



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

**EVALUACIÓN DE UN MÉTODO EXPERIMENTAL DE GENERACIÓN  
DE DATOS A NIVEL DE LABORATORIO PARA EL ESTUDIO DEL  
SISTEMA TERNARIO ACEITE ESENCIAL DE CARDAMOMO  
(*Elletaria cardamomum*)-(ALCOHOL ISOPROPÍLICO-AGUA)<sub>50%</sub>-  
BENCENO EN EQUILIBRIO A DOS TEMPERATURAS DIFERENTES  
Y 640mm Hg**

**Krista Ivonne Aguilar Ovando**

Asesorada por el Ing. César Alfonso García Guerra

Guatemala, octubre de 2006



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE UN MÉTODO EXPERIMENTAL DE GENERACIÓN DE DATOS A NIVEL DE LABORATORIO PARA EL ESTUDIO DEL SISTEMA TERNARIO ACEITE ESENCIAL DE CARDAMOMO (*Elletaria cardamomum*)-(ALCOHOL ISOPROPÍLICO-AGUA)<sub>50%</sub>-BENCENO EN EQUILIBRIO A DOS TEMPERATURAS DIFERENTES Y 640mm Hg**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**KRISTA IVONNE AGUILAR OVANDO**

ASESORADO POR EL INGENIERO CÉSAR ALFONSO GARCÍA GUERRA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**INGENIERA QUÍMICA**

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2006



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
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
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl de León de Paz
EXAMINADOR	Ing. Rosa María Girón Ruiz
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Wong Davi
SECRETARIO	Ing. Marcia Ivonne Véliz Vargas



## 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:

**EVALUACIÓN DE UN MÉTODO EXPERIMENTAL DE GENERACIÓN  
DE DATOS A NIVEL DE LABORATORIO PARA EL ESTUDIO DEL  
SISTEMA TERNARIO ACEITE ESENCIAL DE CARDAMOMO  
(*Elletaria cardamomum*)-(ALCOHOL ISOPROPÍLICO-AGUA)<sub>50%</sub>-  
BENCENO EN EQUILIBRIO A DOS TEMPERATURAS DIFERENTES  
Y 640mm Hg,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 2 de junio de 2006.

Krista Ivonne Aguilar Ovando



## **AGRADECIMIENTO A:**

<b>MIS PADRES</b>	Rommel Christian Aguilar Morales y Ana Maria Ovando Alvarado.
<b>MI HERMANA</b>	Ellen Yvette Aguilar Ovando
<b>COMPAÑEROS Y AMIGOS</b>	Por los momentos compartidos.
<b>MIS PROFESORES</b>	Por guiarme a través de mis estudios.
<b>FACULTAD DE INGENIERÍA</b>	Por haberme brindado la oportunidad de estudiar una carrera universitaria.
<b>UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA</b>	Por haberme brindado la oportunidad de estudiar una carrera universitaria .



# ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b>	<b>V</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	<b>XIII</b>
<b>GLOSARIO</b>	<b>XV</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>XVII</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>XIX</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>XXI</b>
<b>1. ANTECEDENTES</b>	<b>1</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	<b>5</b>
2.1 Extracción Líquido-Líquido	5
2.1.1 Equilibrio Líquido	7
2.1.2 Diagramas de fase ternarios	7
2.1.3 Coeficiente de distribución	10
2.1.4 Efecto de la temperatura	11
2.1.5 Efecto de la presión	12
2.1.6 Elección del disolvente	13
2.1.6.1 Selectividad	13
2.1.6.2 Recuperabilidad	13
2.1.6.3 Coeficiente de distribución	14
2.1.6.4 Capacidad	14
2.1.6.5 Solubilidad del solvente	14
2.1.6.6 Densidad	15
2.1.6.7 Tensión interfacial	15
2.1.6.8 Constante dieléctrica	15
2.1.6.9 Otras	16

2.2	Aceites esenciales	16
2.2.1	Localización	16
2.2.2	Composición química	17
2.2.2.1	Terpenoides	17
2.2.2.2	Compuestos aromáticos	18
2.2.3	Clasificación de los Aceites Esenciales	18
2.2.3.1	De acuerdo con su consistencia	18
2.2.3.2	De acuerdo a su origen	18
2.2.4	Extracción	19
2.3	CARDAMOMO <i>Elletaria cardamomum</i>	20
2.3.1	Aceite Esencial de Cardamomo	21
2.3.2	Características generales del Aceite de Cardamomo producido en Guatemala	21
2.3.3	Aplicaciones	22
2.4	Disolventes	23
2.4.1	Agua	23
2.4.2	Alcohol Isopropílico	23
2.4.3	Benceno	24
<b>3.</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	<b>25</b>
3.1	Recursos	25
3.1.1	Localización	25
3.1.2	Recursos humanos	25
3.1.3	Recursos materiales	26
3.1.3.2	Equipo y cristalería	26
3.1.3.3	Material de escritorio	28
3.2	Metodología experimental	28
3.2.1	Procedimiento experimental	29
3.2.2	Método para la elaboración de la curva de solubilidad	31
3.2.2.1	Determinación de densidad	31

3.2.2.2	Determinación del índice de refracción	31
3.2.2.3	Análisis cromatográfico	31
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>33</b>
<b>5.</b>	<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>43</b>
	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>51</b>
	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>53</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>55</b>
	<b>APÉNDICE</b>	<b>59</b>



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1	Entradas y salidas de un proceso de extracción	6
2	Representación gráfica del equilibrio ternario líquido-líquido	8
3	Curva de solubilidad para un sistema tipo I	9
4	Curva de solubilidad para un sistema tipo II	10
5	Variaciones de los sistemas ternarios con la temperatura	11
6	Tipos de sistemas ternarios	12
7	Semilla de Cardamomo	20
8	Curva de calibración para las soluciones de A. E. de Cardamomo-(IPA-Agua) <sub>50%</sub> a $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$	33
9	Curva de calibración para las soluciones de A. E. de Cardamomo-Benceno a $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$	34
10	Curva de calibración para las soluciones de A. E. de Cardamomo-(IPA-Agua) <sub>50%</sub> a $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$	35
11	Curva de calibración para las soluciones de A. E. de Cardamomo-Benceno a $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$	36
12	Comparación de las curvas de calibración para las soluciones de A. E. de Cardamomo-(IPA-Agua) <sub>50%</sub> a las dos temperaturas trabajadas	37

13	Comparación de las curvas de calibración para las soluciones de A. E. de Cardamomo-Benceno a las dos temperaturas trabajadas	38
14	Diagrama ternario del sistema A. E. de Cardamomo-(IPA-Agua) <sub>50%</sub> -Benceno a $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$	39
15	Diagrama ternario del sistema A. E. de Cardamomo-(IPA-Agua) <sub>50%</sub> -Benceno a $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$	40
16	Cromatografía del Aceite Esencial de Cardamomo	91
17	Equipo de medición de Índices de refracción compuesto por el refractómetro y la unidad de enfriamiento	92
18	Equipo y cristalería empleados para la titulación de las mezclas binarias	92
19	Agitado de las muestras	93
20	Equipo y cristalería empleados para la separación de las fases luego de la agitación	93
21	Detalle de las fases de extracto y refinado durante el proceso de separación	94

## TABLAS

I	Contenido general del Aceite de Cardamomo	22
II	Coeficientes de distribución (K), obtenidos a partir de los porcentajes de A. E de Cardamomo en el extracto y el refinado de las mezclas ternarias, a las dos temperaturas trabajadas	41
III	Peso del picnómetro y la solución, para las soluciones de A. E. de Cardamomo-(IPA-Agua) <sub>50%</sub> a $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$	59
IV	Peso del picnómetro y la solución, para las soluciones de A. E. de Cardamomo-Benceno a $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$	59
V	Peso del picnómetro y la solución, para las soluciones de A. E. de Cardamomo-(IPA-Agua) <sub>50%</sub> a $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$	60
VI	Peso del picnómetro y la solución, para las soluciones de A. E. de Cardamomo-Benceno a $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$	60
VII	Índices de refracción para las soluciones de A. E. de Cardamomo-(IPA-Agua) <sub>50%</sub> a $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$	61
VIII	Índices de refracción para las soluciones de A. E. de Cardamomo-Benceno a $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$	61
IX	Índices de refracción para las soluciones de A. E. de Cardamomo-(IPA-Agua) <sub>50%</sub> a $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$	62
X	Índices de refracción para las soluciones de A. E. de Cardamomo-Benceno a $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$	62
XI	Volumen de Benceno adicionado para titular alícuotas de 5ml de las soluciones de A. E. de Cardamomo-(IPA-Agua) <sub>50%</sub> a $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$	63

XII	Volumen de la solución (IPA-Agua) <sub>50%</sub> adicionada para titular alícuotas de 5ml de las soluciones de A. E. de Cardamomo-Benceno a $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$	63
XIII	Volumen de Benceno adicionado para titular alícuotas de 5ml de las soluciones de A. E. de Cardamomo-(IPA-Agua) <sub>50%</sub> a $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$	64
XIV	Volumen de la solución (IPA-Agua) <sub>50%</sub> adicionada para titular alícuotas de 5ml de las soluciones de A. E. de Cardamomo-Benceno a $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$	64
XV	Índices de refracción de la fase pesada de las soluciones construidas a partir de los puntos debajo del domo de solubilidad a $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$	65
XVI	Índices de refracción de la fase ligera de las soluciones construidas a partir de los puntos debajo del domo de solubilidad a $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$	65
XVII	Pesos de picnómetro, índices de refracción y volúmenes de titulación medios, para las soluciones de A. E. de Cardamomo-(IPA-Agua) <sub>50%</sub> a $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$	67
XVIII	Pesos de picnómetro, índices de refracción y volúmenes de titulación medios, para las soluciones de A. E. de Cardamomo-Benceno a $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$	67
XIX	Pesos de picnómetro, índices de refracción y volúmenes de titulación medios, para las soluciones de A. E. de Cardamomo-(IPA-Agua) <sub>50%</sub> a $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$	68
XX	Pesos de picnómetro, índices de refracción y volúmenes de titulación medios, para las soluciones de A. E. de Cardamomo-Benceno a $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$	68

XXI	Pesos de las soluciones, porcentaje en peso y densidad de las soluciones de A. E. de Cardamomo-(IPA-Agua) <sub>50%</sub> a $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$	69
XXII	Pesos de las soluciones, porcentaje en peso, densidad de las soluciones de A. E. de Cardamomo-Benceno a $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$	69
XXIII	Pesos de las soluciones, porcentaje en peso, densidad de las soluciones de A. E. de Cardamomo-(IPA-Agua) <sub>50%</sub> a $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$	70
XXIV	Pesos de las soluciones, porcentaje en peso, densidad de las soluciones de A. E. de Cardamomo-Benceno a $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$	70
XXV	Composiciones porcentuales de las mezclas ternarias formadas a partir de la mezcla A. E. Cardamomo-(IPA-Agua) <sub>50%</sub> , por adición de Benceno, necesarias para construir la curva binodal a $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$	71
XXVI	Composiciones porcentuales de las mezclas ternarias formadas a partir de la mezcla A. E. Cardamomo-Benceno, por adición de (IPA-Agua) <sub>50%</sub> , necesarias para construir la curva binodal a $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$	71
XXVII	Composiciones porcentuales de las mezclas ternarias formadas a partir de la mezcla A. E. Cardamomo-(IPA-Agua) <sub>50%</sub> , por adición de Benceno, necesarias para construir la curva binodal a $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$	72
XXVIII	Composiciones porcentuales de las mezclas ternarias formadas a partir de la mezcla A. E. Cardamomo-Benceno, por adición de (IPA-Agua) <sub>50%</sub> , necesarias para construir la curva binodal a $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$	72

XXIX	Composición en peso de los puntos en los que el diagrama ternario toca los ejes, a una temperatura de $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$	73
XXX	Composición en peso de los puntos en los que el diagrama ternario toca los ejes, a una temperatura de $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$	73
XXXI	Índices de refracción promedio de las fases pesada (refinado) y ligera (extracto), para los puntos seleccionados por debajo del domo de solubilidad a $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$	74
XXXII	Índices de refracción promedio de las fases pesada (refinado) y ligera (extracto), para los puntos seleccionados por debajo del domo de solubilidad a $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$	74
XXXIII	Porcentajes en peso de A. E. de Cardamomo en Extracto y Refinado, de los puntos debajo del domo de solubilidad a $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$	75
XXXIV	Porcentajes en peso de A. E. de Cardamomo en Extracto y Refinado, de los puntos debajo del domo de solubilidad a $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$	75
XXXV	Porcentajes de error de los datos calculados a una temperatura de $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , para las mezclas binarias de A. E. Cardamomo-(IPA-Agua) <sub>50%</sub>	76
XXXVI	Porcentajes de error de los datos calculados a una temperatura de $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , para las mezclas binarias de A. E. Cardamomo-Benceno	76
XXXVII	Porcentajes de error de los datos calculados a una temperatura de $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , para las mezclas binarias de A. E. Cardamomo-(IPA-Agua) <sub>50%</sub>	77

XXXVIII	Porcentajes de error de los datos calculados a una temperatura de $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , para las mezclas binarias de A. E. Cardamomo-Benceno	77
XXXIX	Porcentajes de error de las composiciones en peso de la mezcla ternaria, utilizados para construir el diagrama ternario a una temperatura de $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , a partir de las mezclas binarias de A. E. Cardamomo-(IPA-Agua) <sub>50%</sub>	78
XL	Porcentajes de error de las composiciones en peso de la mezcla ternaria, utilizados para construir el diagrama ternario a una temperatura de $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , a partir de las mezclas binarias de A. E. Cardamomo-Benceno	78
XLI	Porcentajes de error de las composiciones en peso de la mezcla ternaria, utilizados para construir el diagrama ternario a una temperatura de $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , a partir de las mezclas binarias de A. E. Cardamomo-(IPA-Agua) <sub>50%</sub>	79
XLII	Porcentajes de error de las composiciones en peso de la mezcla ternaria, utilizados para construir el diagrama ternario a una temperatura de $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , a partir de las mezclas binarias de A. E. Cardamomo-Benceno	79
XLII	Incertezas de los instrumentos de medición	89



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>
<b><math>K</math></b>	coeficiente de distribución (adimensional)
<b><math>M_{pic}</math></b>	peso del picnómetro vacío (g)
<b><math>M_{Total}</math></b>	peso de la solución + el peso del picnómetro (g)
<b><math>N</math></b>	número de observaciones
<b><math>\%P</math></b>	porcentaje en peso de aceite de Cardamomo en la solución (adimensional)
<b><math>\rho_{cardam}</math></b>	densidad del Aceite Esencial de Cardamomo (g/ml)
<b><math>\rho_{solvAdic}</math></b>	densidad del solvente adicionado durante la titulación (g/ml)
<b><math>\rho_{sol}</math></b>	densidad de la solución (g/ml)
<b><math>\%Soluto</math></b>	porcentaje en peso del soluto en la mezcla ternaria
<b><math>\%Solv1</math></b>	porcentaje en peso del solvente de la mezcla trabajada
<b><math>\%SolvAdic</math></b>	porcentaje en peso del solvente adicionado en la titulación

$\sigma$	desviación estándar (adimensional)
$\%V$	porcentaje en volumen de Aceite de Cardamomo en la solución
$V_{pic}$	volumen del picnómetro (ml)
$V_{alic}$	volumen de la alícuota de solución tomada para titular (ml)
$V_{solvAdic}$	volumen del solvente adicionado durante la titulación (ml)
$\bar{X}$	media aritmética
$X_i$	dato de la i-ésima observación
$X$	concentración al equilibrio del Aceite Esencial de Cardamomo en el refinado.
$Y$	concentración al equilibrio del Aceite Esencial de Cardamomo en el extracto.

## GLOSARIO

<b>Coeficiente de distribución</b>	Relación entre la proporción de soluto en el extracto y en el refinado.
<b>Cromatografía de gases</b>	Método de separación, caracterización y análisis cuantitativo de sustancias.
<b>Densidad</b>	Peso específico.
<b>Extracto</b>	Producto final de la extracción, rico en soluto. En este caso, A. E. de Cardamomo.
<b>Fase ligera</b>	Fase rica en Benceno. Extracto.
<b>Fase pesada</b>	Fase rica en la mezcla (IPA-Agua) <sub>50%</sub> . Refinado.
<b>Índice de refracción</b>	Razón entre las velocidades de la luz en el vacío y en el medio estudiado.

<b>Picnometría</b>	Método para determinar la densidad de una sustancia líquida por medio del uso de un picnómetro.
<b>Refinado</b>	Líquido residual del cual fue separado el soluto. En este caso, rico en (IPA-Agua) <sub>50%</sub> .
<b>Refractómetro</b>	Equipo con el cual se mide el índice de refracción.
<b>Soluto</b>	Componente de la mezcla que se desea extraer. En este caso, corresponde al Aceite Esencial de Cardamomo.
<b>Solvente 1</b>	Componente de la mezcla que se alimenta junto con el soluto.
<b>Solvente Extractor</b>	Componente que se adiciona a la mezcla binaria de alimentación para separar el soluto del solvente 1

## RESUMEN

El presente trabajo de graduación se realizó con el objetivo de caracterizar el equilibrio ternario del sistema Aceite Esencial de Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub>-Benceno a dos temperaturas diferentes.

Las temperaturas trabajadas fueron  $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$  y  $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$ . Se trabajó a una presión de 640mm Hg.

Para cada una de las temperaturas trabajadas se obtuvieron curvas de calibración que relacionan el índice de refracción contra la composición porcentual en peso del Cardamomo para las mezclas binaria de Aceite Esencial de Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub> y Aceite Esencial de Cardamomo-Benceno.

Para ello, se emplearon los métodos de picnometría y refractometría.

Como resultado se obtuvo un diagrama ternario para cada temperatura trabajada. Ambos diagramas fueron de Tipo II, con un error máximo aproximado del 2%, a partir de las curvas de calibración antes mencionadas.



# OBJETIVOS

## General

Evaluar un método experimental para la generación de datos a nivel de laboratorio del sistema Aceite Esencial de Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub>-Benceno, en equilibrio líquido-líquido.

## Específicos

1. Construir un diagrama de equilibrio ternario a partir de los datos generados a nivel de laboratorio para el sistema Aceite Esencial de Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub>-Benceno, en equilibrio líquido-líquido.
2. Correlacionar los índices de refracción obtenidos experimentalmente, con las concentraciones porcentuales en peso de A.E. de Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub>, a dos temperaturas diferentes.
3. Correlacionar los índices de refracción obtenidos de forma experimental, con las concentraciones porcentuales en peso de A.E. de Cardamomo-Benceno, a dos temperaturas diferentes.

4. Determinar los valores experimentales de concentraciones en equilibrio de inmiscibilidad para el sistema ternario Aceite Esencial de Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub>-Benceno, en equilibrio líquido-líquido, a partir de soluciones de A.E. de Cardamomo en Benceno por adición de solvente (IPA-Agua)<sub>50%</sub>.
  
5. Determinar los valores experimentales de concentraciones en equilibrio de inmiscibilidad para el sistema ternario Aceite Esencial de Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub>-Benceno, en equilibrio líquido-líquido, a partir de soluciones de A.E. en (IPA-Agua)<sub>50%</sub>, por adición de solvente Benceno.

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como objetivo general la evaluación de un método experimental a nivel de laboratorio, para la generación de datos de equilibrio ternario para el sistema Aceite Esencial de Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub>-Benceno, a dos temperaturas diferentes.

El fundamento de la extracción con disolventes es la separación de una mezcla líquida por interacción con un tercer componente líquido insoluble. La diferencia de afinidades de los componentes puede dar como resultado su separación de la mezcla original.

Este tipo de equilibrio, entre componentes líquidos, es denominado equilibrio ternario y se representa de forma gráfica sobre un triángulo equilátero que muestra la curva de solubilidad y las composiciones de las diferentes mezclas posibles.

Con el presente trabajo se pretende continuar con las caracterizaciones de sistemas ternarios, empleados comúnmente en las extracciones líquido-líquido.

Para ello, se utilizaron los métodos de picnometría y refractometría para obtener los valores de densidades e índices de refracción de muestras con diferentes concentraciones de solutos. Así, también, el método de cromatografía para establecer la composición del Aceite Esencial de Cardamomo con el cual se trabajó, ya que, dichas composiciones varían dependiendo del tipo de semilla utilizada, del proceso de extracción empleado y de la forma de almacenamiento del aceite.

Con los datos obtenidos se construyeron las curvas de equilibrio ternario para el sistema Aceite Esencial de Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub>-Benceno, a dos temperaturas diferentes y 640mm Hg.

## 1. ANTECEDENTES

El presente trabajo fue realizado dentro de las instalaciones de los Laboratorios del Área de Química y los Laboratorios del Área de Fisicoquímica de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Se contó con el apoyo de la planta piloto de Extracción-Destilación del Centro de Investigaciones de Ingeniería y del Laboratorio de Toxicología del Centro de Información y Asesoría Toxicológica -CIAT-, de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Las bases para el proyecto fueron tomadas de las investigaciones realizadas anteriormente para los diferentes trabajos de tesis acerca de sistemas ternarios, realizadas en la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Los proyectos de tesis elaborados anteriormente son:

- Durante el año 2002 la investigación de la Ingeniera Ligia Marilú Rivas Méndez sobre el sistema acetona-agua-hexano, asesorada por el Ing. César Alfonso García Guerra, con el título “Evaluación de un método experimental de obtención de datos que permitan caracterizar el equilibrio ternario del sistema agua-hexano-acetona a dos temperaturas”. Esta investigación dio como resultado un sistema ternario del tipo I (con formación de un par de líquidos parcialmente miscibles) dentro del rango de temperaturas de  $28 \pm 7^\circ \text{C}$ .

- Durante el año 2002 la investigación de la Ingeniera Olinda Margarita López Velásquez sobre el sistema etanol-agua-hexano, asesorada por el Ing. César Alfonso García Guerra, con el título “Evaluación de un método experimental de generación de datos para el estudio del sistema ternario etanol-hexano-agua a dos temperaturas diferentes”. Esta investigación dio como resultado que el punto de pliegue experimental obtenido para el sistema etanol-hexano-agua a 23°C es 22% agua, 71% etanol y 7% hexano y a 43°C es 23% agua, 68% etanol y 9% hexano.
- Durante el año 2003 la investigación del Ingeniero Marco Vinicio Pajarito Ángel sobre el sistema Isopropanol-hexano-agua, asesorada por el Ing. César Alfonso García Guerra, con el título “Evaluación de un método experimental de generación de datos para el estudio del sistema ternario Isopropanol-hexano-agua en equilibrio líquido de inmiscibilidad, a tres temperaturas y a 640 mm Hg”. Esta investigación concluyó que existe una diferencia significativa entre las isotermas de temperatura de 10°C y 50°C para el sistema de Isopropanol-hexano-agua, a partir de las curvas binodales al equilibrio de inmiscibilidad y de los puntos de pliegue obtenidos.
- Durante el año 2003 la investigación del Ingeniero Ramiro Antonio Prado Córdova sobre el sistema agua-glicerol-1-butanol-cloruro de sodio, asesorada por el Ing. César Alfonso García Guerra, con el título “Evaluación del efecto de la concentración de cloruro de sodio en el sistema cuaternario agua-glicerol-1-butanol-cloruro de sodio sobre la distribución de equilibrio del glicerol para determinar la factibilidad de un proceso alternativo de recuperación de glicerina en una planta de saponificación”. Donde se determinó que el efecto del factor glicerol sobre el coeficiente de distribución del glicerol en el sistema cuaternario

trabajado, es tal que alcanza un mínimo cuando el porcentaje de glicerol es de 5% luego del cual se incrementa al aumentar la cantidad de glicerol en el sistema.

- Durante el año 2004 la investigación del Ingeniero José Luis Alfaro Soto, sobre el sistema aceite esencial de eucaliptol (1-8 cineol)-agua-hexano, asesorada por el Ing. César Alfonso García Guerra, con el título “Evaluación de un método experimental de generación de datos para el estudio del sistema ternario aceite esencial de eucaliptol (1-8 cineol)-agua-hexano en equilibrio líquido a dos temperaturas y 640 mm Hg”.
- Durante el año 2005 la investigación de Marisol Amado Rodas sobre el sistema limoneno-etanol-hexano, asesorada por el Ing. César Alfonso García Guerra, con el título “Evaluación de un método experimental de generación de datos a nivel de laboratorio para el estudio del sistema ternario aceite esencial de terpenos del fruto de naranja (Limoneno)-etanol-hexano en equilibrio líquido a dos temperaturas y 640 mm Hg”. De la cual se concluyó que el sistema es del tipo II, con un punto de pliegue a 10°C a 62% de A. E. limoneno, 33% de etanol y 5% de hexano y un punto de pliegue a 25°C a 54% de A.E. limoneno, 40% etanol y 6% hexano.



## 2. MARCO TEÓRICO

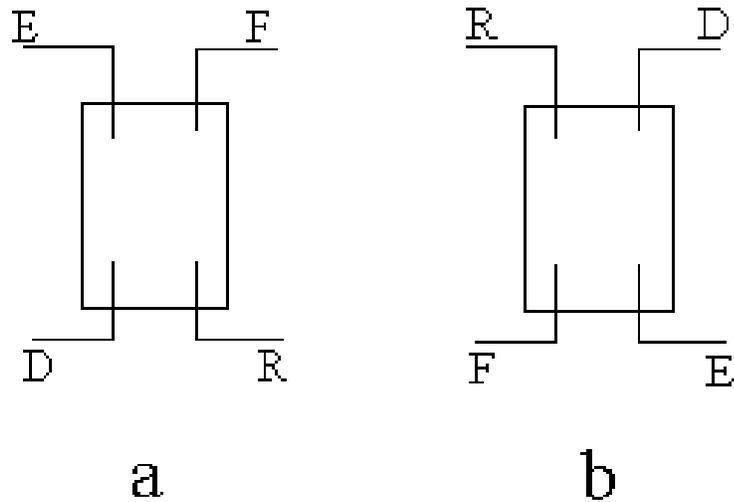
### 2.1 Extracción Líquido-Líquido

Esta operación unitaria es también conocida como extracción con disolventes y consiste en la separación de una solución líquida en sus componentes por medio de la puesta en contacto con un líquido insoluble. El grado de separación que puede obtenerse del proceso depende de la distribución de los componentes de la mezcla en las dos fases líquidas.

La nomenclatura comúnmente utilizada para el proceso de extracción con disolventes define como *alimentación* a la mezcla de la cual se desea realizar la extracción; el componente de la mezcla que desea extraerse es el *soluto*; y, el líquido con el cual se lleva a cabo la extracción el *disolvente*. El producto de la operación, rico en el disolvente, es denominado *extracto*; y al líquido residual del cual fue separado el soluto se lo conoce como *refinado*.

La *figura 1* presenta los dos tipos de diagramas del proceso que pueden darse, basándose en las diferencias de densidades de los líquidos ingresados al sistema, con una alimentación  $F$ , un disolvente  $D$ , un extracto  $E$  y un refinado  $R$ . En el primero, *figura 1a*, se tiene un sistema en el cual la densidad del disolvente es menor que la densidad de la alimentación; en la *figura 1b* se tiene un sistema en el cual la densidad de la alimentación es menor que la del disolvente.

**Figura 1. Entradas y salidas de un proceso de extracción**



El proceso de extracción es esencialmente de carácter físico, por lo que los componentes no cambian su composición química. Sin embargo el carácter químico de los componentes influye en la amplitud de la separación posible, puesto que la distribución de un soluto depende de la no idealidad de las soluciones incluidas. Esta no idealidad puede ser modificada, en algunos casos, para mejorar la separación. Dichas modificaciones pueden consistir en cambios en la temperatura a la cual se lleva a cabo la extracción, la adición de un soluto (una sal por ejemplo), cambios en el pH o en el grado de oxidación de un soluto metálico. Cuando modificaciones de este tipo no mejoran la capacidad de separación puede recurrirse a la reacción química con el disolvente.

### 2.1.1 Equilibrio Líquido

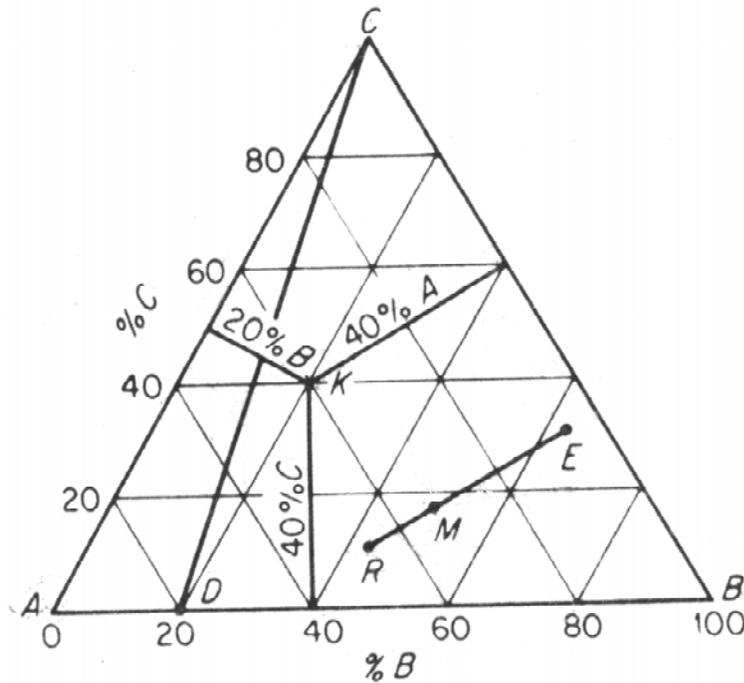
Existen sistemas en los cuales la alimentación se encuentra compuesta por más de dos sustancias, o bien, sistemas en los cuales el disolvente es una mezcla de dos o más sustancias y se denomina disolvente mixto, como el sistema planteado por Ramiro Prado en su trabajo de graduación (*Ref. 10*). Los sistemas más simples se encuentran compuestos por tres sustancias diferentes, dos de ellas componen la mezcla a separar o alimentación y la tercera es el disolvente. Para estos sistemas se habla de **equilibrio ternario** y aunque las fases insolubles son predominantemente muy distintas desde el punto de vista químico, en la mayoría de los casos los tres componentes aparecen en cierto grado en las dos fases.

### 2.1.2 Diagramas de fase ternarios

Comúnmente suele representarse el equilibrio ternario en una gráfica triangular equilátera, como la de la *figura 2*

Donde A y B son líquidos puros básicamente insolubles. B es el disolvente extractor; C es el soluto distribuido y las mezclas que se van a separar por extracción están compuestas por A y C.

**Figura 2. Representación gráfica del equilibrio ternario líquido-líquido.**

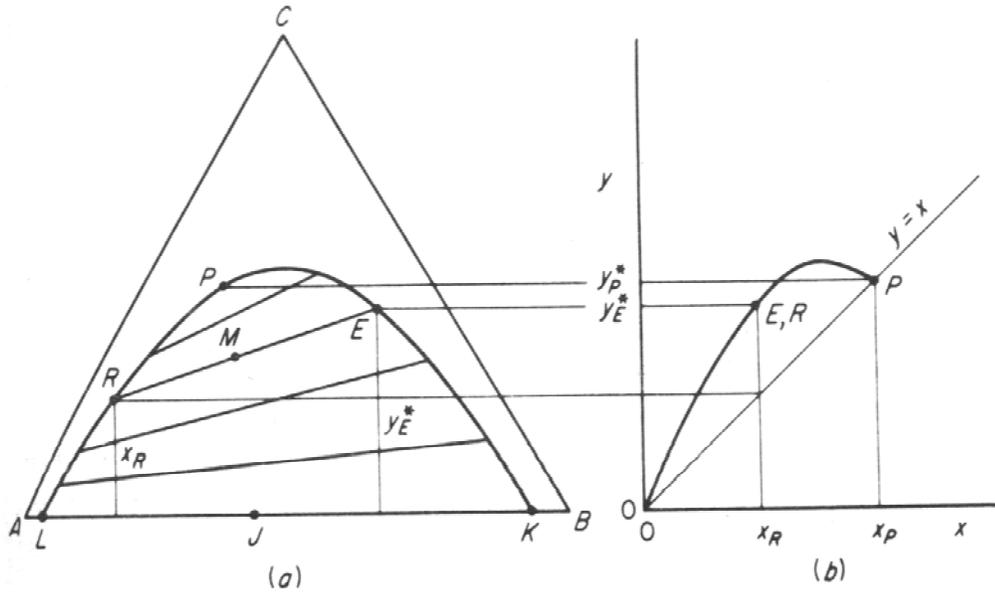


Fuente: Robert E. Treybal. Operaciones de Transferencia de Masa

Las coordenadas triangulares de la gráfica de la *figura 2* representan isotermas a una presión suficiente para mantener el sistema totalmente líquido.

La altura del triángulo representa la composición al 100% y las distancias a los tres lados los porcentajes o fracciones de los tres componentes. Cada vértice del triángulo representa uno de los componentes puros.

**Figura 3. Curva de solubilidad para un sistema tipo I**



Fuente: Robert E. Treybal. Operaciones de Transferencia de Masa

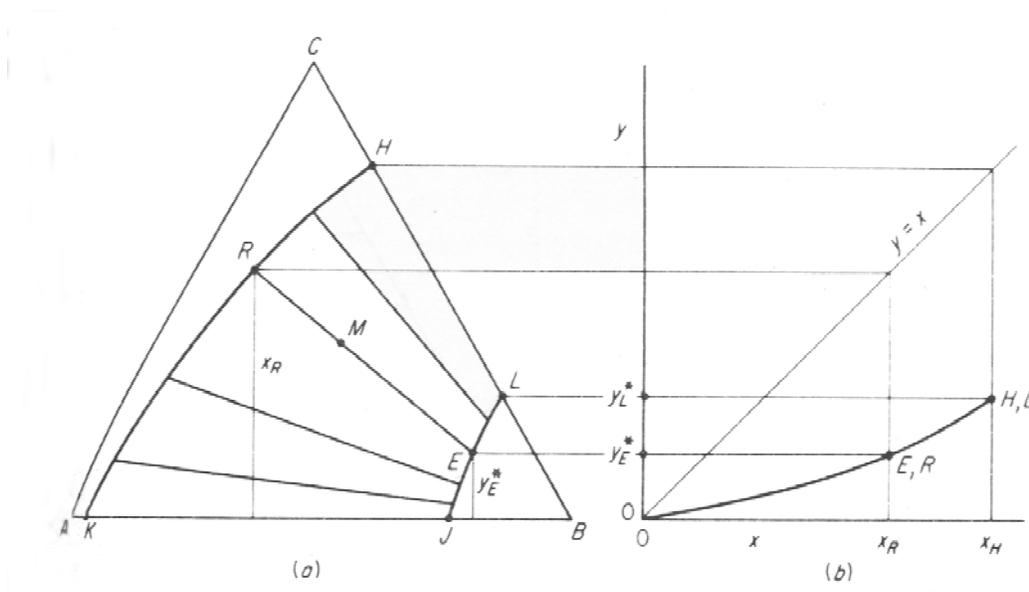
La figura 3 muestra el sistema más común de equilibrio ternario, denominado Tipo I, en el cual la región de inmiscibilidad toca sólo un lado del triángulo. Los pares de líquidos A-C y C-B son completamente miscibles: A y B son sólo parcialmente solubles entre sí, dando lugar a la solución líquida saturada en L (rica en A) y en K (rica en B).

La curva LRPEK es la *curva binodal de solubilidad*, que indica el cambio en solubilidad de las fases ricas en A (punto R) y en B (punto E) al agregar C. Donde la línea RE que une las composiciones en el equilibrio de R y de E es una *línea de unión*, que necesariamente pasa a través del punto M que representa la mezcla como un todo; P representa la última de las líneas de unión, denominada *punto de pliegue*.

El segundo sistema ternario más común es denominado Tipo II y presenta un diagrama como el mostrado en la *figura 4*.

En este sistema B es sólo parcialmente miscible en A y en C.

**Figura 4. Curva de solubilidad para un sistema tipo II**



Fuente: Robert E. Treybal. *Operaciones de Transferencia de Masa*

### 2.1.3 Coeficiente de distribución

Basándose en la *figura 3*, el coeficiente de distribución  $K$  se define como:

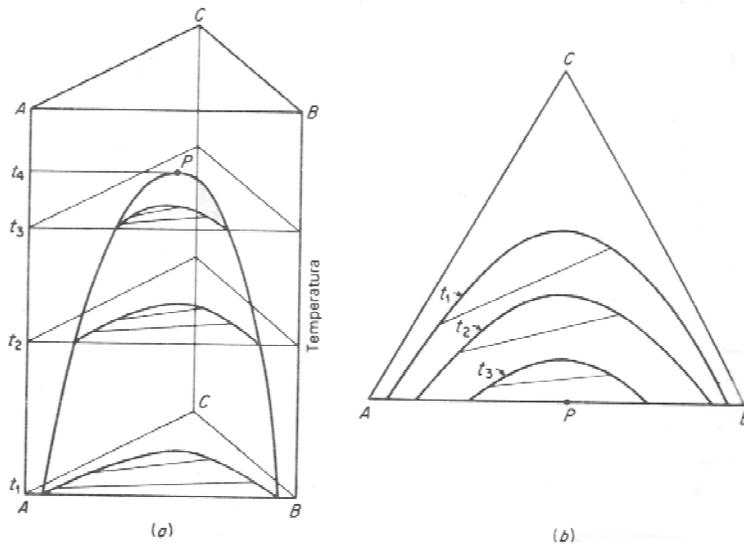
$$K = \frac{y^*}{x}$$

Donde  $x$  e  $y^*$  pueden representar tanto fracciones en peso como fracciones molares.

### 2.1.4 Efecto de la temperatura

En la *figura 5* se muestra como puede comportarse un sistema ternario con las variaciones de temperatura. De acuerdo con el Manual del Ingeniero Químico (*Ref. 11*), a una temperatura suficientemente alta, todos los pares binarios se encuentran por encima de sus temperaturas críticas de solución. Con forme baja la temperatura a  $T_4$  el par binario  $AB$  comienza a formar dos fases. Por debajo de  $T_4$  la sección isotérmica (horizontal) de la figura tridimensional muestra una conducta de fase del tipo I. Las reducciones adicionales de la temperatura ensanchan la región de dos fases y cuando se llega a  $T_2$ , la temperatura crítica binaria de solución para los componentes  $C$  y  $B$ , la región ternaria de dos fases toca la línea  $CB$ . Cuando la temperatura baja todavía más, el sistema tiene características de un sistema tipo II.

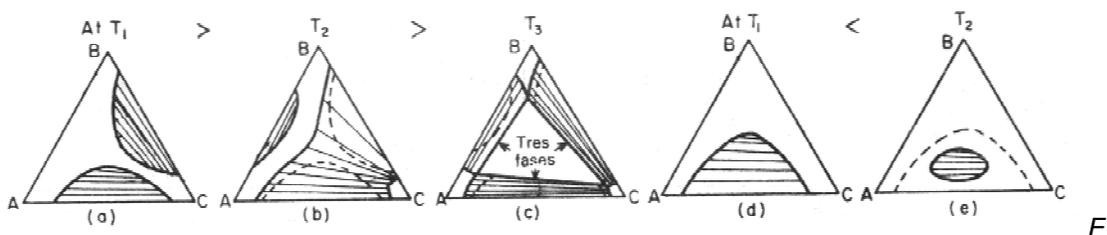
**Figura 5. Variaciones de los sistemas ternarios con la temperatura**



Fuente: Robert E. Treybal. *Operaciones de Transferencia de Masa*

A demás de los sistemas de tipo I y II, El Manual del Ingeniero Químico describe la existencia de otros tipos de equilibrio de fase, obtenibles algunas veces a temperaturas extremas en sistemas ternarios de comportamiento normal a otras temperaturas. Estos sistemas se encuentran representados en la *figura 6*.

**Figura 6. Tipos de sistemas ternarios**



uente: Robert E. Treybal. *Operaciones de Transferencia de Masa*

### 2.1.5 Efecto de la presión

Debido a que los componentes poseen volúmenes parciales muy pequeños, el efecto de la presión en los sistemas de equilibrio líquido-líquido es generalmente despreciable.

### **2.1.6 Elección del disolvente**

Para elegir el solvente más adecuado para determinada extracción es preciso evaluar las características del mismo y, dado que es muy difícil que un solvente específico las presente todas, elegir con criterio aquel que presente la mayor parte o que se adecue más al sistema a trabajar.

#### **2.1.6.1 Selectividad**

Es una medida numérica de hasta qué punto se ha separado la alimentación. De modo que la relación de extracto (fase rica en el soluto) a refinado (fase pobre en el soluto) sea superior a la unidad.

Mientras más cercano sea el valor de la relación a la unidad, más etapas de separación será necesarias para lograr los resultados deseados.

#### **2.1.6.2 Recuperabilidad**

Para que un solvente sea apropiado es preciso que pueda recuperarse con cierta facilidad, tanto del extracto como del refinado. Dado que en la mayoría de casos la recuperación se lleva a cabo por destilación, se requiere que las volatilidades relativas de los solventes y no solventes del sistema sean favorables. El Manual del Ingeniero Químico sugiere un bajo calor latente de vaporización para los solventes volátiles.

### **2.1.6.3 Coeficiente de distribución**

El Manual del Ingeniero Químico sugiere coeficientes de distribución grandes para el componente extraído, ya que esto reducirá tanto la cantidad de solvente requerido como el número de etapas de extracción.

### **2.1.6.4 Capacidad**

Hace referencia a la forma en la que el disolvente disuelve el soluto a extraer. Entre mayor sea la capacidad del disolvente para disolver al soluto, menor será la cantidad requerida del mismo.

### **2.1.6.5 Solubilidad del solvente**

El hecho de que el solvente sea más o menos soluble en el componente A repercute tanto en el intervalo de concentraciones manejables en la alimentación como en la recuperabilidad del solvente.

Solventes más inmiscibles dan mayor amplitud al intervalo de concentraciones de alimentación y una mejor recuperación al final de la extracción.

#### **2.1.6.6 Densidad**

El Manual del Ingeniero Químico indica que una diferencia de densidades entre las fases en equilibrio es indispensable, puesto que en esa forma se ve afectado directamente el flujo de los líquidos que entran en contacto a través de un extractor, así como también la separación de los líquidos finales. En sistemas de tipo I la diferencia de densidades suele decaer con forme se incrementa la concentración del disolvente, llegando a cero en el punto crítico.

#### **2.1.6.7 Tensión interfacial**

Tiene que ver con la forma en la que coagulan las gotas dispersas de líquido. Generalmente disminuye con la miscibilidad de las fases.

Para altas tensiones interfaciales generalmente será necesario agregar agitación al sistema, sin embargo el Manual del Ingeniero Químico sugiere el uso de solventes con alta tensión interfacial pues es más fácil, en general, adicionar agitación mecánica, que solucionar los problemas de coagulación.

#### **2.1.6.8 Constante dieléctrica**

Tiene que ver con la afinidad de unas sustancias hacia otras. Aquellas con valores de constante dieléctrica similares poseen, en general, mayor afinidad que aquellas con valores de constante dieléctrica muy diferentes.

### **2.1.6.9 Otras**

Como complemento a las características de un buen solvente ya descritas, se tienen la baja corrosividad, para los materiales comunes de construcción; baja viscosidad, para mejores velocidades de transferencia de masa y deposición de dispersiones; no inflamabilidad; baja toxicidad; y bajo costo.

## **2.2 Aceites esenciales**

Los aceites esenciales son mezclas de componentes volátiles, producto del metabolismo secundario de las plantas.

Son líquidos a temperatura ambiente, generalmente incoloros y de densidad inferior a la del agua (la esencia de safrán o de clavo constituyen excepciones). En su mayoría insolubles en agua, pero fácilmente solubles en alcohol, éter y aceites vegetales y minerales. Por lo general no son oleosos al tacto. Casi siempre se encuentran dotados de poder rotatorio, teniendo índices de refracción elevados.

### **2.2.1 Localización**

Se encuentran muy difundidos en el reino vegetal, siendo posible su extracción de las hojas, raíces, corteza, flores, cáscaras de frutos, frutos, etc.

En muchos casos, diferentes partes de la misma planta proporcionan esencias distintas en composición y propiedades.

Las cantidades y composiciones de los aceites varían de una especie vegetal a otra, dentro de los mismos géneros de planta, y aun dentro de las mismas especies dependiendo de la región de cultivo, el clima, la madurez de la planta, etc.

### **2.2.2 Composición química**

En la actualidad se conocen más de doscientos aceites esenciales de apreciado valor comercial en los cuales se han identificado alrededor de cuatrocientos componentes químicos.

Sin embargo, sus componentes pueden ser agrupados casi en su totalidad en dos grupos caracterizados por orígenes biogénicos distintos: el grupo de los terpenoides y el grupo de los compuestos aromáticos derivados del fenilpropano, mucho menos frecuentes. Así mismo pueden contener diversos productos procedentes de procesos de degradación que afectan a constituyentes no volátiles. El apéndice A muestra algunos ejemplos de estructuras de monoterpenos acíclicos y cíclicos encontrados en los aceites esenciales.

#### **2.2.2.1 Terpenoides**

Los aceites esenciales contienen únicamente los terpenos más volátiles: monoterpenos, con cadenas  $C_{10}$ - $C_{15}$ ; y sesquiterpenos, con cadenas  $C_{15}$ - $C_{20}$ .

Dentro de estas dos clasificaciones es posible encontrar alcoholes, aldehídos, cetonas, ésteres, éteres, peróxidos y fenoles.

### 2.2.2.2 Compuestos aromáticos

Los derivados del fenilpropano (C<sub>6</sub>-C<sub>3</sub>) son menos frecuentes que los terpenoides. Generalmente se trata de alil- y propenilfenoles.

### 2.2.3 Clasificación de los Aceites Esenciales

La consistencia, el origen y la naturaleza de los compuestos mayoritarios de un aceite son algunos de los criterios para la clasificación de los aceites esenciales.

#### 2.2.3.1 De acuerdo con su consistencia

Los aceites se dividen en **Esencias Fluidas**, que son líquidos muy volátiles a temperatura ambiente; **Bálsamos**, que se encuentran compuestos principalmente por sesquiterpenoides y poseen consistencia más viscosa, poca volatilidad y propensión a la volatilización; y **Oleorresinas**, que poseen los aromas característicos de las plantas de las que son extraídos y son líquidos sumamente viscosos o sustancias semisólidas.

#### 2.2.3.2 De acuerdo a su origen

Los aceites pueden clasificarse como **Naturales**, obtenidos directamente de la planta sin ser sometidos posteriormente a modificaciones físicas o químicas; **Artificiales**, obtenidas a través de los procesos de enriquecimiento de la misma esencia con uno de sus componentes o a partir de mezclas de varias esencias naturales extraídas de distintas plantas; y aceites **Sintéticos**, mezclas de diversos productos obtenidos por medio de procesos químicos.

#### **2.2.4 Extracción**

La extracción de los aceites esenciales de las partes vegetales se realiza de diversas formas, en función de la calidad del aceite por extraer y de la estabilidad de sus constituyentes; ya que en la mayoría de los casos éstos tienden a degradarse cuando se someten a altas temperaturas u otro tipo de tratamiento extremo. La extracción de aceites esenciales se realiza fundamentalmente por cuatro métodos:

- Destilación con agua: llamada también destilación diferencial o destilación simple. Consiste en poner la planta en contacto con agua y elevar la temperatura, es común para la extracción de aceites con propiedades medicinales.
- Destilación con agua y vapor: la parte de la planta se pone en contacto directo con vapor, mismo que diluye el aceite el cual es recolectado en agua.
- Destilación con vapor: o destilación por arrastre con vapor. En esta, la parte vegetal se pone en contacto directo con vapor y los aceites son recolectados directamente.
- Extracción con solventes: o Lixiviación. El aceite se extrae en un solvente, mismo que después debe ser separado.
- mismo que después debe ser separado.

Antes del proceso de destilación la planta o la parte de la planta de interés se seca parcialmente y se machaca, esto ayuda a incrementar la superficie de contacto del solvente y agilizar el proceso de destilación.

### 2.3 CARDAMOMO *Elletaria cardamomum*

La planta es originaria de la India y Sri Lanka

Pertenece como el jengibre y la cúrcuma a la familia de las *Zingiberáceas*.

Es una planta herbácea de hoja perenne que produce unos frutos muy aromáticos y algo picantes que contiene semillas con un sabor que recuerda al alcanfor. Los tallos pueden alcanzar hasta 3 metros de altura y las flores son de color verdoso con la punta blanca y vetas púrpuras. El fruto es verde y consiste en una cápsula que contiene varias semillas de color pardo rojizo que se recogen antes de que maduren, se lavan con agua de pozo, se secan al sol y se blanquean antes de su uso.

**Figura 7. Fruto y semillas de Cardamomo**



Su origen se sitúa en los bosques monzónicos del sur de la India y en Birmania, Sri Lanka, Tanzania, Vietnam y Guatemala también, siendo este último país uno de los que produce mayor cantidad de Cardamomo para exportación. La altitud entre 750 y 1.500 metros es su lugar ideal. Hasta pasados tres años no comienza a dar fruto, durando unos quince su producción óptima. Las semillas se recogen a intervalos entre septiembre y diciembre.

### **2.3.1 Aceite Esencial de Cardamomo**

Es un líquido incoloro o amarillo pálido, de aroma penetrante y ligeramente alcanforado, de sabor ligeramente picante. Insoluble en agua.

Se obtiene a partir de la semilla por medio de diferentes métodos de extracción entre los que figuran la extracción con fluidos supercríticos, extracción con solventes y arrastre con vapor.

### **2.3.2 Características generales del Aceite de Cardamomo producido en Guatemala**

Su densidad se encuentra entre 0.917 y 0.947.

Posee un índice de refracción de 1.4603-1.4660

Rotación óptica, a 25° C, de +22.1° a +44.0°.

Dentro de las semillas el contenido de aceite esencial es totalmente dependiente de las condiciones de almacenamiento, pero se encuentra entre un 3 y un 10%. Así mismo, la composición del aceite varía según el lugar de cultivo, la clase de semilla, el tiempo de cosecha y el método de extracción, entre otros.

El contenido general del aceite de Cardamomo producido a partir de semillas cultivadas en territorio guatemalteco se encuentra descrito en la *tabla 1*, que presenta los componentes que se encuentran en mayor proporción, sin embargo, el aceite de Cardamomo contiene alrededor de 20 compuestos más en cantidades inferiores al 0.01%.

**Tabla I. Contenido general del Aceite de Cardamomo**

	<b>COMPONENTE</b>	<b>PORCENTAJE</b>
contenido mayor al 10%	$\alpha$ - terpinilo	50.7
	1,8 cineol	23.4
contenido menor al 10% pero mayor al 1%	acetato de linalilo	6.3
	Linalool	4.5
	Sabineno	3.4
	Nerolidol	2.4
	$\alpha$ -terpineol	1.9
	$\alpha$ -terpineno	1.5
compuestos traza (contenido menor al 1%)	$\alpha$ -pineno	0.7
	geraniol	0.38
	$\beta$ -pineno	0.3
	Peral	0.15
	acetato de geranilo	0.1
	limoneno	0.1

*Referencia 2, pp. 118*

### 2.3.3 Aplicaciones

El Aceite Esencial de Cardamomo es empleado como saborizantes en múltiples comidas y bebidas y como aromatizante en la industria de los perfumes, jabones, desinfectantes, etc. Así mismo, la industria farmacéutica lo emplea tanto por su efecto como calmante del dolor como por su sabor y aroma.

## 2.4 Disolventes

Cuando se trabaja con sistemas de aceites esenciales, se conoce como soluto al aceite esencial y como solvente al líquido empleado para extraer el aceite de la materia vegetal que lo contiene.

Los solventes que se utilizaron para el equilibrio ternario son agua y Benceno.

### 2.4.1 Agua

- Nombre: Agua
- Fórmula general:  $H_2O$
- Masa molecular: 18.01
- Aspecto: líquido incoloro, inodoro e insípido.
- Punto de ebullición:  $100^{\circ} C$
- Punto de fusión:  $0^{\circ}C$
- Constante dieléctrica a 298K: 81.22
- Índice de refracción: 1.33
- Densidad relativa: 1

### 2.4.2 Alcohol Isopropílico

- Nombre: Alcohol isopropílico / Isopropanol / 2 Propanol
- Fórmula:  $C_3H_8O$  /  $(CH_3)_2CHOH$
- Masa molecular: 60.1
- Aspecto: líquido incoloro

- Punto de ebullición: 83°C
- Punto de fusión: -90°C
- Índice de refracción 1.376-1.378
- Constante dieléctrica: 20.18
- Densidad relativa (agua = 1): 0.79
- Solubilidad en agua: miscible
- Punto de inflamación: 11.7°C
- Temperatura de autoignición: 455°C
- Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 2-12

### 2.4.3 Benceno

- Nombre: Benzol
- Fórmula:  $C_6H_6$
- Aspecto: líquido incoloro, de olor dulzon
- Masa molecular: 78.11g/mol
- Punto de ebullición: 80°C
- Punto de fusión: 5°C
- Índice de refracción 1.5011
- Constante dieléctrica: 2.2825
- Densidad relativa (agua = 1): 0.88
- Solubilidad en agua: 1.8g/lit a 20° C
- Punto de inflamación: -11.7°C
- Temperatura de autoignición: 555°C
- Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 1.2-8.0 vol%

## **3. METODOLOGÍA**

### **3.1 Recursos**

#### **3.1.1 Localización**

La parte experimental de la investigación se llevó a cabo en la Universidad de San Carlos de Guatemala. En el Laboratorio de Química y en el Laboratorio de Fisicoquímica de la Escuela de Ingeniería Química, donde se realizaron los análisis fisicoquímicos del sistema ternario Aceite de Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub>-Benceno.

Los análisis de tipo cromatografía de gases para caracterizar el aceite de Cardamomo que se utilizó fueron hechos en el Laboratorio de Toxicología del Centro de Información y Asesoría Toxicológica -CIAT-, de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia.

#### **3.1.2 Recursos humanos**

Investigador: Br. Krista Ivonne Aguilar Ovando  
Asesor: Ing. Qco. César Alfonso García Guerra

### 3.1.3 Recursos materiales

#### 3.1.3.1 Reactivos

- Aceite Esencial de Cardamomo (comprado en Extract)
- Benceno (proporcionado por el Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala)
- Agua destilada
- Alcohol Isopropílico -IPA- (comprado en Lafimark)

#### 3.1.3.2 Equipo y cristalería

- Refractómetro:      Marca: Abbe  
                              Modelo: 32200  
                              Rango de temperatura: 0 a 80°C  
                              Rango de medición: 1.300-1.700
  
- Balanza analítica    Marca: OHAUS  
                              Modelo: Adventurer, AR1530  
                              Máxima capacidad: 150g  
                              Mínimo valor de medición: 0.001g  
                              Voltaje: 8-14.5v  
                              Potencia: 6w



### 3.1.3.3 Material de escritorio

- Papelería y útiles de oficina
- Computadora
- Impresora
- Escaner
- Softwares: Microsoft Word, Microsoft Excel, aplicación para el estudio de fases y manejo de la información experimental en el laboratorio de Fisicoquímica 2, desarrollada en la tesis "***Diseño y elaboración de una aplicación computacional para el estudio del equilibrio de fases y manejo de la información experimental en el Laboratorio de Fisicoquímica 2***" (Ref. 5 )
- CD's
- Dispositivo de almacenamiento masivo USB

## 3.2 Metodología experimental

Se prepararon soluciones de aceite de Cardamomo-Benceno y de aceite de Cardamomo-(IPA-agua)<sub>50%</sub> a diferentes porcentajes en volumen. Dichas soluciones fueron sometidas a análisis de índices de refracción, densidad y distribución de soluto en los solventes en equilibrio.

Con los datos obtenidos se construyó la curva del sistema ternario Aceite Esencial de Cardamomo-(IPA-agua)<sub>50%</sub>-hexano y se determinó la relación entre densidad, índice de refracción y concentración.

### 3.2.1 Procedimiento experimental

A una temperatura constante de  $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

- Se prepararon soluciones de aceite de Cardamomo en (IPA-agua)<sub>50%</sub> en proporciones de 1, 2, 5 y 8% en volumen.
- Se tomaron tres alícuotas de cada solución y se les midió el índice de refracción.
- Se tomaron tres alícuotas de cada solución y se les midió la densidad por medio de un picnómetro.
- Se tomaron tres alícuotas de 5ml de cada solución y se les agregó Benceno lentamente, manteniendo temperatura y agitación constantes, para completar el sistema ternario, hasta que se dio la formación de dos fases, se anotó el volumen requerido.
- Se construyó el domo de solubilidad para los datos obtenidos en los pasos anteriores.
- Se escogieron 5 puntos al azar por debajo del domo de solubilidad y se prepararon las soluciones con las concentraciones respectivas.
- Se agitaron las mezclas preparadas en el paso anterior durante 25 minutos.
- Se dejaron reposar las mezclas durante 30 minutos.
- Se separaron las dos fases formadas y a cada fase se le midió el índice de refracción.

Los pasos anteriores fueron repetidos para una temperatura de  $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

A una temperatura constante de  $25 \pm 5^\circ\text{C}$ .

- Se prepararon soluciones de aceite de Cardamomo en Benceno en proporciones de 5, 10, 20, 40, 80, 90 y 95% en volumen.
- Se tomaron tres alícuotas de cada solución y se les midió el índice de refracción.
- Se tomaron tres alícuotas de cada solución y se les midió la densidad por medio de un picnómetro.
- Se tomaron tres alícuotas de 5ml de cada solución y se agregó la (IPA-agua)<sub>50%</sub> lentamente, manteniendo temperatura y agitación constantes, para completar el sistema ternario, hasta que se dió la formación de dos fases, se anotó el volumen requerido.
- Se construyó el domo de solubilidad para los datos obtenidos en los pasos anteriores.
- Se escogieron 5 puntos al azar por debajo del domo de solubilidad y se prepararon las soluciones con las concentraciones respectivas.
- Se agitaron las mezclas preparadas en el paso anterior durante 25 minutos.
- Se dejaron reposar las mezclas durante 30 minutos.
- Se separaron las dos fases formadas y a cada fase se le midió el índice de refracción.

Los pasos anteriores fueron repetidos para una temperatura constante de  $10 \pm 5^\circ\text{C}$ .

## **3.2.2 Método para la elaboración de la curva de solubilidad**

### **3.2.2.1 Determinación de densidad**

Aplicando el método de picnometría según la norma ASTM D-45

### **3.2.2.2 Determinación del índice de refracción**

Por medio del uso de un refractómetro Abbe, modelo 32200, cuyas especificaciones se encuentran en la sección de equipo a utilizar.

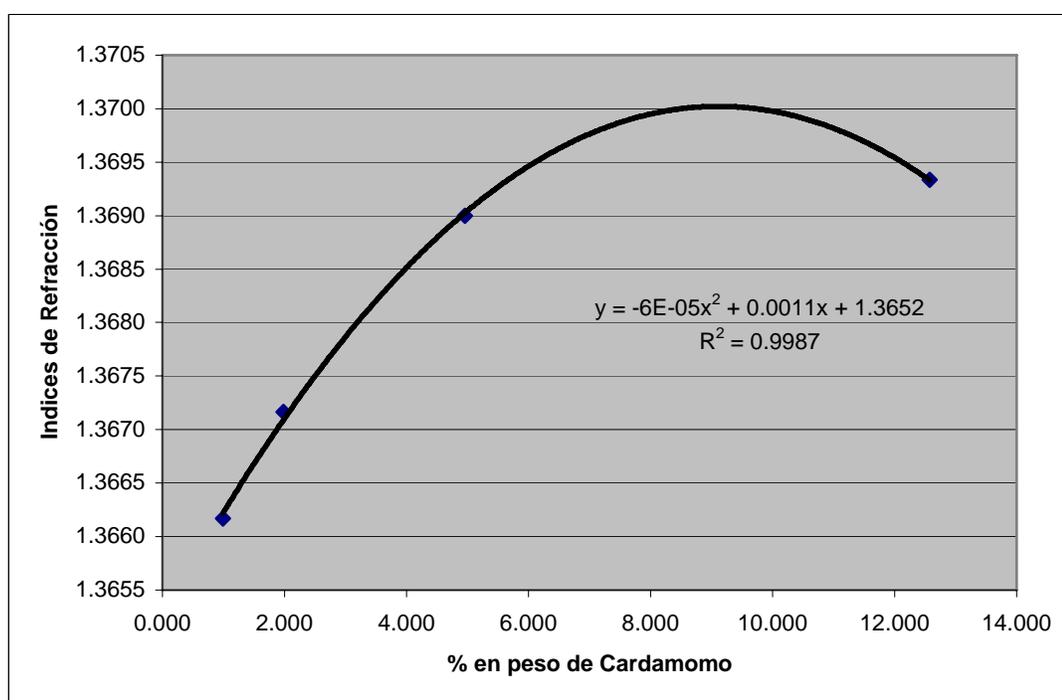
### **3.2.2.3 Análisis cromatográfico**

Una muestra del Aceite Esencial de Cardamomo fue enviada al Laboratorio de Toxicología del Centro de Información y Asesoría Toxicológica -CIAT-, de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala para su análisis y caracterización por medio de un cromatógrafo de gases acoplado a masas.

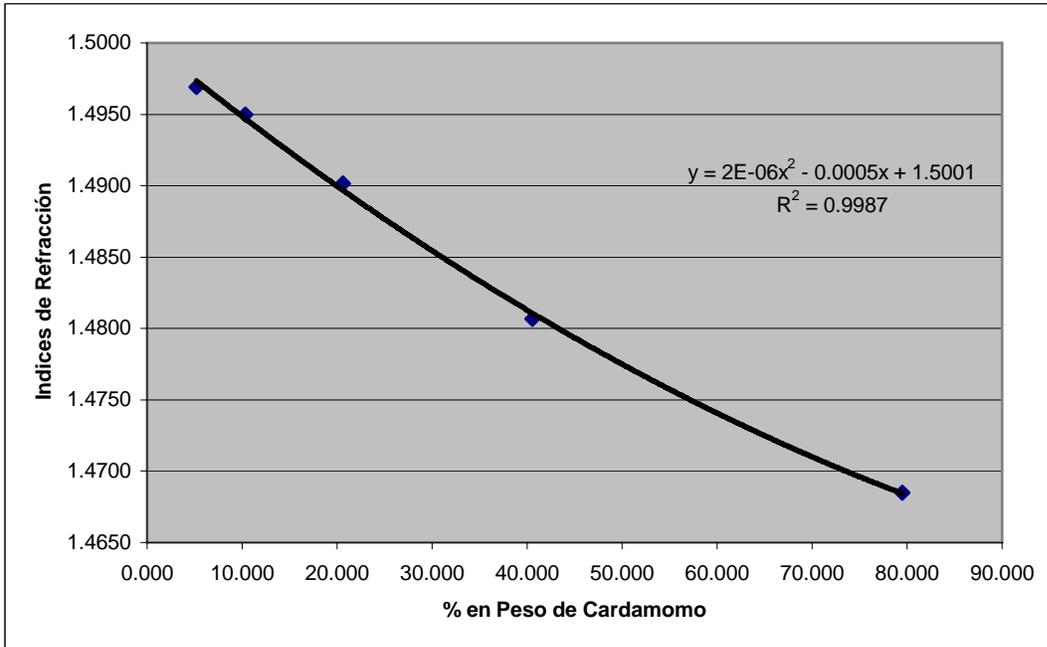


## 4. RESULTADOS

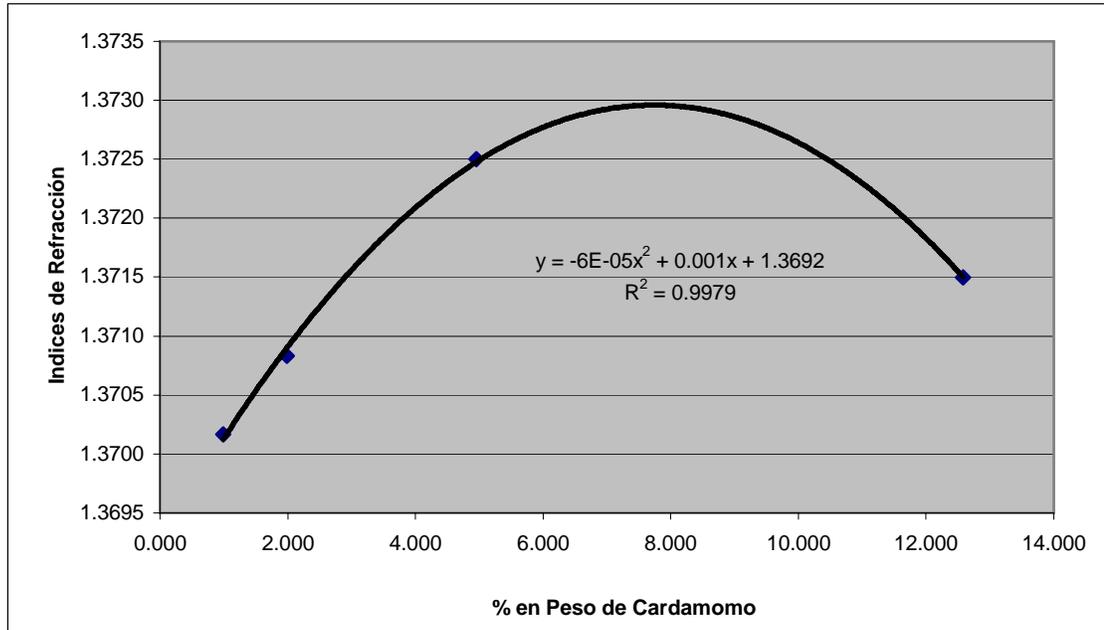
Figura 8. Curva de calibración para las soluciones de A. E. de Cardamomo- (IPA-Agua)<sub>50%</sub> a 25 ± 5°C



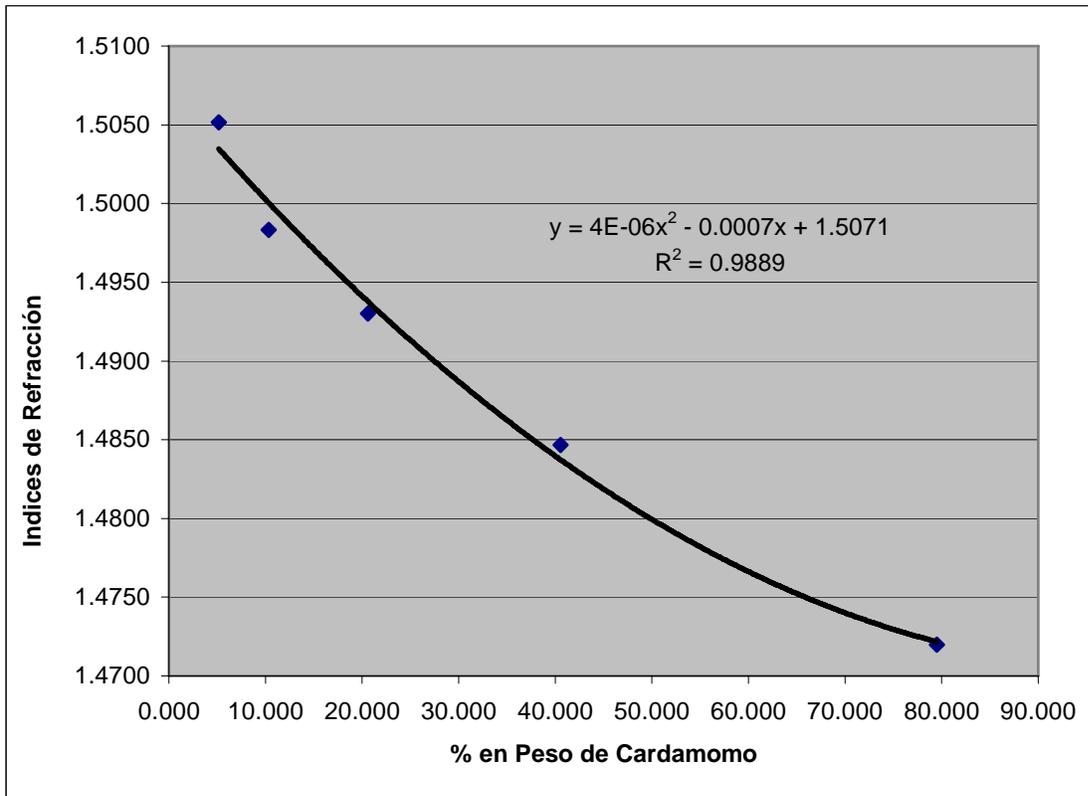
**Figura 9. Curva de calibración para las soluciones de A. E. de Cardamomo-Benceno a  $25 \pm 5^\circ\text{C}$**



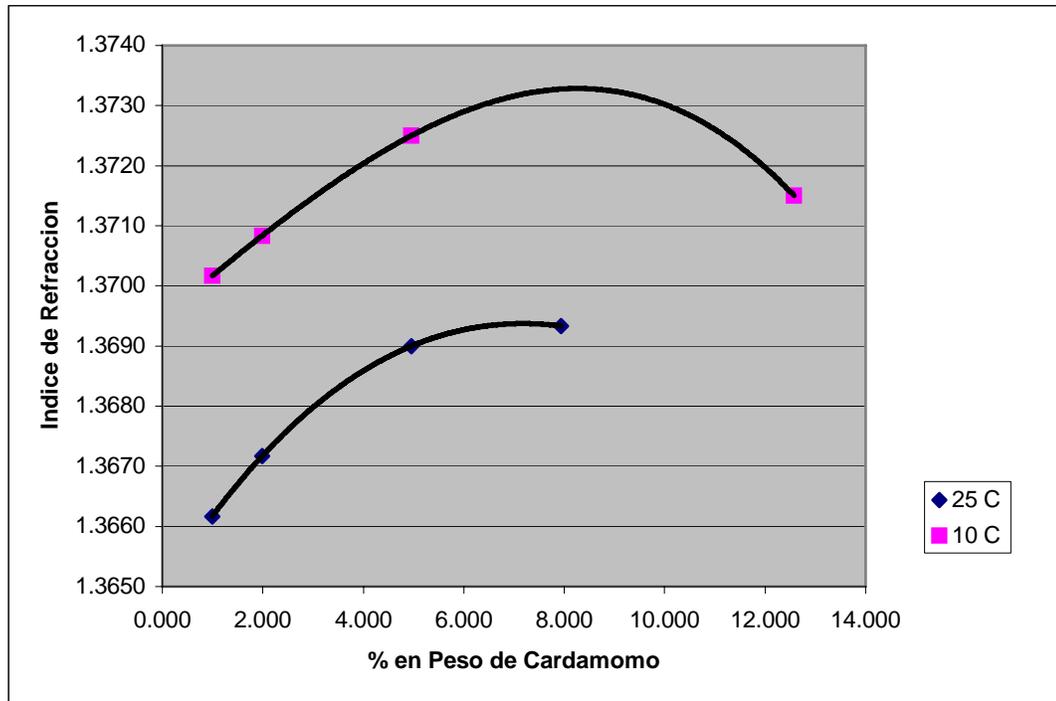
**Figura 10. Curva de calibración para las soluciones de A. E. de Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub> a 10 ± 5°C**



**Figura 11. Curva de calibración para las soluciones de A. E. de Cardamomo-Benceno a  $10 \pm 5^\circ\text{C}$**



**Figura 12. Comparación de las curvas de calibración para las soluciones de A. E. de Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub> a las dos temperaturas trabajadas**



**Figura 13. Comparación de las curvas de calibración para las soluciones de A. E. de Cardamomo-Benceno a las dos temperaturas trabajadas**

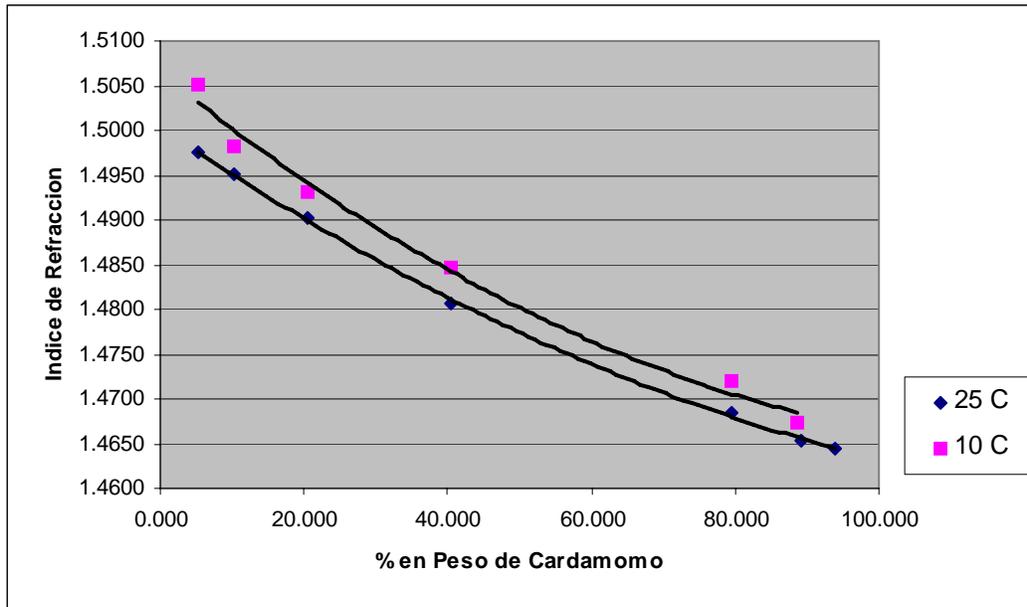


Figura 14. Diagrama ternario del sistema A. E. de Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub>-Benceno a 25 ± 5°C

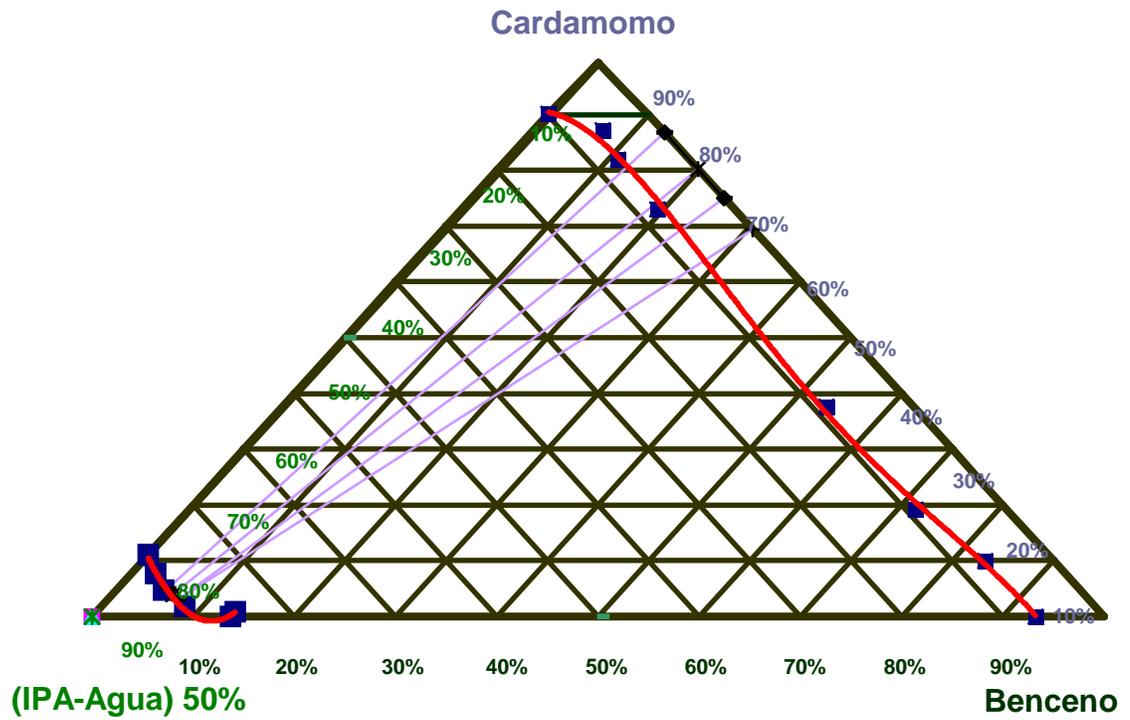
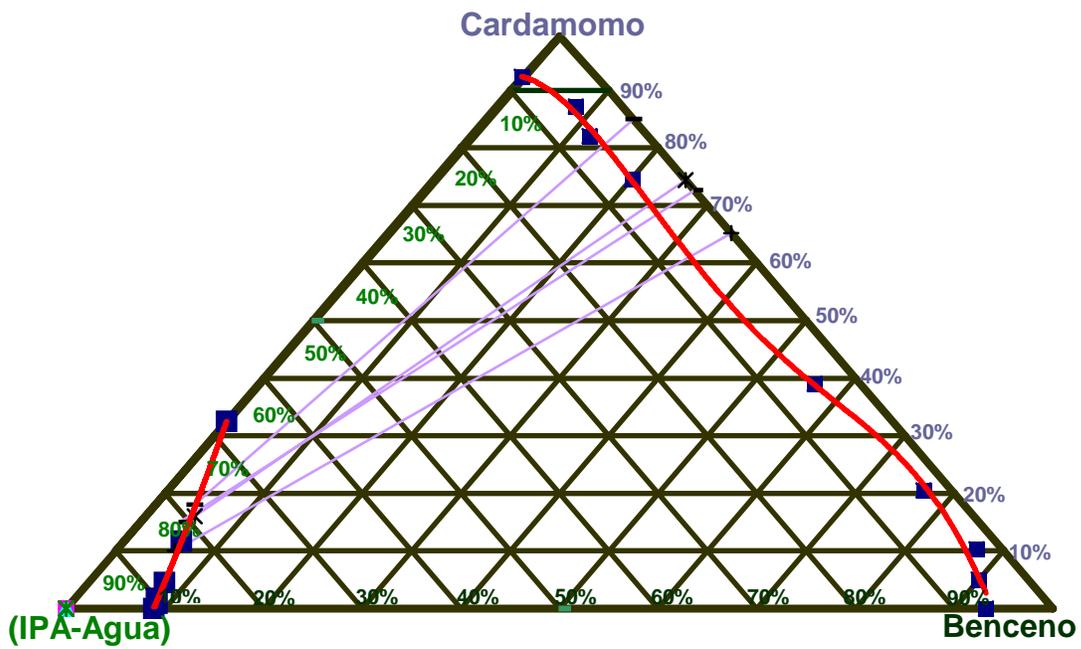


Figura 15. Diagrama ternario del sistema A. E. de Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub>-Benceno a 10 ± 5°C



**Tabla II. Coeficientes de distribución (K), obtenidos a partir de los porcentajes de A. E de Cardamomo en el extracto y el refinado de las mezclas ternarias, a las dos temperaturas trabajadas**

Muestra	Porcentajes en peso de soluto y solventes en las mezclas			Coeficiente de distribución K (adimensional)	
	Cardamomo	(IPA-Agua) <sub>50%</sub>	Benceno	20 ± 5°C	10 ± 5°C
1	10.00	40.00	50.00	2.59	2.80
2	20.00	30.00	50.00	2.15	2.38
3	30.00	30.00	40.00	2.69	3.05
4	40.00	20.00	40.00	2.24	2.54
5	50.00	20.00	30.00	2.65	3.34



## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El presente trabajo evaluó experimentalmente el comportamiento de la curva de solubilidades al equilibrio para un sistema compuesto por Aceite Esencial de Cardamomo, una mezcla de Isopropanol-Agua al 50% en volumen, y Benceno.

El sistema fue trabajado a dos temperaturas diferentes, ( $25 \pm 5^\circ\text{C}$  y  $10 \pm 5^\circ\text{C}$ ), tanto el Aceite Esencial de Cardamomo como el Benceno y el Isopropanol son altamente volátiles, por lo que trabajarlos a temperaturas superiores a los  $25^\circ\text{C}$  habría presentado dificultades para el mantenimiento de las composiciones de las soluciones.

El aceite de Cardamomo no es soluble sensiblemente en agua, en contraste con el Isopropanol puro, que es miscible completamente en el Benceno.

Se seleccionó una mezcla de Isopropanol agua al 50% en volumen con el fin de obtener mayor solubilidad parcial del aceite de Cardamomo (soluto) en el solvente primario (mezcla IPA-Agua<sub>50%</sub>), lográndose hasta un 8% en volumen de Aceite Esencial de Cardamomo en la mezcla binaria; así como una menor afinidad entre el solvente primario y el solvente extractor (Benceno).

Entre mayor sea la distribución de Benceno e Isopropanol entre las fases, más complicada será la determinación de los valores reales de composición de extracto y refinado.

El 50% en volumen fue seleccionado debido a que con un 25% de Isopropanol en el agua la solubilidad del Cardamomo es muy baja (aproximadamente de un 4% en volumen de aceite esencial), mientras que con un 75% de Isopropanol en el agua, junto con el incremento de solubilidad del Aceite Esencial de Cardamomo, se tiene una mayor distribución de Benceno e Isopropanol en las fases ligera y pesada, al momento de darse el equilibrio ternario.

Dado que el sistema nunca había sido probado antes, se seleccionó una composición que permitiera trabajarlo con facilidad, para caracterizar su comportamiento, haciéndose la recomendación de llevar a cabo investigaciones para establecer las diferencias en el sistema al variar la composición de la mezcla IPA-Agua. Se sugieren mezclas al 25 y 75% de Isopropanol en agua.

Para determinar las concentraciones de Aceite Esencial de Cardamomo dentro de las fases de extracto y refinado de las mezclas ternarias fabricadas, se utilizó el método de refractometría, en conjunto con el método de picnometría.

Se construyeron curvas de calibración para las mezclas binarias de Aceite Esencial de Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub> y Aceite Esencial de Cardamomo-Benceno, tomando como variable independiente la concentración del aceite en la mezcla, en porcentaje en peso, y como variable dependiente el índice de refracción, tal como se muestra en las *figuras 8 a 11*.

La *figura 8* representa el comportamiento de la mezcla Aceite Esencial de Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub> a  $25 \pm 5^\circ\text{C}$ . En ella puede observarse una tendencia que puede ser descrita con un polinomio de segundo orden con una correlación de 0.9987. De acuerdo con esta gráfica, el índice de refracción se incrementa al incrementarse la concentración de Aceite Esencial de Cardamomo. El índice de refracción de la mezcla (IPA-Agua)<sub>50%</sub> es de 1.3535. El índice de refracción del Aceite Esencial de Cardamomo como sustancia pura es de 1.4632. Mientras más contenido de aceite posea la mezcla, más similar será su índice de refracción al del aceite de Cardamomo puro.

En la *figura 10*, que representa el comportamiento de la mezcla Aceite Esencial de Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub> a  $10 \pm 5^\circ\text{C}$ , el polinomio que describe su comportamiento es también de orden dos y posee un coeficiente de correlación de 0.9979. En ella puede observarse que con el descenso de la temperatura se incrementa el índice de refracción. El incremento en el índice de refracción se debe a la disminución de la velocidad de la luz en la mezcla, producida por un aumento en el nivel de ordenamiento de las partículas que la componen.

La *figura 9* representa el comportamiento de la mezcla Aceite Esencial de Cardamomo-Benceno a  $25 \pm 5^\circ\text{C}$ . Un polinomio de segundo orden describe el comportamiento de esta gráfica con una correlación de 0.9987.

De acuerdo con ella el índice de refracción disminuye al incrementarse la concentración de aceite esencial en las mezclas. En este caso es el solvente (Benceno) el que presenta el índice de refracción más alto, siendo este de 1.5011. Por tanto, mientras más contenido de aceite exista en las muestras, más bajo será el índice de refracción.

En la *figura 11*, que representa el comportamiento de la mezcla esencial de Cardamomo-Benceno a  $10 \pm 5^\circ\text{C}$  el polinomio que describe su comportamiento es también de orden dos y posee un coeficiente de correlación de 0.9979. En ella puede verse que con el descenso de la temperatura disminuye el índice de refracción. El mismo comportamiento se observa con las sustancias puras.

La *figura 12* muestra tanto las curvas de calibración para la mezcla A. E. Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub> a  $25 \pm 5^\circ\text{C}$  como a  $10 \pm 5^\circ\text{C}$  en el mismo gráfico. Puede observarse que el comportamiento es muy similar entre ambas curvas y que sólo se encuentran desplazadas una con respecto de la otra debido al efecto de la temperatura. El mismo comportamiento se observa en la *figura 13*, donde se muestran las curvas de calibración para la mezcla A. E. Cardamomo-Benceno a  $25 \pm 5^\circ\text{C}$  y a  $10 \pm 5^\circ\text{C}$ .

En ambas curvas puede verse que con el descenso de la temperatura los índices de refracción aumentan y por tanto la curva se desplaza hacia arriba. Es muy probable que haciendo pruebas a diferentes temperaturas se obtenga una familia de curvas similares que describan el comportamiento de dichas muestras binarias. Por encima de la curva de  $25^\circ\text{C}$  cuando las temperaturas sean más bajas y por debajo de la curva de  $25^\circ\text{C}$  cuando las temperaturas trabajadas sean más altas.

Como resultado principal, y partiendo de las curvas de calibración, se obtuvo un diagrama ternario para el sistema a cada una de las temperaturas trabajadas. El sistema obtenido, en ambos casos, es de **Tipo II**, es decir, un sistema en el que el soluto es solo parcialmente miscible en uno de los solventes, en este caso en la mezcla (IPA-Agua)<sub>50%</sub>.

Como puede verse en la *figura 14*, que representa la curva del sistema en un rango de temperaturas de  $25 \pm 5^\circ\text{C}$ , el sistema se corta cuando toca el eje correspondiente a la composición cero del Benceno. Dado que el Cardamomo es sólo parcialmente miscible en la mezcla (IPA-Agua)<sub>50%</sub>, los puntos en los que la curva se corta pertenecen a las dos composiciones en las cuales la mezcla binaria (mezcla libre de Benceno) deja de ser soluble y se separa en dos fases, una con alto contenido en Cardamomo y la otra con bajo contenido en Cardamomo. Estos puntos se encuentran a un 13.7% en volumen de Cardamomo en la parte inferior del diagrama, y 93.25% en peso de Cardamomo en la parte superior.

Puede observarse en la *figura 15* que estos puntos se modifican al bajar la temperatura del sistema, siendo 32.5% en la parte inferior del diagrama y 92.3% en la parte superior. Esta diferencia se presenta debido a que al incrementarse la temperatura se incrementa la solubilidad del Cardamomo en la mezcla (IPA-Agua)<sub>50%</sub>.

Tanto en la *figura 14* como en la *figura 15* puede verse que la curva de solubilidad se encuentra muy cercana al eje (composición de 0% en (IPA-Agua)<sub>50%</sub>). Por tanto, las composiciones de extracto y refinado para este sistema son muy reducidas en (IPA-Agua)<sub>50%</sub>, y Benceno respectivamente.

Una de las características de los sistemas ternarios de Tipo II es que no presentan punto de pliegue dentro del diagrama. Este comportamiento puede apreciarse en ambos diagramas ternarios. Sin embargo, con el incremento de la temperatura las solubilidades aumentan y la curva puede tender a un diagrama de Tipo I, es posible que de poder trabajarse el sistema a temperaturas mucho más altas se obtenga un diagrama de Tipo I.

Otra característica de los diagramas de tipo II es que a determinadas temperaturas (generalmente a temperaturas muy bajas), el domo de inmiscibilidad puede presentar un estrechamiento en uno o ambos lados, como se observa en la *figura 6b*, este estrechamiento puede pronunciarse hasta el punto en el que el domo se rompe y se transforma en dos domos de solubilidad más pequeños, con un punto crítico (punto en el cual se separó el domo completamente) y dos puntos de pliegue (uno para cada domo resultante) como se observa en la *figura 6a*.

Puede apreciarse en ambas figuras que existe cierta irregularidad (estrechamiento hacia el centro del diagrama) en la curva que representa las soluciones compuestas principalmente por Aceite Esencial de Cardamomo y Benceno , y que esta irregularidad se acentúa al reducirse la temperatura. Este estrechamiento puede ser el inicio de la separación del domo en dos domos más pequeños, como se describió con anterioridad. Es probable que al trabajar la mezcla a temperaturas cercanas a cero se obtenga un diagrama en el cual este estrechamiento se aprecie con mucha mayor claridad, pudiendo incluso encontrarse cerca del punto de separación del domo.

Para ambos diagramas se trazaron las líneas de unión, que representan la tendencia de separación de las mezclas ternarias por debajo del domo de solubilidad. Dada la orientación de dichas líneas de unión, puede decirse que la última línea de unión trazable coincide con el eje de concentración cero del Benceno. Probablemente la línea de unión en el otro extremo de la curva de solubilidad coincidiría con el eje de concentración cero del aceite de Cardamomo. Esto no asegura que la tendencia se mantenga dentro de todo el domo de solubilidad, en parte debido al inicio del estrechamiento del domo en un punto, que puede cambiar drásticamente la orientación de las líneas de unión, especialmente si las temperaturas se modifican.

Como parte de los objetivos planteados se determinaron los Coeficientes de Distribución, a partir de las composiciones de las fases de extracto y refinado.

En la *tabla II* se muestran los coeficientes de distribución para el sistema a las temperatura trabajadas. Puede observarse que aunque los coeficientes no son iguales, sí son muy parecidos entre si a temperatura constante. Presentan una media de 2.46 para el sistema a  $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , con una desviación estándar de 0.25; y una media de 2.82 para el sistema a  $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , con una desviación estándar de 0.39.

La diferencia entre los coeficientes de distribución de las muestras tomadas a la misma temperatura se debe a que aunque la fase de extracto posee un alto contenido en Benceno y Cardamomo, contiene cierto porcentaje de (IPA-Agua)<sub>50%</sub>, y la fase con alto contenido en (IPA-Agua)<sub>50%</sub>, y Cardamomo contiene a su vez, una fracción de Benceno, ya que es imposible obtener como extracto y refinado mezclas binarias puras, aunque, como puede apreciarse en el diagrama, los porcentajes del segundo solvente en ambas fases son relativamente bajos.

Los datos aquí presentados se aproximan bastante al comportamiento real del sistema, sin embargo, presentan cierto grado de desviación. Estas desviaciones son producidas por varios factores:

El primero de ellos tiene que ver con las curvas de calibración. Las concentraciones de extracto y refinado con las cuales se calcularon los coeficientes de distribución fueron obtenidas a partir de curvas de calibración hechas con soluciones binarias, sin embargo se sabe que las fases de extracto y refinado siempre contiene a los tres componentes.

Para el caso específico del sistema trabajado, la fracción del tercer componente (el solvente de menor concentración en la referida) es relativamente pequeña, en comparación con las cantidades de los otros dos componentes en la fase, pues nunca supera el 10% en peso, de acuerdo con los diagramas ternarios. Esto introduce alrededor de un 1% de error en los datos de composiciones al equilibrio.

Otras fuentes de desviación tienen que ver con las incertezas de los instrumentos (presentadas en las tablas de la sección de datos originales) y con las desviaciones estándar que los datos (tomados por triplicado) presentan. Al calcular el porcentaje de error a partir del error de arrastre (como se muestra en el apéndice 4, Análisis de Error) se obtuvo un error máximo de 1.41% en los datos de composiciones en peso con los cuales se construyó la curva de solubilidad.

Como parte del análisis de los datos experimentales se emplearon las pruebas t de Student y Q de Dixon para descartar algunos datos que introducían demasiadas desviaciones en los resultados.

Dado que los porcentajes de error que los datos presentan son muy pequeños puede decirse que no introducen diferencias significativas en el comportamiento de la curva de solubilidades para el equilibrio ternario del sistema trabajado.

## CONCLUSIONES

1. Los índices de refracción varían en proporción directa con las concentraciones de Aceite Esencial de Cardamomo para el sistema binario A. E. Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub>.
2. Los índices de refracción varían en proporción inversa con las concentraciones de Aceite Esencial de Cardamomo para el sistema binario A. E. Cardamomo-Benceno.
3. Los índices de refracción de las mezclas varían en proporción inversa con respecto a la temperatura.
4. Existe una mayor afinidad entre el Benceno y el aceite de Cardamomo que entre la mezcla (IPA-Agua)<sub>50%</sub>-A. E. Cardamomo, para el sistema A. E. Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub>-Benceno.
5. El diagrama ternario que representa el sistema A. E. Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub>-Benceno es de Tipo II.
6. Los coeficientes de distribución del sistema A. E. Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub>-Benceno varían en proporción inversa con respecto a la temperatura.

7. El extracto, en general, es una mezcla con un contenido muy alto de Aceite Esencial de Cardamomo.
8. El refinado, en general, es una mezcla con un contenido muy bajo de A. E. Cardamomo.
9. Los resultados obtenidos representan con bastante exactitud el comportamiento real del sistema. Presentando un máximo de 2% de error.
10. No es posible trabajar el sistema a temperaturas por debajo de los 11°C cuando se requiere el uso del Refractómetro, debido a que la condensación que se produce sobre el instrumento hace muy difícil la lectura del índice de refracción. A menos que se trabaje bajo condiciones especiales de temperatura controlada dentro del lugar de trabajo.
11. No es posible trabajar el sistema a temperaturas elevadas debido a la alta volatilidad de los componentes.

## RECOMENDACIONES

1. Realizar pruebas para establecer las variaciones en el comportamiento del sistema compuesto por Aceite Esencial de Cardamomo-Isopropanol-agua-Benceno, con modificaciones en la composición de la mezcla IPA-Agua. Se sugieren composiciones de 25 y 75% en volumen.
2. Investigar el equilibrio ternario de la mezcla Alcohol Isopropílico-agua y Benceno.
3. Realizar pruebas para establecer la familia de curvas de las mezclas binarias Aceite Esencial de Cardamomo- (IPA-Agua)<sub>50%</sub> y Aceite Esencial de Cardamomo-Benceno a diferentes temperaturas.



## BIBLIOGRAFÍA

- 1 Alan S. Wingrove y Robert L Caret. **Química Orgánica**. Primera edición en español. Editorial OXFORD University Press. México 1999.
- 3 Amado Rodas, Marisol, y García Guerra, César Alfonso. Evaluación de un método experimental de generación de datos a nivel de laboratorio para el estudio del sistema ternario aceite esencial de terpenos del fruto de naranja (Limoneno)-etanol-hexano en equilibrio líquido a dos temperaturas y 640mm Hg. Trabajo de Protocolo Ing. Química. Guatemala, USAC, Facultad de Ingeniería, 2005.
- 4 Cáceres, Armando. **Plantas de Uso Medicinal en Guatemala**. Editorial Universitaria, Universidad de San Carlos de Guatemala. Primera edición. Guatemala 1996.
- 5 Dominguez Hernández, Daniel Enrique y Tay Oroxom, José Manuel. Diseño y elaboración de una aplicación computacional para el estudio del equilibrio de fases y manejo de la información experimental en el laboratorio de fisicoquímica 2. Tesis Ing. Química, Guatemala, USAC, Facultad de Ingeniería, 2006. Aplicación computacional.
- 6 Keith J. Laidler y John H. Meiser. **Fisicoquímica**. Tercera reimpresión de la primera edición de 1997. Editorial CECSA. México 2002.

- 7 López Velásquez, Olinda Margarita y García Guerra, César Alfonso. Evaluación de un método experimental de generación de datos para el estudio del sistema ternario etanol-hexano-agua a dos temperaturas diferentes. Tesis Ing. Química, Guatemala, USAC, Facultad de Ingeniería, 2003, Pág.: 1-20.
- 8 McCabe / Smith **Operaciones Básicas de Ingeniería Química** Volumen II. Editorial Reverté, S. A. Barcelona España 1980.
- 9 Merck. **Merck Index**. Editorial Merck KgaA, Darmstadt 1999-2000.
- 10 Pajarito Ángel, Marco Vinicio y García Guerra, César Alfonso. Evaluación de un método experimental de generación de datos para el estudio del sistema ternario Isopropanol-hexano-agua en equilibrio líquido de inmiscibilidad, a tres temperaturas y a 640 mm de Hg. Tesis Ing. Química. Guatemala, USAC, Facultad de Ingeniería, 2003, Pág.: 1-11.
- 11 Prado Córdova, Ramiro Antonio y García Guerra, César Alfonso. Evaluación del efecto de la concentración de cloruro de sodio en el sistema cuaternario agua-glicerol-1-1butanol-cloruro de sodio sobre la distribución de equilibrio del glicerol para determinar la factibilidad de un proceso alternativo de recuperación de glicerina en una planta de saponificación. Tesis Ing. Química. Guatemala, USAC, Facultad de Ingeniería, 2003.
- 12 Robert E. Treybal. **Operaciones de Transferencia de Masa**. Segunda edición. Editorial McGraw-Hill. México 1983.

- 13 Robert H. Perry / Cecil H. Chilton. **Manual del Ingeniero Químico**. Quinta edición (segunda en español). Editorial McGraw-Hill. México 1982.

### Referencias Electrónicas

- 14 Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo. **Fichas Internacionales de Seguridad Química**. 12 de mayo de 2006  
<http://www.mtas.es/insht/ipcsnspn/nspn0279.htm>
- 15 Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo. **Fichas Internacionales de Seguridad Química**. 12 de mayo de 2006  
<http://www.mtas.es/insht/ipcsnspn/nspn0554.htm>
- 16 **Aceites Esenciales**. 13 de mayo de 2006  
<http://www.semarnat.gob.mx/pfnm/AceitesEsenciales.html>
- 17 Universidad Gabriela Mistral. Ingeniería Civil Industrial. **Aceites Esenciales**. 13 de mayo de 2006  
<http://html.rincondelvago.com/aceites-esenciales.html>
- 18 **Aceites Esenciales**. 13 de mayo de 2006  
[http://www.geocities.com/aceites\\_esenciales/](http://www.geocities.com/aceites_esenciales/)
- 19 **Aceites Esenciales**. 13 de mayo de 2006  
[http://www.apaesa.com/?page=productos\\_03&lang=ES](http://www.apaesa.com/?page=productos_03&lang=ES)



## APÉNDICE 1

### DATOS ORIGINALES

**Tabla III. Peso del picnómetro y la solución, para las soluciones de A. E. de Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub> a 25 ± 5°C**

%Volumen de Cardamomo-(IPA-Agua) <sub>50%</sub>	Peso del picnómetro en g			
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	$\bar{X} \pm$
1	38.252	38.252	38.250	0.0005
2	38.245	38.243	38.244	0.0005
5	38.243	38.242	38.243	0.0005
8	38.238	38.238	38.237	0.0005

**Tabla IV. Peso del picnómetro y la solución, para las soluciones de A. E. de Cardamomo-Benceno a 25 ± 5°C.**

% Volumen de Cardamomo-Benceno	Peso del picnómetro en g			
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	$\bar{X} \pm$
5	37.866	37.868	37.872	0.0005
10	37.897	37.896	37.886	0.0005
20	37.931	37.927	37.923	0.0005
40	38.046	38.041	38.043	0.0005
80	38.226	38.227	38.216	0.0005
90	38.262	38.259	38.261	0.0005
95	38.278	38.279	38.279	0.0005

**Tabla V. Peso del picnómetro y la solución, para las soluciones de A. E. de Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub> a  $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$**

% en Volumen de Cardamomo-(IPA-Agua) <sub>50%</sub>	Peso del picnómetro en g			
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	$\bar{X} \pm$
1	38.329	38.311	38.319	0.0005
2	38.315	38.307	38.298	0.0005
5	38.311	38.304	38.300	0.0005
8	38.300	38.297	38.295	0.0005

**Tabla VI. Peso del picnómetro y la solución, para las soluciones de A. E. de Cardamomo-Benceno a  $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$**

% en Volumen de Cardamomo-Benceno	Peso del picnómetro en g			
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	$\bar{X} \pm$
5	37.917	37.904	37.903	0.0005
10	37.921	37.927	37.929	0.0005
20	37.961	37.955	37.953	0.0005
40	38.083	38.075	38.078	0.0005
80	38.252	38.248	38.257	0.0005
90	38.312	38.313	38.310	0.0005
95	38.336	38.335	38.335	0.0005

**Tabla VII. Índices de refracción para las soluciones de A. E. de Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub> a 25 ± 5°C**

% en Volumen de Cardamomo-(IPA-Agua) <sub>50%</sub>	Índice de Refracción			
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	$\bar{X} \pm$
1	1.3665	1.3665	1.3655	0.00005
2	1.3670	1.3675	1.3670	0.00005
5	1.3685	1.3690	1.3695	0.00005
8	1.3690	1.3695	1.3695	0.00005

**Tabla VIII. Índices de refracción para las soluciones de A. E. de Cardamomo-Benceno a 25 ± 5°C**

% en Volumen de Cardamomo-Benceno	Índice de Refracción			
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	$\bar{X} \pm$
5	1.4975	1.4975	1.4975	0.00005
10	1.4950	1.4950	1.4950	0.00005
20	1.4895	1.4905	1.4905	0.00005
40	1.4805	1.4805	1.4810	0.00005
80	1.4685	1.4685	1.4685	0.00005
90	1.4653	1.4653	1.4653	0.00005
95	1.4645	1.4645	1.4645	0.00005

**Tabla IX. Índices de refracción para las soluciones de A. E. de Cardamomo-  
(IPA-Agua)<sub>50%</sub> a 10 ± 5°C**

% en Volumen de Cardamomo- (IPA-Agua) <sub>50%</sub>	Índice de Refracción			
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	$\bar{X} \pm$
1	1.3705	1.3700	1.3700	0.00005
2	1.3710	1.3705	1.3710	0.00005
5	1.3725	1.3725	1.3725	0.00005
8	1.3715	1.3715	1.3715	0.00005

**Tabla X. Índices de refracción para las soluciones de A. E. de Cardamomo-  
Benceno a 10 ± 5°C**

% en Volumen de Cardamomo- Benceno	Índice de Refracción			
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	$\bar{X} \pm$
5	1.5050	1.5050	1.5055	0.00005
10	1.4980	1.4985	1.4985	0.00005
20	1.4930	1.4925	1.4935	0.00005
40	1.4845	1.4845	1.4850	0.00005
80	1.4720	1.4715	1.4725	0.00005
90	1.4673	1.4673	1.4673	0.00005
95	1.4610	1.4610	1.4610	0.00005

**Tabla XI. Volumen de Benceno adicionado para titular alícuotas de 5ml de las soluciones de A. E. de Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub> a 25 ± 5°C**

% en Volumen de Cardamomo-(IPA-Agua) <sub>50%</sub>	Volumen de Benceno adicionado (ml)			
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	$\bar{X} \pm$
1	0.85	0.80	0.90	0.005
2	0.55	0.50	0.40	0.005
5	0.20	0.25	0.35	0.005
8	0.15	0.15	0.10	0.005

**Tabla XII. Volumen de la solución (IPA-Agua)<sub>50%</sub> adicionada para titular alícuotas de 5ml de las soluciones de A. E. de Cardamomo-Benceno a 25 ± 5°C**

% en Volumen de Cardamomo-Benceno	Volumen de (IPA-Agua) <sub>50%</sub> adicionado (ml)			
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	$\bar{X} \pm$
5	0.05	0.10	0.20	0.005
10	0.40	0.45	0.25	0.005
20	0.55	0.50	0.45	0.005
40	0.50	0.45	0.50	0.005
80	0.45	0.40	0.45	0.005
90	0.35	0.45	0.40	0.005
95	0.30	0.25	0.45	0.005

**Tabla XII. Volumen de Benceno adicionado para titular alícuotas de 5ml de las soluciones de A. E. de Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub> a 10 ± 5°C**

% en Volumen de Cardamomo-(IPA-Agua) <sub>50%</sub>	Volumen de Benceno adicionado (ml)			
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	$\bar{X} \pm$
1	0.65	0.45	0.45	0.005
2	0.45	0.45	0.55	0.005
5	0.50	0.40	0.45	0.005
8	0.30	0.30	0.40	0.005

**Tabla XIV. Volumen de la solución (IPA-Agua)<sub>50%</sub> adicionada para titular alícuotas de 5ml de las soluciones de A. E. de Cardamomo-Benceno a 10 ± 5°C**

% en Volumen de Cardamomo-Benceno	Volumen de (IPA-Agua) <sub>50%</sub> adicionado (ml)			
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	$\bar{X} \pm$
5	0.35	0.30	0.15	0.005
10	0.10	0.15	0.15	0.005
20	0.15	0.10	0.20	0.005
40	0.25	0.25	0.25	0.005
80	0.35	0.25	0.30	0.005
90	0.30	0.35	0.35	0.005
95	0.25	0.30	0.25	0.005

**Tabla XV. Índices de refracción de la fase pesada de las soluciones construidas a partir de los puntos debajo del domo de solubilidad a  $25 \pm 5^\circ\text{C}$**

Muestra	Porcentajes en peso de soluto y solventes en las mezclas			Índices de refracción de la fase pesada [rica en (IPA-Agua) <sub>50%</sub> ]		
	Cardamomo	(IPA-Agua) <sub>50%</sub>	Benceno	1	2	3
1	10.00	40.00	50.00	1.3510	1.3515	1.3510
2	20.00	30.00	50.00	1.3490	1.3485	1.3485
3	30.00	30.00	40.00	1.3490	1.3480	1.3485
4	40.00	20.00	40.00	1.3460	1.3460	1.3460
5	50.00	20.00	30.00	1.3435	1.3425	1.3425

**Tabla XVI. Índices de refracción de la fase ligera de las soluciones construidas a partir de los puntos debajo del domo de solubilidad a  $10 \pm 5^\circ\text{C}$**

Muestra	Porcentajes en peso de soluto y solventes en las mezclas			Índices de refracción de la fase ligera (rica en Benceno)		
	Cardamomo	(IPA-Agua) <sub>50%</sub>	Benceno	1	2	3
1	10.00	40.00	50.00	1.4680	1.4680	1.4680
2	20.00	30.00	50.00	1.4715	1.4710	1.4710
3	30.00	30.00	40.00	1.4655	1.4665	1.4665
4	40.00	20.00	40.00	1.4695	1.4695	1.4695
5	50.00	20.00	30.00	1.4650	1.4645	1.4645



## APÉNDICE 2

### DATOS CALCULADOS

**Tabla XVII. Pesos de picnómetro, índices de refracción y volúmenes de titulación medios, para las soluciones de A. E. de Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub> a 20 ± 5°C**

%Volumen de Cardamomo en la solución	Peso del picnómetro (ml)		Índice de Refracción (adimensional)		Volumen de Benceno adicionado (ml)	
	Media	Desviación	Media	Desviación	Media	Desviación
1	38.252	0.0012	1.3662	0.0006	0.85	0.05
2	38.244	0.0010	1.3672	0.0003	0.48	0.08
5	38.243	0.0006	1.3690	0.0005	0.27	0.08
8	38.238	0.0006	1.3693	0.0003	0.13	0.03

**Tabla XVIII. Pesos de picnómetro, índices de refracción y volúmenes de titulación medios, para las soluciones de A. E. de Cardamomo-Benceno a 20 ± 5°C**

%Volumen de Cardamomo en la solución	Peso del picnómetro (ml)		Índice de Refracción (adimensional)		Volumen de Benceno adicionado (ml)	
	Media	Desviación	Media	Desviación	Media	Desviación
5	37.869	0.0031	1.4975	0.0000	0.12	0.08
10	37.893	0.0061	1.4950	0.0000	0.37	0.10
20	37.927	0.0040	1.4902	0.0006	0.50	0.05
40	38.043	0.0025	1.4807	0.0003	0.48	0.03
80	38.223	0.0061	1.4685	0.0000	0.43	0.03
90	38.261	0.0015	1.4653	0.0000	0.40	0.05
95	38.279	0.0006	1.4645	0.0000	0.33	0.10

**Tabla XIX. Pesos de picnómetro, índices de refracción y volúmenes de titulación medios, para las soluciones de A. E. de Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub> a 10 ± 5°C**

% Volumen de Cardamomo en la solución	Peso del picnómetro (ml)		Índice de Refracción (adimensional)		Volumen de Benceno adicionado (ml)	
	Media	Desviación	Media	Desviación	Media	Desviación
1	38.320	0.0090	1.3702	0.0003	0.52	0.12
2	38.307	0.0085	1.3708	0.0003	0.48	0.06
5	38.305	0.0056	1.3725	0.0000	0.45	0.05
8	38.297	0.0025	1.3715	0.0000	0.33	0.06

**Tabla XX. Pesos de picnómetro, índices de refracción y volúmenes de titulación medios, para las soluciones de A. E. de Cardamomo-Benceno a 10 ± 5°C**

% Volumen de Cardamomo en la solución	Peso del picnómetro (ml)		Índice de Refracción (adimensional)		Volumen de Benceno adicionado (ml)	
	Media	Desviación	Media	Desviación	Media	Desviación
5	37.908	0.0078	1.5052	0.0003	0.27	0.10
10	37.926	0.0042	1.4983	0.0003	0.13	0.03
20	37.956	0.0042	1.4930	0.0005	0.15	0.05
40	38.079	0.0040	1.4847	0.0003	0.25	0.00
80	38.252	0.0045	1.4720	0.0005	0.30	0.05
90	38.312	0.0015	1.4673	0.0000	0.33	0.03
95	38.335	0.0006	1.4610	0.0000	0.27	0.03

**Tabla XXI. Pesos de las soluciones, porcentaje en peso, densidad de las soluciones de A. E. de Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub> a 20 ± 5°C**

<b>% Volumen de Cardamomo</b>	<b>Peso de la solución (g)</b>	<b>% en Peso de Cardamomo en la solución</b>	<b>Densidad (g/ml)</b>
1	9.052	0.991	0.941
2	9.044	1.983	0.940
5	9.043	4.959	0.940
8	9.038	7.938	0.939

**Tabla XXII. Pesos de las soluciones, porcentaje en peso, densidad de las soluciones de A. E. de Cardamomo-Benceno a 20 ± 5°C**

<b>% Volumen de Cardamomo</b>	<b>Peso de la solución (g)</b>	<b>% en Peso de Cardamomo en la solución</b>	<b>Densidad (g/ml)</b>
5	8.669	5.172	0.901
10	8.693	10.316	0.903
20	8.727	20.552	0.907
40	8.843	40.563	0.919
80	9.023	79.510	0.938
90	9.061	89.077	0.942
95	9.079	93.839	0.944

**Tabla XXIII. Pesos de las soluciones, porcentaje en peso, densidad de las soluciones de A. E. de Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub> a 10 ± 5°C**

<b>% Volumen de Cardamomo</b>	<b>Peso de la solución (g)</b>	<b>% en Peso de Cardamomo en la solución</b>	<b>Densidad (g/ml)</b>
1	9.120	0.991	0.948
2	9.107	1.983	0.946
5	9.105	4.959	0.946
8	9.097	12.577	0.945

**Tabla XXIV. Pesos de las soluciones, porcentaje en peso, densidad de las soluciones de A. E. de Cardamomo-Benceno a 10 ± 5°C**

<b>% Volumen de Cardamomo</b>	<b>Peso de la solución (g)</b>	<b>% en Peso de Cardamomo en la solución</b>	<b>Densidad (g/ml)</b>
5	8.708	5.172	0.905
10	8.726	10.316	0.907
20	8.756	20.630	0.910
40	8.879	40.563	0.923
80	9.052	79.510	0.941
90	9.112	88.578	0.947
95	9.135	93.257	0.949

**Tabla XXV. Composiciones porcentuales de las mezclas ternarias formadas a partir de la mezcla A. E. Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub>, por adición de Benceno, necesarias para construir la curva binodal a 20 ± 5°C**

<b>% Volumen de Cardamomo</b>	<b>Masa total de la mezcla ternaria</b>	<b>%P Cardamomo</b>	<b>%P (IPA-Agua)<sub>50%</sub></b>	<b>%P Benceno</b>
1	5.451	0.85	85.45	13.71
2	5.124	1.80	89.91	8.29
5	4.933	4.68	90.56	4.75
8	4.814	7.68	89.88	2.43

**Tabla XXVI. Composiciones porcentuales de las mezclas ternarias formadas a partir de la mezcla A. E. Cardamomo-Benceno, por adición de (IPA-Agua)<sub>50%</sub>, necesarias para construir la curva binodal a 20 ± 5°C**

<b>% Volumen de Cardamomo</b>	<b>Masa total de la mezcla ternaria</b>	<b>%P Cardamomo</b>	<b>%P Benceno</b>	<b>%P (IPA-Agua)<sub>50%</sub></b>
5	4.609	5.23	92.50	2.27
10	4.845	9.92	83.31	6.77
20	4.982	19.22	71.80	8.98
40	5.028	37.59	53.80	8.60
80	5.077	72.99	19.37	7.64
90	5.066	81.93	11.00	7.07
95	5.016	87.18	6.87	5.95

**Tabla XXVII. Composiciones porcentuales de las mezclas ternarias formadas a partir de la mezcla A. E. Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub>, por adición de Benceno, necesarias para construir la curva binodal a 10 ± 5°C**

<b>% Volumen de Cardamomo</b>	<b>Masa total de la mezcla ternaria</b>	<b>%P Cardamomo</b>	<b>%P (IPA-Agua)<sub>50%</sub></b>	<b>%P Benceno</b>
1	5.193	0.89	90.37	8.75
2	5.157	1.79	89.97	8.24
5	5.127	4.51	87.78	7.72
8	5.020	11.67	82.49	5.84

**Tabla XXVIII. Composiciones porcentuales de las mezclas ternarias formadas a partir de la mezcla A. E. Cardamomo-Benceno, por adición de (IPA-Agua)<sub>50%</sub>, necesarias para construir la curva binodal a 10 ± 5°C**

<b>% Volumen de Cardamomo</b>	<b>Masa total de la mezcla ternaria</b>	<b>%P Cardamomo</b>	<b>%P Benceno</b>	<b>%P (IPA-Agua)<sub>50%</sub></b>
5	4.764	5.06	89.93	5.01
10	4.654	10.33	87.11	2.56
20	4.684	20.52	76.61	2.87
40	4.837	39.07	56.30	4.63
80	4.972	74.51	20.09	5.40
90	5.033	82.01	12.06	5.93
95	4.986	87.16	8.05	4.79

**Tabla XXIX. Composición en peso de los puntos en los que el diagrama ternario toca los ejes, a una temperatura de  $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$**

<b>Punto</b>	<b>%P Cardamomo</b>	<b>%P (IPA-Agua)<sub>50%</sub></b>	<b>%P Benceno</b>
1	13.7	86.3	0
2	0	88.9	11.1
3	0	9.85	90.15
4	93.25	6.75	0

**Tabla XXX. Composición en peso de los puntos en los que el diagrama ternario toca los ejes, a una temperatura de  $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$**

<b>Punto</b>	<b>%P Cardamomo</b>	<b>%P (IPA-Agua)<sub>50%</sub></b>	<b>%P Benceno</b>
1	32.50	67.5	0
2	0	6.8	93.2
3	0	91.1	8.90
4	92.3	7.70	0

**Tabla XXXI. Índices de refracción promedio de las fases pesada (refinado) y ligera (extracto), para los puntos seleccionados por debajo del domo de solubilidad a  $20 \pm 5^\circ\text{C}$**

Muestra	Porcentajes en peso de soluto y solventes en las mezclas			Fase Pesada		Fase Ligera	
	Cardamomo	(IPA-Agua) <sub>50%</sub>	Benceno	Media	Desviación	Media	Desviación
1	10.00	40.00	50.00	1.3512	0.0003	1.4680	0.0000
2	20.00	30.00	50.00	1.3487	0.0003	1.4712	0.0003
3	30.00	30.00	40.00	1.3485	0.0005	1.4662	0.0006
4	40.00	20.00	40.00	1.3460	0.0000	1.4695	0.0000
5	50.00	20.00	30.00	1.3428	0.0006	1.4647	0.0003

**Tabla XXXII. Índices de refracción promedio de las fases pesada (refinado) y ligera (extracto), para los puntos seleccionados por debajo del domo de solubilidad a  $10 \pm 5^\circ\text{C}$**

Muestra	porcentajes en peso de soluto y solventes en las mezclas			Fase Pesada		Fase Ligera	
	Cardamomo	(IPA-Agua) <sub>50%</sub>	Benceno	Media	Desviación	Media	Desviación
1	10.00	40.00	50.00	1.3533	0.0003	1.4738	0.0003
2	20.00	30.00	50.00	1.3515	0.0000	1.4765	0.0005
3	30.00	30.00	40.00	1.3505	0.0000	1.4710	0.0005
4	40.00	20.00	40.00	1.3488	0.0003	1.4743	0.0003
5	50.00	20.00	30.00	1.3483	0.0006	1.4682	0.0019

**Tabla XXXIII. Porcentajes en peso de A. E. de Cardamomo en Extracto y Refinado, de los puntos debajo del domo de solubilidad a  $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$**

Muestra	Porcentajes en peso de soluto y solventes en las mezclas			Extracto	Refinado
	Cardamomo	(IPA-Agua) <sub>50%</sub>	Benceno		
1	10.00	40.00	50.00	80.26	31.04
2	20.00	30.00	50.00	69.44	32.25
3	30.00	30.00	40.00	86.82	32.33
4	40.00	20.00	40.00	75.05	33.47
5	50.00	20.00	30.00	92.36	34.84

**Tabla XXXIV. Porcentajes en peso de A. E. de Cardamomo en Extracto y Refinado, de los puntos debajo del domo de solubilidad a  $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$**

Muestra	Porcentajes en peso de soluto y solventes en las mezclas			Extracto	Refinado
	Cardamomo	(IPA-Agua) <sub>50%</sub>	Benceno		
1	10.00	40.00	50.00	74.42	26.61
2	20.00	30.00	50.00	65.17	27.42
3	30.00	30.00	40.00	84.95	27.86
4	40.00	20.00	40.00	72.64	28.55
5	50.00	20.00	30.00	96.20	28.76

**Tabla XXXV. Porcentajes de error de los datos calculados a una temperatura de  $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , para las mezclas binarias de A. E. Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub>**

% en Volumen	% De Error		
	% Peso	Densidad de la solución binaria	Masa total de la solución ternaria
1	0.64	0.07	0.67
2	0.89	0.07	0.67
5	0.87	0.06	0.66
8	0.37	0.06	0.66

**Tabla XXXVI. Porcentajes de error de los datos calculados a una temperatura de  $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , para las mezclas binarias de A. E. Cardamomo-Benceno**

% en Volumen	% De Error		
	% Peso	Densidad de la solución binaria	Masa total de la solución ternaria
5	0.90	0.09	0.69
10	1.21	0.13	0.73
20	0.63	0.10	0.70
40	0.39	0.09	0.69
80	0.43	0.12	0.72
90	0.59	0.07	0.67
95	1.15	0.06	0.66

**Tabla XXXVII. Porcentajes de error de los datos calculados a una temperatura de  $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , para las mezclas binarias de A. E. Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub>**

% en Volumen	% de Error		
	% Peso	Densidad de la solución binaria	Masa total de la solución ternaria
1	1.41	0.16	0.76
2	0.78	0.15	0.75
5	0.65	0.12	0.72
8	0.69	0.09	0.69

**Tabla XXXVIII. Porcentajes de error de los datos calculados a una temperatura de  $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , para las mezclas binarias de A. E. Cardamomo-Benceno**

% en Volumen	% de Error		
	% Peso	Densidad de la solución binaria	Masa total de la solución ternaria
5	1.24	0.15	0.75
10	0.41	0.11	0.71
20	0.63	0.11	0.71
40	0.10	0.10	0.70
80	0.63	0.11	0.71
90	0.37	0.07	0.67
95	0.36	0.06	0.66

**Tabla XXXIX. Porcentajes de error de las composiciones en peso de la mezcla ternaria, utilizados para construir el diagrama ternario a una temperatura de  $25 \pm 5^\circ\text{C}$ , a partir de las mezclas binarias de A. E. Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub>**

% en Volumen	% de Error		
	Cardamomo	(IPA-Agua) <sub>50%</sub>	Benceno
1	0.01	0.01	0.07
2	0.02	0.02	0.18
5	0.02	0.02	0.31
8	0.01	0.02	0.26

**Tabla XL. Porcentajes de error de las composiciones en peso de la mezcla ternaria, utilizados para construir el diagrama ternario a una temperatura de  $25 \pm 5^\circ\text{C}$ , a partir de las mezclas binarias de A. E. Cardamomo-Benceno**

% en Volumen	% de Error		
	Cardamomo	Benceno	(IPA-Agua) <sub>50%</sub>
5	0.02	0.02	0.70
10	0.02	0.06	0.30
20	0.01	0.10	0.12
40	0.01	0.17	0.08
80	0.01	0.26	0.09
90	0.01	0.25	0.14
95	0.02	0.33	0.33

**Tabla XLI. Porcentajes de error de las composiciones en peso de la mezcla ternaria, utilizados para construir el diagrama ternario a una temperatura de  $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , a partir de las mezclas binarias de A. E. Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub>**

% en Volumen	% de Error		
	Cardamomo	(IPA-Agua) <sub>50%</sub>	Benceno
1	0.02	0.02	0.24
2	0.02	0.02	0.14
5	0.01	0.02	0.13
8	0.01	0.06	0.20

**Tabla XLII. Porcentajes de error de las composiciones en peso de la mezcla ternaria, utilizados para construir el diagrama ternario a una temperatura de  $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , a partir de las mezclas binarias de A. E. Cardamomo-Benceno**

% en Volumen	% de Error		
	Cardamomo	Benceno	(IPA-Agua) <sub>50%</sub>
5	0.02	0.03	0.42
10	0.01	0.03	0.26
20	0.01	0.10	0.37
40	0.01	0.06	0.03
80	0.01	0.38	0.19
90	0.01	0.17	0.11
95	0.01	0.13	0.13



## APÉNDICE 3

### MUESTRA DE CÁLCULO

#### 1. Cálculo de la media aritmética

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{N} \quad (1)$$

Donde:

$\bar{X}$  : media aritmética

$X_i$  : dato de la i-ésima observación

$N$  : número de observaciones

Se determinó la media aritmética para los pesos del picnómetro, los índices de refracción y los volúmenes de titulación, para todas las mezclas trabajadas.

1.1 Cálculo de la media aritmética de los pesos de las soluciones binarias de la mezcla Aceite Esencial de Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub> (peso de la solución + peso del picnómetro) al 8% en volumen a la temperatura de  $25 \pm 5^\circ\text{C}$ .

$$\bar{M} = \frac{38.238 + 38.238 + 38.237}{3} = 38.238g$$

Las medias aritméticas de los pesos totales del picnómetro, los índices de refracción y los volúmenes de titulación se encuentran reportados en el Apéndice 2, Datos Calculados.

## 2. Cálculo de las densidades de las soluciones

$$\rho_{sol} = \frac{M_{Total} - M_{pic}}{V_{pic}} \quad (2)$$

Donde:

$\rho_{sol}$ : densidad de la solución (g/ml)

$M_{Total}$ : peso de la solución + el peso del picnómetro (g)

$M_{pic}$ : peso del picnómetro vacío (g)

$V_{pic}$ : volumen del picnómetro (ml)

2.1 Cálculo de la densidad de la solución binaria de A.E. de Cardamomo-(IPA-Agua) al 1% a la temperatura de  $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$

$$\rho = \frac{38.252 - 29.200}{9.622} = 0.941 \text{ g / ml}$$

Las densidades calculadas para todas las corridas a las dos temperaturas trabajadas se encuentran en el Apéndice 2: Datos Calculados.

### 3. Determinación de las curvas de correlación

Se determinaron plotando los índices de refracción contra las concentraciones del Aceite Esencial de Cardamomo en los solventes utilizados. Se buscó un modelo matemático para aproximar los comportamientos de los datos plotados.

Las curvas trazadas se presentan en la sección de Resultados, junto con el modelo matemático más aproximado a la tendencia y el coeficiente de correlación de dicho modelo.

### 4. Cálculo de los porcentajes en peso de las mezclas binarias de Aceite Esencial de Cardamomo-solvente.

$$\%P = \frac{(\%V / 100)V_{pic} \rho_{cardam}}{M_{sol}} 100 \quad (3)$$

Donde:

$\%P$ : porcentaje en peso de Aceite Esencial de Cardamomo en la solución (adimensional)

$\%V$ : porcentaje en volumen de aceite de Cardamomo en la solución (adimensional)

$V_{pic}$ : volumen del picnómetro (ml)

$M_{Total}$ : peso de la solución + el peso del picnómetro (g)

$\rho_{cardam}$ : densidad del Aceite Esencial de Cardamomo (g/ml)

4.1 Cálculo del porcentaje en peso de la solución de aceite de Cardamomo-  
(IPA-Agua)<sub>50%</sub> a 1% en volumen a la temperatura de  $25 \pm 5^\circ\text{C}$

$$\%P = \frac{(1/100)9.622(0.932)}{9.052} 100 = 0.991\%$$

Los porcentajes en peso para todas las corridas a las dos temperaturas trabajadas se encuentran en el Apéndice 2: Datos Calculados.

5. Cálculo de la composición porcentual de las mezclas ternarias para graficar la curva binodal.

$$M_{total} = V_{solvadic} \rho_{solvadic} + V_{volalic} \rho_{sol} \quad (4)$$

$$\%Soluto = \frac{(\%P / 100)V_{alic} \rho_{cardam}}{M_{total}} 100 \quad (5)$$

$$\%Solv1 = \frac{V_{alic} \rho_{sol} - (\%P / 100)V_{alic} \rho_{cardam}}{M_{total}} 100 \quad (6)$$

$$\%SolvAdic = \frac{V_{adic} \rho_{sovAdic}}{M_{total}} 100 \quad (7)$$

Donde:

*%Soluto*: porcentaje en peso del soluto en la mezcla ternaria

*%Solv1*: porcentaje en peso del solvente de la mezcla trabajada

*%SolvAdic*: porcentaje en peso del solvente adicionado durante la titulación

*%P*: porcentaje en peso de Aceite Esencial de Cardamomo en la solución (adimensional)

$V_{alic}$ : volumen de la alícuota de solución tomada para titular (ml)

$M_{Total}$ : peso de la solución + el peso del picnómetro (g)

$\rho_{cardam}$ : densidad del Aceite Esencial de Cardamomo (g/ml)

$V_{solvAdic}$ : volumen del solvente adicionado durante la titulación (ml)

$\rho_{solvAdic}$ : densidad del solvente adicionado durante la titulación (g/ml)

$\rho_{sol}$ : densidad de la solución (g/ml)

5.1 Cálculo de las composiciones en peso de la mezcla ternaria a partir de la solución de aceite de Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub> a 1% en volumen, titulada con Benceno, a la temperatura de  $25 \pm 5^\circ\text{C}$

$$M_{total} = 0.85(0.879) + 5(0.941) = 5.451g$$

$$\%Soluto = \frac{(0.991/100)5(0.932)}{5.451} 100 = 0.85\%$$

$$\%Solv1 = \frac{5(0.941) - (1/100)5(0.932)}{5.451} 100 = 85.45\%$$

$$\%SolvAdic = \frac{0.85(0.879)}{5.451} 100 = 13.71\%$$

Las composiciones en peso para todas las corridas a las dos temperaturas trabajadas se encuentran en el Apéndice 2: Datos Calculados.

#### 6. Obtención de la curva binodal

Se graficaron las composiciones porcentuales en peso para las mezclas ternarias utilizando la aplicación para el estudio de fases y manejo de la información experimental en el laboratorio de Fisicoquímica 2, desarrollada en la tesis ***"Diseño y elaboración de una aplicación computacional para el estudio del equilibrio de fases y manejo de la información experimental en el Laboratorio de Fisicoquímica 2"*** (Ref. 5).

El resultado del gráfico es el diagrama de equilibrio ternario para el sistema, que se encuentra en la sección de resultados. Se realizó un diagrama para cada temperatura trabajada.

#### 7. Cálculo de la composición porcentual en peso de extracto y refinado de los puntos tomados debajo del domo de solubilidad, después de haber agitado y reposado las muestras.

Fase abundante en Benceno: Después de separar la fase, se le midió el índice de refracción y se obtuvo la composición porcentual empleando la curva de calibración de las mezclas Aceite Esencial de Cardamomo-Benceno.

Fase abundante en la mezcla (IPA-Agua)<sub>50%</sub>: después de separar la fase, se le midió el índice de refracción y se obtuvo la composición porcentual a partir de la curva de calibración realizada con las mezclas Aceite Esencial de Cardamomo-(IPA-Agua)<sub>50%</sub>.

## 8. Cálculo del coeficiente de distribución

$$K = \frac{Y}{X} \quad (8)$$

Donde:

*K*: coeficiente de distribución (adimensional)

*Y*: concentración al equilibrio del Aceite Esencial de Cardamomo en el extracto.

*X*: concentración al equilibrio del Aceite Esencial de Cardamomo en el refinado.

8.1 Cálculo del coeficiente de distribución para el punto bajo el domo de solubilidad con composiciones en peso de 10% de Aceite Esencial de Cardamomo, 40% de la mezcla (IPA-Agua)<sub>50%</sub> y 50% de Benceno, con una composición de extracto de 80.26% y una composición de refinado de 31.04%, a la temperatura de  $25 \pm 5^\circ\text{C}$ .

$$K = \frac{80.26}{31.04} = 2.59$$



## APÉNDICE 4

### ANÁLISIS DE ERROR

#### 1. Descarte de datos

Para determinar cuales de los datos medidos experimentalmente debían desecharse se emplearon las pruebas t de Student y Q de Dixon.

Las pruebas fueron aplicadas a los pesos totales de picnómetro, los índices de refracción y los volúmenes de titulante. Para ello se empleó la aplicación para el estudio de fases y manejo de la información experimental en el laboratorio de Fisicoquímica 2, desarrollada en la tesis ***“Diseño y elaboración de una aplicación computacional para el estudio del equilibrio de fases y manejo de la información experimental en el Laboratorio de Fisicoquímica 2”*** (Ref. 5 ).

#### 2. Incertezas de los instrumentos de medición

**Tabla XLIII. Incertezas de los instrumentos de medición**

<b>Instrumento de medición</b>	<b>Incerteza</b>
Refractómetro	0.00005 (adim)
Bureta	0.005 (ml)
Balanza	0.0005 (g)

### 3. Desviación Estándar

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(\bar{X} - X_i)^2}{N - 1}} \quad (9)$$

Donde:

$\sigma$  : desviación estándar

$\bar{X}$  : media aritmética

$X_i$  : iesima medición realizada

$N$  : número de mediciones realizadas

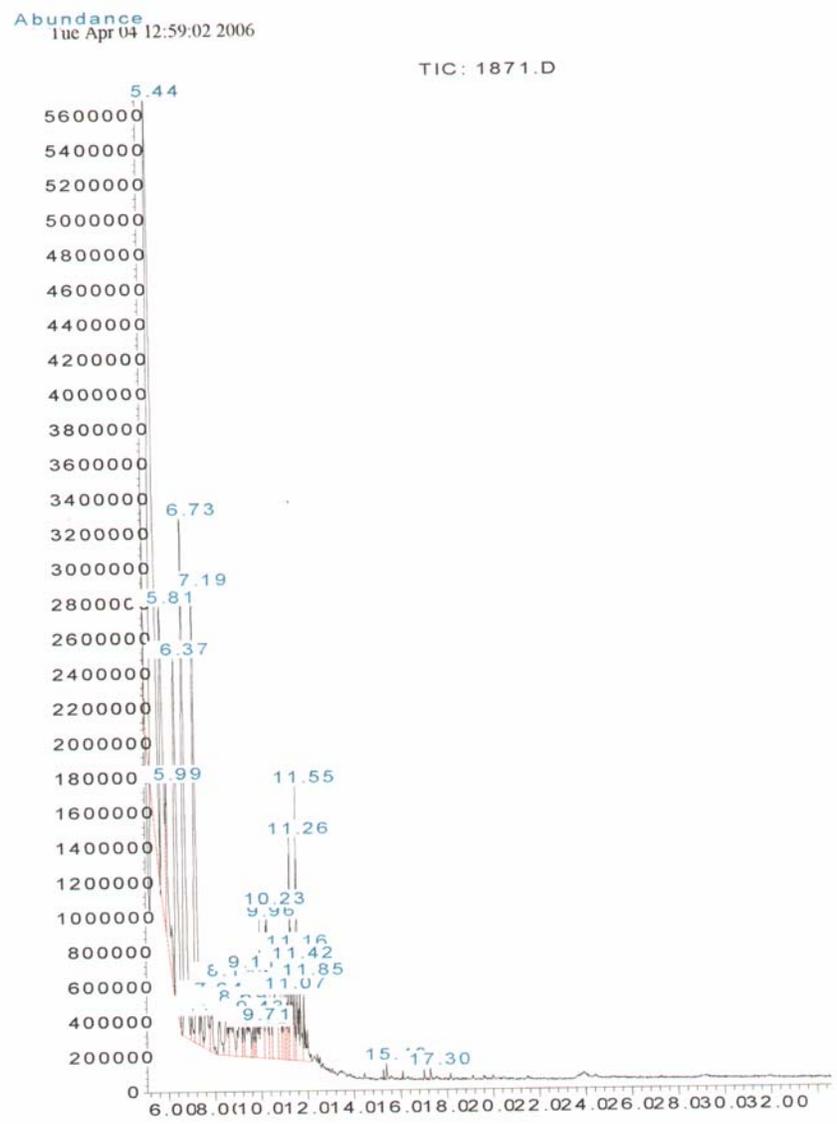
### 4. Porcentaje de error

- Se calculó el error total para los datos experimentales sumando la incerteza del instrumento de medición a la desviación estándar de los datos experimentales.
- A partir del error total se calculó el error de arrastre para cada uno de os datos calculados, por medio de derivadas parciales de las expresiones matemáticas con las cuales se obtuvieron los datos.
- El porcentaje de error se obtuvo dividiendo el error de arrastre dentro del valor del dato calculado.

# APÉNDICE 5

## ANEXOS

Figura 16. Cromatografía del Aceite Esencial de Cardamomo



**Figura 17. Equipo de medición de Índices de refracción compuesto por el refractómetro y la unidad de enfriamiento**



**Figura 18. Equipo y cristalería empleados para la titulación de las mezclas binarias**



**Figura 19. Agitado de las muestras**



**Figura 20. Equipo y cristalería empleados para la separación de las fases luego de la agitación**



**Figura 21. Detalle de las fases de extracto y refinado durante el proceso de separación**

