

El enfoque no lineal de la hidráulica subterránea aplicado a la recarga artificial a través de trincheras de penetración superficial

DIOSDADO PEREZ FRANCO (*)

RESUMEN. Siguiendo los principios de la teoría no lineal del flujo en medios porosos desarrollada por el autor, se analiza el flujo no lineal hacia una trinchera de recarga que penetra solamente la parte superior de un acuífero libre. Teniendo en cuenta que la recarga se incorpora al flujo natural del agua subterránea en el acuífero, se determina que para el caso de flujo lineal hacia la trinchera, el agua del acuífero y la recarga se mezclan dentro de los límites de un contorno conocido delimitado por una línea de corriente que sirve de frontera. Se demuestra, además, que para el caso del flujo no lineal, los conceptos del flujo potencial también pueden ser aplicados, excepto en una pequeña «zona singular» alrededor de la trinchera, de modo que la posición de la línea de corriente límite resulta la misma para flujo lineal y no lineal cuando el valor del caudal recargado por unidad de longitud es igual.

THE NON-LINEAR APPROACH TO GROUNDWATER HYDRAULICS APPLIED TO ARTIFICIAL RECHARGING VIA PENETRATION TRENCHES

ABSTRACT. An analysis is carried out of non-linear flow through a shallow trench which only reaches the upper part of an unconfined aquifer, by applying the non-linear flow theory of groundwater hydraulics that was developed by the author. Taking into account the fact that recharge is incorporated into a flowing mass of water in the aquifer, it has been found that when applying potential flow concepts for linear flow, the aquifer and the recharging water will mix within the limits of a known boundary line. Potential flow concepts can also be applied for non-linear flow, except in a «singular zones» around the trench, but the boundary line will be the same as for linear flow when the value of recharged flow per unit length is the same.

1. INTRODUCCION

El trabajo de investigación realizado por el autor sobre la aplicación del enfoque no lineal al flujo del agua subterránea, aparte de formular una nueva base teórica para la disciplina (2), ha hecho posible entre otras cuestiones: identificar las propiedades hidráulicas intrínsecas del medio que deben tenerse en cuenta en el flujo no lineal (4, 7); establecer nuevos criterios para la definición de los regímenes de flujo y sus límites; presentar una nueva imagen del flujo y de las zonas que deben considerarse alrededor de un pozo de bombeo (6); encontrar nuevas ecuaciones que caracterizan el flujo no lineal hacia los pozos (3) y aplicar el enfoque no lineal a la recarga artificial a través de pozos (8).

A continuación, siguiendo los principios de la teoría no lineal del flujo del agua subterránea, se analiza el flujo de recarga hacia una trinchera de penetración superficial y se combina con el flujo natural del acuífero, brindando una nueva imagen de este tipo de flujo que permite definir una línea de separación entre la zona del acuífero en que se mezclan el flujo natural y el de recarga y la otra zona del acuífero a que no llega el agua recargada.

2. FLUJO NO LINEAL PERMANENTE HACIA UNA TRINCHERA DE RECARGA, QUE PENETRA SOLAMENTE LA PARTE SUPERIOR DE UN ACUÍFERO LIBRE

Como se sabe, la ley general del flujo del agua subterránea puede expresarse como (2, 7):

(*) Profesor de Ingeniería Hidráulica, Instituto Superior Politécnico «José A. Echaverri», La Habana, Cuba.

$$I = \frac{U}{K_D} + \frac{U^2}{K_T^2} \quad [1]$$

donde:

I : gradiente hidráulico

U : velocidad aparente del flujo del agua subterránea

K_D : conductividad hidráulica darciana (lineal)

K_T : conductividad hidráulica turbulenta

Si se considera que la superficie piezométrica es horizontal en un acuífero freático no perturbado, sin circulación natural, homogéneo e isotrópico y de gran espesor, el flujo de recarga a través de una trinchera de penetración superficial (que penetra solamente la parte superior de un acuífero libre) presentará un patrón de flujo semicilíndrico en el plano vertical, tal como aparece en la figura 1, y resultará que:

$$q_r = \pi r U = \pi x U \quad [2]$$

$$I = -\frac{dh_r}{dx} = \frac{dh_r}{dr} \quad [3]$$

donde:

q_r : caudal recargado por unidad de longitud de la trinchera

h_r : altura del agua recargada sobre el nivel de la superficie freática a la distancia x desde el centro de la trinchera

Combinando las ecuaciones 1, 2 y 3 se obtiene:

$$-\frac{dh_r}{dx} = \frac{q_r}{\pi K_D x} + \frac{q_r^2}{\pi^2 K_T^2 x^2} \quad [4]$$

Integrando la ecuación 4 dentro de los límites $x = x_L$, $h_r = h_r$; $h_r = 0$, resulta:

$$h_r = \frac{q_r}{\pi K_D} \ln \frac{x_L}{x} + \frac{q_r^2 (x_L - x)}{\pi^2 K_T^2 x_L} \quad [5]$$

La ecuación 5 muestra que h_r tiene dos componentes: una componente lineal o Darciana representada por el primer término del segundo miembro y una componente turbulenta representada por el segundo término.

Si se supone que la pared de la trinchera está a una distancia x_w del centro de la misma (origen de coordenadas) y que x_w es igual al radio de una trinchera semicilíndrica de igual área de entrada que la real (igual perímetro mojado) resultará que la altura h_1 del agua recargada dentro de la trinchera por encima del nivel freático será:

$$h_1 = \frac{q_r}{\pi K_D} \ln \frac{x_L}{x_w} + \frac{q_r^2 (x_L - x_w)}{\pi^2 K_T^2 x_w \cdot x_L} \quad [6a]$$

si se tiene en cuenta que $x_L \gg x_w$, puede decirse que:

$$\frac{x_L - x_w}{x_w \cdot x_L} = \frac{1}{x_w}$$

Lo que permite transformar la ecuación 6a en:

$$h_1 = \frac{q_r}{\pi K_D} \ln \frac{x_L}{x_w} + \frac{q_r^2}{\pi^2 K_T^2 x_w} \quad [6b]$$

Las ecuaciones 5, 6a y 6b representan la solución analítica del flujo permanente no lineal a través de una trinchera de penetración superficial en un acuífero libre,

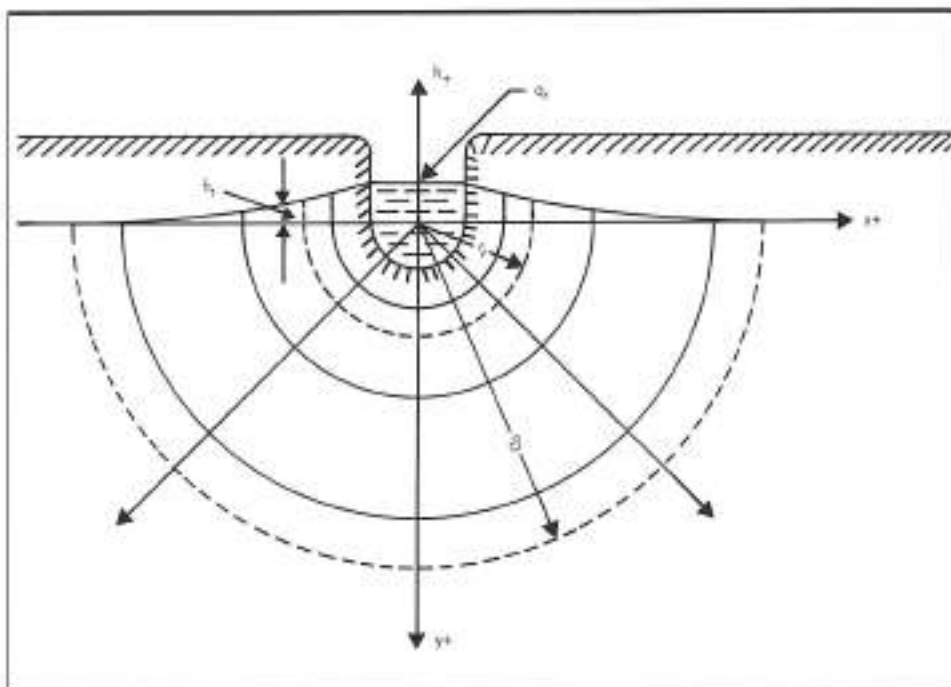


FIGURA 1. Representación esquemática del flujo a través de una trinchera de recarga.

sin tomar en consideración el flujo natural en el acuífero.

3. LOCALIZACION DE ZONAS DE FLUJO ALREDEDOR DE LA TRINCHERA DE RECARGA

Utilizando los mismos criterios que en el caso de un pozo de bombeo (6) o de un pozo de recarga (8) y siguiendo las ideas de Mobasher y Todd (1) es posible reconocer en el caso más general hasta tres zonas de flujo alrededor de la trinchera: a) una zona turbulenta, entre la trinchera y el radio turbulento, r_T ; b) una zona transicional, entre r_T y el radio Darciano, r_D , que define el lugar donde el flujo cambia de no lineal (transicional) a Darciano (lineal), y c) una zona Darciana, para distancias mayores que r_D . Debe recordarse que en la superficie freática $r = x$ (figura 1).

La definición de los valores de los límites entre las zonas de flujo puede hacerse a través de las ecuaciones (9):

$$r_D = \frac{q_r}{0.05 \pi} \cdot \frac{K_D}{K_T^2} \quad [7]$$

y

$$r_T = \frac{r_D}{380} \quad [8]$$

Comparando estos valores con $r_w = x_w$ resultará que:

si $r_T > r_w$, existirán tres zonas de flujo;

si $r_D > r_w$ y $r_T < r_w$, existirán dos zonas de flujo;

si $r_D < r_w$, sólo existirá una zona de flujo y el flujo será lineal en todo el acuífero.

A distancias tales que $x > r_D$ o cuando $r_D < r_w$, la componente turbulenta en las ecuaciones 5, 6a y 6b es prácticamente nula y puede ignorarse en la zona de flujo Darciano.

4. COMBINACION DEL FLUJO DE RECARGA Y DEL FLUJO NATURAL EN EL ACUIFERO

Las ecuaciones 5, 6a y 6b se han deducido sin tener en cuenta que existe en el acuífero un flujo natural. Sin embargo, es muy importante en la realidad, desde el punto de vista teórico y práctico, considerar el hecho de que el flujo de recarga y el natural se combinan para producir un patrón de flujo peculiar.

Se sabe que el flujo lineal (Darciano) del agua subterránea puede tratarse como un flujo potencial (7). Entonces, si el flujo de recarga es lineal ($r_D < r_w$) y el flujo natural en el acuífero es también lineal, ambos pueden considerarse como flujos potenciales, y su combinación en un plano vertical será el resultado de superponer un flujo plano semicilíndrico (el de recarga) y un flujo plano paralelo (el natural). Como se sabe, el flujo resultante estará representado por una función potencial, ϕ , y una función corriente, ψ , que serán respectiva-

mente la suma de las funciones potenciales y de las funciones corrientes de los flujos componentes.

Para una trinchera que tenga su eje longitudinal perpendicular a la dirección general del flujo natural en el acuífero, si se toma la línea central de la trinchera como origen y el eje x coincidiendo con la superficie freática con la x positiva en la dirección del flujo natural del agua subterránea, se puede demostrar que haciendo $\phi_r = -y$:

$$\phi = + U_n x - \frac{q_r}{2 \pi} \ln (x^2 + y^2) \quad [9]$$

y

$$\psi = + U_n y - \frac{q_r}{\pi} \operatorname{tg}^{-1} \frac{y}{x} \quad [10]$$

donde: U_n , velocidad aparente del flujo natural.

De las ecuaciones 9 y 10 resulta que el flujo de recarga combinado estará incluido dentro de la región limitada entre la línea de corriente $\psi = 0$ y la superficie, tal como aparece en la figura 2.

La línea de corriente $\psi = 0$ actúa como divisoria entre una zona superior perturbada, consecuencia de la entrada de la recarga al acuífero, y una zona inferior no perturbada del acuífero, que no se mezcla con el agua de recarga. Aguas arriba de la trinchera aparecerá un punto de estancamiento, E , como punto de contacto entre la divisoria y la superficie freática. La posición del punto de estancamiento se puede obtener de la ecuación 9 haciendo $x = x_E$ y teniendo en cuenta que en dicho punto $y = 0$, o sea que:

$$x_E = - \frac{q_r}{\pi U_n} \quad [11]$$

Y como el flujo natural es lineal, $U_n = K_D I_n$, resultando que:

$$x_E = - \frac{q_r}{\pi K_D I_n} \quad [12]$$

donde: I_n , gradiente del flujo natural en el acuífero.

Si las coordenadas de la divisoria se definen por $x = x_d$ y $y = y_d$, teniendo en cuenta que $\psi = 0$, de la ecuación 10 se obtiene:

$$y_d = \frac{q_r}{\pi U_n} \operatorname{tg}^{-1} \frac{y_d}{x_d} \quad [13]$$

La ecuación 13 permite calcular la profundidad a que se encuentra la divisoria por debajo de la superficie freática para cualquier valor de x . Los valores de y_d para $x = \infty$ y $x = 0$ tienen una significación especial.

Según $x \rightarrow \infty$, y_d se acerca asintóticamente a $y_{d\infty}$, o sea que:

$$y_{d\infty} = \frac{q_r}{U_n} = \frac{q_r}{K_D I_n} \quad [14]$$

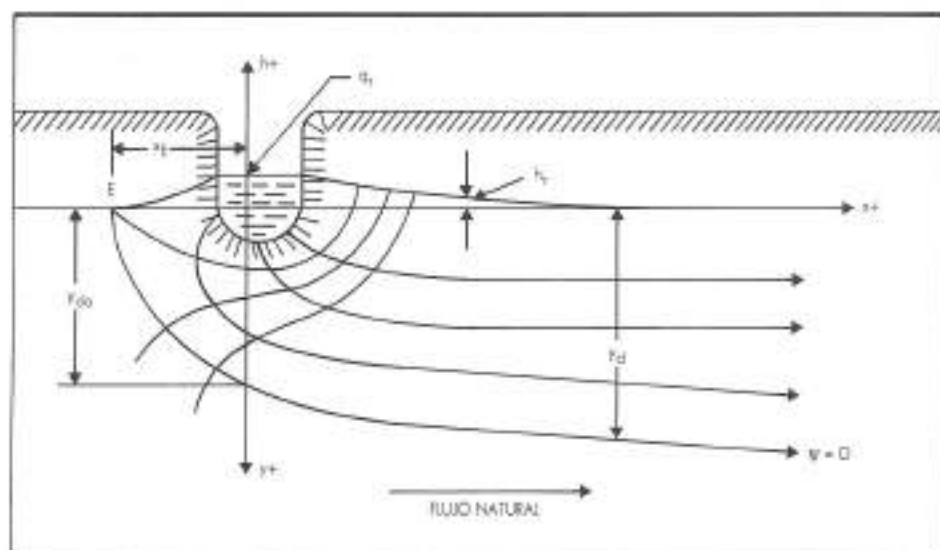


FIGURA 2. Combinación del flujo natural y el flujo de recarga en el acuífero.

Debajo de la línea central de la trinchera, $x=0$ y $y_0 = y_{do}$, de donde resulta que:

$$y_{do} = \frac{q_r}{2 U_e} = \frac{q_r}{2 K_D I_0} = \frac{y_{doo}}{2} \quad [15]$$

Como se ve, la distancia vertical desde la superficie freática hasta la divisoria es función de la razón de recarga por la unidad de longitud, la conductividad hidráulica darciana y el gradiente del flujo natural en el acuífero.

De modo similar a como se ha analizado para una trinchera de captación (9) puede demostrarse que para flujo lineal en el acuífero y flujo no lineal a través de la trinchera de recarga (como siempre ocurre que $r_D < y_{do}$) dentro de la zona perturbada delimitada por

la divisoria aparecerán dos zonas (figura 3): una más allá de r_D , en la cual el flujo es lineal y donde es posible aplicar los conceptos de superposición de flujos potenciales, la otra entre el centro de la trinchera y r_D , que es una «zona singular» donde los conceptos del flujo potencial no pueden aplicarse.

En la divisoria el flujo combinado será lineal ya que está mucho más allá de la distancia r_D y por consiguiente los conceptos del flujo potencial podrán utilizarse también para determinar la posición de la divisoria a pesar de que el flujo de recarga a través de la trinchera sea no lineal.

5. CONCLUSIONES

La aplicación de la teoría no lineal del flujo en medios porosos desarrollada por el autor, a la recarga artificial

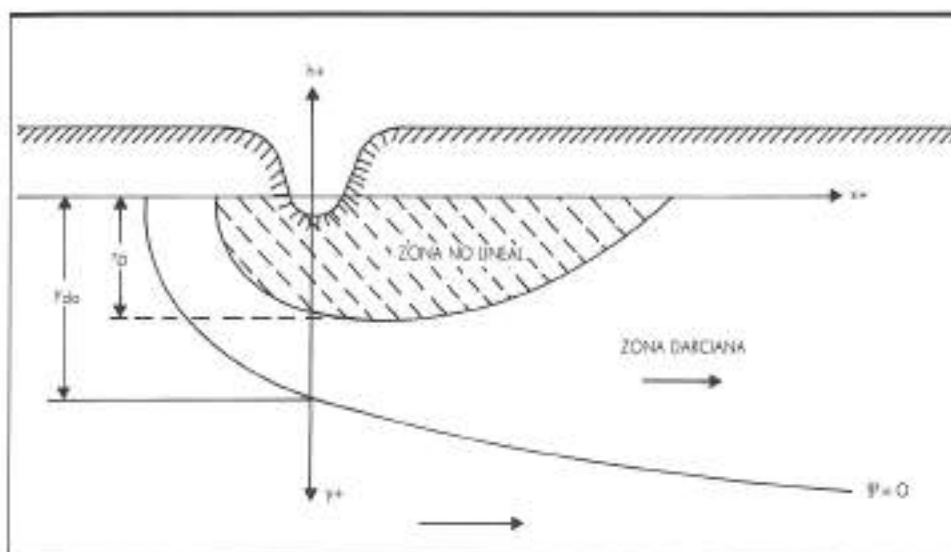


FIGURA 3. Zonas de flujo dentro de la zona perturbada del acuífero.

a través de trincheras de penetración superficial, ha posibilitado obtener nuevas ecuaciones que representan el flujo permanente no lineal a través de este tipo de trincheras. Asimismo, al combinar el flujo a través de la trinchera con el flujo natural en el acuífero se obtiene el patrón real de flujo de este tipo de recarga, lo que contribuye a un mejor entendimiento del mecanismo de recarga a través de este tipo de trincheras.

También se ha demostrado que la determinación de la línea divisoria entre el flujo de recarga y la zona inferior no perturbada del acuífero puede hacerse utilizando los conceptos del flujo potencial, independientemente de que el flujo a través de la trinchera sea lineal o no lineal.

6. REFERENCIAS

1. MOBASHERI, F., y TODD, D. K. (1963). «Investigation of the hydraulics of the flow near recharge wells», *Water Resources Center Contribution*, núm. 72, Hydraulic Laboratory, University of California, Berkeley.
2. PEREZ-FRANCO, D. (1977). *Theoretical and practical investigation into the nonlinear seepage law*. Disertación para el grado de Doctor en Ciencias Técnicas, Academia de Ciencias de Hungría, Budapest.
3. PEREZ-FRANCO, D. (1978). «Flujo no lineal permanente e impermanente hacia un pozo en un acuífero confinado», *Ciencias Técnicas. Serie de Ingeniería Hidráulica*, núm. 2, ISPJAE, La Habana, pp. 115-135.
4. PEREZ-FRANCO, D. (1978). «A new parameter for nonlinear flow in porous media», *Journal of Hydrological Sciences (Poland)*, vol. 5, núm. 2, pp. 127-131.
5. PEREZ-FRANCO, D. (1978). «The types and critical conditions of ground water movements», *Hidrologiai Közlemény*, Year 58, núm. 4, pp. 174-176.
6. PEREZ-FRANCO, D. (1978). «Imagen general del flujo radial hacia un pozo. Zonas y límites», *Voluntad Hidráulica*, núm. 47-48, pp. 3-6.
7. PEREZ-FRANCO, D. (1982). *Hidráulica subterránea*, Editorial Científico-Técnica, La Habana.
8. PEREZ-FRANCO, D. (1985). «The nonlinear approach of groundwater hydraulics as applied to artificial recharge through wells», *Proceedings 21st IAH Congress*, Melbourne, Australia, agosto.
9. PEREZ-FRANCO, D. (1986). «Flujo hacia una trinchera de captación superficial teniendo en cuenta el gradiente natural», *Anais XII Congresso Latinoamericano de Hidráulica*, São Paulo, Brasil, vol. 2, pp. 279-289.



Lo que quiera vender fuera métalo aquí dentro

Cualquier cosa. Desde maquinaria pesada a la cristalería más delicada. Vino, aceite, alimentos, equipos de construcción, tabaco, fertilizantes, zapatos, libros. Todo lo que quiera exportar o importar entre Norte España y Mediterráneo Occidental y Norte, Centro y Sur de América. En uno de los miles de contenedores como éste que ponemos a su servicio.

Casi 150 años de experiencia respaldan nuestro conocimiento, eficacia y fiabilidad. Casi 150 años ayudando a nuestros clientes en el desarrollo de sus mercados internacionales. Porque cuanto más vendan ellos, más embarcan con nosotros; cuanto más éxito tenga su negocio, más tendrá el nuestro.

Así que, la próxima vez, si se preocupa por su carga, déjenos manejarla, y si se preocupa por sí mismo, déjenos cuidar de usted. Estas son dos de las cosas que mejor sabemos hacer.



Compañía Trasatlántica Española, S.A.

San Vicente, 8. Edif. Albia - 9ª planta
Tel. (94) 424 56 16
Telex: 31445 - Fax: (94) 424 74 49
48001 BILBAO

Gral. Martínez Campos, 46 - 3º
Tel. (91) 335 51 00
Telex: 27667 - Fax: (91) 335 18 00
28010 MADRID



EN TRASMEDITERRANEA TODOS LOS DIAS SON AZULES.



Todos los días nuestros barcos
surcan el intenso azul verdoso del mar.
Y el profundo azul celeste del horizonte.
Y el intenso azul oscuro de la noche
en alta mar. Bajo las estrellas.
Todos los días de Trasmediterránea
son azules. A la ida y a la vuelta.
Aprovéchelos. Consulte en su agencia
de viajes o en las delegaciones
de Trasméditerránea.



TRASMEDITERRANEA