

# REVISTA TECNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DEL ZULIA

MARACAIBO - VENEZUELA



Una Revista Internacional Arbitrada  
que está indizada en las publicaciones  
de referencia y comentarios:

- Science Citation Index (SCIExpanded)
- Compendex
- Chemical Abstracts
- Metal Abstracts
- World Aluminium Abstracts
- Mathematical Reviews
- Petroleum Abstracts
- Current Mathematical Publications
- MathSci (online database)
- Revenct
- Materials Information
- Periódica
- Actualidad Iberoamericana

## Vapor Liquid Equilibrium of musts of *Agave cocui* in a constant pressure

**Mayra Carolina Leal de Pérez<sup>1</sup>, Edgar Enrique Pérez Camacho<sup>2</sup>, Héctor Andrés Morán Guillén<sup>3</sup>, Rómulo José Hernández Motzezak<sup>3</sup>, Osney Pérez Ones<sup>4</sup> América García López<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Ingeniero Químico, Profesor Agregado, MSc. Análisis de Procesos en la Industria Química, Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda, Coro 4101, Venezuela, deperezmayra@gmail.com, +58 4126413300. <sup>2</sup>Ingeniero Industrial, Profesor Asistente, Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda, Coro 4101, Venezuela, perezedgar8@gmail.com, +58 4121242083. <sup>3</sup>Ingeniero Químico, Laboratorio de Análisis Químico - Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda, Coro 4101, Venezuela, hamorang@gmail.com, +58 4120706197. T.S.U. en Química, Laboratorio de Análisis Químico - Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda, Coro 4101, Venezuela, motzezak1@gmail.com, +58 4267015689. <sup>4</sup>Ingeniero Químico, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Auxiliar, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Ave 114 No. 11901 e/ 119 y 127. Marianao, La Habana, CP 90500, Cuba, osney@quimica.cujae.edu.cu, +53 72663208 <sup>5</sup>Universidad de Oriente, CP 90500, Santiago de Cuba, america@uo.edu.cu

### Abstract

In this research the vapor-liquid equilibrium for *Agave cocui* fermented musts which constitute a multicomponent complex mixture due to the presence of polar compounds was measured experimentally. Experimental measurements were carried out at constant atmospheric pressure with simple distillation equipment and a gas chromatograph for quantification. The results showed a good correlation exists between the major variables involved in the equilibrium constant pressure (T, P, x, y). The fermented must is considered a mixture with positive deviations from Raoult ideality due the intramolecular interactions and the smaller capacity of its components to form hydrogen bonds. At the same time thermodynamic data have sufficient quality to be used for the simulation of the distillation process, which leads to improving the quality of the alcoholic beverage.

**Key words:** Vapor liquid equilibrium; fermented musts; *Agave cocui*.

## Equilibrio Líquido Vapor de Mostos de *Agave cocui* a presión constante

### Resumen

En esta investigación se midió experimentalmente el equilibrio líquido vapor para mostos fermentados de *Agave cocui* que constituyen una mezcla multicomponente compleja debido a la presencia de compuestos polares. Las mediciones experimentales se realizaron a presión atmosférica constante con un equipo de destilación simple y un cromatógrafo de gases para la cuantificación. Los resultados obtenidos demuestran que existe buena correlación entre las variables principales implicadas en el equilibrio a presión constante (T, P, x, y); los mostos fermentados se consideran una mezcla con desviaciones positivas de la idealidad de Raoult debido a las interacciones intramoleculares y la menor capacidad de sus componentes a formar puentes de hidrógeno y, al mismo tiempo los datos obtenidos tienen la calidad termodinámica suficiente para ser utilizados en la simulación del proceso de destilación, lo cual conlleva a mejorar la calidad de la bebida alcohólica.

**Palabras clave:** equilibrio líquido vapor; mostos fermentados; *Agave cocui*.

## Introducción

El Cocuy Pecayero, es una bebida alcohólica que se obtiene por destilación y rectificación artesanal de mostos preparados a partir de las cabezas maduras (cormo central) de la planta *Agave cocui* Trealese previamente hidrolizados o cocidos y sometidos a fermentación alcohólica con levaduras naturales o cultivadas [1]. La producción del mosto fermentado de cocuy se conoce desde la época precolombina y, desde el siglo XVII [2] se elabora el producto destilado que en la actualidad se produce de manera artesanal en la población de Pecaya, municipio Sucre del estado Falcón, Venezuela.

Esta bebida se encuentra en proceso de legalización y recientemente se aprobó otorgar la denominación de origen al "Cocuy Pecayero" [3]. La bebida, se elabora en varias etapas; la primera etapa incluye el corte de la planta el cual se realiza durante la maduración, antes de producirse la inflorescencia, cuando la planta tiene entre 7 y 10 años. Luego, el cormo central o piña de la planta se cuece en un horno de piedra construido en el suelo, durante 72 a 120 horas. Una vez horneadas, las piñas se trituran en cubas de madera que posteriormente se lavan, presan y filtran. El jugo obtenido es fermentado durante 4 o 5 días en toneles de plástico o de metal para finalmente ser destilado en un alambique artesanal [4].

Los compuestos volátiles producidos en la fermentación influyen en la calidad final del producto. Así, los ésteres son constituyentes volátiles responsables del aroma de la bebida. Los alcoholes superiores no son considerados como un factor de calidad de licores debido a su olor desagradable. Los ésteres etílicos de los ácidos orgánicos superiores otorgan a la bebida sabores y olores a fruta y flores, con excepción del acetato de etilo, el cual proporciona un aroma a solvente. Adicionalmente, altas concentraciones de metanol y furfural pueden conferirle propiedades tóxicas a la bebida [5].

La calidad de las bebidas alcohólicas se establece de acuerdo a las concentraciones de los principales compuestos químicos que conforman la misma, de allí la necesidad de llevar un seguimiento de las fracciones vaporizadas durante la destilación para determinar su evolución y de acuerdo a ello y a las propiedades químicas de estas sustancias en la bebida alcohólica, definir los cortes del destilado, tomando en cuenta los límites establecidos por COVENIN 3340 [6], para de esta manera lograr un mayor control del proceso que permita establecer un equilibrio entre la calidad del producto y el rendimiento del proceso [5].

En la elaboración artesanal del cocuy de Pecaya, la definición de los cortes del destilado (cabeza, destilado medio y cola) se realiza empíricamente, de forma tal

que no se garantiza que el producto cumpla con las especificaciones de grado alcohólico, concentración de metanol, furfural y total de congenéricos establecidos en la Norma COVENIN 3662 [7].

En relación al proceso de destilación, que llevado a cabo en alambiques artesanales transforma el mosto fermentado en Cocuy Pecayero, existe diversidad de criterios relacionados al valor o valores que uno o más parámetros han de adoptar al momento idóneo de concluir la destilación, o de realizar los cortes de separación entre las fracciones comúnmente llamadas cabeza, destilado medio, y cola. Es por esto que se hace necesario estudiar la evolución que a lo largo de una destilación de este tipo experimentan tanto las cantidades como las concentraciones de la mezcla alcohólica en el "ollón" (calderín) de destilación, y el destilado obtenido ya que dicho proceso ocurre bajo los supuestos de que todo vapor que abandona el líquido del calderín lo hace en condiciones de equilibrio con este, que la condensación toma lugar única y exclusivamente en el condensador, y que en el caso que nos ocupa, el sistema a destilar puede considerarse fundamentalmente como una mezcla de etanol y agua [8].

Actualmente en la población de Pecaya, se estima una producción de 200 000 litros de cocuy pecayero anual [9] a través de un proceso completamente artesanal. La obtención de la Denominación de Origen del producto y el proceso de legalización de la bebida que aún se encuentra en proceso, conllevaron al diseño, construcción e instalación de una planta piloto para elaboración de Cocuy Pecayero, como parte del proyecto de la Red Socialista de Innovación Productiva de Agave Cocui del Ministerio del Poder Popular para Ciencia, Tecnología e Industrias Intermedias (MCTI) a través de Fundacite Falcón, con la finalidad de beneficiar a los productores de Agave cocui, quienes pueden mejorar sustancialmente los procedimientos artesanales al implementar buenas prácticas de manufactura que garanticen la calidad e inocuidad de los productos, así como la higiene, seguridad y confort de los trabajadores [9].

Se estima que con la puesta en marcha de la planta piloto la producción de Cocuy Pecayero se incrementará exponencialmente para dar cumplimiento a la demanda debido a la legalización de la bebida previo cumplimiento de la Norma COVENIN 3662 [7] bajo los estándares necesarios para su comercialización y exportación, lo cual a mediano plazo va a requerir de una planta de mayor capacidad con mayor control del proceso; es por esto que se hace necesario establecer el modelo termodinámico que mejor describa al proceso de destilación artesanal y simularlo para establecer recomendaciones operacionales que garanticen la calidad del producto final.

El objetivo de este estudio fue determinar las composiciones de equilibrio líquido vapor (ELV) de los mostos de *Agave cocui* a presión constante, con el fin de modelar y simular el proceso de destilación artesanal que conlleve a mejorar la calidad de la bebida.

## Materiales y Métodos

Para la determinación experimental del ELV isobárico de mostos de *Agave cocui* se utilizó un equipo de destilación simple, conformado por un balón de destilación con tres bocas de 1 L de capacidad y un condensador de tubo liso. Para el registro de la temperatura de la fase líquida se empleó un termómetro de mercurio de  $150 \pm 1^\circ\text{C}$ , mientras que para la fase de vapor se empleó un termómetro digital (DeltaTRAK) de  $-50$  a  $200 \pm 0,1^\circ\text{C}$ . Es importante señalar que la destilación a escala de laboratorio se hizo de forma isobárica (presión atmosférica), al igual que en el proceso productivo original. Una vez alcanzado el equilibrio térmico se extrajeron muestras de la fase líquida y de la fase de vapor, una vez condensada.

La composición de ambas fases se determinó mediante cromatografía de gases, utilizando un equipo marca Agilent Technologies modelo 6890N, provisto de un detector de ionización a la llama (FID) y una columna capilar HP-INNOWAX. El gas de arrastre utilizado fue nitrógeno con una velocidad de flujo de 20 mL/min, la temperatura del inyector fue de  $250^\circ\text{C}$  al igual que para el detector. Cada una de las fracciones se analizó por inyección directa de  $1 \pm 0,2 \mu\text{L}$  de muestra.

Para obtener las ecuaciones que relacionan la densidad de la solución con la concentración de etanol (g/100 mL) se realizó una destilación simple del mosto y cada 30 mL de destilado se toma muestra de ambas fases (líquido y vapor), lo cual se repite 4 veces. A las muestras se les determinó la densidad por picnometría y el contenido de etanol por cromatografía de gases. Para determinar la densidad de la muestra se empleó un picnómetro de 25,386 mL a  $20^\circ\text{C}$  cuyo termómetro es de  $35 \pm 0,2^\circ\text{C}$  y una balanza analítica electrónica (BP 110S, valor máximo 110 g, precisión 0,0001 g).

Con el contenido de etanol de cada muestra analizada y su densidad se construyeron las curvas correspondientes a cada fase y se ajustó una línea de tendencia, cuya ecuación representa la relación entre las variables involucradas para cada caso, las cuales sirvieron para determinar la densidad de la solución en las siguientes destilaciones y así determinar la masa de la solución y a su vez por diferencia con las masas de los otros compuestos, permitió conocer la masa de agua presente en el mosto, lo cual es indispensable para

el cálculo de las composiciones molares de las fases de líquido y de vapor en cada punto de equilibrio de las destilaciones posteriores.

Una vez armado el equipo para el estudio experimental del ELV, se inició el calentamiento, y al alcanzar el equilibrio térmico, se registró el valor de la temperatura simultáneamente con la toma de las muestras de las fases líquido y vapor. Se estableció la toma de muestra cada 3 mL de destilado para las primeras 5 fracciones con su respectiva muestra de fase líquida y, posteriormente cada 10 mL hasta completar la destilación con un volumen total recogido de 165 mL. El cambio de volumen para las tomas de muestra se realizó con el fin de poder cuantificar los componentes más volátiles presentes en las primeras fracciones. Las muestras de ambas fases fueron analizadas por cromatografía de gas para determinar su composición.

Para verificar la calidad de los datos experimentales isobáricos del ELV se consideró la mezcla como binaria a partir de los componentes mayoritarios etanol-agua, ya que las fracciones molares del resto de los seis componentes presentes en el mosto son menores del orden  $10^{-5}$  y todas juntas reunidas representan entre 0,001% y 0,01% de la composición del mosto [10]. Se aplicó en test de Wisniak [11], el cual es una prueba punto a punto y de área, que utiliza relaciones sencillas tales como relaciones de energía libre en exceso, la correspondiente al coeficiente de actividad,  $\gamma_i$ , y la de Clausius-Clapeyron, para plantear como consistencia de los datos de ELV isobáricos la identificación de los términos  $L_i$  y  $W_i$ . Esta prueba de consistencia aplicada no detecta datos inválidos, sino que el resultado demuestra la validez o confiabilidad del conjunto de datos experimentales, en este caso isobáricos. El criterio de consistencia de este test punto a punto viene dado por valores de  $L_i/W_i$  entre 0,9 y 1 para sistemas binarios [11], mientras que, para el conjunto de datos como un todo es que la desviación D sea menor de 3 [12]. En este estudio se definió como criterio  $D < 5$ .

Con el fin de comprobar si se presentan errores no sistemáticos en la determinación del ELV para mostos de *Agave cocui* se aplicó el método de cualitativo de Buszmakin [13], que es un método de interpolación gráfica en el que se determina la volatilidad relativa de la mezcla a partir de los datos experimentales y luego se grafica contra la fracción molar de la fase líquida para el componente más volátil. Este método se basa en que en ausencia de cambios bruscos en las propiedades del sistema, estas deben variar de manera continua. Los puntos experimentales deben originar curvas continuas con tan pequeña dispersión de los puntos cuanto más exactos sean los datos obtenidos.

## Resultados y discusión

A los fines de simplificar la presentación de los resultados, se asigna a cada componente analizado un número que lo

representa, presentado en la Tabla 1. En adelante todos los resultados mostrados serán en función de la codificación asignada. Así mismo, en adelante las fases líquida y vapor serán representadas por los subíndices L y V respectivamente.

**Tabla 1:**  
Codificación de los componentes analizados

Componente	Número asignado
Acetaldehído	1
Acetato de etilo	2
Metanol	3
Etanol	4
Alcohol isobutílico	5
Alcohol isoamílico	6
Furfural	7
Agua	8

Para el cálculo de las composiciones de ELV de mostos de *Agave cocui* fue necesario conocer la densidad de la mezcla en ambas fases, en la Tabla 2 se muestran las ecuaciones de los modelos ajustados que relacionan la densidad (g/mL) con la concentración de etanol (g/100

mL) tanto en fase líquida ( $\rho_L$ ) como en la fase de vapor ( $\rho_V$ ), al igual que el valor de  $R^2$  (coeficiente de correlaciones) asociado a cada curva ajustada y el valor-P reportados por el Statgraphics Centurion XV versión 15.02.5, al realizar un análisis de regresión lineal a los datos experimentales.

**Tabla 2**  
Datos de los modelos ajustados para la densidad en ambas fases

Fase	Ecuación	Estadígrafo $R^2$	Valor-P
Líquido	$\rho_L = 1,0148 - 0,00192106 * C_{4L}$	0,9881	0,0060
Vapor	$\rho_V = 1,00065 - 0,00112943 * C_{4V}$	0,9852	0,0074

Los modelos ajustados para cada fase son válidos para mostos de *Agave cocui* en un intervalo de temperaturas entre 94 y 102°C. Los valores de  $R^2$  (>98%) muestran que los modelos ajustados presentan buena correlación de los datos y variabilidad de la densidad para los casos estudiados, mientras que, los valores-P menores que 0,05 indican que existe una relación estadísticamente significativa entre las variables densidad y concentración

de etanol con un nivel de confianza del 95,0%; sin indicación de una autocorrelación serial en los residuos.

En la Tabla 3 se muestran los datos del ELV para los mostos de *Agave cocui* a presión constante (T, x, y) calculadas a partir de los modelos matemáticos ajustados, correspondientes a cada uno de los compuestos estudiados. Donde x, y son las fracciones molares obtenidas para cada punto del ELV.

**Tabla 3**  
 Datos del ELV para mostos de *Agave cocui* a 101,325 kPa

T (°C)	X <sub>1</sub> 10 <sup>5</sup>	Y <sub>1</sub> 10 <sup>5</sup>	x <sub>2</sub> 10 <sup>5</sup>	y <sub>2</sub> 10 <sup>6</sup>	x <sub>3</sub> 10 <sup>6</sup>	y <sub>3</sub> 10 <sup>5</sup>	x <sub>4</sub> 10 <sup>2</sup>	y <sub>4</sub> 10 <sup>1</sup>	x <sub>5</sub> 10 <sup>7</sup>	y <sub>5</sub> 10 <sup>5</sup>	x <sub>6</sub> 10 <sup>6</sup>	y <sub>6</sub> 10 <sup>5</sup>	x <sub>7</sub> 10 <sup>5</sup>	y <sub>7</sub> 10 <sup>5</sup>	x <sub>8</sub> 10 <sup>1</sup>	y <sub>8</sub> 10 <sup>1</sup>
94,5	1,51	63,52	2,72	81,18	3,60	2,94	4,12	9,44	18,80	37,21	6,67	99,62	0,99	0,57	9,59	0,53
95,1	1,53	49,35	2,28	42,72	3,82	3,83	4,12	9,41	18,72	31,92	6,58	94,21	1,06	0,78	9,59	0,57
95,3	1,54	44,75	2,07	29,25	3,99	4,62	4,12	9,38	18,53	27,76	6,44	88,70	1,13	0,95	9,59	0,60
95,7	1,54	38,30	1,95	22,28	4,14	5,30	4,12	9,33	18,22	24,40	6,23	83,09	1,18	1,10	9,59	0,66
95,9	1,54	34,86	1,86	17,98	4,24	5,87	4,11	9,25	17,76	21,60	5,99	77,43	1,23	1,21	9,59	0,73
96,7	1,53	26,69	1,67	10,71	4,41	7,07	4,07	8,78	15,33	14,89	4,99	59,04	1,38	1,49	9,60	1,21
97,1	1,50	20,92	1,61	7,28	4,38	7,28	3,94	7,94	12,28	10,51	4,02	42,88	1,50	1,63	9,61	2,05
97,6	1,45	16,49	1,55	5,21	4,27	6,77	3,66	6,83	9,53	7,48	3,21	30,03	1,62	1,67	9,63	3,17
98,1	1,40	13,06	1,51	3,85	4,16	5,90	3,23	5,64	7,45	5,37	2,61	20,59	1,73	1,66	9,68	4,36
98,9	1,36	10,48	1,47	2,92	4,11	4,97	2,70	4,53	5,99	3,91	2,16	14,03	1,84	1,62	9,73	5,46
99,3	1,33	8,56	1,44	2,28	4,18	4,14	2,16	3,59	4,99	2,91	1,83	9,58	1,96	1,59	9,78	6,40
99,8	1,31	7,15	1,41	1,83	4,38	3,50	1,69	2,84	4,30	2,21	1,60	6,58	2,10	1,57	9,83	7,16
100,2	1,31	6,10	1,39	1,51	4,71	3,09	1,32	2,25	3,82	1,71	1,42	4,53	2,25	1,57	9,87	7,74
100,6	1,32	5,31	1,37	1,27	5,14	2,92	1,04	1,80	3,48	1,35	1,29	3,11	2,43	1,60	9,90	8,20
101,0	1,34	4,70	1,36	1,10	5,62	3,02	0,84	1,45	3,26	1,08	1,18	2,10	2,64	1,64	9,92	8,55
101,3	1,36	4,22	1,34	0,96	6,09	3,40	0,69	1,18	3,05	0,88	1,10	1,36	2,90	1,71	9,93	8,82
101,6	1,38	3,83	1,34	0,85	6,44	4,08	0,59	0,97	2,91	0,72	1,04	0,81	3,20	1,81	9,94	9,02
101,6	1,39	3,52	1,33	0,76	6,57	5,08	0,51	0,81	2,81	0,59	0,99	0,40	3,58	1,93	9,95	9,19
101,8	1,37	3,26	1,32	0,69	6,35	6,43	0,46	0,68	2,72	0,49	0,95	0,08	4,06	2,08	9,96	9,32
102,0	1,31	3,04	1,32	0,63	5,61	8,16	0,42	0,58	2,66	0,40	0,91	0,01	4,68	2,27	9,96	9,42

Tanto la temperatura como las composiciones molares de cada uno de los compuestos analizados cambian en función del tiempo, tal como lo establece el principio fundamental de la destilación por carga. Las temperaturas registradas durante el proceso están en el intervalo de 94,5-102°C.

Para resumir el comportamiento de los datos de equilibrio para los mostos de *Agave cocui* se considera la mezcla multicomponente como un sistema binario en función de sus componentes mayoritarios, etanol - agua, lo cual se muestra en la Figura 1.

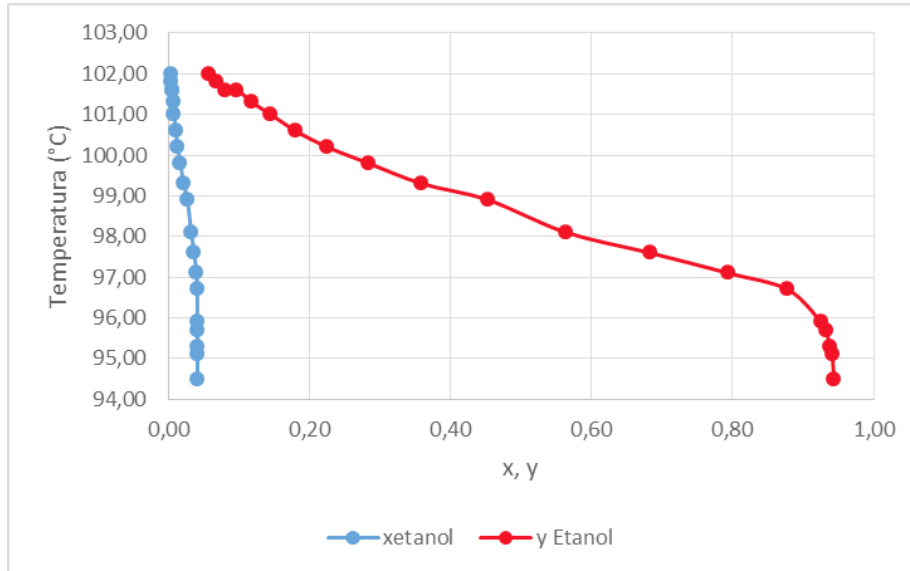


Figura 1: Diagrama Txy Etanol-Agua

Se evidencia que cada punto Txy corresponde a un instante de tiempo en el que se alcanza el equilibrio líquido vapor para el sistema estudiado.

Para evaluar el ELV de los mostos de *Agave cocui* considerando la presión atmosférica constante (P), se asumió comportamiento ideal para la fase de vapor ( $\phi_i \cong 1$ ) por estar sometido el sistema a bajas presiones

y calculando el coeficiente de actividad para la fase líquida ( $\gamma_i$ ) de acuerdo a la Ley de Raoult modificada (Ecuación 1), lo cual resulta ser una solución real ( $\gamma_i \neq 1$ ). Los resultados se muestran en la Tabla 4.

$$\gamma_i = y_i P / x_i P \quad (1)$$

Tabla 4  
Coeficientes de actividad para el ELV de mostos de *Agave cocui*

T (°C)	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$	$\gamma_4$	$\gamma_5$	$\gamma_6$	$\gamma_7$	$\gamma_8$
94,5	4,3410	179,1379	2,8124	12,4653	330,0537	607,8656	5,2419	0,0678
95,1	3,2968	110,2220	3,3864	12,1640	277,5951	567,4273	6,5636	0,0706
95,3	2,8255	82,5994	3,8740	12,0372	241,9796	541,7321	7,5092	0,0746
95,7	2,4987	66,2372	4,2392	11,8084	212,9239	514,8343	8,1003	0,0799
95,9	2,2602	55,5934	4,5525	11,6417	191,8557	495,1335	8,5484	0,0885
96,7	1,7115	35,4389	5,1383	10,8499	148,3657	436,9540	9,1005	0,1419
97,1	1,3590	25,0572	5,2520	9,9961	128,7745	388,1773	8,9763	0,2372
97,6	1,0913	18,3422	4,9377	9,0850	115,8294	332,6545	8,3920	0,3580



Continuación

98,1	0,8842	13,7617	4,3526	8,3578	104,3081	275,4094	7,6413	0,4818
98,9	0,7188	10,4843	3,6088	7,8226	91,5829	218,8680	6,8133	0,5839
99,3	0,5965	8,2835	2,9194	7,6448	80,4091	173,0962	6,1728	0,6707
99,8	0,4991	6,6868	2,3188	7,5922	69,4301	133,8387	5,6061	0,7329
100,2	0,4226	5,5364	1,8800	7,6154	59,6236	101,9821	5,1516	0,7789
100,6	0,3612	4,6758	1,6107	7,6032	50,8722	75,9187	4,7712	0,8106
101,0	0,3119	4,0168	1,5026	7,5015	43,2067	54,6763	4,4480	0,8314
101,3	0,2733	3,5105	1,5464	7,3123	36,7037	37,5277	4,1822	0,8473
101,6	0,2432	3,1049	1,7363	7,0118	31,0747	23,4610	3,9432	0,8573
101,6	0,2225	2,7970	2,1201	6,6886	26,5138	12,0571	3,7616	0,8723
101,8	0,2080	2,5259	2,7630	6,2510	22,3524	2,4546	3,5548	0,8779
102,0	0,2018	2,2967	3,9426	5,7767	18,7401	0,3710	3,3425	0,8812

La determinación de los coeficientes de actividad requirió el cálculo de las presiones de vapor de cada componente en función de las temperaturas de equilibrio ( $P_i^s$ ), para lo cual se empleó la Ecuación de Antoine (2); donde la presión de vapor determinada (P) viene dada en mmHg, la temperatura de equilibrio (T) en K y las constantes A, B y C fueron tomadas de la base de datos del simulador comercial Chemcad 6.0.

$$\ln P = A - \frac{B}{(T+C)} \quad (2)$$

Todos los componentes analizados en los mostos de *Agave cocui* arrojan valores del coeficiente de actividad mayores que 1 ( $\gamma_i > 1$ ), excepto para el agua que son cercanos a la unidad ( $\gamma_i < 1$ ). Sin embargo, esta mezcla multicomponente se considera con desviaciones positivas de la idealidad de Ley de Raoult debido a sus interacciones intramoleculares y la menor capacidad de sus componentes a formar puentes de hidrógeno, lo cual puede influir en la formación de azeótropos y sistemas parcialmente miscibles dentro de la mezcla.

Los datos del ELV experimentales siempre están sujetos a errores, pequeños o grandes en dependencia de la exactitud que tengan los instrumentos de medición que se utilicen, del método analítico empleado para determinar las composiciones de las fases en el equilibrio, así como

del diseño y construcción del equipo de destilación utilizado. De forma general, se pueden distinguir dos tipos de errores, los sistemáticos y los no sistemáticos.

Para la detección de errores no sistemáticos se utilizó el método de Buszmakin [13], con el que no se detecta la presencia de estos errores pues se obtiene una curva continua al graficar  $\alpha_{12}$  vs  $x_1$ , es posible que estos errores no existan o que no hayan sido detectados por este método.

Los errores sistemáticos están provocados por factores que afectan de igual modo al repetir las mediciones y son causados frecuentemente por un mal funcionamiento de los equipos de equilibrio o de los instrumentos de medición. Para esto se aplicó el test de consistencia termodinámica de Wisniak [11], denominado test L-W o de punto a punto y área.

Para el cálculo de L y W se considera la integración de las áreas que resultan al graficar  $L_i$  y  $W_i$  como función de la composición del componente 1, en este caso  $x_{\text{etanol}}$ , la cual se muestra en la Figura 2.

Para el conjunto de datos experimentales de ELV isobárico para mostos de *Agave cocui* los valores de  $L_i/W_i$  varían entre 0,84 y 1,13, por lo tanto existen algunos puntos que no cumplen con el test aplicado, es decir que son inconsistentes termodinámicamente.



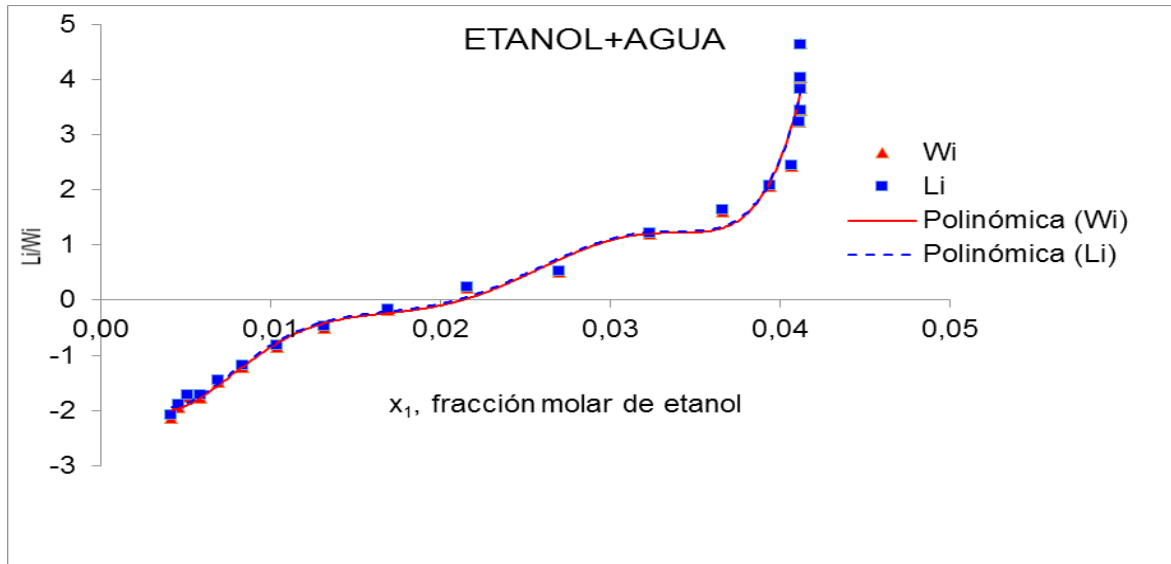


Figura 2: Representación gráfica del test de Wisniak

El parámetro D de este test, muestra la consistencia de los datos experimentales de ELV como un todo y su criterio de consistencia es que dicha desviación (D) sea menor que 5. En la Tabla 5 se presentan los resultados

obtenidos al aplicar el test de Wisniak para el conjunto de datos experimentales del ELV de mostos de *Agave cocui* y el resultado de eliminar los puntos que el test detecta como inconsistentes.

Tabla 5  
Resultados del Test de Wisniak a los datos experimentales del ELV

Total de puntos experimentales	Sin el punto	L	W	D
20	--	-0,007	-0,005	-9,719
19	11	-0,006	-0,005	-10,486
18	10	-0,008	-0,007	-7,909
17	9	-0,008	-0,007	-7,687
16	8	-0,010	-0,009	-5,950
15	7	-0,013	-0,012	-4,427

Al eliminar los 5 puntos inconsistentes del conjunto de al datos experimentales del ELV, se cumple con el criterio de consistencia según Wisniak, donde  $D < 5$ . La inconsistencia presentada en los puntos 7-11 probablemente es debida a errores sistemáticos en los datos de equilibrio, lo cual puede atribuirse a fluctuaciones de temperatura en la manta de calentamiento usada y, al equipo inadecuado

utilizado para obtener los datos experimentales del ELV [14], por lo que se debe considerar emplear equipos con recirculación de una o ambas fases para minimizar los errores en las composiciones de las fases en equilibrio; al igual que el empleo de otras pruebas de consistencia termodinámica para verificar la calidad de los datos experimentales.

## Conclusiones

Los datos de ELV para mostos de *Agave cocui* se determinaron experimentalmente a presión atmosférica constante (101,325 kPa) demostrando que existe una correlación entre la variación de las variables principales implicadas (T, x, y) y el tiempo. Estos mostos se consideran como una mezcla con desviaciones positivas de la idealidad de Ley de Raoult debido a sus interacciones intramoleculares y la menor capacidad de sus componentes a formar puentes de hidrógeno lo cual puede influir en la formación de azeótropos y sistemas parcialmente miscibles dentro de la mezcla. La consistencia termodinámica para el conjunto de datos experimentales de ELV considerando la mezcla binaria etanol-agua fue probada por el Test de Wisniak el cual indica que tienen la calidad suficiente para ser considerados en diversos cálculos de ingeniería. Estos resultados obtenidos constituyen el primer acercamiento al ELV de los mostos de *Agave cocui*, lo cual es esencial para la simulación del proceso de destilación y consecuente diseño de equipos u optimización de los mismos, que permitirán mejorar la calidad de la bebida alcohólica.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Sr. Yoel Medina (productor de cocuy) y a la Asociación Falconiana de Cocuy (ASOFSCOCUY) su gran disposición para colaborar con la realización de este trabajo.

## Referencias Bibliográficas

- [1] Yegres, F; Fernández, G; Padin, C; Rovero, L; Richard, N. "Saccharomyces cerevisiae en la fabricación del licor de Cocuy", Revista de la Sociedad Venezolana de Microbiología. Vol. 23, (2003), 51-54.
- [2] González, C. "Noticia histórica sobre el Cocuy (*Agave cocui*)". Croizatia, Vol. 2, N° 3, (2001), 173-176.
- [3] SAPI. Boletín de la Propiedad Industrial. 2001, Venezuela.
- [4] Ventura, J. "Caracterización del proceso de producción artesanal del Cocuy Pecayero". Tesis de Ingeniería Industrial, Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda, Venezuela, (2001).
- [5] Leal, I; Moran, H; Medina, J; Jaimes, L. "Evaluación de la diferencia en la composición de volátiles mayoritarios entre cocuy de agave y licor fraudulento comercializado como cocuy". Multiciencias, Vol. 11, N° 4, (2011), 339-344.
- [6] COVENIN. Bebidas alcohólicas. Normas 3340, 1997, Venezuela.
- [7] COVENIN. Cocuy pecayero. Norma 3662, 2001, Venezuela.
- [8] Iñiguez, J. "Algunas consideraciones teórico-prácticas sobre la destilación intermitente en alambique simple de mostos fermentados y ordinarios. Parte I: Algunas Definiciones y Conceptos fundamentales". Revista Electrónica Ingeniería Primero, Vol. 17, (2010), 31-51.
- [9] MPPCTI.[Internet]. "Inaugurada unidad piloto para procesamiento de *Agave Cocui*. 15 de marzo 2010". [Citado en febrero 2013]. Disponible en: <http://www.mcti.gob.ve/actualidad/noticias/inaugurada-unidad-piloto-para-procesamiento-de-agave-cocui>
- [10] Skoog, D; Leary, J. Análisis Instrumental. España, McGraw Hill Interamericana, 1994.
- [11] Wisniak, J. "The Herington test for thermodynamic consistency". Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 33, N° 1, (1994), 177-180.
- [12] Pérez, O; Zumalacárregui, L; Gozá, O. "Evaluación de propiedades termodinámicas de mezclas etanol-agua (I)". Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquía, Vol. 52, (2010), 47-61.
- [13] Mondeja, D; Ruiz, H; Pons, A. "Termodinámica para Ingenieros Químicos". La Habana, Editorial Félix Varela, 2006.
- [14] Diaz, C; Tojo, J. "Phase equilibria behaviour of n-heptane with o-xylene, m-xylene, p-xylene and ethylbenzene at 101.3 kPa". J.Chem. Thermodynamics, Vol. 34, (2002), 867-871.

Recibido el 12 de Junio de 2016  
En forma revisada el 05 de Junio de 2017



UNIVERSIDAD  
DEL ZULIA

---

## **REVISTA TECNICA**

DE LA FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DEL ZULIA

**Vol. 40. N°3, Diciembre 2017** \_\_\_\_\_

*Esta revista fue editada en formato digital y publicada en Diciembre de 2017, por el **Fondo Editorial Serbiluz**, Universidad del Zulia. Maracaibo-Venezuela*

[www.luz.edu.ve](http://www.luz.edu.ve)  
[www.serbi.luz.edu.ve](http://www.serbi.luz.edu.ve)  
[produccioncientifica.luz.edu.ve](http://produccioncientifica.luz.edu.ve)