

MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITES ESENCIALES MEDIANTE LA DESTILACIÓN POR ARRASTRE CON VAPOR

J.Armijo C.¹, E. Vicuña G.², P. Romero y Otiniano³, C. Condorhuamán C.⁴ y B. Hilario R.⁵

RESUMEN

En este trabajo se presenta una investigación de la extracción de aceites esenciales mediante el arrastre con vapor. Se analiza el proceso y se desarrolla un modelo para la extracción de aceite esencial de eucalipto en escala piloto con un flujo de vapor de 5,73 g / min. Según el modelo de Dunckhorst-Houghton, que considera el efecto de dispersión axial, y el uso de procedimientos de optimización para establecer los parámetros del modelo, se obtuvo una excelente concordancia entre la cantidad extraída de aceite teórico y el experimental.

Palabras claves: Aceite esencial, destilación por arrastre de vapor, simulación, dispersión axial.

MODELING AND SIMULATION PROCESS OF EXTRACTION ESSENTIAL OILS BY STEAM DISTILLATION

ABSTRACT

This paper presents an investigation of the extraction of essential oils by steam distillation. The process is analyzed and a model is developed for the extraction of essential oil of eucalyptus in pilot scale with a steam flow of 5.73 g / min. According to the model Dunckhorst-Houghton, which considers the effect of axial dispersion, and the use of optimization procedures to establish the model parameters, excellent agreement was obtained between the amount of oil extracted theoretical and experimental.

Keywords: Essential oil by steam distillation, simulation, axial dispersion.

I. INTRODUCCIÓN

Los aceites esenciales son mezclas complejas de compuestos volátiles, fuertemente olorosos y producidos por organismos vivos y aislados por medios físicos (presión y destilación) de una planta entera o parte de la planta. No todos los extractos olorosos de plantas oleaginosas cumplen con la definición de un "aceite esencial". El documento ISO/DIS 9235.2 de la Organización Internacional de Normas (ISO) define a un aceite esencial, correspondiente a materias

primas aromáticas naturales, como: "Producto obtenido a partir de materias primas vegetales, ya sea por destilación con agua o vapor, o desde el epicarpio de los frutos cítricos mediante un proceso mecánico, o por destilación seca". Los productos obtenidos por métodos de extracción con solventes y/o con bióxido de carbono (extracción supercrítica) no se consideran aceites esenciales. Asimismo, los productos obtenidos por tratamiento enzimático de material vegetal no cumplen con los requisitos de la definición

1 jarmijocarranza@gmail.com; Departamento Académico de Operaciones Unitarias, FQIQ, UNMSM.

2 eder_vicuña@yahoo.com; Departamento Académico de Análisis y Diseño de P., FQIQ, UNMSM.

3 pedroromeroy@yahoo.es; Departamento Académico de Análisis y Diseño de P., FQIQ, UNMSM.

4 cesarioccc@yahoo.com; Departamento Académico de Operaciones Unitarias, FQIQ, UNMSM.

5 benignohilario@hotmail.com Departamento Académico de Química Inorgánica, FQIQ, UNMSM.

de un aceite esencial. Existe, sin embargo, al menos una excepción que es el “aceite esencial” de levadura de vino que se deriva de un microorganismo y no de una planta.

Los aceites esenciales se utilizan en una amplia variedad de bienes de consumo tales como detergentes, jabones, productos de tocador, cosméticos, productos farmacéuticos, perfumes, productos de confitería de comida, refrescos, bebidas alcohólicas destiladas (bebidas duras) y los insecticidas.

La obtención de aceites esenciales se realiza mediante la destilación por arrastre con vapor de agua y es la técnica más difundida porque es fácil de operar y produce aceites de alta calidad. La técnica consiste en vaporizar dos líquidos inmiscibles a temperaturas inferiores a las de ebullición de cada uno de los componentes volátiles por efecto de una corriente directa de vapor agua. El vapor ejerce la doble función de calentar la mezcla hasta su punto de ebullición y disminuir la temperatura de ebullición al adicionar la tensión (presión) del vapor, que se inyecta, a la de los componentes volátiles de los aceites esenciales. Los vapores que salen se enfrían hasta condensar y los dos líquidos inmiscibles: agua y aceite esencial, finalmente, se separan por gravedad. En la destilación por arrastre con vapor, el vapor húmedo o seco se produce por separado en una caldera y se inyecta por la parte inferior del recipiente que contiene el material vegetal. La ventaja de este tipo de destilación “seca” es que es relativamente rápida, consume menos energía y causa menos transformaciones químicas a los componentes lábiles o reactivos de los aceites esenciales.

La hidrodestilación es otro método de destilación que consiste en evaporar una suspensión acuosa del material vegetal que durante toda la operación se encuentra sumergido en agua y en constante agitación para evitar aglomeración o sedimentación que pueden degradar térmicamente el aceite esencial.

En la literatura se reporta algunos estudios acerca de la extracción del aceite esencial mediante la destilación por arrastre con va-

por o hidrodestilación, mucho de los cuales establecen una serie de presunciones para desarrollar modelos matemáticos que expliquen la cinética de extracción.

Cassel y Vargas^[1] consideran que la difusión en la partícula es la etapa controlante y a partir de la segunda ley de Fick determinan una expresión matemática para el grado de extracción para una geometría rectangular.

Romdhane y Tizaoui^[2], desarrollan ecuaciones para expresar la fracción en peso del aceite en la semilla y del aceite en el vapor, ambos en función del tiempo, mediante balances de materia macroscópico en un lecho fijo de semillas. La velocidad de extracción de aceite se expresa en función de un coeficiente global de transferencia de masa el cual es determinado experimentalmente.

El proceso de hidrodestilación es analizado por Sovová y Aleksovski^[3]. Ellos consideran un vaporizador donde se encuentra sumergido las **partículas de vegetal en agua** y suponen que una fracción del material vegetal contiene aceite de fácil acceso y en la otra fracción el aceite se encuentra en el interior de la matriz. Mediante balance de materia determinan una expresión para el rendimiento de aceite en el separador, suponen que existe equilibrio entre el sólido-agua-vapor y utilizan un coeficiente para expresar la velocidad de transferencia de masa desde la matriz del vegetal hacia la superficie libre.

Según Cerpa, Mato y Cocero^[4], la extracción de aceite se puede describir en tres etapas: 1- el aceite en el interior de los pelos glandulares se exuda térmicamente hasta la superficie externa, 2-el aceite y el agua condensada forma dos capas separadas que se evaporan en equilibrio; 3-el aceite evaporado en la interface sólido-líquido es transferido hacia la fase vapor. Cada etapa es modelada matemáticamente y combinada con el balance de materia para determinar la masa de aceite recolectado después de condensar la mezcla vapor-aceite.

Milojevic, Stojanovic, Palic, Lazic y Veljkovic^[5], consideran el proceso de hidrodestilación

análogo al proceso de extracción con solventes de dos etapas: rápido lavado del aceite desde la superficie de la partícula y la difusión del aceite desde el interior de la partícula. Se postula un modelo cinético de primer orden para la cantidad de aceite en el vegetal.

Kabuba y Huberts^[6], investigan el efecto de la temperatura y el tiempo de extracción en el proceso de extracción con vapor de aceite. Establecen un modelo matemático a partir de la primera ley de Fick aplicando balances de materia a una hoja de la planta.

Sartor, Secchi, Soares y Cassel^[7], realizan un estudio teórico-experimental del proceso dinámico de extracción de aceite mediante destilación con vapor a escala industrial. El modelo matemático está compuesto de una ecuación de balance de materia diferencial en fase fluida que toma en cuenta la acumulación en el fluido y en el material sólido.

Fase fluida

$$\frac{\partial c(z,t)}{\partial t} = -u \frac{\partial c(z,t)}{\partial z} - \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon} \rho_s \frac{\partial q(z,t)}{\partial t}$$

La segunda ecuación considera la acumulación en el sólido proporcional a la diferencia de concentración de aceite en sólido y la concentración de equilibrio:

Fase sólida

$$\frac{\partial q(z,t)}{\partial t} = -k_{MT} [q(z,t) - q^*(z,t)]$$

La relación de equilibrio: $q^*(z,t) = K c(z,t)$. En este modelo se desprecia el coeficiente de dispersión axial.

Xavier y otros^[8] desarrollan un modelo matemático basado en la suposición de partículas intactas y partículas quebradas. En el primero de ellos la extracción de aceite es gobernado por los procesos de difusión, y en el segundo se establece un estado de equilibrio entre la fase sólida y fluida. Las ecuaciones de balance son muy similares a las ecuaciones presentadas en la referencia^[7].

Por la literatura analizada se puede desprender que los modelos matemáticos establecidos identifican dos etapas características: extracción del aceite libre y del aceite en el interior del sólido. La primera etapa es la extracción del aceite que se encuentra disperso sobre la superficie y es liberado por procesos de pre-tratamiento en la matriz. Esta cinética es característicamente lineal. La segunda etapa es dominada por procesos de transferencia de masa hacia el vapor desde el interior de la matriz que contiene al aceite esencial. Los tiempos que demandan cada etapa son diferentes. La cinética del proceso de extracción del aceite libre es más rápida que la otra que muestra resistencia a la transferencia de masa. Es evidente que el proceso de extracción de aceites esenciales por arrastre de vapor es complejo debido a que la matriz sólida que contiene al aceite esencial tiene diferentes estructuras, y que el aceite esencial es una mezcla de muchos componentes conformada básicamente por terpenos. En algunos casos se puede caracterizar un aceite en base a un solo componente si este se encuentra en una alta concentración respecto a los otros. Por otro lado, los modelos matemáticos que simulan el proceso dinámico de extracción de aceites esenciales por destilación con vapor introducen parámetros de valores inciertos como el coeficiente de difusión en la partícula y coeficientes de transferencia de masa que son dependientes de la geometría y naturaleza del vegetal sólido. Estos parámetros deben determinarse mediante pruebas independientes en el laboratorio.

La cinética del proceso de extracción de aceites esenciales por arrastre con vapor depende de la hidrodinámica del flujo de vapor, de la geometría, porosidad y localización del aceite en el sólido. Una descripción completa de la cinética de extracción es necesario pero de poca utilidad si el mecanismo del proceso introduce parámetros de valores inciertos.

El objetivo del presente trabajo es modelar matemáticamente el proceso de extracción de aceites esenciales con arrastre de vapor,

identificando y caracterizando los mecanismos fenomenológicos de este proceso así como determinar los efectos que producen el flujo, presión y temperatura sobre el proceso de extracción por destilación por arrastre con vapor.

Una comprensión fundamental del proceso mediante la modelación y simulación es necesaria para desarrollar mecanismos de control y mejoramiento en la productividad del aceite esencial extraído así como de su pureza.

II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El desarrollo del modelo matemático considera una columna empacada con un material sólido vegetal que es inyectada por la parte inferior con vapor de agua. A medida que el vapor asciende verticalmente este atraviesa el lecho extrayendo el aceite esencial. La mezcla de vapores de agua y aceite extraído salen por la parte superior de la columna, posteriormente son condensados y separados por gravedad debido a la poca o nada miscibilidad del aceite en agua.

Las suposiciones del modelo son:

- a- La velocidad lineal del vapor atravesando el lecho es constante.
- b- El vapor se distribuye de forma uniforme en la sección radial.
- c- La porosidad del lecho se mantiene constante en toda la columna.
- d- El flujo de vapor es lento que se puede considerar la existencia de equilibrio entre el aceite contenido en el sólido y el que se encuentra en el vapor.
- e- El aceite se transporta a través de la fase fluida por efectos convectivos y debido a la dispersión axial.
- f- La difusión en el interior de las partículas sólidas es despreciable. Esta suposición es válida si el tamaño de partículas es pequeño de tal manera que el vapor penetra rápidamente en la matriz del sólido para vaporizar el aceite.

- g- La caída de presión en la columna es despreciable por lo tanto la presión total se mantiene constante.
- h- La concentración de aceite en el vapor y en el sólido, dependen del tiempo y la coordenada axial de la columna.
- i- Aunque el aceite esencial es una mezcla de diversos compuestos químicos, este se puede representar como un solo seudocomponente.

Un balance de materia en un diferencial del lecho empacado, en la columna, conduce a la siguiente ecuación para la fase fluida:

$$D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} = \frac{\partial c}{\partial t} + v \frac{\partial c}{\partial z} + \delta \frac{\rho_b}{\varepsilon} \frac{\partial q}{\partial t} \quad (1)$$

La ecuación 1 es el modelo propuesto por Lapidus-Amundson^[9] y Dunckhorst-Houghton^[10] para el análisis de los procesos de adsorción ($\delta=+1$) y desorción ($\delta=-1$) en columnas empacadas.

Para la fase sólida tenemos las siguientes relaciones:

Si existe equilibrio en cada punto del lecho:

$$q = K_0 + K_1 c + K_2 c^2 \quad (2)$$

La forma cuadrática de la ecuación 2 es propuesta por Dunckhorst-Houghton, mientras que la forma lineal ($K_2=0$) es propuesta por Lapidus-Amundson.

Si no se alcanza el equilibrio la velocidad de extracción es finita y Lapidus-Amundson proponen la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = k_1 c - k_2 q \quad (3)$$

La ecuación 3 establece que existe resistencia a la transferencia de masa en la interface sólido-fluido y k_1 , k_2 son coeficientes de transferencia de masa. El desconocimiento

de estos coeficientes de transferencia hace poco práctico la solución de las ecuaciones 1 y 3.

El sistema formado por las ecuaciones 1, 2 (con $K_2=0$) y 3 han sido resueltos de forma analítica por Lapidus-Amundson.

Considerando que el proceso de extracción de aceites es análogo al proceso de desorción asumimos preferentemente la solución al sistema de ecuaciones 1 y 2, proporcionada por Dunckhorst-Houghton, en condiciones de equilibrio:

$$\frac{c}{c_0} = \frac{\exp(g)[1 - \delta \operatorname{erf}(p+h)]}{1 + \delta \operatorname{erf}(p) + \exp(g)[1 - \delta \operatorname{erf}(p+h)]} \quad (4)$$

Dónde:

$$p = \frac{\xi}{2\sqrt{D_c t}} \quad (5)$$

$$h = \frac{\lambda c_0 v_c t}{2\sqrt{D_c t}} \quad (6)$$

$$g = \frac{\lambda c_0 v_c (2\xi + \lambda c_0 v_c t)}{4D_c} \quad (7)$$

$$D_c = \frac{D}{(1 + \delta \rho_b K_1 / \varepsilon)} \quad (8)$$

$$v_c = \frac{v}{(1 + \delta \rho_b K_1 / \varepsilon)} \quad (9)$$

$$\lambda = \delta \frac{2\rho_b K_2}{\varepsilon(1 + \delta \rho_b K_1 / \varepsilon)} \quad (10)$$

$$\xi = z - v_c t \quad (11)$$

III. MÉTODO EXPERIMENTAL

Un aparato diseñado para ser operado de manera más práctica, sin necesidad de los complicados cierres mecánicos, se observa en la Figura N.º1. Este sistema destilador

para arrastre con vapor a nivel piloto se puede implementar sin muchas complicaciones a nivel comercial (industrial) y consta de cuatro partes básicas: generador de vapor con resistencia eléctrica (1), cámara de extracción (2), condensador (3) y separador florentino (4). Los vapores de agua generados en 1 pasan por el lecho del material vegetal que se encuentra en la cámara 2. El aceite extraído es arrastrado por el vapor de agua hacia el condensador 3 donde los vapores son condensados. Debido a que el aceite es inmisible y de menor densidad que el agua, estos se separan por gravedad en el separador florentino 4.

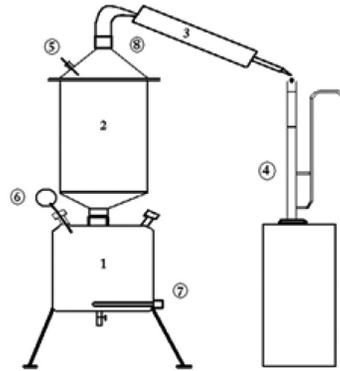


Figura N.º 1. Destilador por arrastre de vapor a escala piloto.

En la tabla N.º 1 se consignan datos para una corrida experimental, en el cual el aceite de hojas de eucalipto es extraído con vapor de agua de 1 atm de presión. El tiempo total de operación fue 50.25 minutos.

Tabla N.º 1. Datos de una corrida con hojas de eucalipto y vapor de agua a de 1 atm

Diámetro de columna	=	21.3	cm
Longitud del lecho empacado	=	47.6	cm
Volumen de la columna	=	16961	cm ³
Peso de hojas de eucalipto	=	5800	g
Densidad del lecho	=	0.342	g/cm ³
Tiempo de operación	=	50.25	min
Volumen de mezcla recolectado	=	345	cm ³
Volumen de aceite recolectado	=	57.16	cm ³

El caudal de vapor de agua inyectado a la columna empacada se calcula como sigue:

Flujo másico de vapor = $[(345-57.16) \text{ cm}^3 \times 1 \text{ g/cm}^3]/50.25 \text{ min} = 5.73 \text{ g/min}$

A 1 atm de presión y 100°C, considerando vapor saturado, el volumen específico del vapor es 1684 cm³/g, luego el caudal de vapor es:

Caudal de vapor = $5.73/(1684 \times 60) = 160.82 \text{ cm}^3/\text{s}$

Este flujo lo consideramos igual al flujo de vapor a la salida de la columna, aunque esto no es exacto porque a la salida tenemos una mezcla de vapores: aceite- agua. El problema es que desconocemos el volumen específico de los vapores de aceite.

La tabla 2 muestra el proceso de extracción en función del tiempo. El peso de aceite es calculado suponiendo una densidad del aceite igual 0.92 g/cm³.

Tabla N.º 2 Volumen y peso de aceite en función de tiempo

minutos	cm ³ de aceite	gramos de aceite
3.70	8.5	7.82
6.45	15.86	14.59
10.00	18.69	17.19
12.08	23.79	21.89
25.00	39.65	36.48
27.00	41.35	38.04
29.42	44.18	40.65
34.08	47.58	43.77
39.00	51.54	47.42
43.38	53.81	49.51
46.60	55.51	51.07
49.27	56.64	52.11
50.25	57.21	52.63

Densidad del aceite=0.92 g/cm³

Para relacionar la ecuación 4 del modelo con los datos recolectados en el laboratorio hacemos un balance de materia en la zona marcada como se muestra en la figura 2. La concentración de aceite en la columna es función de la posición (z) y del tiempo (t). A la salida de la columna, la concentración de aceite es c(L, t).

Despreciando la acumulación en el condensador y en las líneas, así como cualquier pérdida por evaporación al medio ambiente, el balance de materia se escribe como sigue:

[Acumulación de aceite en el depósito] = flujo másico de aceite que ingresa al depósito

$$\frac{dm}{dt} = Qc(L, t) \tag{12}$$

Separando variables e integrado entre t= 0 y un tiempo cualquiera t = t_f, obtenemos la masa de aceite recolectado en función del tiempo:

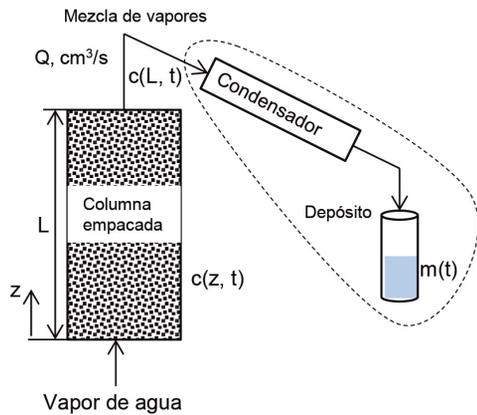


Figura N.º 2 Balance de materia en la zona marcada para determinar la cantidad de aceite recolectado, m, en función del tiempo.

$$m = Qc_0 \int_0^{t_f} \frac{c(L, t)}{c_0} dt \tag{13}$$

La ecuación anterior se puede utilizar para estimar la concentración c₀ si se conoce la masa de aceite recolectado en un tiempo determinado:

$$c_0 = \frac{m(t_f)}{Q \int_0^{t_f} \frac{c(L, t)}{c_0} dt} \tag{14}$$

La relación de concentraciones c(L, t)/c₀ que aparece en las ecuaciones 13 y 14 se determina de la ecuación 4 para valores conocidos de los parámetros D_c y v_c definidos

por las ecuaciones 8 y 9, respectivamente. Aunque λ debería ser conocido a partir de la distribución de equilibrio dado por la ecuación 2, este también se aproxima debido a que desconocemos las constantes de la ecuación 2.

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El procedimiento de cálculo es el siguiente:

1-Suponer valores para $\lambda c_0, v_c, D_c$

$$\begin{aligned} \lambda c_0 &= 0 \\ v_c &= 0.037 \text{ cm/s} \\ D_c &= 1 \text{ cm}^2/\text{s} \end{aligned}$$

2-Calcula la integral de la ecuación 14, evaluando el área bajo la curva desde $t=0$ hasta t_p , el cual se toma de la primera columna de la Tabla 2, para una masa $m(t_p)$ de aceite recolectado que aparece en la tercera columna de la misma tabla 2. La integral bajo la curva se calcula mediante la cuadratura de Gauss-Legendre de 15 puntos. El caudal de vapor calculado anteriormente es $160.82 \text{ cm}^3/\text{s}$.

3- Se calcula la concentración c_0 de la ecuación 14:

segundos	gramos	área	c_0
222	7.82	219.71	0.00022132
387	14.59	372.37	0.00024364
600	17.2	547.51	0.00019534
724.8	21.89	639.2	0.00021295
1500	36.48	1072.8	0.00021144
1620	38.04	1124.04	0.00021044
1765.2	40.65	1181.7	0.0002139
2044.8	43.77	1280.92	0.00021248
2340	47.42	1371.24	0.00021503
2602.8	49.51	1441.18	0.00021362
2796	51.07	1487.17	0.00021353
2956.2	52.11	1522.21	0.00021287
3015	52.63	1534.42	0.00021328
Promedio =			0.0002146

4-Para cada valor experimental del tiempo, t_p , calculamos la masa de aceite teórico recolectado utilizando las ecuaciones 4 y 13. Para verificar la bondad del ajuste calculamos la función objetivo a minimizar:

$$F_{obj} = \sum (m_{exp} - m_{teo})_i^2$$

Donde m_{exp} es la masa experimental de aceite recolectado y m_{teo} es la masa de aceite teórico; la diferencia en la ecuación anterior representa los residuales cuadráticos.

segundos	experim	teórico	residual ²
222	7.82	7.6	0.0484
387	14.59	12.87	2.9584
600	17.2	18.93	2.9929
724.8	21.89	22.1	0.0441
1500	36.48	37.09	0.3721
1620	38.04	38.86	0.6724
1765.2	40.65	40.86	0.0441
2044.8	43.77	44.29	0.2704
2340	47.42	47.41	0.0001
2602.8	49.51	49.83	0.1024
2796	51.07	51.42	0.1225
2956.2	52.11	52.63	0.2704
3015	52.63	53.05	0.1764
Función objetivo =			8.0746

Este procedimiento se repite para diferentes valores de parámetros hasta minimizar la función objetivo.

El resultado final después de trece iteraciones es:

$$\begin{aligned} \lambda c_0 &= -0.045 \\ v_c &= 0.037 \text{ cm/s} \\ D_c &= 1 \text{ cm}^2/\text{s} \end{aligned}$$

segundos	experim	teórico	residual ²
222	7.82	7.63	0.0361
387	14.59	12.92	2.7889
600	17.2	18.97	3.1329
724.8	21.89	22.13	0.0576
1500	36.48	36.98	0.25
1620	38.04	38.72	0.4624
1765.2	40.65	40.68	0.0009
2044.8	43.77	44.05	0.0784
2340	47.42	47.12	0.09
2602.8	49.51	49.48	0.0009
2796	51.07	51.04	0.0009
2956.2	52.11	52.22	0.0121
3015	52.63	52.63	0
Función objetivo =			6.9111

La concentración promedio c_0 , calculada como en el paso 3, es 0.000216 g/cm^3 .

La figura 3 muestra la masa de aceite de eucalipto extraído, teórico y experimental, en función del tiempo. Se observa que la

masa de aceite extraído calculado del modelo teórico, dado por la ecuación 4, pasa por la mayor cantidad de puntos experimentales a excepción de los tiempos 387 y 600 segundos, cuyos residuales cuadráticos justamente son los más grandes. Para el caso de aceite de eucalipto, la figura 3 revela que existe una buena correlación entre los datos experimentales y el modelo teórico dado por la ecuación 4. Si un conjunto de parámetros permite obtener un buen ajuste entre los datos experimentales y el modelo teórico, entonces podemos utilizar dicha información para estimar el coeficiente de dispersión axial D y la velocidad del fluido intersticial v, a partir de las ecuaciones 8 y 9, respectivamente.

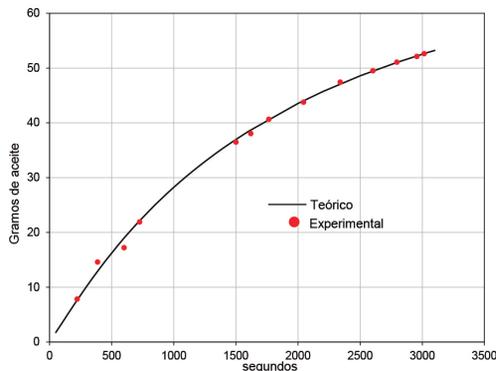


Figura N.º 3 Masa de aceite de eucalipto extraído, teórico y experimental, en función del tiempo.

Esto, siempre y cuando se conozcan las constantes de distribución de equilibrio en la ecuación 2. Como las constantes de la ecuación 2 son desconocidas podemos tener un estimado de estas a partir de las ecuaciones 9 y 11. Despejando K_1 y K_2 de las ecuaciones 9 y 11 obtenemos:

$$K_1 = -\frac{1}{\rho_b} \left(\frac{v^*}{v_c} - \varepsilon \right) \quad (15)$$

$$K_2 = -\frac{(\lambda c_0) v^*}{(\rho_b c_0) v_c} \quad (16)$$

Donde v^* es la velocidad del fluido en la columna vacía:

$$v^* = \varepsilon v \quad (17)$$

La velocidad v^* se calcula con los datos de flujo y el área de la sección transversal de la columna:

$$v^* = \frac{\text{caudal}}{(\pi / 4) \text{diámetro}^2} = \frac{160.82 \text{ cm}^3 / \text{s}}{356.3 \text{ cm}^2}$$

$$v^* = 0.451 \text{ cm/s}$$

Remplazando números en las ecuaciones 15 y 16 obtenemos:

$$K_2 = -\frac{(-0.045) \times 0.451}{(0.342 \times 0.000216) \times 0.037} = 7425$$

$$K_1 = -\frac{1}{0.342} \left(\frac{0.451}{0.037} - \varepsilon \right) = -\frac{1}{0.342} (12.189 - \varepsilon)$$

$$\varepsilon = 0 \quad K_1 = -35.64$$

$$\varepsilon = 1 \quad K_1 = -32.72$$

$$\text{promedio} \quad K_1 = -34.18$$

La constante K_0 es desconocida y debe determinarse de datos experimentales de equilibrio.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El modelo matemático, ecuación 4, propuesto por Dunckhorst-Houghton^[10] para procesos de adsorción-desorción en columnas empacadas, puede aplicarse para la simulación de la extracción de aceite mediante arrastre con vapor de agua. El modelo requiere conocer solamente el coeficiente de dispersión axial D, siempre que se disponga de las constantes en la ecuación 2.

Se recomienda continuar con la recolección de mayor cantidad de datos, utilizando diferentes materiales vegetales a diferentes condiciones de operación, básicamente de presión de vapor, temperatura y flujo, con la finalidad de evaluar los diferentes parámetros involucrados en el modelo matemático.

VI. NOMENCLATURA

c, c_0 : Concentración en la fase fluida, [g de aceite/ cm³ de solución]

D: Coeficiente de dispersión axial, [cm²/s].

m= Masa de aceite extraído, [g]

q: Concentración en la fase sólida, [g de aceite/g de sólido].

v: Velocidad del fluido en los intersticios del lecho empacado, [cm/s]

t: Tiempo, [s]

z: Longitud axial de la columna, dirección que circula el fluido, [cm]

r_b : Densidad del lecho empacado, [g de sólido/cm³ de lecho empacado]

ε : Porosidad del lecho, [volumen vacío/volumen del lecho empacado], el volumen vacío es también el volumen que ocupa la fase fluida.

Función error:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-\xi^2) d\xi$$

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Cassel Eduardo, Rubem M. F. Vargas. Experiments and Modeling of the Cymbopogon winterianus Essential Oil Extraction by Steam Distillation, J. Mex. Chem. Soc. 2006, 50(3), 126-129.
- [2] Romdhane Mehrez and Chedly Tizaoui. The kinetic modelling of a steam distillation unit for the extraction of aniseed (Pimpinella anisum) essential oil, J Chem Technol Biotechnol, 2005, 80:759–766.
- [3] Sovová Helena and Slavcho A. Aleksovski. Mathematical model for hydrodistillation of essential oils, Flavour and Fragrance Journal, Flavour Fragr. J. 2006, 21: 881–889
- [4] Cerpa G. Manuel, Rafael B. Mato, and María José Cocero. Modeling Steam Distillation of Essential Oils: Application to Lavandin Super Oil, AIChE Journal 2008; 54(4): 909-917.
- [5] Milojevic Z Svetomir, Tamara D. Stojanovic, Radosav Palic, Miodrag L. Lazic Vlada B. Veljkovic. Kinetics of distillation of essential oil from comminuted ripe juniper (Juniperus communis L.) berries, Biochemical Engineering Journal; 2008; 39: 547–553.
- [6] Kabuba John and Robert Huberts. Steam Extraction of Essential Oils: Investigation of Process Parameters, The Canadian Journal of Chemical Engineering; 2009, 87: 915-920.
- [7] Sartor B. Rafael, Argimiro R. Secchi, Rafael de P. Soares, and Eduardo Cassel. Dynamic Simulation of Rosemary Essential Oil Extraction in an Industrial Steam Distillation Unit; Ind. Eng. Chem. Res. 2011, 50, 3955–3959.
- [8] Xavier V.B, R.M.F. Vargas, E. Cassela, A.M. Lucas, M.A. Santos, C.A. Mondin, E.R. Santarem, L.V. Astarita, T. Sartor. Mathematical modeling for extraction of essential oil from Baccharis spp. by steam distillation; Industrial Crops and Products; 2011, 33: 599–604.
- [9] Lapidus L., Neal Amundson Mathematics of adsorption in beds. VI The effect of longitudinal diffusion in ion exchange and chromatographic columns; J. Phys. Chem; 1952, 56:984-988.
- [10] Dunckhorst F.T., Houghton G. Frontal behavior in nonlinear adsorption-desorption process with axial dispersion. Shorter communications; J. Phys. Chem; 1965, 709-710.