

7. PERIMETROS DE PROTECCION

7.1. Protección de la calidad

7.1.1. Criterios para la delimitación de perímetros

- A. Distancia*
- B. Descenso*
- C. Tiempo de tránsito*
- D. Criterios hidrogeológicos*
- E. Poder autodepurador del terreno*

Elección del criterio

7.1.2. Métodos para la delimitación del perímetro

- A. Radio fijado arbitrariamente*
- B.1. Radio fijo calculado (RFC)*
 - B.1.1. Función del tiempo de tránsito*
 - B.1.2. Función del descenso*
- B.2. Método de Hoffman y Lillich*
- B.3. Método de Wyssling*
- B.4. Uso de un catálogo de formas simples*
- B.5. Método de Albinet*
- B.6. Empleo de ábacos para el cálculo de isocronas*
 - B.6.1. Método de Jacobs y Bear*
 - B.6.2. Pozo único en un acuífero homogéneo, isótropo, de extensión semi-infinita situado próximo a un curso de agua que proporciona alimentación lateral*
 - B.6.3. Batería de pozos en línea*
- B.7. Nomogramas de Van Waegeningh y Van Duijnenboden. Cálculo de tiempo o distancia por nomogramas*
- B.8. Nomógrafo de Pettyjon*
- C. Método de Horsley*
- D. Métodos hidrogeológicos*

7. PERIMETROS DE PROTECCION

7.1. Protección de la calidad

7.1.1. Criterios para la delimitación de perímetros

Para proceder a la delimitar un perímetro de protección, debe elegirse previamente en base a qué criterios se va a definir, puesto que los objetivos que se pretenden obtener, variarán en función de éste. Los empleados usualmente son los siguientes:

- Evitar que debido al bombeo en la captación se produzcan variaciones en el flujo del agua subterránea en las inmediaciones de ésta que puedan provocar la llegada de sustancias indeseables a la misma (distancia, descenso).
- Asegurar que la contaminación será inactivada en el trayecto entre el punto de vertido y su lugar de extracción (poder autodepurador del terreno, tiempo de tránsito, distancia).
- Proporcionar un tiempo de reacción que permita el empleo de otras fuentes de abastecimiento alternativas, hasta que se reduzca a niveles tolerables el efecto de una contaminación (tiempo de tránsito).
- Garantizar la protección de la calidad de las aguas subterráneas en la totalidad del área de alimentación de una captación (criterios hidrogeológicos).

En la cuadro 14 se relacionan los cinco criterios existentes con el proceso físico que controlan. Se analizará detalladamente cada uno de ellos:

Cuadro 14: Relación entre los criterios que pueden emplearse en la delimitación de perímetros de protección y los procesos físicos que controlan

Criterio	Distancia	Descenso	Tiempo de tránsito	Criterios hidrogeológicos	Poder autodepurador del terreno
Proceso físico					
Advección		X	X	X	
Dispersión hidrodinámica (dispersión mecánica y difusión molecular)			X		X
Interacción sólido-soluto (Reacciones químicas de adsorción)			X		X

Fuente: EPA, 1987.

A. Distancia

Consiste en delimitar un área definida por un círculo con centro en la captación.

Su tamaño es una decisión arbitraria del organismo encargado del control de la calidad de las aguas subterráneas, si bien éste define frecuentemente sus dimensiones como una media de las obtenidas al aplicar en diferentes casos otros criterios más complejos.

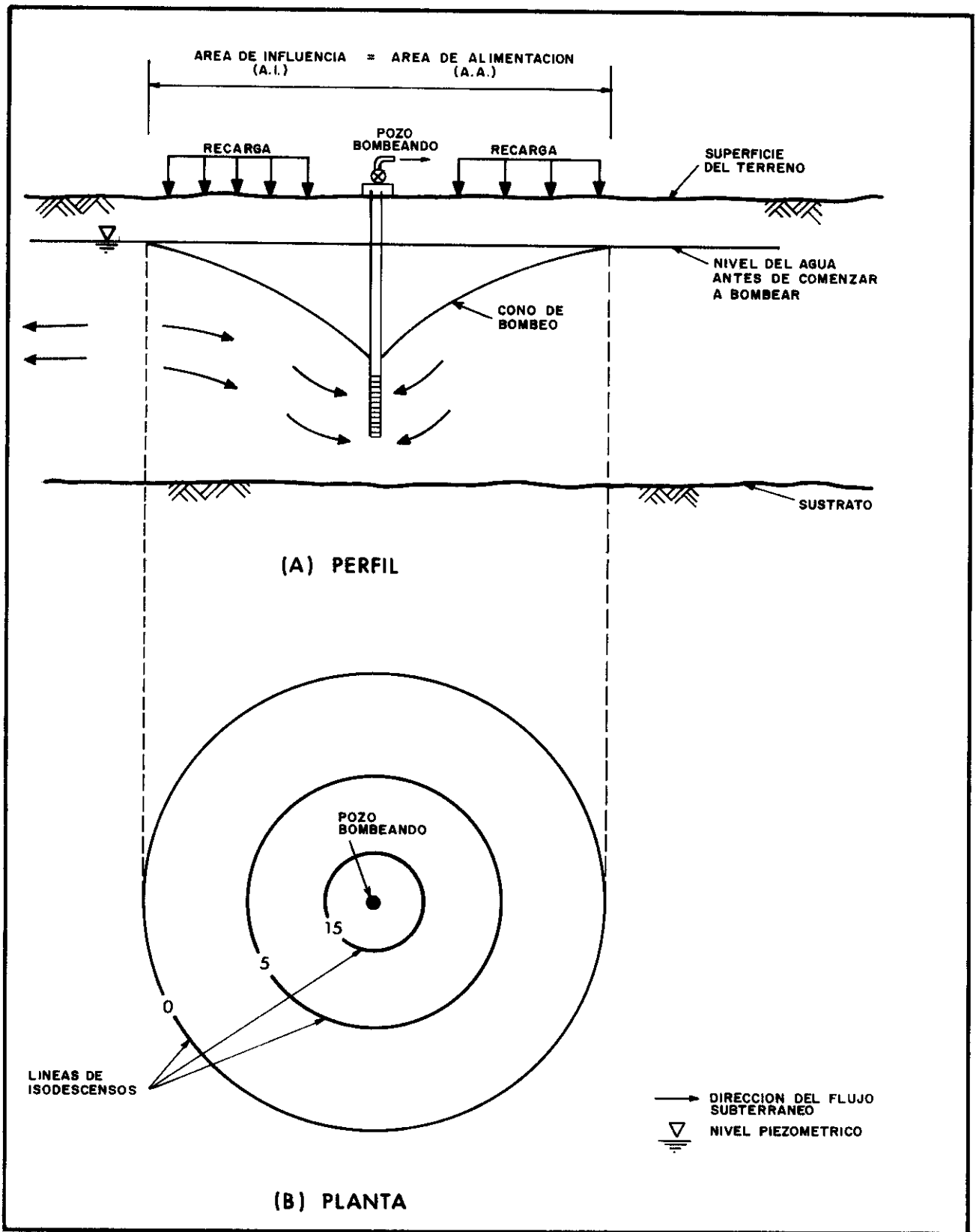
Es el más elemental de los existentes, pudiendo valorarse como poco eficaz, puesto que no incorpora ninguna consideración sobre las condiciones de flujo del agua subterránea, ni respecto a los procesos implicados en el transporte de los contaminantes en cada caso particular.

B. Descenso

Este criterio se basa en considerar que en el área en la cual desciende el nivel del agua subterránea, debido al efecto del bombeo, se producen cambios en la dirección del flujo subterráneo y un aumento de la velocidad con la que el agua llega a la captación, debido al incremento del gradiente hidráulico, produciendo o acelerando la migración del contaminante hacia ella.

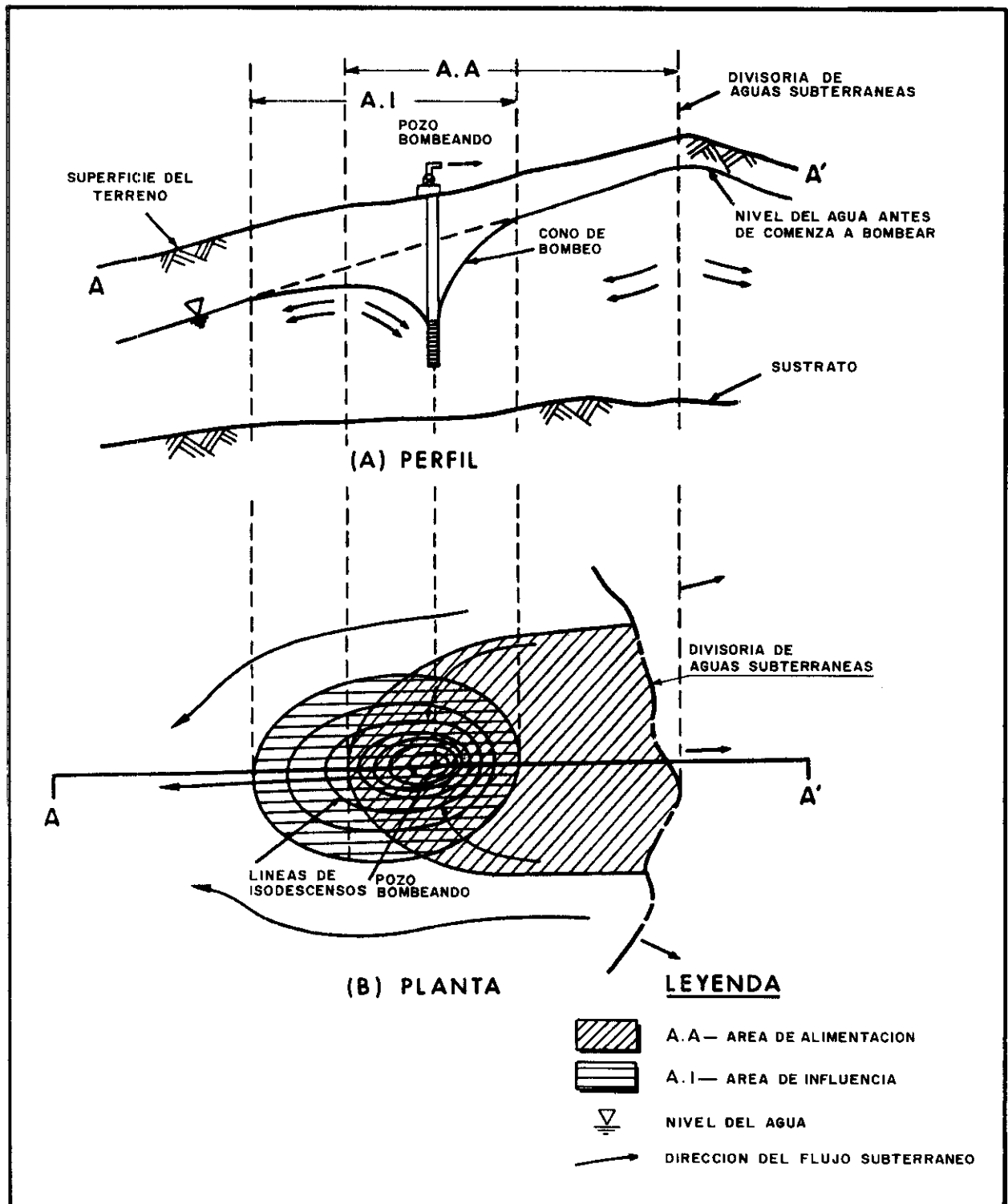
Ha sido mal aplicado en numerosas ocasiones debido a la idea errónea de que el área de alimentación y el área de influencia coinciden. Esto sólo es cierto en aquellas zonas en las cuales antes de comenzar a bombear no haya gradiente hidráulico o éste sea despreciable (Figura 37).

En la figura 38 puede observarse como difieren ambas cuando sí se considera su existencia. En este caso, que es el más habitual en la práctica totalidad de



Fuente: EPA, 1987

Fig. 37 AREA DE INFLUENCIA Y AREA DE ALIMENTACION EN UN ACUIFERO SIN GRADIENTE HIDRAULICO EN REGIMEN ESTACIONARIO Y CON PRECIPITACIONES ELEVADAS.



Fuente: Modificado de EPA, 1987

Fig. 38 AREA DE INFLUENCIA Y AREA DE ALIMENTACION EN UN ACUIFERO CON GRADIENTE HIDRAULICO EN REGIMEN ESTACIONARIO.

las situaciones, no toda el área de influencia queda englobada en el área de alimentación y por otra parte la contaminación producida fuera del área de influencia, pero dentro del área de alimentación, podrá alcanzar la captación en un período de tiempo variable, que es función de la distancia a la misma.

C. Tiempo de tránsito

Mediante este criterio se evalúa el tiempo que un contaminante tarda en llegar a la captación que se pretende proteger.

Los cálculos para la determinación del tiempo de tránsito se realizan considerando principalmente el proceso de advección, que es el más conocido y el que tiene mayor importancia en acuíferos con alta velocidad de flujo, si bien también tienen en cuenta la dispersión hidrodinámica y la interacción sólido-soluto, que adquieren mayor relevancia en aquellos acuíferos en los que la velocidad de flujo es menor.

Es uno de los criterios más exactos que existen puesto que considera diversos factores que afectan a la evaluación del proceso.

En definitiva, el objetivo que se pretende con su aplicación es definir zonas alrededor de las captaciones con la suficiente amplitud para que el resultado de una actividad contaminante tarde en llegar a la misma un tiempo determinado que permita su degradación, o proporcione una capacidad de reacción que haga posible un cambio temporal en la fuente de suministro a la población, hasta que la degradación de la calidad de las aguas extraídas disminuya a límites aceptables.

La mayor parte de los países han escogido como criterio para definir la zonación del perímetro un tiempo de tránsito de 1 día en la zona inmediata, 50-60 días en la zona próxima y 10 años en la zona alejada en función de la degradabilidad de los agentes contaminantes (ver capítulo 6).

D. Criterios hidrogeológicos

Su elección se fundamenta en la asunción de que una contaminación que se produjese en el área de alimentación de una captación podría alcanzarla transcurrido un cierto período de tiempo, por lo que debe delimitarse ésta y protegerla en su totalidad.

Se trata por tanto de identificar los límites hidrogeológicos que delimitan el área en la cual el agua procedente de la precipitación después de infiltrarse podría llegar a alcanzar la captación. Estos son de diversos tipos, pudiendo actuar como tales ríos, canales, lagos, divisorias piezométricas, materiales impermeables, etc.

La aplicación de este criterio va a implicar la protección de un área mayor de la necesaria, por lo que se utilizará principalmente al realizar una primera determinación del perímetro, especialmente en los acuíferos constituidos por materiales kársticos y rocas fracturadas que poseen elevadas velocidades de flujo. Su empleo es también muy usual en acuíferos pequeños, en los que el tiempo de tránsito hasta los límites es muy reducido, por lo que disminuye notablemente el área sobreprotegida que su aplicación implicará.

En cualquier caso es sumamente recomendable su utilización en conjunción con otros criterios tanto para valorar si los límites hidrogeológicos existentes van a restringir su utilización como para modificar cuando sea preciso los resultados que éstos puedan proporcionar.

E. Poder autodepurador del terreno

Consiste en utilizar la capacidad que poseen los diferentes terrenos para atenuar la concentración de los contaminantes que los atraviesan como criterio para definir la extensión de éstos que debe recorrer un agua contaminada hasta alcanzar una calidad admisible para el consumo humano.

En esta capacidad depuradora del terreno intervienen procesos físicos, químicos y biológicos que actúan de modo diferente para cada contaminante, por lo cual deben realizarse experiencias previas que permitan evaluarlos convenientemente.

El estudio requerirá el análisis detallado del perfil edafológico, textura, estructura, composición mineralógica, porosidad, así como las características propias de cada contaminante que sea preciso considerar.

ELECCION DEL CRITERIO

Para elegir entre los criterios anteriormente expuestos el que interesa utilizar en cada caso se debe tener en cuenta consideraciones técnicas así como el impacto socioeconómico que planteará su aplicación.

Por lo que respecta a los aspectos técnicos en el cuadro 15 se refleja dicha selección en función del análisis de los siguientes conceptos:

- **Facilidad de aplicación.** Indica si su empleo requiere una capacidad técnica mayor o menor. No debe representar un problema al suponerse que los organismos encargados de su realización poseen personal técnico lo suficientemente cualificado.

Cuadro 15: Valoración de los criterios utilizados en la delimitación de los perímetros de protección en función de consideraciones técnicas

Consideraciones técnicas	Facilidad e aplicación	Facilidad de cuantificar	Adaptable a cambios	Facilidad de verificación	Capacidad de considerar el poder autodepurador del terreno	Concordancia con el modelo hidrogeológico general	Capacidad de considerar procesos físicos	Clasificación (1a 5)
Criterio	B/M/A	B/M/A	B/M/A	B/M/A	B/M/A	B/M/A	B/M/A	
Distancia	A	A	A	A	N/A	B	B	1
Descenso	M	A	B	A	N/A	A	B	2
Tiempo de tránsito	M	M	B	B	M	A	A	5
Criterios hidrogeológicos	M	N/A	A	A	N/A	M-A	M	3
Poder autodepurador del terreno	B	B	A	B	A	M-A	M	3

B: Bajo
M: Medio
A: Alto
N/A: No aplicable
A Criterio seleccionado

NOTA: Clasificación (1-5):

1 Mínima puntuación
5 Máxima puntuación

Fuente: EPA, 1987.

- **Facilidad de cuantificar.** Conlleva la posibilidad de utilizar métodos matemáticos en su aplicación.
- **Adaptable a cambios.** Consiste en evaluar si es posible adaptarlo a modificaciones que se produzcan en el futuro, como por ejemplo variaciones en el régimen de bombeo.
- **Facilidad de verificación.** Indica si sus resultados pueden ser comprobados directamente en el propio terreno mediante estudios de detalle.
- **Capacidad de considerar el poder autodepurador del terreno.** Se trata de evaluar con qué fiabilidad refleja las características intrínsecas del terreno.
- **Concordancia con el modelo hidrogeológico general.** Al considerar este concepto se pretende valorar si las asunciones que debieron realizarse al aplicar el criterio son admisibles respecto a las consideraciones hidrogeológicas regionales.
- **Capacidad de considerar procesos físicos.** Refleja si el criterio elegido incorpora los procesos físicos envueltos, los cuales ya fueron señalados previamente (ver cuadro 14).

El cuadro 15 se realizó evaluando el criterio empleado en 900 casos reales, en su mayoría correspondientes a acuíferos libres en medios porosos en EE.UU., y se obtuvo que el criterio mejor valorado al realizar dicho análisis es el tiempo de tránsito.

Cuando la aplicación de la metodología propuesta en esta guía permita disponer de suficientes perímetros de protección en territorio español deberá ser revisado para comprobar su fiabilidad en nuestro país, así como para otros acuíferos distintos de los aquí utilizados.

En el apartado 7.1.3. se indican los métodos que pueden ser utilizados en función del criterio elegido y se analizan los diferentes factores (consideraciones técnicas y económicas) que deben considerarse en dicha elección.

7.1.2. Métodos para la delimitación del perímetro

En este apartado se analizarán detalladamente los diversos procedimientos existentes para calcular el perímetro de protección.

Los factores a considerar en su elección se desarrollan en el apartado 7.1.3.

7.1.2.A. Radio fijado arbitrariamente

Es el método más simple de los existentes. El perímetro de protección que se obtiene al utilizarlo es el constituido por el área definida por un radio con centro en la captación que pretende protegerse.

El tamaño que debe tener dicho radio es una decisión arbitraria, si bien suele escogerse en base a las dimensiones que tiene el obtenido al usar métodos más complejos en otras captaciones del área estudiada.

Así por ejemplo en algunas ocasiones se ha empleado una media de las distancias que corresponden a un tiempo de tránsito determinado obtenido por alguno de los procedimientos que se verán posteriormente.

Este método fue muy utilizado en el dimensionado de los perímetros de protección de captaciones de aguas minerales, puesto que la legislación definía éste como el constituido por un cuadrado de 300 metros de lado con centro en la captación (R.D. Ley de 26 de Abril de 1929).

La protección frente a la degradación de la calidad que proporcionan los perímetros definidos en base a dicha legislación es en numerosas ocasiones insuficiente, por lo que deberían revisarse aplicando, cuando se considere preciso, otros métodos más complejos.

En la actualidad este método es aún muy utilizado en la definición de la zona inmediata o de restricciones absolutas (ver apartado 3.1) y se usa también en numerosos países para disponer en todas las captaciones de un perímetro de protección mientras se realizan estudios técnicos para su determinación de una forma más precisa.

7.1.2.B.1. Radio fijo calculado (R.F.C.)

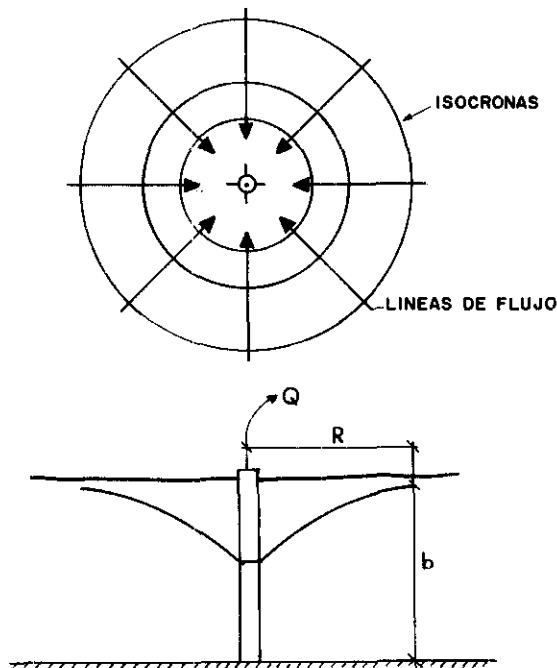
En este caso el radio que define el perímetro propuesto se obtiene mediante una ecuación en la que se utiliza como criterio el tiempo de tránsito o el descenso del nivel piezométrico.

Se analizarán ambas posibilidades:

7.1.2.B.1.1. Función del tiempo de tránsito

La ecuación empleada (Ec. volumétrica) calcula el volumen de agua que llegará a la captación en un tiempo determinado, que será el considerado necesario para eliminar o disminuir la contaminación hasta un nivel admisible.

Se supone que la captación es el único drenaje del acuífero, y no existen direcciones privilegiadas de flujo, convergiendo en el pozo todas las líneas de corriente. Las líneas isocronas son círculos concéntricos con centro en la captación. (ver figura 39).



Fuente: Elaboración propia

FIG. 39 LINEAS DE FLUJO Y CONO DE DESCENSO EN UN POZO DE BOMBEO

La ecuación volumétrica es la siguiente:

$$Qt = m_e H \pi R^2$$

$$H \pi R^2 = \text{Volumen total del cilindro}$$

$$m_e H \pi R^2 = \text{Volumen de agua contenido}$$

Por lo tanto:

$$R = \sqrt{\frac{Qt}{m_e H \pi}} \quad (1)$$

Siendo:

Q = caudal bombeado

t = tiempo de tránsito hasta la captación

m_e = porosidad eficaz del acuífero

H = espesor saturado en la captación

R = radio del perímetro de protección

Este método fue aplicado para determinar el perímetro de protección de una captación en un acuífero detrítico en Florida (EE.UU).

Los datos de partida eran:

$$Q = 1.380.860 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$m_e = 0,2$$

$$H = 91 \text{ m}$$

$$t = 5 \text{ años}$$

Aplicando la ecuación (1) se obtiene que el radio del perímetro de protección es de 347 metros.

7.1.2.B.1.2. Función del descenso

Al usar este método se pretende definir el área en la cual se produce un descenso determinado del nivel piezométrico.

Para ello hay que emplear la ecuación de Theis para el estado transitorio, que es la siguiente:

$$d = \frac{Q}{4 \pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du$$

en la cual u es una función auxiliar cuyo valor es:

$$u = \frac{R^2 S}{4Tt}$$

Donde:

d = descenso en un punto situado a la distancia R de la captación

Q = caudal de bombeo constante

T = transmisividad

R = distancia a la captación

S = coeficiente de almacenamiento

t = tiempo transcurrido desde el comienzo del bombeo

Se define una función de pozo $W(u)$ que corresponde a la integral de la citada fórmula.

$$W(u) = \int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du$$

Esta integral no tiene solución analítica y se ha resuelto por métodos aproximados. Se muestran en la tabla 6 los valores de $W(u)$ y u .

Tabla 6: Tabla de la función del pozo $W(u)$ (resumida)

	$k \times 10^{-14}$	$k \times 10^{-12}$	$k \times 10^{-10}$	$k \times 10^{-8}$	$k \times 10^{-6}$	$k \times 10^{-4}$	$k \times 10^{-2}$	k
1,0	31,6590	27,0538	22,4486	17,8435	13,2383	8,6332	4,0379	0,2194
1,5	31,2535	26,6483	22,0432	17,4380	12,8328	8,2278	3,6374	,1000
2,0	30,9658	26,3607	21,7555	17,1503	12,5451	7,9402	3,3547	,04890
2,5	30,7427	26,1375	21,5323	16,9272	12,3220	7,7172	3,1365	,02491
3,0	30,5604	25,9552	21,3500	16,7449	12,1397	7,5348	2,9591	,01305
3,5	30,4062	25,8010	21,1959	16,5907	11,9855	7,3807	2,8099	,006970
4,0	30,2727	25,6675	21,0623	16,4572	11,8520	7,2472	2,6813	,003779
4,5	30,1549	25,5497	20,9446	16,3394	11,7342	7,1295	2,5684	,002073
5,0	30,0495	25,4444	20,8392	16,2340	11,6289	7,0242	2,4679	,001148
5,5	29,9542	25,3491	20,7439	16,1387	11,5336	6,9289	2,3775	,0006409
6,0	29,8672	25,2620	20,6569	16,0517	11,4465	6,8420	2,2953	0,0003601
6,5	29,7872	25,1820	20,5768	15,9717	11,3665	6,7620	2,2201	,0002034
7,0	29,7131	25,1079	20,5027	15,8976	11,2924	6,6879	2,1508	,0001155
7,5	29,6441	25,0389	20,4337	15,8286	11,2234	6,6190	2,0867	,00006583
8,0	29,5795	24,9744	20,3692	15,7640	11,1589	6,5545	2,0269	,00003767
8,5	29,5189	24,9137	20,3086	15,7034	11,0982	6,4939	1,9711	,00002162
9,0	29,4618	24,8566	20,2514	15,6462	11,0411	6,4368	1,9187	,00001245
9,5	29,4077	24,8025	20,1973	15,5922	10,9870	6,3828	1,8695	0,000007185

Para la gama de valores de u que interesen, elijase el correspondiente $u = k \times$ potencia de 10, y en la misma fila de los valores de k (que aparecen en la primera columna) se encontrarán, en la misma columna elegida, los valores correspondientes de la función de pozo $W(u)$.

Fuente: M. Villanueva y A. Iglesias, 1984

Por tanto se tiene:

$$d = \frac{Q}{4 \pi T} W(u) \rightarrow W(u) = \frac{d 4 \pi T}{Q} \quad (2)$$

$$u = \frac{R^2 S}{4 T t} \rightarrow R = \sqrt{\frac{u 4 T t}{S}} \quad (3)$$

La manera de proceder consiste en calcular $W(u)$ con la fórmula (2) y obtener de la tabla 6 el valor de u .

Finalmente se sustituye su valor en (3) obteniendo la distancia a la captación (R) en la que se produce un descenso (d) fijado como criterio para delimitar el perímetro de protección.

Los resultados obtenidos se ajustarán más a la realidad cuanto más se asemeje la realidad física del caso estudiado a las condiciones matemáticas impuestas en su planteamiento.

Esas circunstancias limitativas eran:

- No existen recargas anteriores
- El acuífero es homogéneo e isótropo en cuanto a su permeabilidad
- El acuífero es infinito
- La captación es de diámetro cero
- La captación atraviesa completamente la formación permeable
- El agua que se bombea no vuelve a introducirse en el acuífero
- El flujo del agua hacia la captación es radial y no tiene componentes verticales
- El caudal de bombeo es constante

Este método fue aplicado en un acuífero detrítico de Vermont (EE.UU) para calcular el perímetro de protección de una captación.

Los datos de partida eran:

$$\begin{aligned} T &= 19 \text{ m}^2/\text{día} \\ S &= 0,02 \\ t &= 1 \text{ día} \\ Q &= 136 \text{ m}^3/\text{día} \end{aligned}$$

Se consideró necesario incluir en el perímetro de protección toda el área en la que se produce un

descenso de más de 15 mm. Por lo tanto $d = 0,015 \text{ m}$.

En primer lugar debe calcularse el valor de $W(u)$.

$$W(u) = \frac{d 4 \pi T}{Q} = 0,026$$

De la tabla reseñada se obtiene que $u = 2,5$.

Por último

$$R = \sqrt{\frac{u 4 T t}{S}} \rightarrow R = 97 \text{ m}$$

El perímetro de protección de la captación analizada está definido por un círculo de radio igual a 97 m con centro en la misma. En toda esta zona el descenso del nivel piezométrico es de al menos 0,015 m.

Aunque la utilización del radio fijo calculado aumenta la precisión respecto al uso del radio fijado arbitrariamente descrito en el apartado anterior, sigue siendo un método que proporciona poca exactitud, puesto que considera un número muy limitado de factores, no teniendo en cuenta aspectos importantes como el gradiente hidráulico, límites de flujo y otros por lo que proporcionará sobreprotección en unos casos y en otros las captaciones tendrán un área de protección menor de la requerida.

Su utilización puede ser muy interesante en las primeras etapas de la investigación, así como en aquellos casos en los que los factores que no consideran tienen poca influencia.

7.1.2.B.2. Método de Hoffman y Lillich

Se trata de un método iterativo desarrollado inicialmente por Lillich y Liting y posteriormente modificado por Hoffman y Lillich.

Es un método simple que necesita pocas variables para su resolución, aplicable en medios homogéneos, cuando el descenso provocado por bombeo sea pequeño en relación al espesor del acuífero.

El descenso en las proximidades de un pozo, en un acuífero cautivo, puede describirse por la siguiente ecuación (Todd, 1964).

$$h - h_w = (h_o - h_w) \frac{\ln(l/r)}{\ln(R/r)} \quad (4)$$

h = nivel piezométrico en relación a un nivel de referencia en un punto dado

l = distancia de ese punto al pozo

h_w = nivel dinámico en el pozo respecto al nivel de referencia

h_o = nivel piezométrico en reposo respecto al nivel de referencia

R = radio de influencia (distancia donde el descenso es nulo)

r = radio del pozo

En el caso de un acuífero libre se emplea la expresión:

$$(h - h_w)^2 = (h_o - h_w)^2 \frac{\text{Ln}(l/r)}{\text{Ln}(R/r)} \quad (5)$$

(Fórmula de Dupuit)

Si el descenso es menor que 1/10 de la potencia del acuífero se puede emplear la ecuación 4.

Para aplicar el método (ver figura 40) se sigue el procedimiento:

- a) El gradiente $i = (h - h_w)/l$
- b) A partir de la ecuación de Darcy la velocidad eficaz es:

$$V_e = \frac{Ki}{m}$$

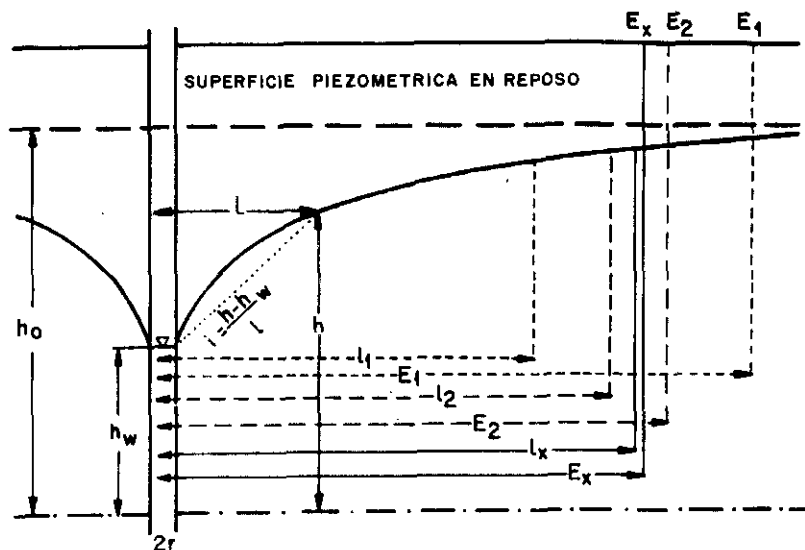
K = coeficiente de permeabilidad

m = porosidad cinemática, asimilable a la porosidad eficaz m_e .

- c) La distancia correspondiente a un tiempo de tránsito t es:

$$E = V_e t$$

Se trata ahora de encontrar la distancia l para la cual el gradiente i posee un valor tal que si se calcula la velocidad V_e y la distancia E correspondiente, se encuentran los mismos valores para E y para l .



Fuente: Hoffman y Lillich, 1973

FIG. 40 DETERMINACION DE LAS ISOCRONAS POR ITERACION

Ejemplo de aplicación

Se va a resolver a título de ejemplo, la primera iteración de resolución del método en el caso de un sondeo de abastecimiento construido sobre un acuífero formado por arenas terciarias. Los datos de partida (obtenidos en parte del bombeo de ensayo realizado al construir el sondeo) (ver figura 41) son los siguientes:

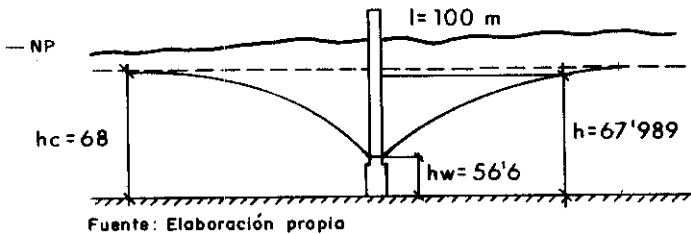


FIG. 41 ESQUEMA DEL CONO DE BOMBEO

Transmisividad $T = 176 \text{ m}^2/\text{día}$
 Espesor saturado $b = 68 \text{ m}$
 Coeficiente de almacenamiento $S = 4 \times 10^{-2}$
 Caudal $Q = 30 \text{ l/s} = 2.592 \text{ m}^3/\text{día}$
 Radio del pozo $r = 0,3 \text{ m}$
 Descenso a estabilización de niveles = $11,4 \text{ m}$
 Tiempo de tránsito $t = 50 \text{ días}$

se da a l un valor de 100 m .

$$(h - h_w)^2 = (h_0 - h_w)^2 \frac{\ln(l/r)}{\ln(R/r)} \quad (5)$$

$$R = 1,5 \sqrt{\frac{Tt}{me}} \rightarrow R = 1,5 \sqrt{\frac{176 \times 50}{4 \times 10^{-2}}} \rightarrow R = 703,56$$

$$(h - h_w)^2 = (11,4)^2 \frac{\ln(100/0,3)}{\ln(703,56/0,3)}$$

$$(h - h_w)^2 = \frac{754,95}{7,76} \rightarrow h - h_w = 9,86$$

$$i = \frac{h - h_w}{l} \rightarrow i = 0,0986$$

$$T = K b \rightarrow 176 = K 68 \rightarrow K = 2,58 \text{ m/día}$$

$$V_* = \frac{Ki}{me} \rightarrow V_* = \frac{2,58 \times 0,0986}{4 \times 10^{-2}} \rightarrow V_* = 6,35 \text{ m/día}$$

$$E = V_* t \rightarrow E = 6,35 \times 50 \rightarrow E = 317,9 \text{ m}$$

Como puede verse los valores de E y l difieren, por lo que se debería seguir dando valores a l hasta conseguir igualarlos.

7.1.2.B.3. Método de Wyssling

Wyssling ha diseñado un método para el dimensionamiento de perímetro de protección consistente en el cálculo de la zona de llamada de una captación y búsqueda posterior del tiempo de tránsito deseado.

El método es simple, aplicable en acuíferos porosos homogéneos pero presenta el inconveniente de no tener en cuenta las heterogeneidades del acuífero. Para su aplicación se necesita de un ensayo de bombeo previo.

La resolución del método precisa conocer las siguientes variables:

i = gradiente hidráulico (adimensional)

Q = caudal bombeado

K = permeabilidad

m_e = porosidad eficaz (adimensional)

b = espesor del acuífero

Se calcula en primer lugar la zona de llamada (1) (Fig. 42 y 43).

En un acuífero libre si B es la anchura del frente de llamada:

$$Q = K B b i \rightarrow B = \frac{Q}{K b i}$$

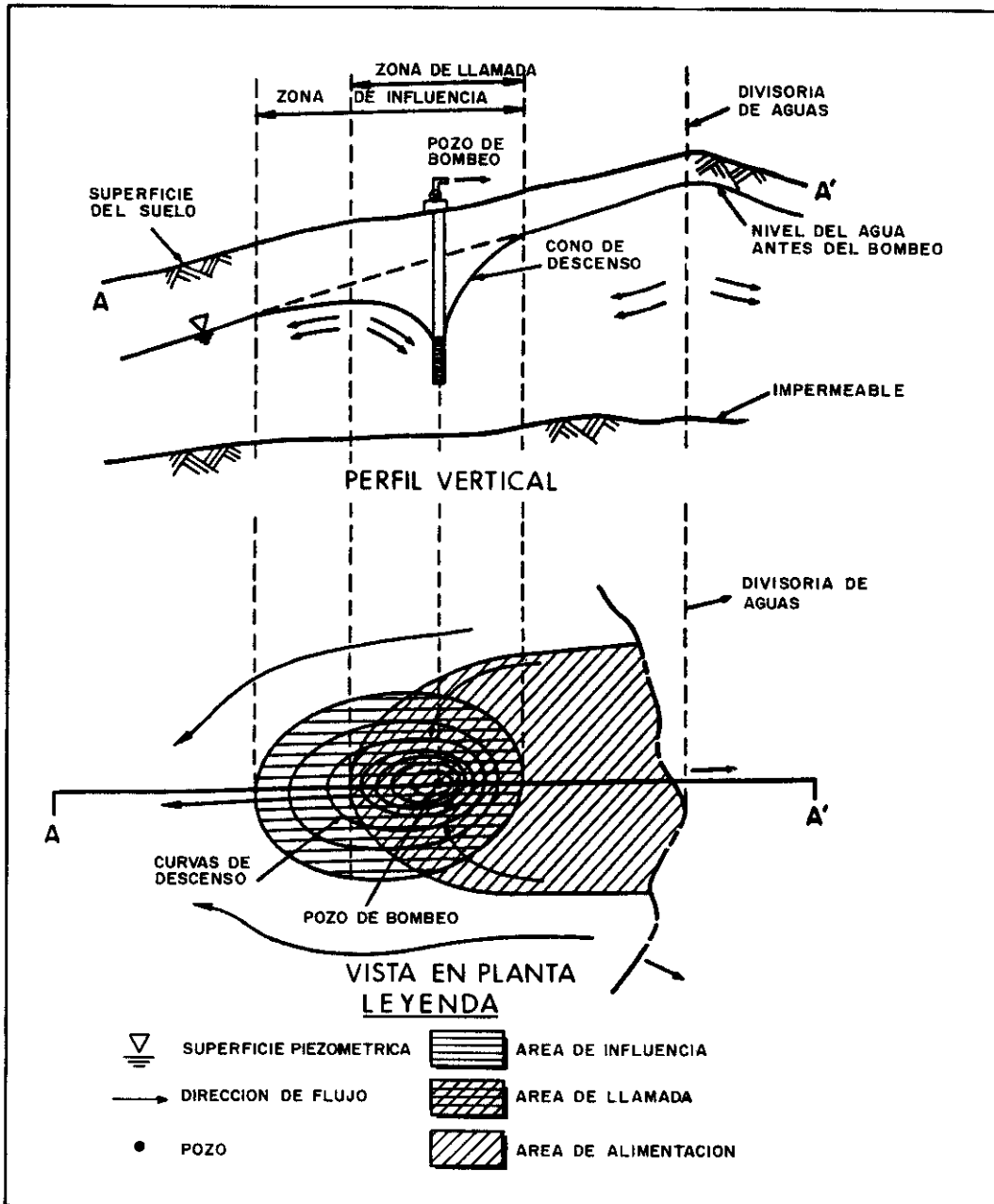
El radio de llamada puede obtenerse de la expresión:

$$X_0 = \frac{Q}{2 \pi K b i}$$

y el ancho del frente de llamada a la altura de la captación:

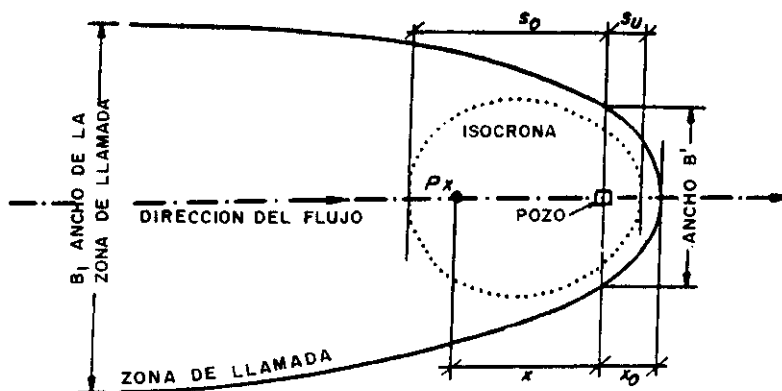
$$B' = \frac{B}{2} = \frac{Q}{2 K b i}$$

(1) Se entiende como "zona de llamada" la parte del área de alimentación en la cual puede apreciarse un descenso piezométrico consecuencia del bombeo y las líneas de corriente se dirigen a la captación.



Fuente: A. LALLEMAND, J-C ROUX, 1989

Fig. 42 ESQUEMA DE UN BOMBEO EN MEDIO POROSO



Fuente: A. LALLEMAND, J-C ROUX, 1989

Fig. 43 DETERMINACION DE ISOCRONAS (METODO DE WYSSLING)

La velocidad eficaz V_e se define como: $V_e = \frac{ki}{m}$ una vez determinada la zona de llamada ha de buscarse en la dirección del flujo la distancia correspondiente al tiempo de tránsito deseado (isocronas).

se emplean las ecuaciones:

$$S_o = \frac{+l + \sqrt{l(l+8X_o)}}{2}$$

$$S_u = \frac{-l + \sqrt{l(l+8X_o)}}{2}$$

$$l = V_e t$$

Donde:

t = tiempo de tránsito

V_e = Velocidad eficaz

S_o = distancia en el sentido del flujo correspondiente a un tiempo de tránsito t .

S_u = distancia en el sentido contrario al flujo correspondiente a un tiempo de tránsito t .

Ejemplo de aplicación del Método de Wyssling

En la población de Almazora (provincia de Castellón) se dimensionó un perímetro de protección empleándose el método de Wyssling pues las características del acuífero (poroso, homogéneo) lo hacían un candidato idóneo para su aplicación.

Se partió de los siguientes datos:

$$Q = 2100 \text{ l/min} = 0,035 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$b = 150 \text{ m}$$

$$m_e = 0,25$$

$$K = 0,00116 \text{ m/s}$$

$$i = 0,0006$$

El radio de llamada será:

$$X_o = \frac{Q}{2\pi K b i} = 53,35 \text{ m.}$$

La velocidad eficaz

$$V_e = \frac{Ki}{m_e} = 2,4 \times 10^{-6} \text{ m/s.}$$

El ancho del frente de llamada

$$B = \frac{Q}{K b i} = 335,20 \text{ m.}$$

El ancho del frente de llamada a la altura de la captación:

$$B' = \frac{B}{2} = 167,60 \text{ m.}$$

La zonificación del perímetro se realizó en función del criterio tiempo de tránsito, empleándose en función de las características regionales, de la actividad económica e industrial, los valores:

Zona de restricciones: Absolutas - 24 horas
Máximas - 60 días
Moderadas - 10 años

Así pues hay que calcular l para dichos tiempos:

$$l = V_e t \rightarrow l_{24h} = 0,207 \quad l_{60d} = 12,442 \quad l_{10años} = 756,864$$

Ahora se calcula S_o y S_u para cada uno de los tiempos de tránsito.

$$S_o = \frac{+l + \sqrt{l(l+8X_o)}}{2} \quad S_u = \frac{-l + \sqrt{l(l+8X_o)}}{2}$$

$$S_{o\ 24h} = 4,80 \text{ m} \quad S_{o\ 60d} = 43,18 \text{ m} \quad S_{o\ 10años} = 851,68 \text{ m}$$

$$S_{u\ 24h} = -4,60 \text{ m} \quad S_{u\ 60d} = -30,74 \text{ m} \quad S_{u\ 10años} = -94,82 \text{ m}$$

De esta forma el perímetro queda definido por los valores:

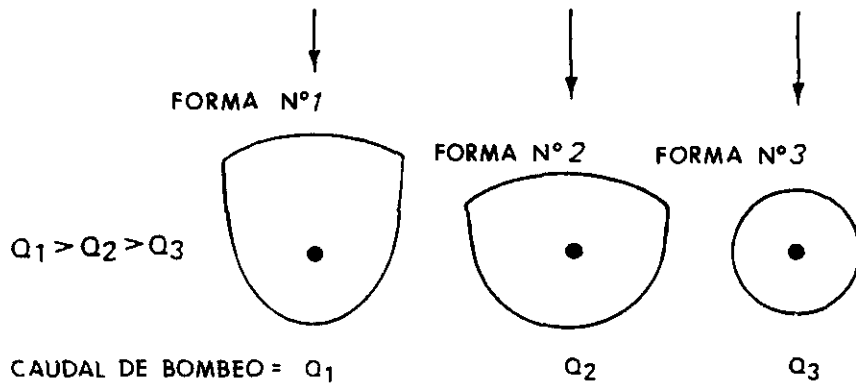
Zona de restricciones	Aguas Arriba (So)	Aguas Abajo (Su)
Absolutas	5 m	5 m
Máximas	45 m	30 m
Moderadas	850 m	95 m

7.1.2.B.4. Uso de un catálogo de formas simples

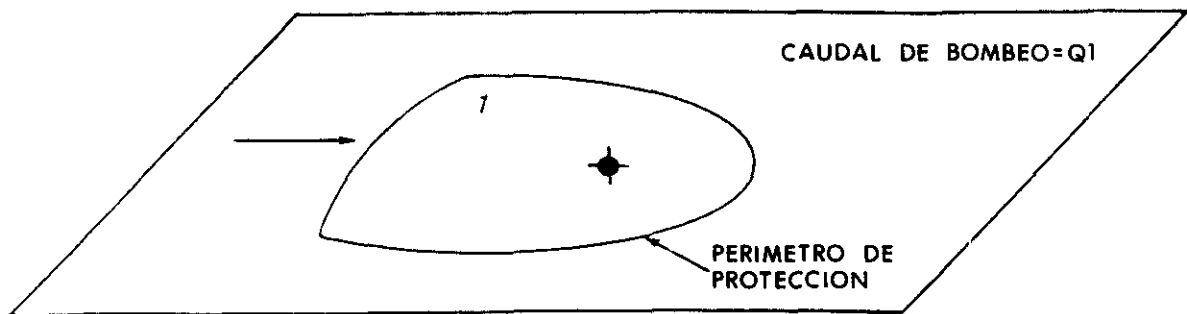
Este método consiste en elegir qué figura de las representadas en un catálogo de formas de perímetros de protección es la que ha sido realizada empleando unos parámetros hidrogeológicos similares a los existentes en el caso analizado. Una vez escogida, solo resta orientarla en la captación en función de la dirección y sentido del flujo subterráneo.

En la figura 44 se muestra un ejemplo de la determinación del perímetro de protección usando este método.

1ª FASE: DELINEAR FORMAS ESTANDAR DE PERIMETROS DE PROTECCION USANDO METODOS ANALITICOS.



2ª FASE: ELEGIR LA FORMA APLICABLE EN NUESTRO CASO.



3ª FASE: LA FORMA ELEGIDA (LA NUMERO 1 EN ESTE EJEMPLO) SE USA PARA ESTA CAPTACION AL TENER LOS MISMOS PARAMETROS HIDROGEOLOGICOS Y REGIMEN DE BOMBEO SIMILAR. ORIENTANDOLA EN FUNCION DEL FLUJO EXISTENTE.

LEYENDA

- ★ CAPTACION
- ↓ DIRECCION Y SENTIDO DEL FLUJO SUBTERRANEO

Fuente: EPA, 1987

Fig. 44 EJEMPLO DE UTILIZACION DE UN CATALOGO DE FORMAS SIMPLES.

Para definir las figuras del catálogo, al que debe acudir cada vez que se quiera aplicar este procedimiento, deberán calcularse las formas que se obtienen al aplicar algún método analítico para diferentes valores de parámetros como el caudal de bombeo, gradiente hidráulico, coeficiente de almacenamiento, espesor saturado, etc.

Es un método muy utilizado para la determinación de perímetros de protección en el sureste de Inglaterra. En esa zona utilizan el método de Wyssling, explicado en el apartado anterior, para calcular el ancho del frente de llamada a la altura de la captación (B') y el radio de llamada X_0 como ya fue explicado anteriormente:

$$B' = \frac{Q}{2 K b i}$$

$$X_0 = \frac{Q}{2 \pi K b i}$$

Donde:

Q = caudal bombeado

K = permeabilidad

b = espesor del acuífero

i = gradiente hidráulico (adimensional)

Finalmente emplean una ecuación de tiempo de tránsito para calcular la extensión del perímetro de protección aguas arriba en el sentido de flujo. Esta ecuación, que se resuelve por el método de prueba y error (tanteo) es la siguiente:

$$t_x = \frac{S}{V} \left[\pm (S_0 - R_p) + X_0 \right] \frac{(X_0 \pm R_p)}{(X_0 \pm R_p)} \quad /$$

$$X_0 = \frac{Q}{2 \pi K b i}$$

Donde:

t_x = tiempo de tránsito desde un punto situado a una distancia S_0 de la captación hasta la misma

S = coeficiente de almacenamiento

V = velocidad del flujo del agua subterránea

S_0 = distancia aguas arriba en la dirección del flujo correspondiente a un tiempo de tránsito t

R_p = radio del pozo

Q = caudal de bombeo

K = permeabilidad

b = espesor saturado

i = gradiente hidráulico

La gran ventaja que tiene este método es que una vez creado el catálogo se aplica fácilmente con un coste muy reducido, obteniéndose en numerosas ocasiones resultados lo suficientemente precisos. Debe no obstante señalarse que cuando intervienen límites hidrogeológicos, heterogeneidades del acuífero u otros factores que no han sido considerados en su elaboración disminuye notablemente su eficacia.

7.1.2.B.5. Método de Albinet.

Cualquier contaminación sobre el área de llamada (ver fig. 47) llegará a la captación, por ello se emplea frecuentemente el límite aguas abajo de esta zona como límite del perímetro próximo o cercano.

Este método gráfico se basa en la fórmula de Theis, válida en régimen transitorio. Si se considera una larga duración del bombeo esta fórmula proporciona un estado en régimen seudopermanente.

Las curvas de descenso en función de la distancia al pozo pueden calcularse aplicando la fórmula de Theis,

$$d = \frac{Q}{4 \pi T} W(u) \quad U = \frac{r^2 S}{4 T t}$$

d = descenso a una distancia l del pozo, tras un tiempo t

Q = caudal constante de bombeo

T = transmisividad

S = coeficiente de almacenamiento

$W(u)$ = función de pozo (tabulada)

t = tiempo

Conocida la superficie piezométrica previa al bombeo se trazan las curvas de igual descenso alrededor de la captación, en función del caudal elegido, según la fórmula de Theis (figura 45). Estos círculos cortarían las isopiezas antes del bombeo en unos puntos en los que se calculará, por sustracción, los valores modificados de

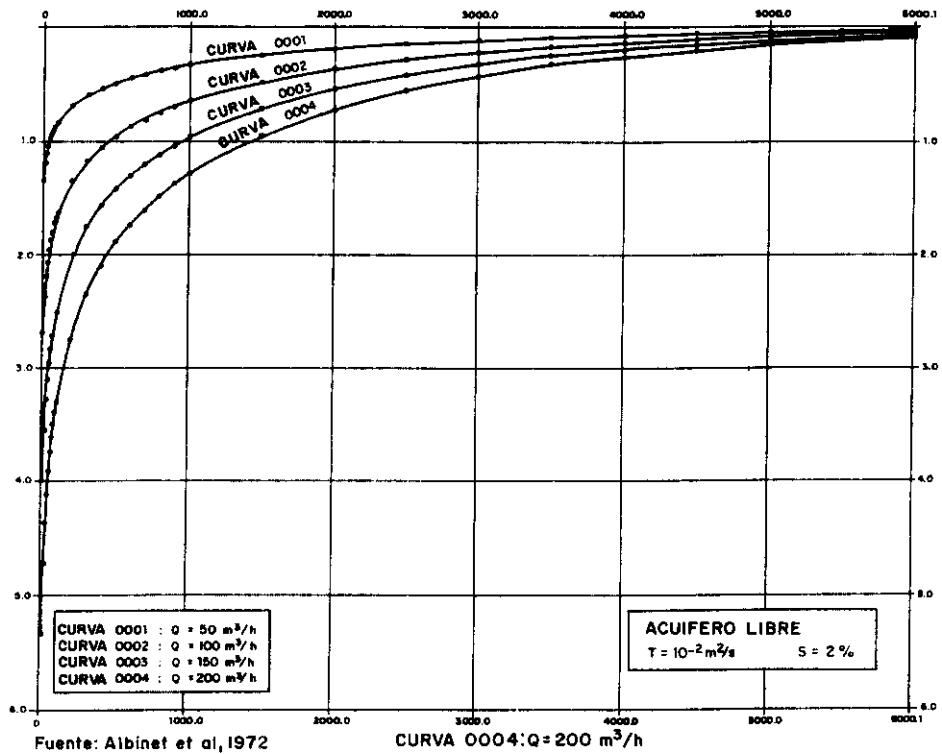


Fig. 46 CURVAS DISTANCIA DESCENSO

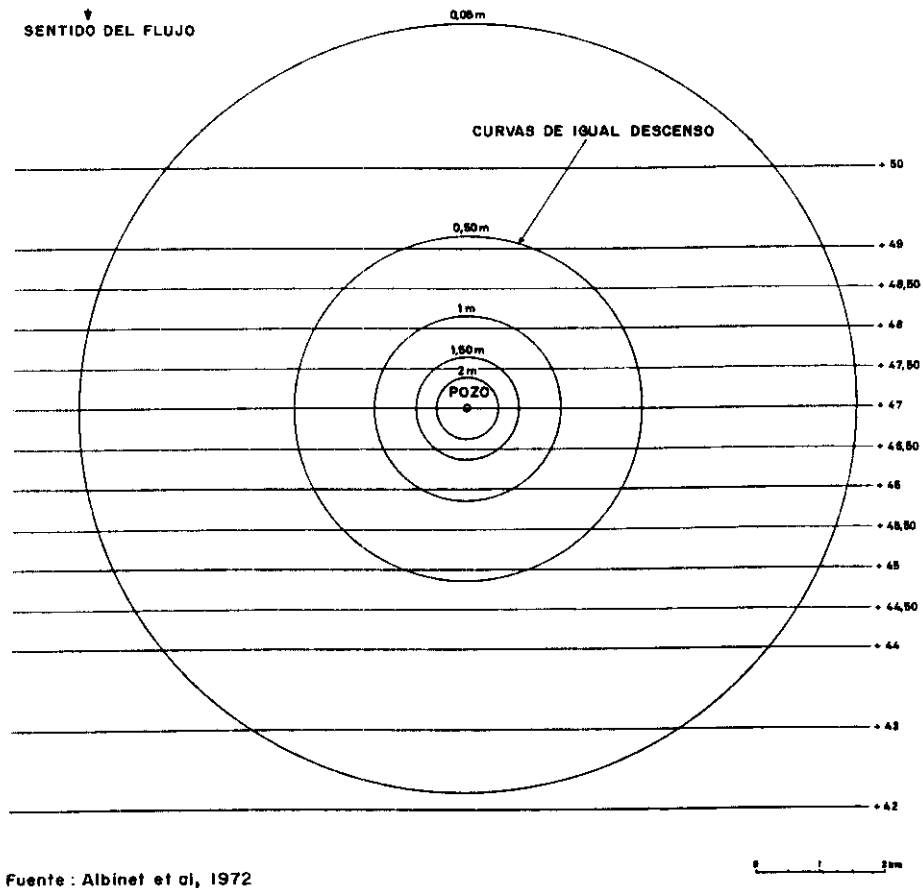
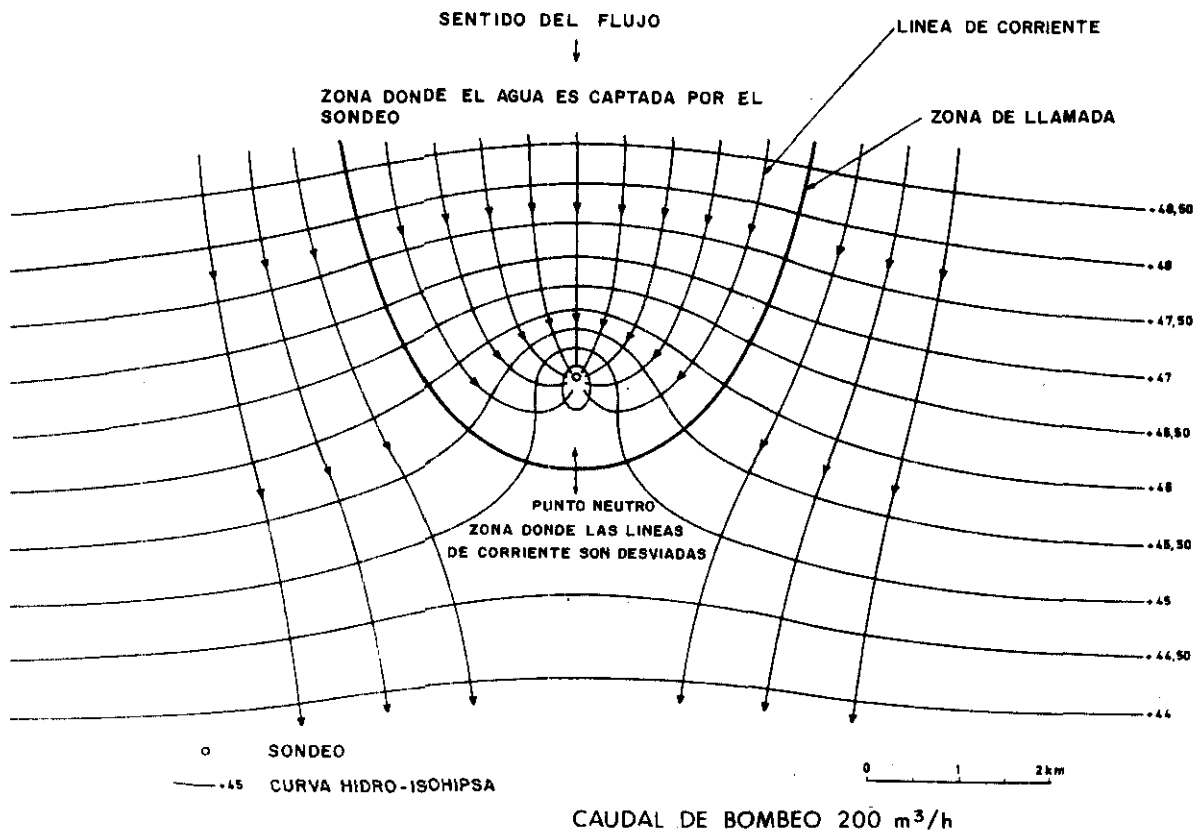


Fig. 45 CURVAS DE IGUAL DESCENSO



Fuente: Albinet et al, 1972

FIG. 47 DETERMINACION DE LA ZONA DE LLAMADA DE UNA CAPTACION

la carga hidráulica. A partir de esos puntos se trazan las isopiezas resultantes tras el bombeo, así como las líneas de corriente, que permitirán deducir el perímetro de llamada de la captación.

Albinet y colaboradores proporcionan un ejemplo. Se trata de un acuífero libre; el caudal de bombeo elegido es de 200 m³/h.

A partir de la curva descenso distancia correspondiente (figura 46) se trazan los círculos de igual descenso. Se dibujan después las isopiezas modificadas por el bombeo (figura 47) y la zona de llamada de la captación.

Se entiende como "zona de llamada" la parte del área de alimentación en la cual puede apreciarse un descenso piezométrico consecuencia del bombeo y las líneas de corriente se dirigen a la captación.

7.1.2.B.6. Empleo de ábacos para el cálculo de isocronas

El cálculo numérico o el empleo de ábacos para la determinación de isocronas permite, como ya se ha visto, definir con garantía las zonas inmediata y próxima del perímetro de protección. Es un método espe-

cialmente eficaz en acuíferos detriticos, donde se conocen con precisión la dirección y magnitud del flujo del agua y los parámetros que caracterizan al acuífero. Se analizarán cuatro supuestos generales que permiten abordar la mayor parte de los casos posibles:

- a) Pozo único situado en un acuífero homogéneo, isótropo y de extensión infinita, inicialmente en reposo (ver apartado 7.1.2.B.1.1.).
- b) Pozo único situado en un acuífero homogéneo, isótropo y de extensión infinita, sometido a un gradiente regional uniforme. (7.1.2.B.6.1.)
- c) Pozo único situado en un acuífero homogéneo e isótropo, de extensión semiinfinita con alimentación lateral procedente de un curso de agua. (7.1.2.B.6.2.)
- d) Batería de pozos en línea (7.1.2.B.6.3.)

7.1.2.B.6.1 Método de Jacobs y Bear

En este caso tanto las líneas de corriente como las líneas equipotenciales son más complejas que en el caso anterior (ver figura 48).

Las isocronas tienen por expresión en función de variables "reducidas" (adimensionales):

$$t_R = \frac{X_R}{10} - \frac{l}{\pi} L_n \left(\cos \pi \frac{Y_R}{10} + \frac{X_R}{Y_R} \operatorname{sen} \pi \frac{Y_R}{10} \right)$$

siendo

$$X_R = \frac{20 V b}{Q} x; \quad Y_R = \frac{20 V b}{Q} y; \quad t_R = \frac{2 T^2 i^2 t}{m_e Q b}$$

donde:

V = velocidad de Darcy (m/h)

Q = caudal de bombeo ficticio continuo (m³/h)

m_e = porosidad eficaz (adimensional)

b = espesor del acuífero (m)

T = transmisividad (m²/h)

i = gradiente hidráulico (adimensional)

Y_R, X_R, t_R = variables "reducidas"

Jacobs y Bear construyeron a partir de la fórmula de las isocronas un ábaco consistente en una colección de curvas semejantes a una parábola cuyo eje de simetría coincide con la del flujo del agua subterránea, (ver anexo 10-4), las asíntotas limitan aguas arriba del

pozo un flujo de agua igual al caudal extraído. Cada curva representa un tiempo de tránsito para el cual se han resuelto las ecuaciones.

La manera de proceder sería la siguiente:

- Sobre el plano de trabajo se traza un eje paralelo a la dirección del flujo que pase por la captación, así como un eje perpendicular a éste.
- Se calcula el "tiempo reducido":

$$t_R = \frac{2 T^2 i^2}{m_e Q b} t$$

Donde:

T = Transmisividad (m²/h)

Q = Caudal (m³/h)

t = tiempo (isocrona que se quiere calcular) (horas)

b = espesor saturado (m)

i = gradiente hidráulico (adimensional)

m_e = porosidad eficaz (adimensional)

Q = es el caudal medio diario, es un caudal ficticio

- Sobre el ábaco se busca la curva correspondiente al tiempo t_R , si no coincide con ninguna de las dibujadas se determina por interpolación entre las dos más próximas.
- Se dibujan sobre el ábaco tantos puntos como sea necesario para poder reproducir la curva a escala real. Normalmente es sufi-

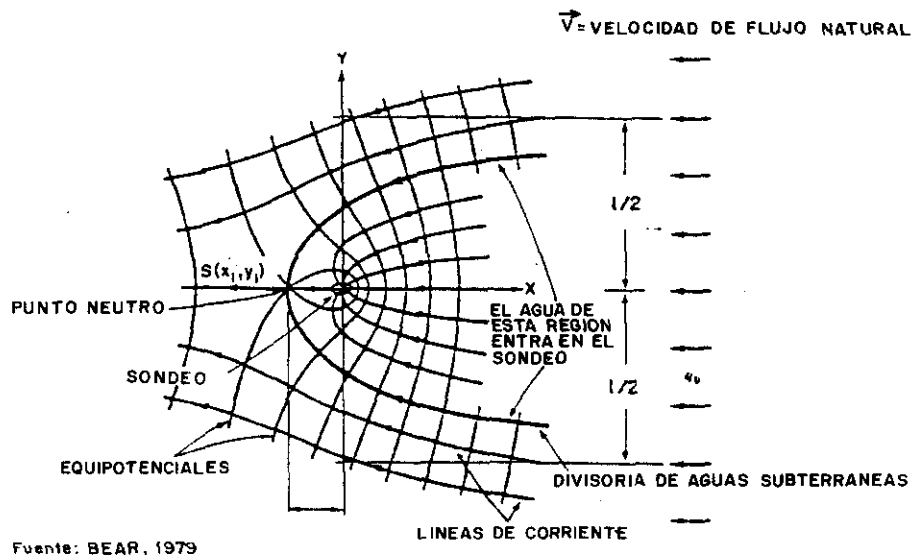


FIG. 48 LINEAS DE CORRIENTE ENTORNO A LA CAPTACION

ciente con determinar los cortes con los ejes coordenados y 3 ó 4 puntos más debido a la simetría de las curvas.

- e) Se calculan las coordenadas reales de los puntos mediante las fórmulas de transformación:

$$X(m) = \frac{Q}{20Ti} X_R; \quad Y(m) = \frac{Q}{20Ti} Y_R$$

X, Y = distancia real en m

Q = caudal en m^3/h durante las 24 horas del día

X_R, Y_R = distancia en cm en el ábaco

T = transmisividad en m^2/h

i = gradiente hidráulico en reposo (adimensional)

- f) Se traza la curva a mano alzada sobre el plano a la escala de trabajo.

En el caso de valores de tr pequeños ($< 0,005$) los frentes de desplazamiento isocrono son aproximadamente circulares y se puede emplear el método del acuífero en equilibrio hidrostático sin cometer gran error.

Ejemplo:

Se va a aplicar el método partiendo de los siguientes datos:

$$b = 154,5 \text{ m}$$

$$T = 132 \text{ m}^2/h$$

$$m_e = 0,02$$

$$i = 0,039$$

$$Q = 216 \text{ m}^3/h \text{ 16 horas/día}$$

$$t = 1 \text{ día} = 24 \text{ horas}$$

Debe transformarse el caudal a un bombeo ficticio constante durante las 24 horas

$$Q = 216 \cdot \frac{16}{24} = 144 \text{ m}^3/h$$

Procedimiento:

- 1° Se calcula el tiempo reducido (tr)

$$t_R = \frac{2 T^2 i^2 t}{m_e Q b} \rightarrow t_R = 2,86$$

- 2° Se interpola entre las curvas del ábaco la buscada (2,86), puesto que no coincide con ninguna (ver figura 49).

- 3° Se determinan los cortes con los ejes y 3 ó 4 puntos más.

Las coordenadas ficticias (en unidades gráficas, cm) son:

$$X_{R(A,B)} = 36,7 \text{ cm}$$

$$X_{R(A,C)} = 3,1 \text{ cm}$$

$$Y_{R(A,D)} = 5 \text{ cm}$$

$$Y_{R(A,E)} = 5 \text{ cm}$$

- 4° Se calculan las coordenadas reales (x, y) de los puntos antes determinados usando:

$$X(m) = \frac{Q}{20Ti} X_R \quad Y(m) = \frac{Q}{20Ti} Y_R$$

Las coordenadas reales son:

$$X_{(A,B)} \simeq 52 \text{ m}$$

$$X_{(A,C)} \simeq 5 \text{ m}$$

$$Y_{(A,D)} \simeq 7 \text{ m}$$

$$Y_{(A,E)} \simeq 7 \text{ m}$$

- 5° En el plano de trabajo se traza un eje paralelo a la dirección del flujo que pase por la captación, así como un eje perpendicular a éste.

Se marcan los puntos B, C, D, E, empleando las distancias reales obtenidas en el paso 4° y se traza la curva que los una que es la isocrona que se quería calcular (1 día).

En un caso real es conveniente emplear como referencia algún punto más para poder dibujar la isocrona con mayor precisión.

Como ha sido explicado este método es idóneo para su aplicación en acuíferos detríticos homogéneos. En Benisa (Alicante) se definió un perímetro de protección para un sondeo de abastecimiento basándose en criterios de carácter hidrogeológico, pues las características del acuífero (carbonatado) así lo aconsejaba; no obstante se aplicaron además, entre otros, el método de Jacobs y Bear a fin de tener un cierto criterio de comparación, encontrándose que el método englobaba en el perímetro un foco antiguo contaminante que afectó al sondeo. En el apartado 7.1.3. se analizará con detalle en qué condiciones puede considerarse a determinados acuíferos carbonatados asimilables a los acuíferos detríticos por lo que se podía emplear en ambos los mismo métodos.

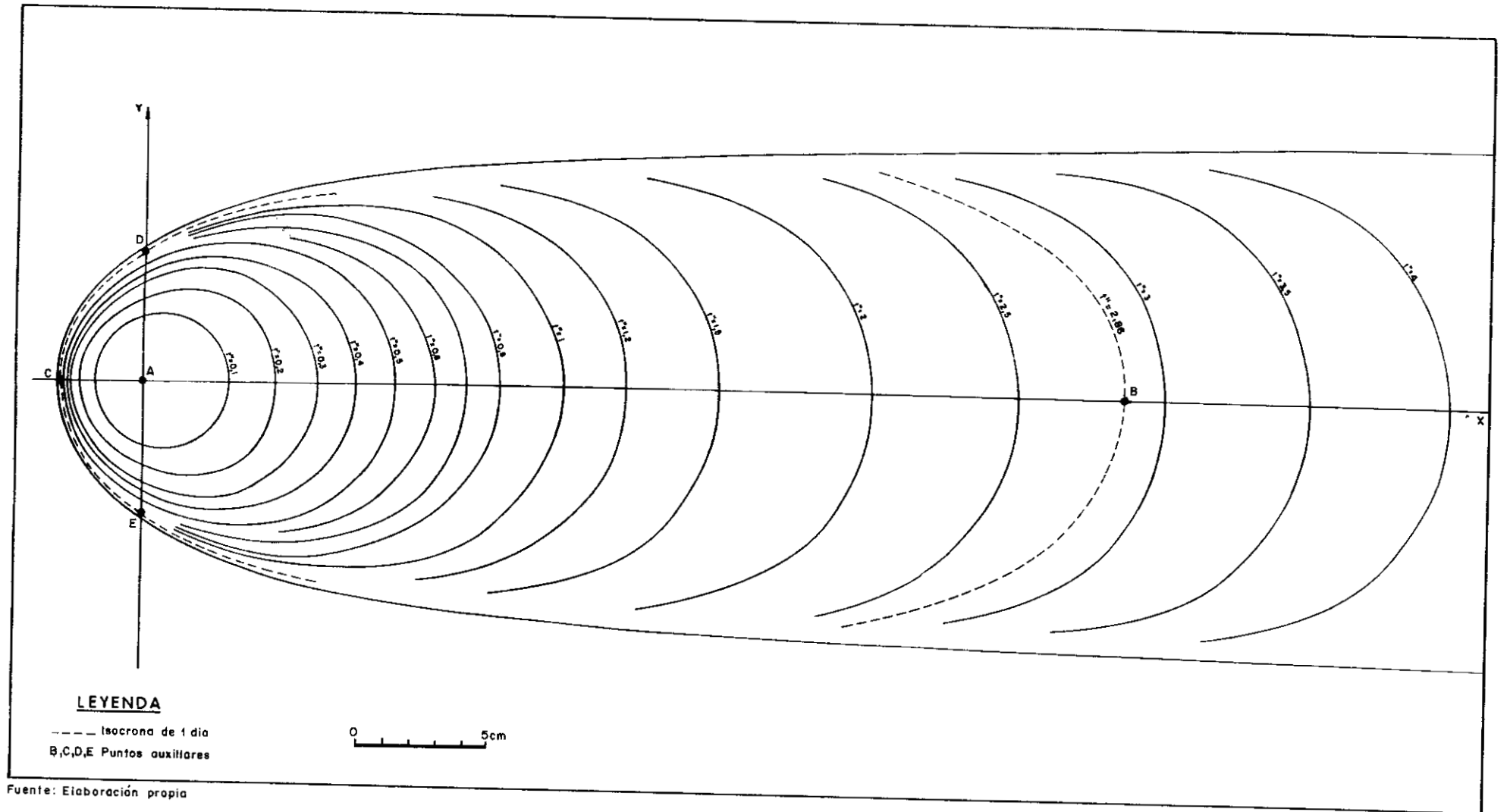


Fig. 49 EJEMPLO DE APLICACION DEL METODO DE JACOBS Y BEAR

7.1.2.B.6.2. Pozo único en un acuífero homogéneo, isótropo, de extensión semi-infinita situado próximo a un curso de agua que proporciona alimentación lateral

Sea un pozo P situado a una distancia l de un curso de agua.

Antes de comenzar el bombeo existe un flujo regional hacia el río. Si la distancia l es lo suficientemente pequeña, después de un cierto tiempo de comenzado el bombeo se establecerá un flujo desde la ribera hacia el pozo causado por la depresión creada por éste, lo que se conoce como inversión del flujo (ver figura 50). Es importante conocer, una vez alcanzado el régimen permanente, la tasa de alimentación proporcionada por el curso de agua así como el tiempo mínimo de tránsito entre la ribera y el pozo, ya que en caso de una hipotética contaminación del río ésta podría acabar afectando al pozo.

Una vez conocidos estos dos parámetros se podrá determinar tanto el grado de dilución que alcanzarían las aguas contaminadas en el instante de la extracción, como el momento de afección del pozo.

Estos parámetros dependerán del caudal de bombeo, de la distancia l entre el pozo y el curso de agua y del vector velocidad del flujo subterráneo, dado por su módulo V y su desviación respecto del curso de agua.

Tasa de alimentación de ribera en régimen permanente

El ábaco de la figura 52 permite calcular la proporción q de agua proveniente del curso de agua, en función del ángulo α de "desviación" del flujo y del parámetro adimensional.

$$Q_R = \frac{Q}{b l v} \quad Q_D = \frac{Q_R}{2 \pi} = \frac{Q}{2 \pi b l v}$$

q = vendrá dado por:

$$q = \frac{Q_1 + Q_2}{Q}$$

(Ver Figura 51)

Del análisis de las curvas se puede concluir que:

- La tasa de alimentación es creciente con el caudal reducido Q_R . Esto quiere decir que será tanto mayor cuanto mayor sea el caudal de bombeo Q en el pozo P , o cuanto menor sean el espesor del acuífero b , la distancia entre el pozo y el río l o la velocidad del flujo subterráneo V , a constancia de los otros tres parámetros.
- Cuando $\alpha \geq 90^\circ$, es el río el que alimenta al acuífero (río influente), y, por lo tanto, para cualquier caudal de bombeo en el pozo la tasa de alimentación es la unidad.
- Existe un valor mínimo del caudal de bombeo tal que, para valores menores de éste no se produce inversión del flujo hacia el pozo y no existe, por tanto, alimentación del curso de agua ($q = 0$).
- Para un mismo valor de Q_R (caudal de bombeo constante) la tasa de alimentación es tanto mayor cuanto más oblicuo es el flujo subterráneo respecto del curso de agua.
- Cuando el caudal de bombeo es lo suficientemente elevado (en teoría infinito), la tasa q es la unidad (todo el agua extraída en el sondeo proviene del río) para cualquier valor de α . Lo mismo ocurriría si se acerca suficientemente el pozo al curso de agua ($l \rightarrow 0$).

Cálculo de los tiempos de llegada

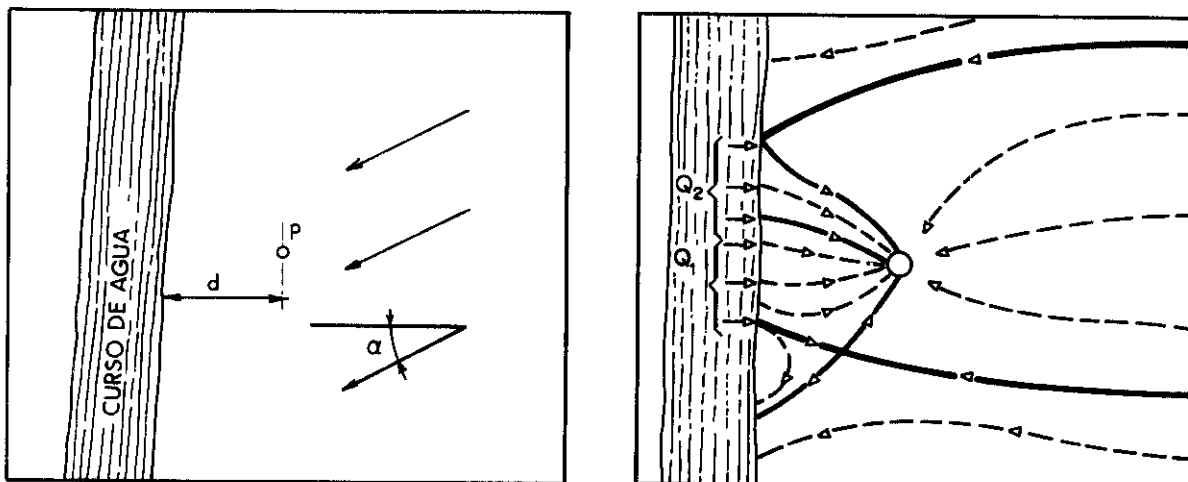
El tiempo de llegada t_p o tiempo de transporte a lo largo de la línea de corriente más corta, entre el curso de agua y el pozo de bombeo, representa el tiempo mínimo necesario para que una posible contaminación del curso de agua alcance el pozo (supuesto constante el caudal de bombeo).

El ábaco de la figura 53 proporciona los tiempos de llegada en función de los valores de:

$$Q_R = \frac{Q}{b l v} \quad \text{con} \quad Q_D = \frac{Q_R}{2 \pi} \quad \text{y de} \quad \alpha$$

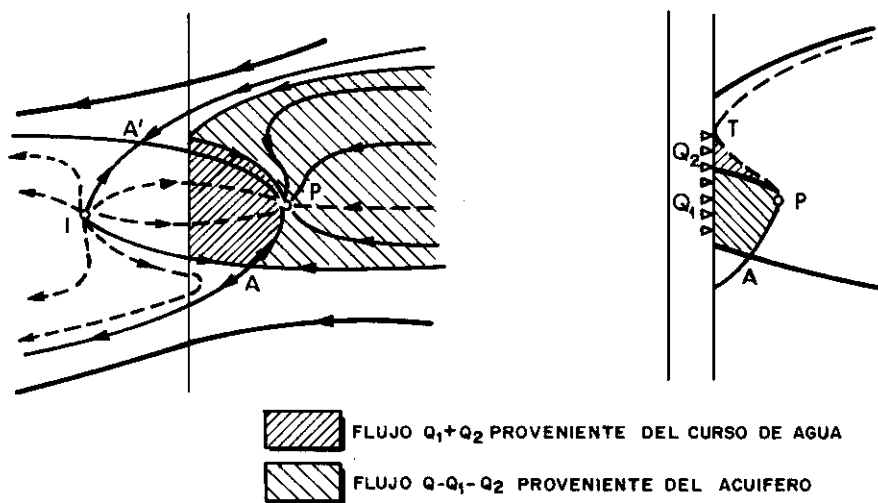
Por integración del vector velocidad se obtiene:

$$t_p = \frac{2 \pi m_* l^2 b}{3 Q} f(Q_R, \alpha)$$



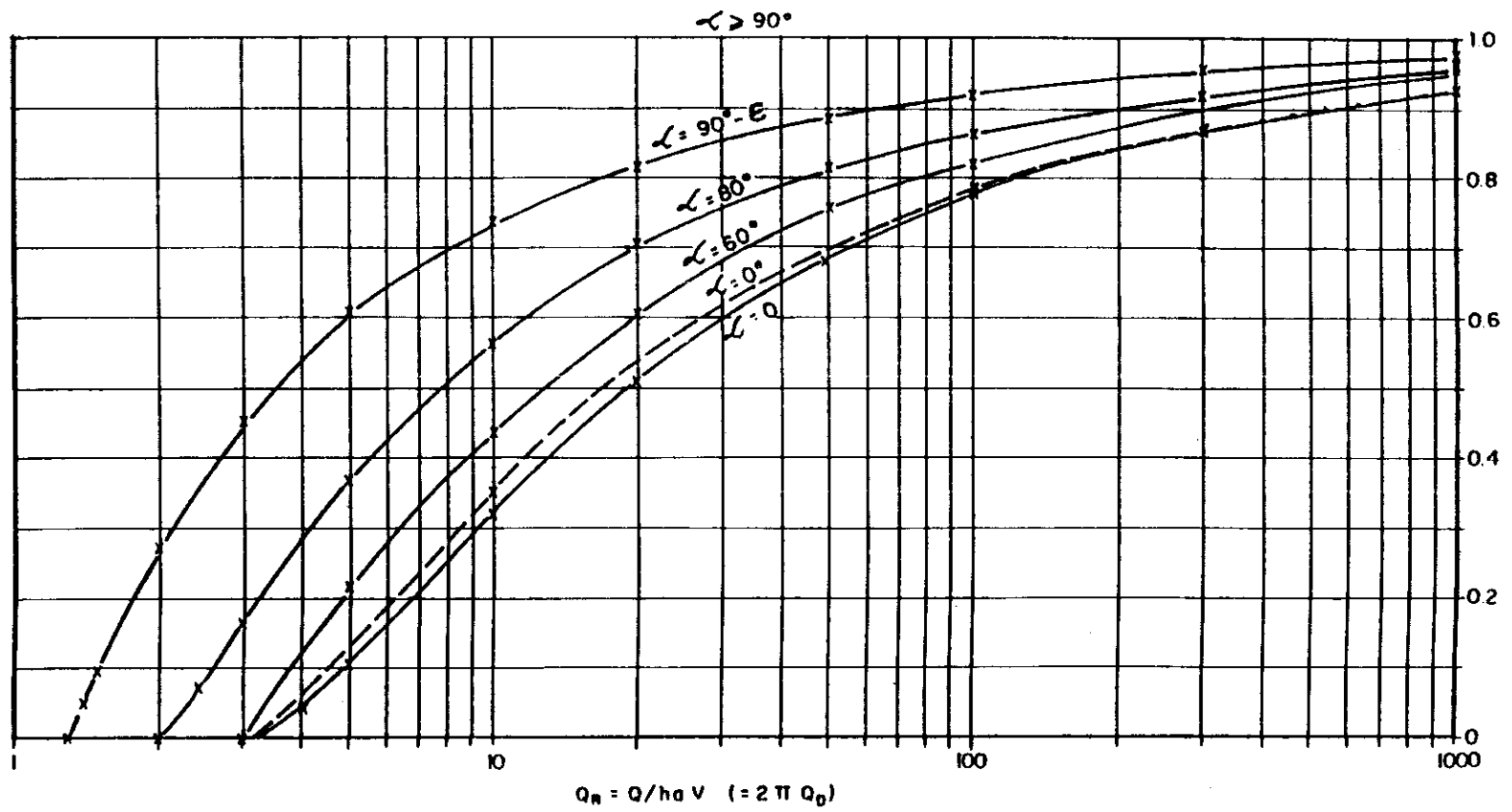
Fuente: J.P. Sauty, 1985

Fig. 50 BOMBEO EN LAS PROXIMIDADES DE UN CURSO DE AGUA CON ALIMENTACION DE RIBERA.



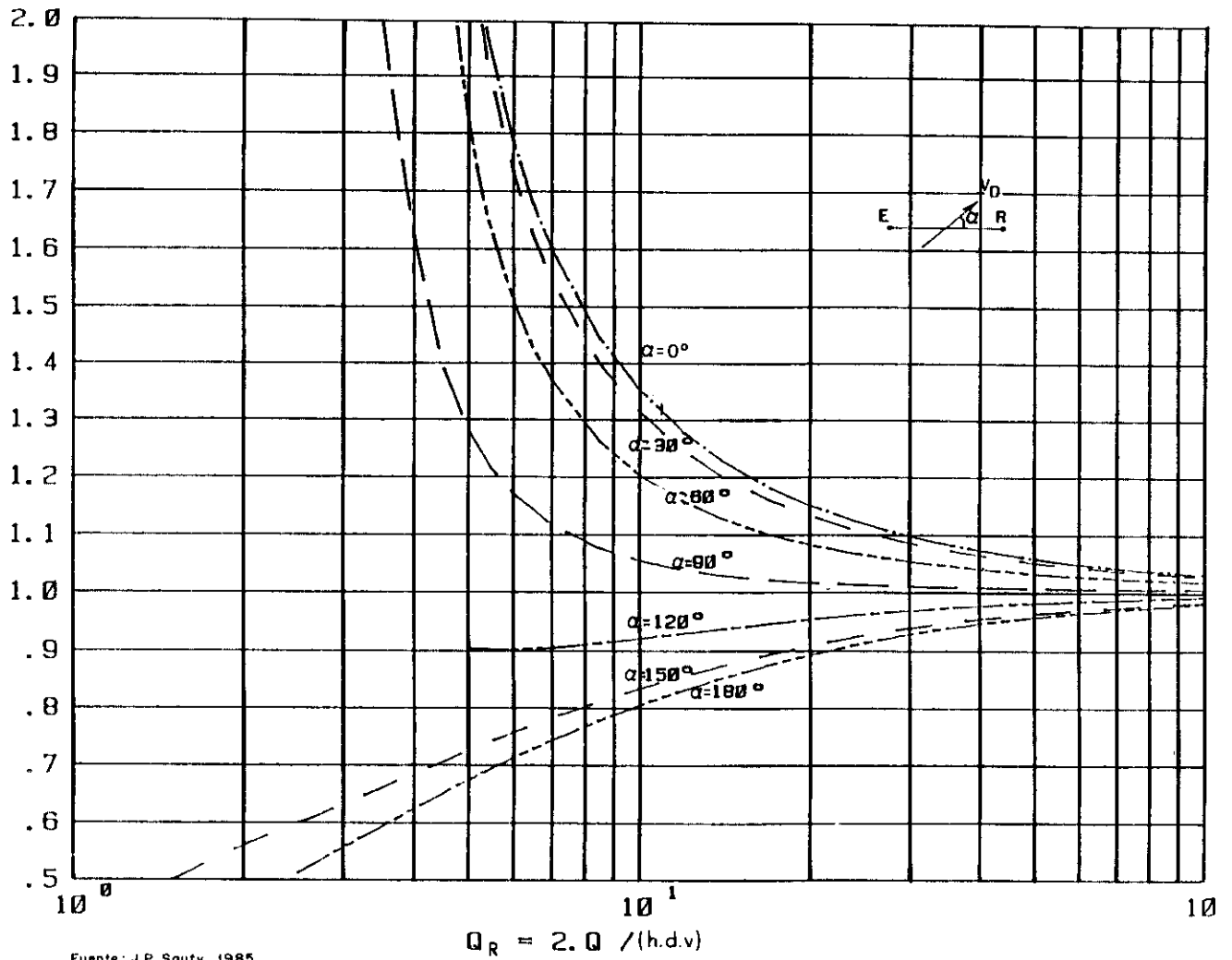
Fuente: J.P. Sauty, 1985

Fig. 51 ESQUEMAS DE PRINCIPIO



Fuente: J.P. Souty, 1985

Fig. 52 TASA DE AGUA BOMBEOADA PROVENIENTE DEL CURSO DE AGUA.



Fuente: J.P. Sauty, 1985

Fig.53 INFLUENCIA DEL FLUJO REGIONAL SOBRE EL TIEMPO DE LLEGADA EN FUNCION DE Q_r Y DE α

El ábaco proporciona los valores de la función $f(Q_R, \alpha)$, calculándose posteriormente t_p a partir de fórmula expuesta.

No obstante, la función $f(Q_R, \alpha)$ puede ser calculada analíticamente en determinados casos muy particulares.

- a) *Caso de alimentación lateral perpendicular al curso de agua.*

Se tiene $\alpha = 0$. Entonces:

$$\text{si } Q_D = \frac{Q}{2\pi b d v} > 0.5$$

$$t_p = \frac{m_e l}{V} \left(1 - \frac{2 Q_D}{\sqrt{2 Q_D - 1}} \text{Arc tag } \frac{1}{\sqrt{2 Q_D - 1}} \right)$$

Si $Q_D \leq 0.5$ el pozo no recoge nada de agua proveniente del curso de agua.

- b) *En el caso inverso de que sea inicialmente el río el que alimente al acuífero con un flujo perpendicular a la ribera se tiene:*

$$\alpha = 180^\circ$$

$$t_p = \frac{m_e l}{V} \left(1 + \frac{2 Q_D}{\sqrt{2 Q_D + 1}} \text{Arc tag } \frac{1}{\sqrt{2 Q_D + 1}} \right)$$

- c) *En el caso de que no exista alimentación lateral $V = 0$ y $f(Q_R, \alpha) = 1$ Entonces:*

$$t_p = \frac{2\pi m_e l^2 b}{3 Q}$$

En el resto de los casos que se presenten, será necesario la utilización de un ordenador para el cálculo de la función $f(Q_R, \alpha)$, o el empleo del ábaco de la figura 53.

Del análisis de la figura 53 se observa:

- a) Dos familias de curvas claramente diferenciadas en su comportamiento, separadas por la curva correspondiente a $\alpha = 90^\circ$.
- b) Para valores de $\alpha > 90^\circ$ se tiene una familia de curvas crecientes con el valor de Q_R , y son tales que cuanto menor sea el valor del caudal de bombeo Q menor es el valor de $f(Q_R, \alpha)$, y, por lo tanto, del tiempo de transferencia t_p . Estas curvas admiten una

asíntota única, independiente del valor de α y para

$$f(Q_R, \alpha) = 1. \text{ Por tanto } t_p = \frac{2\pi m_e l^2 b}{3 Q}$$

depende del caudal de bombeo Q , de las características del acuífero y de la distancia del pozo al curso de agua. Además, para un mismo valor de Q_R (caudal mínimo de bombeo) el tiempo de transferencia es tanto mayor cuanto más oblicuo sea el flujo subterráneo respecto del curso de agua (cuanto mayor sea α).

- c) Para valores de $\alpha < 90^\circ$ tenemos otra familia de curvas, decrecientes con el valor de Q_R . Esto es, cuanto mayor sea el caudal de bombeo Q , a igualdad del resto de los parámetros, mayor será el valor de $f(Q_R, \alpha)$ y, por tanto, del tiempo de tránsito t_p . Al igual que en el caso anterior, todas estas curvas admiten una asíntota única, independiente, por tanto, del valor de α , para la que $f(Q_R, \alpha) = 1$ y

$$t_p = \frac{2\pi l^2 b m_e}{3 Q} \text{ si } Q \text{ es lo suficientemente}$$

elevado $Q \rightarrow \infty$, el pozo está lo suficientemente próximo al río $l \rightarrow 0$ ó la velocidad del flujo subterráneo es nula ($V = 0$). Por último, para un mismo valor de Q_R (mismo caudal de bombeo) el tiempo de transferencia es tanto menor cuanto más oblicuo sea el flujo subterráneo respecto de las márgenes del curso de agua.

- d) Para un mismo valor de Q_R (mismo caudal de bombeo) los tiempos de llegada son menores para valores de $\alpha \geq 90^\circ$. Esto es lógico ya que para $\alpha \leq 90^\circ$ es el acuífero el que inicialmente alimenta al río por lo que el bombeo se opone entre el pozo y la ribera al flujo natural y la velocidad del contaminante a lo largo de las líneas de corriente debe ser menor que en el caso de que ya inicialmente el flujo vaya del río al pozo ($\alpha > 90^\circ$). Además, cuanto mayor sea la oblicuidad de las líneas de corriente respecto del río, en el primer caso, menor será la componente de la velocidad en dirección al pozo de bombeo y tanto más fácilmente será contrarrestada por el bombeo en el pozo por lo que la velocidad a lo largo de las líneas de corriente será mayor y menor el tiempo de llegada del contaminante. Al contrario ocurrirá para $\alpha > 90^\circ$ (el río alimenta al acuífero) y cuanto más oblicua sea la velocidad natural del flujo

subterráneo, menor será su componente en dirección al pozo con lo que la velocidad a lo largo de la línea de corriente más corta será menor, así como el tiempo de llegada de la partícula contaminante.

Régimen transitorio resultante de la parada del bombeo. Caso de una captación situada en las proximidades de un curso de agua temporalmente contaminado.

Sea una captación situada en un acuífero aluvial con alimentación lateral, que en ausencia de bombeo es drenado por el río (ver figura 54). Se presentan aquí una serie de ábacos obtenidos por simulación numérica que permiten determinar:

- Los tiempos durante el cual el río sigue alimentando al acuífero después de la parada del bombeo.
- La evolución de los caudales que penetran en el acuífero durante este período.
- El volumen total del agua del río que penetra en el acuífero durante este período.

Los ábacos proporcionan el volumen adimensional.

$$V_a = 4 \frac{VT}{SQ_p L^2}$$

en función del tiempo reducido, también adimensional

$$t_R = 4 \frac{tT}{L^2 S}$$

para diferentes valores de caudal reducido

$$Q_R = \frac{Q_x L}{Q_p}$$

y del coeficiente de colmatación del lecho

$$\frac{A}{L} = \frac{K E}{K_c L}$$

donde:

- Q_p = caudal de bombeo inicial del pozo (m³/s)
- L = distancia del pozo al margen (m)
- T = transmisividad del acuífero (m²/s)
- S = coeficiente de almacenamiento

Q_x = alimentación natural del acuífero por unidad de longitud perpendicular al río (m²/s)

Q_y = alimentación natural del acuífero por unidad de longitud paralela al río (m²/s)

A = coeficiente de colmatación expresado en espesor de terreno circundante

$$(m) A = K E / K_c$$

E = espesor de la capa colmatada

K_c = permeabilidad de la capa colmatada

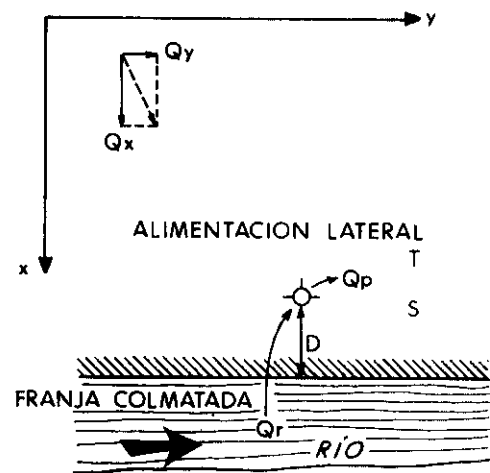
K = permeabilidad del acuífero

t = tiempo transcurrido desde la parada del bombeo (s)

Q_r = caudal de infiltración del agua del río en el acuífero (m³/s)

t_0 = tiempo de anulación del caudal de infiltración, tal que $Q_r(t_0) = 0$

v = volumen de agua infiltrada después del instante $t = 0$ (m³)



Fuente: J.P. Souty, 1985

FIG. 54 CAPTACION CON ALIMENTACION LATERAL POR UN RIO.

En las figuras 55 a 60 se presentan los ábacos de evolución del volumen infiltrado en el acuífero, para diferentes coeficientes de colmatación del lecho, una vez cesado el bombeo.

El tiempo en el que deja de aumentar el volumen infiltrado en el acuífero viene representado por el punto en el que comienza el tramo horizontal de las curvas.

Se observa que cuanto mayor sea el caudal de bombeo inicial en el pozo, mayor será el tiempo necesario para que se produzca la inversión del flujo y mayor el volumen de agua contaminada que penetra en el acuífero. Lo mismo ocurriría cuanto menor sea la distancia entre el pozo y la margen del río (L) o cuanto mayor sea la alimentación lateral del acuífero (Q_x) a constancia de los otros factores.

A medida que aumenta el grado de colmatación (A) del cauce, el tiempo durante el que el río sigue alimentando al acuífero disminuye, si permanecen constantes los valores de Q_x , L y Q_p .

En la figura 61 se representa la proporción de caudal bombeado que procede del río en régimen permanente, en función del grado de colmatación del lecho.

El tiempo necesario para que se invierta el flujo una vez parado el bombeo, representa el tiempo de antelación mínimo con el que se debe de detectar una posible contaminación en el río antes de que llegue a las proximidades de la captación.

En función de la velocidad de circulación del agua del río y de este tiempo se obtiene la distancia a la que cualquier vertido contaminaría el acuífero en mayor o menor grado, aunque se procediera rápidamente a la parada del bombeo.

A esta distancia como mínimo debería de situarse una estación de control con el fin de detectar cualquier posible contaminación aguas arriba, lo que permitiría, con tiempo suficiente, proceder a la parada de las extracciones.

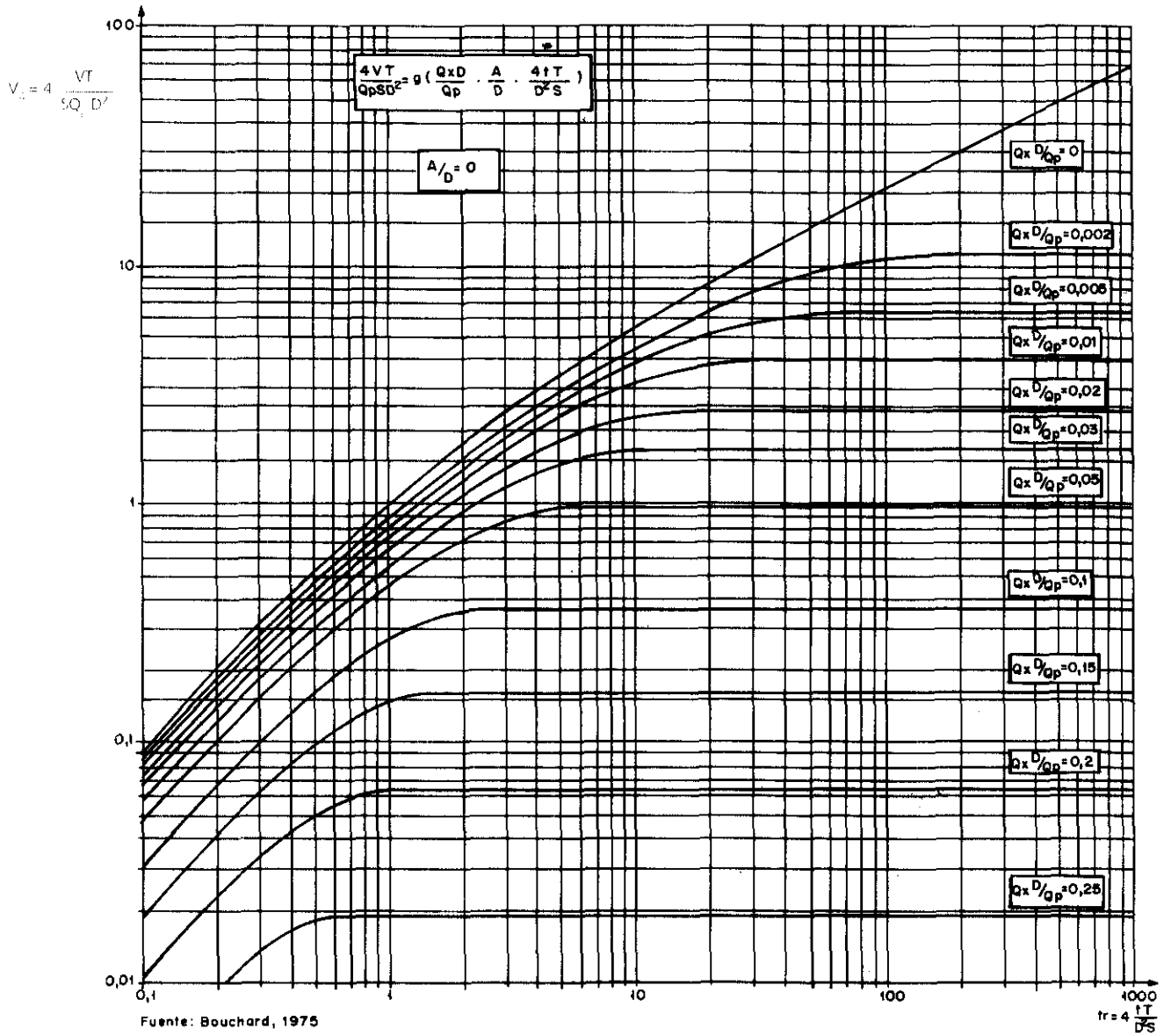


Fig.55 EVOLUCION DEL VOLUMEN INFILTRADO EN AUSENCIA DE COLMATACION (A=0)

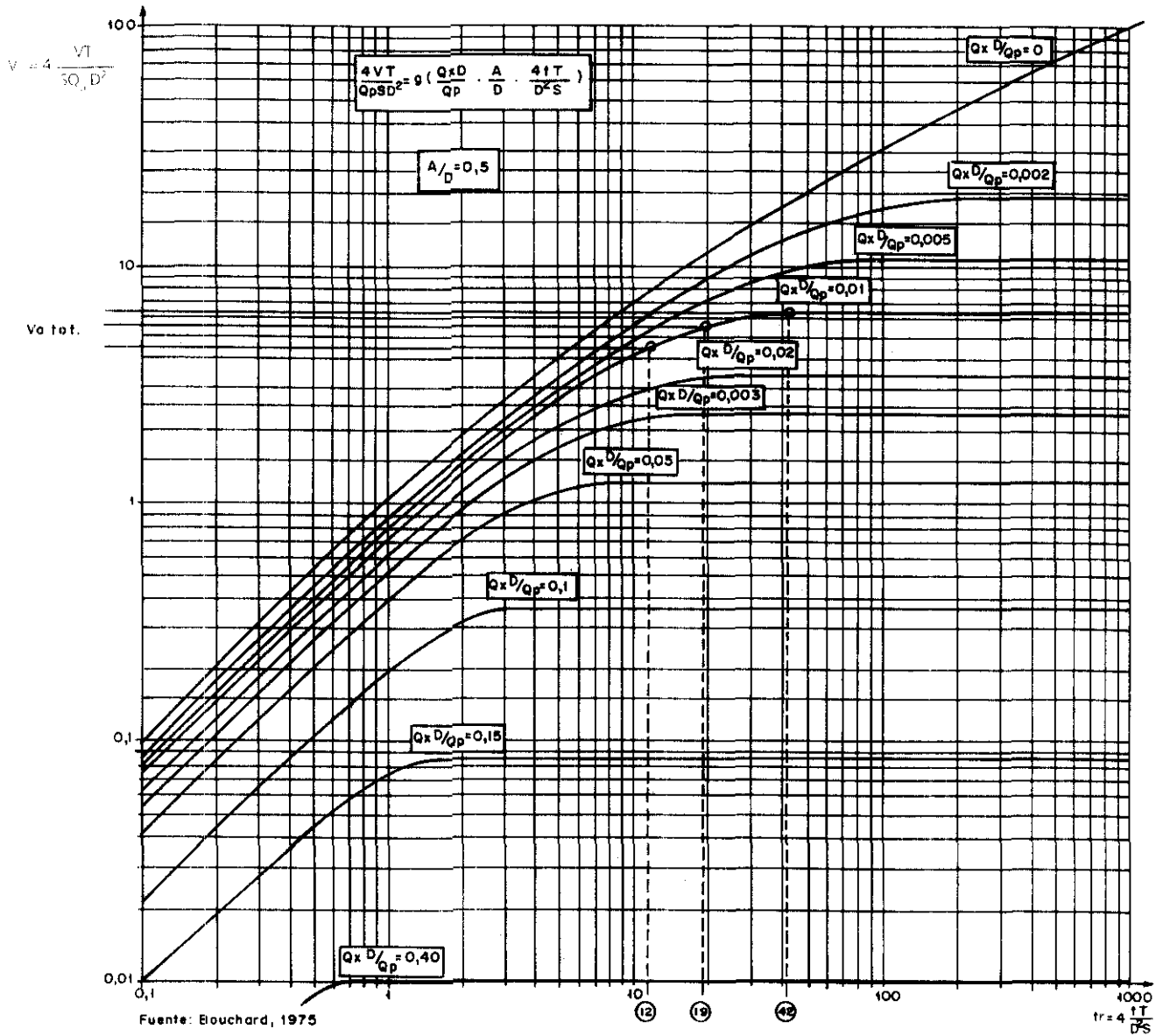


Fig.56 EVOLUCION DEL VOLUMEN INFILTRADO. COEFICIENTE DE COLMATACION
A/D=0,5

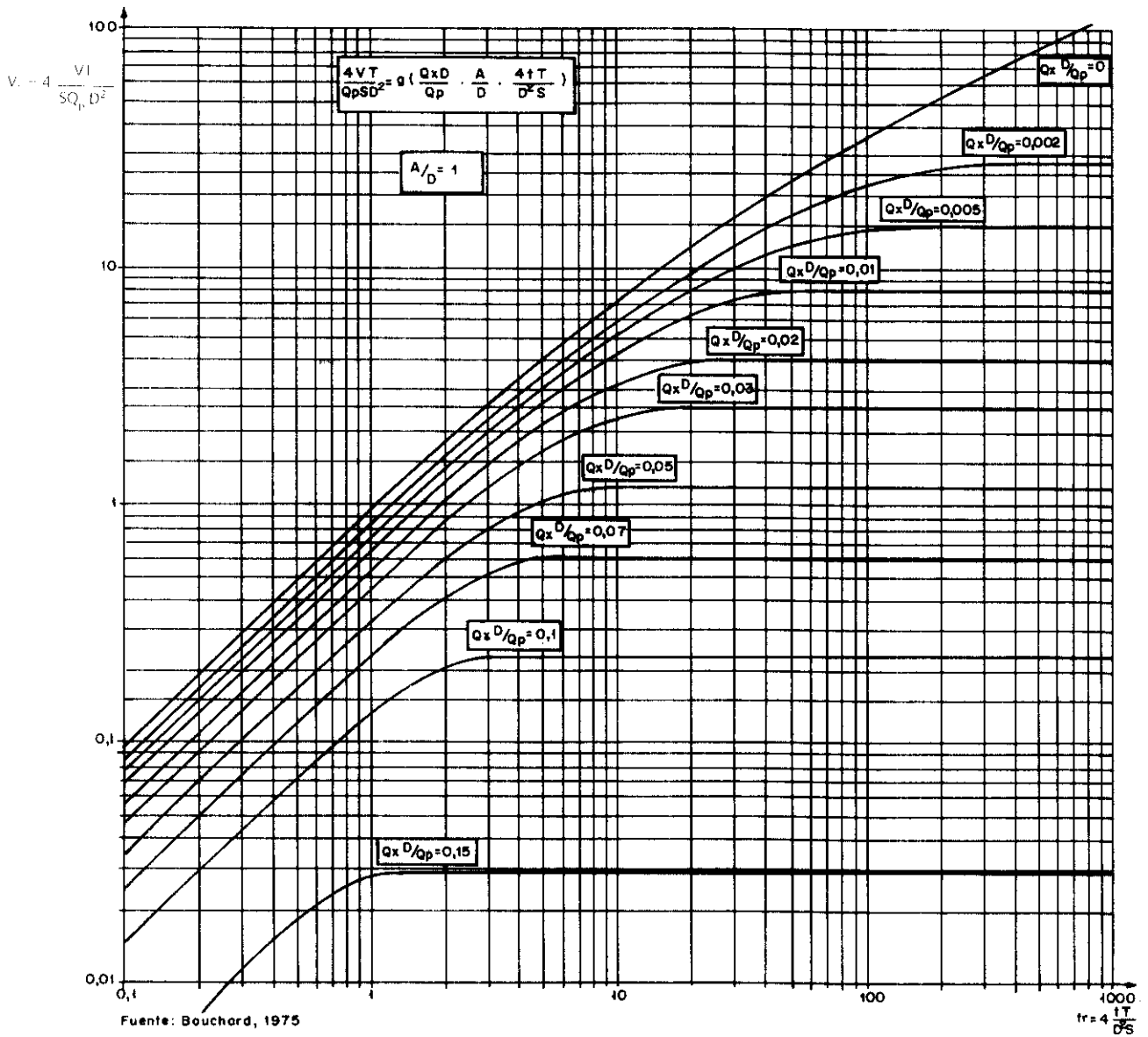


Fig. 57 EVOLUCION DEL VOLUMEN INFILTRADO. COEFICIENTE DE COLMATACION
A/D=1

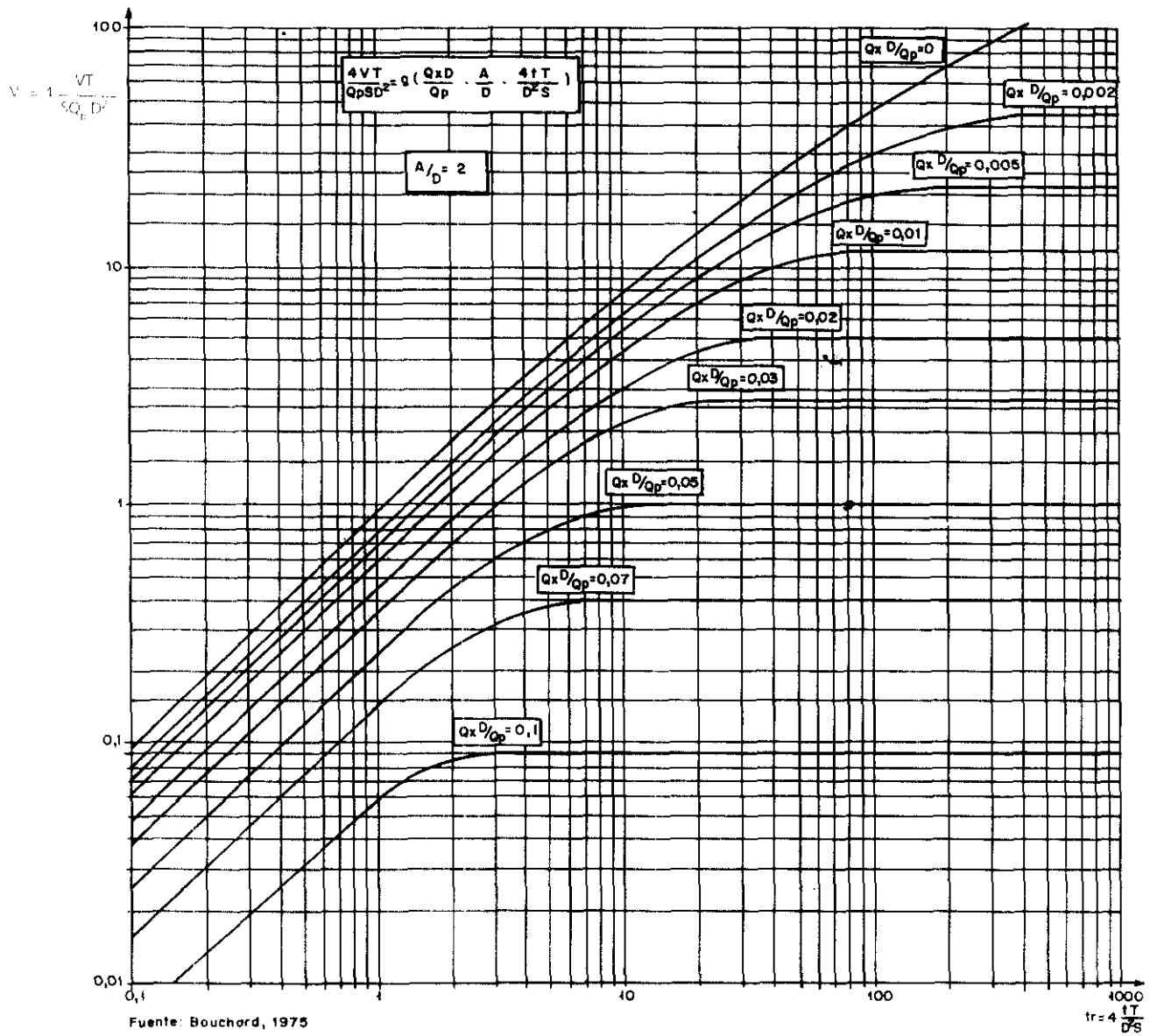


Fig.58 EVOLUCION DEL VOLUMEN INFILTRADO. COEFICIENTE DE COLMATACION
A/D= 2

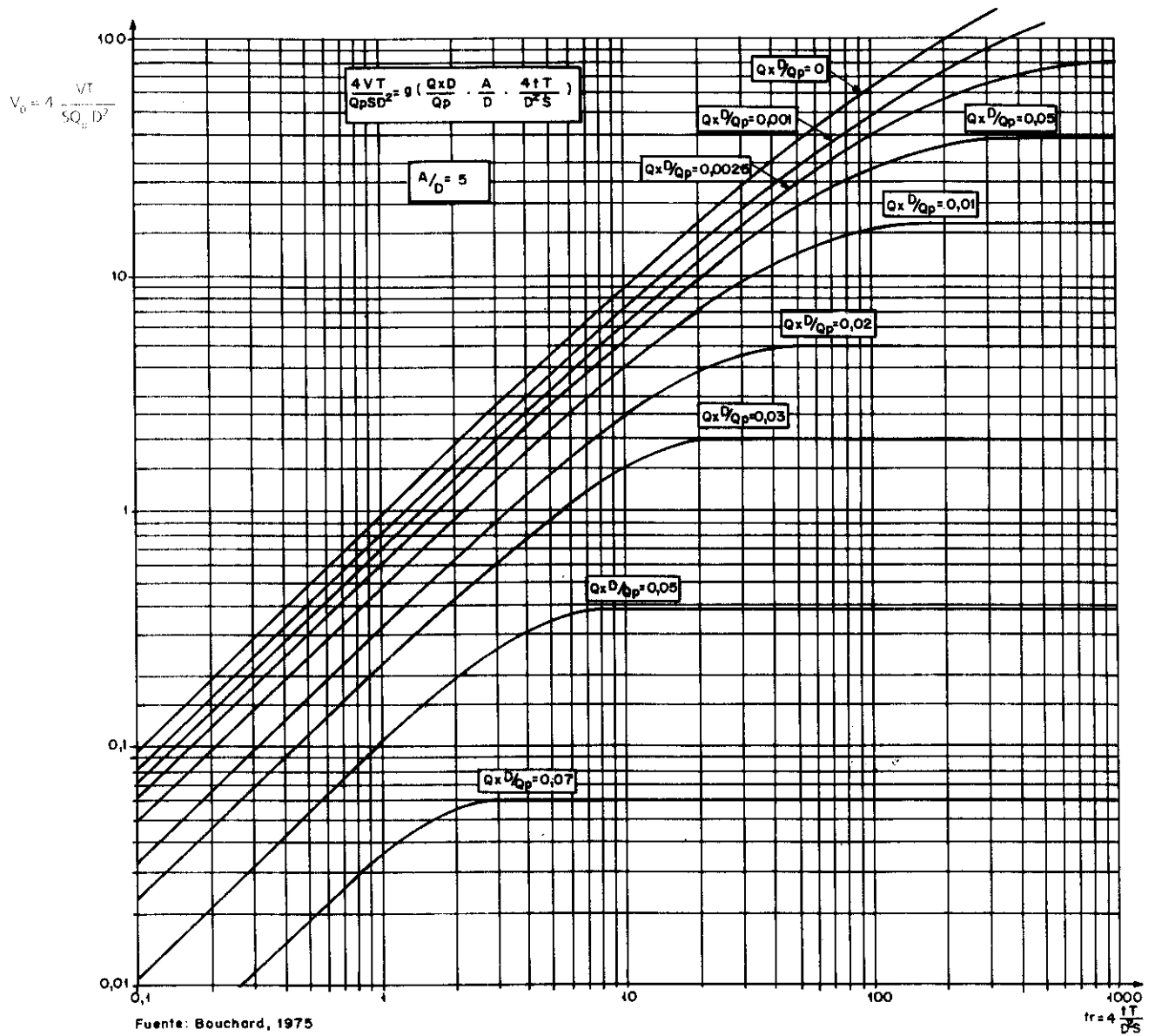


Fig. 59 EVOLUCION DEL VOLUMEN INFILTRADO. COEFICIENTE DE COLMATACION
A/D = 5

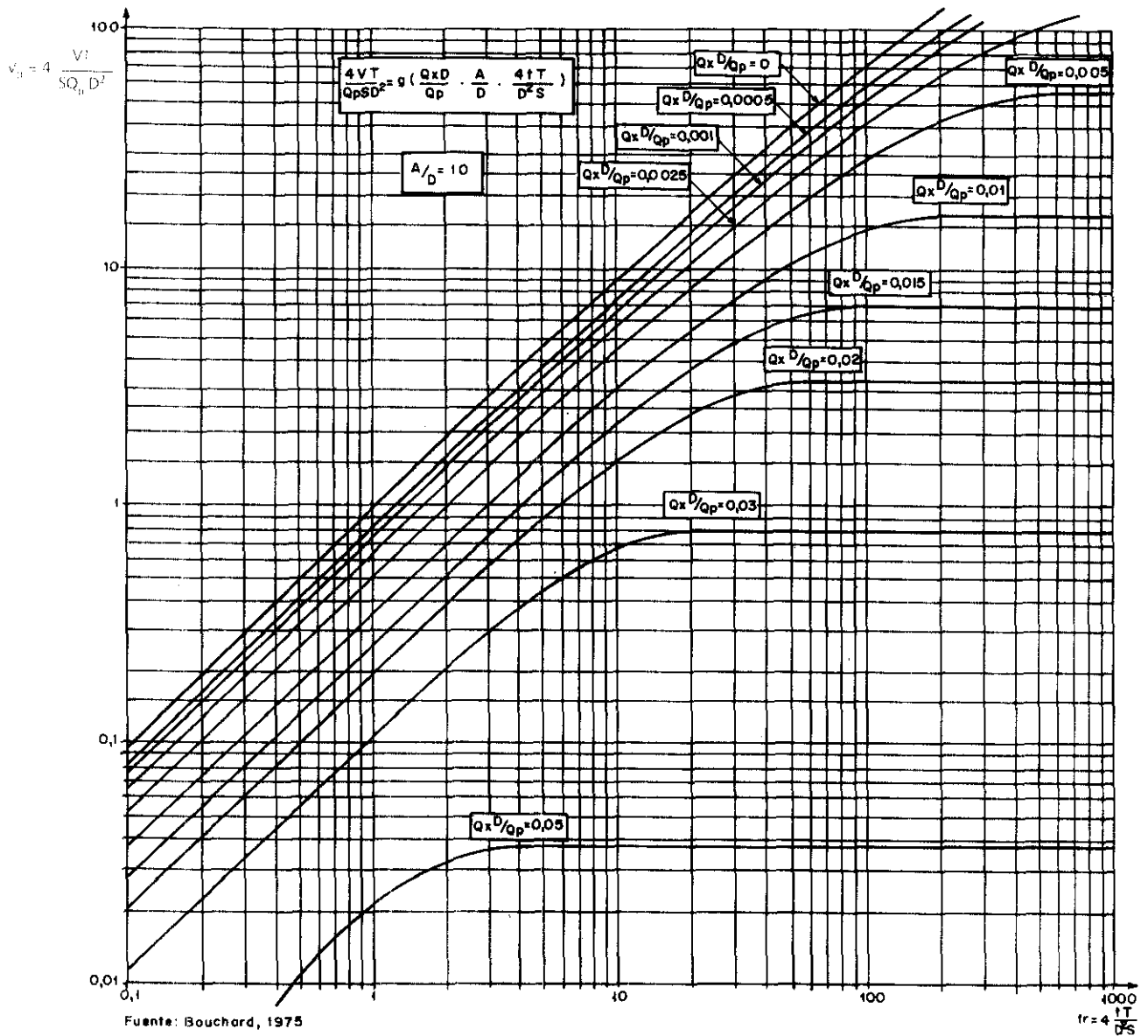


Fig.60 EVOLUCION DEL VOLUMEN INFILTRADO. COEFICIENTE DE COLMATACION
A/D= 10

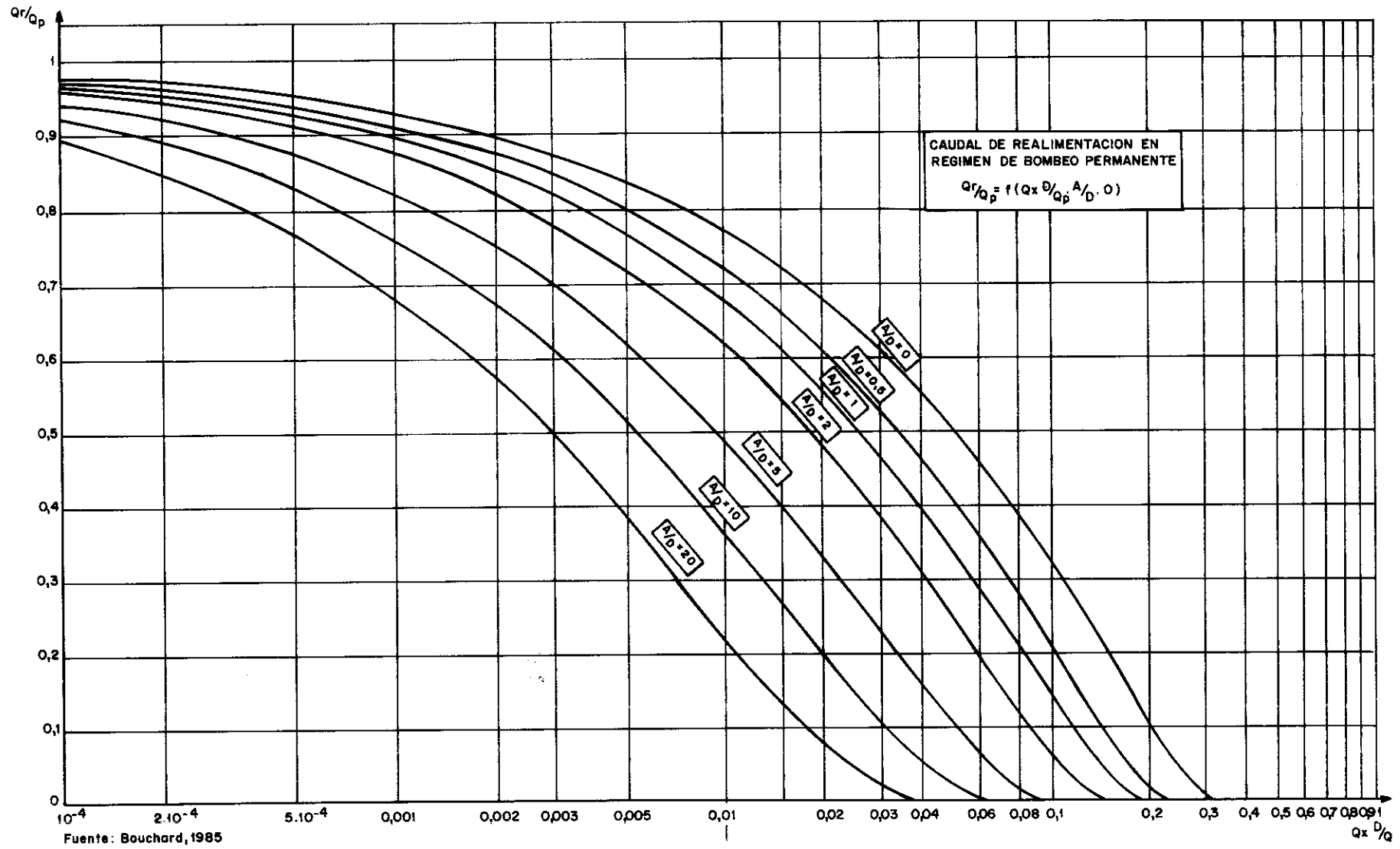
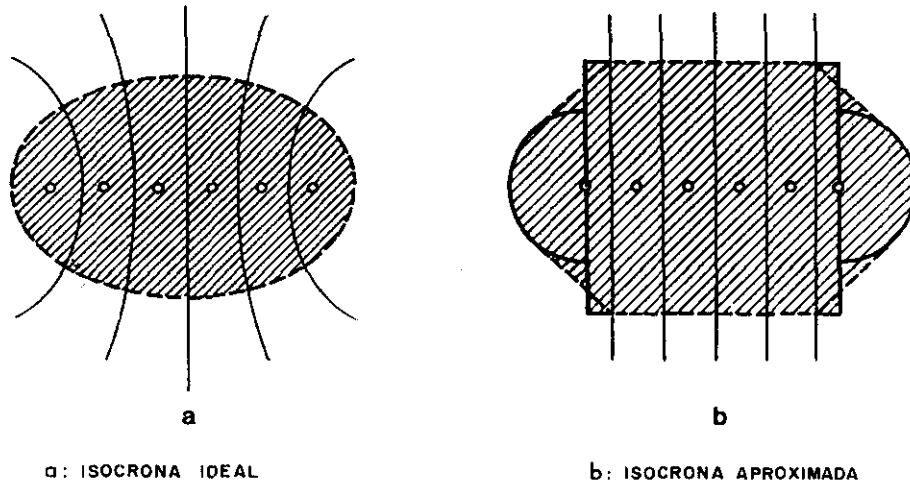


Fig. 61 PROPORCION DEL CAUDAL BOMBEADO PROVENIENTE DEL RIO EN REGIMEN PERMANENTE.



Fuente: J.P. Souty, 1985

FIG. 62 BATERIA DE POZOS EN LINEA

7.1.2.B.6.3. Batería de pozos en línea

Se propone aproximar la isocrona t_0 por una serie de rectángulos, (fig. 62, aproximación válida del 5% después de que la distancia de la isocrona a los sondeos sobrepase el doble del espaciamiento de los pozos) para los pozos interiores y de semicírculos para los dos pozos extremos. La superficie global estará cerrada por dos segmentos de recta tangentes a los círculos.

La longitud de los rectángulos es:

$$L = \frac{Q t_0}{m_e b d}$$

siendo d la separación de dos sondeos vecinos.

El radio del círculo es:

$$R = \sqrt{\frac{Q t_0}{\pi m_e b}}$$

Hay que tener en cuenta que: el perímetro está calculado suponiendo que el flujo es:

- Entre los pozos: paralelo (perpendicular a la línea de los pozos); el volumen de agua representado por cada rectángulo es igual al volumen bombeado por un pozo durante el tiempo t_0 .

$$W L d b = Q t_0$$

- En el exterior, para un caudal mitad de los pozos periféricos: asimétrico alrededor de estos sondeos; el volumen de agua representado por cada semicírculo es igual a la mitad del volumen bombeado por los pozos extremos durante el tiempo t_0 .

$$\frac{m_e \pi R^2}{2} = \frac{Q t_0}{2}$$

7.1.2.B.7. Nomogramas de Van Waegeningh y Van Duijnenboden. Cálculo de tiempo o distancias por nomogramas

Estos autores han puesto a punto nomogramas para obtener el tamaño de la zona de protección. Para su empleo es necesario conocer: porosidad eficaz, infiltración, tiempo de tránsito, caudal bombeado y espesor del acuífero.

Si se supone que el caudal extraído de un sondeo Q es igual a la recarga del acuífero por infiltración I sobre una superficie de radio L , se tiene:

$$Q = \pi L^2 I$$

A una distancia l del sondeo se tiene:

$$Q_l = \pi (L^2 - l^2) I,$$

con una superficie de alimentación del acuífero

$A = 2 \pi l b m_e$, la velocidad a la distancia l es:

$$V = \frac{dl}{dt} = \frac{Q_l}{A} = \frac{(L^2 - l^2) I}{2 l b m_e}$$

$$dt = \frac{2 m_e b l dl}{(L^2 - l^2) I}$$

$$t = \frac{-m_e b}{I} \ln (L^2 - l^2) + cte$$

Para $l = 0, t = 0$ la constante vale: $\frac{m_e b \ln L^2}{I}$

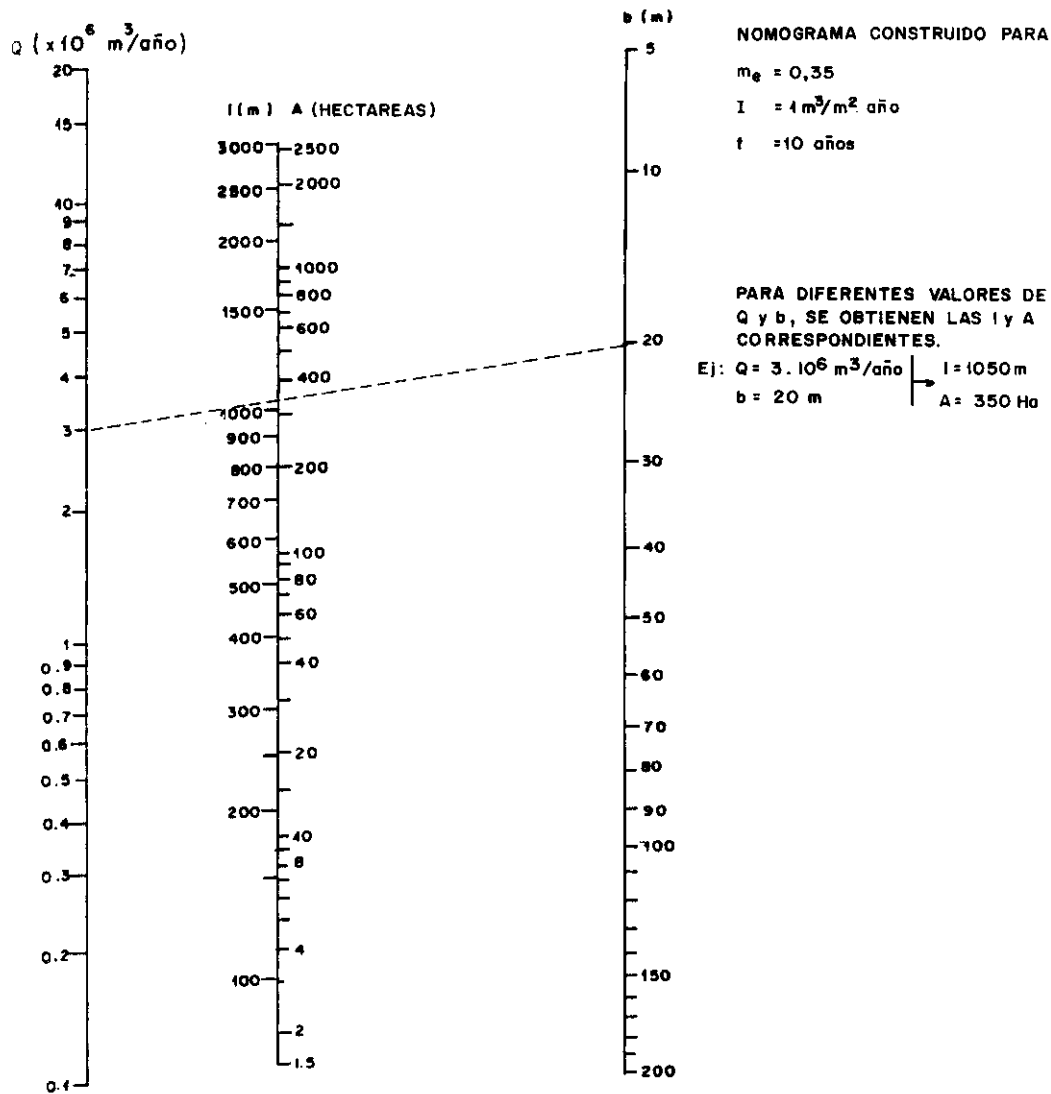
y en consecuencia

$$t = \frac{m_e b}{I} \ln \frac{L^2}{(L^2 - l^2)} \quad \text{Para } L^2 = \frac{Q}{\pi I}$$

$$t = \frac{m_e b}{I} \ln \frac{Q}{Q - l^2 \pi I} \rightarrow l = \sqrt{\frac{Q}{\pi I} (1 - \exp\left(\frac{-tI}{b m_e}\right))} \quad (6)$$

El nomograma de la figura 63 muestra los valores para l y A en función de Q y b en un acuífero libre con un tiempo de transferencia de 10 años, una porosidad eficaz de 935 y una infiltración de $1 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ año}$, los cálculos se han realizado a partir de la ecuación (6).

Se podrían obtener otros nomogramas variando los parámetros que se han fijado para obtener éste, por ejemplo el tiempo de transferencia, la porosidad eficaz, etc.



Fuente: A. Lallemand-Barrès, J.C. Roux, 1989

FIG. 63 EJEMPLO DE APLICACION DE LOS NOMOGRAMAS DE VAN WAEGENING Y VAN DUIJVENBODEN

7.1.2.B.8. Nomógrafo de Pettyjon

Se va a explicar su principio de utilización a partir de un ejemplo tomado de A. Lallemand y JC Roux.

Sea un acuífero con las siguientes características:

Espesor $b = 33,52$ m
 Porosidad $m_p = 0,35$
 Velocidad $V_a = 0,5$ m/día
 Coeficiente de dispersión longitudinal $DX = 9,75$ m²/día
 Coeficiente de dispersión transversal $DY = 1,95$ m²/día
 Dipersividad $X_D = 19,5$ m (DX / V)
 Factor de retardo $R_d = 1$
 Caudal de inyección $Q = 759,2$ m³/día

Se desea encontrar la distancia x a la cual una concentración $C_o = 50$ mg/l aparece al cabo de un tiempo de 5 años $t = 1.825$ días. El contaminante se inyecta con una concentración de 150 mg/l con un caudal de 800 m³/día. Los pasos a seguir son los siguientes (ver figura 64).

- a) Sobre la gráfica C se sitúa la concentración C_o que se espera que aparezca (50 mg/l), es el punto A.

b) $Q_D = m_p b \sqrt{DX DY} = 51,15$ m³/día

$\frac{Q C_o}{Q_D} = 2346$ mg/l que es el punto B.

- c) Se unen los puntos A y B prolongando la línea hasta el nomógrafo, punto C.

d) $t_B = \frac{R_d DX}{V_a^2} = 39$

El valor de la curva $\frac{t}{t_B} = 46,79$

Se interpola dicha curva obteniéndose el punto D donde la corte una línea paralela al eje $\frac{x}{x_D}$ que pase por C.

- e) Trazando una paralela al eje $\frac{t}{t_B}$ que pase por D se obtiene E.

$E = 45 \quad E = \frac{X}{X_D} \rightarrow X = 19,5 \times 45 = 877,5$ m

Se obtiene así la distancia a la cual aparecerá dentro de 5 años una concentración de 50 mg/l del contaminante. Esta distancia ha de ser medida en la línea central de la pluma de contaminación.

7.1.2.C. Método de Horsley

La obtención del perímetro de protección en base a este método se realiza en tres etapas, siendo la segunda de ellas una aplicación del modelo prismático de Strahler.

1ª Fase

Se pretende obtener la distancia aguas abajo en el sentido del flujo a la que se encuentra la divisoria de flujo de la misma mediante un método gráfico que utiliza los descensos del nivel piezométrico al alejarse de ella.

El modo de actuar aparece reflejado en la figura 65. En ella, la curva A representa la variación del nivel piezométrico, antes de comenzar el bombeo, al alejarse de la captación. La curva B indica el cono de bombeo que se produce alrededor de la misma por efecto de las extracciones.

Sumando ambas se obtiene la curva C que será la que indique hasta donde debe extenderse el perímetro aguas abajo. Para ello basta con ver en el eje X a qué distancia de la captación está el punto de inflexión de la curva C.

2ª Fase

Tiene como objetivo delimitar la extensión del perímetro aguas arriba.

Para ello se debe calcular qué proporción existe entre la potencia de acuífero que drena la captación y el espesor saturado total del mismo.

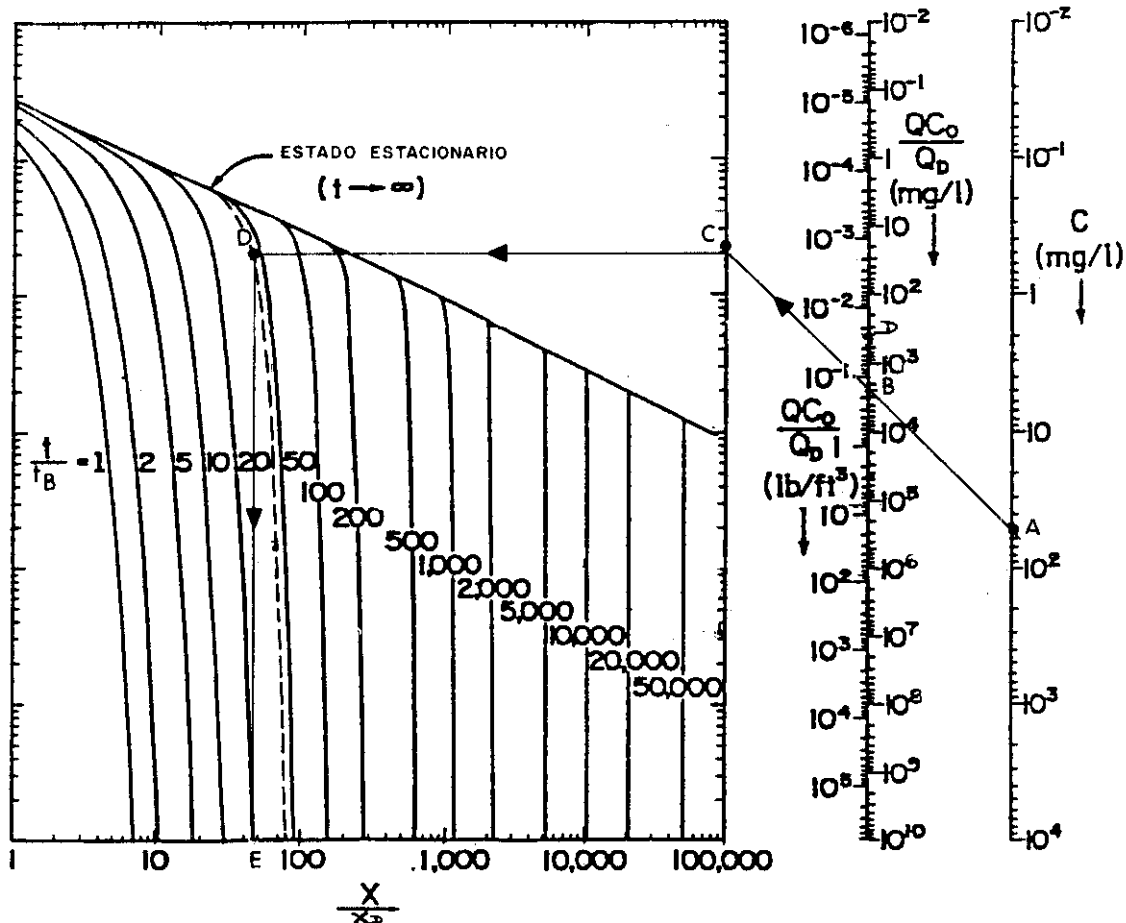
Aplicando la misma proporción a la distancia existente hasta la divisoria hidrogeológica aguas arriba de la captación, se obtiene la extensión del perímetro en esa dirección.

3ª Fase

En esta última fase de la determinación del perímetro de protección solo queda por conocer la zona que abarcará, puesto que ya se calculó previamente cual es su longitud aguas arriba y abajo de la captación.

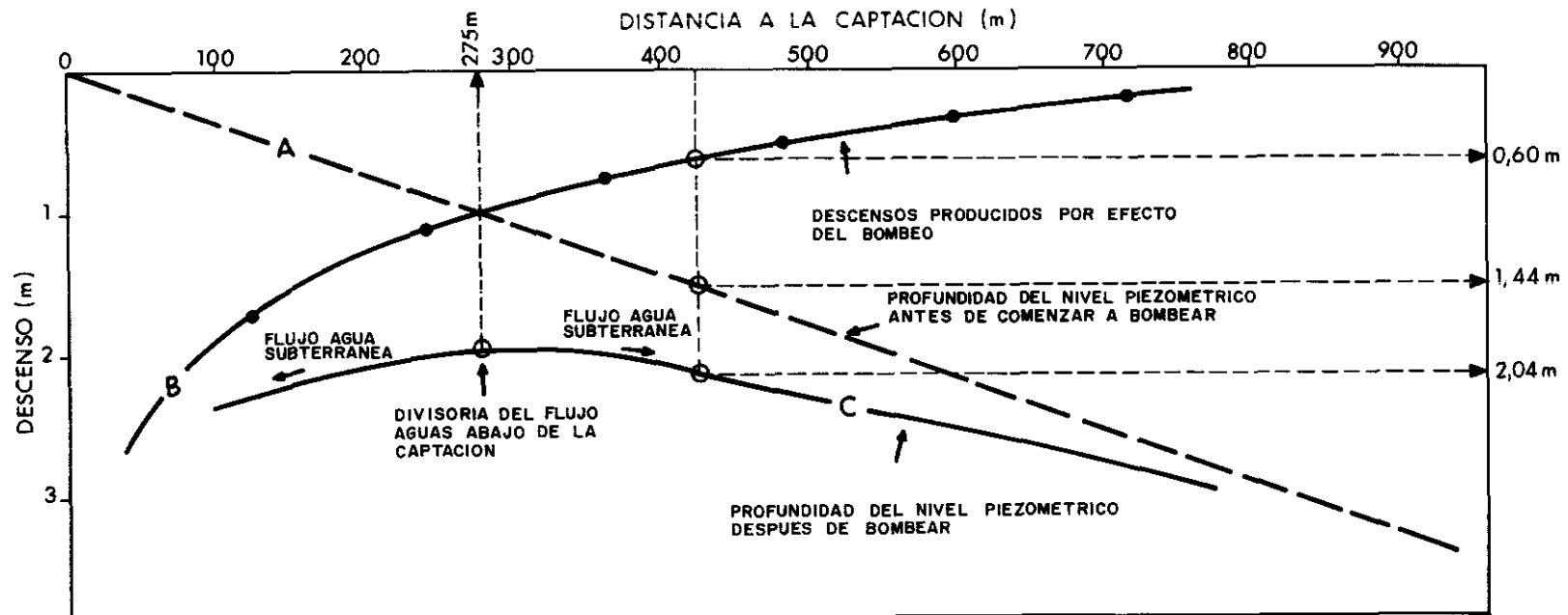
Esta se obtiene calculando el área que necesita para proporcionar el caudal extraído por el sondeo en función de la recarga existente. Para ello se emplea:

$$V = I A \rightarrow A = \frac{V}{I}$$



Fuente: A. Lallemand-Barrés y J.C. Roux, 1989

Fig. 64 NOMOGRAMA PARA LA DETERMINACION DE LA CONCENTRACION EN LA LINEA CENTRAL DE LA PLUMA DE CONTAMINACION.



Fuente: Horsley, 1983

Fig. 65 DETERMINACION DE LA DIVISORIA DE FLUJO DE LA CAPTACION AGUAS ABAJO DE LA MISMA EN EL SENTIDO DEL FLUJO. APLICACION AL CASO DE CAPE COD, MASSACHUSETTS.

Donde:

V = volumen extraído en un período de tiempo t

I = volumen infiltrado por unidad de superficie en el tiempo t

A = área de infiltración

Este método ha sido aplicado para la determinación del perímetro de protección de una captación en Cape Cod, Massachusetts (EE.UU). Se describe a continuación el modo de proceder:

En primer lugar, (ver figura 65), se representan la profundidad del nivel piezométrico al alejarse de la captación y los descensos producidos por efecto del bombeo en esos mismos lugares. La suma de ambos datos permite obtener la curva C en la que se observa la existencia de un punto de inflexión que corresponde a la divisoria de flujo aguas abajo de la captación. La distancia a la que ésta se encuentra se obtiene directamente en dicha figura; en este caso es de 275 m.

Asumiendo que la captación drena los 22 primeros metros del acuífero cuyo espesor saturado total es de 66 m, es decir 1:3, puede usarse esta misma relación respecto a la distancia a la divisoria hidrogeológica, que es de 9600 m como aparece representado en la figura 66.

Se obtiene así que el perímetro de protección debe extenderse 3200 metros aguas arriba de la captación en el sentido del flujo.

Al concluir esta segunda etapa se conoce cual es el eje principal del perímetro de protección y puede orientarse en función del sentido del flujo. Solo resta por calcular el área que ocupará:

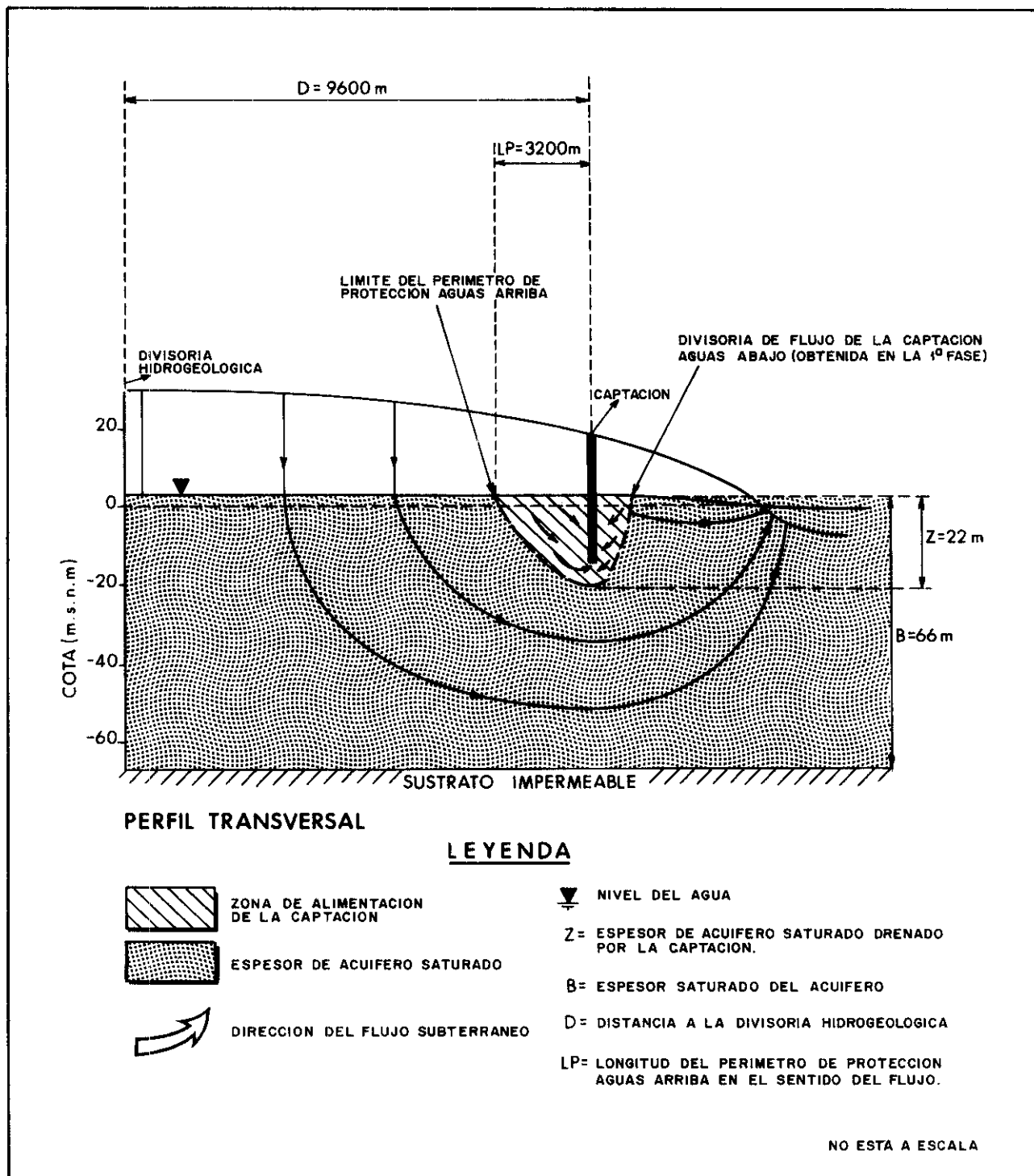
En este caso:

V = volumen extraído anualmente = $1.381.525 \text{ m}^3$

I = volumen infiltrado anualmente = $0,33 \text{ m}^3/\text{m}^2$

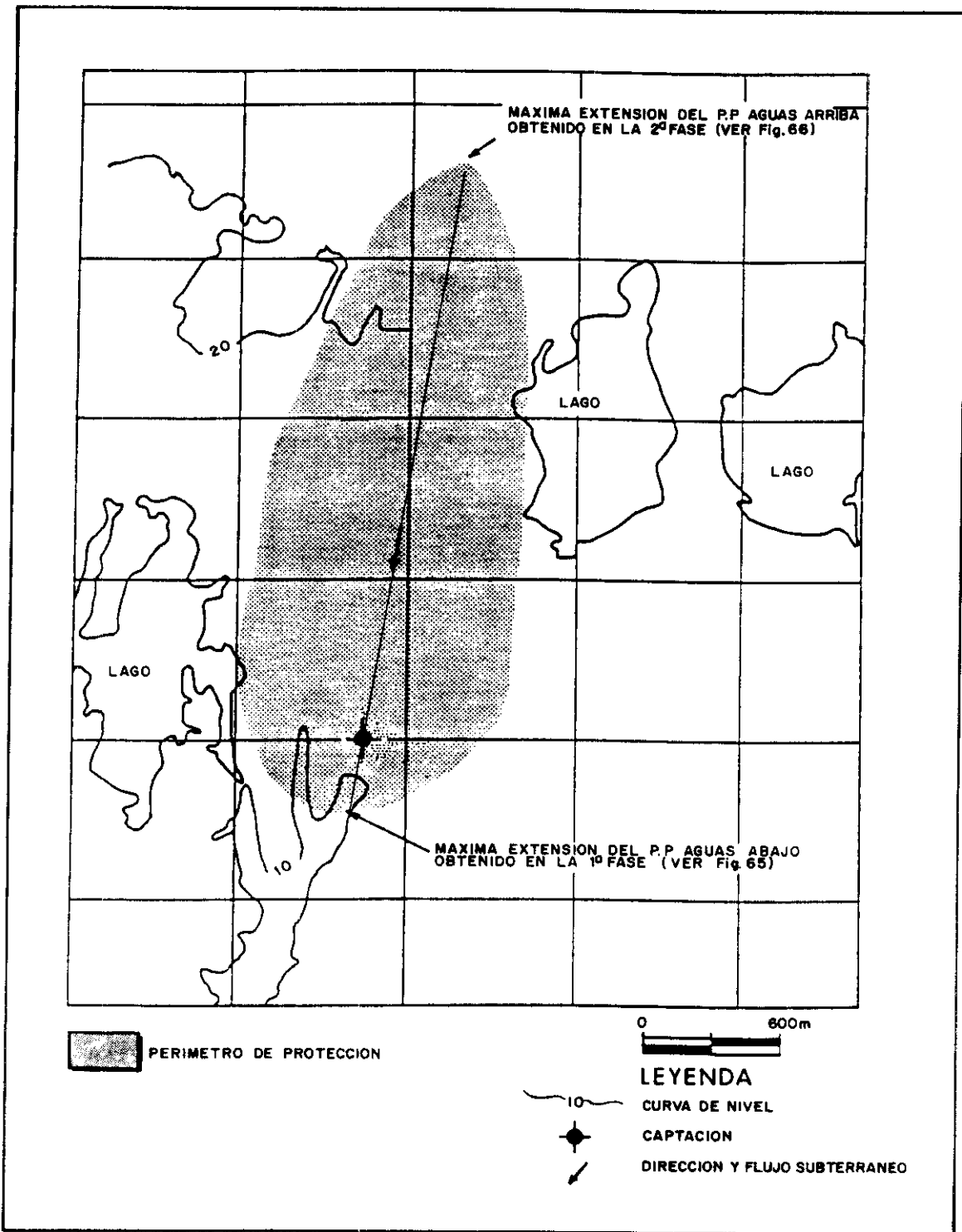
Y puesto que $V = I A \rightarrow A = \frac{V}{I} = 4.186.439 \text{ m}^2$

Este área fue marcada con la ayuda de un planimetro a ambos lados del eje que ya se conocía, como se ve en la figura 67.



Fuente: Modificado de Horsley, 1983

Fig. 66 DETERMINACION DE LA EXTENSION DEL PERIMETRO DE PROTECCION AGUAS ARRIBA EN EL SENTIDO DEL FLUJO EN CAPE COD, MASSACHUSETTS (EEUU).



Fuente: HORSLEY, 1983

Fig. 67 DETERMINACION DEL AREA OCUPADA POR EL PERIMETRO DE PROTECCION DE CAPE COD, MASSACHUSETTS (EE.UU)

7.1.2.D. Métodos hidrogeológicos

La aplicación de métodos hidrogeológicos en el área objeto de estudio puede permitir, mediante la realización de una cartografía hidrogeológica de detalle, el análisis de la piezometría, la determinación del balance hidrogeológico y diversas técnicas de apoyo, identificar variaciones litológicas, cambios de permeabilidad, divisorias de agua subterránea, influencia de ríos y otros factores que hagan posible localizar con precisión los diferentes límites de flujo, definiendo en base a éstos el perímetro de protección.

Estos métodos son especialmente útiles cuando se pretende proteger captaciones situadas en acuíferos kársticos o en rocas fisuradas, en los cuales no son aplicables la mayor parte de los procedimientos descritos previamente, al ser acuíferos heterogéneos y anisótropos. En ellos la velocidad de flujo es muy elevada, por lo que un contaminante puede recorrer grandes distancias en poco tiempo. En estos casos es recomendable complementar estos métodos con el uso de otras técnicas, como el empleo de trazadores, que serán analizadas en apartados posteriores.

También es posible utilizarlos en otros casos, especialmente cuando se deba evaluar la posible conexión del acuífero captado con otros próximos, si hay límites de flujo cerca de la captación lo que hace disminuir notablemente la precisión de los métodos descritos anteriormente, que no consideran dicha influencia o en acuíferos pequeños, en los que disminuye cuantitativamente la sobreprotección que su empleo conlleva.

El principal inconveniente que plantean es la necesidad de contar con técnicos muy especializados y que puede suponer unos costes muy elevados si no existe una cartografía hidrogeológica previa o es necesario recurrir al apoyo de técnicas geofísicas, efectuar campañas piezométricas, etc.

Este método fue aplicado para definir el perímetro de protección de la fuente del Cañar (Almedijar-Castellón) realizado en 1990 por el ITGE y la Conselleria de Industria, Comercio y Turismo de la Generalitat Valenciana.



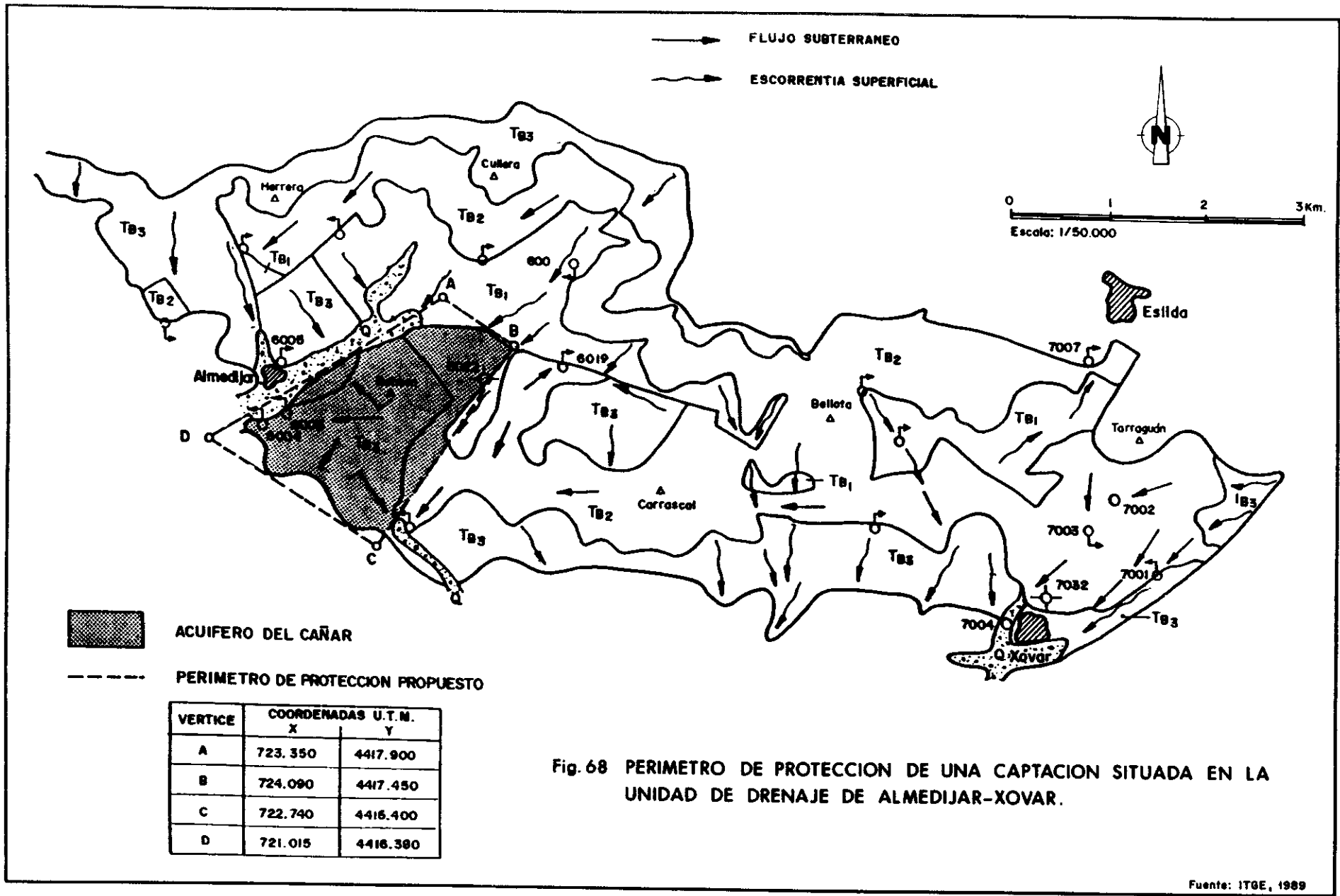
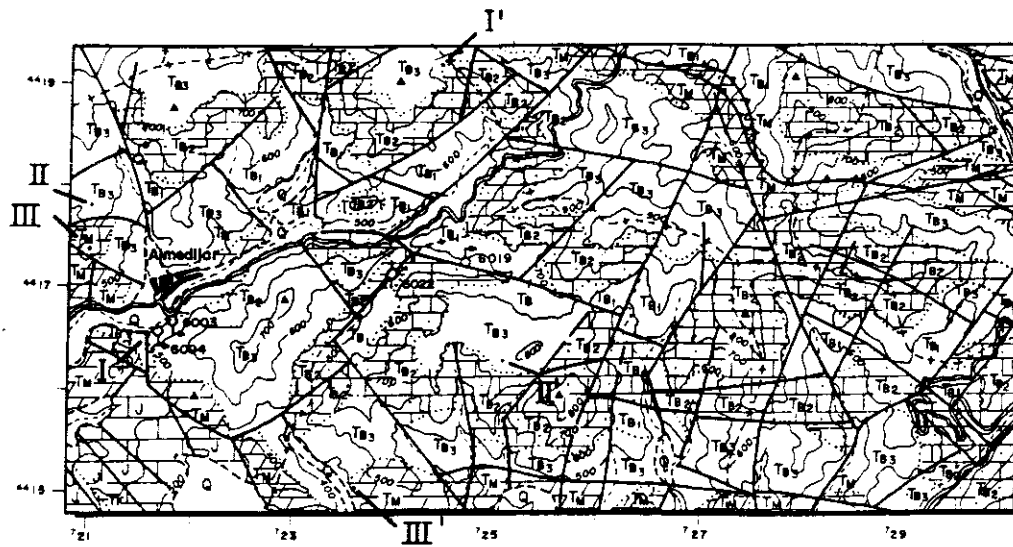


Fig.68 PERIMETRO DE PROTECCION DE UNA CAPTACION SITUADA EN LA UNIDAD DE DRENAJE DE ALMEDIJAR-XOVAR.

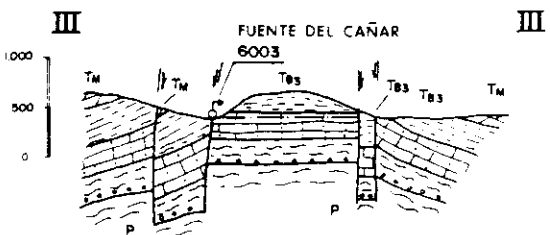
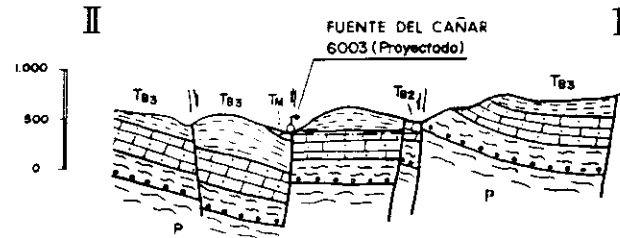
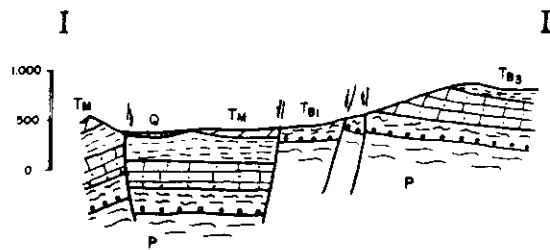
Fuente: ITGE, 1989



Fuente: Base geológica Tesis Doctoral de Policarpo Garay en ITGE 1990

LEYENDA

CUATERNARIO			Q	Conglomerados, gravas, arenas, limos y arcillas
JURASICO			J	LIAS
				Dolomías y calizas con concholas en la base
TRIASICO				
		Tk	KEUPER	Margas y arcillas abigarradas con yeso
		Tm	MUSCHELKALK	Dolomías, calizas atómicadas y margas
		Tbs	BUNTSANDSTEIN SUP.	Arcillitas y areniscos
		Tbz	" MEDIO	Areniscas cuarcíticas muy compactas
		Tbi	" INF.	Areniscas, limolitas y arcillitas



	CUATERNARIO
	MUSCHELKALK
	BUNTSANDSTEIN SUP
	" MEDIO
	" INF
	PALEOZOICO

	CONTACTO NORMAL
	CONTACTO DISCORDANTE
	FALLA
	CABALGAMIENTO
	SONDEO
	MANANTIAL
	NIVEL PIEZOMETRICO

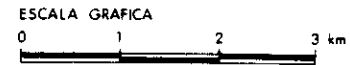


Fig. 69 CARTOGRAFIA HIDROGEOLOGICA DEL ENTORNO DEL ACUIFERO DEL CAÑAR

Las aguas de esta fuente se comercializan envasadas para consumo humano y constituyen parte de la descarga del acuífero del Cañar el cual está situado al SO y dentro de la unidad de Almedijar-Xovar (ver figura 68).

Los materiales permeables que dan lugar al acuífero del Cañar son las areniscas del Buntsandstein medio, (Tb_2), que son permeables por fracturación y fisuración. Sus impermeables de techo y muro son, respectivamente, las lutitas y arcillitas del Tb_3 y Tb_1 . Los límites del acuífero realizados en función del estudio hidrogeológico (ver figura 69) son:

- **Septentrional**, de carácter cerrado al flujo subterráneo por afloramiento del impermeable de base.
- **Occidental**, por contacto mecánico con el impermeable de techo, es un límite cerrado al flujo subterráneo y precisamente en él se origina la "Fuente del Cañar".
- **Meridional**. Aquí los materiales permeables del acuífero se hunden debajo de las formaciones carbonatadas del Muschelkalk. Es por consiguiente un límite abierto al flujo subterráneo, por el que se transfiere parte de la descarga subterránea del acuífero.
- **Oriental**. Presenta dos sectores de características diferenciadas: el septentrional que, por aflorar el impermeable de base, es cerrado al flujo subterráneo y el meridional que, por la disposición estructural de los materiales del acuífero, probablemente esté constituido por una divisoria de flujo, aunque no se puede descartar que por él se produzca alguna entrada de flujo subterráneo del resto de la unidad. No obstante con los datos existentes se consideró el límite oriental cerrado en su totalidad al flujo subterráneo.

La circulación del agua subterránea (figura 68) se realiza fundamentalmente hacia el S y SO condicionada por las áreas de descarga (manantiales 6003 y 6004 y el borde meridional de transferencia de flujo subterráneo).

En base a estas características y a la reducida extensión del acuífero se establece un perímetro de protección que abarca a todo el acuífero (ver figura 68).

7.1.2.E. Modelos matemáticos de flujo y transporte

Los perímetros de protección pueden calcularse usando modelos matemáticos que simulan el flujo del agua subterránea y/o el transporte de solutos y resuelven numéricamente las ecuaciones que lo definen.

El cuadro 16 recoge los pasos que se deben seguir al emplearlos.

El modo de actuar consiste esencialmente en definir unas hipótesis hidrodinámicas que caractericen al acuífero que va a ser modelado, eligiendo en función de éstas y de los objetivos a obtener, el modelo que va a utilizarse.

En las tablas 7 y 8 aparecen reflejados diversos modelos de flujo y de calidad, señalando sus principales características, así como los autores y una dirección de contacto para poder disponer de información complementaria.

Una vez realizada esta elección se debe escoger, en función del número de datos existentes, qué período va a ser utilizado como referencia, e introducir en cada una de las celdas en las que ha sido discretizado el acuífero los parámetros hidrogeológicos requeridos por el modelo.

La siguiente fase consiste en calibrarlo, es decir, comprobar si los datos que proporciona coinciden con los existentes en el período de referencia elegido, recurriendo cuando no sea así a datos complementarios y/o revisar los empleados.

Al concluir esta etapa se dispondrá de un modelo matemático que reproduce fielmente la realidad, por lo que puede ser empleado para simular diferentes hipótesis.

En este caso y en función del criterio elegido para la determinación del perímetro de protección interesará definir el área en la que se produce un cierto descenso, calcular las isocronas para distintos tiempos de tránsito, etc...

Cuando se utiliza un modelo de calidad el procedimiento a seguir suele consistir en realizar primero un modelo de flujo, usando los datos que éste proporciona como entradas para poder resolver así la ecuación de la dispersión.

Respecto a la elección del modelo es necesario efectuar previamente una detallada valoración de la calidad y tipo de los datos de entrada disponibles, puesto que carece de sentido el utilizar modelos muy complicados que requieran un elevado número de parámetros cuando solo se dispone de datos fiables para un número reducido de celdas.