La extracción de aceite esencial de pinabete por medio de arrastre con vapor, es rentable y la tendencia indica que su rentabilidad aumenta conforme se aumenta la escala. Tanto la ramilla del raleo como la de la poda del pinabete, pueden utilizarse para extraer su aceite esencial y así aumentar el valor del bosque. Con un buen manejo de la poda y el raleo, se puede mantener una producción diaria sin dañar al árbol o al bosque.

# CONCLUSIONES

1. Para mejorar el rendimiento y la rentabilidad de la extracción de aceite esencial crudo, es necesario utilizar una trampa con hexano, usado como solvente.
2. El mayor rendimiento que puede esperarse de la extracción de aceite esencial por medio de arrastre de vapor nivel planta piloto, es de 0.8 %.
3. Para lotes menores de 13.6 kilogramos (30 libras) el diámetro del vaso florentino debe ser de 9.3 a 15 cm; para lotes mayores de 13.6 kilogramos (30 libras), debe calcularse el diámetro del vaso florentino a partir de datos experimentales.
4. La extracción de aceite esencial crudo de pinabete por medio de arrastre de vapor es económicamente rentable, debido al tiempo de recuperación de la inversión que es 1.02 años.
5. El aumento de escala del proceso para extracción de aceite esencial crudo de pinabete por medio de arrastre con vapor, disminuye los costos variables, y aumenta la utilidad del proceso.
6. Para una extracción de aceite esencial crudo por medio de arrastre con vapor a cualquier escala, el tamaño de partícula debe ser de aproximadamente 2x4 cm.



## RECOMENDACIONES

1. Comparar el rendimiento de extraer el aceite esencial de pinabete, utilizando el método de arrastre con vapor con otros métodos para la extracción de aceites esenciales como lixiviación con algún solvente o por fluidos supercríticos.
2. Comparar la viabilidad económica y rentabilidad del método de arrastre de con vapor para la extracción de aceite esencial crudo de pinabete con otros métodos de extracción de aceites esenciales como lixiviación con algún solvente o por fluidos supercríticos.
3. Determinar los rendimientos de extracción de aceite esencial de pinabete de otras partes del árbol de pinabete.
4. Investigar y diseñar otros productos de beneficio a partir del aceite esencial de pinabete.





# BIBLIOGRAFÍA

1. Agencia universitaria del periodismo científico, “Aceites esenciales, el aroma de la naturaleza”  
<http://aupec.univalle.edu.co/informes/julio98/aceites.html>
2. Baldizón B. 1993. Análisis dimensional, similitud y cambio de escala en el diseño de equipo en la ingeniería química, aplicación al diseño de un birreactor. Tesis ing. Química, Universidad de San Carlos, Facultad de Ingeniería. Guatemala. 85 pp.
3. Coc, A. y C. Girón. 1988. Diagnóstico preliminar sobre el estado del pinabete (*Abies guatemalensis* Rheader) en el altiplano occidental del país. DIGEBOS. Guatemala 68 pp.
4. Euzen, [JP.](#) 2000. *Scale-Up Methodology for Chemical Processes*. Gulf Professional Publishing. USA. 180 pp.
5. González, J. 1979. Caracterización ecológica de las comunidades del pinabete (*Abies guatemalensis* Rheder) en Guatemala. USAC. Guatemala. 40 pp.
6. Herbotecnia. “Destilación de aceites esenciales”  
<http://www.herbotecnia.com.ar/poscosecha-esencias.html>
7. Laidler, Keith. 1999. Físicoquímica. Editorial continental. México. 978 pp.

8. Lopez Elmer. 1999. Diagnóstico de las poblaciones naturales del pinabete (*Abies guatemalensis* Rheader) en Guatemala y estrategia para su conservación. INAB. Guatemala. 1999. 72 pp.
9. McCabe, Warren. 2000. Operaciones unitarias en ingeniería química. 4ta edición, Editorial McGraw Hill. España. 1512 pp.
10. Mortimer, Charles. 1983. Química. 5ª edición, editorial iberoamericana. Mexico. 760 pp.
11. Morrison, Robert. 1998. Química Orgánica. 5ª edición, editorial Addison Wensley Longman. México. 1467 pp.
12. Perry Robert, Down Green. 2001. Manual de ingeniero quimico. 7ª edición, McGraw hill. España. 4512 pp.
13. Treybal, Robert. 2002. Operaciones de transferencia de masa. 2ª edición, editorial McGraw Hill. México. 852 pp.
14. W. Hoyle. 1997. *Pilot Plants and Scale-Up of Chemical Processes II*. Springer-Verlag Telos. Inglaterra. 250 pp.
15. Zlokarnik, Marko. 2002. *Scale-up in Chemical Engineering*. Wiley-VCH. USA. 196 pp.

# APÉNDICE



# APÉNDICE A

## DATOS ORIGINALES

**Tabla II. Rendimiento y volumen de aceite obtenido para cada uno de los lotes realizados, así como las variables para cada lote**

No. Lote	Tamaño del lote (lb)	Tiempo de extracción (h)	Tipo de materia prima	Tamaño de partícula	Flujo de vapor (kg/h)	Volumen de aceite obtenido (mL)	Rendimiento (%)
1	6	1	Cosecha	Pequeño (2x4 cm)	17.1	15.3	0.42
2	6	1	Cosecha	Pequeño (2x4 cm)	17.1	15.6	0.43
3	6	1.5	Cosecha	Pequeño (2x4 cm)	17.1	26.9	0.74
4	6	1.5	Cosecha	Pequeño (2x4 cm)	17.1	28.0	0.77
5	6	2	Cosecha	Pequeño (2x4 cm)	17.1	29.8	0.82
6	6	2	Cosecha	Pequeño (2x4 cm)	17.1	28.7	0.79
7	4	2	Cosecha	Pequeño (2x4 cm)	17.1	15.3	0.63
8	4	2	Cosecha	Pequeño (2x4 cm)	17.1	15.0	0.62
9	8	2	Cosecha	Pequeño (2x4 cm)	17.1	34.4	0.71
10	8	2	Cosecha	Pequeño (2x4 cm)	17.1	32.9	0.68
11	6	1.5	Cosecha	Pequeño (2x4 cm)	19.3	27.2	0.75
12	6	1.5	Cosecha	Pequeño (2x4 cm)	14.5	25.1	0.69
13	6	1.5	Cosecha	Pequeño (2x4 cm)	12.0	23.6	0.65
14	6	1.5	Cosecha	Muy pequeño (1x2 cm)	17.1	28.3	0.78
15	6	1.5	Cosecha	Mediano (1/2 ramilla)	17.1	25.1	0.69
16	6	1.5	Cosecha	Grande (Ramilla completa)	17.1	21.8	0.6
17	6	1	Natural	Pequeño (2x4 cm)	17.1	14.5	0.4
18	6	1.5	Natural	Pequeño (2x4 cm)	17.1	23.6	0.65
19	6	2	Natural	Pequeño (2x4 cm)	17.1	26.2	0.72

**Tabla III. Volumen de hidrolato obtenido para cada uno de los lotes realizados, así como las variables para cada lote**

<b>No. Lote</b>	<b>Tamaño del lote (kg)</b>	<b>Tiempo de extracción (h)</b>	<b>Tipo de materia prima</b>	<b>Tamaño de partícula</b>	<b>Flujo de vapor (kg/h)</b>	<b>Volumen de hidrolato obtenido (L)</b>
1	6	1	Cosecha	Pequeño (2x4 cm)	17.1	17.6
2	6	1	Cosecha	Pequeño (2x4 cm)	17.1	18.3
3	6	1.5	Cosecha	Pequeño (2x4 cm)	17.1	26.4
4	6	1.5	Cosecha	Pequeño (2x4 cm)	17.1	26.9
5	6	2	Cosecha	Pequeño (2x4 cm)	17.1	35.2
6	6	2	Cosecha	Pequeño (2x4 cm)	17.1	36.1
7	4	2	Cosecha	Pequeño (2x4 cm)	17.1	35.2
8	4	2	Cosecha	Pequeño (2x4 cm)	17.1	34.0
9	8	2	Cosecha	Pequeño (2x4 cm)	17.1	35.7
10	8	2	Cosecha	Pequeño (2x4 cm)	17.1	34.9
11	6	1.5	Cosecha	Pequeño (2x4 cm)	19.3	30.5
12	6	1.5	Cosecha	Pequeño (2x4 cm)	14.5	22.8
13	6	1.5	Cosecha	Pequeño (2x4 cm)	12.0	19.3
14	6	1.5	Cosecha	Muy pequeño (1x2 cm)	17.1	27.3
15	6	1.5	Cosecha	Mediano (1/2 ramilla)	17.1	27.1
16	6	1.5	Cosecha	Grande (Ramilla completa)	17.1	26.9
17	6	1	Natural	Pequeño (2x4 cm)	17.1	18.3
18	6	1.5	Natural	Pequeño (2x4 cm)	17.1	18.0
19	6	2	Natural	Pequeño (2x4 cm)	17.1	17.9

**Tabla. IV. Temperaturas de entrada y salida para cada flujo para cada uno de los lotes realizados**

No. Lote	Temperatura de agua de enfriamiento (°C)		Temperatura de vapor (°C)	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida
1				
2	9	12	93	20
3	9	12	93	20
4	9	12	93	20
5	9	12	93	20
6	9	12	93	20
7	9	12	93	20
8	9	12	93	20
9	9	12	93	20
10	9	12	93	20
11	9	12	93	20
12	9	12	93	20
13	9	12	93	20
14	9	12	93	20
15	9	12	93	20
16	9	12	93	20
17	9	12	93	20
18	9	12	93	20
19	9	12	93	20





## APÉNDICE B

### DATOS CALCULADOS

**Tabla V. Variación del rendimiento dependiendo del lugar de donde proviene la ramilla**

<b>Lugar</b>	<b>Tiempo (h)</b>	<b>Volumen de aceite recuperado (mL)</b>	<b>Rendimiento (%)</b>
Cosecha	1	15.25	0.42
Natural	1	14.52	0.4
Cosecha	1.5	26.87	0.74
Natural	1.5	23.6	0.65
Cosecha	2	28.69	0.79
Natural	2	26.15	0.72

**Tabla VI. Variación del rendimiento dependiendo del tamaño de partícula**

<b>Tamaño de partícula</b>	<b>Volumen de aceite recuperado (mL)</b>	<b>Rendimiento (%)</b>
Muy pequeño (1x2 cm)	28.3296	0.78
Pequeño (2x4 cm)	27.9664	0.77
Mediano (1/2 ramilla)	25.0608	0.69
Grande (Ramilla completa)	21.792	0.6

**Tabla VII. Variación del rendimiento dependiendo del tiempo de extracción**

<b>Tiempo de extracción (h)</b>	<b>Volumen de aceite recuperado (mL)</b>	<b>Rendimiento (%)</b>
1	15.25	0.42
1	15.62	0.43
1.5	26.88	0.74
1.5	27.97	0.77
2	29.78	0.82
2	28.69	0.79

**Tabla VIII. Variación del rendimiento dependiendo del tamaño del lote.**

<b>Tamaño del lote (lb)</b>	<b>Volumen de aceite recuperado (mL)</b>	<b>Rendimiento (%)</b>
4	15.25	0.63
4	15.01	0.62
6	29.78	0.82
6	28.69	0.79
8	34.38	0.71
8	32.93	0.68

**Tabla IX. Variación del rendimiento dependiendo del flujo de vapor.**

<b>Flujo de vapor (kg/h)</b>	<b>Volumen de aceite recuperado (mL)</b>	<b>Rendimiento (%)</b>
19.3	27.24	0.75
17.1	26.8768	0.74
14.46	25.0608	0.69
12.03	23.608	0.65

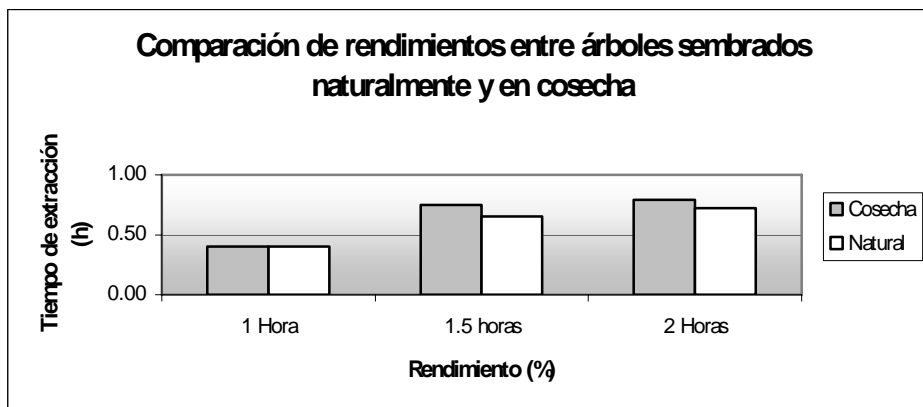


# APÉNDICE C

## GRÁFICAS DE TENDENCIA Y COMPORTAMIENTO DE LOS LOTES

**Figura 17. Variación del rendimiento en función del lugar de donde proviene la ramilla**

**Fuente: Tabla II**



**Figura 18. Variación del rendimiento en función del lugar del tamaño de partícula**

**Fuente: Tabla III**

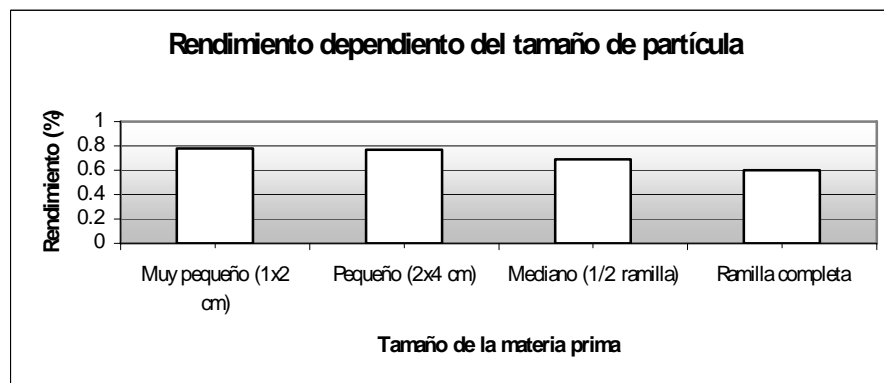


Figura 19. Variación del rendimiento en función del tiempo de extracción

$$y = -0.5491x^2 + 2.0249x - 1.0481$$

Fuente: Tabla IV

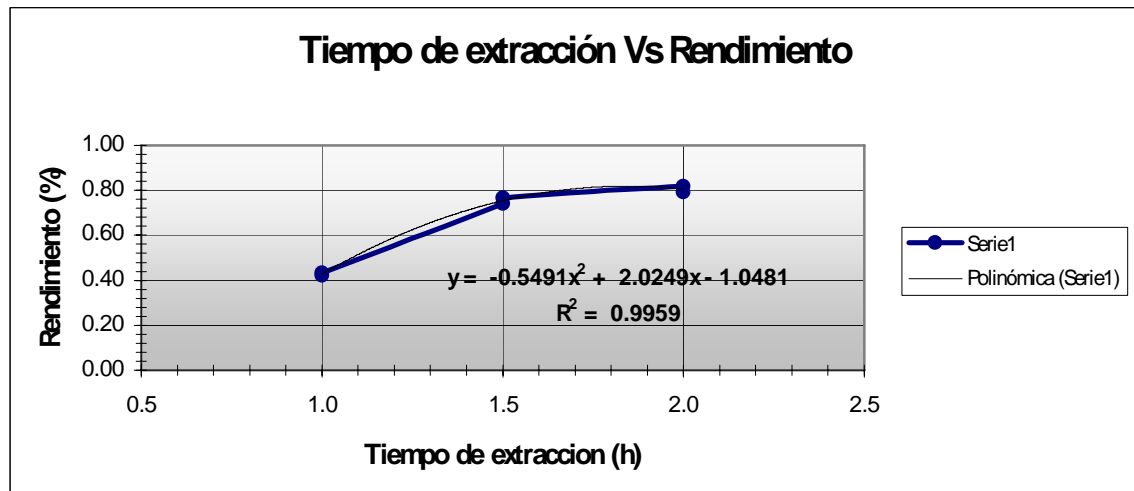


Figura 20. Variación del rendimiento en función del tamaño del lote

$$y = -0.0375x^2 + 0.47x - 0.65$$

Fuente: Tabla V

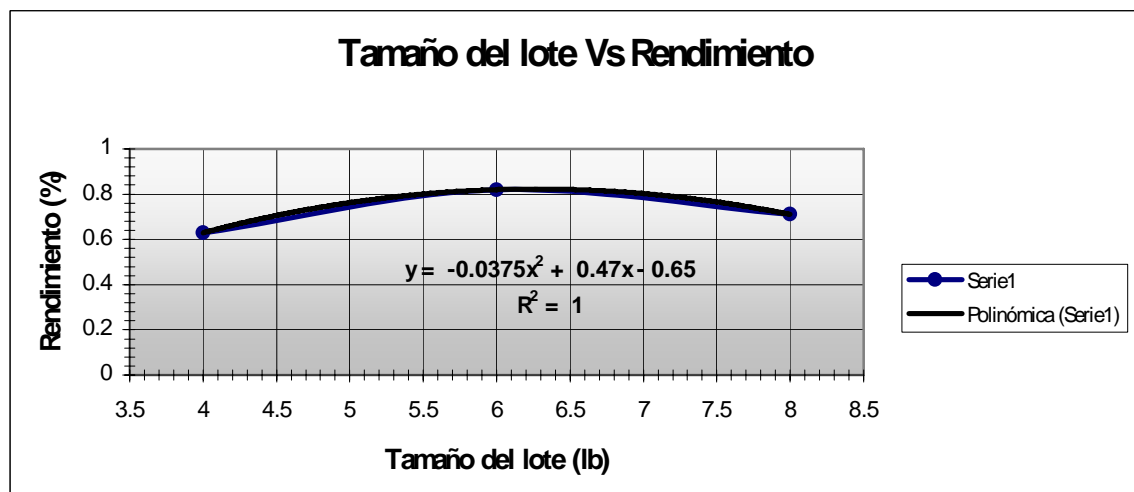
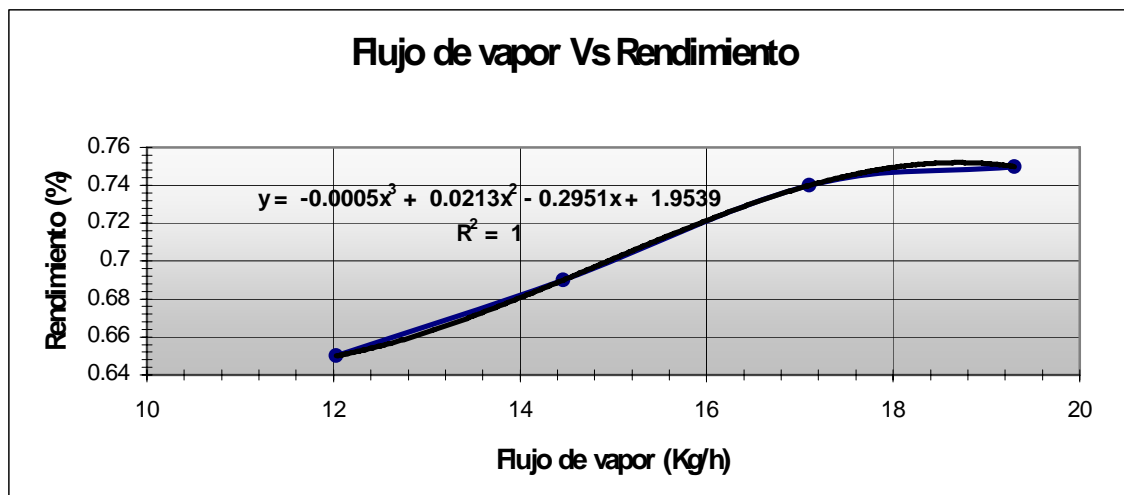


Figura 21. Variación del rendimiento en función del flujo de vapor

$$y = -0.0005x^3 + 0.0213x^2 - 0.2951x + 1.9539$$

Fuente: Tabla VI







# APÉNDICE D

## ANÁLISIS DE ERROR

**Correlación para cada una de las gráficas y modelos matemáticos realizados.**

- **Comportamiento del rendimiento en función de las variaciones del tiempo de extracción, a las demás variables constantes.**

$$y = -0.5491x^2 + 2.0249x - 1.0481$$

Correlación: 0.9979

- **Comportamiento del rendimiento en función de las variaciones de tamaño de lote, a las demás variables constantes.**

$$y = -0.0375x^2 + 0.47x - 0.65$$

Correlación: 1

- **Comportamiento del rendimiento en función de las variaciones de flujo de vapor, a las demás variables constantes.**

$$Y = -0.0005x^3 + 0.0213x^2 - 0.2951x + 1.9539$$

Correlación: 1



# **ANEXOS**



# ANEXO 1

## FOTOGRAFÍAS

**Figura 22. Materia prima agotada después de la extracción**



**Figura 23. Intercambiador de calor**



**Figura 24. Caldera**



**Figura 25. Extracción por arrastre de vapor de aceite esencial de pinabete a nivel laboratorio, por medio de un neoclavenger**



**Figura 26. Caracterización del aceite. Determinación de la densidad**



**Figura 27. Caracterización del aceite. Determinación del índice de refracción**



**Figura 28. Esencia**



**Figura 29. Desinfectante**







# ANEXO 2

## CROMATOGRAMA

**Figura 30. Cromatograma del aceite esencial crudo de pinabete**

