

## Estudio de la hidrogenación del aceite de jojoba

Por Alberto Willnecker y María del C. Pramparo\*

Departamento de Tecnología Química. Facultad de Ingeniería.  
Universidad Nacional de Río Cuarto. Ruta 36 Km 601. Río Cuarto. Argentina.

\* Autor para correspondencia: mpramparo@ing.unrc.edu.ar

### RESUMEN

#### Estudio de la hidrogenación del aceite de jojoba.

Se han llevado a cabo ensayos de hidrogenación de aceite de jojoba para estudiar los efectos de las principales variables operativas de esta operación sobre el índice de yodo y el punto de fusión. Se utilizó un reactor discontinuo con un catalizador de níquel. Los efectos seleccionados para su análisis fueron la temperatura de reacción, la presión de operación y la cantidad de catalizador. El rango de temperaturas estudiado fue de 120-200°C, el de presión entre 2 y 4 atm y la cantidad de catalizador entre 0,2-0,6 % (% masa catalizador / masa de aceite). Si bien los tres efectos estudiados fueron significativos, la temperatura fue el efecto que más influencia tuvo sobre el avance de la reacción. Se estudió además el comportamiento cinético mediante el ajuste de un modelo potencial de pseudo-primer orden, obteniéndose los parámetros cinéticos correspondientes.

*PALABRAS CLAVE: Aceite – Cera – Hidrogenación – Índice de iodo – Jojoba.*

### SUMMARY

#### Study on jojoba oil hydrogenation.

Trials were carried out on jojoba oil hydrogenation to study the effects of the main operative variable on iodine index and melting point. A batch reactor with nickel catalysts was used. The effects selected for analysis were the reaction temperature, the operation pressure and the amount of catalyst. The range of temperature studied was 120-200°C, the pressure was between 2 and 4 atm and the amount of catalyst ranged from 0.2 – 0.6% (percentage of catalyst mass over oil mass). The results showed that these three factors affected the reaction significantly; although temperature was the most influential in the progression of the reaction. In addition, the kinetic behavior was studied using a potential model of pseudo-first order and the corresponding kinetic parameters were obtained.

*KEY-WORDS: Hydrogenation – Iodine Value – Jojoba – Oil – Wax.*

## 1. INTRODUCCIÓN

El aceite de jojoba es un producto natural que se extrae de las semillas de la planta de jojoba. Esta planta es un arbusto originario del desierto de Sonora, al norte de México y del sur-oeste de EEUU. En Argentina, su cultivo se encuentra en período de incipiente crecimiento, siendo actualmen-

te, uno de los más importantes productores en el mundo. La semilla de este arbusto tiene entre 40 y 60% de aceite. El aceite extraído de la semilla, también denominado cera líquida, fluye libremente a temperaturas mayores de 10°C y está compuesto por una mezcla de 97% de ésteres lineales (de 36 a 46 átomos de carbono) de ácidos y alcoholes grasos monoinsaturados de cadena larga, lo que contrasta con los aceites vegetales y animales los cuales son principalmente triglicéridos (Gunstone, 1990).

De varias muestras de Argentina ensayadas, mediante el empleo de cromatografía gaseosa con espectrómetro de masa (GC-MS), se identificaron nueve ácidos grasos y ocho alcoholes grasos saturados y mono-insaturados conteniendo entre 16 y 24 átomos de carbono. Los ácidos grasos más abundantes fueron 9\_octadecanoico (18:1), 13\_docosanoico (22:1) y 11\_eicosanoico (20:1); éste último en porcentajes cercanos al 76%. Entre los alcoholes se destacaron el 11\_eicosanol y el 13\_docosanol, los que representaron aproximadamente el 90% de los alcoholes. Entre los principales parámetros físicos, químicos y fisicoquímicos evaluados en dichas muestras se ha determinado el punto de ebullición: 386,5°C, la densidad (a 25°C): 0,8581 gr/ml, el índice de refracción (a 25°C): 1,447, el índice de acidez: 0,59 mg KOH/g y el índice de saponificación: 101,25 mg KOH/g Tobarez et al. (2002).

La hidrogenación es una de las reacciones químicas más comunes que se realizan sobre los aceites y grasas con la finalidad de mejorar sus propiedades. La hidrogenación involucra la adición química de hidrógeno a los dobles enlaces carbono-carbono insaturados presentes en una molécula de ácido graso o alcohol graso. La reacción debe ser catalizada para obtener adecuados rendimientos. Esta técnica no sólo incrementa los puntos de fusión y la consistencia de las grasas, sino que también mejora el color, el olor y la estabilidad oxidativa de las mismas (Hastert, 1998).

La reacción de hidrogenación de aceites procede según una serie de pasos de transferencia de masa y adsorción-desorción, y bajo condiciones adecuadas, la principal resistencia se concentra en la reacción química sobre la superficie del catalizador. Las moléculas con dobles enlaces insaturados

son adsorbidas en el catalizador sólido y allí reaccionan con átomos de hidrógeno (O'Brien, 1998).

Wisniak et al. (1987) propusieron una reacción de primer orden para la cinética seguida con el índice de yodo. Experimentalmente llevaron a cabo la reacción de hidrogenación en catalizadores de cobre y níquel (5-30 gr/1000 ml aceite), a altas presiones (7-50 atm), bajas temperaturas (100-140°C) y velocidades de agitación entre 550-1200 rpm. Después de los períodos de inducción, las líneas de valor de yodo en función del tiempo dieron lo suficientemente lineales como para suponer orden uno de reacción. El avance de la reacción fue controlado con el índice de refracción a 75°C, el cual variaba bastante linealmente con el índice de yodo. La constante cinética no fue dependiente de la velocidad de agitación, lo que además probó la preponderancia de la resistencia química frente a la física.

Warth (1956) reportó que el aceite de jojoba puede ser fácilmente hidrogenado por un proceso similar al de hidrogenación de aceite de algodón. Se lograba con este proceso un producto altamente lustroso, blanco perlado, en forma de cristales laminado, de alta dureza y punto de fusión alrededor de 70°C. El producto obtenido se utilizó como ingrediente en ceras para pulir, en la fabricación del papel, para encerar frutas y recubrimiento exterior de velas.

La composición del aceite hidrogenado depende de muchos factores, los cuales influyen en la evolución de la reacción de hidrogenación. Entre los principales factores se encuentran las características del aceite y las condiciones a las cuales se lleva a cabo el proceso (temperatura, presión, velocidad y tipo de agitación, tamaño del reactor, calidad del hidrógeno, tipo y cantidad de catalizador) (Ariaansz, 1998). En general, la presión de trabajo está en el orden de los 0-120 psig; sin embargo, para ácidos grasos y otros materiales no comestibles difíciles de hidrogenar se emplean presiones de hasta 25 atm para obtener velocidades de reacción satisfactorias (Wisniak, 1994).

Los catalizadores utilizados para esta reacción están basados en níquel, mezclados con cobre, aluminio y óxidos de silicón. Otro tipo de catalizadores utilizados son los de cobre-cromo, los cuales tienen una alta selectividad pero baja actividad. Por otra parte, estos catalizadores tienen la desventaja de ser altamente sensibles a distintos venenos del catalizador. En general son usados para hidrogenar aceite de soja, el cual, parcialmente hidrogenado es muy utilizado para ensaladas, por ser muy estable. Los metales preciosos (paladio, oro, bismuto) también son posibles catalizadores de hidrogenación. Son muy activos y más selectivos que los de níquel, pero más costosos. La alta actividad de estos catalizadores permite trabajar a más bajas temperaturas de reacción. Varios inconvenientes se presentan por el uso de catalizadores. Impurezas en el aceite pueden envenenar el catalizador. Compuestos tales como jabones, fosfátidos y carbohidratos son absorbidos en la superficie del catalizador, mientras otros, como los ácidos grasos,

pueden destruir el catalizador por reacción química. Glicéridos oxidados y peróxidos reducen la actividad del catalizador. Compuestos del azufre y monóxido de carbono pueden venir como impurezas del hidrógeno que es producido por el proceso de su elaboración y son efectivos venenos de estos catalizadores (Hui, 1996).

La reacción de hidrogenación se puede llevar a cabo en forma parcial o total. Dependiendo de las condiciones operativas y de las características del catalizador, la reacción puede evolucionar más o menos rápidamente, y es posible detener la reacción en distintos niveles de conversión, dando productos más o menos saturados (hidrogenados), proveyendo de esta manera grasas con distintas características químicas y funcionales. Mientras más se permite que la reacción avance se obtendrán grasas hidrogenadas o saturadas más duras, pasando por graduales cambios de dureza a medida que la reacción avanza.

La reacción de hidrogenación puede seguirse mediante distintas determinaciones analíticas. Entre ellas pueden citarse la composición, el índice de yodo, el índice de refracción y el consumo de hidrógeno. Propiedades tales como el punto de fusión y la curva de sólidos tienen relación directa con la consistencia y funcionalidad del producto. La determinación del punto final de la operación de hidrogenación de aceites vegetales constituye un problema crítico. De mucha utilidad es la disponibilidad de sistemas de medición on-line para monitorear el índice de refracción, el cual se correlaciona con el índice de yodo para cada tipo de aceite. El índice de yodo es una medida directa del grado de saturación alcanzado en la reacción (Kellens y Hendrix, 1998).

El objetivo del presente trabajo es estudiar los efectos de las principales variables operativas de la reacción de hidrogenación del aceite de jojoba sobre la eficiencia de saturación. Para alcanzar este objetivo se analizó el producto obtenido, evaluando el índice de yodo y el punto de fusión del producto final a diferentes condiciones operativas y tiempos de reacción. Se estudió además el comportamiento cinético mediante el ajuste de un modelo potencial de pseudo-primer orden.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Descripción del equipamiento

Se utilizó un reactor marca PARR, construido en acero inoxidable, con capacidad máxima de 0,6 L, presiones máximas de 6 atm y con agitador, calefacción y sistema de enfriamiento. La temperatura se programó y controló mediante un controlador PID Cole Palmer y termocuplas tipo K-J. El vacío necesario para la etapa previa de calentamiento fue provisto por una bomba de vacío marca DOSI-VAC, del tipo de anillo de aceite. (presión mínima alcanzada 0,3 atm).

El reactor trabaja en forma discontinua y requiere de operaciones previas posteriores a la reacción

para la concreción de los ensayos. A continuación se plantean las etapas seguidas en cada ensayo:

1. Pre calentamiento a presión atmosférica, hasta 100°C.
2. Desgasado en vacío para evitar futuras oxidaciones de los ácidos grasos.
3. Calentamiento en vacío hasta la temperatura de reacción (con agitación).
4. Etapa de reacción con introducción de hidrógeno.
5. Enfriamiento de la masa reaccionante.
6. Filtración para separar la masa reaccionante del catalizador.

Como la hidrogenación es exotérmica, a mayor velocidad de reacción, mayor será el calor desprendido. Esto ayuda a la calefacción del sistema para mantener la reacción en su temperatura de trabajo. Una vez que el sistema ha alcanzado su temperatura de trabajo, puede necesitar enfriamiento a causa de la exotermicidad de la reacción, a menos que las pérdidas de calor del sistema superen la generación de calor por reacción química. En estas experiencias no fue necesario enfriar sino calentar durante todo el tiempo de reacción.

## 2.2. Determinaciones analíticas

Las muestras obtenidas en los ensayos de hidrogenación son analizadas en el laboratorio para determinar: índice de yodo y punto de fusión. Se siguieron los protocolos normalizados de la *American Oil Chemist's Society (AOCS)* para cada una de las determinaciones (índice de yodo: AOCS Cd 1-25 (89), punto de fusión: AOCS Cc 1-25 (89)) (A.O.C.S., 1994).

## 2.3. Condiciones experimentales

Se utilizó aceite de jojoba refinado proveniente de dos proveedores regionales. El catalizador utilizado es de marca PRICAT Modelo 9910 (25% níquel en estearina). La proporción de catalizador utilizada varió en el rango de 0,2-0,6% (porcentaje másico de catalizador en aceite), dependiendo de la experiencia llevada a cabo. La presión de operación varió en el rango 2-4 atmósferas absolutas y las temperaturas entre 120-200°C. La velocidad de agitación empleada fue de 1425 rpm. Se tomaron muestras de la masa reaccionante a 30, 60 y 90 min respectivamente.

## 2.4. Experiencias

Se llevaron a cabo 2 conjuntos de experiencias para cumplir con los siguientes objetivos:

- 1) Análisis del efecto de condiciones operativas en la reacción de hidrogenación; con el objetivo de determinar qué variables ensayadas tienen efecto significativo en el producto de

reacción, y qué tipo de efecto ejercen, las variables operativas seleccionadas fueron: la temperatura de reacción, la presión y la cantidad de catalizador. Existen antecedentes en la literatura relacionados al efecto de estas variables sobre otros aceites que justifican esta primer selección de variables (Hui, 1996).

- 2) Estudio cinético de la reacción de hidrogenación: con el objetivo de realizar un análisis teórico-experimental del modelado cinético de la operación de hidrogenación se han realizado un conjunto de experiencias complementarias que permitan determinar las constantes específicas de reacción así como las energías de activación y factores pre-exponenciales para esta reacción.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Análisis del efecto de condiciones operativas en la reacción de hidrogenación

Se ha utilizado un diseño factorial 2<sup>3</sup> con dos réplicas para cada una de las variables seleccionadas como factores: temperatura, presión y cantidad de catalizador (Montgomery, 1991). Las experiencias fueron realizadas en forma aleatoria. La variable observada elegida como un indicador del avance de la reacción de hidrogenación es el índice de yodo. Los valores empleados para cada una de las variables experimentales analizadas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1  
Límites de los factores analizados

	Temperatura (°C)	Presión (atm)	Catalizador (% másico)
Nivel Inferior	120	2	0,2
Nivel Superior	200	4	0,6

Para el análisis de los resultados experimentales se emplearon las variables codificadas  $x_1$ ,  $x_2$  y  $x_3$  definidas de la siguiente manera:

$$x_1 = \frac{T - (T_{baja} + T_{alta})/2}{(T_{baja} - T_{alta})/2} \quad (1)$$

$$x_2 = \frac{C - (C_{baja} + C_{alta})/2}{(C_{baja} - C_{alta})/2} \quad (2)$$

$$x_3 = \frac{P - (P_{baja} + P_{alta})/2}{(P_{baja} - P_{alta})/2} \quad (3)$$

siendo  $T$  la temperatura en °C,  $C$  la cantidad de catalizador en % másico relativo de catalizador/aceite, y  $P$  la presión en atmósferas absolutas. Los

subíndices «bajo» y «alto» se refieren a los niveles inferior y superior respectivamente, del diseño estadístico seleccionado.

El modelo de regresión, expresado en variables codificadas, obtenido del diseño factorial  $2^3$  es de la forma:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3 + b_7x_1x_2x_3 + \epsilon \quad (4)$$

donde  $y$  representa la respuesta de interés (valor de yodo a 30, 60 y 90 min de reacción),  $b_0$  a  $b_7$  son los parámetros del modelo y  $\epsilon$  representa el residuo o error de la estimación. Estos parámetros se han evaluado a través de los datos experimentales empleando regresión multiparamétrica lineal. Los valores de los parámetros  $b_1$  a  $b_7$  corresponden a la mitad de los efectos principales e interacciones en tanto que  $b_0$  cuantifica el efecto promedio.

Se realizaron 16 experiencias de reacción para el diseño factorial  $2^3$  seleccionado, correspondiendo a las 8 diferentes combinaciones de tratamientos y sus respectivas réplicas. En la Tabla 2 se muestran los resultados experimentales del avance de la reacción expresado como índice de yodo para distintos tiempos de reacción, en cuatro condiciones operativas diferentes, y a  $120^\circ\text{C}$  y  $200^\circ\text{C}$  de temperatura de reacción.

El grado de saturación logrado a  $200^\circ\text{C}$  de temperatura es notoriamente mayor que en los ensayos a  $120^\circ\text{C}$ .

Se puede observar a través de los resultados experimentales que la temperatura es una de las variables de mayor influencia en la velocidad de hidrogenación. En general, a mayor temperatura la velocidad de reacción aumenta, hecho evidenciado

por la constante de velocidad específica expresada en función de la temperatura (según la Ley de Arrhenius). Pero, a mayor temperatura disminuye la solubilidad del hidrógeno en el aceite, dificultando el contacto del hidrógeno con el aceite en la superficie del catalizador, de manera que son dos efectos contrapuestos. Ambas causas conducen a que la concentración de hidrógeno en el catalizador disminuya a mayor temperatura.

El efecto de la presión depende de las características del catalizador utilizado. El mecanismo aceptado de doble hidrogenación en catalizadores de níquel asume que el paso controlante es la reacción superficial entre el hidrógeno atómico y el aceite no adsorbido. En general a menor presión el gas cubre menos superficie de catalizador, lo que disminuye la velocidad de reacción.

La cantidad de catalizador influye en la velocidad de reacción. A mayor cantidad de catalizador, mayor superficie de catálisis expuesta, mayor será la velocidad de reacción. No obstante esto ocurrirá hasta un cierto punto, donde el hidrógeno deje de disolverse lo suficientemente rápido y este efecto desaparecerá.

En la Figura 1 se observa la variación del punto de fusión con el tiempo de reacción para cuatro condiciones operativas diferentes. A mayor punto de fusión mayor grado de consistencia se espera del aceite hidrogenado. Este parámetro es un buen indicador representativo del aspecto físico de la grasa o cera obtenida.

Se llevó a cabo el análisis de varianza respectivo para los tres tiempos de reacción estudiados, obteniéndose los valores de los coeficientes de la regresión propuesta cuya comparación puede ser observada en los diagramas de Pareto que se

Tabla 2  
Resultados experimentales de valor de yodo\*

Tiempo (min)	0,2 % catalizador		0,6 % catalizador	
	Presión 2 atm	Presión 4 atm	Presión 2 atm	Presión 4 atm
<b>Temperatura de reacción: <math>120^\circ\text{C}</math></b>				
0	85,7	85,7	85,7	85,7
15	84,0	82,6	83,0	84,5
30	82,1	78,4	80,5	75,9
45	80,0	75,9	78,5	73,9
60	78,0	71,9	74,7	61,0
75	75,9	68,0	72,9	48,5
90	74,0	66,2	67,8	32,2
<b>Temperatura de reacción: <math>20^\circ\text{C}</math></b>				
0	85,7	85,7	85,7	85,7
15	70,9	66,9	67,5	55,6
30	60,3	50,0	53,2	36,1
45	54,0	26,6	35,5	14,7
60	45,1	11,6	21,1	4,5
75	35,7	6,8	15,6	2,1
90	27,2	2,6	6,0	1,6

\*Valor de yodo: media de dos réplicas.

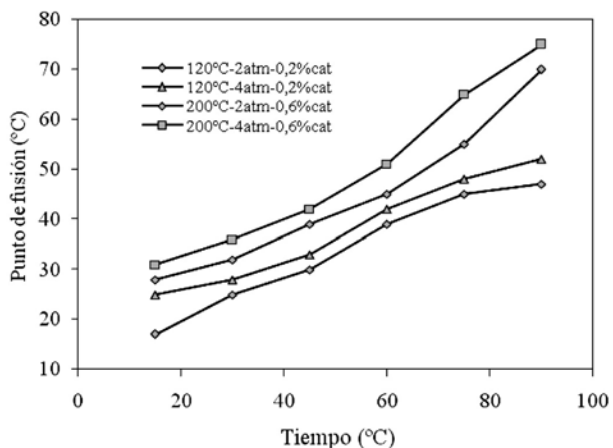


Figura 1 Resultados experimentales de punto de fusión.

muestra en la Figura 2 para los tres tiempos de reacción analizados.

Se observa que a medida que aumenta el tiempo de reacción algunos efectos combinados tienden a no ser significativos. Del análisis del error de las regresiones se pone de manifiesto que los errores están uniformemente distribuidos alrededor del cero.

En todos los tiempos estudiados la temperatura mostró ser la variable de mayor influencia sobre el avance de la reacción de hidrogenación, siendo el efecto de la presión y de concentración de catalizador de aproximadamente el mismo orden, observándose un efecto ligeramente inferior del % del catalizador.

### 3.2. Modelo cinético

Dadas las características del sistema reaccionante y la complejidad de la composición de este aceite, y en base a resultados previos de la literatura (Wisniak, 1994), se propone seguir la reacción a través del índice de iodo utilizando un modelo cinético de pseudo-primer orden donde se expresa la variación de la composición de insaturación a través del índice de iodo. La ecuación diferencial resultante es:

$$\frac{d[VI]}{dt} = -k[VI] ; t = 0 [VI] = VI^0 \quad (5)$$

donde [VI] es el valor de iodo o índice de iodo y k la constante cinética (min<sup>-1</sup>).

La constante cinética se expresa en función de la energía de activación de acuerdo a la ley de Arrhenius. Dado que se analizan en conjunto los datos para diferentes temperaturas, las constantes cinéticas se han escrito en forma reparametrizada, ya que de este modo se consigue una mejor y más rápida convergencia de los programas numéricos.

La ecuación para la ley de Arrhenius queda entonces:

$$k = km \exp(-E/VT) \quad (6)$$

siendo:

$$VT = \frac{(T_m - T)}{RT_m T} \quad (7)$$

con R: Constante Universal de los Gases, T<sub>m</sub>: temperatura de reparametrización y km: constante cinética a la temperatura de reparametrización.

El modelo cinético propuesto fue ajustado por cuadrados mínimos, utilizándose el método de Levenberg-Marquardt (Constantinides y Mostoufi, 1999; Hoffman, 1992). El criterio de minimización de suma de cuadrados de las desviaciones permitió obtener los parámetros presentes en el modelo propuesto. Se utilizaron el software MicroMath Scientific v2.01 for Windows de MicroMath Scientific Software y el entorno Matlab 7.1.

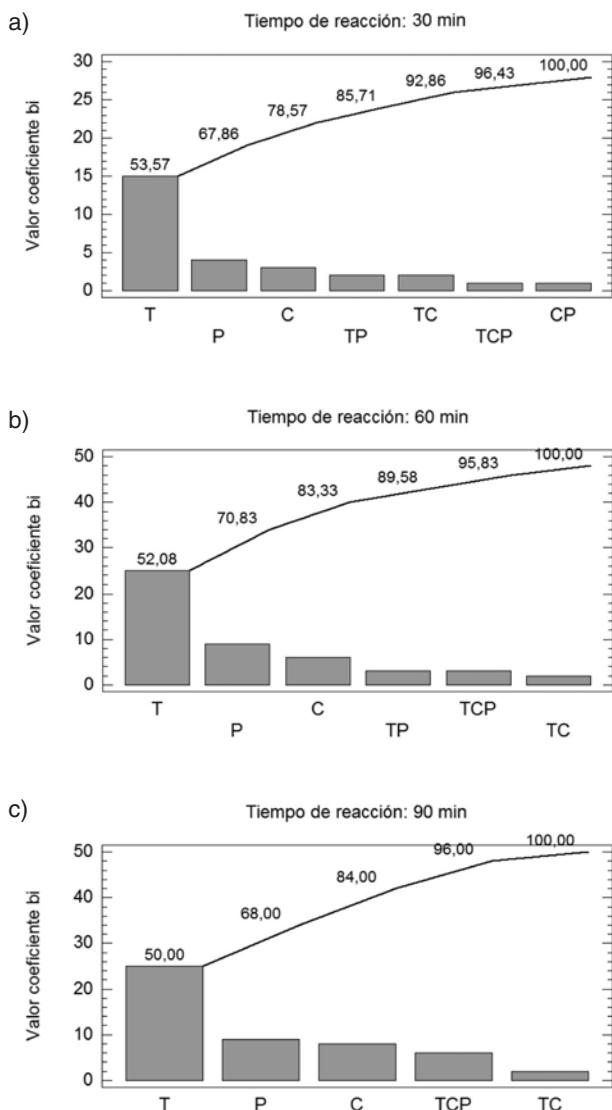


Figura 2 Diagramas de Pareto con la significancia de los efectos: T: temperatura, C: composición del catalizador, P: presión. a) 30 min , b) 60 min y c) 90 min de tiempo de reacción.

En la Tabla 3 se muestran los valores de las constantes cinéticas de velocidad de reacción obtenidas según los ajustes respectivos para cada una de las condiciones operativas utilizadas en los ensayos, dando además la desviación estándar como un parámetro estadístico indicativo de la bondad del ajuste.

De los datos obtenidos de velocidad específica de reacción se destaca el hecho de que un aumento de la temperatura, de la presión y/o de la cantidad de catalizador conduce a un aumento de la velocidad de reacción, siendo la temperatura la que más influencia produce.

En la Tabla 4 se presentan los valores de  $km$  y energía de activación  $E$ , parámetros obtenidos según la ley de Arrhenius con experiencias a 120°C, 160°C y 200°C.

Los valores de energía de activación obtenidos mediante el planteo de esta cinética simplificada de pseudo-primero orden tomando la concentración de reactivo representada por el índice de yodo son bajos comparados en órdenes de magnitud con valores típicos de energías de activación de reacciones químicas.

En la Figura 3 se contrastan los valores experimentales con los obtenidos mediante el modelo potencial propuesto con los parámetros ajustados estadísticamente.

De la Figura 3 se puede destacar que en general el modelo potencial representa adecuadamente el desarrollo de la reacción de hidrogenación del aceite de jojoba, manifestándose mejor ajuste a condiciones de menores conversiones como es el caso de las experiencias A y B.

#### 4. CONCLUSIONES

Se ha estudiado la reacción de hidrogenación del aceite de jojoba, llevando a cabo ensayos a distintas condiciones operativas, determinando el índice de yodo y el punto de fusión de las muestras ensayadas. Se llevó a cabo un análisis estadísticos de los resultados obtenidos, obteniéndose que de los tres efectos considerados: temperatura, cantidad de catalizador y presión, la temperatura es la variable que produjo mayor efecto sobre el índice de yodo considerado como variable de avance de reacción.

Tabla 3  
Parámetros  $k$  estimados para el modelo cinético propuesto

Condiciones operativas			Constante Cinética	
% Catalizador	Presión (atm)	Temperatura (°C)	$k$ (min <sup>-1</sup> )	Desviación Estándar
0,2	2	120	0,0016	2,15 10 <sup>-5</sup>
0,2	2	200	0,0115	0,0096
0,2	4	120	0,0029	5,51 10 <sup>-5</sup>
0,2	4	200	0,0259	0,0028
0,6	3	120	0,0042	0,0003
0,6	3	200	0,0260	0,0037
0,6	4	120	0,0072	0,0013
0,6	4	200	0,0357	0,0023
0,2	3	120	0,0026	3,46 10 <sup>-5</sup>
0,2	3	200	0,0161	0,0008
0,6	2	120	0,0022	9,97 10 <sup>-5</sup>
0,6	2	200	0,0213	0,0016
0,2	2	160	0,0056	0,0001
0,6	2	160	0,0103	0,0003
0,2	4	160	0,0133	0,0004
0,6	4	160	0,0215	0,0010

Tabla 4  
Parámetros  $km$  y  $E$  de Arrhenius (120°C, 160°C, 200°C)

Condiciones operativas		Constante Cinética Específica		Energía de Activación	
% Catalizador	Presión (atm)	$Km$ (min <sup>-1</sup> )	Desviación Estándar	$E$ (kJoule/mol)	Desviación Estándar
0,2	2	0,0020	0,0004	8,067	0,903
0,2	4	0,0046	0,0015	8,067	1,592
0,6	2	0,0034	0,0010	8,511	1,450
0,6	4	0,0092	0,0021	6,350	1,120

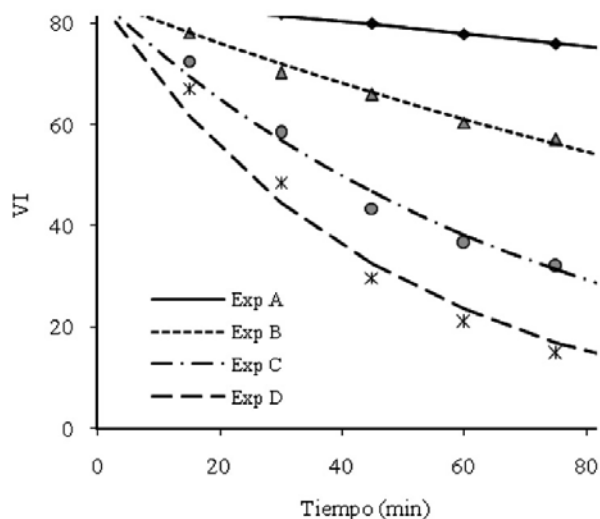


Figura 3

Valor de yodo calculado según modelo potencial vs datos experimentales.

Exp. A: 0,2 % cat, 2 atm, 120°C; Exp. B: 0,2 % cat, 2 atm, 160°C; Exp. C: 0,2 % cat, 4 atm, 160°C; Exp. D: 0,6 % cat, 4 atm, 160°C.

Se ha planteado una ecuación cinética de pseudo-primer orden para representar el mecanismo cinético de la reacción de hidrogenación. Se obtuvieron los parámetros cinéticos del modelo propuesto con buenos indicadores estadísticos del ajuste. Se puede destacar que en general el modelo potencial representa adecuadamente el desarrollo de la reacción de hidrogenación del aceite de jojoba, manifestándose mejor ajuste a condiciones de menores conversiones.

## REFERENCIAS

- Ariaansz R. 1998. Teoría de la hidrogenación. *Aceites y Grasas* **32**, 383-396.
- A.O.C.S. 1994. Official Methods & Recommended Practices of the American Oil Chemists' Society. AOCS Press, USA.
- Constantinides A, Mostoufi N. 1999. Numerical Methods for Chemical Engineers with Mat Lab Applications. Prentice Hall, New Jersey, USA.
- Gunstone F D. 1990. Jojoba oil. *Endeavour* **14**, 40-43.
- Hastert R. 1998. Hidrogenación: principios e historial. *Aceites y Grasas* **32**, 359-361.
- Hoffman J. 1992. *Numerical Methods for Engineers and Scientists*. McGraw-Hill Inc., New York, USA.
- Hui Y. 1996. Edible oil and fat products: processing technology. In *Bailey's Industrial Oil and Fat Products*. John Wiley & Sons, Inc. N.Y., USA.
- Kellens M, Hendrix M. 1998. Desarrollos en la modificación de grasas: hidrogenación-interesterificación-fraccionamiento. Características y beneficios. *Aceites y Grasas* **32**, 399-411.
- Montgomery DC. 1991. *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, USA.
- O'Brien R D. 1998. *Fats and Oils. Formulating and Processing for Applications*. Technomic Publication, USA.
- Tobarez L, Guzman CA, Maestri DM. 2002. Caracterización de las ceras de jojoba de producción argentina obtenidas mediante diferentes metodologías. *Aceites y Grasas* **4**, 516-520.
- Warth AH. 1956. *The Chemistry and Technology of Waxes*. Reinhold, New York, USA.
- Wisniak J. 1987. The chemistry and technology of jojoba oil. *Journal of American Oil Chemists' Society* **64**, 93-111.
- Wisniak J. 1994. Potential uses of jojoba oil and meal, a review. *Industrial Crops and Products* **3**, 43-68.

Recibido: 26/3/08  
Aceptado: 8/5/08