



Universidad Autónoma de San Luis Potosí

FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS

Modelamiento y Simulación
de una Columna de Riego
de Extracción Líquido-Líquido

TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO
PRESENTA

Efrén Hernández Castro

SAN LUIS POTOSI, S. L. P.

1984



T

QD63

.E88

H4

C.1



1080076428



Universidad Autónoma de San Luis Potosí

FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS

Modelamiento y Simulación
de una Columna de Riego
de Extracción Líquido-Líquido

TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO
PRESENTA

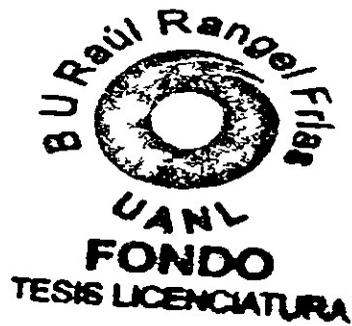
Efrén Hernández Castro

SAN LUIS POTOSÍ, S. L. P.

1984



X
QD63
E88
H4



A DIOS.

A MIS PADRES:

ESTEBAN HERNANDEZ HERNANDEZ.

AMPARO CASTRO DE HERNANDEZ.

A MIS HERMANOS:

ESTEBAN, YOLANDA, ROGELIO,
RUBEN, MARIBEL, GLORIA ROCIO,
FROYLAN ELOY.

A MIS ABUELOS, TIOS Y PRIMOS.

MI AGRADECIMIENTO AL DR. ROBERTO LEYVA RAMOS
POR SU ASESORIA EN LA REALIZACION DE ESTE
TRABAJO.

INDICE.

| CAPITULO. | PAG. |
|---|------|
| 1. RESUMEN. | 1 |
| 2. INTRODUCCION. | 2 |
| 3. REVISION BIBLIOGRAFICA. | 3 |
| 4. MODELADO MATEMATICO. | 15 |
| 5. DESCRIPCION DEL MODULO O PROGRAMA COMPUTACIONAL. | 24 |
| 6. COMPARACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON EL PROGRAMA Y LOS DATOS EXPERIMENTALES. | 33 |
| 7. SIMULACION. | 44 |
| 8. DISCUSION DE RESULTADOS. | 91 |
| 9. CONCLUSIONES. | 98 |
| BIBLIOGRAFIA. | 100 |
| NOMENCLATURA. | 101 |
| APENDICE. LISTADO DEL PROGRAMA COMPUTACIONAL. | 104 |

1. RESUMEN.

Un programa computacional para diseñar y simular una columna de riego de extracción líquido-líquido se desarrolla en este trabajo. El modelo incluye la hidrodinámica del sistema, así como el transporte de masa en la interfase líquido-líquido. El cálculo de la altura de la columna se basa en el método de los coeficientes globales de transporte de masa.

Comparando los resultados obtenidos con este modelo y los reportados experimentalmente, se concluye que las correlaciones de los parámetros hidrodinámicos y el coeficiente global de transporte de masa no permiten utilizar este programa computacional para el diseño de este tipo de columnas, porque se pueden tener errores hasta del 200%. Sin embargo, por medio de la simulación se obtienen aspectos muy interesantes del efecto de los parámetros característicos de una columna de riego en la altura de esta. Algunos de ellos son:

a) La altura de la columna resulta, en determinadas circunstancias, independiente del número de boquillas u orificios del distribuidor.

b) Conforme las densidades de las dos fases son más similares, la altura de la columna es mayor.

c) El % de retención de la fase dispersa afecta drásticamente la altura de la columna.

d) La tensión superficial entre las fases influye de manera importante en la altura de la columna.

2. INTRODUCCION.

El principal objetivo de este trabajo es desarrollar un módulo computacional de extracción líquido-líquido en columnas de riego, mediante el cual se puede determinar la forma como influyen en el proceso de extracción cada uno de los parámetros característicos de esta operación, tales como las densidades, viscosidades, gastos volumétricos y tensión interfacial de las fases, la difusividad del soluto, la cantidad de fase dispersa en la columna y otros.

Con este módulo se obtiene un mejor conocimiento de la extracción en columnas de riego y de otro tipo, y muy importantes criterios e indicaciones que ayuden en la operación real de una columna. Este módulo también permite realizar una simulación de la columna para conocer la sensibilidad del comportamiento de esta con respecto a cada parámetro de operación.

Los aspectos fundamentales que incluye el módulo son:

- a) Programa para calcular la altura de una columna de riego de extracción líquido-líquido.
 - Modelo matemático de una columna de contacto continuo.
 - Hidrodinámica del sistema.
- b) Comprobación de la utilidad de este.
 - Prueba con datos experimentales.
- c) Simulación.
 - Variación de parámetros característicos para determinar su importancia en la operación de la columna.

Los resultados numéricos del módulo no se pueden usar en el diseño de la columna; pero si muestran cualitativamente el comportamiento de ésta.

3. REVISION BIBLIOGRAFICA.

En este capítulo se hace una revisión de los aspectos más importantes que afectan el comportamiento de la columna de extracción líquido-líquido. Principalmente las ecuaciones de los parámetros hidrodinámicos de una columna de riego que influyen decisivamente en el transporte de masa.

3.1. Antecedentes del Trabajo.

En la Facultad de Ciencias Químicas de la U.A.S.L.P. se han desarrollado ya algunos módulos computacionales de operaciones unitarias de Ingeniería Química. La extracción líquido-líquido en columnas de riego es una nueva experiencia, debido a que hasta ahora no se ha reportado algo parecido.

3.2. Extracción Líquido Líquido.

Cuando la destilación y rectificación no se pueden aplicar, se utiliza la extracción líquido-líquido. Esta es la operación de transferencia de masa en un sistema de dos fases líquidas. En esta los componentes de una solución se separan en virtud de su distribución entre dos fases líquidas mutuamente insolubles.

Cuando se puede utilizar extracción líquido-líquido o la destilación para lograr una cierta separación, se opta generalmente por la destilación, a pesar de sus requerimientos de calor y agua de refrigeración. En extracción es preciso recuperar el disolvente para su posterior reutilización, esto exige también una operación de destilación, y la combinación de ambas es más complicada y generalmente más cara.

Por otra parte en extracción es necesario reponer las pérdidas de disolvente. En muchos casos la elección entre los métodos de destilación y extracción requiere un estudio comparativo de ambos.

Entre las aplicaciones de la extracción líquido-líquido (16) están: Recuperación del ácido acético, fenol, amoníaco y ácido sulfhídrico, producción de aceites lubricantes, refinación de aceites vegetales y recuperación y concentración de vitaminas.

3.3. Aparatos de Extracción.

En extracción líquido-líquido se contactan dos fases líquidas con el fin de favorecer el transporte de masa entre ellas, y posteriormente se separan.

Existen varios tipos de aparatos de extracción (16,24) que se diferencian por la forma de operación, y la forma de contactar y separar las fases.

Clasificación del equipo de extracción líquido-líquido.

Forma de operación continua:

I. Dos fases separadas por gravedad.

a) Contacto hecho a través de una película de una de las fases.

1. Columnas de paredes mojadas.

2. Columnas empacadas.

b) Contacto hecho con una fase dispersa en gotas.

1. Columnas de riego.

2. Columnas de placas.

3. Columnas de platos perforados.

4. Columnas empacadas.

5. Columnas agitadas.

6. Columnas pulsadas.

II. Dos fases separadas por centrifugación.

1. Extractores centrífugos.

Forma de operación por lotes:

a) Mezcladores.

1. Recipientes con agitación.

2. Mezcladores de flujo o tubería.

b) Sedimentadores.

1. No mecánicos (por gravedad)

2. Mecánicos (centrífugas)

La mayor parte de aparatos de extracción operan con flujo continuo, ya sea utilizando sucesivas etapas de contacto o bien un contacto diferencial.

3.3.1. Columnas de Riego.

Estas columnas proporcionan un contacto diferencial en donde los procesos de mezcla y separación se producen en forma continua y simultánea. En la columna de riego que se representa esquemáticamente en la Fig. 3-1, se introduce el líquido ligero por el fondo, dispersándolo en pequeñas gotas mediante las boquillas A. Las gotas del líquido ligero ascienden a través de la masa de líquido pesado que desciende formando una corriente continua. Las gotas se rompen en la parte superior para formar la corriente de fase ligera que sale de la columna. La fase pesada sale por el fondo de la columna. En la fig. 3-1 la fase ligera es la dispersa y la fase pesada es la continua. Sin embargo, se puede invertir la forma de operar dispersando la fase pesada en la parte superior de la columna, para descender luego a través de una corriente continua de la fase ligera. En cualquiera de los dos casos, las gotas se mezclan continuamente, es decir, se ponen en contacto renovado con la otra fase, y también continuamente se están separando de ella. Se produce así una transferencia continua de materia entre las fases, variando la composición de las mismas a medida que fluyen a través de la columna. El equilibrio no se alcanza en ningún plano horizontal del aparato, por el contrario, el alejamiento del equilibrio constituye la fuerza impulsora de la transferencia de materia.

En las columnas reales de riego el contacto entre las gotas y la fase continua no es muy eficaz, excepto en el momento de su formación. En la zona de dispersión puede tener lugar del 40 al 45 % de la transferencia total de materia. Por esta razón, aunque las columnas de riego son de construcción sencilla y fáciles de operar, resultan menos eficaces.

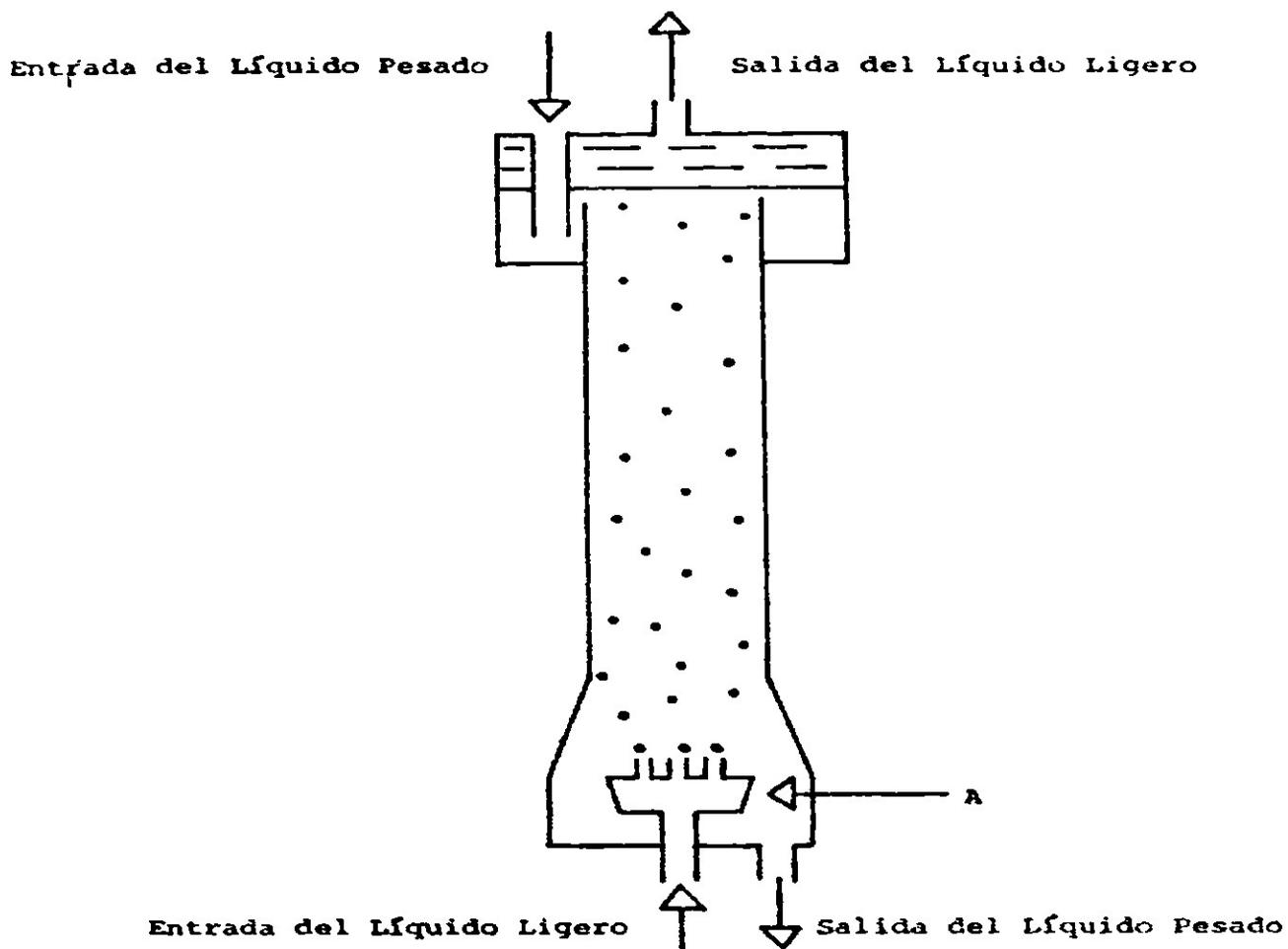


Figura 3-1. Representación Esquemática de una Columna de Riego de Extracción Líquido-Líquido.

3.4. Hidrodinámica de las Columnas de Riego.

Para describir el comportamiento de una columna de riego son necesarios los parámetros hidrodinámicos: tamaño de las gotas, % de retención (Hold up) de la fase dispersa y la velocidad de inundación de la fase continua. Como se discutirá más adelante, el % de retención de la fase dispersa afecta considerablemente el coeficiente global de transporte de masa.

Es importante notar que el estudio que se revisa a continuación fue hecho en ausencia total de transferencia de masa, debido a las dificultades que esta implica.

3.4.1. Diámetro de las Gotas.

En las columnas de riego, el diámetro de las gotas de la fase dispersa es un parámetro muy importante. Este término es necesario para calcular el % de retención de la fase dispersa y la velocidad de inundación de la fase continua.

La dispersión en gotas de una de las fases se hace mediante un distribuidor que puede ser un plato perforado o un grupo de boquillas. Las gotas se pueden formar por varios mecanismos dependiendo de la velocidad de la fase dispersa en los orificios del distribuidor. A bajas velocidades se forman gotas individuales en el orificio del distribuidor; a medida que se aumenta la velocidad se forma un chorro en el orificio, la longitud de este chorro se incrementa con el aumento de la velocidad. Este proceso continúa hasta que se alcanza un valor crítico de la velocidad y después el chorro ya no crece. Las gotas se forman por la desintegración del chorro.

En la región de baja velocidad (antes de la formación del chorro), el diámetro de la gota se puede calcular por la correlación de

Chazal y Ryan (9),

$$v = \frac{\pi d_n \gamma'}{\Delta \rho g} \left\{ \phi + 1.648 \frac{g \Delta \rho d_n v^{1/3}}{2 \gamma' v_s} - 0.857 \frac{d_n \rho_d v_n^2}{2 \gamma'} (1 + \beta) \right\} \quad (3-1)$$

donde

$$\beta = 0 \text{ para } \left(\frac{\rho_d d_n v_n^2}{2 \gamma'} \right)^{1/2} \leq 1.07 - 0.75 \left(\frac{\Delta \rho g d_n^2}{4 \gamma'} \right)^{1/2} \quad (3-2)$$

ó bien

$$\beta = 0.286 \left(\frac{\Delta \rho g d_n^2}{4 \gamma'} \right)^{1/2} \quad (3-3)$$

En la ecuación 3-1 el término ϕ se calcula por la ecuación siguiente:

$$\phi = 0.6 + 0.4 \exp(-2X) \quad (3-4)$$

donde

$$X = d_n \left(\frac{\Delta \rho g}{\pi \gamma' d_n} \right)^{1/3} \quad (3-5)$$

El término v_s , velocidad de deslizamiento, se obtiene por la correlación de Hu y Kitner (9):

$$v_s = \frac{\mu_c p^{0.15}}{\rho_c d} (0.798 Y^{0.784} - 0.75) \text{ para } 2 < Y \leq 70 \quad (3-6)$$

ó bien

$$v_s = \frac{\mu_c p^{0.15}}{\rho_c d} (3.701 Y^{0.422} - 0.75) \text{ para } Y > 70 \quad (3-7)$$

donde

$$Y = \frac{4 \Delta \rho d^2 g}{3 \nu} p^{0.15} \quad (3-8)$$

$$p = \frac{\rho_c^2 \nu^3}{\mu_c^4 \Delta \rho g} \quad (3-9)$$

La velocidad a la que se forma el chorro se calcula por la ecuación de Scheele y Meister (9),

$$v_j = \left(\frac{3 \nu (1 - d_n/d)}{\rho_d d_n} \right)^{1/2} \quad (3-10)$$

Para velocidades mayores que la de formación del chorro, la situación es más complicada, las gotas formadas no son uniformes y la predicción de su tamaño es difícil. Incrementando aún más la velocidad, ésta alcanza un valor crítico para el cuál el chorro tiene la máxima longitud posible y entonces se desintegra en gotas de tamaño uniforme.

Skelland y Johnson (9) reportan la siguiente ecuación para calcular la velocidad crítica del chorro,

$$v_{nc} = 0.69 \left(\frac{d_{jc}}{d_n} \right)^2 \left[\frac{\nu}{d_{jc} (0.514 \rho_d + 0.472 \rho_c)} \right]^{1/2} \quad (3-11)$$

donde d_{jc} es el diámetro crítico del chorro formado, dado por

$$d_{jc} = \frac{d_n}{(0.485 K^2 + 1.0)} \quad \text{para } K < 0.785 \quad (3-12)$$

$$d_{jc} = \frac{d_n}{(1.51 K + 0.12)} \quad \text{para } K \geq 0.785 \quad (3-13)$$

El factor K depende de los parámetros del sistema de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$K = \frac{d_n}{\left(\frac{\gamma}{\Delta\rho g}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (3-14)$$

El diámetro de la gota en la región crítica se calcula según Christiansen y Hixson (9), usando las ecuaciones siguientes:

$$d = \frac{2.07 d_n}{0.485 E_o + 1} \quad \text{para } E_o = \frac{g d_n^2 \Delta\rho}{\gamma} < 0.615 \quad (3-15)$$

$$d = \frac{2.07 d_n}{1.51 E_o^{0.5} + 0.12} \quad \text{para } E_o \geq 0.615 \quad (3-16)$$

Para platos perforados con múltiples orificios, Perrut y Loutaty (18) derivaron la correlación siguiente:

$$d = 2.07 d_n (1 - 0.193 E_o) \quad (3-17)$$

Para calcular el diámetro de la gota en la región entre las velocidades del chorro y crítica, Horvath et. al. (9) sugieren la ecuación

$$\frac{d}{d_{jc}} = \frac{2.06}{v_n/v_{nc}} + 1.47 \ln \frac{v_n}{v_{nc}} \quad (3-18)$$

3.4.2. Porcentaje de Retención (Hold Up) de la Fase Dispersa.

Esta definido como la fracción volumétrica de la fase dispersa, en otras palabras es el volumen total de todas las gotas presentes por unidad de volumen de la columna. Esta relacionado a la velocidad real de deslizamiento por la siguiente ecuación:

$$v_s = \frac{U_c}{1 - \epsilon_d} + \frac{U_d}{\epsilon_d} \quad (3-19)$$

Esta velocidad es diferente de la que se predice con las ecuaciones 3-6 ó 3-7 debido a que ahora en el enjambre de gotas formado por el distribuidor, las velocidades promedio de las gotas se afectan entre sí. De las varias ecuaciones reportadas para relacionar la velocidad real de deslizamiento con el % de retención de la fase dispersa, una de las mejores es la de Pilhofer (9), que se representa como sigue:

$$v_s = \frac{v_c}{d} \frac{3 zq^2 \epsilon_d}{C_I (1 - \epsilon_d)} q^3 \left\{ \left(\frac{C_I q^3 A_r (1 - \epsilon_d)^3}{54 (zq^2 \epsilon_d)^2} + 1 \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right\} \quad (3-20)$$

donde

$$C_I = \frac{\Delta p d g}{6 \rho_c v_\infty} - \frac{3 \mu_c}{\rho_c d v_\infty} \quad (3-21)$$

$$zq^2 = \frac{1 - \epsilon_d}{\epsilon_d} \exp \left(\frac{\epsilon_d}{0.4 - 0.244 \epsilon_d} \right) \quad (3-22)$$

$$q^3 = 5.0 \left(\frac{\epsilon_d}{1 - \epsilon_d} \right)^{0.45} \left\{ 1 - 0.31 \left(\frac{\mu_c}{\mu_d} \right)^{0.39} \right\} \quad (3-23)$$

El término v_∞ se calcula como v_s por las ecuaciones 3-6 ó 3-7.

La ecuación 3-20 se resuelve en forma iterativa con la ecuación 3-19.

El % de retención se calcula encontrando el menor valor absoluto de la diferencia en las v_s calculadas por las ecuaciones 3-19 y 3-20. El rango aproximado de validez es de 1 a 20 % de la fracción de fase dispersa ϵ_d .

El porcentaje de retención también se puede predecir por la ecuación de Hughmark (10). Esta requiere conocer v_s de las ecuaciones 3-6 ó 3-7, y el término h que está definido por:

$$h = \frac{U_d}{v_s} \quad \text{para} \quad \frac{U_d}{v_s} < 0.02 \quad (3-24)$$

$$h = - 0.0023 + 1.11 (U_d/v_s) \text{ para } 0.02 < \frac{U_d}{v_s} < 0.05 \quad (3-25)$$

$$h = - 0.0285 + 1.36 (U_d/v_s) + 2.98 (U_d/v_s)^2 \text{ para } 0.05 < \frac{U_d}{v_s} \quad (3-26)$$

El por ciento de retención se calcula por la ecuación

$$e_d = \frac{U_d + U_d/h - U_c - \sqrt{(U_c - U_d - U_d/h)^2 - 4 U_d^2/h}}{2 (U_d/h)} \quad (3-27)$$

Estas ecuaciones tienen una desviación absoluta promedio del 15%, dependiendo del sistema líquido-líquido usado.

3.4.3. Velocidades de Inundación en Columnas de Extracción Líquido-Líquido.

Para cada velocidad de flujo de uno de los líquidos hay una velocidad máxima posible para el otro, controlada por las propiedades fisicoquímicas del líquido, el diseño del aparato y la fuerza impulsora. Si se intenta sobrepasar la velocidad máxima del segundo líquido, uno de los líquidos será expulsado del equipo, y entonces se dice que se ha "inundado" la columna. Sakiadis y Johnson (12) derivaron teóricamente una ecuación generalizada para calcular la velocidad de inundación de la fase continua en columnas de riego:

$$1 + 1.8 \left(\frac{U_d}{U_c} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\rho_d}{\rho_c} \right)^{\frac{1}{2}} = C_s \left(\frac{U_{cf}^2}{g} \frac{\rho_c}{\Delta \rho} \mu_c^{\frac{1}{2}} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3-28)$$

La constante C_s está relacionada con el diámetro promedio de las gotas por la ecuación:

$$C_s = 0.565 d^{\frac{1}{2}} \quad (3-29)$$

donde d = diámetro de la gota, pulg.

μ_c = viscosidad de la fase continua, cp.

$g = 4.17 \times 10^8 \text{ ft/hr}^2$.

La ecuación 3-28 también se ha derivado en ausencia de transporte de masa.

3.4.4. Coefficiente Global de Transporte de Masa.

En extracción líquido-líquido el coeficiente global de transporte de masa se obtiene referido a la fase dispersa o la continua. En cualquiera de los casos es afectado drásticamente por el % de retención de la fase dispersa. Laddha y Degaleesan, (12) recomiendan las siguientes ecuaciones para predecir el coeficiente global en columnas de riego:

Referido a la fase continua:

$$K_{oc} a = 0.081 \epsilon_d (1 - \epsilon_d) \left(\frac{g^3 \Delta \rho^3}{\nu \rho_c^2} \right)^{\frac{1}{2}} \left/ \left[(N_{Sc})_c^{\frac{1}{2}} + \left\{ (N_{Sc})_d^{\frac{1}{2}} / m \right\} \right] \right. \quad (3-30)$$

Referido a la fase dispersa:

$$K_{od} a = 0.081 \epsilon_d (1 - \epsilon_d) \left(\frac{g^3 \Delta \rho^3}{\nu \rho_c^2} \right)^{\frac{1}{2}} \left/ \left[(N_{Sc})_d^{\frac{1}{2}} + m (N_{Sc})_c^{\frac{1}{2}} \right] \right. \quad (3-31)$$

Otro procedimiento para calcular el coeficiente global es a partir de los coeficientes individuales de transporte de masa de las dos fases líquidas. Las relaciones válidas sólo para el caso de soluciones líquidas muy diluidas son:

Para la fase dispersa:

$$\frac{1}{K_{od} a} = \frac{1}{k_d a} + \frac{m}{k_c a} \quad (3-32)$$

Para la fase continua:

$$\frac{1}{K_{oc} a} = \frac{1}{m' k_d a} + \frac{1}{k_c a} \quad (3-33)$$

El coeficiente individual de la fase continua se obtiene a partir de la correlación de Ruby y Elgin (24),

$$k_c = 0.725 \left(\frac{d v_s \rho_c}{\mu_c} \right)^{-0.43} \left(\frac{\mu_c}{\rho_c D_c} \right)^{-0.58} v_s (1 - \epsilon_d) \quad (3-34)$$

El coeficiente individual de la fase dispersa para cuando las gotas son de tamaño mayor que el dado por la ecuación

$$d = 7.25 \left(\frac{\nu}{g \Delta \rho p^{0.15}} \right)^{0.5} \quad (3-35)$$

se calcula por

$$k_d = \frac{0.00375 v_s}{1 + \frac{\mu_d}{\mu_c}} \quad (3-36)$$

Para gotas de tamaño menor

$$k_d \approx \frac{D_d}{d} \quad (3-37)$$

El área interfacial se calcula por

$$a = \frac{6 \epsilon_d}{d} \quad (3-38)$$

En las anteriores ecuaciones v_g se obtiene de la ecuación 3-19 y p de la ecuación 3-9.

4. MODELADO MATEMATICO.

4.1. Introducción.

El tamaño de una columna de contacto continuo depende de la velocidad con que se efectúa la transferencia de masa en la interfase de las fases. Esta velocidad es influenciada por:

- 1) Las composiciones de las fases en cada punto de la columna, las cuales están relacionadas por la línea de operación.
- 2) El equilibrio entre ambas fases, dado por la relación de equilibrio.
- 3) El coeficiente global (o individuales, en su caso) de transporte de masa, que es una medida de la facilidad con que se lleva a cabo tal fenómeno de transporte.
- 4) El área total interfacial existente.

En este capítulo se desarrollan las ecuaciones necesarias para obtener la línea de operación de la columna, y después, se deriva la expresión requerida para el cálculo de la altura de la misma. El coeficiente global de transporte de masa y el área interfacial se obtienen con las correlaciones que se discuten en el capítulo anterior. La relación de equilibrio se supone conocida.

4.2. Balances de Masa. Línea de Operación.

Los balances de materia basados en las corrientes que entran y salen de la columna son (Ver Figura 4-1):

$$\text{Balance global: } V_1 + L_2 = V_2 + L_1 \quad (4-1)$$

$$\text{Balance para el soluto: } V_1 y_1 + L_2 x_2 = V_2 y_2 + L_1 x_1 \quad (4-2)$$

donde V = Flujo molar de la fase ligera, g-mol/s.
 L = Flujo molar de la fase pesada, g-mol/s.
 y = Fracción molar del soluto en la fase ligera.
 x = Fracción molar del soluto de la fase pesada.

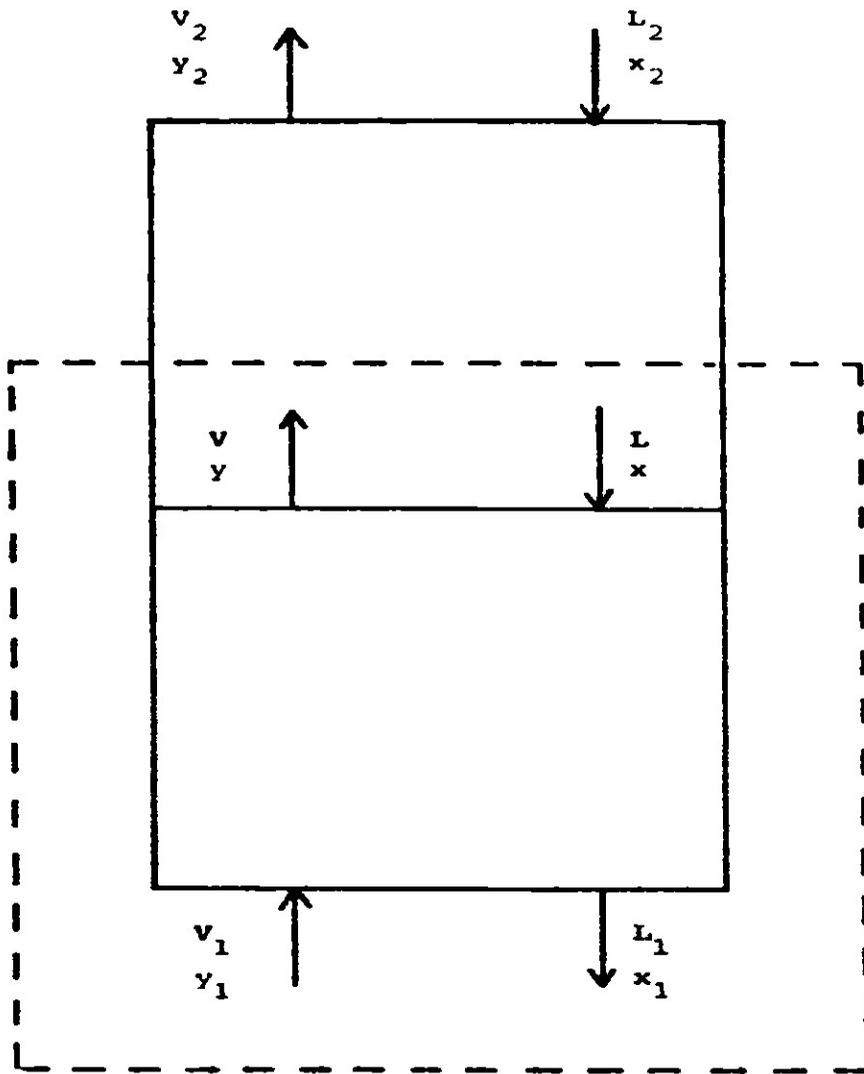


Figura 4-1. Columna de Contacto Continuo.
Línea de Operación.

Los balances de materia para una sección de la columna tal como se muestra por la línea de trazo discontinuo en la Figura 4-1, son los siguientes:

$$\text{Balance global: } V_1 + L = V + L_1 \quad (4-3)$$

$$\text{Balance para el soluto: } V_1 y_1 + Lx = Vy + L_1 x_1 \quad (4-4)$$

En la operación más común de extracción líquido-líquido, el transporte de masa es del soluto A de una fase a otra; o sea, no existe simultáneamente el transporte de masa del solvente, con lo que se tendría el caso de contradifusión equimolar. Así pues, para el caso de difusión de A a través de B estacionario se tiene:

$$V' = V_1 (1-y_1) = V_2 (1-y_2) = V (1-y) \quad (4-5)$$

$$L' = L_1 (1-x_1) = L_2 (1-x_2) = L (1-x) \quad (4-6)$$

Combinando las ecuaciones 4-5 y 4-6 con la ecuación 4-4 se obtiene:

$$V' \frac{y_1}{1-y_1} + L' \frac{x}{1-x} = V' \frac{y}{1-y} + L' \frac{x_1}{1-x_1} \quad (4-7)$$

Esta es la ecuación de la línea de operación y se muestra en la Figura 4-2.

Para el caso de contradifusión equimolar, se tiene que

$$V = V_1 = V_2 \quad (4-8)$$

$$L = L_1 = L_2 \quad (4-9)$$

Sustituyendo estas en la ecuación 4-4, la ecuación de la línea de operación es:

$$y = \frac{L}{V} x + \frac{Vy_1 - Lx_1}{V} \quad (4-10)$$

que es la ecuación de una línea recta.

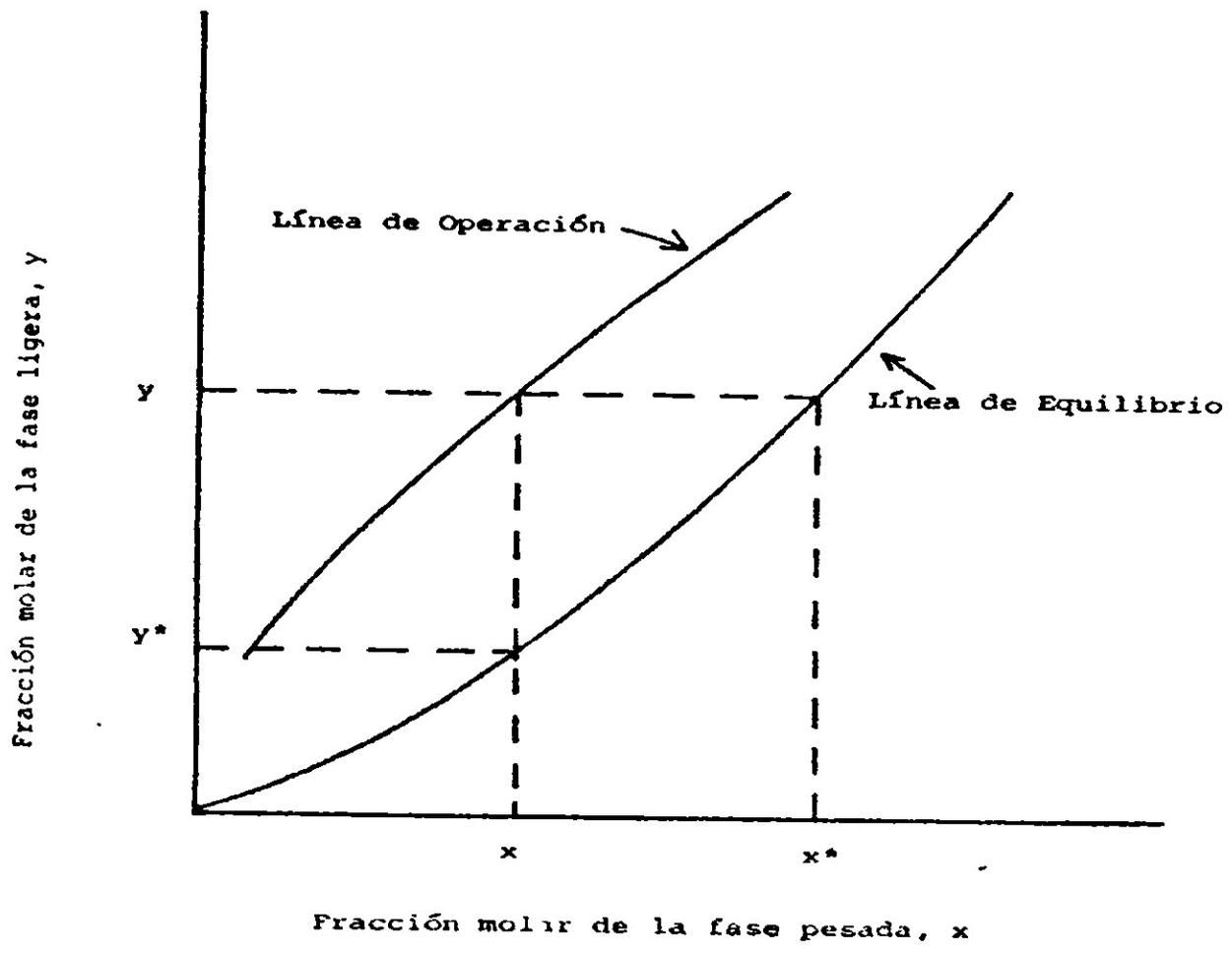


Figura 4-2. Representación Esquemática de las Líneas de Operación y de Equilibrio.

4.3. Método General de Diseño de una Columna de Contacto Continuo.

Método de los Coeficientes Globales.

Considerese el elemento diferencial de columna que se muestra en la Figura 4-3. Realizando un balance global de materia, se obtiene

$$V \Big|_{z + \Delta z} + L \Big|_z = V \Big|_z + L \Big|_{z + \Delta z} \quad (4-11)$$

Dividiendo esta ecuación por Δz y tomando el límite cuando Δz tiende hacia cero,

$$\lim_{\Delta z \rightarrow 0} \left(\frac{V \Big|_{z + \Delta z} - V \Big|_z}{\Delta z} \right) = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \left(\frac{L \Big|_{z + \Delta z} - L \Big|_z}{\Delta z} \right) \quad (4-12)$$

Por medio de la definición de derivada, la ecuación anterior se puede expresar de la forma siguiente:

$$\frac{dV}{dz} = \frac{dL}{dz} \quad (4-13)$$

ó bien

$$dV = dL \quad (4-14)$$

Esta ecuación indica que la masa que gana una fase la pierde la otra.

Un balance de masa del soluto sobre el elemento diferencial da como resultado la ecuación siguiente:

$$V_y \Big|_{z + \Delta z} + L_x \Big|_z = V_y \Big|_z + L_x \Big|_{z + \Delta z} \quad (4-15)$$

Procediendo de la misma manera que en el balance anterior se llega a

$$d(V_y) = d(L_x) \quad (4-16)$$

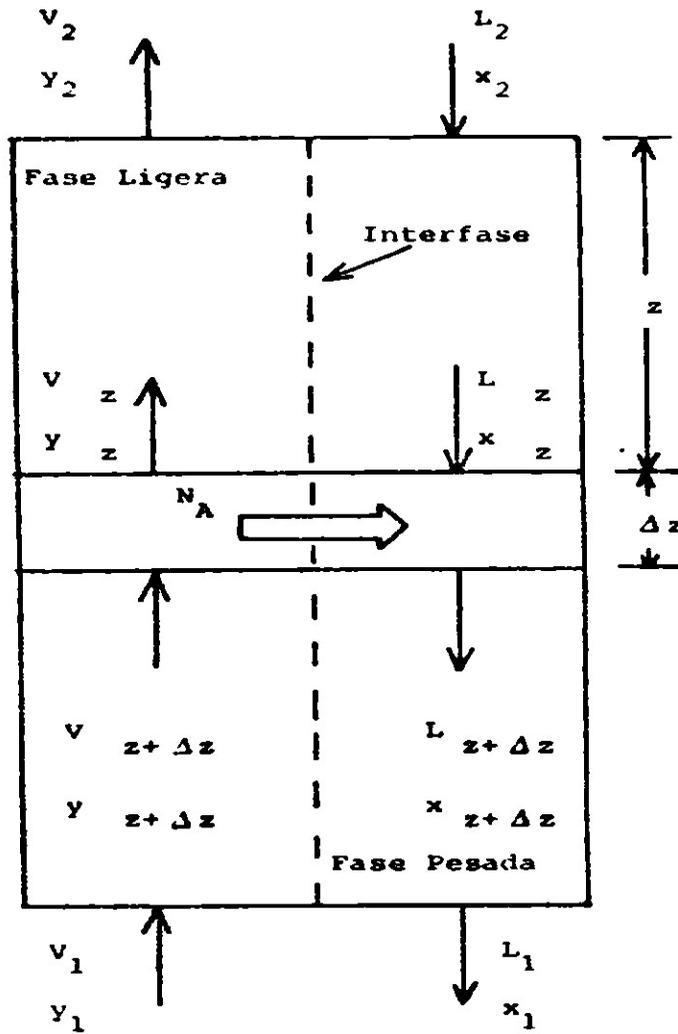


Figura 4-3. Representación Esquemática del Modelo Matemático de una Columna de Contacto Continuo.

Ahora bien, si se realiza un balance de materia del soluto en la fase ligera (Ver Figura 4-3), se obtiene la ecuación siguiente:

$$v_y \Big|_{z+\Delta z} - v_y \Big|_z - N_A \Delta A = 0 \quad (4-17)$$

donde N_A = Transporte de masa del soluto, g-mol/cm²-s.

ΔA = Area interfacial total del elemento diferencial de columna, cm².

El área interfacial se puede expresar por medio de

$$\Delta A = aS \Delta z \quad (4-18)$$

donde $a = \frac{\text{área interfacial}}{\text{volumen de la columna}}, \text{cm}^2 / \text{cm}^3.$

$S = \text{Area seccional de la columna, cm}^2.$

Sustituyendo la ecuación 4-18 en 4-17,

$$v_y \Big|_{z+\Delta z} - v_y \Big|_z - N_A a S \Delta z = 0 \quad (4-19)$$

Dividiendo por Δz y tomando el límite cuando Δz tiende hacia cero,

$$d(v_y) = N_A a S dz \quad (4-20)$$

Siguiendo el mismo procedimiento para el soluto en la fase pesada, se obtiene

$$d(Lx) = N_A a S dz \quad (4-21)$$

El término N_A , transporte de masa del soluto se puede calcular con la ecuación

$$N_A = \frac{K_y}{v_{*y}} (y - y^*) = \frac{K_x}{v_{*x}} (x^* - x) \quad (4-22)$$

donde K'_y = Coeficiente global de transporte de masa referido a la fase ligera, g-mol/cm²-s- fracción molar.

K'_x = Coeficiente global de transporte de masa referido a la fase pesada, g-mol/cm²-s- fracción molar.

y^* = Composición de la fase ligera en equilibrio con la composición de la fase pesada x (Ver Figura 4-2).

x^* = Composición de la fase pesada en equilibrio con la composición de la fase ligera y (Ver Figura 4-2).

Los términos φ_{*y} y φ_{*x} se obtienen por las ecuaciones siguientes:

$$\varphi_{*y} = \frac{(1-y) - (1-y^*)}{\ln \left(\frac{1-y}{1-y^*} \right)} \quad (4-23)$$

$$\varphi_{*x} = \frac{(1-x^*) - (1-x)}{\ln \left(\frac{1-x^*}{1-x} \right)} \quad (4-24)$$

Para el caso de transporte de masa de A a través de B estacionario, por medio de la ecuación 4-5 se obtiene:

$$v = \frac{v'}{1-y} \quad (4-25)$$

Sustituyendo esta ecuación en el primer miembro de la ecuación 4-20 y simplificando términos,

$$d(Vy) = \frac{v \, dy}{(1-y)} \quad (4-26)$$

Así pues, la nueva forma de la ecuación 4-20 es

$$\frac{v}{1-y} \, dy = \frac{K'_y}{\varphi_{*y}} (y-y^*) \, a \, S \, dz \quad (4-27)$$

Integrando con respecto a z , la ecuación final es

$$z = \int_0^z dz = \int_{y_2}^{y_1} \frac{v dy}{\frac{K' a S}{y} (y-y^*) (1-y)} \quad (4-28)$$

ψ_{*y}

De la misma forma

$$z = \int_0^z dz = \int_{x_2}^{x_1} \frac{L dx}{\frac{K' a S}{x} (x^* - x) (1-x)} \quad (4-29)$$

ψ_{*x}

Por medio de una de estas expresiones se calcula la altura de una columna de contacto continuo, para el caso de transporte de masa de A a través de B estacionario.

La integral de la ecuación 4-28 se resuelve por algún método numérico de integración. En la mayoría de los casos la regla de Simpson da muy buenos resultados.

5. DESCRIPCIÓN DEL MÓDULO O PROGRAMA COMPUTACIONAL.

En este capítulo se describe el algoritmo de cálculo que tiene el módulo computacional. Este módulo es un programa que calcula la altura de una columna de riego de extracción líquido-líquido. También se determinan los parámetros hidrodinámicos que afectan la transferencia de masa y que son necesarios para obtener esa altura.

Con este programa es posible observar el efecto de algunos de los parámetros de operación en el comportamiento de una columna de riego.

5.1. Descripción General del Módulo.

En la Figura 5-1 se presenta el diagrama general de flujo del módulo computacional. Al principio se tiene una sección opcional de teoría donde se explica brevemente conceptos generales sobre extracción líquido-líquido en columnas de riego. A continuación está la sección de datos que se requieren para el cálculo de la altura de la columna. Después de esto, se efectúa un balance de masa para el cálculo de la línea de operación. Enseguida se alimenta la relación de las concentraciones de las fases en el equilibrio, para calcular las composiciones de equilibrio en la interfase. Después se obtienen los parámetros hidrodinámicos del sistema: el diámetro promedio de las gotas de la fase dispersa, el % de retención de este, y el % de la velocidad de inundación de la fase continua. Con estos parámetros se obtiene el coeficiente global de transporte de masa y la altura de la columna. Al final está la sección de simulación donde se presenta una lista de los parámetros que se pueden variar para observar su efecto en la altura de la columna.

5.2. Teoría.

En esta sección se presenta un breve resumen sobre extracción líquido-líquido en columnas de riego, consta de las siguientes partes:

- a) Definición de la operación de extracción líquido-líquido.
- b) Descripción de la columna de riego.
- c) Hidrodinámica del sistema.
- d) Método de cálculo de la altura de la columna de riego.

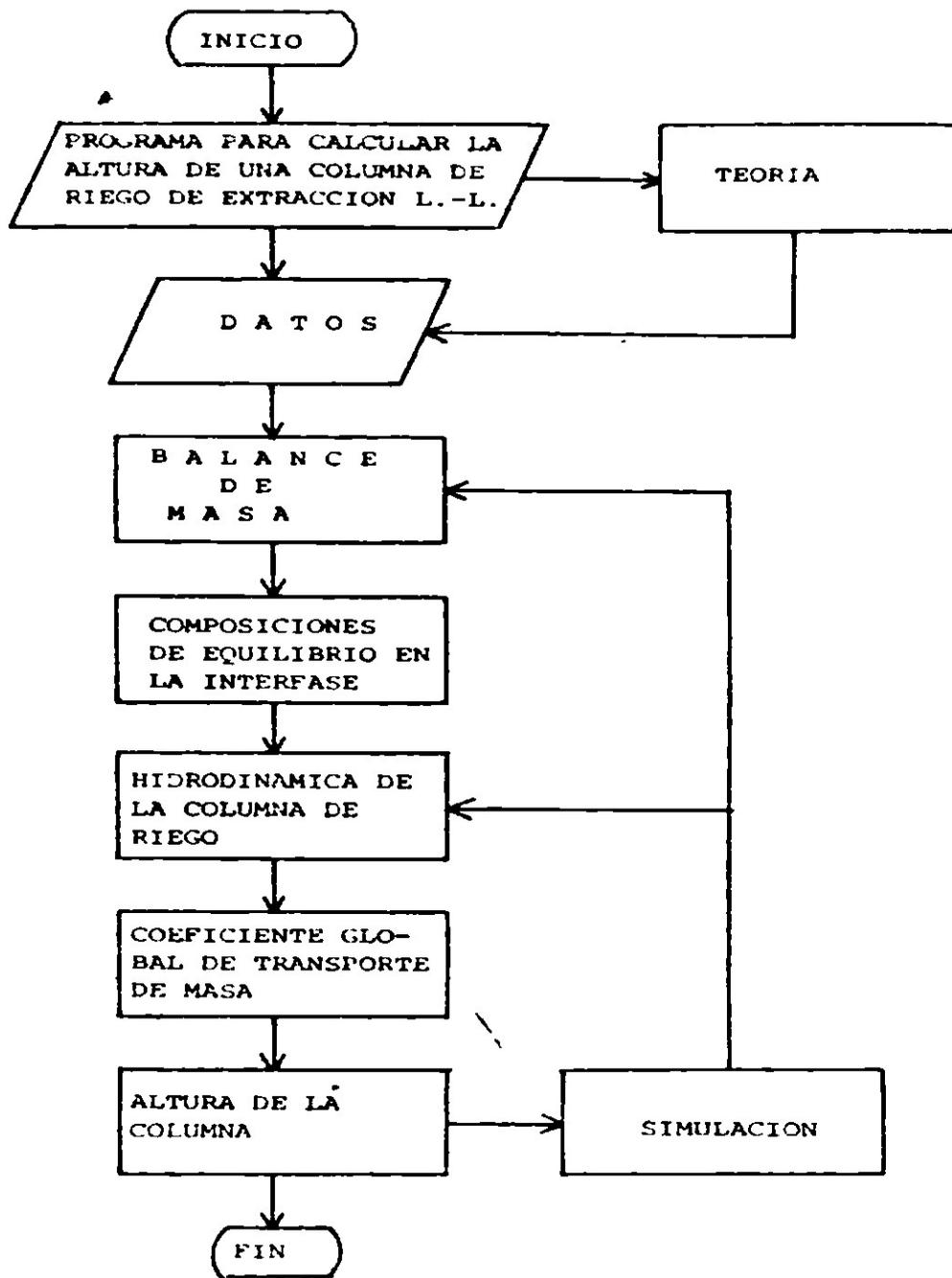


Figura 5-1. Diagrama General de Flujo del Módulo Computacional.

5.3. Datos Requeridos por el Módulo Computacional.

En esta sección se alimentan al módulo la mayor parte de los datos necesarios para obtener la altura de la columna. Es indispensable usar en ellos el Sistema Internacional de Unidades (SI). Los diversos tipos de datos se listan a continuación:

5.3.1. Nombre de los Componentes del Sistema.

- a) Solute, solvente ligero y solvente pesado.
- b) Fase dispersa y fase continua.

5.3.2. Datos de Diseño de la Columna.

- a) Tipo de distribuidor: plato perforado y boquillas.
- b) Número de orificios del distribuidor.
- c) Diámetro del orificio, m
- d) Diámetro de la columna, m

5.3.3. Datos de Operación de la Columna.

- a) Gasto volumétrico de la fase dispersa, m^3/s
- b) Gasto volumétrico de la fase continua, m^3/s

5.3.4. Propiedades Fisicoquímicas.

- a) Peso molecular del soluto, Kg/Kmol
- b) Peso molecular del solvente ligero, Kg/Kmol
- c) Peso molecular del solvente pesado, Kg/Kmol
- d) Densidad de la fase dispersa, Kg/m^3
- e) Densidad de la fase continua, Kg/m^3
- f) Tensión superficial entre las fases, N/m

5.3.5. Propiedades de Fenómenos de Transporte.

- a) Viscosidad de la fase dispersa, Kg/m-s
- b) Viscosidad de la fase continua, Kg/m-s
- c) Difusividad del soluto en la fase dispersa, m^2/s
- d) Difusividad del soluto en la fase continua, m^2/s

5.4. Balance de Masa.

En esta sección se requieren alimentar al módulo los siguientes datos:

- a) Concentración de la fase pesada a la entrada de la columna, mol/lt
- b) Concentración de la fase ligera a la entrada de la columna, mol/lt
- c) Concentración de la fase pesada a la salida de la columna, (cuando el solvente ligero realiza la extracción), mol/lt
- d) Concentración de la fase ligera a la salida de la columna (cuando el solvente pesado realiza la extracción), mol/lt

El algoritmo del balance de masa consta de los siguientes cálculos:

- a) Fracciones molares de las concentraciones conocidas.
- b) Fracción molar y/o concentración desconocida con la ecuación 4-7
- c) Flujo molar de las corrientes ligera y pesada que entran a la columna.
- d) Flujo molar del solvente ligero y del pesado.
- e) Línea de operación. Por medio de la ecuación 4-7 se obtienen 21 puntos o composiciones que están igualmente espaciados a través de la columna.

5.5. Composiciones en la Interfase.

En esta sección se alimenta al módulo la relación de equilibrio del sistema líquido-líquido. Esta puede ser:

1. Ley de Henry o constante de distribución,

$$K = \frac{\text{Concentración de la fase ligera}}{\text{Concentración de la fase pesada}}$$

2. Datos experimentales de concentración de las fases ligera y pesada en el equilibrio.

En el primer caso, las composiciones de equilibrio en la interfase se obtienen con la ecuación

$$y^* = Hx$$

K se transforma a H y las concentraciones a fracción molar.

En el segundo caso, se correlacionan los datos experimentales (en fracción molar) por medio del método de mínimos cuadrados con un

polinomio de la forma

$$Y = AX + B X^2 + C X^3 \quad (5-2)$$

Las composiciones de equilibrio en este caso se calculan con la ecuación

$$y^* = Ax + Bx^2 + Cx^3 \quad (5-3)$$

Una vez que se conocen las composiciones en la interfase se resuelve la integral de la ecuación 4-28 por el método de integración numérica de Simpson, teniendo en cuenta que el término K'_y a S queda fuera de la integral para ser calculado posteriormente:

Las correlaciones para calcular el coeficiente global de transporte de masa requieren conocer la constante de equilibrio del sistema líquido-líquido. En el caso de datos experimentales de equilibrio esta constante se aproxima con la pendiente de la ecuación 5-3.

$$m = \left. \frac{dy^*}{dx} \right|_{x=x_0} = A + 2Bx + 3C x^2 \quad (5-4)$$

5.6. Hidrodinámica de las Columnas de Riego.

En esta sección se calculan los siguientes parámetros hidrodinámicos:

- a) Región de formación de las gotas de la fase dispersa y diámetro promedio de estas.
- b) % de retención de la fase dispersa.
- c) % de la velocidad de la inundación de la fase continua.

Los datos que se requieren son los que se indican en la sección 5.3.

En la Figura 5-2 se muestra un diagrama de flujo de esta sección.

5.6.1. Diámetro Promedio de las Gotas.

Este parámetro se calcula dependiendo de la región de formación de las gotas de la fase dispersa (Ver Capítulo 3); esta región depende de la velocidad de esa fase a través del orificio del distribuidor. Esta velocidad se calcula con la ecuación:

$$v_n = \frac{0.1}{A_0 N} \quad (5-5)$$

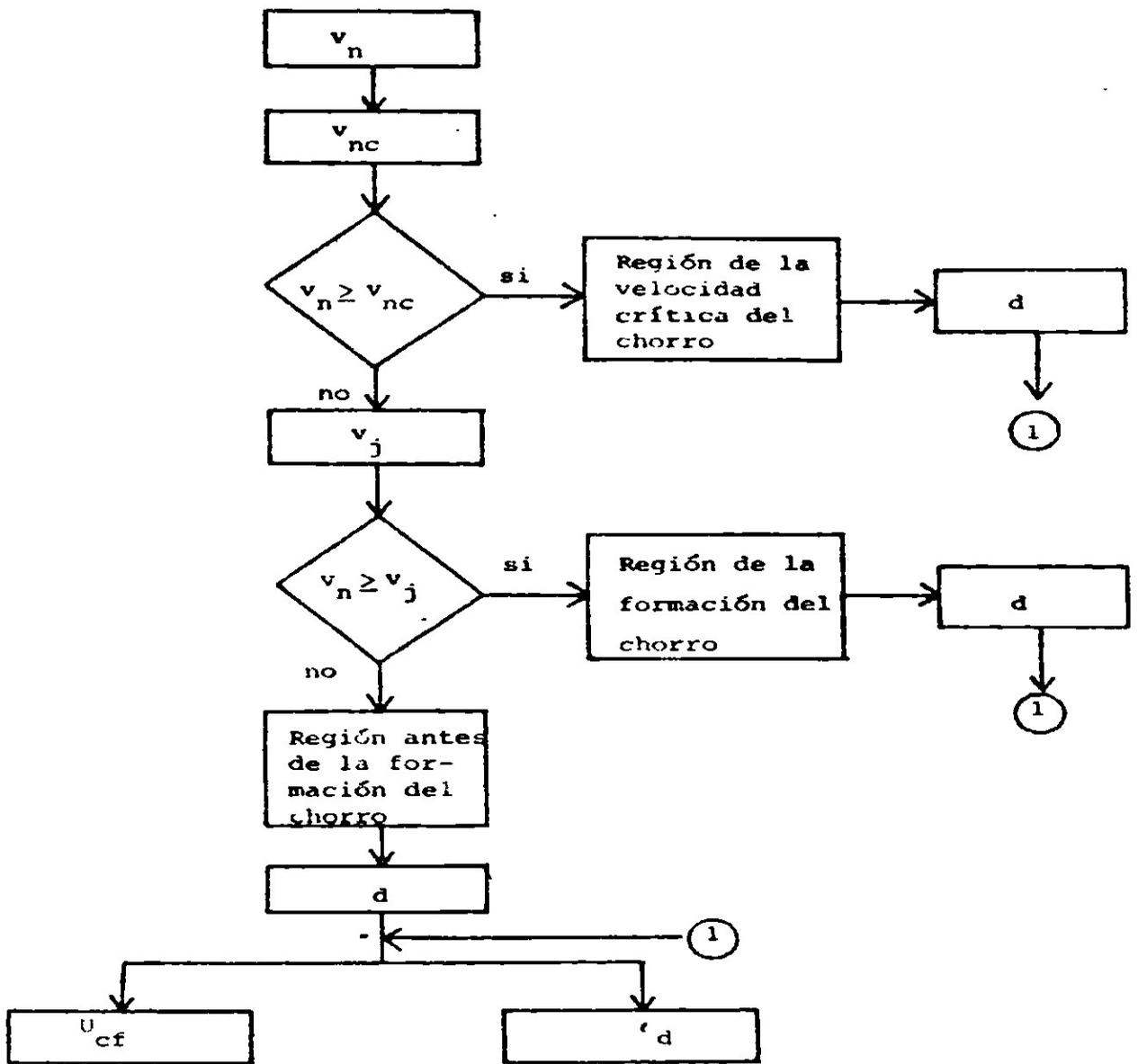


Figura 5-2. Diagrama de Flujo de la Hidrodinámica de la Columna de Riego.

donde Q_d = Gasto volumétrico de la fase dispersa, m^3/s
 A_o = Area seccional del orificio o boquilla, m^2
 N = Número de orificios o boquillas.

El algoritmo para determinar la región o formación de las gotas y el diámetro promedio de estas, es el siguiente:

- a) Cálculo de la velocidad a través del orificio, v_n , con la ecuación 5-5.
- b) Cálculo de la velocidad crítica del chorro, v_{nc} , con la ecuación 3-11.
- c) Si v_n es mayor o igual que v_{nc} entonces se tiene la región a la velocidad crítica del chorro. El diámetro de las gotas se calcula con las ecuaciones 3-15 ó 3-16 cuando el distribuidor es del tipo boquilla, o con la ecuación 3-17 si es de plato perforado.
- d) Si v_n es menor que v_{nc} se calcula la velocidad del chorro formado en el distribuidor, v_j , con la ecuación 3-10. Esta requiere conocer el diámetro de la gota, el cuál se calcula en forma iterativa con la ecuación 3-1. En esta se despeja el diámetro de la gota del término V , volumen de la gota de forma esférica. La aproximación inicial se obtiene de la ecuación 3-18.
- e) Si la velocidad v_n es mayor o igual que v_j se tiene la región de formación del chorro, y el diámetro de la gota se calcula con la ecuación 3-18.
- f) Si la velocidad v_n es menor que v_j , se está en la región de antes de la formación del chorro, y el diámetro de la gota es el que se calculó con la ecuación 3-1.

5.6.2. Porcentaje de Retención de la Fase Dispersa.

Este parámetro hidrodinámico es un término importante incluido en las correlaciones para calcular el coeficiente global de transporte de masa. La forma como se obtiene depende del método que se utilice (Ver capítulo 3)

- a) Método Iterativo
- b) Método Directo.

El método iterativo da muy buenos resultados en el rango de 1 a 15 % de retención de la fase dispersa, ϵ_d . Consiste en obtener el valor de ϵ_d , que da el menor valor absoluto de la diferencia de las - - -

velocidades de deslizamiento v_g , calculadas con las ecuaciones 3-19 y 3-20. El procedimiento es el siguiente:

- a) Empezando con $\epsilon_d = 0.01$ se calculan las velocidades v_g con las ecuaciones 3-19 y 3-20, y se obtiene el valor absoluto de la diferencia de esas velocidades.
- b) Se incrementa ϵ_d en 0.001 y se obtiene el valor absoluto de la nueva diferencia.
- c) Se comparan los valores absolutos anteriores y se retiene el menor.
- d) Si todavía no se alcanza el límite superior $\epsilon_d = 0.20$, se continúa según el paso 2.
- e) El valor de ϵ_d con que se obtuvo el último valor absoluto retenido es el correcto.

El método directo también da buenos resultados y es mucho más simple que el anterior. Se requiere conocer el término Ud/v_g para aplicar cualquiera de las ecuaciones 3-24, 3-25 ó 3-26, según las condiciones; y después se calcula el % de retención de la fase dispersa con la ecuación 3-27.

5.6.3. Velocidad de Inundación de la Fase Continua.

Esta se calcula por medio de la ecuación 3-28; siendo necesario conocer el diámetro promedio de las gotas de la fase dispersa. Con esta velocidad se calcula el % de la velocidad de inundación de la fase continua al que opera la columna, según las condiciones del proceso dadas por los gastos volumétricos de las fases continua y dispersa.

5.7. Coefficiente global de Transporte de Masa.

Este se obtiene por dos correlaciones diferentes (Ver Capítulo 3):

- a) Correlación del coeficiente global.
- b) Correlación de los coeficientes individuales.

En la primera de ellas se utilizan las ecuaciones 3-30 ó 3-31 dependiendo de que la fase ligera sea la fase continua o la fase dispersa, respectivamente.

En la segunda, válida únicamente para el caso de soluciones líquidas muy diluidas, se utilizan las ecuaciones 3-32 ó 3-33 dependiendo, una vez más, de que la fase ligera sea la fase dispersa o la continua, respectivamente.

Los datos que se requieren para obtener el coeficiente global de transporte de masa se indican en sección 5.3. Además, se requiere conocer la constante de distribución α , en el caso de datos experimentales de equilibrio, la pendiente de la ecuación que correlacione estos datos.

5.8. Altura de la Columna.

El coeficiente global de transporte de masa obtenido en la sección anterior como $K_{od} a$ o $K_{oc} a$ se convierte a $K_y a$ con la ecuación

$$K_y a = (C_t)_L K_{od} a \quad (5-6)$$

o bien,

$$K_y a = (C_t)_L K_{oc} a \quad (5-7)$$

La altura de la columna se calcula según la ecuación 4-28, dividiendo el resultado obtenido con el método numérico de Simpson entre el término $K_y a$.

5.9. Simulación.

Después de calcular la altura de la columna se presenta la siguiente lista de parámetros que se pueden variar para observar su efecto particular en el comportamiento de la columna.

- a) Diámetro de la columna (velocidad de inundación de la fase continua).
- b) Número de boquillas u orificios del distribuidor.
- c) Viscosidades de las fases.
- e) Tensión superficial entre las fases.
- f) Difusividad del soluto en las fases.
- g) Gastos volumétricos de las fases.
- h) λ de retención de la fase dispersa.
- i) λ de extracción del soluto.

6. COMPARACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON EL PROGRAMA Y LOS DATOS EXPERIMENTALES.

En este capítulo se muestra como el programa computacional desarrollado representa aproximadamente el funcionamiento real de una columna de riego; mediante la utilización de datos experimentales de tres diferentes sistemas líquido-líquido reportados en la literatura.

6.1. Datos Experimentales.

Los sistemas líquido-líquido utilizados son:

Sistema 1. Eter Etilico-Acido Adípico-Agua, (6).

Sistema 2. Metil Isobutil Cetona-Acido Propiónico-Agua, (26).

Sistema 3. Metil Isobutil Cetona-Acido Fórmico-Agua, (26).

A continuación se muestran los datos experimentales de cada uno de los sistemas en las tablas 6.1 a 6.10. En los tres casos el ácido es el soluto, la solución acuosa es la fase continua, y la orgánica la fase dispersa.

6.2. Resultados del Módulo Computacional con los Datos Experimentales de los Sistemas 1, 2 y 3.

En las tablas 6-11 a 16 la retención de la fase dispersa y el coeficiente global de transporte de masa se han calculado por las dos formas que se tienen para cada uno de ellos (Ver Capítulo 3). En la retención de la fase dispersa el cálculo iterativo se hace con las ecuaciones 3-19 y 3-20, mientras que el cálculo directo se hace con la ecuación 3-27. El coeficiente global de transporte de masa se obtiene dependiendo de que la fase ligera se la dispersa o la continua, con las ecuaciones 3.30 ó 3-31 del coeficiente global, y a partir de los coeficientes individuales con las ecuaciones 3-32 y 3-33.

Tabla 6.1. Datos de Operación de la Columna. Sistema I (6).

| Corrida Temp. | Altura de la Columna | Diámetro de la Columna | Número de Orificios (Plato Perforado) | Diámetro del Orificio | Gasto Volumétrico Fase Dispersa | Gasto Volumétrico Fase Continua |
|---------------|----------------------|------------------------|---------------------------------------|-----------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| °C | m | m | | m | m ³ /s | m ³ /s |
| 43 | 1.524 | 0.15381 | 121 | 0.0023812 | 6.30836×10^{-5} | 4.29472×10^{-5} |

Tabla 6.2. Concentraciones de las Fases a la Entrada y Salida de la Columna. Sistema I (6).

| Concentración de la Fase Continua | | Concentración de la Fase Dispersa | |
|-----------------------------------|----------|-----------------------------------|----------|
| mol/lit | | mol/lit | |
| Entrada | Salida | Entrada | Salida |
| 0.0472983 | 0.026567 | 0.000128267 | 0.015247 |

TABLA 6.3. Datos de Concentraciones en Equilibrio para el Sistema 1, a 25 °C (6).

| Fase Dispersa mol/lt | Fase Continua mol/lt |
|-------------------------|-------------------------|
| 0.008 | 0.01555 |
| 0.01585 | 0.03085 |
| 0.01875 | 0.0366 |
| 0.0415 | 0.08 |
| 0.071 | 0.1305 |

TABLA 6.4. Datos de Propiedades Fisicoquímicas y de Fenómenos de Transporte. Sistema 1 (6). T = 25°C.

| Propiedad | Fase Dispersa (Eter) | Fase Continua (Agua) |
|---|---------------------------------|--------------------------------|
| Densidad, Kg/m ³ | 708 | 997 |
| Viscosidad, Kg/m-s | 0.233x10 ⁻³ | 0.8937x10 ⁻³ |
| Difusividad del Acido Adípico, m ² /s | 4.0106x10 ⁻⁹ (21)* | 0.7127x10 ⁻⁹ (21)** |
| Tensión Interfacial, N/m | 15.912x10 ⁻³ (21)*** | |
| Pesos Moleculares, Kg/Kmol: | Acido Adípico = 146.14 | |
| | Eter Etílico = 74.12 | |
| | Agua = 18.0 | |

* Se calculó por la ecuación de Scheibel.

** Se calculó por la ecuación de Wilke-Chang.

*** Se calculó por la correlación de Goldhammer y Gambill.

TABLA 6.5. Datos de Operación de la Columna. Sistema 2 (26).

| Corrida | Temp. °C | Altura de la Columna m | Diámetro de la Columna m | Número de Boquillas | Diámetro de la Boquilla m | Fase Dispersa $\text{m}^3/\text{s} \times 10^6$ | Gasto Volumétrico Fase Continua $\text{m}^3/\text{s} \times 10^6$ |
|---------|----------|------------------------|--------------------------|---------------------|---------------------------|---|---|
| 1 | 24 | 0.9144 | 0.0358 | 6 | 0.00254 | 2.4396 | 3.4376 |
| 7 | 24 | 0.6096 | 0.0358 | 6 | 0.00254 | 2.5 | 3.4547 |
| 10 | 27 | 0.3048 | 0.0358 | 6 | 0.00254 | 2.56 | 3.4376 |
| 11 | 25 | 0.3048 | 0.0358 | 10 | 0.00254 | 4.111 | 3.37 |
| 21 | 25 | 0.9144 | 0.0386 | 6 | 0.00254 | 2.8747 | 3.9354 |
| 26 | 22 | 0.9144 | 0.0386 | 6 | 0.00254 | 2.9342 | 3.9552 |
| 33 | 25 | 0.1524 | 0.0358 | 6 | 0.00254 | 2.542 | 3.3864 |

TABLA 6.6. Concentraciones de las Fases a la Entrada y Salida de la Columna. Sistema 2 (26).

| Corrida | Concentración de la Fase Continua mol/lit | | Concentración de la Fase Dispersa mol/lit | |
|---------|---|---------|---|---------|
| | Entrada | Salida | Entrada | Salida |
| 1 | 0 | 0.11207 | 0.46785 | 0.3112 |
| 7 | 0 | 0.08545 | 0.47667 | 0.3513 |
| 10 | 0 | 0.06926 | 0.48677 | 0.38736 |
| 11 | 0 | 0.0970 | 0.4879 | 0.4072 |
| 21 | 0.32788 | 0.11768 | 0 | 0.29693 |
| 26 | 0 | 0.08257 | 0.311046 | 0.20330 |
| 33 | 0.31345 | 0.21965 | 0 | 0.13067 |

TABLA 6.7. Datos de Propiedades Fisicoquímicas y de Fenómenos de Transporte. Sistema 2 (26).

| Propiedad | Temp. °C | Fase Dispersa (M I C) | Fase Continua (Agua) |
|--|-------------|--------------------------|-------------------------|
| Densidad, Kg/m ³ | 25 | 801.643 | 998.84 |
| Viscosidad, Kg/m-sx10 ³ | 22 | 0.5984 (21)* | 0.9579 |
| | 24 | 0.5837 | 0.9142 |
| | 25 | 0.5766 | 0.8937 |
| | 27 | 0.5627 | 0.8545 |
| Difusividad del Acido Propiónico, m ² /sx10 ⁹ | 22 | 1.9906 | 0.9319 |
| | 24 | 2.0546 | 0.98306 |
| | 25 | 2.0869 (21)** | 1.009 (1) |
| | 27 | 2.1528 | 1.0623 |
| Tensión Interfacial, N/m | 25 | | 0.0091 (24) |
| Constante de Equilibrio, $K = \frac{C_d}{C_c}$ | | | 2.22 (27) |
| Pesos Moleculares, Kg/Kmol : | | | |
| | | Acido Propiónico = 74 | |
| | | M I C = 100 | |
| | | Agua = 18 | |

* Se calculó por la ecuación de Ertl y Dullien.

** Se calculó por la ecuación de Scheibel.

TABLA 6.8. Datos de operación de la Columna. Sistema 3 (26).

| Corrida | Temp. °C | Altura de Columna m | Diámetro de la Columna m | Número de Boquillas | Diámetro de la Boquilla m | Fase Dispersa $\text{m}^3/\text{s} \times 10^6$ | Gasto Volumétrico Fase Continua $\text{m}^3/\text{s} \times 10^6$ |
|---------|----------|---------------------|--------------------------|---------------------|---------------------------|---|---|
| 4A | 24 | 0.9144 | 0.0358 | 6 | 0.00254 | 2.55 | 3.3523 |
| 14A | 26 | 0.3048 | 0.0358 | 6 | 0.00254 | 2.5 | 3.36 |

TABLA 6.9. Concentración de las Fases a la Entrada y Salida de la Columna. Sistema 3 (26).

| Corrida | Concentración de la Fase Continua mol/lit | Concentración de la Fase Dispersa mol/lit | Entrada | Salida |
|---------|---|---|---------|----------|
| 4A | 0.47083 | 0.34984 | 0 | 0.179413 |
| 14A | 0.32355 | 0.27192 | 0 | 0.07134 |

TABLA 6.10. Datos de Propiedades Fisicoquímicas y de Fenómenos de Transporte. Sistema 3 (26).

| Propiedad | Temp. °C | Fase Dispersa (M I C) | Fase Continua (Agua) |
|---|-------------|----------------------------|---------------------------|
| Densidad, Kg/m ³ | 25 | 801.643 | 998.84 |
| Viscosidad, Kg/m-sx10 ³ | 24 | 0.5837 (21)* | 0.9142 |
| | 26 | 0.5695 | 0.8737 |
| Difusividad del Acido Fórmico, m ² /sx10 ⁹ | 24 | 2.318 | 1.477 |
| | 25 | 2.354 (21)** | 1.516 (1) |
| | 26 | 2.3917 | 1.556 |
| Tensión Interfacial, N/m | 25 | 0.0091 (24) | |
| Constante de Equilibrio, $K = \frac{C_d}{C_c}$ | | 0.42 (27) | |
| Pesos Moleculares, Kg/Kmol: Acido Fórmico = 46 | | | |
| | | M I C = 100 | |
| | | Agua = 18 | |

* Se calculó por la ecuación de Ertl y Dullien.

** Se calculó por la ecuación de Scheibel.

| Corrida | Región de Formación de las Gotas. | Retención de la Fase Dispersa | Velocidad de Inundación de la Fase Continua | Porcentaje de la Velocidad de Inundación de la Fase Continua |
|---------|-----------------------------------|-------------------------------|---|--|
| | | | m/s | |
| | | Iterativo Directo | | |
| | | (a) | (b) | |
| 43 | Velocidad Crítica del Chorro. | 1.6 | 2.517 | 0.01321 |
| | | | | 17.5 |

TABLA 6.12. Coeficiente Global de Transporte de Masa y Altura de la Columna. Sistema 1 (6)
(Ver Tablas 6.1 a 4).

| Corrida | Coeficiente Global Referido a la Fase Dispersa $1/s \times 10^3$ | Altura de la Columna | Altura Calculada | Altura Experimental |
|---------|--|----------------------|------------------|---------------------|
| | | | (ac) | (ad) (bc) (bd) |
| | | | (c) | (d) |
| 43 (a) | 1.676 | 4.5 | 2.453 | 0.914 1.573 0.80 |
| (b) | 2.613 | 5.13 | | 1.61 0.6 1.032 0.52 |

TABLA 6.11. PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS. Sistema 2 (26) (Ver Tablas 6.5 a 7).

| Corrida | Región de Formación de las Gotas. | Retención de la Fase Dispersa | | Velocidad de la Fase Continua | Porcentaje de la Velocidad de Inundación |
|---------|-----------------------------------|-------------------------------|---------|-------------------------------|--|
| | | Iterativo | Directo | | |
| | | (a) | (b) | m/s | |
| 1 | Velocidad Crítica del Chorro. | 2.1 | 2.5 | 0.01385 | 24.64 |
| 7 | " | 2.1 | 2.58 | 0.0137 | 25.05 |
| 10 | " | 2.2 | 2.63 | 0.0136 | 25.14 |
| 11 | " | 4.1 | 4.38 | 0.0099 | 33.73 |
| 21 | " | 2.1 | 2.54 | 0.01365 | 24.62 |
| 26 | " | / 2.2 | 2.62 | 0.01341 | 25.2 |
| 33 | " | 2.2 | 2.617 | 0.01343 | 25.02 |

TABLA 6.14. Coeficiente Global de Transporte de Misa y Altura de la Columna. Sistema 2 (26)
(Ver Tablas 6.5 a 7).

| Corrida | Coeficiente Global | Altura de la Columna | Altura Calculada |
|---------|--------------------|----------------------|---------------------|
| | Referido a la | | Altura Experimental |
| | Fase Dispersa | | |
| | $1/s \times 10^3$ | m | |
| | Ec. Coef. Global | Coef. Individual | |
| | | duales | |
| | (c) | (d) | (ac) (ad) (bc) (bd) |
| 1 (a) | 0.574 | 0.485 | 2.53 2.99 2.12 2.56 |
| (b) | 0.683 | 0.566 | |
| 7 (a) | 0.574 | 0.486 | 1.75 2.07 1.44 1.72 |
| (b) | 0.7 | 0.583 | |
| 10 (a) | 0.642 | 0.533 | 1.12 1.35 0.95 1.15 |
| (b) | 0.763 | 0.623 | |
| 11 (a) | 1.123 | 0.944 | 0.89 1.06 0.84 1.00 |
| (b) | 1.2 | 1.0 | |
| 21 (a) | 0.587 | 0.494 | 3.38 4.02 2.81 3.4 |
| (b) | 0.707 | 0.584 | |
| 26 (a) | 0.574 | 0.491 | 2.85 3.33 2.40 2.85 |
| (b) | 0.6807 | 0.573 | |
| 33 (a) | 0.6146 | 0.5162 | 0.95 1.13 0.80 0.97 |
| (b) | 0.728 | 0.6023 | 2.76 3.27 2.32 2.8 |
| | | | 2.88 3.4 2.35 2.83 |
| | | | 3.68 4.44 3.10 3.8 |
| | | | 2.93 3.5 2.74 3.28 |
| | | | 3.70 4.40 3.07 3.71 |
| | | | 3.11 3.64 2.63 3.12 |
| | | | 6.21 7.40 5.24 6.34 |

TABLA 6.15. Parámetros Hidrodinámicos. Sistema 3 (26) (Ver Tablas 6.8 a 10).

| Corrida | Región de Formación de las Gotas. | Retención de la Fase Dispersa | | Velocidad de Inundación de la Fase Continua | Porcentaje de Inundación de la Fase Continua |
|---------|-----------------------------------|-------------------------------|---------|---|--|
| | | Iterativo | Directo | | |
| | | (a) | (b) | m/s | |
| 4A | Velocidad Crítica del Chorro. | 2.2 | 2.63 | 0.0133 | 25.04 |
| 14A | " | 2.1 | 2.56 | 0.0135 | 24.63 |

TABLA 6.16. Coeficiente Global de Transporte de Masa y Altura de la Columna. Sistema 3 (26) (Ver Tablas 6.8 a 10).

| Corrida | Coeficiente Global Referido a la Fase Dispersa $1/s \times 10^3$ | Altura de la Columna | | | Altura Calculada | | | Altura Experimental | | |
|---------|--|----------------------|-------|------|------------------|------|------|---------------------|------|------|
| | | (c) | (d) | (e) | (ac) | (ad) | (bc) | | (bd) | |
| 4A (a) | 1.846 | 0.68 | 3.00 | 8.16 | 2.52 | 6.85 | 3.28 | 8.92 | 2.75 | 7.5 |
| (b) | 2.2 | 0.81 | | | | | | | | |
| 14A (a) | 1.83 | 0.67 | 1.074 | 2.93 | 0.884 | 2.41 | 3.52 | 9.62 | 2.90 | 7.92 |
| (b) | 2.22 | 0.8137 | | | | | | | | |

7. SIMULACION DE LA OPERACION DE LA COLUMNA Y RESULTADOS.

La importancia de las diferentes variables de operación en el comportamiento de la columna de extracción se analizó por medio de una simulación de la operación de esta. La simulación se realizó por medio del modelo matemático que se resuelve por el módulo computacional. Los parámetros que afectan la operación son:

- 1) Diámetro de la columna.
- 2) Número de boquillas u orificios.
- 3) Densidades de las fases.
- 4) Viscosidades de las fases.
- 5) Tensión superficial entre las fases.
- 6) Difusividad del soluto en las fases.
- 7) Gastos volumétricos de las fases.
- 8) ϵ de retención de la fase dispersa.
- 9) ϵ de extracción del soluto.

La simulación se realizó manteniendo todos los parámetros de operación constantes excepto uno. De esta forma se observó el efecto de este parámetro en el comportamiento de la columna. Los valores de los parámetros que se usaron fueron de tres corridas de los sistemas líquido-líquido ya mencionados anteriormente. La simulación permite conocer la sensibilidad del comportamiento de la columna con respecto a cada una de las variables de operación. Esta información se requiere para el diseño de la columna así como para el diseño del sistema de control.

TABLA 7.1. Efecto del % de la Velocidad de Inundación de la Fase Continua.
Sistema 1, Corrida 43 (Ver Tablas 6.1. a 4)

| Diámetro de la Columna, m | Porcentaje de la Velocidad de Inundación de la Fase Continua, % | Altura de la Columna, m |
|------------------------------|--|----------------------------|
| 0.065 | 98.0 | 1.11 |
| 0.070 | 84.45 | 1.15 |
| 0.074 | 75.57 | 1.19 |
| 0.08 | 64.66 | 1.26 |
| 0.09 | 51.1 | 1.4 |
| 0.102 | 40.0 | 1.59 |
| 0.12 | 28.74 | 1.52 |
| 0.15381* | 18.4 | 1.56 |
| 0.18 | 12.77 | 1.59 |
| 0.22 | 8.55 | 1.59 |
| 0.3 | 4.6 | 1.58 |
| 0.5 | 1.65 | 1.58 |

* Valor real.

TABLA 7.2. Efecto del % de la Velocidad de Inundación de la Fase Continua.
Sistema 2, Corrida 1 (Ver Tabla 6,5 a.7)

| Diámetro de la Columna, m | Porcentaje de la Velocidad de Inundación de la Fase Continua, % | Altura de la Columna , m |
|------------------------------|--|-----------------------------|
| 0.018 | 97.54 | 1.52 |
| 0.0187 | 90.38 | 1.58 |
| 0.020 | 79.0 | 1.71 |
| 0.021 | 71.66 | 1.81 |
| 0.022 | 65.3 | 1.92 |
| 0.023 | 60.0 | 2.0 |
| 0.024 | 55.0 | 2.16 |
| 0.025 | 50.57 | 2.0 |
| 0.0263 | 45.7 | 2.01 |
| 0.03 | 35.11 | 2.05 |
| 0.0358* | 24.64 | 2.12 |
| 0.05 | 12.64 | 2.16 |
| 0.10 | 3.16 | 2.17 |

* Valor real.

TABLA 7.3. Efecto del % de la Velocidad de la Fase Continua. Sistema 3.
Corrida 4 A (Ver Tabla 6.8 a 10)

| Diámetro de la Columna, m | Porcentaje de la Velocidad de Inundación de la Fase Continua, % | Altura de la Columna, m |
|------------------------------|--|----------------------------|
| 0.0180 | 99.125 | 1.79 |
| 0.0188 | 90.87 | 1.88 |
| 0.020 | 80.3 | 2.00 |
| 0.021 | 72.82 | 2.11 |
| 0.023 | 60.71 | 2.36 |
| 0.025 | 51.4 | 2.66 |
| 0.0265 | 45.73 | 2.40 |
| 0.028 | 41.0 | 2.42 |
| 0.030 | 35.68 | 2.44 |
| 0.0358* | 26.2 | 2.51 |
| 0.04 | 20.08 | 2.58 |
| 0.05 | 12.85 | 2.57 |
| 0.08 | 5.02 | 2.58 |
| 0.20 | 0.803 | 2.58 |

* Valor real

TABLA 7.4. Efecto del Número de Orificios del Distribuidor de Plato Perforado. Sistema 1, Corrida 43 (Ver Tablas 6.1 a 4).

| Número de Orificios | Región de Formación de las Gotas | Altura de la Columna m |
|---------------------|------------------------------------|---------------------------|
| 500 | Antes de la Formación del chorro. | 1.300 |
| 200 | " | 1.301 |
| 1 | " | 1.301 |
| 125 | " | 1.302 |
| 124 | " | 1.302 |
| 123 | A la velocidad Crítica del chorro. | 1.573 |
| 121* | " | 1.573 |
| 100 | " | 1.573 |
| 50 | " | 1.573 |
| 10 | " | 1.573 |

* Valor real.

TABLA 7.5 Efecto del Número de Boquillas del Distribuidor. Sistema 2, Corrida 1 (Ver Tablas 6.5 a 7).

| Número de Boquillas | Región de Formación de las Gotas | Altura de la Columna m |
|---------------------|------------------------------------|---------------------------|
| 100 | Antes de la formación del chorro. | 1.935 |
| 20 | " | 1.935 |
| 15 | " | 1.936 |
| 10 | " | 1.936 |
| 8 | " | 1.936 |
| 7 | A la velocidad crítica del chorro. | 2.123 |
| 6* | " | 2.123 |
| 3 | " | 2.123 |

*Valor real.

TABLA 7.6 Efecto del Número de Boquillas del Distribuidor. Sistema 3, Corrida 4A (Ver Tablas 6.8 a 10).

| Número de Boquillas | Región de Formación de las Gotas | Altura de la Columna m |
|---------------------|------------------------------------|---------------------------|
| 100 | Antes de la Formación del chorro. | 2.3 |
| 50 | " | 2.3 |
| 20 | " | 2.3 |
| 10 | " | 2.3 |
| 8 | " | 2.3 |
| 7 | A la velocidad crítica del chorro. | 2.52 |
| 6* | " | 2.52 |
| 3 | " | 2.52 |

* Valor Real.

TABLA 7.7 Efecto de la Densidad de la Fase Continua. Sistema 1,
Corrida 43 (Ver Tablas 6.1 a 4).

| Densidad de la Fase Continua Kg/m ³ | Altura de la Columna m |
|--|------------------------------|
| 2000 | 0.31 |
| 1700 | 0.68 |
| 1500 | 0.85 |
| 1200 | 1.13 |
| 997* | 1.57 |
| 900 | 1.68 |
| 800 | 2.59 |
| 750 | 3.97 |
| 650 | 3.62 |
| 600 | 2.76 |
| 550 | 2.39 |
| 500 | 2.2 |
| 400 | 1.99 |
| 350 | 1.97 |

* Valor real.

TABLA 7.8. Efecto de la Densidad de la Fase Continua. Sistema 2, Corrida 1 (Ver Tablas 6.5 a 7).

| Densidad de la Fase Continua Kg/m ³ | Altura de la Columna m |
|--|------------------------------|
| 2000 | 0.68 |
| 1700 | 0.83 |
| 1500 | 0.99 |
| 1300 | 1.23 |
| 1200 | 1.41 |
| 1100 | 1.67 |
| 998.84* | 2.12 |
| 960 | 2.38 |
| 900 | 2.88 |
| 860 | 3.82 |
| 700 | 3.33 |
| 650 | 2.85 |
| 600 | 2.56 |
| 500 | 2.23 |
| 400 | 2.1 |
| 250 | 2.12 |

* Valor real.

TABLA 7.9. Efecto de la Densidad de la Fase Continua. Sistema 3
Corrida 4A (Ver Tablas 6.8 a 10).

| Densidad de la Fase Continua Kg/m ³ | Altura de la Columna m |
|--|------------------------------|
| 2000 | 0.914 |
| 1750 | 0.051 |
| 1500 | 1.25 |
| 1250 | 1.614 |
| 1100 | 2.017 |
| 998.84* | 2.52 |
| 950 | 2.90 |
| 900 | 3.37 |
| 700 | 3.75 |
| 650 | 3.18 |
| 600 | 2.84 |
| 500 | 2.43 |
| 400 | 2.24 |
| 300 | 2.21 |

* Valor real.

TABLA 7.10. Efecto de la Densidad de la Fase Dispersa. Sistema 1,
Corrida 43 (Ver Tablas 6.1 a 4).

| Densidad de la Fase Dispersa Kg/m ³ | Altura de la Columna m |
|--|------------------------------|
| 2000 | 0.67 |
| 1700 | 0.92 |
| 1500 | 1.1 |
| 1300 | 1.41 |
| 1150 | 1.68 |
| 1100 | 2.08 |
| 950 | 3.03 |
| 900 | 2.14 |
| 850 | 1.76 |
| 800 | 1.54 |
| 750 | 1.38 |
| 708* | 1.57 |
| 650 | 1.45 |
| 600 | 1.39 |
| 550 | 1.33 |
| 450 | 1.27 |
| 350 | 1.24 |

* Valor real.

TABLA 7.11. Efecto de la Densidad de la Fase Dispersa. Sistema 2,
Corrida 1 (Ver Tablas 6.5 a 7).

| Densidad de la Fase Dispersa kg/m ³ | Altura de la Columna m |
|--|------------------------------|
| 2000 | 0.86 |
| 1800 | 0.976 |
| 1600 | 1.14 |
| 1400 | 1.426 |
| 1300 | 1.65 |
| 1200 | 2.02 |
| 1100 | 2.624 |
| 900 | 2.68 |
| 850 | 2.40 |
| 801.643* | 2.12 |
| 700 | 1.766 |
| 600 | 1.57 |
| 400 | 1.35 |

* Valor real.

TABLA 7.12. Efecto de la Densidad de la Fase Dispersa. Sistema 3, Corrida 4A (Ver Tablas 6.8 a 10).

| Densidad de la Fase Dispersa Kg/m ³ | Altura de la Columna m |
|---|---------------------------|
| 2000 | 0.886 |
| 1800 | 1.02 |
| 1600 | 1.216 |
| 1400 | 1.546 |
| 1300 | 1.81 |
| 1200 | 2.24 |
| 1100 | 2.97 |
| 900 | 3.13 |
| 801.643 * | 2.52 |
| 700 | 2.13 |
| 600 | 1.94 |
| 500 | 1.83 |
| 400 | 1.77 |
| 300 | 1.77 |

* Valor real.

TABLA 7.13. Efecto de la Viscosidad de la Fase Continua. Sistema 1, Corrida 43 (Ver Tablas 6.1 a 4).

| Viscosidad de la Fase Continua Kg/m-s x 10 ³ | Altura de la Columna m |
|--|---------------------------|
| 0.1 | 0.64 |
| 0.3 | 0.97 |
| 0.6 | 1.31 |
| 0.8937* | 1.57 |
| 1.0 | 1.66 |
| 1.4 | 1.96 |
| 1.7 | 2.1 |
| 2.0 | 2.19 |
| 2.2 | 2.25 |
| 2.5 | 2.33 |

*Valor real.

TAB 7.14. Efecto de la Viscosidad de la Fase Continua. Sistema 2, Corrida 1 (Ver Tablas 6.5 a 7).

| Viscosidad de la Fase Continua Kg/m-s x 10 ³ | Altura de la Columna m |
|--|---------------------------|
| 0.1 | 0.86 |
| 0.3 | 1.43 |
| 0.5 | 1.8 |
| 0.8 | 2.04 |
| 0.9142* | 2.12 |
| 1.0 | 2.18 |
| 1.2 | 2.30 |
| 1.5 | 2.46 |
| 1.75 | 2.57 |
| 2.0 | 2.7 |
| 2.2 | 2.76 |
| 2.5 | 2.87 |

*Valor real.

TABLA 7.15. Efecto de la Viscosidad de la Fase Continua. Sistema 3,
Corrida 4A (Ver Tablas 6.8 a 10).

| Viscosidad de la Fase Continua Kg/ m-s x 10 ³ | Altura de la Columna m |
|--|------------------------------|
| 0.1 | 1.62 |
| 0.3 | 2.14 |
| 0.5 | 2.42 |
| 0.8 | 2.49 |
| 0.9142* | 2.52 |
| 1.0 | 2.54 |
| 1.2 | 2.58 |
| 1.5 | 2.64 |
| 1.75 | 2.68 |
| 2.0 | 2.73 |
| 2.2 | 2.76 |
| 2.5 | 2.8 |

* Valor real.

TABLA 7.16. Efecto de la Viscosidad de la Fase Dispersa. Sistema 1,
Corrida 43 (Ver Tablas 6.1 a 4).

| Viscosidad de la Fase Dispersa Kg/ m-s x 10 ³ | Altura de la Columna m |
|--|------------------------------|
| 0.05 | 1.28 |
| 0.1 | 1.39 |
| 0.233* | 1.57 |
| 0.3 | 1.65 |
| 0.5 | 1.82 |
| 0.7 | 1.97 |
| 0.8 | 2.03 |
| 1.0 | 2.15 |
| 1.2 | 2.26 |
| 1.5 | 2.41 |
| 1.8 | 2.54 |
| 2.0 | 2.62 |
| 2.2 | 2.7 |

* Valor real.

TABLA 7.17. Efecto de la Viscosidad de la Fase Dispersa. Sistema 2, Corrida 1, (Ver Tablas 6.5 a 7).

| Viscosidad de la Fase Dispersa Kg/m-s x 10 ³ | Altura de la Columna m |
|---|------------------------------|
| 0.1 | 1.85 |
| 0.3 | 1.99 |
| 0.5 | 2.1 |
| 0.5837* | 2.12 |
| 0.6 | 2.13 |
| 0.8 | 2.2 |
| 1.0 | 2.27 |
| 1.2 | 2.32 |
| 1.44 | 2.39 |
| 1.7 | 2.45 |
| 2.0 | 2.52 |
| 2.3 | 2.58 |

* Valor real.

TABLA. 7.18. Efecto de la Viscosidad de la Fase Dispersa. Sistema 3,
Corrida 4A (Ver Tablas 6-8 a 10).

| Viscosidad de la Fase Dispersa Kg/m-s x 10 ³ | Altura de la Columna m |
|---|------------------------------|
| 0.1 | 1.59 |
| 0.2 | 1.86 |
| 0.3 | 2.07 |
| 0.4 | 2.25 |
| 0.5 | 2.4 |
| 0.5837* | 2.52 |
| 0.6 | 2.54 |
| 0.8 | 2.79 |
| 1.0 | 3.0 |
| 1.2 | 3.21 |
| 1.5 | 3.48 |
| 1.8 | 3.72 |
| 2.0 | 3.87 |
| 2.5 | 4.21 |

* Valor real.

TABLA 7.19. Efecto de la Tensión Superficial entre las Fases. Sistema 1, Corrida 43 (Ver Tablas 6.1 a 4).

| Tensión Superficial entre las Fases $N/m \times 10^2$ | Altura de la Columna m |
|---|------------------------------|
| 0.5 | 0.80 |
| 1.0 | 1.28 |
| 1.5912* | 1.57 |
| 2.0 | 1.46 |
| 3.0 | 1.78 |
| 4.0 | 2.05 |
| 5.0 | 2.3 |
| 6.0 | 2.5 |
| 7.0 | 2.70 |
| 8.0 | 2.9 |
| 10.0 | 3.2 |

* Valor real.

TABLA 7.20. Efecto de la Tensión Superficial entre las Fases. Sistema 2, Corrida 1 (Ver Tablas 6.5 a 7).

| Tensión Superficial entre las Fases $N/m \times 10^2$ | Altura de la Columna m |
|---|------------------------------|
| 0.91 | 0.542 |
| 0.45 | 1.40 |
| 0.91* | 2.12 |
| 1.8 | 2.73 |
| 3.0 | 3.5 |
| 4.0 | 4.0 |
| 5.0 | 4.48 |
| 6.0 | 4.88 |
| 7.0 | 5.25 |
| 8.0 | 5.6 |
| 9.1 | 5.51 |
| 10.0 | 6.2 |

* Valor real.

TABLA 7.21. Efecto de la Tensión Superficial entre las Fases. Sistema 3, Corrida 4A (Ver Tablas 6.8 a 10).

| Tensión Superficial entre las Fases N/m $\times 10^2$ | Altura de la Columna m |
|---|------------------------------|
| 0.091 | 0.72 |
| 0.45 | 1.67 |
| 0.91* | 2.52 |
| 1.8 | 3.24 |
| 3.0 | 4.2 |
| 4.0 | 4.80 |
| 5.0 | 5.34 |
| 6.0 | 5.82 |
| 7.0 | 6.25 |
| 8.0 | 6.65 |
| 9.1 | 7.06 |
| 10.0 | 7.38 |

* Valor real.

TABLA 7.22. Efecto de la Difusividad del Solute en la Fase Continua.
Sistema 1, Corrida 43 (Ver Tablas 6.1 a 4).

| Difusividad del Solute en la Fase Continua $m^2/s \times 10^9$ | Altura de la Columna m |
|--|------------------------------|
| 0.1 | 3.3 |
| 0.2 | 2.49 |
| 0.39 | 2.01 |
| 0.7127* | 1.57 |
| 1.0 | 1.41 |
| 1.5 | 1.25 |
| 2.0 | 1.16 |
| 2.5 | 1.09 |
| 4.0 | 0.98 |

* Valor real.

TABLA 7.23. Efecto de la Difusividad del Solute en la Fase Continua.
Sistema 2, Corrida 1 (Ver Tablas 6.5 a 7).

| Difusividad del Solute en la Fase Continua $m^2/s \times 10^9$ | Altura de la Columna m |
|--|------------------------------|
| 0.1 | 5.67 |
| 0.2 | 4.15 |
| 0.5 | 2.8 |
| 0.9976* | 2.12 |
| 1.5 | 1.81 |
| 2.0 | 1.63 |
| 4.0 | 1.3 |

* Valor real.

TABLA 7.24. Efecto de la Difusividad del Solute en la Fase Continua.
Sistema 3, Corrida 4A (Ver Tablas 6.8 a 10).

| Difusividad del Solute en la Fase Continua $m^2/s \times 10^9$ | Altura de la Columna m |
|--|------------------------------|
| 0.1 | 5.18 |
| 0.3 | 3.66 |
| 0.7 | 2.94 |
| 1.0 | 2.72 |
| 1.477* | 2.52 |
| 2.0 | 2.39 |
| 3.0 | 2.24 |
| 4.0 | 2.15 |

* Valor real.

TABLA. 7.25. Efecto de la Difusividad del Solute en la Fase Dispersa.
Sistema 1, Corrida 43 (Ver Tablas 6.1 a 4).

| Difusividad del Solute en la Fase Dispersa $m^2/s \times 10^9$ | Altura de la Columna m |
|--|------------------------------|
| 0.1 | 4.46 |
| 0.5 | 2.57 |
| 1.0 | 2.12 |
| 2.0 | 1.80 |
| 3.0 | 1.66 |
| 4.0106* | 1.57 |

* Valor real.

TABLA. 7.26. Efecto de la Difusividad del Solute en la Fase Dispersa.
Sistema 2, Corrida 1 (Ver Tablas 6.5 a 7).

| Difusividad del Solute en la Fase Dispersa $m^2/s \times 10^9$ | Altura de la Columna m |
|--|------------------------------|
| 0.5 | 2.58 |
| 1.0 | 2.31 |
| 2.0546* | 2.12 |
| 3.0 | 2.03 |
| 4.0 | 1.97 |
| 5.0 | 1.94 |

* Valor real.

TABLA. 7.27. Efecto de la Difusividad del Solute en la Fase Dispersa.
Sistema 3, Corrida 4A (Ver Tablas 6.8 a 10).

| Difusividad del Solute en la Fase Dispersa $m^2/s \times 10^9$ | Altura de la Columna m |
|--|------------------------------|
| 0.7 | 3.82 |
| 1.0 | 3.35 |
| 2.0 | 2.64 |
| 2.318* | 2.52 |
| 3.0 | 2.33 |
| 4.0 | 2.14 |

* Valor real.

TABLA 7.28. Efecto del Gasto Volumétrico de la Fase Continua. Sistema 1, Corrida 43 (Ver Tablas 6.1 a 4).

| Gasto Volumétrico de la Fase Continua $m^3/s \times 10^5$ | Altura de la Columna m |
|---|------------------------------|
| 1.0 | 0.26 |
| 2.0 | 0.56 |
| 3.0 | 0.93 |
| 4.0 | 1.4 |
| 4.2947* | 1.57 |
| 5.0 | 2.06 |
| 6.0 | 3.13 |
| 6.5 | 4.06 |

* Valor real.

TABLA 7.29. Efecto del Gasto Volumétrico de la Fase Continua. Sistema 2, Corrida 1 (Ver Tablas 6.5 a 7).

| Gasto Volumétrico de la Fase Continua $m^3/s \times 10^6$ | Altura de la Columna m |
|---|------------------------------|
| 2.0 | 4.42 |
| 2.5 | 2.76 |
| 3.0 | 2.32 |
| 3.4376* | 2.12 |
| 4.0 | 1.98 |
| 5.5 | 1.75 |
| 6.5 | 1.67 |
| 8.0 | 1.58 |
| 9.0 | 1.54 |
| 10.0 | 1.50 |

* Valor real.

TABLA 7.30. Efecto del Gasto Volumétrico de la Fase Continua. Sistema 3, Corrida 4A (Ver Tablas 6.8 a 10).

| Gasto Volumétrico de la Fase Continua $m^3/s \times 10^6$ | Altura de la Columna m |
|---|------------------------------|
| 0.5 | 0.18 |
| 1.0 | 0.40 |
| 2.0 | 0.90 |
| 2.5 | 1.35 |
| 3. | 1.9. |
| 3.3523* | 2.52 |
| 3.5 | 2.88 |
| 4.0 | 7.53 |

* Valor real.

TABLA 7.31. Efecto del Gasto Volumétrico de la Fase Dispersa. Sistema 1, Corrida 43 (Ver Tablas 6.1 a 4).

| Gasto Volumétrico de la Fase Dispersa $m^3/s \times 10^5$ | Altura de la Columna m |
|--|---------------------------|
| 3.5 | 7.14 |
| 3.6 | 5.1 |
| 4.0 | 4.14 |
| 5.0 | 2.05 |
| 6.0 | 1.42 |
| 6.30836* | 1.57 |
| 8.0 | 1.08 |
| 10.0 | 0.79 |
| 12.0 | 0.63 |

* Valor real.

TABLA 7.32. Efecto del Gasto Volumétrico de la Fase Dispersa. Sistema 2, Corrida 1 (Ver Tablas 6.5 a 7).

| Gasto Volumétrico de la Fase Dispersa $m^3/s \times 10^6$ | Altura de la Columna m |
|--|---------------------------|
| 0.5 | 1.41 |
| 1.0 | 1.51 |
| 1.5 | 1.64 |
| 2.0 | 1.8 |
| 2.4396* | 2.12 |
| 3.0 | 2.41 |
| 3.5 | 2.84 |
| 4.0 | 3.65 |
| 4.5 | 9.66 |
| 5.0 | 6.67 |

* Valor real.

TABLA 7.33. Efecto del Gasto Volumétrico de la Fase Dispersa. Sistema 3, Corrida 4A (Ver Tablas 6.8 a 10).

| Gasto Volumétrico de la Fase Dispersa $m^3/s \times 10^6$ | Altura de la Columna m |
|---|------------------------------|
| 2.3 | 3.7 |
| 2.55* | 2.52 |
| 3.0 | 1.7 |
| 3.4 | 1.34 |
| 4.0 | 1.02 |
| 5.0 | 0.74 |

* Valor real.

TABLA 7.34. Efecto del Por ciento de Retención de la Fase Dispersa. Sistema 1, Corrida 43 (Ver Tablas 6.1 a 4).

| Retención de la Fase Dispersa % | Altura de la Columna m |
|------------------------------------|---------------------------|
| 1.0 | 3.9 |
| 2.0 | 1.97 |
| 2.517* | 1.57 |
| 5.0 | 0.81 |
| 10.0 | 0.43 |
| 20.0 | 0.24 |
| 30.0 | 0.18 |
| 40.0 | 0.16 |
| 50.0 | 0.15 |

* Valor real.

TABLA 7.35. Efecto del Por ciento de Retención de la Fase Dispersa. Sistema 2, Corrida 1 (Ver Tablas 6.5 a 7).

| Retención de la Fase Dispersa % | Altura de la Columna m |
|------------------------------------|---------------------------|
| 1.0 | 5.25 |
| 2.0 | 2.65 |
| 2.5* | 2.12 |
| 3.0 | 1.78 |
| 4.0 | 1.35 |
| 5.0 | 1.1 |
| 6.0 | 0.92 |
| 10.0 | 0.58 |
| 20.0 | 0.324 |
| 50.0 | 0.21 |

* Valor real.

TABLA 7.36 Efecto del Porcentaje de Retención de la Fase Dispersa.
Sistema 3, Corrida 4A (Ver Tablas 6.8 a 10).

| Retención de la Fase Dispersa % | Altura de la Columna m |
|---------------------------------------|------------------------------|
| 2.0 | 3.3 |
| 2.63* | 2.52 |
| 4.0 | 1.68 |
| 6.0 | 1.14 |
| 10.0 | 0.717 |
| 15.0 | 0.506 |
| 20.0 | 0.40 |
| 30.0 | 0.31 |
| 50.0 | 0.26 |

* Valor real.

TABLA 7.37. Efecto del Porcentaje de Extracción del Sólido. Sistema 1,
Corrida 43 (Ver Tablas 6.1 a 4).

| Sólido Extraído | Altura de la Columna |
|--------------------|-------------------------|
| % | m |
| 10 | 0.198 |
| 20 | 0.45 |
| 30 | 0.806 |
| 40 | 1.31 |
| 43.83* | 1.57 |
| 50 | 2.11 |
| 60 | 3.61 |
| 70 | 7.8 |

* Valor real.

TABLA 7.38. Efecto del Porcentaje de Extracción del Sólido. Sistema 2,
Corrida 1 (Ver Tablas 6.5 a 7).

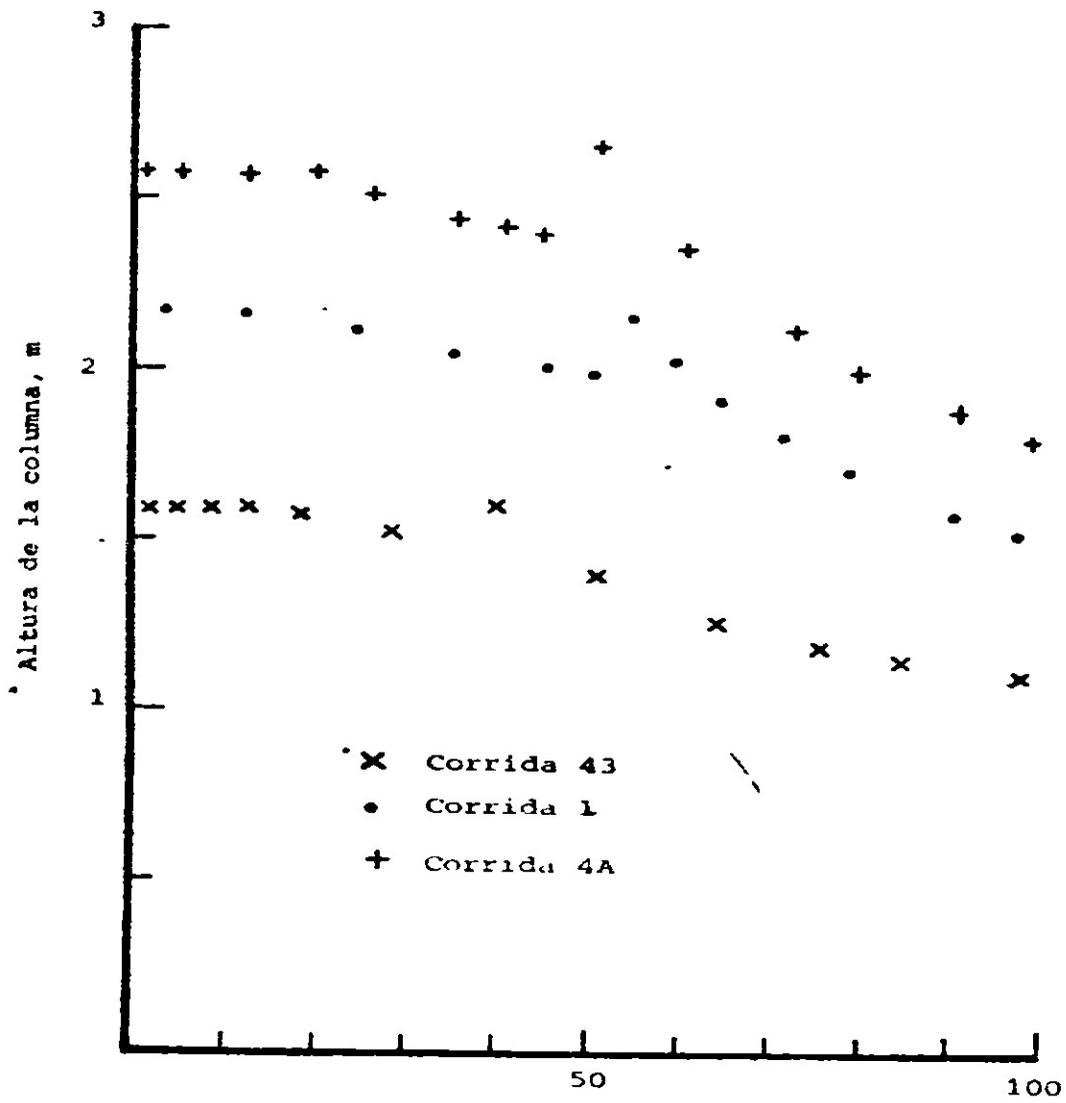
| Sólido Extraído | Altura de la Columna |
|--------------------|-------------------------|
| % | m |
| 10 | 0.412 |
| 20 | 0.96 |
| 30 | 1.76 |
| 33.5* | 2.12 |
| 40 | 3.00 |
| 50 | 5.31 |
| 60 | 12.75 |

* Valor real.

TABLA 7.39. Efecto del Porcentaje de Extracción del Sólido. Sistema 3,
Corrida 4A (Ver Tablas 6.8 a 10).

| Sólido Extraído | Altura de la Columna |
|--------------------|-------------------------|
| % | m |
| 10 | 0.46 |
| 20 | 1.3 |
| 26.63 * | 2.52 |
| 28 | 3.0 |
| 30 | 4.1 |

* Valor real.



% de la velocidad de inundación de la fase continua.

Figura 7-1 Efecto del % de la velocidad de inundación de la fase continua en el comportamiento de la columna.

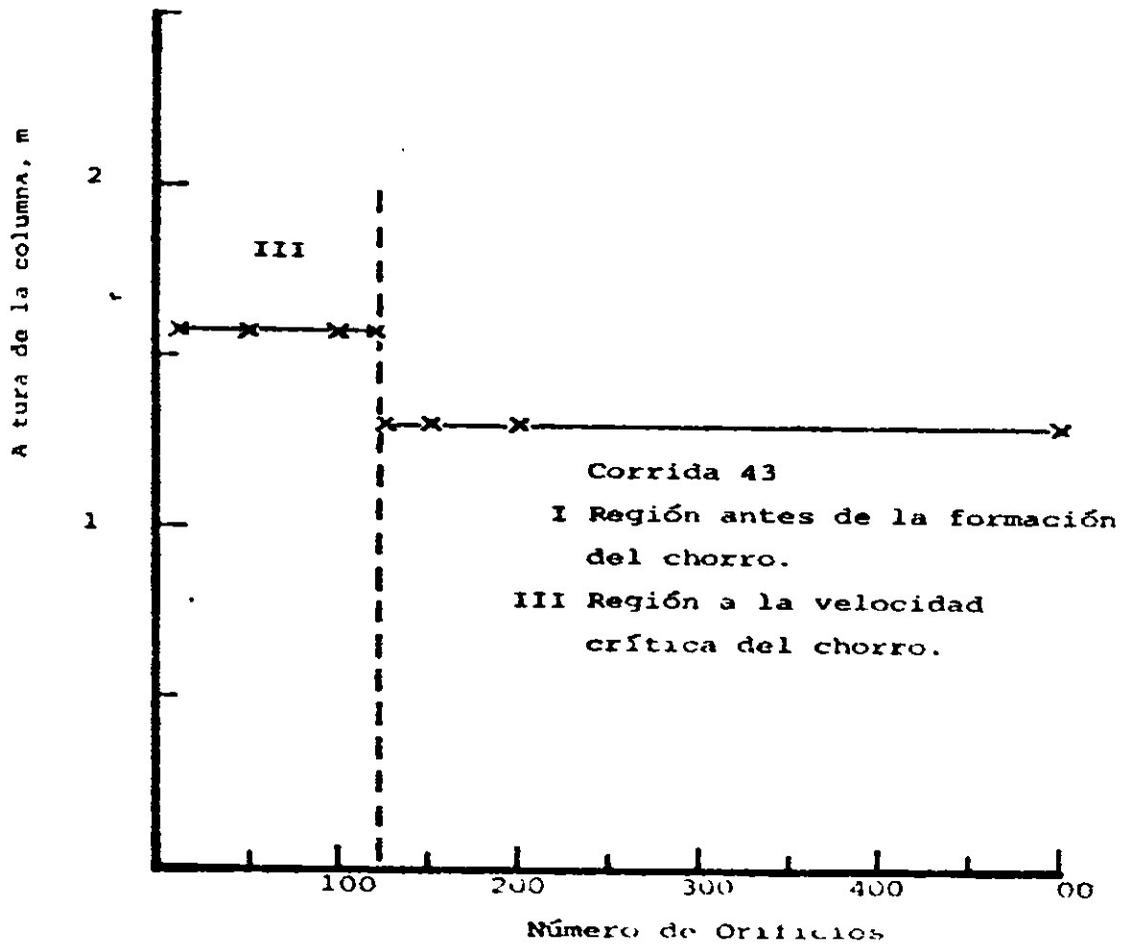


Figura 7-2 Efecto del número de orificios de un distribuidor de plato perforado en el comportamiento de la columna.

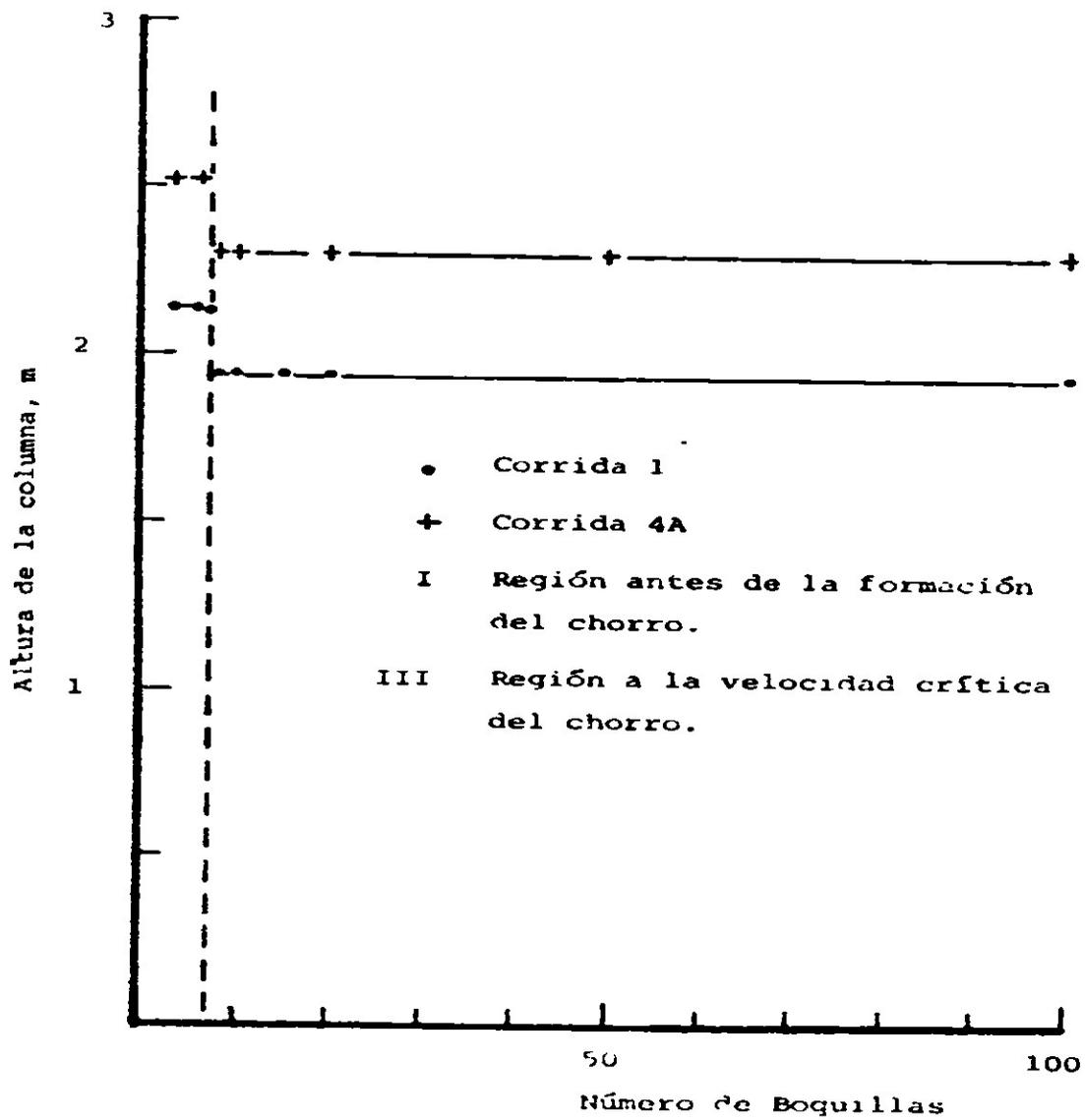


Figura 1- Relación del número de boquillas en el momento de la columna.

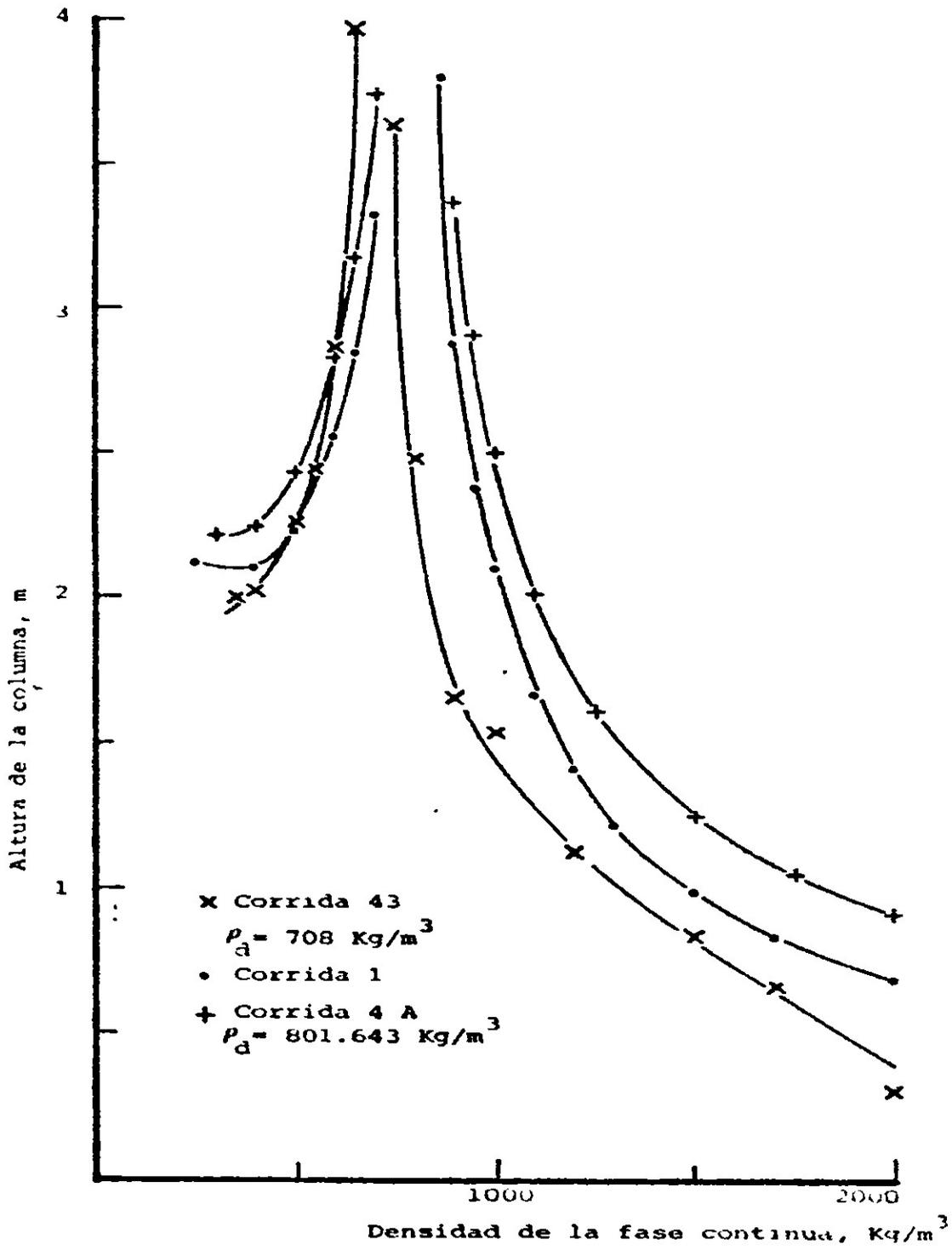


Figura 7-4 Efecto de la densidad de la fase continua en el comportamiento de la columna.

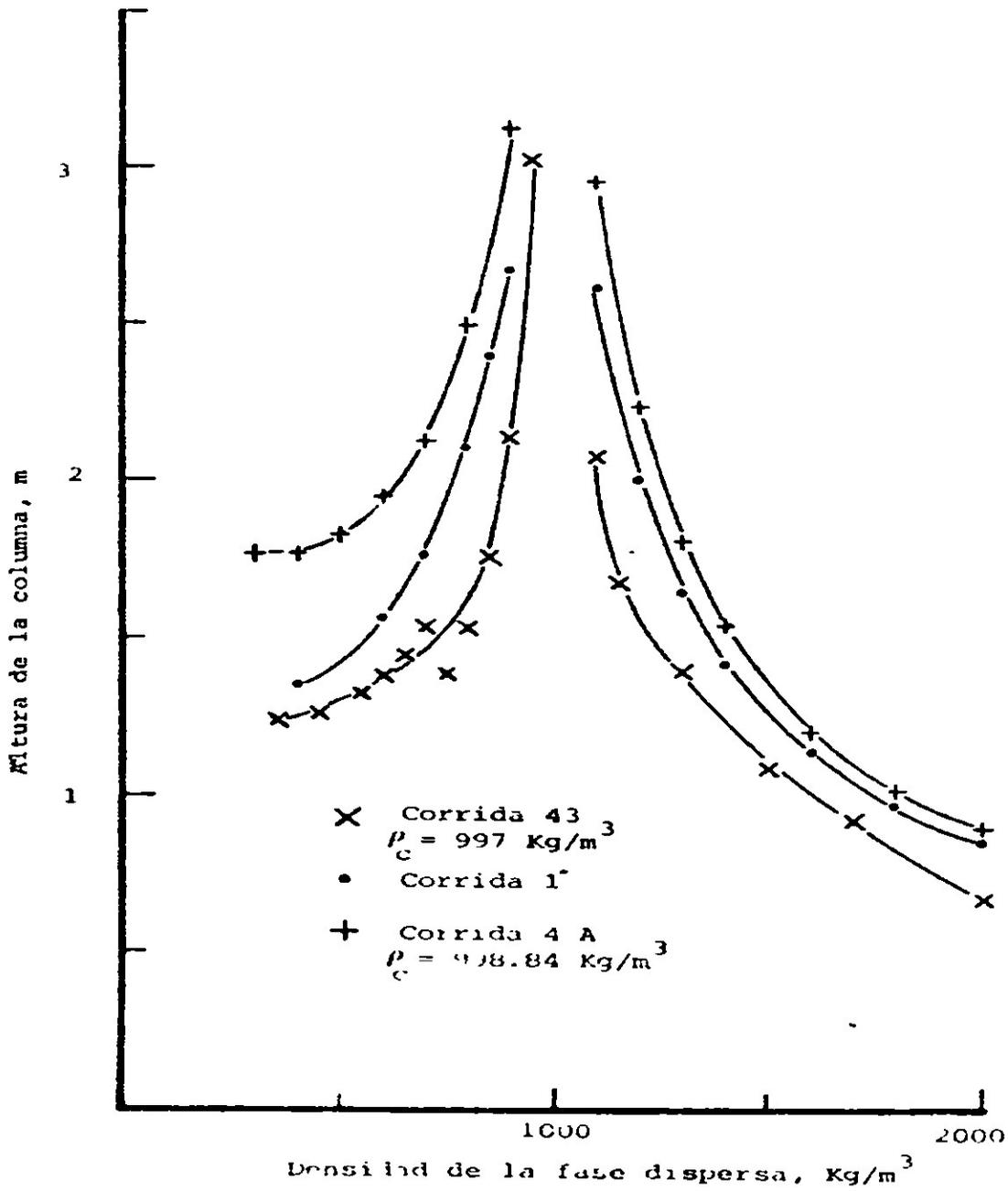


Figura 7-5 Efecto de la densidad de la fase dispersa en el comportamiento de la columna.

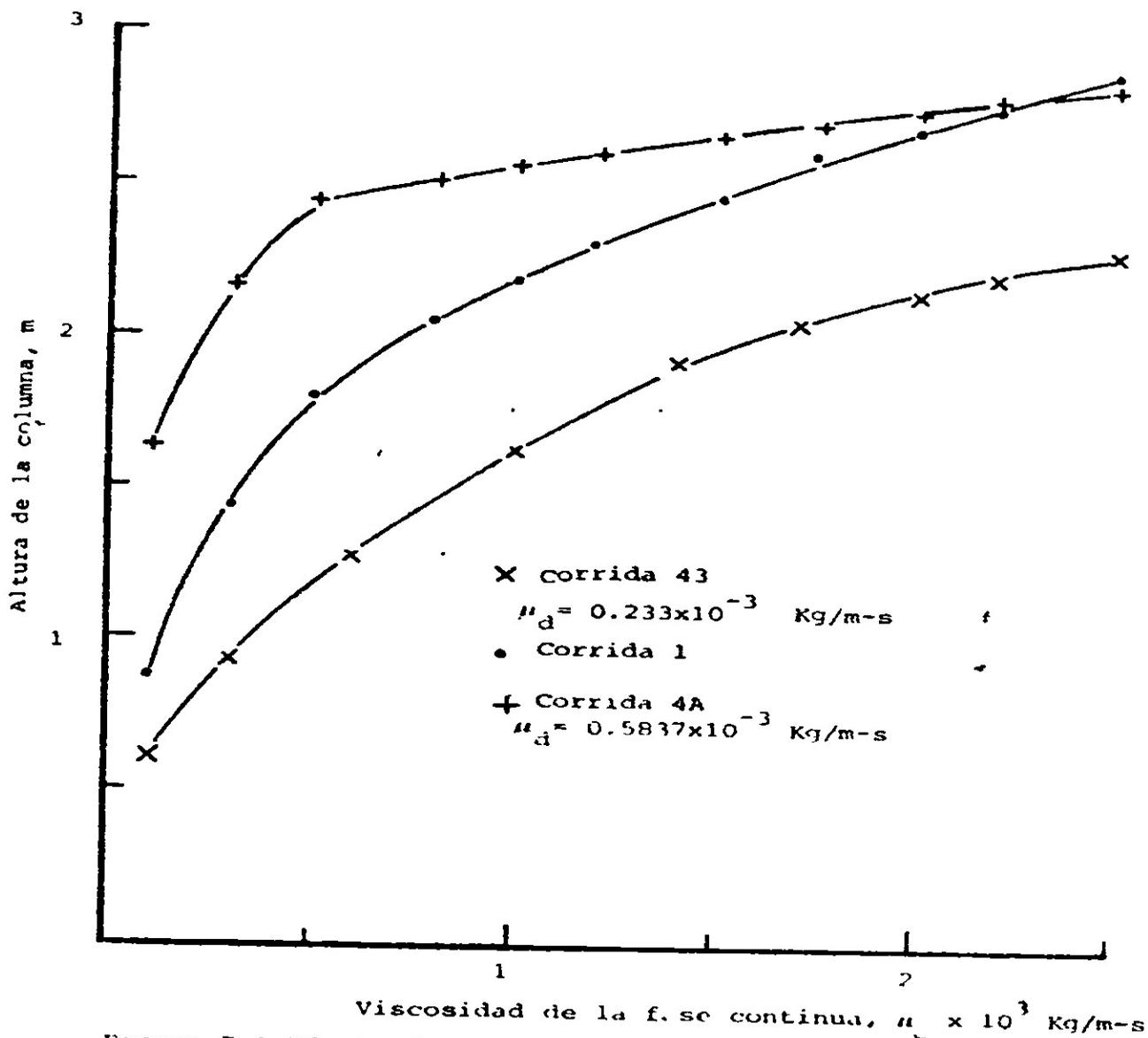


Figura 7-6 Efecto de la viscosidad de la fase continua en el comportamiento de la columna.

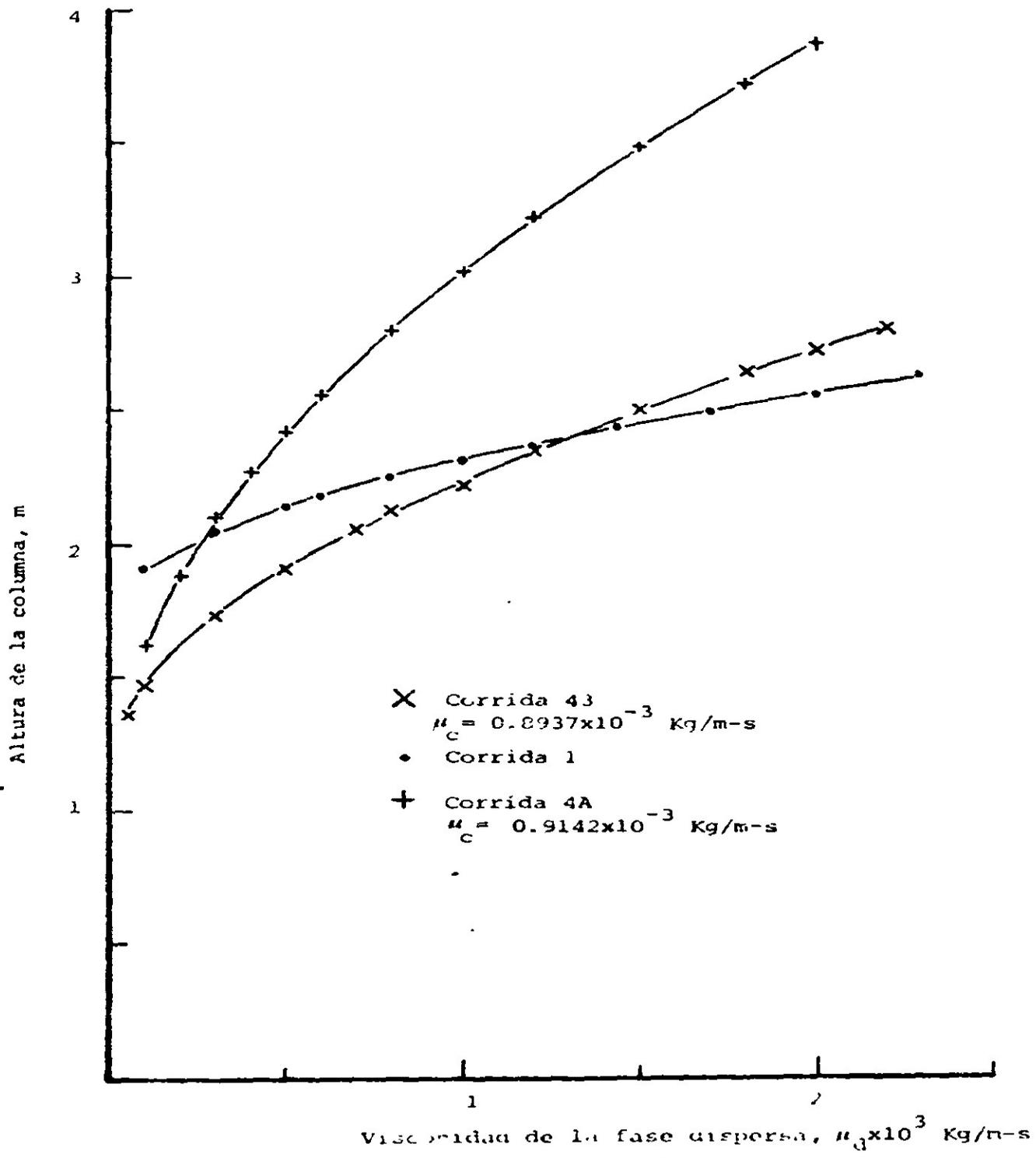


Fig. 7-7 Efecto de la viscosidad de la fase dispersa en el coeficiente de transferencia de la columna.

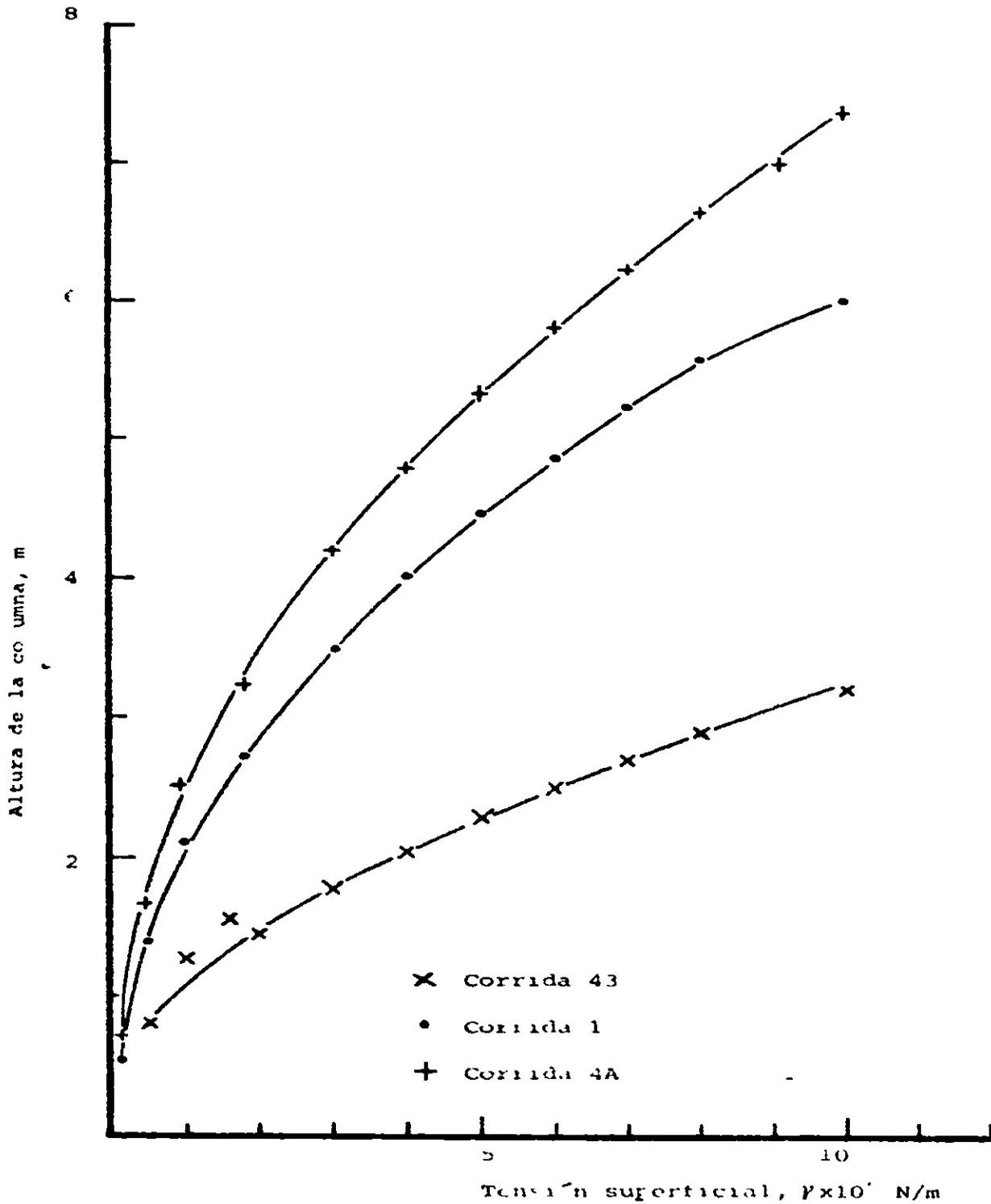
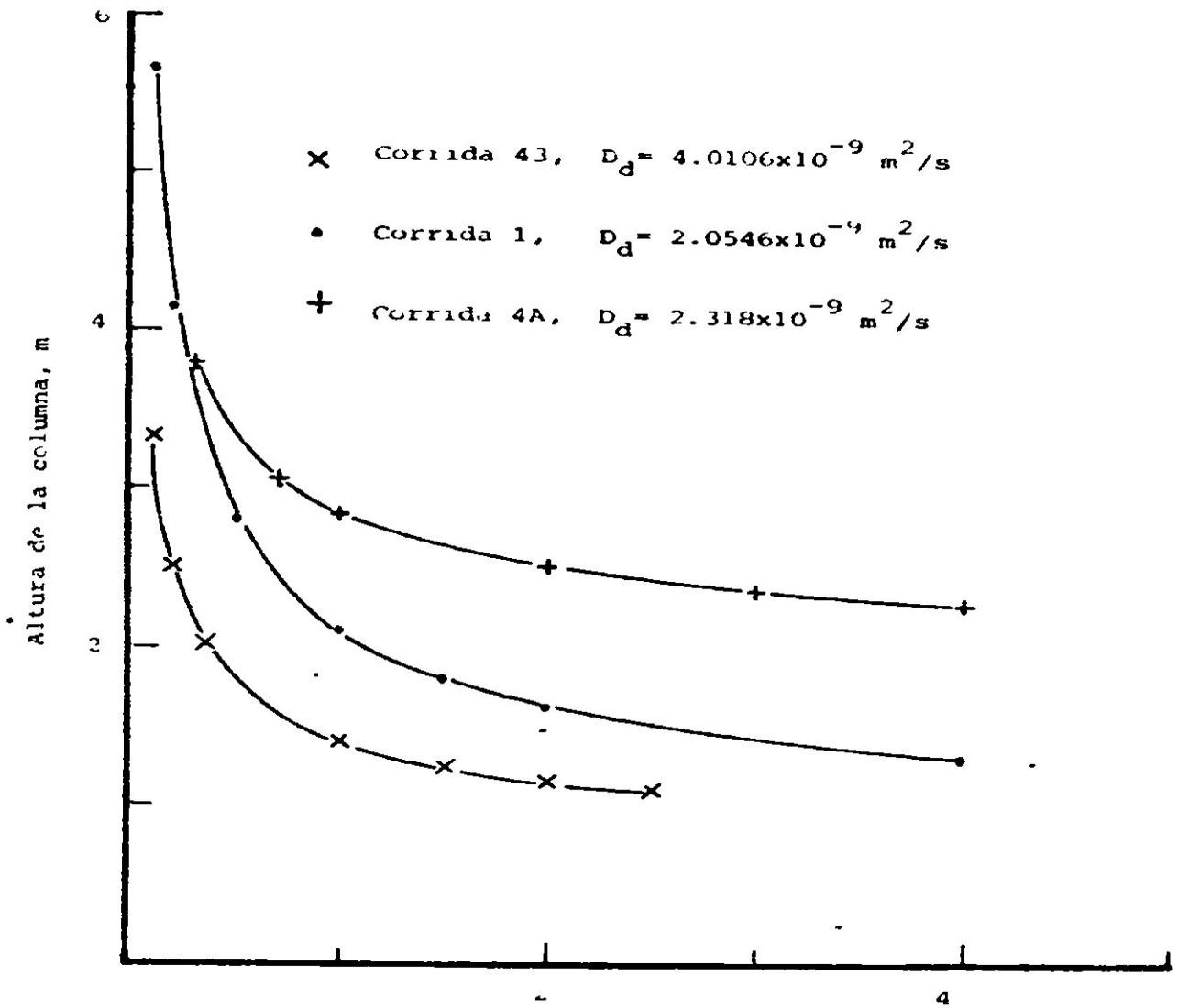
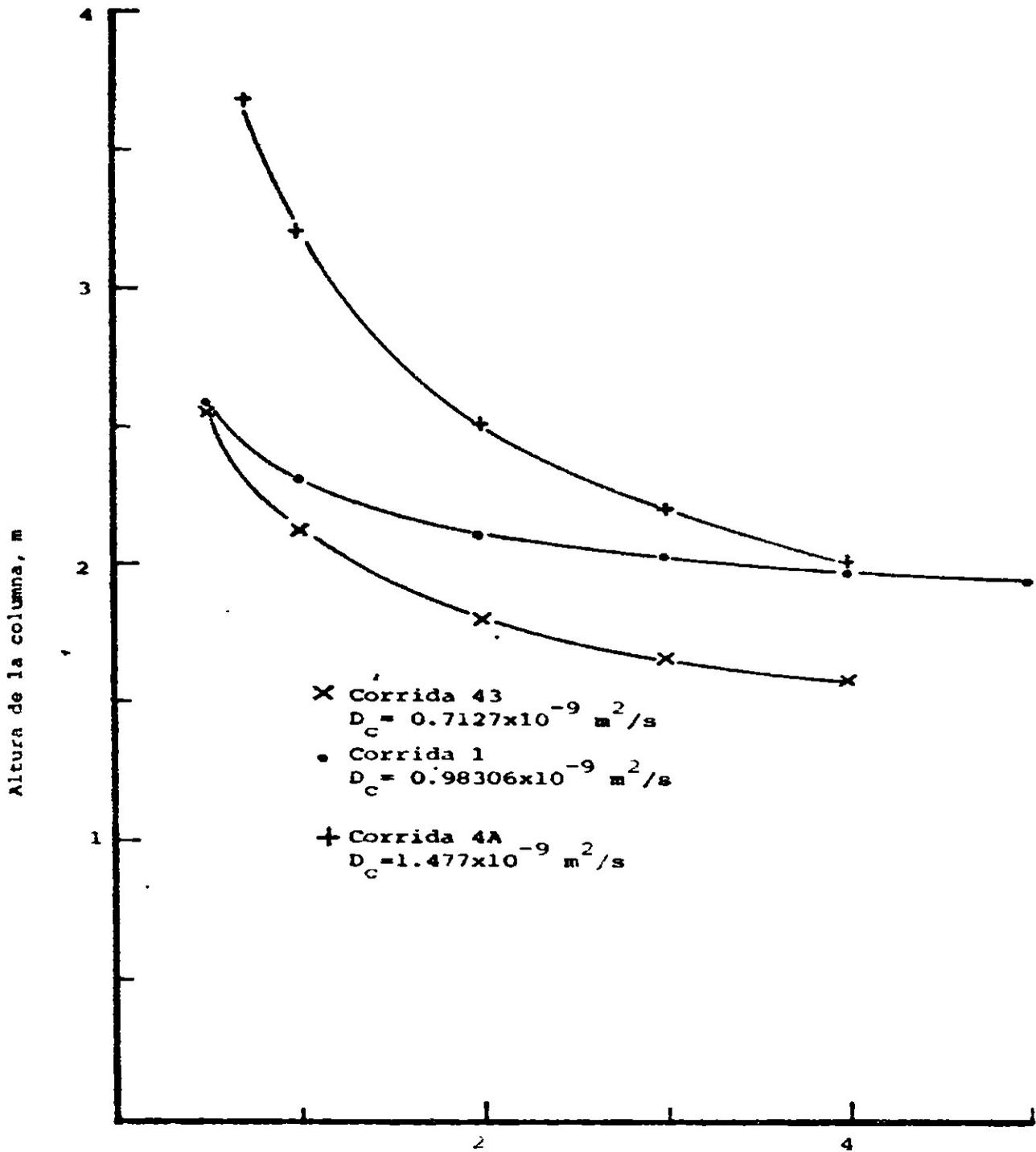


Figura 7-8 Efecto de la tensión superficial entre las fases en el comportamiento de columna.



Difusividad del soluto en la fase continua, $D_c \times 10^9 \text{ m}^2/\text{s}$
 para 7-9 Pte teórica. Difusividad del soluto en la fase
 continua y el comportamiento de la columna.



Difusividad del soluto en la fase dispersa, $D_d \times 10^9 \text{ m}^2/\text{s}$
 Figura 7-10 Efecto de la difusividad del soluto en la fase dispersa
 en el comportamiento de la columna.

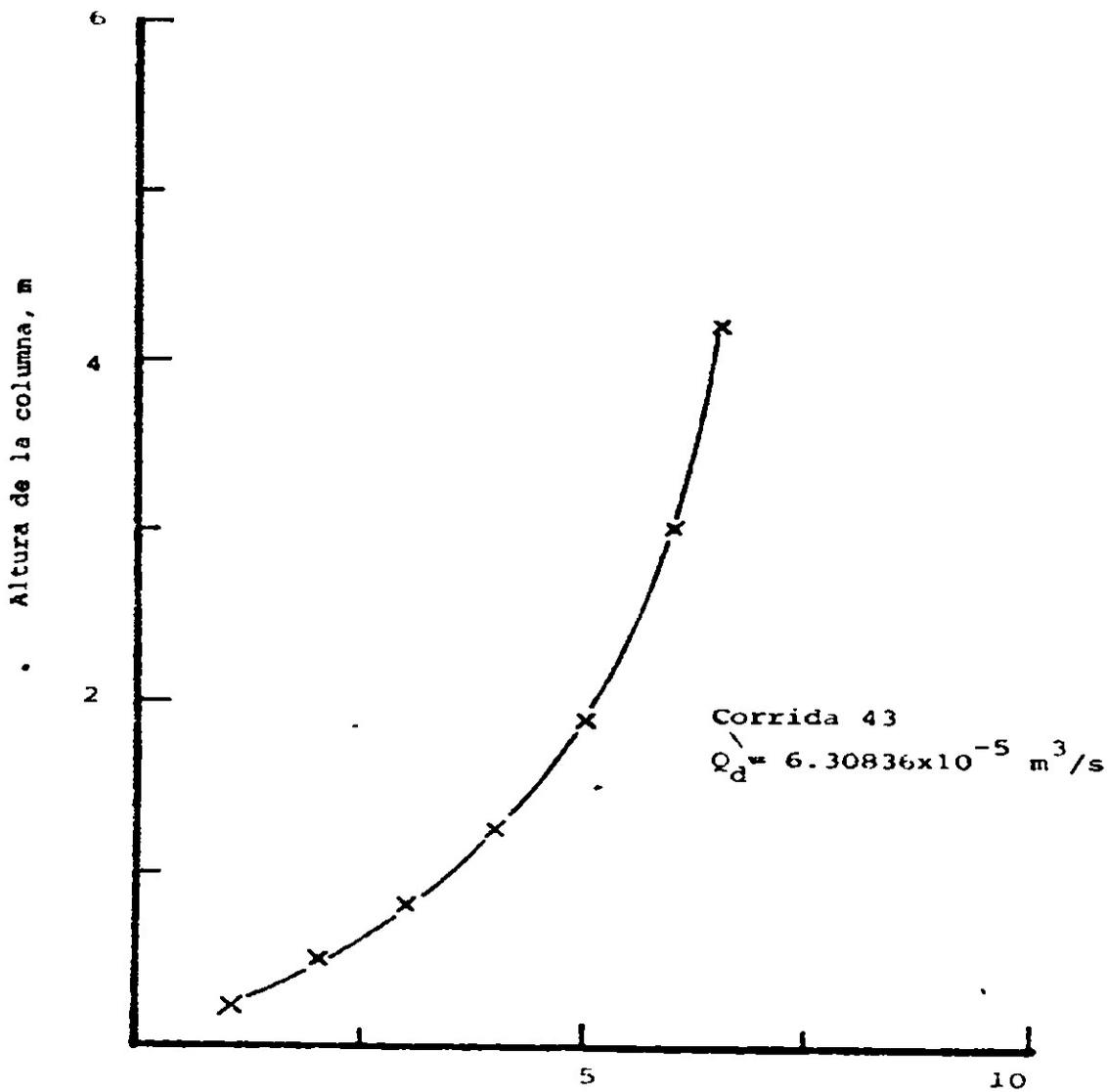


Figura 7-11 Efecto del gasto volumétrico de la fase continua en el comportamiento de la columna.

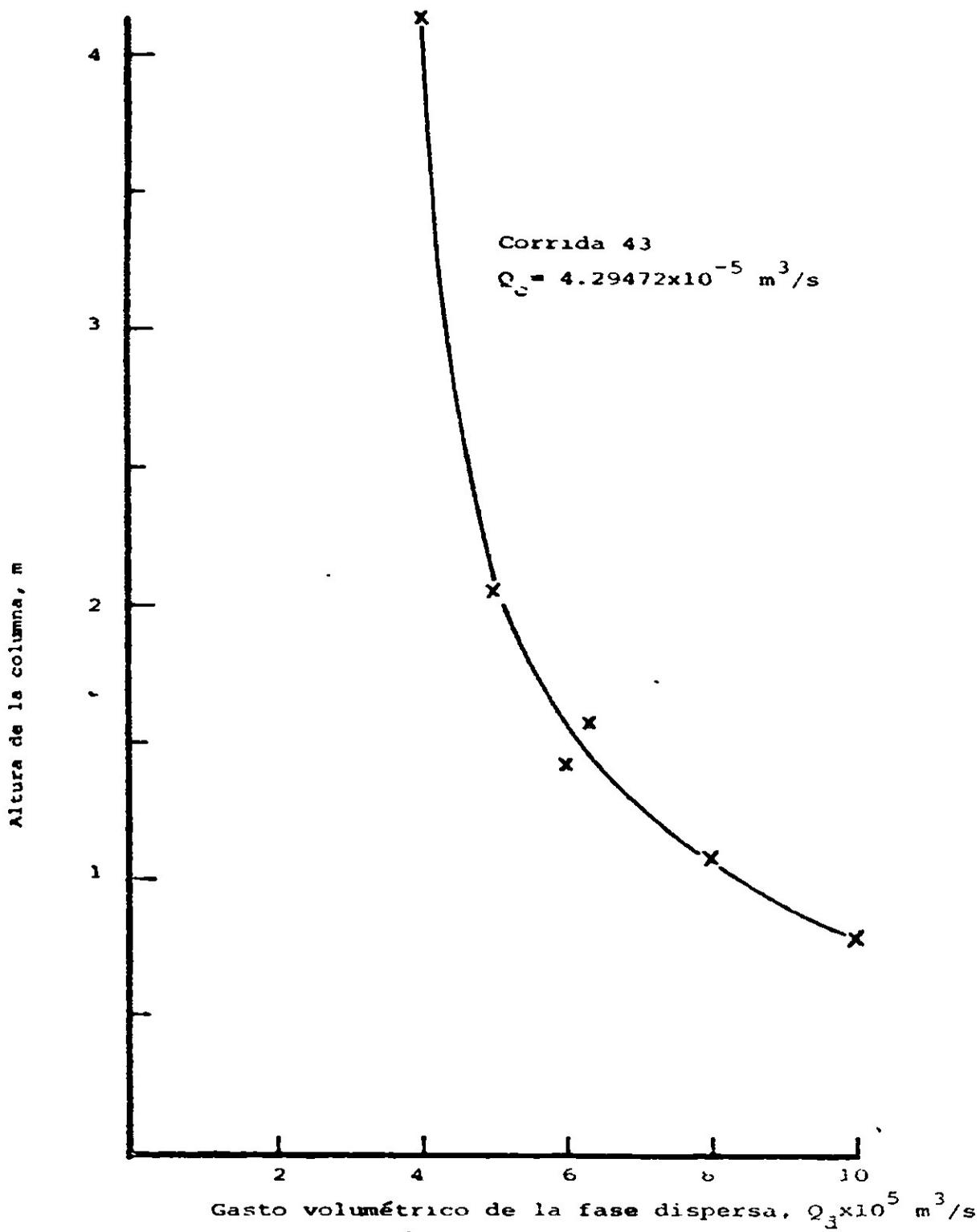
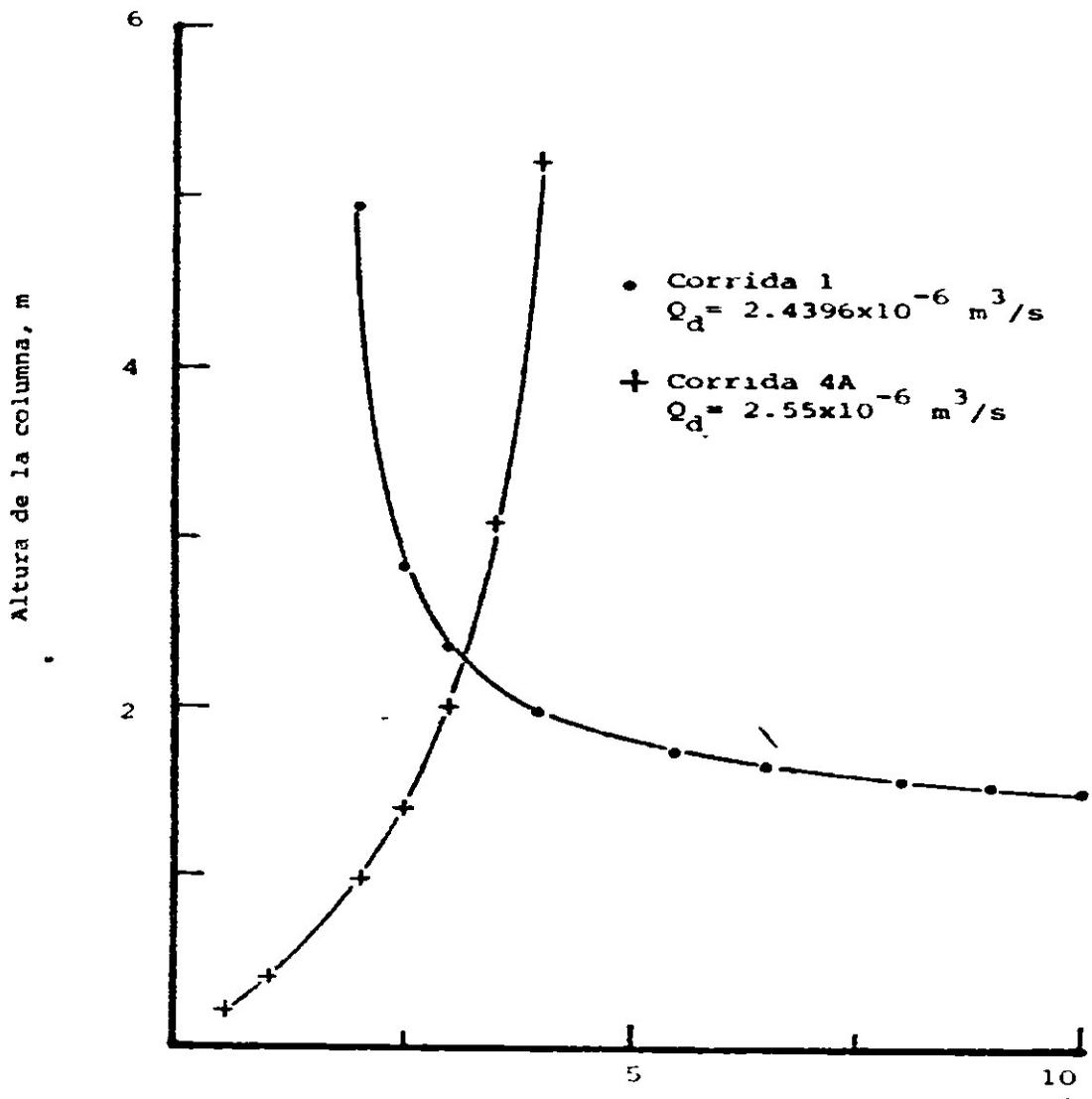
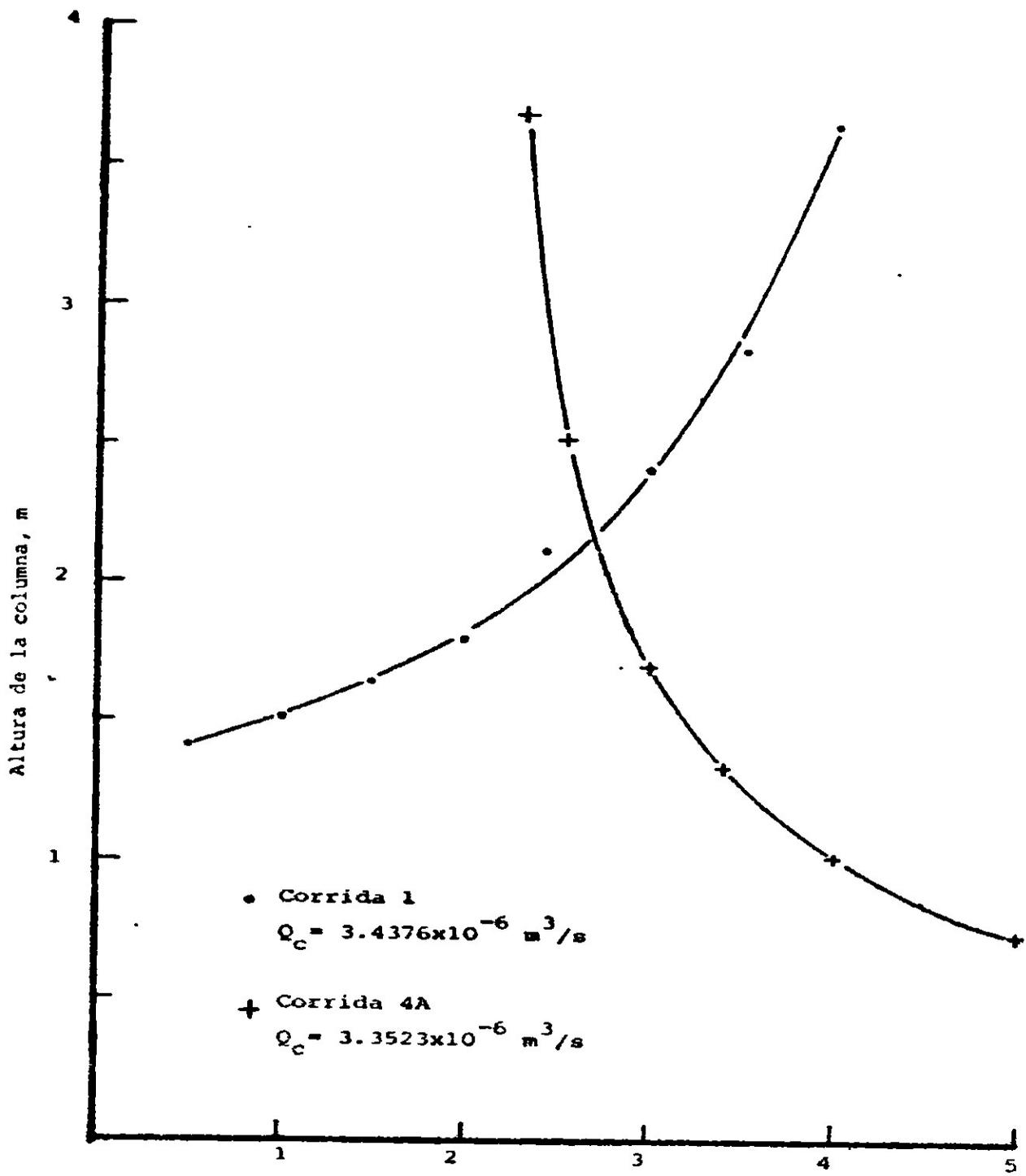


Figura 7-12 Efecto del gasto volumétrico de la fase dispersa en el comportamiento de la columna.



Gasto volumétrico de la fase continua, $Q_c \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$
 Figura 7-13 Efecto de Q_c volumétrico de la fase
 continua en el comportamiento de la columna.



Gasto volumétrico de la fase dispersa, $Q_d \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$
 Figura 7-14 Efecto del gasto volumétrico de la fase dispersa en el comportamiento de la columna.

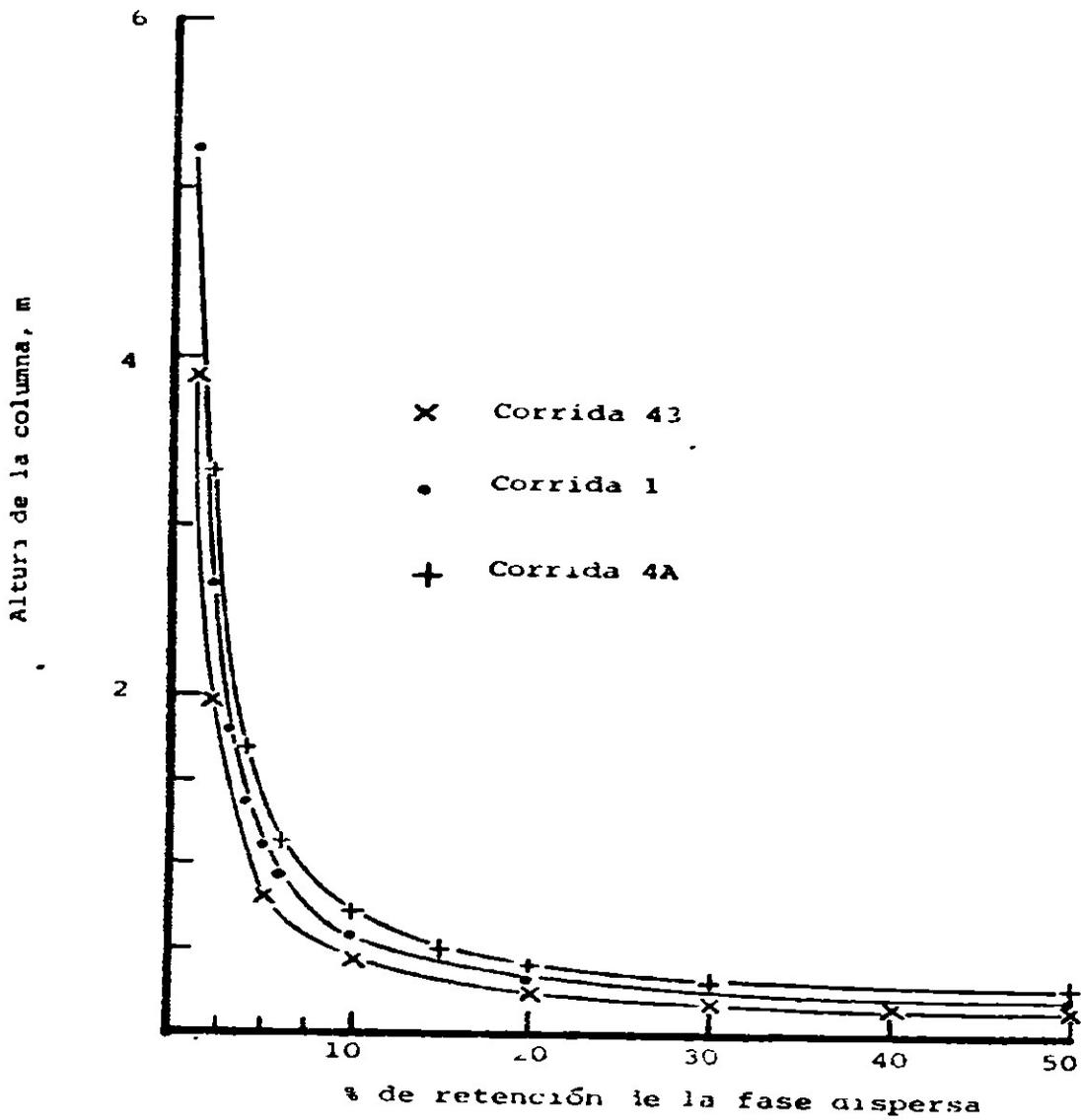


Figura 7-15 Efecto del % de retención de la fase dispersa en el comportamiento de la columna.

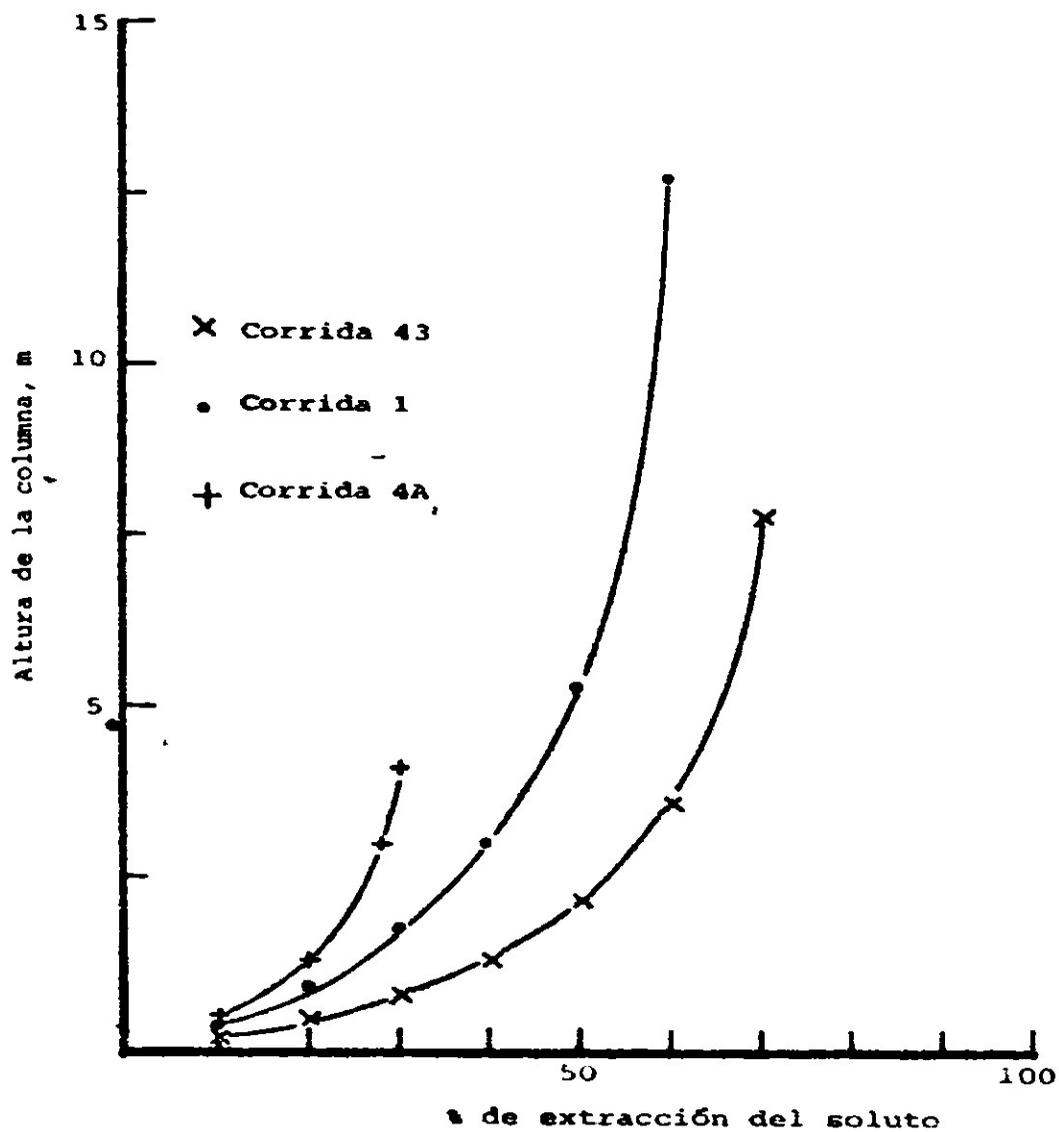


Figura 7-16 Efecto del % de extracción del soluto en el comportamiento de la columna.

8. DISCUSION DE RESULTADOS.

8.1. Comprobación del Programa Computacional.

El funcionamiento correcto del programa computacional se comprobó comparando los resultados obtenidos con el programa y los calculados manualmente con una calculadora de bolsillo. La comparación se hizo con dos corridas de los sistemas líquido-líquido 1 y 2, y los resultados concordaron satisfactoriamente con una diferencia menor del 1%.

8.2. Discusión de la Comparación de los Resultados Obtenidos con el Módulo con Datos Experimentales.

Como puede observarse en las Tablas 6.12, 6.14 y 6.16, en todas las corridas de los tres sistemas la mejor aproximación a la altura real de la columna se obtiene cuando se utiliza la combinación (bc) del % de retención de la fase dispersa y el coeficiente global de transporte de masa. El % de error disminuye, relativamente, con la razón diámetro/longitud de la columna. Esto sucede en las corridas 43, 1, 7, 10, 33, 4A y 14A. Las corridas 11, 21 y 26 difieren ligeramente de esto debido al mayor % de retención de la fase dispersa.

Puede notarse que en la corrida 33 el error es del 400 %, lo cual posiblemente se deba a la altura muy baja de la columna, para la cuál la predicción del modelo desarrollado no es razonable.

8.3. Discusión de los Resultados de la Simulación.

Teniendo en cuenta los resultados de la sección anterior, se utilizó en la simulación los métodos (b) y (c) para el cálculo del α de retención de la fase dispersa y el coeficiente global de transporte de masa, respectivamente.

8.3.1. Efecto del α de la Velocidad de Inundación de la Fase Continua en el Comportamiento de la Columna.

En la Figura 7-1 se observa que el α de la velocidad de inundación de la fase continua no tiene un efecto determinante en la altura de la columna. Esta disminuye ligeramente al aumentar el α de la velocidad de inundación desde aproximadamente 50 hasta 100. Sin embargo, una columna de contacto continuo generalmente se opera por debajo del 60 % de la velocidad de inundación, debido a ciertos factores como la transferencia de masa, el manejo de los flujos volumétricos, y otros. Por lo tanto, se recomienda que las columnas de riego se operen al 50 % de la velocidad de inundación de la fase continua, como puede observarse en esta figura.

8.3.2. Efecto del Número de Boquillas u Orificios en el Comportamiento de la Columna.

En las Figuras 7-2 y 7-3 se muestra este efecto, que como puede observarse es independiente del tipo de distribuidor.

El número de boquillas u orificios con que se produce la fase dispersa, no afecta significativamente la altura de la columna. Puede notarse, sin embargo, una variación del orden del 20 % en la altura, dependiendo de la región de formación de las gotas (Región I y Región III). Esto puede ser causado por la cantidad de fase dispersa que se tiene en cada región, y que va aumentando desde la región de antes de la formación del chorro (Región I) hasta la velocidad crítica del chorro (Región III).

Cabe mencionarse que en la simulación nunca se logró operar en la región del chorro (Región II), que se encuentra entre las dos regiones antes mencionadas. La razón de esto es que el área del

distribuidor se fue aumentando de manera discreta, o sea se aumentó el número de orificios o boquillas.

8.3.3. Efecto de las Densidades de las Fases en el Comportamiento de la Columna.

8.3.3.1. Densidad de la Fase Continua.

En la Figura 7-4 se observa que la altura de la columna es afectada por la densidad de la fase continua. Conforme la densidad de la fase continua se hace igual a la densidad de la fase dispersa, la altura requerida es cada vez mayor. Esto se debe a lo difícil que resulta mezclar y separar dos fases de densidades muy similares. En el caso contrario, al ser la densidad de la fase continua diferente a la de la fase dispersa, se requiere una altura menor. Esta altura es todavía menor si la densidad de la fase continua es mayor que la de la fase dispersa. Lo anterior quiere decir que cuanto más pesada es la fase continua, el transporte de masa es más rápido; aunque también lo es cuando la fase dispersa es más pesada que la fase continua.

8.3.3.2. Densidad de la Fase Dispersa.

En la Figura 7-5 se observa que el efecto de la densidad de la fase dispersa en la altura de la columna es el mismo que se presenta con la densidad de la fase continua. Existen las mismas tendencias en cuanto al aumento o disminución de la altura con la variación de la densidad de la fase dispersa.

De las anteriores observaciones se puede concluir que en extracción líquido-líquido las densidades de las dos fases deben ser lo más diferentes posible. En la selección del solvente la diferencia de densidades entre las fases es un factor muy importante.

8.3.4. Efecto de las Viscosidades de las Fases en el Comportamiento de la Columna.

8.3.4.1. Viscosidad de la Fase Continua.

La Figura 7-6 muestra que la altura de la columna aumenta con la viscosidad de la fase continua. Este efecto es más considerable cuando la viscosidad de la fase continua es menor de 0.001 Kg/m-s. Por ejemplo, en la corrida 1 la altura de la columna se duplica al aumentar 10 veces la viscosidad de la fase continua. El comportamiento anterior es de esperarse puesto que el modelo se basa en la teoría de la doble película. En esta teoría la resistencia al transporte de masa depende de la viscosidad.

8.3.4.2. Viscosidad de la Fase Dispersa.

En la Figura 7-7 se observa el efecto de la viscosidad de la fase dispersa en la altura de la columna; este es igual al efecto que se presenta con la viscosidad de la fase continua.

Se puede observar comparando las figuras 7-6 y 7-7 que el efecto de la viscosidad de la fase continua en las corridas 43 y 4A es menor que el de la viscosidad de la fase dispersa, y que lo opuesto sucede con la corrida 1. Esto se debe a la extracción del soluto, que en las corridas 43 y 4A es hecha por la fase dispersa, y en la corrida 1 por la fase continua. Entonces, dependiendo de cual fase lleve a cabo la extracción, y con esto la dirección del transporte de masa, la viscosidad de esta fase afectará aún más que la otra a la altura de la columna.

Se puede concluir que por el comportamiento de la columna respecto a las viscosidades de las fases, en extracción líquido-líquido es deseable que las dos fases posean baja viscosidad.

8.3.5. Efecto de la Tensión Superficial entre las Fases en el Comportamiento de la Columna.

De la Figura 7-8 se puede decir que la tensión superficial entre las fases afecta considerablemente la altura de la columna. Cuando la tensión superficial entre las fases es alta, la altura requerida también lo es. Por tanto, es conveniente que la tensión superficial entre las fases se mantenga lo más baja posible para que la altura de la columna sea menor. Por ejemplo, en la corrida 1, si se disminuye la tensión superficial en 2.5 veces, entonces la altura de la columna se reduce en 1/3.

8.3.6. Efecto de la Difusividad del Solute en cada una de las Fases en la Altura de la Columna.

8.3.6.1. Difusividad del Solute en la Fase Continua.

La Figura 7-9 muestra que la difusividad del soluto en la fase continua afecta la altura de la columna. El aumento de esta difusividad trae consigo la disminución de la altura. Este efecto se explica porque la difusividad del soluto es un parámetro que mide la velocidad de transporte de masa, y de este depende considerablemente el tamaño de la columna. Puede observarse en esta figura que el efecto es más importante cuando la difusividad del soluto en la fase continua es menor que $1.5 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$.

8.3.6.2. Difusividad del Solute en la Fase Dispersa.

La Figura 7-10 presenta un comportamiento idéntico de la difusividad del soluto en la fase dispersa, al que se tiene con la difusividad del soluto en la fase continua.

De la comparación de ambas figuras se observa que la difusividad del soluto en la fase que lleva a cabo la extracción tiene más influencia en la altura de la columna que la difusividad del soluto en la otra fase. Así, por ejemplo, en la corrida 1, donde la extracción la realiza la fase continua, la difusividad del soluto en esta fase es más importante que la difusividad del soluto en la fase dispersa.

8.3.7. Efecto de los Gastos Volumétricos de las Fases en el Comportamiento de la Columna.

6.3.7.1. Gasto Volumétrico de la Fase Continua.

Como se puede observar en las Figuras 7-11 y 7-13, el gasto volumétrico de la fase continua influye en la altura de la columna. Esta disminuye al aumentar el gasto volumétrico de la fase continua cuando esta fase es la que realiza la extracción; si la extracción la hace la fase dispersa entonces la altura aumenta con el gasto volumétrico de la fase continua. Puede observarse que, en la corrida 1, donde la fase continua es la que realiza la extracción, la altura de la columna disminuye 2.5 veces al duplicar el gasto volumétrico de la fase continua; mientras que en las corridas 43 y 4A, donde la extracción la realiza la fase dispersa, la altura aumenta 5 y 3 veces, respectivamente, al duplicar el gasto volumétrico de la fase continua.

8.3.7.2. Gasto Volumétrico de la Fase Dispersa.

En las Figuras 7-12 y 7-14 se observa que el efecto del gasto volumétrico de la fase dispersa en la altura de la columna es opuesto al que se presenta con el gasto volumétrico de la fase continua. De lo anterior puede concluirse que, dependiendo de la fase que lleve a cabo la extracción, el aumento del gasto volumétrico de esta fase disminuye la altura de la columna. Esto se puede explicar por la cantidad de esta fase presente en la columna y que está disponible para contactarse con la otra fase; además de que el transporte de masa también es beneficiado por el aumento del gasto volumétrico mencionado.

8.3.8. Efecto del % de Retención de la Fase Dispersa.

En la Figura 7-15 se observa que la altura de la columna es afectada considerablemente por el % de retención de la fase dispersa. El aumento de esta de 1 a 5% disminuye drásticamente la altura de la columna; este efecto continúa siendo importante hasta el 20%, arriba del cuál la altura varía muy poco. En las corridas 1 y 43 se observa que cuando la retención de la fase dispersa aumenta de 1 a 5 %, la altura de la columna disminuye aproximadamente 5 veces. Lo mismo sucede con la corrida 4A.

8.3.9. Efecto del % de Extracción del Sólido.

Como se observa en la Figura 7-16, la altura de la columna depende de la cantidad de sólido que se desea extraer. Se requiere una columna cada vez mayor conforme aumenta el % de extracción del sólido. En la corrida 1, por ejemplo, la altura de la columna es 4 veces mayor al aumentar de 40 a 60 % la cantidad del sólido extraído. El comportamiento anterior es debido a que para lograr una mayor separación del sólido es necesario que las concentraciones de las fases sean lo más diferente posible a todo lo largo de la columna. Esto indica que la cantidad de sólido extraído depende casi totalmente de la optimización económica del proceso.

9. CONCLUSIONES.

A partir de los resultados que se muestran en las Tablas 6.12, 6.14 y 6.16, se concluye que este módulo computacional no puede ser utilizado para el diseño de una columna de riego de extracción líquido-líquido. Esto se debe a que las correlaciones del λ de retención de la fase dispersa resultan inseguras, por lo que se sugiere encontrar otra mejor, o, en su lugar, determinar experimentalmente este parámetro.

De la simulación efectuada se obtiene la siguiente información, muy importante, acerca del comportamiento de la columna de riego respecto a los parámetros característicos de esta:

- a) La operación de la columna es satisfactoria alrededor del 50% de la velocidad de inundación de la fase continua.
- b) La altura de la columna resulta independiente del número de boquillas u orificios del distribuidor, para un determinado tamaño de las gotas.
- c) Para densidades muy similares de las dos fases se incrementa considerablemente la altura de la columna.
- d) Es deseable que las dos fases posean baja viscosidad; y todavía sea menor la de la fase que realiza la extracción.
- e) La altura de la columna es considerablemente afectada por la tensión superficial entre las fases. Esto deberá considerarse en la selección del solvente.
- f) Una mayor difusividad del soluto en la fase que realiza la extracción facilita, de manera importante, la rapidez del transporte de masa.
- g) Dependiendo de la fase que lleva a cabo la extracción, la velocidad de transporte de masa aumenta con el gasto volumétrico de esta fase.

h) El % de retención de la fase dispersa afecta drásticamente la altura de la columna con el rango de 1 a 20 %. De 20 hasta 70% la altura es casi independiente del % de retención.

i) La cantidad de soluto que se desea extraer fija la altura de la columna. Puede suceder que aumentar esta cantidad requiera una altura mucho mayor, que estaría fuera de las limitaciones económicas del proceso.

Finalmente se puede concluir que se requieren mejores correlaciones para el cálculo del % de retención y el coeficiente global de transporte de masa.

BIBLIOGRAFIA.

1. Elup, D.E. y C.J. Geankoplis, *J. Chem. Eng. Data*, 8 (2), 170 (1963).
2. Christiansen, R.M. y A.N. Hixson, *Ind. Eng. Chem.*, 49, 1017 (1957).
3. Dunn, I., L. Lapidus y J.C. Elgin, *A.I.Ch.E. J.*, 11, 158 (1965).
4. Geankoplis, C.J. y A.N. Hixson, *Ind. Eng. Chem.* 42, 1141 (1950).
5. Geankoplis, C.J., P.L. Wells y E.L. Hawk, *Ind. Eng. Chem.*, 43, 1848 (1951).
6. Gier, T.E. y J.O. Hougen, *Ind. Eng. Chem.*, 45, 1362 (1953).
7. Hayworth, C.B. y R.E. Treybal, *Ind. Eng. Chem.*, 42, 1174 (1950).
8. Heertjes, F.M., L. H. de Nie y H.J. de Vries, *Chem. Eng. Sci.*, 26, 441 (1971).
9. Horvath, M., L. Steiner y S. Hartland, *Can. J. Chem. Engr*, 56, 9 (1978).
10. Hughmark, G.A., *Ind. Eng. Chem. Fundamentals*, 6, 408 (1967).
11. Kreager, R.M. y C.J. Geankoplis, *Ind. Eng. Chem.*, 45, 21-6 (1953).
12. Laddha, G.S. y T.E. Degaleesan, "Transport Phenomena in Liquid Extraction", McGraw-Hill Book Co., New Delhi, (1976).
13. Letan, R., y E. Kehat, *A.I.Ch.E.J.*, 13, 443 (1967).
14. Licht, W., y J.B. Conway, *Ind. Eng. Chem.*, 42, 1151 (1950).
15. McCabe, W.L. y J.C. Smith, "Operaciones básicas de Ingeniería Química", Ed. Reverté, España, (1981).
16. Morello, V.S. y N. Poffenberger, *Ind. Eng. Chem.*, 42, 1021 (1950).
17. Null, H.R. y H.P. Johnson, *A.I.Ch.E.J.*, 4, 273 (1958).
18. Perrut, M. y R. Loutaty, *Chem. Eng. Sci.*, 27, 669 (1972).
19. Perrut, M., R. Loutaty y P. Le Goff, *Chem. Eng. Sci.*, 28, 1541 (1973).
20. Scheele, G.F. y B.J. Meister, *A.I. Ch. E.J.*, 14, 9 (1968).
21. Sherwood, T.K., J.M. Prausnitz y R.C. Reid, "The Properties of Gases and Liquids", McGraw-Hill Book Co., 3a Ed., New York (1966).
22. Skelland, A.H.P. y S.S. Minhas, *A.I.Ch.E.J.*, 17, 1316 (1971).
23. Takahashi, T., Y. Akagi, K. Fujita y T. Kishimoto, *J. Chem. Eng. Japan*, 7, 223 (1974).
24. Treybal, R.E., "Extracción en Fase Líquida", Ed. UTEHA, México, (1968).
25. Vedaiyan, S., T.E. Degaleesan, G.S. Laddha y H.E. Hoelscher, *A.I.Ch.E.J.*, 18, 1961 (1972).
26. Vogt, H.J. y C.J. Geankoplis, *Ind. Eng. Chem.*, 46, 1763 (1954).
27. Vogt, H.J. y C.J. Geankoplis, *Ind. Eng. Chem.*, 45, 2119 (1953).
28. Weaver, R.E.C., L. Lapidus y J.C. Elgin, *A.I.Ch.E.J.* 5, 533 (1959).

NOMENCLATURA.

- A_r = Número de Arquímedes = $\Delta \rho g d^3 / \rho_c v_c^2$, adimensional
- a = Área interfaseal, m^2/m^3 de columna.
- C_I = Definido por la ecuación 3-21.
- C = Concentración, $K \text{ mol}/m^3$.
- D = Difusividad molecular, m^2/s
- d = Diámetro (referido al diámetro de la gota si es usado sin subíndice), m .
- g = Aceleración de la gravedad = $9.8 \text{ m}/s^2$
- H = Constante de la ley de Henry.
- K = Definido por la ecuación 3-14.
- $K_o a$ = Coeficiente individual de transporte de masa referido a concentración, $1/s$.
- k_a = Coeficiente individual de transporte de masa referido a concentración, $1/s$.
- L = Velocidad de flujo molar de la fase pesada, mol/s
- L' = Velocidad de flujo molar del solvente pesado, mol/s
- m, m' = Pendiente de la curva de equilibrio, C_d/C_c , adimensional.
- N_A = Velocidad de transporte de masa, $\text{mol}/cm^2 \cdot s$.
- N_{Sc} = Número de Schmidt = $\mu / \rho D$, adimensional.
- p = Definido por la ecuación 3-9.
- Q = Gasto volumétrico, m^3/s .
- q^3 = Definido por la ecuación 3-23.
- S = Área de sección transversal de la columna, m^2 .

- U = Velocidad superficial, m/s.
 U_{cf} = Velocidad de inundación de la fase continua, m/s.
 V = Volumen de la gota (Capítulo 3), m^3 .
 v = Velocidad de flujo molar de la fase ligera, mol/s.
 v' = Velocidad de flujo molar del solvente ligero, mol/s.
 v = Velocidad, m/s.
 v_s = Velocidad de deslizamiento de la gota relativa a la fase continua, m/s.
 x = Composición del soluto en la fase pesada, fracción molar.
 x^* = Composición de la fase pesada en equilibrio con la composición de la fase ligera y .
 y = Composición del soluto en la fase ligera, fracción molar.
 y^* = Composición de la fase ligera en equilibrio con la composición de la fase pesada x .
 zq^2 = Definido por la ecuación 3-22.
 z = Altura de la columna, m.

Símbolos Griegos.

- β = Definido por la ecuación 3-2 ó 3-3.
 γ = Tensión superficial, N/m.
 ϵ = Fracción volumétrica de la fase dispersa presente en la columna.
 μ = Viscosidad, Kg/m-s.
 ν = Viscosidad cinemática, m^2/s .
 π = 3.1416.
 ρ = Densidad, Kg/m^3 .
 $\Delta\rho$ = Diferencia de densidades, Kg/m^3 .
 u_y = Definido por la ecuación 4-23.
 u_x = Definido por la ecuación 4-24.
 u = Factor de corrección para el volumen de la gota, definido por la ecuación 3-4.

Subíndices.

- c = Continua.
- d = Dispersa.
- j = Chorro de la fase dispersa.
- jc = Valor crítico en el chorro.
- L = Fase ligera.
- n = Boquilla.
- nc = Valor crítico en la boquilla.
- t = Valor medio.

A P E N D I C E .

LISTADO DEL PROGRAMA COMPUTACIONAL.

LIST

```
2 REM *ALIMENTACION DE DATOS*
5 SPEED=255
10 HOME:PRINT "DATOS REQUERIDOS:"
20 PRINT:PRINT:PRINT "1. TIPO DE DISTRIBUIDOR"
30 PRINT "2. NUMERO DE ORIFICIOS O BOQUILLAS"
40 PRINT "3. DIAMETRO DEL ORIFICIO O BOQUILLA"
50 PRINT "4. DIAMETRO DE LA COLUMNA"
60 PRINT "5. PESOS MOLECULARES DE LOS LIQUIDOS"
70 PRINT "6. DENSIDADES DE LAS DOS FASES"
80 PRINT "7. VISCOSIDADES DE LAS DOS FASES"
90 PRINT "8. GASTOS VOLUMETRICOS DE LAS DOS FASES":
100 PRINT "9. DIFUSIVIDAD DEL SOLUTO EN LAS DOS FASES"
110 PRINT "10. RELACION DE EQUILIBRIO"
120 PRINT "11. CONCENTRACIONES DE LAS FASES EN LOS EXTREMOS
    DE LA COLUMNA"
130 LE$=" (PARA CONTINUAR PRESIONA <RETURN>)"
140 VTAB 24:PRINT " ":LE$:
150 GET UU$
160 IF UU$ < > CHR$(13) THEN 150
170 HOME:VTAB 5:HTAB 10:PRINT " I M P O R T A N T E "
180 VTAB 9:PRINT " LA ALIMENTACION DE DATOS REQUERIDOS"
190 PRINT:PRINT " DEBERA HACERSE UTILIZANDO EL SISTEMA"
200 PRINT:VTAB 13:PRINT " INTERNACIONAL DE UNIDADES (SI). "

220 VTAB 22:PRINT " ":LE$:
230 GET UU$
240 IF UU$ < > CHR$(13) THEN 230
250 HOME
260 PRINT "PROPORCIONA EL NOMBRE DE LOS LIQUIDOS"
270 PRINT "QUE FORMAN EL SISTEMA:"
280 VTAB 7:INPUT "SOLUTO: ":SO$
290 PRINT:INPUT "SOLVENTE LIGERO: ":SL$
300 PRINT:INPUT "SOLVENTE PESADO: ":SP$
310 HOME
320 PRINT:PRINT "PROPORCIONA EL NUMERO DE LAS FASES:"
330 VTAB 7:INPUT "FASE DISPERSA: ":FD$
340 VTAB 9:PRINT:INPUT "FASE CONTINUA: ":FC$
350 HOME:VTAB 10:PRINT "ES EL SOLVENTE LIGERO < ":SL$:" < LA
    FASE DISPERSA? (SI/NO)":
360 INPUT " ":BD$
370 IF BD$="SI" THEN 400
380 IF BD$="NO" THEN 400
390 GOTO 350
400 HOME:VTAB 3:PRINT "DATOS DE DISEÑO DE LA COLUMNA:"
410 POKE 34,6
420 VTAB 7:HTAB 3:PRINT "TIPO DE DISTRIBUIDOR:"
```

```

430 VTAB 10: HTAB 4: PRINT "1.- PLATO PERFORADO"
440 PRINT : HTAB 4: PRINT "2.- BOQUILLAS"
450 VTAB 15: HTAB 3: INPUT "CUAL ES TU CASO? ":C$
460 IF C$ = "1" THEN TD$ = "@PLATO @PERFORADO": GOTO 490
470 IF C$ = "2" THEN TD$ = "@BOQUILLAS": GOTO 490
480 GOTO 400
490 HOME : VTAB 7: PRINT "ALIMENTA EL DIAMETRO DEL ORIFICIO (M)
":
500 INPUT " ":DB
510 PRINT : PRINT : INPUT "ALIMENTA EL NUMERO DE BOQUILLAS (U O
RI FICIOS) ":NB
520 PRINT : PRINT : PRINT "ALIMENTA EL DIAMETRO DE LA COLUMNA (
M) ":
530 INPUT " ":L1
540 POKE 34.0
550 HOME
560 VTAB 3: PRINT "CONDICIONES DEL PROCESO:"
570 PRINT : PRINT : PRINT "ALIMENTA EL GASTO VOLUMETRICO DE LA
FASE DISPERSA ":FD$: "^(M3/S)^":
580 INPUT " ":GD
590 PRINT : PRINT : PRINT "ALIMENTA EL GASTO VOLUMETRICO DE LA
FASE CONTINUA ":FC$: "^(M3/S)^":
600 INPUT " ":GC
610 HOME
620 VTAB 3: PRINT "PROPIEDADES FISICOQUIMICAS:"
630 POKE 34.3
640 VTAB 6: PRINT "ALIMENTA LOS PESOS MOLECULARES:"
650 PRINT : PRINT : PRINT SO$:
660 INPUT " ":MS
670 PRINT : PRINT : PRINT SL$:
680 INPUT " ":ML
690 PRINT : PRINT : PRINT SP$:
700 INPUT " ":MP
710 HOME : PRINT : PRINT : PRINT "ALIMENTA LA DENSIDAD DE LA FA
SE DISPERSA ":FD$: "^(KG/M3)^":
720 INPUT " ":DD
730 PRINT : PRINT : PRINT "ALIMENTA LA DENSIDAD DE LA FASE CONT
INUA ":FC$: "^(KG/M3)^":
740 INPUT " ":DC
750 PRINT : PRINT : INPUT "ALIMENTA LA TENSION SUPERFICIAL ENTR
E LAS FASES (NEWTON/M) ":TS
760 POKE 34.0
770 HOME
780 VTAB 3: PRINT "PROPIEDADES DE FENOMENOS DE TRANSPORTE:"
790 PRINT : PRINT : PRINT "ALIMENTA LA VISCOSIDAD DE LA FASE DI
SPERSA ":FD$: "^(KG/M-S)^":
800 INPUT " ":VD
810 PRINT : PRINT : PRINT "ALIMENTA LA VISCOSIDAD DE LA FASE CO
NTINUA ":FC$: "^(KG/M-S)^":
820 INPUT " ":VC
830 PRINT : PRINT : PRINT "ALIMENTA LA DIFUSIVIDAD DE ":SO$: " E
N LA FASE DISPERSA ":FD$: "^(M2/S)^":
840 INPUT " ":DU
850 PRINT : PRINT : PRINT "ALIMENTA LA DIFUSIVIDAD DE ":SO$: " E
N LA FASE CONTINUA ":FC$: "^(M2/S)^":
860 INPUT " ":DM
870 HOME : VTAB 12: HTAB 5: SPEED= 150
880 PRINT "B A L A N C E D E M A S A ": SPEED 255

```

```

890 FOR I = 1 TO 1500: NEXT I
900 HOME : VTAB 5: PRINT "AQUI ES NECESARIO INDICAR CUAL SOLVEN
TE"
910 PRINT : PRINT "REALIZA LA EXTRACCION:"
920 VTAB 10: HTAB 3: PRINT "1.- SOLVENTE LIGERO"
930 PRINT : HTAB 3: PRINT "2.- SOLVENTE PESADO"
940 VTAB 15: HTAB 3: INPUT "CUAL ES TU CASO? ": I$
950 IF I$ = "1" THEN 980
960 IF I$ = "2" THEN 980
970 GOTO 940
980 HOME : VTAB 13
990 PRINT "ALIMENTA LA CONCENTRACION DEL SOLUTO EN EL SOLVENTE
LIGERO A LA ENTRADA (MOL/LT) CL(1)=": INPUT " ": B1
1000 HOME : VTAB 13
1010 PRINT "ALIMENTA LA CONCENTRACION DEL SOLUTO EN EL SOLVENTE
PESADO A LA ENTRADA (MOL/LT) CL(2)=": INPUT " ": W2
1020 IF I$ = "1" THEN 1060
1030 HOME : VTAB 13
1040 INPUT "ALIMENTA LA CONCENTRACION A LA CUAL SE DESEA QUE S
ALGA EL SOLUTO EN EL SOLVEN TE LIGERO (MOL/LT) CL(2)= ": B2
1050 GOTO 1030
1060 HOME : VTAB 13
1070 INPUT "ALIMENTA LA CONCENTRACION A LA CUAL SE DESEA QUE S
ALGA EL SOLUTO EN EL SOLVEN TE PESADO (MOL/LT) CL(1)= ": W1
1080 HOME : VTAB 7
1090 IF B0$ = "NO" THEN 1110
1100 GOTO 1120
1110 DD = DC/DC = DD:DD = DD:DD = DD:DD = DD:DD = DD:DD = DD
1120 Y1 = B1 * ML / DD / (1 - B1 * (MS - ML) / DD)
1130 X2 = W2 * MP / DC / (1 - W2 * (MS - MP) / DC)
1140 IF I$ = "1" THEN 1170
1150 Y2 = B2 * ML / DD / (1 - B2 * (MS - ML) / DD)
1160 GOTO 1180
1170 X1 = W1 * MP / DC / (1 - W1 * (MS - MP) / DC)
1180 MB = MS * Y1 + ML * (1 - Y1):MA = MS * X2 + MP * (1 - X2)
1190 V1 = GD * DD / MB:L2 = GC * DC / MA
1200 LP = L2 * (1 - X2)
1210 VF = V1 * (1 - Y1)
1220 AA = VF * Y1 / (1 - Y1) + LP * X2 / (1 - X2)
1230 IF I$ = "1" THEN 1310
1240 AB = AA - VF * Y2 / (1 - Y2)
1250 X1 = 1 / (1 + LP / AB)
1260 W1 = X1 * DC / (MP + (MS - MP) * X1)
1270 PRINT : PRINT : PRINT : PRINT "LA CONCENTRACION DEL SOLVEN
TE PESADO A LA SALIDA ES CP(1)=":W1:" MOL/LT"
1280 PE = (B1 - B2) / B1 * 100:PE = INT (PE * 1E3 + 0.5) / 1E3
1290 PRINT : PRINT : PRINT : PRINT "EL % DE EXTRACCION ES ":PE
1300 GOTO 1370
1310 AC = AA - LP * X1 / (1 - X1)
1320 Y2 = 1 / (1 + VF / AC)
1330 B2 = Y2 * DD / (ML + (MS - ML) * Y2)
1340 PRINT : PRINT : PRINT : PRINT "LA CONCENTRACION DEL SOLVEN
TE LIGERO A LA SALIDA ES CL(2)=":B2:" MOL/LT"
1350 PE = (W2 - W1) / W2 * 100:PE = INT (PE * 1E3 + 0.5) / 1E3
1360 PRINT : PRINT : PRINT : PRINT "EL % DE EXTRACCION ES ":PE

```

```

1370 FOR I = 1 TO 1000: NEXT I
1380 V2 = VP / (1 - Y2)
1390 L1 = LP / (1 - X1)
1400 MT = MS * Y2 + ML * (1 - Y2):MJ = MS * X1 + MF * (1 - X1)
1410 MD = (MT + MB) / 2:MC = (MA + MJ) / 2
1420 IF 30$ = "NO" THEN 1440
1430 GOTO 1450
1440 MH = MD:MD = MC:MC = MH
1450 GOSUB 4000
2000 REM SUBROUTINA PARA CARGAR EL SET DE GRAFICAS
2010 F0KE 216.0
2020 GOTO 2100
2030 REM ** CASE CONVERTER SUBR. **
2040 I1$ = " ": FOR JJ = 1 TO LEN (AA$):LL = 32
2050 LL$ = MID$ (AA$,JJ,1): IF LL$ = "e" OR LL$ = "s" THEN JJ =
JJ + 1:LL = 0 - 64 * (LL$ = "s")
2060 I1 = ASC (MID$ (AA$,JJ)): IF I1 < ASC ("AA") OR I1 > ASC
("ZZ") THEN LL = 0
2070 PRINT CHR$ (I1 + LL): NEXT JJ: PRINT : RETURN
2080 I1$ = I1$ + CHR$ (I1 + LL): NEXT JJ: PRINT I1$: RETURN
2090 REM REMOVE LINE 35 FOR LINE-AT-A-TIME MODE
2100 TEXT : CALL - 936
2110 HGR2 : REM TURN-ON HIRES SCREEN
2120 FR# 0: IN# 0: F0KE 54.0: F0KE 55.96: REM INITIALIZE HIRES
CHARACTER MODE
2130 GOSUB 2350
2140 HTAB 13:AA$ = "@@@@@@LEU@N@N@A @e@e @r@i@e@e@e@e@": GOSUB 2040
: VTAB 2: HTAB 12:AA$ = "@e@x@t@e@A@C@C@C@I@O@E@ @L@e@e@.-@L@e@e
@.": GOSUB 2040
2150 QC = GC:QC = INT (1E5 * GC + 0.5) / 1E5
2160 QD = GD:QD = INT (1E5 * GD + 0.5) / 1E5
2170 IF 50$ = "NO" THEN 2210
2180 VTAB 5: HTAB 1:AA$ = "@QC= ": GOSUB 2040: VTAB 5: HTAB 4:A
A$ = STR$ (QC): GOSUB 2040: VTAB 5: HTAB 5 + LEN (STR$ (
QC)):AA$ = "M3/8": GOSUB 2040
2190 VTAB 22: HTAB 1:AA$ = "@QD= ": GOSUB 2040: VTAB 22: HTAB 4
:AA$ = STR$ (QD): GOSUB 2040: VTAB 22: HTAB 5 + LEN (STR$
(QD)):AA$ = "M3/8": GOSUB 2040
2200 GOTO 2230
2210 VTAB 5: HTAB 1:AA$ = "@QU= ": GOSUB 2040: VTAB 5: HTAB 4:A
A$ = STR$ (QD): GOSUB 2040: VTAB 5: HTAB 5 + LEN (STR$ (
QC)):AA$ = "M3/8": GOSUB 2040
2220 VTAB 22: HTAB 1:AA$ = "@QC= ": GOSUB 2040: VTAB 22: HTAB 4
:AA$ = STR$ (QD): GOSUB 2040: VTAB 22: HTAB 5 + LEN (STR$
(QD)):AA$ = "M3/8": GOSUB 2040
2230 VTAB 4: HTAB 1:AA$ = "@W2= ": GOSUB 2040:W2 = INT (1E5 *
W2 + 0.5) / 1E5: VTAB 4: HTAB 4:AA$ = STR$ (W2): GOSUB 204
0: VTAB 4: HTAB 5 + LEN (STR$ (W2)):AA$ = "MUL/L1": GOSUB
2040
2240 VTAB 21: HTAB 1:AA$ = "@B1= ": GOSUB 2040:B1 = INT (1E5 *
B1 + 0.5) / 1E5: VTAB 21: HTAB 4:AA$ = STR$ (B1): GOSUB 20
40: VTAB 21: HTAB 5 + LEN (STR$ (B1)):AA$ = "MUL/LT": GOSUB
2040
2250 VTAB 4: HTAB 23:AA$ = "@B2= ": GOSUB 2040:B2 = INT (1E5 *

```

```

92 + 0.5) / 1E5: VTAB 4: HTAB 26: AA# = STR# (B2): GOSUB 20
40: VTAB 4: HTAB 27 + LEN ( STR# (B2)): AA# = "MOL/LT": GOSUB
2040
2260 VTAB 21: HTAB 23: AA# = "@W1 = ": GOSUB 2040: W1 = INT (1E5 *
W1 + 0.5) / 1E5: VTAB 21: HTAB 26: AA# = STR# (W1): GOSUB 2
040: VTAB 21: HTAB 27 + LEN ( STR# (W1)): AA# = "MOL/LT": GOSUB
2040
2270 VTAB 7: AA# = "@FASE @LIGERA": GOSUB 2040: VTAB 11: AA# = "G
FASE @PESADA": GOSUB 2040
2280 IF B0# = "NO" THEN 2310
2290 VTAB 8: AA# = "@DISPERSA": GOSUB 2040: VTAB 9: AA# = FD#: GOSUB
2040: VTAB 12: AA# = "@CONTINUA": GOSUB 2040: VTAB 13: AA# =
FL#: GOSUB 2040
2300 GOTO 2320
2310 VTAB 8: AA# = "@CONTINUA": GOSUB 2040: VTAB 9: AA# = FL#: GOSUB
2040: VTAB 12: AA# = "@DISPERSA": GOSUB 2040: VTAB 13: AA# =
FD#: GOSUB 2040
2320 VTAB 24: HTAB 5: AA# = "PARA CONTINUAR PRESIONA CERO": GOSUB
2040
2330 GET FF#: IF FF# < > CHR# (27) THEN 2330
2340 FR# 0: IN# 0: GOTO 2450
2350 HCOLOR= 3: HPLOT 142.35 TO 142.40 TO 160.40 TO 160.59 TO 1
50.59 TO 150.120 TO 155.135 TO 155.145 TO 153.145 TO 153.15
0
2360 HPLOT 139.35 TO 139.40 TO 128.40 TO 128.55: HPLOT 124.55 TO
124.40 TO 120.40 TO 120.59 TO 130.59 TO 130.120 TO 125.135 TO
125.145 TO 133.145 TO 133.150
2370 HPLOT 142.150 TO 142.145 TO 149.145 TO 149.150: HPLOT 130.
59 TO 130.50: HPLOT 150.59 TO 150.50: HPLOT 120.48 TO 124.4
8: HPLOT 126.48 TO 160.48
2380 HPLOT 121.45 TO 123.45: HPLOT 132.45 TO 137.45: HPLOT 142.
45 TO 147.45: HPLOT 152.45 TO 157.45: HPLOT 121.42 TO 123.4
2: HPLOT 130.42 TO 135.42: HPLOT 140.42 TO 145.42: HPLOT 15
0.42 TO 155.42
2390 HPLOT 138.145 TO 138.140 TO 133.140 TO 133.135 TO 135.135 TO
135.132: HPLOT 137.132 TO 137.135 TO 139.135 TO 139.132: HPLOT
141.132 TO 141.135 TO 143.135 TO 143.132: HPLOT 145.132 TO
145.135 TO 148.135 TO 147.140 TO 142.140 TO 142.145
2400 HPLOT 126.25 TO 126.35 TO 128.35 TO 126.38 TO 124.35 TO 12
6.35: HPLOT 140.35 TO 140.25 TO 142.25 TO 140.22 TO 138.25 TO
140.25
2410 HPLOT 140.160 TO 140.154 TO 138.154 TO 140.150 TO 142.154 TO
140.154: HPLOT 151.150 TO 151.157 TO 153.157 TO 151.160 TO
149.157 TO 151.157
2420 HPLOT 133.130: HPLOT 141.130: HPLOT 144.130: HPLOT 133.126
: HPLOT 149.126: HPLOT 146.122: HPLOT 132.119: HPLOT 141.11
7: HPLOT 147.115
2430 HPLOT 133.112: HPLOT 133.114: HPLOT 143.107: HPLOT 142.104
: HPLOT 136.101: HPLOT 133.96: HPLOT 147.96: HPLOT 141.92
2440 HPLOT 134.87: HPLOT 146.86: HPLOT 139.80: HPLOT 146.73: HPLOT
134.71: HPLOT 141.65: HPLOT 134.61: HPLOT 146.58: HPLOT 148
.53: HPLOT 142.54: HPLOT 135.50: RETURN
2450 POKE 54,129: POKE 55,158
2460 PRINT CHR# (4): "RUN COLUMNA"
4000 D# = CHR# (4)
4010 PRINT D#"OPEN DATOS CONDUCTIVOS"
4020 PRINT D#"DELETE DATOS CONDUCTIVOS"
4030 PRINT D#"OPEN DATOS CONDUCTIVOS"

```

```
4040 PRINT D$ "WRITE DATOS CONOCIDOS"
4050 PRINT SO$: PRINT FD$: PRINT FC$
4060 PRINT MS: PRINT ML: PRINT MF
4070 PRINT BO$: PRINT C$: PRINT TD$: PRINT DE: PRINT NB: PRINT
DT
4080 PRINT GD: PRINT GC: PRINT DD: PRINT VD: PRINT DC: PRINT VC
: PRINT TS
4090 PRINT DU: PRINT DM
4100 PRINT I$: PRINT B1: PRINT B2: PRINT W1: PRINT W2
4110 PRINT D$ "CLOSE DATOS CONOCIDOS"
4120 RETURN
```

LIST *COLUMN*

```

2  TEXT : HOME
5  DIM X(30),Y(30),XE(30),YE(30),Y(30),YA(30),CE(30),CP(30),CL
/   (30),CN(30)
10 D$ = CHR$(4)
20 PRINT D$"OPEN DATOS CONOCIDOS"
30 PRINT D$"READ DATOS CONOCIDOS"
40 INPUT BU$: INPUT BU$: INPUT BU$
50 INPUT MB: INPUT ML: INPUT MP
60 INPUT BU$: INPUT L$: INPUT ID$: INPUT DS: INPUT NB: INPUT DT
70 INPUT GU: INPUT GO: INPUT DU: INPUT VD: INPUT DC: INPUT VL: INPUT
TS
80 INPUT DU: INPUT DM
90 INPUT I$: INPUT B1: INPUT B2: INPUT W1: INPUT W2
100 PRINT D$"CLOSE DATOS CONOCIDOS"
110 HOME : VTAB 12: PRINT "YA SE CALCULO LA ALTURA DE LA COLUMN
A?" (SI/NO)":
112 INPUT " ":AC$
114 IF AC$ = "SI" THEN 116
116 IF AC$ = "NO" THEN 121
118 GOTO 110
119 GOSUB 7500
121 LE$ = "(PARA CONTINUAR PRESIONA (RETURN))"
130 Y1 = B1 * ML / DD / (1 - B1 * (MS - ML) / DD)
135 Y1 = B1 * ML / DD / (1 - B1 * (MS - ML) / DD)
140 X2 = W2 * MP / DC / (1 - W2 * (MS - MP) / DC)
150 IF I$ = "1" THEN 170
160 IF OS = ? THEN B2 = B1 * (1 - FE)
170 Y2 = B2 * ML / DD / (1 - B2 * (MS - ML) / DD)
180 GOTO 210
190 IF OS = ? THEN W1 = W2 * (1 - FE)
200 X1 = W1 * MP / DC / (1 - W1 * (MS - MP) / DC)
210 MS = MS * Y1 + ML * (1 - Y1);MA = MS * X2 + MP * (1 - X2)
220 V1 = GD * DD / MS;L2 = GC * DC / MA
230 L$ = L2 * (1 - X2)
240 VP = V1 * (1 - Y1)
250 AA = VP * Y1 / (1 - Y1) + LP * X2 / (1 - X2)
260 IF I$ = "1" THEN 370
270 AB = AA + VP * Y2 / (1 - Y2)
280 AT = 1 / (1 + LP / AB)
290 W1 = X1 * DC / (MP + (MD - MP) * X1)
300 IF OS$ = "SI" THEN 320
310 IF OS = ? THEN 320
320 HOME : VTAB 11
330 PRINT "LA CONCENTRACION DEL LIQUIDO RESAQU A LA SALIDA ES
OF(1) = "W1:" MOL/LT"
340 GOTO 420
370 AC = AA + LP * X1 / (1 - X1)
380 Y2 = 1 / (1 + VP / AC)
370 B2 = Y2 * DD / (ML + (MS - ML) * Y2)

```

```

380 IF US# = "SI" THEN 400
390 IF OS < > ? THEN 420
400 HOME : VTAB 11
410 PRINT : PRINT "LA CONCENTRACION DEL LIQUIDO LIGERO A LA SA
LIDA ES CL(2)= ":B2:" MOL/LT"
414 REM CALCULO DE LA LINEA DE OPERACION
420 IF OS# = "SI" THEN 424
421 IF AC# = "NO" THEN 430
422 IF AC# = "SI" THEN 426
424 VTAB 22: PRINT LE#:
426 GET EE#
428 IF EE# < > CHR# (13) THEN 426
430 HOME
432 VTAB 12: HTAB 4: PRINT "CALCULO DE LA LINEA DE OPERACION"
436 V2 = VP / (1 - Y2)
438 L1 = LP / (1 - X1)
440 MT = MS * Y2 + ML * (1 - Y2):MJ = MS * X1 + MF * (1 - X1)
450 MD = (MT - M2) / 2:MO = (MA + MJ) / 2
490 AE = LP * X1 / (1 - X1) - VP * Y1 / (1 - Y1)
500 Y0 = Y2
510 DEF FN A(Y0) = AE + VP * Y0 / (1 - Y0)
520 H = (Y1 - Y0) / 20
530 IF X2 < > 0 THEN T = 1: GOTO 550
540 Y0(1) = Y0:Y0 = Y0 + H:T = 2
550 FOR K = T TO 21
560 Y0(K) = Y0
570 X0 = 1 / (1 + LP / FN A(Y0))
580 Y0(K) = X0
590 Y0 = Y0 + H
600 NEXT K
601 IF OS# = "SI" THEN 603
602 IF AC# = "SI" THEN 632
603 HOME
604 PRINT : PRINT "DATOS DE 'X0', 'Y0' (FRACCION MOLAR) DE LA L
INEA DE OPERACION"
605 PRINT : PRINT TAB( 13):"X0": TAB( 32):"Y0"
606 F0KE 34.6
610 PRINT : PRINT
612 FOR L = 1 TO 21
614 X0(L) = INT (10E6 * X0(L) + .5) / 10E6
616 Y0(L) = INT (10E6 * Y0(L) + .5) / 10E6
618 PRINT " ":L:".- ": TAB( 8):" ":X0(L): TAB( 30):" ":Y0(L)
620 PRINT
622 NEXT L
624 F0KE 34.0
626 VTAB 24: PRINT LE#:
628 GET UU#
630 IF UU# < > CHR# (13) THEN 628
632 IF OS# = "SI" THEN 640
634 FOR I = 1 TO 1000: NEXT I
636 GOTO 690
640 IF OS = 3 THEN 660
650 GOTO 1470
660 IF S = 2 THEN 680
670 GOTO 1470
680 GOTO 1070
690 IF AC# = "SI" THEN 750
692 HOME : VTAB 4

```

```

700 PRINT "CALCULO DE LAS COMPOSICIONES EN LA INTERFASE (YA) ,
      "XA". "
710 VTAB 9: PRINT "LAS RELACIONES QUE PUEDE UTILIZAR ESTE PROG
      RAMA SON:"
720 PRINT : PRINT : PRINT " 1) COEFICIENTE DE DISTRIBUCION
      K = CONC.LIQ.LIGERO CE(L) / CONC.LIQ. PESADO
      CE(P)"
730 PRINT : PRINT : PRINT " 2) ALIMENTACION DE DATOS EXPERIMENT
      ALES " CE(P) " CONTRA " CE(L) ", (MOL/LT)"
740 VTAB 22: INPUT "CUAL ES TU OPCION? ": Q
750 IF Q = 1 THEN 1450
760 IF Q = 2 THEN 780
770 GOTO 740
780 IF ACS = "S1" THEN 1070
782 HOME : VTAB 5
790 PRINT : INPUT "ALIMENTA EL NUMERO TOTAL DE PARES DE DATOS:
      ": N
800 PRINT : PRINT "ALIMENTA LOS DATOS EXPERIMENTALES DE " CP
      " Y " CL "
810 PRINT : PRINT TAB( 7) "CP": TAB( 24) "CL"
820 PRINT : PRINT
830 R = 15
840 FOR K = 1 TO N
850 PRINT K ". - " :
860 INPUT " ": CP(K)
870 IF R = 25 THEN R = 23
880 VTAB R: HTAB 23
890 INPUT " ": CL(K)
900 R = R + 2
910 PRINT
920 NEXT K
930 PRINT : INPUT "ESTAN CORRECTOS LOS DATOS? (SI/NO) ": DE$
940 IF DE$ = "SI" THEN 1070
950 IF DE$ = "NO" THEN 970
960 GOTO 930
970 PRINT : INPUT "ALIMENTA EL NUMERO DE LA LISTA QUE ESTA MAL
      ": K
980 PRINT : INPUT "ALIMENTA EL PAR DE DATOS CORREGIDOS SEPARADO
      3 POR UNA COMA (CP,CL): " : CP(K), CL(K)
990 PRINT : PRINT
1000 PRINT : PRINT " ": TAB( 13) "CP", "CL"
1010 FOR K = 1 TO N
1020 CP(K) = INT (10E6 * CP(K) + 0.5) / 10E6
1030 CL(K) = INT (10E6 * CL(K) + 0.5) / 10E6
1040 PRINT : PRINT K ". - " CP(K), CL(K)
1050 NEXT K
1060 GOTO 930
1070 FOR K = 1 TO N
1080 XE(K) = CP(K) * MP / DC / (1 - CP(K) * (MS - MP) / DC)
1090 YE(K) = CL(K) * ML / LD / (1 - CL(K) * (MS - ML) / LD)
1100 NEXT K
1104 REM CORRELACION DATOS ED.
1110 E1 = 0: E2 = 0: E3 = 0: E4 = 0: E5 = 0: E6 = 0: E7 = 0: E8 = 0
1120 FOR K = 1 TO N
1130 E1 = E1 + YE(K) * XE(K)
1140 E2 = E2 + XE(K) ^ 2
1150 E3 = E3 + XE(K) ^ 3

```

```

1160 E4 = E4 + XE(K) ^ 4
1170 E5 = E5 + YE(K) * XE(K) ^ 2
1180 E6 = E6 + XE(K) ^ 5
1190 E7 = E7 + YE(K) * XE(K) ^ 3
1200 E8 = E8 + XE(K) ^ 6
1210 NEXT K
1220 ER = E1 * E4 * E6 + E5 * E6 * E4 + E3 * E6 * E7 - E7 * E4 *
E4 - E5 * E8 * E8 - E6 * E6 * E1
1230 ER = E2 * E4 * E8 + E3 * E6 * E4 + E3 * E6 * E4 - E4 * E4 *
E4 - E3 * E8 * E8 - E6 * E6 * E2
1240 JR = E2 * E5 * E8 + E3 * E7 * E4 + E4 * E1 * E6 - E4 * E5 *
E4 - E3 * E1 * E8 - E2 * E7 * E3
1250 DR = E2 * E4 * E7 + E3 * E6 * E1 + E3 * E5 * E4 - E4 * E4 *
E1 - E3 * E8 * E7 - E6 * E5 * E2
1260 A = DR / ER
1270 B = JR / ER
1280 C = DR / ER
1290 IF AC# = "S1" THEN 1470
1300 HOME : SPEED= 150
1310 PRINT : PRINT "DATOS CORRELACIONADOS DE CONCENTRACIONES EN
EL EQUILIBRIO."
1320 PRINT : PRINT TAB( 8); "CL": TAB( 23); "CP"
1330 PRINT : PRINT
1340 POKE 34.6
1350 FOR K = 1 TO N
1360 Y(K) = A * XE(K) + B * XE(K) ^ 2 + C * XE(K) ^ 3
1370 CN(K) = Y(K) * DD / (ML + (MS - ML) * Y(K))
1380 PRINT : PRINT K, "- CN(K): TAB( 21); CP(K)
1390 NEXT K
1400 POKE 34.0
1402 SPEED= 255
1410 VTAB 23: PRINT LE#:
1420 GET UU#
1430 IF UU# < > CHR# (13) THEN 1420
1440 GOTO 1470
1450 IF AC# = "S1" THEN 1470
1452 HOME : VTAB 11
1460 PRINT : INPUT "ALIMENTA EL COEFICIENTE DE DISTRIBUCION K =
CL/CP PARA EL SISTEMA ":KT
1470 CD = DD / MD:CC = DC / MC
1480 IF Q = 2 THEN 1500
1490 H = KT * CC / CD
1500 GOTO 1690
1520 REM METODO DE SIMPSON 3/8
1570 R = 0:BZ = 0
1580 FOR K = 2 TO 20 STEP 2
1590 R = R + CE(K)
1600 NEXT K
1610 FOR K = 3 TO 19 STEP 2
1620 BZ = BZ + CE(K)
1630 NEXT K
1640 HR = (Y0(21) - Y0(1)) / 20
1650 S1 = CE(1) + 4 * R + 2 * BZ + CE(21)
1660 H3 = HR / 3
1670 OF = H3 * S1
1680 RETURN
1690 FOR K = 1 TO 21
1700 IF Q = 2 THEN 1730

```

```

1710 YA(K) = H * XO(K)
1720 GOTO 1740
1730 YA(K) = A * XO(K) + B * XO(K) ^ 2 + C * XO(K) ^ 3
1740 BI = YO(K) - YA(K)
1750 AI = 1 - YO(K)
1760 LM = ((1 - YA(K)) - (1 - YO(K))) / LOG ((1 - YA(K)) / (1 -
YO(K)))
1770 V = VP / (1 - YO(K))
1780 CE(K) = V * LM / (AI * BI)
1790 NEXT K
1800 GOSUB 1560
1810 IF OS# = "SI" THEN 1964
1820 IF AC# = "SI" THEN 2100
1834 HOME : PRINT "DATOS DE LAS COMPOSICIONES EN LA INTERFASE."
/ Y EL TERMINO DE LA INTEGRAL"
1870 PRINT : PRINT TAB( 13):"YA": TAB( 32):"INTEGRAL"
1930 FPUKE 34.4
1990 PRINT : PRINT
2000 FOR L = 1 TO 21
2010 YA(L) = INT (10E6 * YA(L) + 0.5) / 10E6
2020 CE(L) = INT (10E6 * CE(L) + 0.5) / 10E6
2030 PRINT " ";L;".- " : TAB( 8):" " :YA(L): TAB( 30):" " :CE(L)
2040 PRINT
2050 NEXT L
2060 FPUKE 34.0
2070 VIAB 24: PRINT LE#:
2080 GET UU#
2090 IF UU# < > CHR# (13) THEN 2080
2100 IF Q = 1 THEN 2178
2110 REM CALCULO DE LA PENDIENTE (VARIABLE) DE LA LINEA DE EQU
ILIBRIO NECESARIA PARA EL CALCULO DE KC
2120 ME = 0:MF = 0
2130 FOR K = 1 TO 21
2140 ME = ME + MF
2150 MF = A + 2 * B * XO(K) + 3 * C * XO(K) ^ 2
2160 NEXT K
2170 ME = ME / 21
2172 KT = ME * CD / CC
2178 IF OS# = "SI" THEN 2190
2182 IF AC# = "SI" THEN 3760
2183 SPEED= 150
2184 HOME : VIAB 10: HTAB 7: PRINT "H I D R O D I N A M I C A"
2185 PRINT : HTAB 14: PRINT "D E L A"
2186 PRINT : HTAB 5: PRINT "C O L U M N A D E R I E G O": FOR
I = 1 TO 2000: NEXT I
2187 SPEED= 255
2190 HOME : FQ# = "REGION DE FORMACION DE LAS GUTAS DE LA FASE
DISPERSA.": VIAB 5: PRINT FQ#
2200 REM DATOS NECESARIOS PARA CALCULO DE ED
2210 IF BS# = "NO" THEN 2214
2212 GOTO 2218
2214 DO = DO:DC = DD:DD = DO:GO = GO:GO = OD:GD = GO
2218 PI = 3.141592654
2220 AI = PI * DI ^ 2 / 4
2230 UD = GD / AI:UC = GO / AI
2250 AN = PI * DE ^ 2 / 4
2260 UN = DE / (AN * NE)
2270 Q = 9.8:AD = ABS (DC - DD)
2274 IF OS = 8 THEN 2310
2280 P = DU / 2 * TG ^ 3 / (UG ^ 4 * AD * G)
2290 K = DE / 305 (TG / (AD * G))
2294 IF K * K < 155 THEN DU = DE / (0.485 * K ^ 2 + 1.0): GOTO 23
20
2310 DU = DE / (1.51 * K ^ 2 + 1.0)

```

```

2320 UE = 2.69 * (DJ / DB) ^ 2 * SQR (TS / (DJ * (0.514 * DD +
0.472 * DC)))
2330 IF UN > = UE THEN VC$ = "SI": GOTO 2620
2340 REM REGION ANTES DE LA VELOCIDAD CRITICA DEL CHORRO
2350 X = DB * (AD * G / (PI * TS * DB)) ^ (1 / 3)
2360 F1 = 0.6 + 0.4 * EXP (- 2 * X)
2370 AL = SQR (DB * DB * UN ^ 2 / (2 * TS))
2380 DE = 1.07 - 0.75 * SQR (AD * G * DB ^ 2 / (4 * TS))
2390 IF AL < = DE THEN BE = 0: GOTO 2410
2400 BE = 0.286 * SQR (AD * G * DE ^ 2 / (4 * TS))
2410 N1 = 6 * DB * TS / (AD * G)
2420 N2 = 1.645 * G * AD * DE * (PI / 6) ^ (1 / 3) / (2 * TS)
2430 N3 = 0.857 * DB * DD * UN ^ 2 * (1 + BE) / (2 * TS)
2440 D = DJ * (2.06 * UE / UN + 1.47 * LOG (UN / UE))
2450 Y = 4 * AD * D ^ 2 * G * P ^ 0.15 / (3 * TS)
2460 IF Y > 70 THEN UI = VC * P ^ 0.15 / (DC * D) * (3.701 * Y ^
0.422 - 0.75): GOTO 2490
2470 IF Y > = 2 THEN UI = VC * P ^ 0.15 / (DC * D) * (0.798 *
Y ^ 0.784 - 0.75): GOTO 2490
2480 PRINT "NO EXISTE CORRELACION PARA LOS DATOS QUE AL
IMENTASTE (Y<2)"
2482 VTAB 22: PRINT LE$:
2484 GET EE$
2486 IF EE$ < > CHR$ (13) THEN 2484
2488 GOTO 4000
2490 IF VC$ = "SI" THEN 2720
2500 IF VJ$ = "SI" THEN 2720
2510 EP = N1 * (F1 + N2 * D / UI - N3)
2520 DG = EP ^ (1 / 3)
2530 DG = INT (10E6 * DG + 0.5) / 10E6
2540 D = INT (10E6 * D + 0.5) / 10E6
2550 IF DG = D THEN VJ = SQR (3 * TS * (1 - DB / D) / (DD * DB
)): GOTO 2570
2560 D = DG: GOTO 2450
2570 IF UN < VJ THEN 2710
2580 REM REGION A LA VELOCIDAD DEL CHORRO
2600 VTAB 11: PRINT "REGION A LA VELOCIDAD DEL CHORRO"
2610 VJ$ = "SI": GOTO 2440
2620 REM REGION A LA VELOCIDAD CRITICA DEL CHORRO
2640 VTAB 11: PRINT "REGION A LA VELOCIDAD CRITICA DEL CHORRO"
2650 EO = G * DB ^ 2 * AD / TS
2660 IF C$ = "1" THEN D = 2.07 * DB * (1 - 0.193 * EO): GOTO 24
50
2670 IF EO < 0.615 THEN D = 2.07 * DB / (0.485 * EO + 1): GOTO
2450
2680 D = 2.07 * DB / (1.51 * EO ^ 0.5 + 0.12)
2690 GOTO 2450
2710 VTAB 11: PRINT "REGION ANTES DE LA FORMACION DEL CHORRO"
2720 VC$ = " ": VJ$ = " "
2730 VTAB 22: PRINT LE$:
2740 GET EE$
2750 IF EE$ < > CHR$ (13) THEN 2740
2770 UN OS GOTO 2820, 2820, 2820, 2820, 2820, 2820, 2820, 2820, 2820

```

```

2780 HOME : VTAB 5: PRINT "CALCULO DEL PORCIENTO DE RETENCION D
E LAFASE DISPERSA."
2782 PRINT : PRINT : PRINT "OPCIONES:"
2790 PRINT : PRINT : HTAB 3: PRINT "1) SOLUCION ITERATIVA"
2800 PRINT : HTAB 3: PRINT "2) SOLUCION DIRECTA (HUGHMARK)"
2810 VTAB 17: INPUT "CUAL ES TU OPCION? ":HU$
2820 IF HU$ = "1" THEN 2850
2830 IF HU$ = "2" THEN 3130
2840 GOTO 2810
2850 REM CALCULO DE ED
2860 CI = AD * D * G / (6 * DC * UI ^ 2) - 3 * VC / (DC * D * UI
)
2870 NC = VC / DC
2880 AR = AD * G * D ^ 3 / (DC * NC ^ 2)
2890 C1 = NC * D * 3 / C1
2900 C2 = CI * AR / 54
2910 C3 = (1 - .31 * (VC / VD) * 0.39) * 5
2920 H = 0.001
2930 X1 = 0.01:XF = 0.20
2940 ED = X1
2950 GOSUB 5000
2960 FI = F
2970 XS = XI
2980 XD = XS + H
2990 ED = XD
3000 GOSUB 5000
3010 FD = F
3020 IF FI < FD THEN 3080
3030 IF XD > = XF THEN ED = XD: GOTO 3110
3040 XI = XD
3050 XS = XD
3060 FI = FD
3070 GOTO 2980
3080 IF XD > = XF THEN ED = XI: GOTO 3110
3090 XS = XD
3100 GOTO 2980
3110 IF ED > = XF THEN PRINT : PRINT "EL METODO ITERATIVO NO
CONVERGE. SE USARA LA SOLUCION DIRECTA (HUGHMARK)": GOTO 3
130
3120 GOTO 3200
3130 REM CALCULO DE ED POR LA CORRELACION DE ZENZ (HUGHMARK)
3140 CU = UD / UI
3150 IF CU < 0.02 THEN FH = CU: GOTO 3180
3160 IF CU > 0.05 THEN FH = - 0.0225 + 1.36 * CU + 2.98 * CU ^
2: GOTO 3180
3170 FH = - 0.0023 + 1.11 * CU
3180 RC = SQR ((UC - UD - UD / FH) ^ 2 - 4 * UD ^ 2 / FH)
3190 ED = (UD + UD / FH - UC - RC) / (2 * UD / FH)
3200 HOME : VTAB 11: PRINT "LA RETENCION DE LA FASE DISPERSA ES
:"
3202 VTAB 13: HTAB 11: PRINT "ED=":ED * 100:" %"
3210 VTAB 24: PRINT LE$:
3220 GET XX$
3230 IF XX$ < > CHR$ (13) THEN 3220
3240 REM CALCULO DE LA VELOCIDAD DE INUNDACION DE LA FASE CONT
INUA. UF
3250 UF = SQR ((0.525 * (D / 0.0254) ^ 0.25 / (1 + 1.2 * (UD /
UC) ^ 0.5 * (DD / DC) ^ 0.25)) ^ 4 * (4.17E8 * AD / (DC *

```

```

VC / 1E - 3) ^ 0.25))) * 0.3048 / 3600
3260 UF = INT (UF * 1E5 + 0.5) / 1E5
3270 HOME : VTAB 11
3280 PRINT " LA VELOCIDAD DE INUNDACION DE LA FASE CONTINUA ES
:"
3282 VTAB 14: NTAB 12: PRINT "UF=":UF:" M/S"
3290 IF UC < UF THEN 3310
3300 PRINT : PRINT : PRINT : PRINT "LA COLUMNA TRABAJA POR ENCI
MA DE LA VELOCIDAD DE INUNDACION. ES NECESARIO DISMINUIR EL
GASTO VOLUMETRICO DE LA FASE CONTINUA CAMBIANDO EL DIAMETR
O DE LA COLUMNA": GOTO 4010
3310 IP = UC / UF * 100: IP = INT (IP * 1E2 + 0.5) / 1E2
3320 PRINT : PRINT : PRINT : PRINT "LA COLUMNA OPERA AL ":IP:"
% DE LA VELOCIDAD DE INUNDACION"
3330 VTAB 22: PRINT LE$:
3340 GET II$:
3350 IF II$ < > CHR$ (13) THEN 3340
3360 ON OS GOTO 3420,3420,3420,3420,3420,3420,3420,3420,3420
3362 IF OS = "SI" THEN 3372
3370 HOME : VTAB 11: PRINT "COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSPORTE DE
MASA": FOR I = 1 TO 1000: NEXT I
3372 HOME : VTAB 5: PRINT "CALCULO DEL COEFICIENTE GLOBAL DE TR
ANS PORTE DE MASA."
3380 PRINT : PRINT : PRINT "OPCIONES:"
3390 PRINT : PRINT : PRINT " 1) DIRECTAMENTE (EC. DE CORRELACIO
N)"
3400 PRINT : PRINT " 2) A PARTIR DE LOS COEFICIENTES INDIVI
DUALES DE TRANSF. DE MASA (SOLUCION ES DILUIDAS)"
3410 VTAB 19: INPUT "CUAL ES TU OPCION? ":KI$
3420 IF KI$ = "1" THEN 3600
3430 IF KI$ = "2" THEN 3450
3440 GOTO 3410
3450 UL = UC / (1 - ED) + UD / ED
3460 K1 = (D * UL * DC / VC) ^ (- 0.43)
3470 K2 = (VC / (DC * DM)) ^ (- 0.58)
3480 KO = 0.725 * K1 * K2 * UL * (1 - ED)
3490 DP = 7.25 * SQR (TS / (G * AD * P ^ 0.15))
3500 IF D > DP THEN 3530
3510 KD = 17.9 * DU / D
3520 GOTO 3540
3530 K = 0.00375 * UL / (1 + VD / VC)
3540 AP = 6 * ED / D
3550 IF BS$ = "NO" THEN 3580
3560 KR = KD * AP * KO * AP / (KO * AP + KT * KD * AP)
3570 KC = KR: GOTO 3670
3580 KU = KU * AP * KU * AP / (KO * AP + KT * KD * AP)
3590 KC = KU: GOTO 3670
3600 REM NUMEROS DE SCHMIDT DE LAS FASES
3610 SD = VD / (DD * DU): SC = VC / (DC * DM)
3620 KA = 0.081 * ED * (1 - ED) * (G ^ 3 * AD ^ 3 / (TS * DC ^ 2
)) ^ 0.25
3630 IF BS$ = "NO" THEN 3660
3640 KC = KA / (KT * SC ^ 0.5 + SD ^ 0.5)
3650 GOTO 3670
3660 KC = KA / (6C ^ 0.5 + SD ^ 0.5 / KT)
3670 HOME : VTAB 8: PRINT "EL COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSPORTE
DE MASA REFERIDO A CONCENTRACION ES:"

```

```

3680 VTAB 11: HTAB 11: PRINT "KC=":KC:" 1/3"
3681 VTAB 22: PRINT LE$:
3682 GET TT$
3684 IF TT$ < > CHR$ (13) THEN 3682
3690 KC = CD * KC
3700 Z = DP / (KC * PI * D1 ^ 2 / 4)
3704 Z = INT (Z * 1E2 + 0.5) / 1E2
3710 HOME : VTAB 9: PRINT "LA ALTURA DE LA COLUMNA ES:"
3711 VTAB 11: HTAB 14: PRINT "Z=":Z:" M"
3714 FOR I = 1 TO 1000: NEXT I
3720 IF AC$ = "NO" THEN 3750
3722 HOME : VTAB 12: PRINT "DESEAS VER LA PRESENTACION DE RESUL
TADOS(SI/NO)?":
3724 INPUT " ":VP$
3726 IF VP$ = "SI" THEN 3748
3728 IF VP$ = "NO" THEN 3760
3730 GOTO 3722
3748 IF UD$ = "SI" THEN 3750
3747 GOTO 3754
3750 GOSUB 6000
3754 GOSUB 7000
3756 PRINT CHR$ (4):"RUN PRESENTACION DE RESULTADOS"
3760 HOME : VTAB 13: HTAB 5: PRINT "DESEAS PROBAR LA OTRA OPCIO
N EN EL CALCULO DE EL % DE RETENCION Y EL COEFI CIENTE GLO
BAL DE TRANSPORTE DE MASA? (SI/NO)":
3770 INPUT " ":UD$
3780 OS = 0
3790 IF OD$ = "SI" THEN HOME : GOTO 2210
3800 IF OD$ = "NO" THEN 3840
3810 GOTO 3760
3840 IF OS$ = "SI" THEN 3848
3842 HOME : VTAB 12: HTAB 8: PRINT "S I M U L A C I O
N": FOR I = 1 TO 2000: NEXT I
3848 HOME : PRINT "DESEAS CAMBIAR ALGUNA DE LAS SIGUIENTES:"
3850 PRINT : PRINT "1).- DIAMETRO DE LA COLUMNA"
3860 PRINT "2).- NUMERO DE BOQUILLAS (ORIFICIOS):"
3870 PRINT "3).- DENSIDADES DE LAS FASES"
3880 PRINT "4).- VISCOSIDADES DE LAS FASES"
3890 PRINT "5).- TENSION SUPERFICIAL ENTRE LAS FASES"
3900 VTAB 9: PRINT "6).- DIFUSIVIDAD DEL SOLUTO EN LAS FASES"
3910 VTAB 10: PRINT "7).- GASTOS VOLUMETRICOS DE LAS FASES"
3920 PRINT "8).- % DE RETENCION DE LA FASE DISPERSA"
3930 PRINT "9).- % DE EXTRACCION DEL SOLUTO"
3940 VTAB 18: INPUT "(SI/NO)? ":OS$
3950 IF OS$ = "SI" THEN 3980
3960 IF OS$ = "NO" THEN 4000
3970 GOTO 3940
3980 PRINT : INPUT "ALIMENTA EL NUMERO CORRESPONDIENTE ":US:OS =
INT (US)
3990 ON OS GOTO 4010,4030,4100,4150,4200,4220,4050,4270,4220
4000 HOME : VTAB 12: PRINT "DESEAS VOLVER AL INICIO DEL PROGRAM
A (SI/NO)?":
4001 INPUT " ":DV$
4002 IF DV$ = "SI" THEN PRINT CHR$ (4):"RUN MENU"
4004 IF DV$ = "NO" THEN HOME : VTAB 12: HTAB 10: PRINT "TERMIN
A EL PROGRAMA": FOR I = 1 TO 2000: NEXT I: HOME : END

```

```

4006 GOTO 4000
4010 PRINT : PRINT "ALIMENTA EL DIAMETRO DE LA COLUMNA (M) ":
4012 INPUT " ":DI
4020 GOTO 2190
4030 PRINT : INPUT "ALIMENTA EL NUMERO DE BOQUILLAS (U ORI FIC
IUS) ":NB
4040 GOTO 2190
4050 PRINT : PRINT "ALIMENTA EL GASTO VOLUMETRICO DE LA FASE DI
SPERSA ":FD$:" (M3/S)^":
4060 INPUT " ":GD
4070 PRINT : PRINT "ALIMENTA EL GASTO VOLUMETRICO DE LA FASE CO
NTINUA ":FC$:" (M3/S)^":
4080 INPUT " ":GC
4082 IF GC$ = "NO" THEN 4086
4084 GOTO 4090
4086 GC = GD:GD = GC:GL = GC
4090 GOTO 130
4100 PRINT : PRINT "ALIMENTA LA DENSIDAD DE LA FASE DISPERSA ":
FD$:" (KG/M3)^":
4110 INPUT " ":LD
4120 PRINT : PRINT "ALIMENTA LA DENSIDAD DE LA FASE CONTINUA ":
FC$:" (KG/M3)^":
4130 INPUT " ":DC
4132 IF DC$ = "NO" THEN 4136
4134 GOTO 4140
4136 DC = DD:DD = DC:DC = DD
4140 GOTO 130
4150 PRINT : PRINT "ALIMENTA LA VISCOSIDAD DE LA FASE DISPERSA
":FD$:" (KG/M-S)^":
4160 INPUT " ":VD
4170 PRINT : PRINT "ALIMENTA LA VISCOSIDAD DE LA FASE CONTINUA
":FC$:" (KG/M-S)^":
4180 INPUT " ":VC
4190 GOTO 2190
4200 PRINT : INPUT "ALIMENTA LA TENSION SUPERFICIAL ENTRE LAS F
ASES (NEWTON/M) ":TS
4210 GOTO 2190
4220 PRINT : PRINT "ALIMENTA LA DIFUSIVIDAD DE ":SO$:" EN LA FA
SE DISPERSA ":FL$:" (M2/S)^":
4230 INPUT " ":DU
4240 PRINT : PRINT "ALIMENTA LA DIFUSIVIDAD DE ":SO$:" EN LA FA
SE CONTINUA ":FC$:" (M2/S)^":
4250 INPUT " ":DM
4260 GOTO 2190
4270 PRINT : INPUT "ALIMENTA EL VALOR PROPUESTO PARA ED (SU LO
VALIDO PARA LA OPCION 1 DEL COEFICIENTE GLOBAL) ":ED: GOTO
2210
4280 PRINT : INPUT "ALIMENTA EL % DE EXTRACCION (ENTRE 0 Y 1) "
:PE: GOTO 130
5000 REM SUBROUTINA DEL METODO ITERATIVO PARA CALCULAR ED
5010 Z0 = (1 - ED) / ED * EXP (ED / (0.4 - 0.244 * ED))
5020 Q3 = (ED / (1 - ED)) ^ 0.45 * C3
5030 FL = C1 * Z0 * ED / ((1 - ED) * Q3) * (((C2 * Q3 * (1 - ED)
^ 3 / (Z0 * ED) ^ 2) + 1) ^ 0.5 - 1)
5040 FC = UC / (1 - ED) + UD / ED
5050 F = ABS (ABS (FL) - ABS (FC))

```

```
5060 RETURN
6000 D$ = CHR$(4)
6010 PRINT D$"OPEN DATOS INTERMEDIOS"
6020 PRINT D$"DELETE DATOS INTERMEDIOS"
6030 PRINT D$"OPEN DATOS INTERMEDIOS"
6040 PRINT D$"WRITE DATOS INTERMEDIOS"
6050 PRINT Q: PRINT HU$: PRINT KI$
6060 IF Q = 2 THEN 6090
6070 PRINT KT
6080 GOTO 6130
6090 PRINT N
6100 FOR K = 1 TO N
6110 PRINT CP(K): PRINT CL(K)
6120 NEXT K
6130 PRINT D$"CLOSE DATOS INTERMEDIOS"
6140 RETURN
7000 D$ = CHR$(4)
7001 PRINT D$"OPEN RESULTADOS"
7002 PRINT D$"DELETE RESULTADOS"
7004 PRINT D$"OPEN RESULTADOS"
7006 PRINT D$"WRITE RESULTADOS"
7008 PRINT BQ$: PRINT GQ: PRINT GC: PRINT B1: PRINT B2: PRINT W
1: PRINT W2
7010 PRINT FQ$: PRINT FC$: PRINT TQ$: PRINT DT: PRINT IP: PRINT
ED: PRINT Z
7012 PRINT D$"CLOSE RESULTADOS"
7014 RETURN
7500 D$ = CHR$(4)
7510 PRINT D$"OPEN DATOS INTERMEDIOS"
7520 PRINT D$"READ DATOS INTERMEDIOS"
7530 INPUT Q: INPUT HU$: INPUT KI$
7540 IF Q = 2 THEN 7570
7550 INPUT KT
7560 GOTO 7610
7570 INPUT N
7580 FOR K = 1 TO N
7590 INPUT CP(K): INPUT CL(K)
7600 NEXT K
7610 PRINT D$"CLOSE DATOS INTERMEDIOS"
7620 RETURN
```

