

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

**MATERIA
HIDROGEOLOGIA**

**MANUAL PARA LA
INTERPRETACION DE LOS
ENSAYOS DE BOMBEO**

PARTE II

MATERIAL DE M.C. ALFREDO OCHOA GRANILLO EN PREPARACIÓN

**1.5 ECUACIONES QUE CARACTERIZAN EL MOVIMIENTO DEL
AGUA SUBTERRANEA**

La ley general del flujo del agua subterránea puede representarse por expresiones monómicas o binómicas. (6) Se ha demostrado que las expresiones binómicas de la forma conocida de Dupuit-Forchheimer se adaptan mejor al carácter hidrodinámico del proceso de flujo (4). El autor ha logrado identificar los coeficientes de la ecuación de Dupuit-Forchheimer con las propiedades hidrogeológicas del medio, por lo que la ley general del flujo en medios porosos puede expresarse en las dos formas siguientes:

$$I = \frac{\gamma}{gk}U + \frac{C}{gk^{\frac{1}{2}}}U^2 \quad (1.7)$$

$$I = \frac{U}{K_D} + \frac{U^2}{K_T^2} \quad (1.8)$$

Estas serán las ecuaciones de que se partirá para la deducción de las fórmulas de los distintos casos de flujo hacia los pozos en régimen no lineal, que incluye como caso particular el régimen lineal o darciano.

1.6 LA ESTRUCTURA DE UN POZO DE BOMBEO

El pozo de bombeo, perforado en un acuífero por cualquier procedimiento, podrá estar provisto de una estructura, cuando sea necesaria para garantizar la estabilidad de las paredes de la perforación. Esta estructura ocupará una parte del espacio interior definido por la cara del pozo (figura 1.3)

En su forma más general, tal como aparece representada en la figura 1.3, la estructura del pozo, al atravesar el acuífero, puede estar compuesta por un empaque de grava y una camisa, total o parcialmente convertida en rejilla, que permitirá que el agua entre a dicha camisa para ser extraída por la bomba:

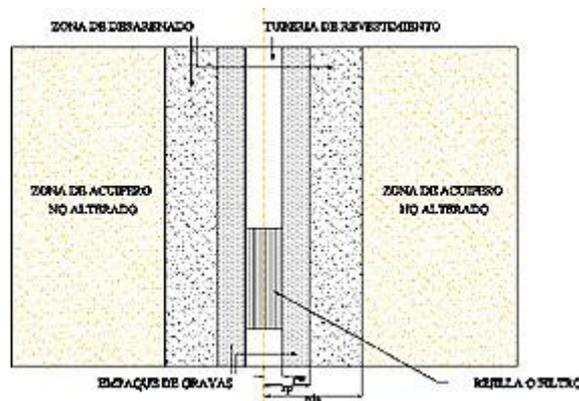


Fig. 1.3
Representación esquemática de la estructura de un pozo de bombeo y de las zonas características en su cercanía.

Las operaciones de perforación y el desarrollo del pozo afectarán al acuífero más allá de la cara del pozo. El desarrollo remueve el material más fino del acuífero, corrigiendo cualquier afectación o colmatación en la formación geológica originadas como efecto colateral del proceso de perforación. Asimismo, estabiliza la formación alrededor del pozo, de modo que el agua extraída estará desprovista de arena y aumenta además la porosidad y la permeabilidad de la formación natural en la vecindad del pozo de extracción. (2)

Es decir, que en la práctica, una vez desarrollado el pozo, se formará una zona de desarenado más permeable que el acuífero, que se extenderá desde la cara del pozo hasta una distancia r_{da} , que definirá el comienzo de la formación acuífera no alterada. (2)

De esa forma, quedan definidas tres zonas alrededor de la camisa del pozo:

- Zona del empaque de gravas, comprendida entre las distancias radiales r_w y r_p .

- Zona de desarenado, comprendida entre las distancias radiales r_p y r_{da} .
- Zona del acuífero no alterado, situada más allá de la distancia radial r_{da} .

Las distancias radiales que definen estas zonas, están definidas como:

r_w , distancia del centro del pozo a la cara interior de la tubería de revestimiento (camisa) y rejilla.

r_p , distancia del centro del pozo hasta el límite exterior del empaque de grava (cara del pozo).

r_{da} , distancia del centro del pozo hasta la formación acuífera no alterada.

Como cada zona tiene sus características hidrogeológicas propias, el abatimiento que se produce en el pozo, S_w , para el caso de un acuífero confinado, estará formado por varias componentes y podrá expresarse como (7).

$$S_w = S_{r_{da}} + \Delta_{r_{da}-p} + \Delta_{r_p-w} + h_{fcs} \quad (1.9)$$

donde:

$S_{r_{da}}$, abatimiento producido en el acuífero no alterado a la distancia r_{da}

$\Delta_{r_{da}-p}$ abatimiento adicional que se produce en la zona de desarenado (diferencia en abatimiento entre las distancias r_p y r_{da})

Δ_{r_p-w} abatimiento adicional que se produce en el empaque de gravas (diferencia en abatimiento entre las distancias r_w y r_p)

h_{fcs} , pérdida de carga en la rejilla y la tubería de revestimiento del pozo (camisa)

A partir del análisis de estas componentes del abatimiento el autor ha podido formular una nueva ecuación característica para el pozo de bombeo (7), que aparece más adelante como ecuación 3.8.

2. PREPARACION Y EJECUCION DE LOS ENSAYOS DE BOMBEO

2.1 INTRODUCCION

Al enfocar la solución de problemas de Hidrología Subterránea en pequeña o gran escala, nos encontramos continuamente ante la situación de poder obtener valores confiables y representativos de las características hidráulicas de los acuíferos. Los ensayos o pruebas de bombeo han probado ser el medio más adecuado para alcanzar ese objetivo.[\(3\)](#)

Como era lógico esperar, las pruebas de bombeo han sido interpretadas hasta muy recientemente partiendo del criterio de que el flujo es lineal en todo el campo alrededor del pozo. Sin embargo, como se sabe, tanto en acuíferos de baja como de alta conductividad hidráulica puede producirse flujo no lineal, lo que implica la necesidad de interpretar los ensayos con el criterio más general no lineal, que incluye como caso particular el lineal o Darciano. Además está claro que el único medio disponible para poder obtener los valores de los tres parámetros hidrogeológicos que caracterizan hasta el momento los acuíferos (k , C y E o sus propiedades asociadas) es la utilización del enfoque no lineal. Es utilizando ese nuevo enfoque que se presentarán la ejecución e interpretación de los distintos tipos de ensayos de bombeo.

2.2 OBJETIVOS Y TIPOS DE PRUEBAS DE BOMBEO

La ejecución de las pruebas de bombeo responde en general a uno de los dos objetivos siguientes:

- a) Estimar la cantidad de agua que puede extraerse de un pozo bajo condiciones previamente establecidas, o sea, con propósitos de aforo. En este tipo de pruebas, basta generalmente obtener información del pozo de bombeo y de dos pozos de observación o satélites.

- b) Determinar las propiedades hidráulicas de un acuífero, para poder predecir posteriormente su comportamiento bajo situaciones diversas, evaluar la disponibilidad de recursos de agua subterránea, etcétera. En general, en este caso, es necesario obtener información de varios puntos seleccionados del acuífero, para lo cual se utilizarán varios pozos de bombeo con dos o más satélites cada uno. En la literatura rusa se denomina a este tipo de pruebas, aforos experimentales.

Por otra parte, desde el punto de vista del caudal extraído, las pruebas de pozo pueden realizarse a caudal constante o con abatimiento escalonado.

En las pruebas a caudal constante, éste debe mantenerse fijo durante toda la realización de la prueba, por lo que habrá necesidad de ir ajustándolo según pase el tiempo.

Se denominan pruebas de pozo con abatimiento escalonado a aquellas en que el caudal extraído del pozo se mantiene constante durante un tiempo, para cambiar súbitamente a otro caudal que se mantendrá constante durante otro tiempo, para volver a cambiar a un tercer caudal durante un tercer espacio de tiempo, y así sucesivamente.

El número de escalones (de caudales diferentes) deberá ser como mínimo tres, y los espacios de tiempo entre los cambios de caudal no tienen que ser iguales, aunque sí es recomendable que duren lo suficiente para que pueda utilizarse la aproximación de Jacob de la ecuación de Theis para flujo impermanente.

Las pruebas con abatimiento escalonado tienen la ventaja de poder determinar con ellas todas las propiedades hidrogeológicas de un mismo punto del acuífero sin necesidad de utilizar otra información que no sea la de ese punto, por lo que los resultados no quedarán afectados por las variaciones espaciales de las propiedades, sobre todo en el caso de los acuíferos con fracturas, fisuras o canales de disolución, que presentan gran heterogeneidad.

Aunque se han desarrollado métodos de análisis a base de abatimiento constante y caudal variable (6), un tipo de prueba basado en este criterio sería imposible de utilizar en la práctica, por las variaciones continuas que deben introducirse en el caudal, para mantener constante el abatimiento.

También se pueden determinar las propiedades hidráulicas de los acuíferos a través de pruebas de recarga, pero ese tipo de pruebas no será analizado ya que su utilización es poco frecuente.

Independientemente del propósito o del tipo de ensayo de bombeo que vaya a realizarse, se pueden distinguir claramente en ellos tres fases: el diseño de la prueba, la realización de las observaciones de campo y la interpretación de los resultados.

2.3 DISEÑO DE LA PRUEBA DE UN ACUIFERO

Este es probablemente el más importante y más descuidado de los aspectos fundamentales de una prueba de bombeo.

El costo de una prueba de bombeo puede ser muy variable en dependencia de los objetivos que con ella se persiguen, pero en cualquier caso, resulta imprescindible diseñar adecuadamente el experimento para mejorar la probabilidad de que se obtengan los resultados esperados y evitar un malgasto de recursos.

El diseño previo de las pruebas, que vayan a ejecutarse en un acuífero tiene el propósito fundamental de obtener con una precisión aceptable, los valores de las características hidráulicas del medio. Para ello deberá evaluarse el lugar de la prueba, conocer previamente determinadas características del acuífero y tomar determinadas precauciones en relación con los pozos de bombeo, principales o de control y con los pozos de observación o satélites.(1,5)

Evaluación del lugar de la prueba

La evaluación de las distintas facilidades existentes en el área donde nos proponemos realizar las pruebas es el primer paso a dar para preparar el diseño.

Debe hacerse un inventario de los pozos existentes tanto abandonados como bajo explotación, ya que la utilización de algunos de ellos puede significar una disminución del costo de la prueba, aunque pocas veces ocurre que la configuración, estado y distribución de los pozos existentes resulte adecuada para la ejecución de una prueba. El

análisis de las facilidades existentes debe realizarse teniendo en cuenta las características que deben reunir los pozos de control y los de observación según aparece a continuación:

El pozo de control, de bombeo o principal

1. El pozo principal debe tener instalado un equipo de bombeo confiable, de capacidad adecuada para la prueba y con su equipo de control de caudal correspondiente.
2. Debe evitarse que el agua extraída pueda retornar al acuífero durante la prueba, por lo que debe ser conducida lejos del pozo de bombeo. Este aspecto es de importancia capital cuando se trata de un acuífero libre cuya superficie freática esté cercana a la del terreno.
3. Los dispositivos de descarga de la bomba deben permitir la instalación fácil de equipos para control remoto y regulación del caudal.
4. Debe ser posible medir adecuadamente el nivel del agua en el pozo de control, antes, durante y después de la prueba.
5. El diámetro, la profundidad total y la posición relativa de todas las aberturas de la camisa en el pozo de control deben conocerse detalladamente, es decir, todas las características del pozo.

Los pozos de observación o satélites

1. Se recomienda normalmente que los pozos satélite se dispongan en líneas que forman una cruz cuyo centro es el pozo principal. Cuando exista flujo natural en un acuífero, uno de los brazos de la cruz deberá estar orientado según la dirección del flujo y el otro normal a dicha dirección. (2) Cuando no sea posible económicamente perforar las 2 líneas de pozos, es conveniente que los pozos de observación se dispongan en la línea normal al flujo (1), en la cual el nivel estático de todos los satélites va a ser el mismo.
2. Los pozos de observación deben ser por lo menos 2 y estarán situados a distancias radiales del centro del pozo principal de 5 m y de 20 m. Cuando se puedan perforar mayor número de pozos estos deben situarse a 40 m, 80m y 10m del centro del pozo principal. Cuando por causas económicas en una prueba de aforo sólo se pueda perforar un pozo de observación, éste deberá situarse a 4 o 5m del pozo de control. Desde luego, que de esta forma habrá que utilizar el pozo principal para los cálculos de las propiedades hidráulicas, con los inconvenientes que de ello se deriven.
3. La respuesta de todos los pozos de observación a los cambios de nivel del agua debe probarse inyectando un volumen conocido de agua en cada pozo y medir inmediatamente la declinación del nivel del agua. El aumento inicial del nivel del agua debe desaparecer en no más de 3h, aunque resulta preferible una respuesta más rápida.
4. Deben conocerse la profundidad, el diámetro y los intervalos con rejilla de cada pozo de observación.

5. La distancia radial desde cada pozo de observación al centro del pozo de bombeo debe determinarse con la precisión necesaria, así como la posición de todos ellos en el plano.

6. Información sobre el acuífero

Debe estar disponible o investigarse convenientemente la siguiente información sobre el acuífero.

1. Profundidad hasta el acuífero, espesor del mismo, así como los cambios en su configuración en el área que va a ser sometida a la prueba.
2. Planos o mapas de las discontinuidades del acuífero causadas por cambios en la litología o por la presencia de ríos y lagos.
3. Estimados de todas las propiedades hidráulicas pertinentes del acuífero y de las rocas adyacentes realizados por los medios disponibles. Si se sospecha la presencia de capas semiconfinantes ésto debe tenerse en cuenta al analizar los resultados de las pruebas.

Importancia y objetivos de la evaluación previa a la prueba

La realización de una evaluación previa del lugar donde se ejecutará una prueba de un acuífero es muy importante. Es imprescindible tener en cuenta lo que hemos dicho respecto al pozo principal y los satélites, tanto para los pozos existentes como para los que se perforen con el propósito de ejecutar la prueba.

La evaluación previa del lugar de la prueba tiene propósitos principales:

- a) Describir el acuífero, el pozo de control y los pozos de observación con el detalle suficiente, que permitirá enfocar correctamente su análisis.
- b) Suministrar una base firme para predecir el valor relativo de los resultados de las pruebas teniendo en cuenta las facilidades existentes y llamar la atención sobre las posibles deficiencias en la localización de los pozos de observación y en otros aspectos.

Si la evaluación previa del lugar, indica que éste tiene características que se desvían notablemente de las que se suponen al deducir las fórmulas de pozo existentes, el lugar debe descartarse como zona de prueba.

Cuando las condiciones del lugar son complejas, como en el caso de acuíferos libres o pozos de penetración parcial, es obvio que resulta más difícil predecir los resultados de la prueba. No obstante, la predicción de los resultados debe realizarse en todos los sitios que se escojan para pruebas, ya que de ese modo podremos estar advertidos en contra de las deficiencias importantes, por ejemplo, en la configuración de la situación de los pozos y tomar una decisión acertada respecto a la perforación de uno o más pozos en puntos claves dentro del sistema.

Los acuíferos confinados son más fáciles de someter a pruebas que los libres, a causa de que tienen condiciones de contorno más simples. En los sistemas no confinados la

movilidad del contorno superior (superficie freática), las componentes verticales del flujo y la entrega no lineal del agua desde el almacenaje, son problemas difíciles de tratar, aunque, sin embargo, estos problemas han podido analizarse con éxito recientemente (1). Debemos recordar, además, que el flujo libre se puede tratar como confinado dentro de ciertos límites.

En la época anterior a que se hubieran podido estudiar analíticamente los efectos del flujo vertical y la entrega retardada de los acuíferos libres, la práctica común era bombear un "tiempo suficiente" de tal modo que esos efectos se convirtieran en despreciables y se pudiera aplicar el modelo más simple del flujo artesiano. Sin embargo no había un verdadero criterio que cuantificara ese "tiempo suficiente". En la actualidad, las soluciones analíticas existentes han permitido elaborar algunos criterios para definir el "tiempo suficiente" para poder obtener una respuesta artesiana de un acuífero libre.

En la referencia se mencionan varios de esos criterios, entre ellos el elaborado por Boulton y por Hantush, que expresa que las componentes verticales del flujo afectan significativamente la respuesta del acuífero, para tiempos:

$$t < 5 m E/Kz$$

en la región

$$0 r/m < 0,2$$

donde Kz : es la conductividad hidráulica lineal vertical del acuífero y los demás símbolos, tal como han sido definidos anteriormente.