

ESTUDIO CUALITATIVO DE UNA INESTABILIDAD DE DENSIDAD ENTRE FLUIDOS MISCIBLES EN UN MEDIO POROSO

A. Schuschny, M. Piva(*), A. Calvo, M. Rosen (**)

Grupo de Medios Porosos, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires,
Paseo Colón 850, 1063 Buenos Aires.

A partir de secuencias de fotografías tomadas en experiencias sobre medios porosos bidimensionales verticales, se midieron las características dinámicas del fenómeno de digitación por densidad entre fluidos miscibles. Este se debe a una inestabilidad que aparece cuando desde abajo un fluido menos denso desplaza a uno más denso que se encuentra en la parte superior de la muestra.

Simultáneamente se determinaron por absorción de microondas los coeficientes de dispersión correspondientes a los casos estables e inestables.

INTRODUCCION

Un medio poroso bidimensional, colocado en posición vertical, se encuentra saturado con un fluido. Desde la base inferior se inyecta otro fluido, miscible con el primero, de densidad menor.

En la zona de mezcla aparecen perturbaciones locales que crecen dando lugar a una inestabilidad gravitacional (*fingering*). La misma se va desarrollando a medida que el fluido menos denso avanza.

El estudio de esta inestabilidad es de gran importancia en campos tales como la hidrología de costas, donde el agua salada penetra en suelos saturados con agua dulce, produciendo modificaciones en la composición de las napas subterráneas de tierras cultivables.

El objetivo de este trabajo es estudiar las condiciones en las que evolucionan estos "dedos". Realizando dos tipos de experiencias complementarias (técnica de absorción de microondas y visualización fotográfica), caracterizarlos y asociarlos al fenómeno de dispersión.

DESCRIPCION DE LA EXPERIENCIA

Se ha construido una celda rectangular de acrílico transparente cuyas dimensiones son de 27 x 21 y 1 cm de espesor. En la misma se incorporan microesferas de vidrio de un diámetro de 500 μm , compactadas de tal manera que el lecho poroso tenga una distribución poral homogénea (Porosidad: $\phi = 0.4$).

* Becario UBA

** Investigador CONICET

La celda se satura con agua (líquido de menor densidad ρ_1). Por la base se inyecta una solución salina de densidad $\rho_2 > \rho_1$, coloreada con rodamina. En estas condiciones el desplazamiento es estable y el frente resultante es plano. Para evitar efectos dispersivos se aplicaron caudales máxicos bajos 1 g/min. $\leq Q \leq 5$ g-min. Al llegar el frente a la mitad de la celda, la misma se invierte, creciendo a partir de la zona de mezcla la inestabilidad: dedos gravitatorios o de densidad.

A partir de los datos obtenidos por absorción de microondas ⁽¹⁾, es posible obtener la evolución del perfil de concentraciones en función del tiempo. Así, se calcula el coeficiente de dispersión longitudinal para distintos caudales de inyección (A.F.A. 1990).

Para estas mismas condiciones de trabajo se toman secuencias de fotografías, que permiten observar el crecimiento y la estructura de los "dedos", hasta que llegan al borde opuesto de la celda.

Se estudian las fotografías obtenidas calculando para cada caudal la longitud de onda media ($2 \times$ ancho de la celda/ N° dedos) y la velocidad de crecimiento de la inestabilidad.

DISCUSION DE LOS RESULTADOS

A partir de las curvas de concentración en función del tiempo, obtenidas mediante la técnica de absorción de microondas (fig. 1 y 2) se calculó, ajustando con la función error, el coeficiente de dispersión longitudinal. Efectivamente la solución de la ecuación de convección-difusión para fluidos miscibles⁽²⁾, en el caso bidimensional es de la forma:

$$\partial c/\partial t + v \partial c/\partial z = D_L \partial^2 C/\partial Z^2$$

$$C(Z,t) = (1/2) \operatorname{erf} [z - vt]/2(D_L t)^{1/2}$$

Donde $C(Z,t)$ es la concentración. v es la velocidad de desplazamiento, D_L es el coeficiente de dispersión longitudinal y la coordenada Z se mide a partir de la base de inyección.

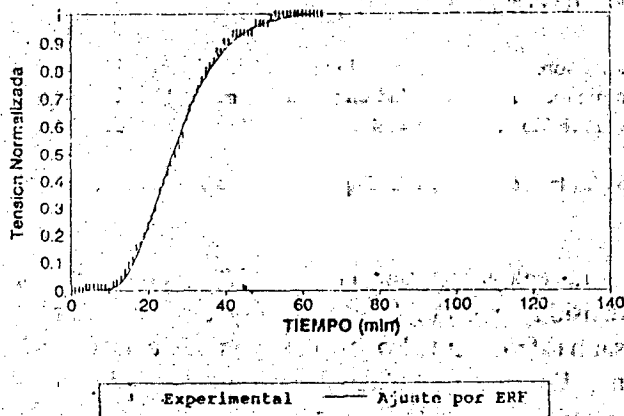


Figura 1: Curva de dispersión obtenida por absorción de microondas para el caudal $Q=1\text{g/min}$, $D=10^{-3}\text{cm}^2/\text{s}$.

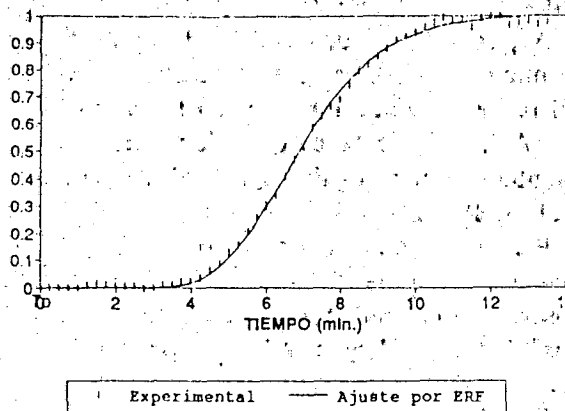


Figura 2: Curva de dispersión obtenida por absorción de microondas para el caudal $Q=20\text{g/min}$, $D=2 \times 10^{-3}\text{cm}^2/\text{s}$.

Para condiciones iniciales (inyección tipo escálon)

$$C(Z, 0) = \begin{cases} 1 & \text{si } z < 0 \\ 0 & \text{si } z > 0 \end{cases}$$

la solución es:

La velocidad de inyección v se caracteriza con un número adimensional P_e (número de Peclet) definido como la relación entre los efectos convectivos y difusivos $P_e = vl / \phi D_m$ (D_m : coeficiente de difusión molecular $\approx 10^{-5}\text{cm}^2/\text{seg.}$, l : diámetro medio de los poros).

Los coeficientes de dispersión obtenidos para desplazamientos estables e inestables son representados en la fig.3 en función de P_e comparados con los valores teóricos calculados por Saffman⁽²⁾. Se ve que el coeficiente de dispersión longitudinal se aparta notablemente del valor teórico para $P_e < 10$ debido a la presencia de inestabilidades.

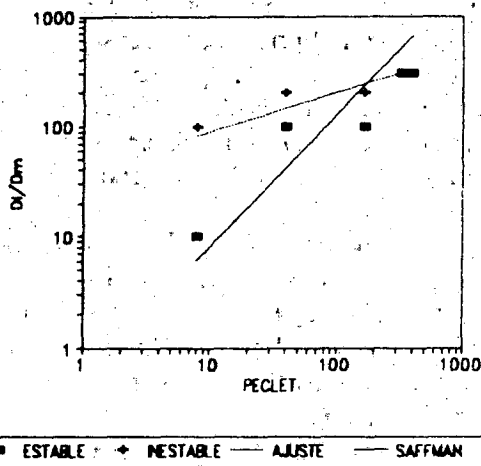


Figura 3: Coeficiente de dispersión longitudinal referido al de difusión molecular en función del número de P_e para desplazamientos estables e inestables.

En la fig. 4 se muestra, a modo de ejemplo, una de las secuencias fotográficas obtenidas durante una experiencia inestable. El análisis de las fotografías para distintos P_e muestra que a medida que aumenta el caudal, la longitud de los dedos disminuye y su número aumenta de manera que altos P_e (>100) no es posible individualizarlos. A estos P_e , el fenómeno de dispersión enmascara el de digitación por densidad.

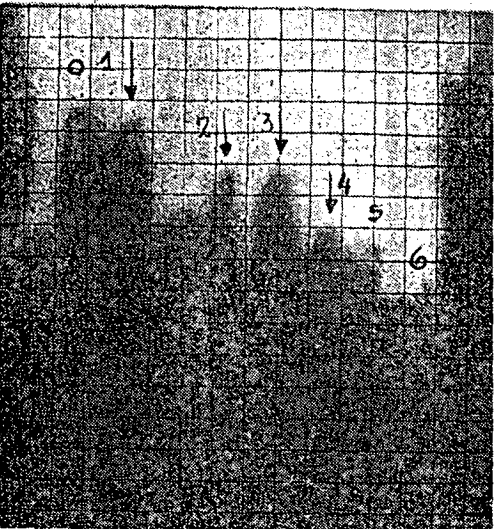
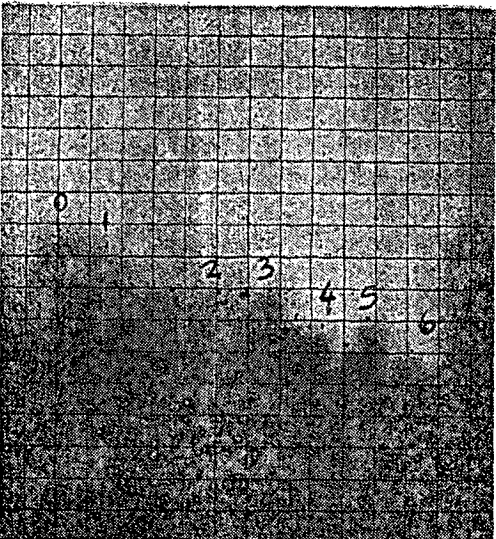
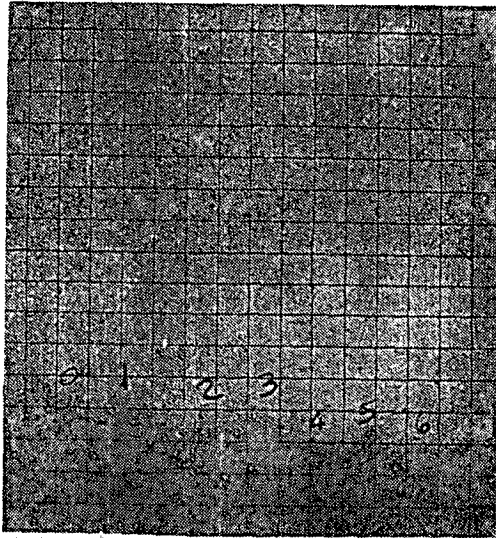


Figura 4: Secuencia fotográfica del crecimiento de los dedos para $Pe=12$.

En las figs. 5 y 6 se muestra, para $Pe=12$ y $Pe=40$ el crecimiento de los dedos en función del tiempo normalizado ($t^* = vt / L_0$, donde L_0 es la longitud de la celda). Se ve que, para un Pe fijo, todos los dedos crecen aproximadamente con la misma velocidad durante la primera parte de la experiencia y que a menor caudal la velocidad de crecimiento de la inestabilidad es mayor.

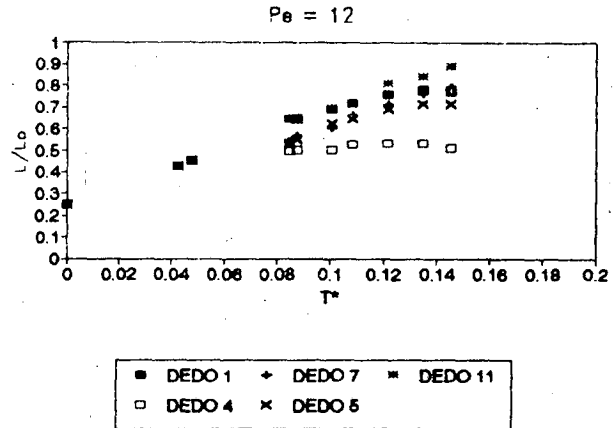


Figura 5: Crecimiento de algunos dedos en función del tiempo normalizado para $Pe=12$.

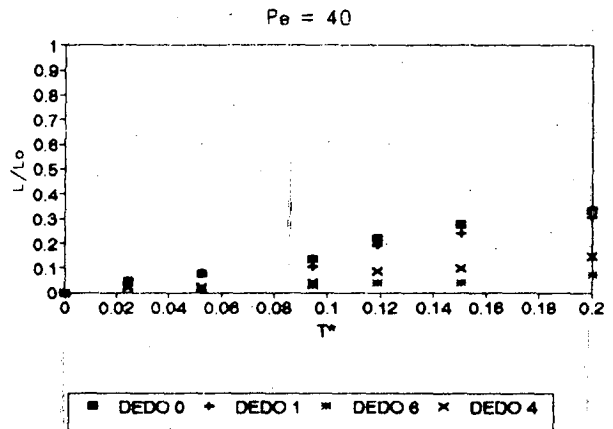


Figura 6: Crecimiento de algunos dedos en función del tiempo normalizado para $Pe=40$.

En las figs. 7 y 8 se muestran la secuencia fotográfica y el crecimiento de los dedos para otra condición experimental, pero con el mismo caudal que el correspondiente a la fig. 5. En este caso se inyecta el fluido menos denso en el punto medio del borde inferior. Se observa que, contrariamente a lo que ocurre en el caso de inyección homogé-

nea, una zona central crece de manera preferencial. Se conoce este fenómeno con el nombre de apantallamiento, donde uno de los dedos crece a expensas de los otros.

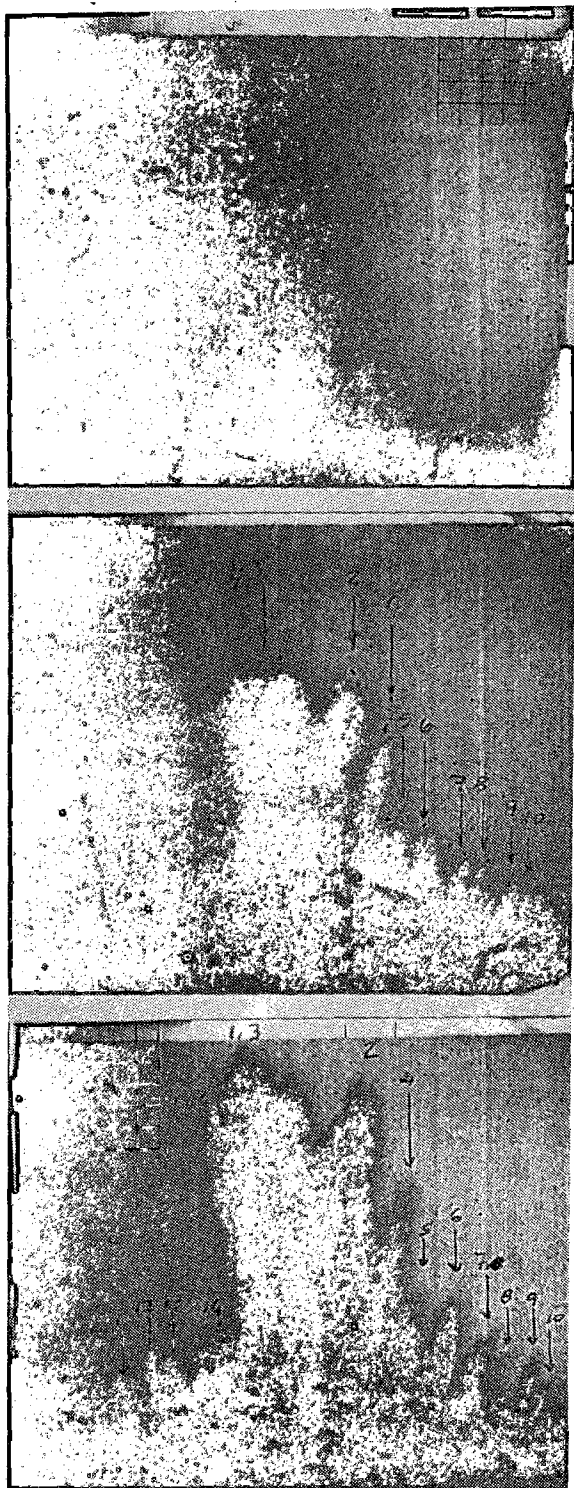


Figura 7: Secuencia fotográfica para $P_e=12$ con inyección en un punto de la base.

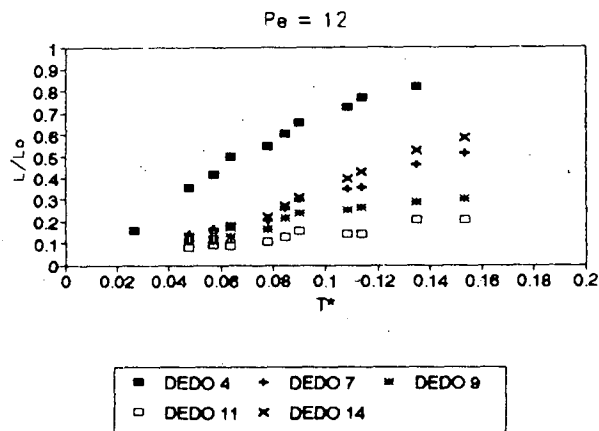


Figura 8: Crecimiento de algunos dedos en función del tiempo normalizado para $P_e=12$ con inyección en un punto de la base.

Simultáneamente se estudió el crecimiento de la longitud de onda media^(3,4) en función de T_n (fig.9), donde T_n es el tiempo relativo al tiempo de llegada al borde superior del fluido desplazante. Se observa que en todos los casos la longitud de onda aumenta con el tiempo, lo que se conoce con el nombre de fenómeno de coalescencia, pero este efecto es mucho más notable para P_e bajos que para altos. De la misma figura se desprende lo expuesto más arriba, es decir que la longitud de onda media disminuye con la velocidad de flujo. Para $P_e > 100$ el fenómeno de dispersión hidrodinámica enmascara totalmente el proceso de digitación y se observa un frente filamentososo.

CONCLUSIONES

Hemos realizado mediciones independientes del coeficiente de dispersión longitudinal y caracterizado el crecimiento de los dedos mediante la técnica de visualización. El orden de magnitud de estos coeficientes de dispersión refleja la presencia ya sea de inhomogeneidades o inestabilidades en el proceso.

Si bien este resultado corresponde a un análisis lineal válido en primera aproximación, en el crecimiento de estos dedos y en el comportamiento de la longitud de onda (fenómeno no lineal) no aparecen correlacionados de forma directa. Esta es la etapa que se encara actualmente.

REFERENCIAS

1. J.Bear. "Dynamics of fluids in porous media", Ed. American Elsevier (1967).
2. I.Ippolito, Tesis de Licenciatura, FCEyN, UBA, (1989).
3. Maxworthy, T.: J.Fluid Mech. (1987), vol. 177, pp. 207-232.
4. Wooding, R.A.: J.Fluid Mech. (1969), vol. 39, pp. 477-495.

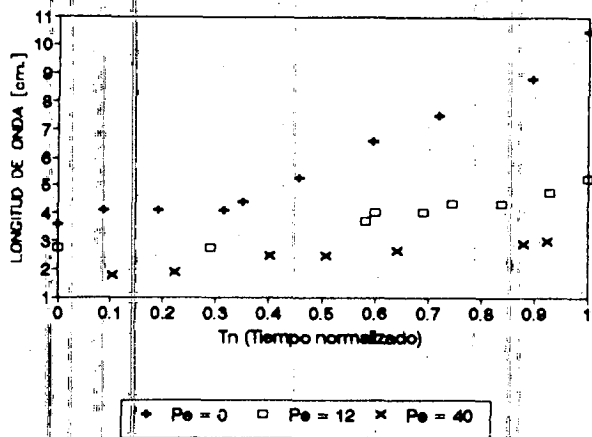


Figura 9: Variación de la longitud de onda media en función del tiempo normalizado para tres velocidades de desplazamiento.