

*E. Modelos matemáticos de flujo y transporte*

*F. Otros métodos y técnicas complementarias*

*F.1. Método de Rehse para el cálculo del poder depurador del suelo*

*F.2. Modificación de Bolsenkötter para medios kársticos y/o fisurados*

*F.3. Empleo de trazadores*

*F.4. Datación con tritio*

### **7.1.3. Selección del método**

*A. Consideraciones técnicas*

*B. Consideraciones económicas*

*B.1. Coste de la determinación del perímetro según los diferentes métodos*

*B.2. Impacto socioeconómico de la aplicación del perímetro de protección*

*1. Coste técnico objetivo*

*2. Coste variable*

## **7.2. Protección de la cantidad**

## **7.3. Mecanismos de control de los perímetros de protección**

### **7.3.1. Sistema de vigilancia**

### **7.3.2. Plan de intervención**

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.

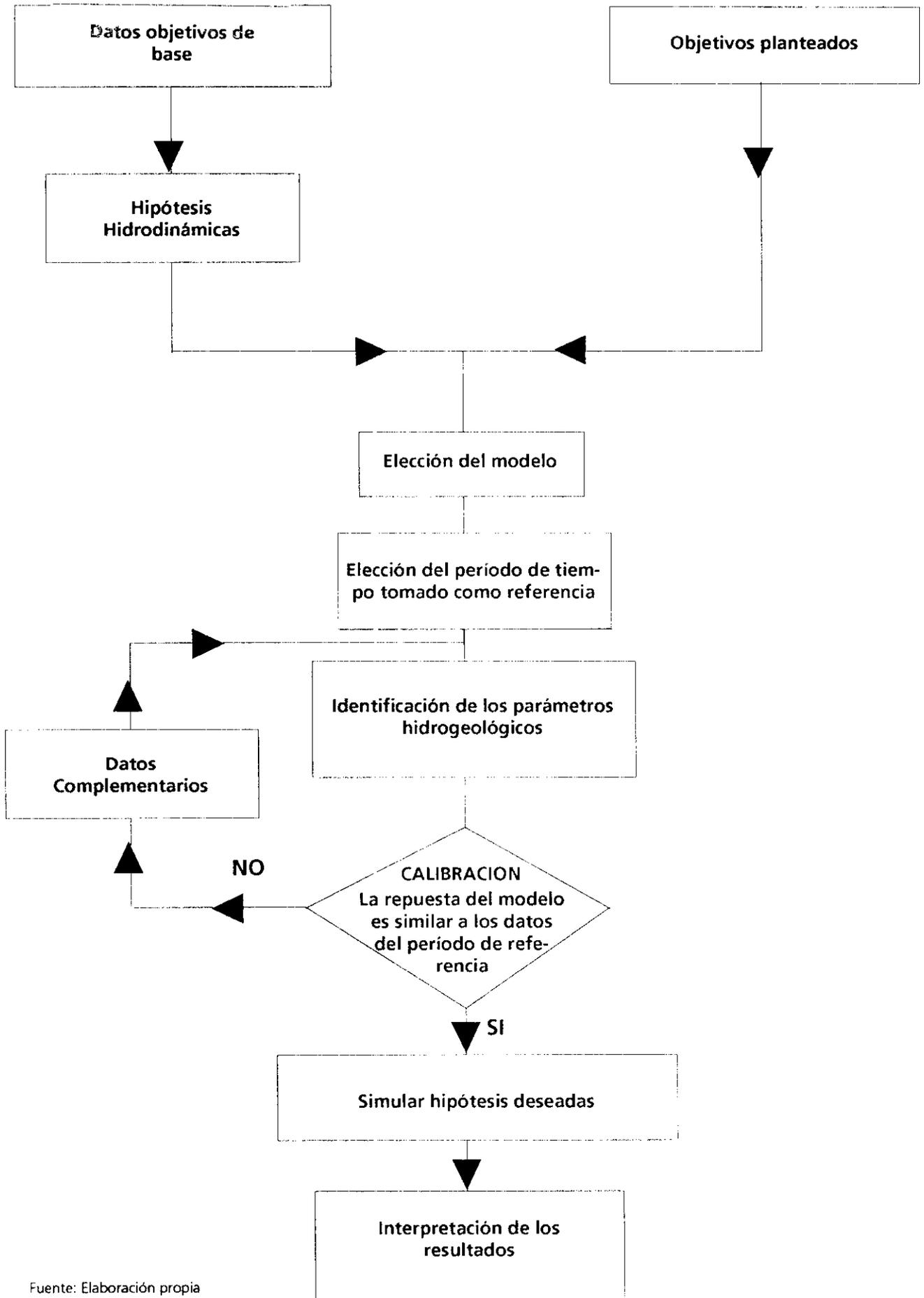
Al concluir esta etapa se dispondrá de un modelo matemático que reproduce fielmente la realidad, por lo que puede ser empleado para simular diferentes hipótesis.

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.

Cuadro 16: Principales etapas en la utilización de un modelo matemático



Fuente: Elaboración propia

El empleo de modelos matemáticos es especialmente útil para la determinación de perímetros de protección cuando existen límites de flujo y condiciones hidrogeológicas complejas, así como para predecir los posibles cambios de tamaño que será necesario realizar en ellos debido a variaciones respecto a las condiciones en los que fue calculado, tales como incrementos de los bombeos, etc. Proporcionan resultados con un elevado grado de exactitud.

El mayor inconveniente que plantea su empleo es que su uso requiere técnicos con una alta especialización, siendo los costes de su aplicación muy elevados. Por esta razón tienden a usarse principalmente cuando se requiere una gran exactitud ante la complejidad del problema o los posibles desembolsos elevados que implicaría la aplicación del perímetro que se proponga, por lo que se hace indispensable proteger solamente el terreno estrictamente necesario, reduciendo así la necesidad de realizar explotaciones.

En el informe " Aplicación de los modelos de simulación de flujo y transporte de solutos como apoyo a las técnicas de delimitación de perímetros de protección" realizado por el ITGE (en prensa) se exponen con detalle diversos programas analíticos y numéricos especialmente indicados para delimitar perímetros de protección. En algunos países se combina el uso de métodos analíticos en las proximidades de la captación y modelos numéricos para definir la extensión total del perímetro. Esto se debe a que los primeros pueden ser más precisos en las inmediaciones de la captación si la baja densidad espacial de los datos no permite establecer un mallado lo suficientemente pequeño.

Un ejemplo de aplicación del empleo de modelos matemáticos para la determinación de perímetro de protección lo proporcionan Moreau y P.Morfaux:

Se trata de dos campos de sondeos de abastecimiento, que constituyen un caso complejo, pues al hecho de existir varios pozos muy cercanos para la captación de agua se une una intensa relación río-acuífero (ver figura 70).

La formación acuífera está constituida por un paquete de 2 a 5 metros de gravas sobre las que se asientan 2-3 m de limos arcillosos. Las gravas son un excelente acuífero normalmente en carga, pasando a ser un acuífero libre después de bombeos intensos.

En estado natural, el acuífero es drenado por el río Sena, salvo en la proximidad de los principales embalses.

El río juega un papel de barrera hidráulica y de límite de alimentación en bombeo, pero con un desfase

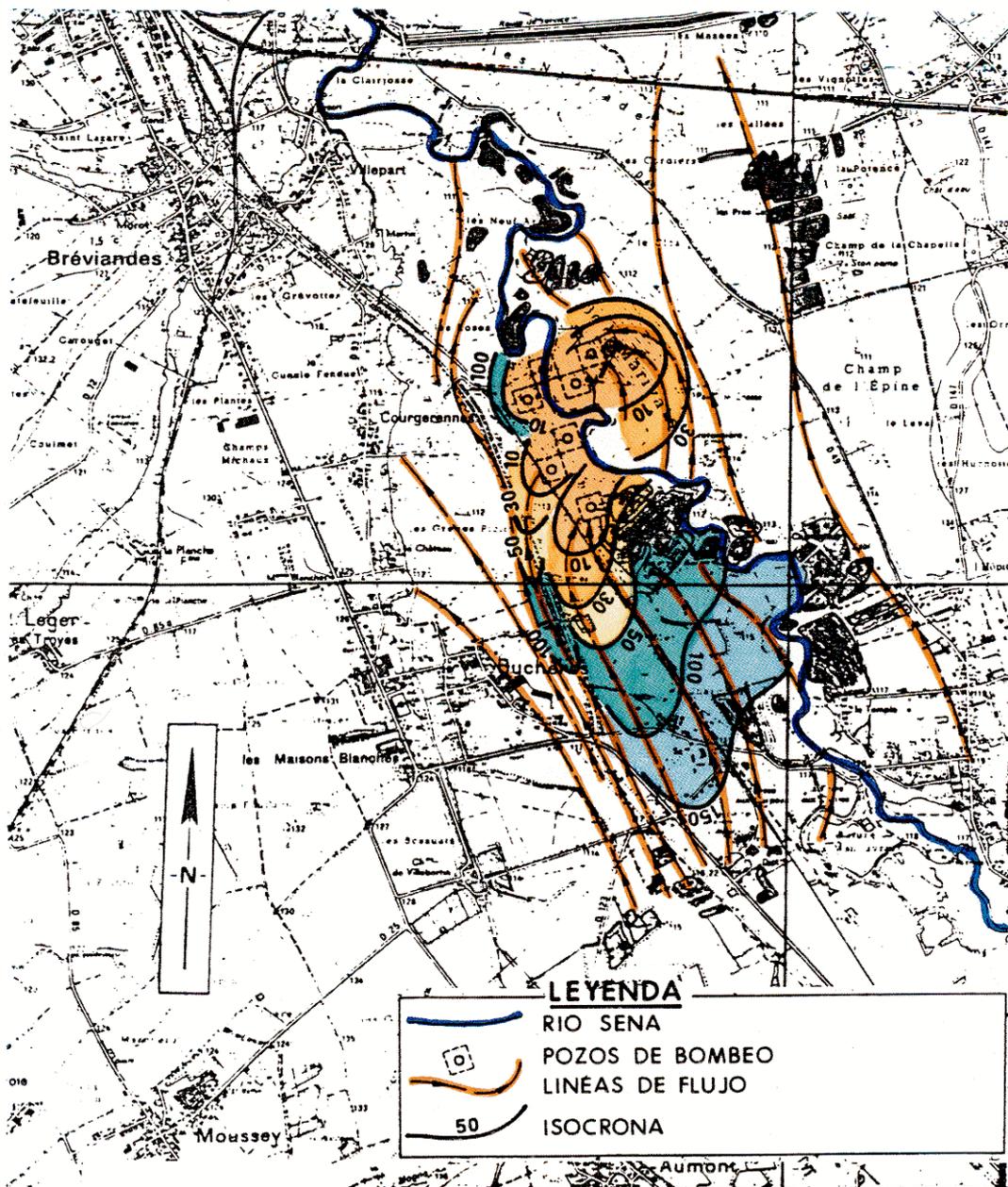
ligado a la colmatación de la rivera. Es también la principal vía de entrada de contaminantes al alimentar al acuífero con posibles sustancias extrañas provenientes de vertidos aguas arriba.

Se hizo un estudio previo de las características hidrogeológicas del acuífero, determinándose los valores (en ambas márgenes) de transmisividad, permeabilidad, coeficiente de almacenamiento, etc, y se establecieron dos modelos, uno de simulación hidrodinámica, que permitía evaluar la evolución piezométrica en cualquier punto del acuífero, así como las aportaciones laterales. También se preparó un modelo de flujo de solutos con el fin de simular la dinámica y los posibles focos de contaminación (Sena, una gravera aguas arriba, una destilería, etc)

El esquema de explotación elegido corresponde a la puesta en funcionamiento de todas las obras de abastecimiento en la zona en estudio.

De esta manera se obtuvieron cuadros en los que puede verse el tiempo que tardaría un contaminante en llegar a un pozo determinado en función del origen de la polución. Además se realizó un plano de las curvas isocronas de 10 y 30 días de propagación del frente de contaminación.

El estudio dio lugar al establecimiento del perímetro de protección próximo en función de las curvas isocronas obtenidas por el modelo.



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

Fig. 70 APLICACION DE UN MODELO DE FLUJO Y CALIDAD PARA LA DETERMINACION DE UN PERIMETRO DE PROTECCION EN TROYES Y LA MOGNE. (FRANCIA).

**TABLA 7: MODELOS DE FLUJO**

<b>AUTORES</b>	<b>DIRECCION DE CONTACTO</b>	<b>NOMBRE DE PROGRAMA Y FECHA ULTIMA VERSION</b>	<b>DESCRIPCION DEL PROGRAMA</b>	<b>SALIDAS DEL MODELO</b>
J.V. Tracy	U.S. Geological Survey Water Resource Dept. National Center Reston, VA 22092	GALERKIN FINITE ELEMENT FLOW MODEL (1979)	Modelo bidimensional de elementos finitos para simular el flujo del agua subterránea en un acuífero libre o confinado heterogéneo y anisótropo conectado con un río. El modelo incluye el cálculo del balance del agua superficial.	AI,CB, AA,F
L.R Townley J.L. Wilson A.S. Costa	Ralph M. Parsons Laboratory for water Resources and Hydrodynamics Room 48-211 Massachusetts Inst. of Technology Cambridge. MA 02139	AQUIFEM-1 (1979)	Modelo bidimensional de elementos finitos para simular el flujo del agua subterránea.	AI,CB, AA,F
S.P Neuman	Dept. of Hidrology and Water Resources University of Arizona Tucson AZ 8572	UNSAT2 (1979)	Modelo bidimensional de elementos finitos para simular el flujo del agua en planta o perfil de un acuífero poroso heterogéneo y anisótropo.	AI,CB, AA,F
C.R. Faust T.Chan B.S. Ramada BM.Thompson	Performance Assessment Dept. Office of Nuclear Waste Isolation Battelle Project Mngmt. Div. 505 King Avenue Columbus OH 43201	STFLO (1982)	Modelo bidimensional de elementos finitos para simular el flujo del agua en planta o perfil, en el estado estacionario en acuíferos libres o confinados, heterogéneos y anisótropos.	AI,CB, AA,F
G.T. Yeh C.W.Francis	Oak Ridge National Lab Environmental Sciences División Oak Ridge, TN 378330	AQUIFLOW (1984)	Modelo bidimensional de elementos finitos para simular el flujo del agua subterránea en acuíferos libres o confinados, heterogéneos y anisótropos.	AI,CB, AA,F
G.T. Yeh D.D. Huff	Environmental Sciences División Oak Ridge, National Lab Oak Ridge, TN 37830	FEWA (1983)	Modelo bidimensional de elementos finitos para simular el flujo del agua subterránea en perfil, en acuíferos libres o confinados.	AI,CB, AA,F

**TABLA 7: MODELOS DE FLUJO (Continuación)**

<b>AUTORES</b>	<b>DIRECCION DE CONTACTO</b>	<b>NOMBRE DE PROGRAMA Y FECHA ULTIMA VERSION</b>	<b>DESCRIPCION DEL PROGRAMA</b>	<b>SAIDAS DEL MODELO</b>
K.R. Rushton L.M. Tomlinson	Dept. of civil Engineering Univ of Birmingham P.O. Box 363 Birmingham, B 15 2TT United Kingdom	AQU-1 (1979)	Modelo bidimensional para simular el flujo del agua subterránea en un subterránea en un acuífero monocapa.	AI, CB, F
J. Boonstra	I.L.R.I P.O. Box 45 Wageningen The Netherlands	S.G.M.P. (1981)	Modelo bidimensional para simular el flujo del agua subterránea en el estado estacionario transitorio en un acuífero confinado o semiconfinado heterogéneo y anisótropo.	AI, CB, AA, F
O. Berney	Land and Water Development División Food and Agriculture Organization Un via Delle Terme Di Caracalla 00100 - Rome, Italy	DISIFLAQ (1980)	Modelo bidimensional para simular el flujo del agua subterránea en el estado estacionario o transitorio en un acuífero bicapa, isotropo y heterogéneo	AI, CB, AA, F
P.C. Trescott G.F. Pinder S.P. Larson	U.S. Geological Survey Branch of Ground Water M. S 411 National Center Reston, VA 22092	USGS-2D-FLOW (1976)	Modelo bidimensional para simular el flujo del agua subterránea, horizontal o vertical en un acuífero confinado o libre heterogéneo y anisótropo.	AI, CB, AA, F
S.P. Neuman P.A. Witherspoon	Dept. of Hydrology and Water Resources University of Arizona Tucson AZ 85721	FRESUR- 1 (1979)	Modelo bidimensional para simular el flujo del agua subterránea, horizontal o vertical en el estado estacionario en un acuífero confinado o libre heterogéneo y anisótropo.	AI, CB, AA, F
G.T. Yeh D.S. Ward	Enviromental Sciences División Oak Ridge National Lab Oak Ridge, TN 37830	FEMWATER/FECWATER (1981)	Modelo bidimensional para simular el flujo del agua subterránea, en perfil en un acuífero poroso heterogéneo y anisótropo.	AI, CB AA, F, V
P.K.M van der Hejide	IGWMC Holcomb Research Institute Butler University 4600 Sunset Avenue Indianapolis, IN 46208	THWELLS (1987)	Modelo de flujo para calcular los descensos del nivel piezométrico producidos por el bombeo en varias captaciones en un acuífero confinado, isotropo y heterogéneo.	AI, C, B

**TABLA 7: MODELOS DE FLUJO (Continuación)**

AUTORES	DIRECCION DE CONTACTO	NOMBRE DE PROGRAMA Y FECHA ULTIMA VERSION	DESCRIPCION DEL PROGRAMA	SALIDAS DEL MODELO
C. R. Kolterman	Water Resources Center Desert Research Institute university of Nevada System Reno, NV	GWUSER/conjun (1983)	Modelo de flujo para combinar la simulación y optimación para determinar la localización óptima de las captaciones y su volumen de extracción para acuíferos confinados con o sin recarga artificial o para el uso conjunto de recursos superficiales y subterráneas.	AI, C, B, F,
K.R. Rushton	Dept. of civil Engineering Univ. of Birmingham P.O Box 363 Birmingham, b 15 2tt United Kingdom.	RADIAL (1979)	Modelo de flujo para determinar este alrededor de una captación.	AI, CB, F,
J.E. Reed MS Bedinger J.E. Terry	U.S. Geological Survey Room 2301 Federal Building 700 w. Capitol Ave. Little Rock, AR 72201	SUPERMOCK (1975)	Modelo de flujo para simular la respuesta de un acuífero saturado o no saturado incluyendo un acuífero libre suprayacente a otro confinado ante un cambio transitorio en la presión a que está sometido.	AI, CB, AA
G.F. Pinder C.I. Voss	U.S. Geological Survey Water Resources División National Center M.S. 431 Reston VA 22092	AQUIFEM (1979)	Modelo de flujo para simular este en el estado transitorio en acuíferos confinados, semiconfinados o libres, isótropos y heterogéneos.	AI, CB, AA, F
D.G. Jorgensen H. Grubb CH Baker Jr GE Hilmes ED Jenkins	U.S. Geological Survey Water Research dept. 1950 Avenue A-Campus West University of Kansas Lawrence, KS 66044-3897	GWMD3 (1982)	Modelo de diferencias finitas para calcular los descensos, debidos a la ejecución de un nuevo sondeo, en todas las captaciones existentes en la sección del mismo y en otras 8 secciones adyacentes, comparando estos descensos con el máximo admisible que se imponga.	AI, CB, AA, F
H.M. Haitjema O.D. L. Strack	School of Public & Environmental Affairs 10 th Street Indiana University Bloomington IN 4705	SYLENS (1985)	Modelo de flujo para el estado estacionario calculando este en sistemas con dos acuíferos localmente interconectados.	AI, CB, AA, F

**TABLA 7: MODELOS DE FLUJO (Continuación)**

AUTORES	DIRECCION DE CONTACTO	NOMBRE DE PROGRAMA Y FECHA ULTIMA VERSION	DESCRIPCION DEL PROGRAMA	SALIDAS DEL MODELO
G. F.Pinder E.O. Frind.	Dept. of Civil Enginnering Priceton University Priceton, NJ 08540	ISOQUAD (1982)	Modelo tridimensional de elementos finitos para simular el flujo del agua subterranea en acuíferos libres y confinados.	AI, CB, AA, F
D. Kocn	Koch & Associates 1660 s. Filmore St. Denver, CO 80210	AQUIFERA (1984)	Modelo tridimensional de diferencias finitas para simular el flujo del agua subterranea en un acuífero semiconfinado.	AI, CB, F
T. N. Narasimhan	Batelle Pacific NW Lab Water and Lan Resources División P.O. Box 999 Richland, WA 99352	TRUST (1981)	Modelo de flujo para simular variaciones en la piezometría en acuíferos multicapa heterogéneos, medios porosos deformables con geometría compleja.	AI, CB, AA, F
T.A. Prickett C. G. Lonquist	Consulting Water Resource Engineers 6 G. H. Baker Drive Urbana, IL 61801	PLASH (1986)	Modelo bidimensional o cuasi-tridimensional para simular el flujo del agua subterranea para acuíferos confinados mono o multicapa, acuíferos semiconfinados o libres, con posibilidad de considerar evapotranspiración y recargasde rios	AI, CB, AA, F
D.R. Posson G.A. Hearne J.V. Tracy P.F. Frenzel.	U.S. Geological Survey P.O. Box 26659 Albuquerque, NM 87125	N.M.F.D. 3D (1980)	Modelo tridimensional para simular el flujo del agua subterranea en acuíferos multicapa heterogéneos y anisótropos.	AI, CB, AA, F
P.C. Trescott S.P. Larson	U.S. Geological Survey Branch of Groundwater M.S. 411 National Center Reston, VA 22092	USGS-3D-FLOW (1982)	Modelo tridimensional para simular el flujo del agua subterranea en acuíferos heterogéneos y anisótropos.	AI, CB, AA, F
S.K. Gupta C.R. Cole F.W. Bond	Battelle Pacific NW Labs Water and Land Resouces División P.O. Box 999 Richaland, Wa 99352	FE3DGW (1985)	Modelo tridimensional para simular el flujo en el estado estacionario o transitorio en una gran cuenca con acuífero multicapa.	AI, CB, AA, F, V
J.A. Liggett	School of Civil and Environmental Eng. Hollister Hall Cornell University Ithaca, NY 14853	GMS (1982)	Modelo tridimensional para simular el flujo en el estado estacionario en una cuenca compleja, con diversos acuíferos heterogéneos y anisótropos.	AI, CB, AA, F, V,

**TABLA 7: MODELOS DE FLUJO (Continuación)**

<b>AUTORES</b>	<b>DIRECCION DE CONTACTO</b>	<b>NOMBRE DE PROGRAMA Y FECHA ULTIMA VERSION</b>	<b>DESCRIPCION DEL PROGRAMA</b>	<b>SAIDAS DEL MODELO</b>
M.G. Mc Donald A.W. Harbaugh	Ground Water Branch, WRD U.S. Geological Survey WGS-Mail Stop 433 Reston, VA 22092	MODFLOW (1983)	Modelo tridimensional de diferencias finitas para simular el flujo del agua subterránea en acuíferos heterogéneos y anisótropos.	AI, CB, AA, F

**TABLA 8: MODELOS DE CALIDAD**

<b>AUTORES</b>	<b>DIRECCION DE CONTACTO</b>	<b>NOMBRE DE PROGRAMA Y FECHA ULTIMA VERSION</b>	<b>DESCRIPCION DEL PROGRAMA</b>	<b>SAIDAS DEL MODELO</b>
G.T. Yeh D.D. Huff	Environmental Sciences División Oak Ridge National Lab Oas Ridge TN 37830	FEMA (1984)	Modelo bidimensional de elementos finitos para simular el transporte de solutos considerando disminución de radiactividad, absorción y degradación química y biológica. El modelo resuelve sólo la ecuación del transporte de solutos, debiendo generarse las velocidades con un modelo de flujo.	F, C
C.I. Voss	U.S. Geological Survey 431 National Center Reston, VA 22092	SUTRA (1984)	Modelo bidimensional de elementos finitos para el estado transitorio, zona saturada- no saturada, flujo dependiente de la densidad, así como transporte de energía o de sustancias químicas sencillas.	AI, CB, AA, F, C, V,
P. Huyakorn	IGWMC Holdcomb Research Institute Butler University 4600 Sunset Avenue Indianapolis, IN 46208	TRAFRAP (1986)	Modelo bidimensional de elementos finitos para simular el flujo del agua subterránea y el transporte de sustancias químicas o radionucleidos en medios porosos fracturados o no, heterogéneos y anisótropos.	AI, CB, AA, F, C, V, P
I. Javandel C. Doughty C.F. Tsang	Lawrence Berkeley Lab Earth Sciences División University of California Berkeley CA 94720	RESSQ (1983)	Modelo bidimensional semi analítico para simular el transporte de contaminantes considerando advección y absorción en un acuífero confinado de espesor uniforme, homogéneo e isótropo en el estado estacionario.	C, V, P, T

**TABLA 8: MODELOS DE CALIDAD (Continuación)**

AUTORES	DIRECCION DE CONTACTO	NOMBRE DE PROGRAMA Y FECHA ULTIMA VERSION	DESCRIPCION DEL PROGRAMA	SALIDAS DEL MODELO
R.W Nelson	Battelle Pacific NW Labs Sigma 5 Building P.O Box 999 Richland WA 99352	PATHS (1983)	Modelo bidimensional para evaluar problemas de contaminación en el estado transitorio usando una solución analítica para la ecuación del flujo y una solución numérica para las ecuaciones que definen la trayectoria de las partículas contaminantes.	F,V,C, P, T
T.R Knowles	Texas Water Development Board P.O. Box 13231 Austin TX 78711	GWSIM-11(1981)	Modelo bidimensional para el estado transitorio para simular los niveles del agua y su calidad en un acuífero confinado o libre, heterogéneo y anisótropo.	AI,CB, F,C,AA
P.Van der Veer	Rijkswaterstaat Data Processing División P.O Box 5809 2280 HV Rijswijk (Z.H) The Netherlands	MOTGRO (1981)	Modelo bidimensional de flujo y calidad para el estado transitorio en acuíferos confinados o libres heterogéneos, y anisótropos de formas arbitrarias.	AI,CB, F,V,P,T
J.W Wesswling	Delft hydraulics Laboratory P.O Box 152 8300 Ad Emmeloord The Netherlands	GROWKWA (1982)	Modelo bidimensional para el estado transitorio que simula el flujo y el transporte no conservativo de solutos en un sistema acuífero multicapa heterogéneo y anisótropo.	AI,CB,AA,F,C,V
S.Haji-Djafari T.C Wells	D'Appollonia Waste Mgmt. Services, Inc. 10 Duff Road Pittsburgh, PA 15235	GEOFLOW (1982)	Modelo bidimensional para el estado estacionario o transitorio que simula el flujo y el transporte de masa en un acuífero confinado, semiconfinado, o libre, heterogéneo y anisótropo.	AI,CB,AA,F,C,V
W.E Sandford L.F Konikow	U.S Geological Survey 431 National Center Reston, VA 22092	MOC DENSE (1986)	Modelo bidimensional para simular el transporte y dispersión de una o dos sustancias en el agua dependiendo el flujo de la densidad. Emplea diferencias finitas y el método de las características para resolver las ecuaciones de flujo y transporte de solutos.	AI,CB,AA,F,C, V
T.A Prickett T.G Naymik C.G.onnquist	Consulting Water Resources Engineers 6 G.H Baker Drive Urbana, IL 61801	RANDOM WALK (1981)	Modelo mono o bidimensional para simular el flujo en el estado estacionario o transitorio y problemas de transporte de solutos en acuíferos libres y/o confinados heterogéneos.	AI,CB,AA,F,C,V

**TABLA 8: MODELOS DE CALIDAD (Continuación)**

AUTORES	DIRECCION DE CONTACTO	NOMBRE DE PROGRAMA Y FECHA ULTIMA VERSION	DESCRIPCION DEL PROGRAMA	SAUDAS DEL MODELO
P.S Huyakorn	Geotrans, Inc. 431 Elden St. 301 Herndon, VA 22070	SATURN 2 (1982)	Modelo bidimensional para simular el flujo del agua subterránea en el estado transitorio y transporte de solutos en acuíferos en medios porosos heterogéneos y anisótropos.	AI,CB,AA,F,C,V
L.F Konikow J.D Bredehoeft	U.S Geological Survey 431 National Center Reston, VA 22092	MOC (1987)	Modelo bidimensional para simular el flujo del agua subterránea y el transporte de solutos en acuíferos confinados, semiconfinados o libres.	AI,CB,AA,F,C, V
B.Sagar	Analytic and Computational Research, Inc. 3106 Inglewood Blvd. Los Angeles, CA 90066	AQUIFER (1982)	Modelo bidimensional para simular el flujo del agua subterránea en el estado estacionario o transitorio en planta o sección y la trayectoria de los contaminantes en un sistema multiacuífero heterogéneo y anisótropo.	AI,CB,AA,F,V,P
P. Huyakorn	Geotrans, Inc. 209 Elden St. 301 Herndon, VA 22070	SEFTRAN (1983)	Modelo bidimensional para simular flujo y problemas de transporte de contaminantes o calor en planta o sección de acuíferos heterogéneos.	AI,CB,AA,F,C,V V,P
B. Sagar	Analytic & Computational Research, Inc 3106 Inglewood Blvd. Los Angeles, CA 90066	FRACFLOW (1981)	Modelo bidimensional para simular en el estado estacionario y transitorio el flujo dependiente de la densidad, el transporte de solutos o calor incluyendo su variación en función del tiempo y lo mismo, en una dimensión, en acuíferos por fracturación.	AI,CB,AA F,C,V,P
B. Sagar	Analytic & Computational Research, Inc 3106 Inglewood Blvd. Los Angeles, CA 90066	FLOTRA (1982)	Modelo bidimensional para simular en el estado estacionario o transitorio en planta o sección el flujo dependiente de la densidad, transporte de solutos o calor en un acuífero en medios porosos deformable, heterogéneo y anisótropo.	AI,CB,AA F,C,V,P
Miller, I. J.Marlon- Lambert	Golder Associates 2950 Northrup way Bellevue, WA 98004	GGWP(1983)	Modelo bidimensional o cuasitridimensional para simular en el estado estacionario o transitorio el flujo y transporte de solutos en un sistema acuífero multicapa heterogéneo y anisótropo.	AI,CB,AA,F,C V,P,T
M.S Beljin	IGWMC Holcomb Research Institute Butler University 4600 Sunset Avenue Indianapolis, IN 46208.	SOLUTE (1985)	Paquete de 8 modelos analíticos para simular el transporte de solutos en el agua subterránea.	C,T.

**TABLA 8: MODELOS DE CALIDAD (Continuación)**

AUTORES	DIRECCION DE CONTACTO	NOMBRE DE PROGRAMA Y FECHA ULTIMA VERSION	DESCRIPCION DEL PROGRAMA	SALIDAS DEL MODELO
T.Steenhuis S. Pacenka	Northeast Regional Agricultural Engineering Service Riley-Robb Hall Cornell University Ithaca, NY 14853	MOUSE (1987)	Paquete de 4 modelos lincaados para definir el movimiento de sustancias contaminantes en la zona saturada y no saturada.	C,T
M.Th.van Genuchten W.J Alves	U.S Salinity Lab 4500 Glenwood Drive Riverside, CA 92501	ONE-D (1982)	Modelo monodimensional para simular analíticamente el transporte de solutos convectivo-dispersivo con absorción lineal en el estado estacionario en un acuífero semiinfinito homogéneo e isótropo.	C,T
INTERA Environmental Consultants	Battelle Project Management Division Performance Assessment Dept . Office of Nuclear Waste Isolation 505King Avenue Columbus, OH 43201	VERTPAK-1 (1982)	Paquete de soluciones analíticas para ayudar en la verificación de los códigos numéricos usados para simular el flujo del agua subterránea, la deformación de las rocas y el transporte de solutos en medios porosos fracturados o no.	C,V,T
C. Van Den Akker	National Institute for Water Supply P.O Box 150 2260 Ad Leidschendam The Netherlands	FLOP-2(1975)	Modelo para generar los caminos preferentes del flujo en un estado estacionario, acuífero semiconfinado, isótropo y homogéneo sin almacenamiento y para calcular tiempos de tránsito para diversas partículas.	C,V,P,T
C.S Desai	Dept. of Civil Eng. and Eng.Mach. University of Arizona Tuscon, AZ 85721	MAST-2D	Modelo para simular el transporte de solutos en acuíferos en medios porosos.	AI,CB,F,C,V
A.E Reisenauer C.R. Cole	Water and Land Resources Division Battelle Pacific NW Labs P.O Box 999 Richland, WA 99352	VTT (1979)	Modelo para simular acuíferos multicapa confinados o libres y para generar líneas de flujo y tiempos de tránsito.	AI,CB,V,P,T
W.C Walton	IGWMC Holcomb Research Institute Butler University 4600 Sunset Avenue Indianapolis, IN 46208	35 MICROCOMPUTER PROGRAMS (1984)	Paquete de programas analíticos y numéricos para simular el flujo y el transporte de solutos y calor en acuíferos libres o confinados con geometría sencilla.	AI,CB,C,V,T
S.P Garabedian L.F Konikow	U.S. Geological Survey 431 National Center Reston, VA 22092	FRONTRACK (1983)	Modelo de diferencias finitas para simular el transporte convectivo de un trazador que no se descompone disuelto en el agua subterránea para el régimen estacionario o transitorio. El modelo calcula velocidades y la posición de las partículas del trazador.	AI,CB,AA,F,C V,P,T

**TABLA 8: MODELOS DE CALIDAD (Continuación)**

AUTORES	DIRECCION DE CONTACTO	NOMBRE DE PROGRAMA Y FECHA ULTIMA VERSION	DESCRIPCION DEL PROGRAMA	SALIDAS DEL MODELO
S.K Gupta C.T Kincaid P.R Meyer C.A Newbill C.R Cole	Battelle Pacific NW Labs P.O Box 999 Richland WA 99352	CFEST (1985)	Modelo tridimensional de elementos finitos para simular el flujo del agua subterránea, así como el transporte de solutos y calor en un medio poroso.	AI,CB, F,AA,C,V
G.T Yeh	Environmental Sciences Division Oak Ridge National Lab Oak Ridge, TN 37830	AT123D (1981)	Modelo mono- bi o tridimensional para simular el transporte de solutos en un acuífero homogéneo y anisótropo considerando la disminución y retardo de estos desde diversas fuentes de procedencia.	C,T
R.D Schmidt	U.S Dept of the Interior Bureau of Mines P.O Box 1660 Twin Cities, MN 55111	ISL-50 (1979)	Modelo tridimensional para simular el flujo en un acuífero homogéneo y anisótropo considerando un modelo de captaciones de inyección y extracción determinando tiempos de transito y recorridos de sustancias contaminantes.	V,P,T
G. Segol E.O Frind	Dept. of Earth Sciences University of Waterloo Waterloo, Ontario Canada N2L 3G1	3-D SATURATED UNSATURATED TRANSPORT MODEL (1976)	Modelo tridimensional para determinar la concentración de solutos conservativos o no en sistema de flujo saturados o no.	AI,CB, F,C
A.K Runchal	Analytic & Computational Research, Inc. 3106 Inglewood Blvd Los Angeles, CA 9006	PORFLOW II AND III (1987)	Modelo bi-tridimensional para simular flujo dependiente de la densidad, transporte de solutos y calor en acuíferos en medios porosos no deformables, saturados, heterogéneos y anisótropos.	AI,CB,AA,F,C,V
P.S Huyakorn	Geotrans Inc. 209 Elden St. 301 Herndon VA 22070	GREASE 2 (1982)	Modelo multidimensional para simular el flujo del agua subterránea, el transporte de solutos y/o calor en acuíferos multicapa en medios porosos heterogéneos y anisótropos, fracturados o no.	AI,CB,AA,F,C,V
INTERA Environmenta Consultants, en Inc. and INTERCOMP Resource Development & Eng, Inc	U.S Geological Survey Box 25046 Mail Stop 411 Denver Federal Center Lakewood CO 80225	SWIP/SWIPR/ SWENT (1985)	Modelo tridimensional para simular el flujo del agua subterránea en el estado transitorio, así como el transporte de contaminantes o calor en un acuífero heterogéneo y anisótropo.	AI,CB,AA,F,C,V

**TABLA 8: MODELOS DE CALIDAD (Continuación)**

AUTORES	DIRECCION DE CONTACTO	NOMBRE DE PROGRAMA Y FECHA ULTIMA VERSION	DESCRIPCION DEL PROGRAMA	SALIDAS DEL MODELO
B.J Travis	Los Alamos National Lab Earth and Spaces Sciences Division Los Alamos NM 87545	TRACR3D (1984)	Modelo tridimensional de diferencias finitas para simular el flujo y transporte de diversos solutos en acuíferos en medios porosos o fracturados, deformables, y heterogéneos.	AI,CB,AA,F,C,V
R.T Dillon RM Cranwell R.B Lantz S.B Panwa M.Reeves	Sandia National Labs Albuquerque NM 87185	SWIFT (1981)	Modelo tridimensional de diferencias finitas para simular el flujo dependiente de la densidad, así como el transporte de calor, radio nucleídos o trazadores en acuíferos confinados heterogéneos y anisótropos.	AI,CB,AA,F,C V,P,T

**LEYENDA TABLAS 7 Y 8**

La columna " Salidas del modelo" presente en las tablas 7 y 8 especifica el tipo de información que proporciona el modelo que puede ser utilizada para delimitar los perímetros de protección.

Se han usado las siguientes abreviaturas:

- AI = Area de influencia (Area alrededor de la captación en la que se producen descensos del nivel piezométrico por efecto del bombeo en la misma)
- C = Concentración del contaminante en el area simulada
- CB = Cono de bombeo. (Es la forma que presenta el area de influencia en sección)
- F = Flujo
- P = Trayectoria de las partículas contaminantes en el acuífero
- AA = Area de alimentación (zona en la cual el agua procedente de la precipitación, cauces superficiales u otras fuentes podría eventualmente alcanzar la captación)
- T = Tiempo de tránsito (isocronas)
- V = Velocidad del agua subterránea

### 7.1.2.F. Otros métodos y técnicas complementarias

#### 7.1.2.F.1. Método de Rehse para el cálculo del poder depurador del suelo

Rehse propone un método empírico para el cálculo del poder depurador del suelo sobre los efluentes contaminantes que pudieran atravesarlo, para ello considera la circulación del contaminante en dos tramos diferenciados, un tramo vertical a través de la zona no saturada del terreno, y un segundo tramo, horizontal, hasta el punto de extracción del agua, circulando por la zona saturada del acuífero. Así en función de la velocidad, tipo de materiales y espesor atravesado, cuantifica el nivel de depuración sufrido por el contaminante. Para el cálculo se apoya en varias tablas, que relacionan el tipo de materiales (diferenciando zona saturada y no saturada) y su poder depurador. En las tablas 9 y 10 se recogen características de los materiales de la zona saturada y no saturada.

Así pues se definen las variables siguientes (ver figura 71):

$Ir = 1/H$  Donde  $Ir$  = Índice de depuración en la zona no saturada (cuadro 17)

$H$  = Espesor vertical de la zona no saturada

$la = 1/L$   $la$  = Índice de depuración de la zona saturada (cuadro 18)

$L$  = Longitud atravesada de zona saturada

El poder depurador vendrá dado por:

$$Mx = Ma + Mr$$

Donde

$Mx$  = Poder depurador sobre la totalidad del transporte

$Mr$  = Poder depurador en el trayecto vertical

$Ma$  = Poder depurador en el trayecto horizontal

Cuando  $Mx \geq 1$  la depuración es completa.

- Depuración en la zona no saturada

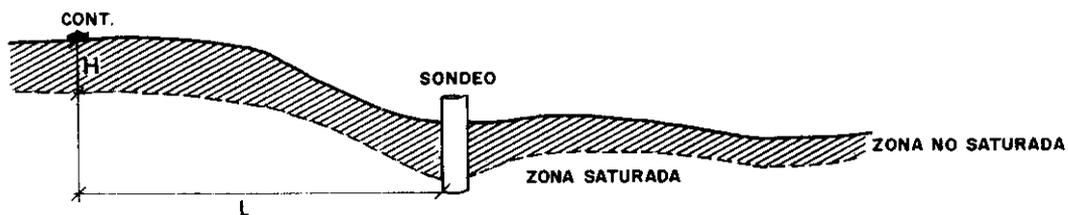
Para el trayecto vertical, si la zona no saturada está constituida por  $n$  materiales diferentes:

$$Mr = \sum_{i=1}^n h_i Ir_i$$

$h_i$  = espesores de los materiales

$Ir_i$  = índices para esos materiales

Cuando  $Mr \geq 1$  la depuración en la zona no saturada es completa y según Rehse no sería necesario determinar el perímetro de protección próximo.



Fuente: Elaboración propia

FIG. 71 ZONA A CONSIDERAR EN EL METODO DE REHSE

Cuando  $Mr < 1$  la depuración en las capas superiores no es completa y el agua contaminada alcanzaría la zona saturada.

**- Depuración en el acuífero**

Si  $Mx = 1$  (es decir, existe una depuración completa antes de llegar el agua a la captación) entonces el poder depurador de la zona saturada será:

$$Ma = 1 - Mr$$

La distancia L que como mínimo es necesario recorrer para alcanzar una depuración total sería:

$$L = Ma / Ia \quad Ia = \text{índice correspondiente al material acuífero.}$$

Según Rehse L correspondería al límite del perímetro de protección próximo.

Si no existiera recubrimiento toda la depuración debería realizarse a través del material acuífero, para que sea completa, debe ser:

$$Ma = 1 \quad y \\ L = 1 / Ia$$

**Cuadro 17: Poder depurador del suelo en el recubrimiento (suelo + zona no saturada)**

M	Descripción del material	H (m)	$I_r = 1/H$
1	Humus, 5 - 10 % humus, 5-10% arcilla	1,2	0,8
2	Arcilla sin grietas de desecación, limo-arcilloso. Arena muy arcillosa	2	0,5
3	Limo arcilloso a limo	2,5	0,4
4	Limo, arena poco limosa, arena limosa	3-4,5	0,33-0,22
5	Arena fina a media	6	0,17
6	Arena media a gruesa	10	0,1
7	Arena gruesa	15	0,07
8	Grava con abundante matriz arenosa y limo-arcillosa	8	0,13
9	Grava con abundante matriz arenosa y limo-arcillosa	12	0,08
10	Grava fina a media, rica en arena	25	0,04
11	Grava media a gruesa con poca arena	35	0,03
12	Guijarros	50	0,02

M = Nº de clasificación granulométrica

H = Espesor de la capa de suelo necesaria para la depuración

$I_r$  = Índice de depuración de la zona de recubrimiento

Arena	Díametro de grano	2 mm - 0,063
Limo	Díametro de grano	0,063 mm - 0,005 mm
Arcilla	Díametro de grano	< 0,005 mm

Fuente Rehse, 1977

TABLA 9: Algunos parámetros hidrogeológicos para las rocas de la zona no saturada

(1) N° DE DE ROCA M	(2) ROCA	(3) ESPESOR (m)	(4) PERMEABILID. SATURADA O SEMISATUR. (m/s)	(5) POROSIDAD UTIL SATURADA %	(6) POROSIDAD UTIL NO SATURADA	(7) SUPERFICIE ESPECIFICA m <sup>2</sup>	(8) VELOCIDAD REAL (m/d)	(9) TIEMPO DE RECORRIDO (días)	(10) CAPACIDAD RETENCION (%)	(11) VOLUMEN UTIL m <sup>3</sup>	(12) RETENCION m <sup>3</sup>	(13) SUPERFICIE TOTAL DE LOS GRANOS (m <sup>2</sup> )	
1	Roca con propiedades de adsorción	1,2	5 x 10 <sup>7</sup>	0,05	-	1x10 <sup>6</sup> a5x10 <sup>7</sup>	0,86	1,4	> 10	(0,06)	0,12	1.2x10 <sup>6</sup> a6x10 <sup>7</sup>	
2		2,0	1x10 <sup>8</sup>	0,035	-	4x10 <sup>8</sup>	0,025	80,0	50	(0,07)	1,0	8x10 <sup>8</sup>	
3		2,5	1x10 <sup>7</sup>	0,065	-	4x10 <sup>9</sup>	0,16	15,6	20	(0,14)	0,5	1x10 <sup>8</sup>	
4 <sub>1</sub>		3,0	5x10 <sup>7</sup>	0,08	-	225.600	0,54	5,6	32	0,24	1,0	676.800	
4 <sub>2</sub>	Roca  Arenosa	3,8	1x10 <sup>6</sup>	0,10	-	25.000	0,86	4,4	27	0,38	1,0	95.000	
4 <sub>3</sub>		4,5	5x10 <sup>6</sup>	0,10	0,08	19.000	4,32	1,0	24	0,45	1,1	85.500	
5		6,0	1x10 <sup>9</sup>	0,105	0,08	13.400	8,23	0,7	3	0,63	0,2	80.400	
6		10,0	1x10 <sup>6</sup>	0,135	0,1	7.600	19,2	0,5	2,5	1,35	0,3	76.000	
7		15,0	3x10 <sup>9</sup>	0,16	0,12	4.000	27,0	0,6	2,3	2,4	0,4	60.000	
				5x10 <sup>6</sup>			3,6	4,2					
8	Gravas	8,0	5x10 <sup>7</sup>	0,06	-	9.000	0,72	11,1	15	0,48	1,2	72.000	
9		12,0	3,5x10 <sup>4</sup>	0,15	0,12	1.800	201,6	0,06	2	1,8	0,2	21.600	
10		25,0	3,5x10 <sup>6</sup>	0,18	0,15	580	480	0,05	2	4,5	0,5	14.500	
			1x10 <sup>3</sup>										
11	Gravas	35,0	1x10 <sup>2</sup>	0,20	0,15	200	4.320	11,7min	1,5	7,0	0,5	7.000	
			1x10 <sup>4</sup>				57,6	14,6 h		12,5	0,6	3.000	
12	Gujarros	50,0	2,5	0,25	-	60	6m/h	8,3h	1,2				

155

Columnas:  
 (3) Espesor indicado en el cuadro 17  
 (7) Superficie específica de los granos  
 (11) Producto de las columnas (3) y (5)  
 (12) Producto de las columnas (3) y (10)

(4) k: Valor superior o valor único = en condición saturada  
 (8 y 9): El valor en negrita es aquel que prevalece. Corresponde a la saturación parcial para los materiales permeables  
 (13) Producto de las columnas (3) y (7)

Fuente: Rehse, 1977.

**TABLA 10: Algunos parámetros hidrogeológicos para las rocas de la zona saturada (Acuífero)**

(1) Nº DE ROCA	(2) ROCA	(3) PERMEABILIDAD Km/s	(4) VELOCIDAD REAL m/d	(5) DISTANCIA LIMITE (m)	(6) TIEMPO DE RECORRIDO (d)	(7) VOLUMENES INFILTRADOS (m³)	(8) SUPERF. ESPECIFICA (m²/m³)	(9) SUPERFICIE TOTAL DE LOS GRANOS (m²)
9	Grava limosa arenosa	3,5 x 10³	a < 3 b 3 12 20 c 20 35 50 d 50 75 > 50	100 150 170 200	33,3 12,5 4,9 4,0	100 150 170 200	1800	180 x 10³ 270 x 10³ 306 x 10³ 360 x 10³
10	Grava arenosa	1,0 x 10²	a < 5 b 5 12 20 c 20 35 50 d 50 75 100	150 200 220 250	30,0 16,7 6,3 3,3	150 200 220 250	580	87 x 10³ 116 x 10³ 128 x 10³ 145 x 10³
11	Grava	1,0 x 10²	a < 5 b 5 12 20 c 20 35 50 d 50 75 100	200 250 270 300	40,0 20,8 7,7 3,0	200 250 270 300	200	40 x 10³ 50 x 10³ 54 x 10³ 60 x 10³
12	Guijarros	2,5	a < 5 b 5 12 20 c 20 35 50 d 50 75 100	300 340 360 400	60,0 28,3 10,3 4,0	300 340 360 400	260	18 x 10³ 20 x 10³ 22 x 10³ 24 x 10³

Columnas:

- (1) Nº de Material.
- (3) Valor de k (permeabilidad) en condición saturada.
- (4) Intervalos de velocidades reales: el valor medio es utilizado en los cálculos, por ejemplo, en la columna 6. Depende del gradiente.
- (5) Distancia límite requerida según el caso.
- (6) Tiempos de recorrido calculado a partir de (4) y (5).
- (7) Producto de 1 m² de sección y de la distancia.
- (8) Superficie específica de los granos
- (9) Superficie total de los granos, calculada a partir de las columnas (5) y (8).

Fuente: Rehse, 1977.

**Cuadro 18: Poder depurador del suelo en el acuífero**

M	Descripción del material	L	$I_a = 1/L$
9	Grava con abundante matriz arenosa y escasamente limosa	a) 100 b) 150 c) 170 d) 200	0,01 0,007 0,006 0,005
10	Grava fina a media rica en arena	a) 150 b) 200 c) 220 d) 250	0,07 0,005 0,0045 0,004
11	Grava media a gruesa con poca arena	a) 200 b) 250 c) 270 d) 300	0,05 0,004 0,0037 0,0033
12	Gravas, guijarros	a) 300 b) 340 c) 360 d) 400	0,0033 0,0029 0,0058 0,0025

$L_m$  = distancia horizontal necesaria para la depuración (m)

a = velocidad eficaz < 3 m/día

b = velocidad eficaz comprendida entre 3 y 20 m/día

c = velocidad eficaz comprendida entre 20 y 50 m/día

d = velocidad eficaz > 50 m/día

$I_a$  = índice de depuración en el acuífero

Fuente Rehse, 1977.

### Ejemplo de aplicación del método de Rehse

Recientemente se ha aplicado este método en la determinación de un perímetro en el término municipal de Benidoleig, donde existe un sondeo que capta dos niveles acuíferos diferentes, uno inferior confinado, correspondiente a niveles carbonatados del Neocomiense y otro superior, libre, formado por depósitos cuaternarios (gravas y arenas).

Dado que las peculiares características del pozo no permiten realizar un bombeo de ensayo a fin determinar sus parámetros hidrodinámicos y además se observa que el sondeo explota fundamentalmente al acuífero carbonatado, no existiendo en el área afloramiento del acuífero Neocomiense, queda claro que una posible contaminación debería provenir básicamente del acuífero detrítico (el inferior está protegido de forma natural). A la vista de estas consideraciones se consideró el método de Rehse como el más adecuado para este caso, definiéndose así la zona de restricciones máximas.

La profundidad mínima del nivel del agua en el pozo es de  $\approx 10 \text{ m} \rightarrow H 10 \text{ m}$ . La velocidad eficaz estimada es de  $V_e = 3 \text{ m/día}$ .

La zona superior no saturada consiste en unas gravas finas ricas en arenas por lo tanto  $M = 10$  e  $I_e = 0,04$  (cuadro 17), mientras que para la depuración en la zona saturada se ha elegido una  $I_a = 0,005$  en función del material ( $m=10$ ) y la velocidad efectiva de 3 m/día. (cuadro 18)

Con estos datos, operando se obtiene:

$$M_r = I_r H \quad M_a = 1 - M_r \quad L = \frac{M_a}{I_a}$$

$$M_r = 0,04 \times 10 = 0,4$$

$$M_a = 1 - 0,4 = 0,6 \quad L = \frac{0,6}{0,005} = 120 \text{ m}$$

La zona de restricciones máximas se definió como un círculo con centro en la captación y radio de 120 m. La zona de restricciones bajas o moderadas fue calculada en base a criterios hidrogeológicos.

**Cuadro 19: Poder depurador de las rocas (Bolsenkötter)**

M	Descripción del material	H(m)	$I_a = 0,5/h$
1	Margas	10	0,05
2	Arenisca con capas arcillosas. Arcillas, micaesquistos y filitas	20	0,025
3	Basaltos y rocas volcánicas	30	0,017
4	Grauvaca, arcosas, arenisca arcillosa, limosa	50	0,01
5	Granito, granodiorita, diorita sionita	70	0,007
6	Cuarcitas, areniscas con sílex	100	0,005
7	Caliza	200	0,0025

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

### 7.1.2.F.2 Modificación de Bolsenkötter para medios kársticos y/o fisurados

El método de Rehse funciona adecuadamente y proporciona resultados fiables cuando se trata de un sistema isótropo, en el cual la circulación del agua se produce a través de un medio poroso. Bolsenkötter, ha completado el método de Rehse proponiendo otro similar para los medios kársticos y/o fisurados.

El poder depurador de las rocas en medios kársticos y fisurados es menor que en medios porosos y por ello aumenta las distancias necesarias para conseguir una depuración total. En este caso Bolsenkötter ha calculado unos nuevos índices que aparecen reflejados en el cuadro 19.

En la tabla adjunta se proporciona el valor de H y  $I_a$  para diferentes tipos de materiales.

### 7.1.2.F.3. Empleo de trazadores

El empleo de trazadores permite conocer con bastante precisión la dirección, sentido y magnitud del flujo del agua subterránea, incluso (en el caso de acuífero fisurados o kársticos) realizar una cartografía del sistema de conductos existentes en el subsuelo.

El método consiste en inyectar una cantidad conocida de una solución del trazador (la sustancia que posteriormente será determinada) siguiendo su evolución espacio-temporal mediante el muestreo y análisis sistemáticos de aquellos pozos, sondeos, manantiales, etc., que se encuentren en la posible trayectoria del agua subterránea.

Como trazadores pueden emplearse muy diferentes sustancias, a condición de cumplir unos requisitos mínimos:

- No degradarse en el tiempo que va a durar la experiencia.
- No ser agresivos para el medio o perjudiciales para la salud si el agua puede llegar al consumo humano.
- Debe ser determinable mediante una técnica sencilla y poco costosa. Hay que considerar que serán necesarias muchas determinaciones.
- Si se preve una dilución importante al atravesar el acuífero la técnica de determinación del trazador ha de poseer suficiente sensibilidad.
- No debe interactuar con el medio.
- Se debe conocer la cinética de degradación del trazador en el acuífero, así como la existencia de fenómenos de retención.

Se han empleado gran variedad de trazadores, pertenecientes a muy diferentes grupos de sustancias:

- Temperatura
- Partículas sólidas en suspensión
- Flotadores
- Microorganismos (levaduras, bacterias, virus):

Sacharomyces cerevisiae	Serratia marcescens
E. Coli	Serratia indica
Streptococcus faecalis	Diferentes virus animales y vegetales
Bacillus stearothermophilus	

- Esporas (Lycopodium)
- Iones (Cl<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, Li<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, I<sup>-</sup>)
- Compuestos orgánicos (m-TFMBA, rojo congo, verde malaquita)
- Elementos radiactivos (<sup>2</sup>H, <sup>32</sup>P, <sup>51</sup>Cl, <sup>60</sup>Co, <sup>82</sup>Br, <sup>85</sup>Kr, <sup>131</sup>I, <sup>198</sup>Au,)
- Compuestos orgánicos fluorescentes (Fluoresceína, rodamina-B)

- Gases inertes y gases radiactivos (Freones, Neón, Kriptón, Xenón, Radón)

Realmente la lista de compuestos dentro de cada uno de los apartados es muy grande, debiendo recurrirse en cada caso al trazador más adecuado a cada circunstancia. Los más empleados son el ClK, ClLi, la fluoresceína y la rodamina-B.

En el caso de los perímetros de protección, normalmente se pretende conocer si desde un punto determinado el agua llegará a la captación que se quiere proteger y si esto es así cuanto tiempo tardará. El método tiene una aplicación concreta, de especial relevancia en el caso de la localización de perímetros satélites, cuya determinación objetiva muchas veces solo puede ser hecha a partir de un estudio con trazadores.

Frecuentemente se han empleado a modo de trazadores focos conocidos de contaminación, en especial si en el efluente contaminante se encuentra alguna sustancia que lo pueda caracterizar y diferenciar de otros focos cercanos (se pueden emplear algunos metales pesados que pueden ser indicadores de actividades muy específicas) estudiando su distribución alrededor del punto de contaminación y en la propia captación de abastecimiento.

En la figura 72, se muestra, como la delimitación de un perímetro empleando la metodología tradicional, puede incluir zonas que mediante el empleo de trazadores se demuestra no afectan a la captación a proteger, se observa incluso como un foco de contaminación aguas arriba de la captación no llega a incidir sobre ésta.

### 7.1.2.F.4. Datación con tritio

El contenido de tritio en las aguas subterráneas puede ser empleado para determinar su edad.

El método se basa en considerar que si el agua en el momento de infiltrarse poseía un contenido  $n_0$  en tritio y cuando se extrae o surge contiene  $n$  puede establecerse que:

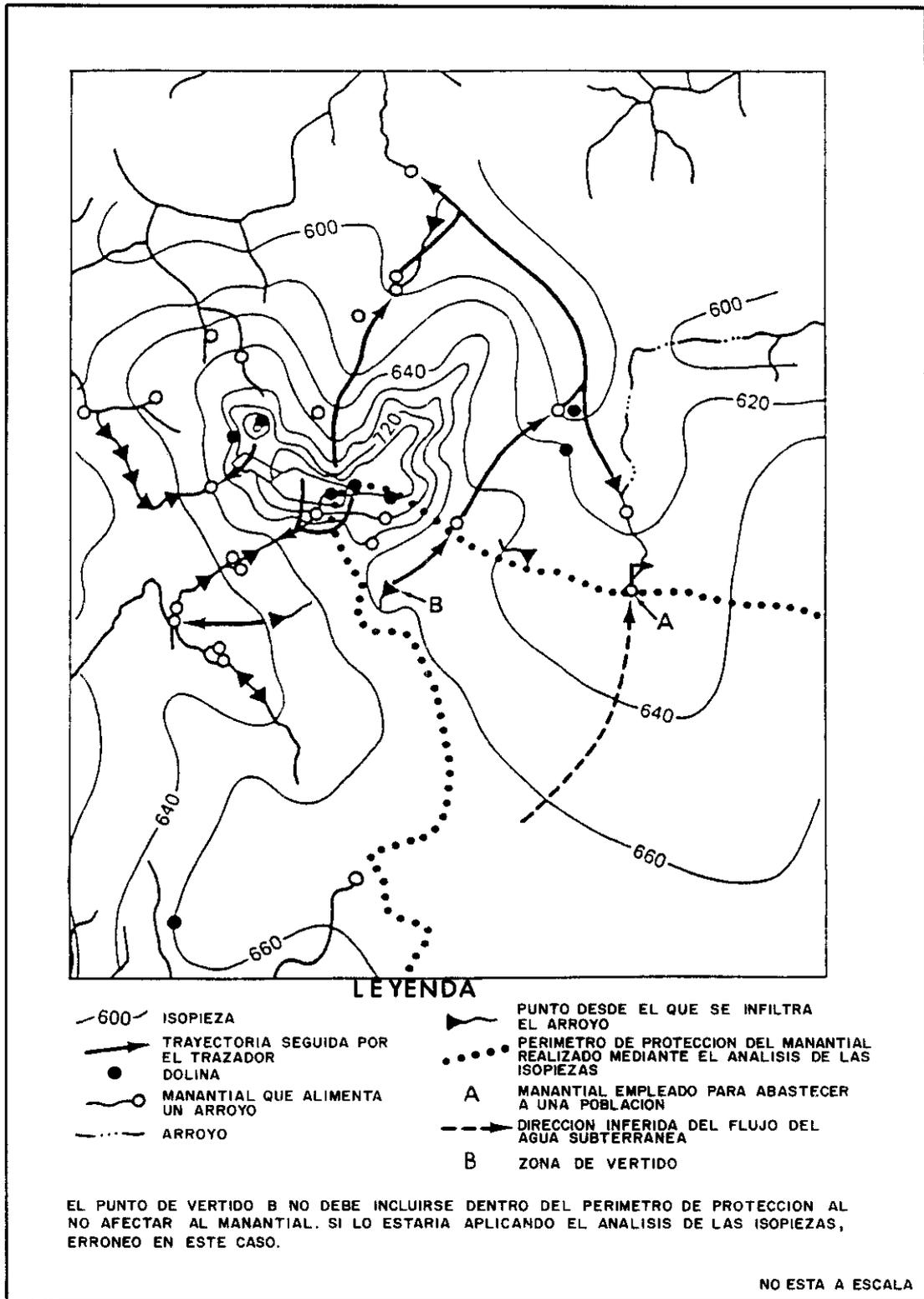
$$n = n_0 e^{(-0,693 t) / T} \quad (7)$$

$$t = (T / 0,693 \ln (n_0 / n)) \quad (8)$$

Donde:

T = período radiactivo del tritio

t = tiempo transcurrido desde que se infiltra hasta que surge o es extraída



Fuente: Modificado de Quinlan y Ewers, 1985

**Fig. 72 DELINEACION DE UN PERIMETRO DE PROTECCION EN KENTUCKY MEDIANTE EL EMPLEO DE TRAZADORES.**

Debido a las perturbaciones que han originado las pruebas con armas nucleares no es posible conseguir un registro completo de la evolución que presenta el factor  $n_0$  con el tiempo, lo que habría permitido realizar la corrección de esos valores por desintegración hasta el momento de muestreo.

No obstante sí que puede determinarse si el agua se infiltró antes o después de 1954, pues desde esta fecha se produjo un notable incremento del contenido de tritio en la atmósfera debido a dichas pruebas nucleares.

Debe no obstante señalarse que el hecho de que las aguas subterráneas sean frecuentemente una mezcla de aguas procedentes de diversas fuentes y edades puede dificultar enormemente estos cálculos.

Cabe indicar que algunos autores han propuesto establecer una edad mínima para las aguas minerales que vayan a ser destinados a determinados usos lo que garantizaría la ausencia en ellas de contaminantes que han empezado a ser utilizados en fechas relativamente recientes, como pesticidas, etc.

La datación de las aguas subterráneas mediante su contenido en tritio fue utilizada en la definición del perímetro de protección del manantial de "Font Calda" (Villavieja-Castellón) realizado en 1990 por el ITGE y la Conselleria de Industria, Comercio y Turismo de la Generalitat Valenciana.

Se consideró interesante proceder a la datación de las aguas termales de este manantial ya que existía cierta incertidumbre sobre su edad y el conocimiento de ésta permitiría evaluar su vulnerabilidad frente a actividades contaminantes.

Estas aguas han sido objeto de aprovechamiento por diversos balnearios de la localidad debido a sus propiedades terapéuticas.

Considerando que:

$T$  = período radiactivo del tritio = 12,26 años

$n_0$  = contenido natural del tritio en el agua infiltrada antes de 1954 = 6 UT

$t$  = tiempo transcurrido desde que se infiltró hasta surgir = 1990 - 1954

Se puede aplicar la ecuación 7:

$n = 6 \cdot e^{(-0,693 (1990-1954)) / 12,26}$

$n = 6 \times 0,13 = 0,78$  UT

La concentración de tritio obtenida al analizar una muestra de agua de la Font Calda en 1990 era de 0,80  $\pm$  0,98 UT.

Este valor indica que el agua drenada por dicha fuente se infiltró en torno al año 1954. Si hubiese existido mezcla con aguas más superficiales y recientes, éstas deberían suponer una fracción muy reducida de dicha mezcla puesto que en caso contrario se habría obtenido valores de tritio muy superiores.

A este respecto cabe indicar que en estudios similares a éste en otras poblaciones de la Comunidad Valenciana se obtuvieron valores de 7 a 25 UT. Este dato sirvió para corroborar las observaciones hidrogeológicas que apuntaban a la existencia de un flujo subterráneo profundo que favoreció el carácter termal de esas aguas.

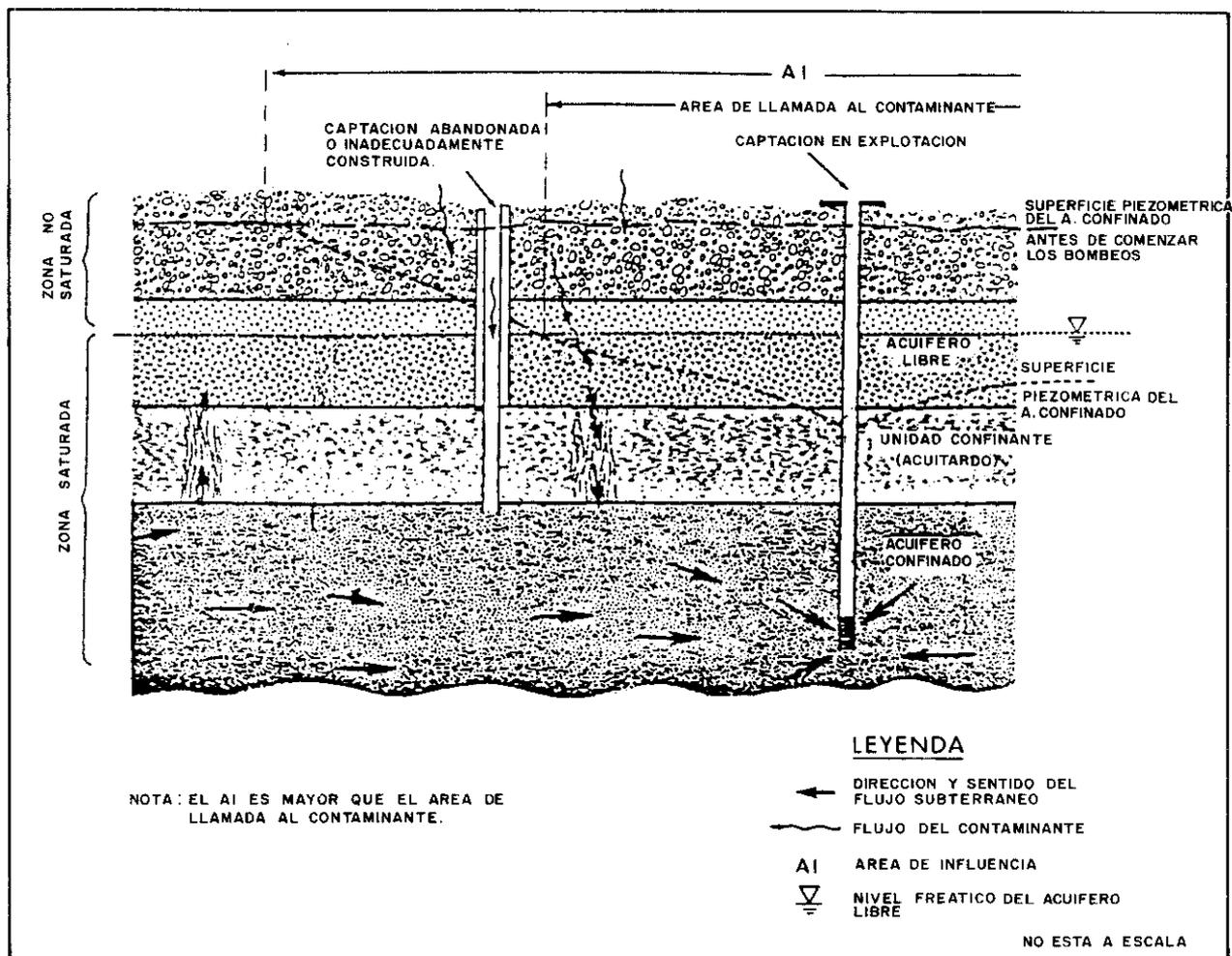
La datación también puede realizarse utilizando otros compuestos como el  $\text{CCl}_3\text{F}$  (Triclorofluorometano) que también es de origen antrópico y está presente en la atmósfera desde hace solo cincuenta años. No obstante su empleo está mucho menos generalizado que el del tritio puesto que no se conocen bien las transformaciones físicas y químicas que se producen al incorporarse al flujo subterráneo, si bien parece probable que hay diferentes procesos que afectan a su concentración en las aguas subterráneas.

Una de las principales aplicaciones de este método es evaluar si un acuífero es realmente confinado lo que hace innecesaria su protección, o es posible la llegada de contaminantes hasta él.

En la figura 73 se sintetizan diversos factores que pueden producir la contaminación de un acuífero que inicialmente podría considerarse confinado.

En la práctica puede resultar sumamente complicado detectar esos factores, que serán analizados seguidamente, por lo que la datación con tritio adquiere un notable interés e indica, cuando su concentración es elevada, una gran susceptibilidad frente a la contaminación.

En esa figura se observa que cuando el nivel piezométrico del acuífero confinado está por encima del nivel freático del acuífero libre, el primero no puede contaminarse puesto que el flujo a través del acuífero es ascendente. Por el contrario cuando por efecto de los bombeos el nivel piezométrico está más bajo sí que existe un flujo descendente que puede transportar contaminantes hasta el acuífero confinado. En este caso en las cercanías de la captación el cono de bombeo puede provocar que el acuífero se comporte como libre aunque estratigráficamente sea confinado.



Fuente: EVERETT, 1987

Fig. 73 VARIACIONES PRODUCIDAS POR EFECTO DEL BOMBEO Y/O EXISTENCIA DE CAPTACIONES ABANDONADAS EN LA RELACION EXISTENTE ENTRE UN ACUIFERO LIBRE Y OTRO CONFINADO.

En cualquier caso debe señalarse que la existencia del acuitado hace que este flujo sea muy reducido.

Otra posibilidad de contaminación del acuífero confinado que es relativamente frecuente es la existencia de pozos abandonados o deficientemente construidos que conecten ambos acuíferos o excavaciones que lleguen hasta la capa confinante.

Finalmente debe analizarse si existen fracturas no detectables en superficie que lo pongan localmente en contacto con otros acuíferos.

### 7.1.3. Selección del método

En el apartado 7.1.1. se estudiaron los criterios que permiten dimensionar los perímetros de protección, su correcta elección reviste una especial importancia pues determinará de forma substancial las características espaciales del perímetro. Para la aplicación práctica de este criterio habrá de emplearse uno o varios de los métodos descritos de forma teórica y práctica en el apartado precedente, requiriendo su selección tanto de consideraciones de carácter técnico y económico, como de la evaluación del impacto social que supondrá la implantación del perímetro.

Se relacionan en el cuadro 20 los criterios para la determinación de perímetros junto a los métodos que permiten su aplicación, además en las columnas de tipo de materiales se analiza la adecuación de cada uno de éstos a las características del acuífero (medios porosos y asimilables o fisurados).

Se aprecia como todos los métodos son aplicables sobre medios porosos y asimilables (el de Bolsenkötter no es más que una adaptación del de Rehse a materiales kársticos o fisurados) y es sin embargo reducido el número de los que pueden ser aplicados en acuíferos kársticos o fisurados (sensu stricto).

Respecto a los acuíferos en materiales carbonatados cabe hacer algunas consideraciones.

Los estudios y sobre todo la explotación de los acuíferos existentes en dichos materiales han permitido constatar que la denominación de acuíferos kársticos, habitualmente empleada para referirse al conjunto de los desarrollados en dichos materiales, resulta imprecisa, puesto que engloba a acuíferos muy dispares en su comportamiento, existiendo una gradación con numerosos estadios intermedios entre aquellos que funcionan de una manera similar a los acuíferos en medios porosos, en los cuales puede aplicarse la ley de Darcy, hasta aquellos en los que el agua circula por una auténtica red hidrográfrica subterránea.

El diferente funcionamiento observado en los acuíferos existentes en materiales carbonatados se debe a las variaciones en la estructura del medio acuífero, su régimen hidráulico y la capacidad de almacenamiento de agua, por lo que el análisis minucioso de dichos aspectos será por tanto básico para la elección de la metodología de estudio que debe aplicarse.

En una primera aproximación a estos acuíferos puede aceptarse que:

- a) Existen medios con una saturación general en los cuales la fisuración, la microfisuración y la eventual porosidad intergranular cumple a la vez las funciones de almacenamiento y conducción, siendo perfectamente continuos desde el punto de vista hidráulico, por lo que pueden ser asimilables a un medio poroso.
- b) Medios en los que el almacenamiento en la matriz rocosa es prácticamente inexistente, carecen de continuidad hidráulica y de saturación general. En ellos el agua procedente de la recarga circula por una red hidrográfrica bien jerarquizada que se establece en el macizo rocoso.
- c) Por último existen otros medios intermedios en los que las microfisuras, porosidad intergranular, etc., tienen funciones de almacenamiento mientras que el drenaje se realiza a través de conductos (fracturas, discontinuidades ensanchadas, juntas de estratificación, contactos erosionales, etc.).

Los modelos señalados constituyen en cierta manera los dos grandes grupos de acuíferos en rocas carbonatadas descritos en la literatura anglosajona, es decir, los sistemas de flujo difuso y los sistemas de flujo por conductos, con una frontera no definida sino gradual.

En el cuadro 21 aparecen reflejadas las principales características que los definen.

Por su parte en el cuadro 22 se muestra una propuesta de clasificación de las diferentes tipologías de acuíferos existentes en las rocas carbonatadas de España realizada por Bayo Dalmau, A. et al. en 1986, explicando sus principales características y las zonas tipo en las que aparecen representadas y relacionándolas con la diferenciación descrita previamente entre acuíferos de flujo difuso, kársticos (sensu stricto) e intermedios.

Cuadro 20: Criterio empleado por los diferentes métodos de delimitación de perímetros de protección

Método / Criterio		Distancia	Descenso	Tiempo de Tránsito	Criterios hidrogeológicos	Poder autodepurador	Tipo de materiales	
							Porosos y asimilables	Kársticos y fisurados (sensu stricto)
	Radio fijado arbitrariamente	***					***	***
Métodos analíticos propiamente dichos	Radio fijo	Función tiempo		***			***	
		Función descenso		***			***	***
	Hoffman y Lillich			***	***		***	
	Wyssling			***	***		***	
Catálogo de formas simples			***	***		***		
Métodos gráficos	Albinet			***			***	***
	Tiempo de tránsito por ábacos	Sauty y Tyeri		***			***	
		Jacobs y Bear		***			***	
Nomogramas de V.W. y V.D. Nomógrafo de Pettyjon				*** ***			*** ***	
Métodos hidrogeológicos	Horsley Hidrogeológicos			***	*** ***		*** ***	***
Modelos matemáticos	Modelos de flujo y transporte			***	***		***	***
Otros métodos y técnicas complementarias	Rehse Bolsenkötter					***	***	***
	Trazadores Tritio				*** ***	****	*** ***	*** ***

Fuente: Elaboración propia.

Recientemente se han aplicado los métodos de Wyssling, Jacobs y Bear en acuíferos calizos del levante español, comprobándose mediante estudios complementarios la idoneidad de los perímetros definidos.

La aplicabilidad de los métodos inicialmente desarrollados para medios porosos a determinado acuíferos

carbonatados (acuíferos de flujo difuso), con garantía de proteger adecuadamente el recurso hídrico, se ha puesto de manifiesto en la determinación de diversos perímetros de protección en calizas en el sur de Inglaterra, empleando el catálogo de formas simples con resultados satisfactorios.

**Cuadro 21: Características de los tipos básicos de acuíferos carbonatados**

<b>Acuíferos kársticos (sensu stricto)</b>			<b>Acuíferos de flujo difuso</b>	
<b>COMUNES</b>	Medio muy heterogéneo	→	<b>ACUIFEROS INTERMEDIOS</b>	→
	Masa impermeables coexistiendo con grande conductos	→		→
	Almacenamiento pequeño o nulo	→		→
	Piezometría virtual, discontinua	→		→
	Circulación por conductos y ríos subterráneos. Pequeños acuíferos colgados	→		→
	Hidrogramas de descargas, en coordenadas semilogarítmicas presentan <<picos>> y zonas tendidas	→		→
	Infiltración puntos localizados	→		→
	Regulación natural escasa	→		→
	Oscilaciones piezométricas grandes, nivel de agua profundo	→		→
	Formas kársticas abundantes, accesibilidad fácil al interior del macizo	→		→
<b>FRECUENTES</b>	La regulación es difícilmente aumentable con captaciones subterráneas	→	→	

Fuente: Bayó Dalmau, A. et al, 1986.

CUADRO N°22 ENSAYO SOBRE LAS DIVERSAS TIPOLOGIAS DE ACUIFEROS EN ROCAS CARBONATADAS DE ESPAÑA

		TIPOS	ALGUNOS SUBTIPOS	CARACTERISTICAS PRINCIPALES	POSIBLES LOCALIDADES TIPO		
CON SATURACION GENERAL	FLUJO DIFUSO	ACUIFEROS DE FLUJO DIFUSO	LIBRES	SÓMEROS ABIERTOS (1) DE GRAN ESPESOR (2)	ABIERTOS O CERRADOS	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Comportamiento semejante a un acuífero granular</li> <li>- Formas kársticas de absorción escasas</li> <li>- Tectónica distensiva</li> <li>- Discontinuidades bien conectadas</li> <li>- Anisotropía poco marcada</li> <li>- Piezometría continua. Gradientes hidráulicos regulares</li> <li>- Continuidad hidráulica. Circulación profunda</li> <li>- Permeabilidad apreciable en todo el macizo rocoso</li> <li>- Recarga uniforme</li> <li>- Almacenamiento grande y elevada capacidad de regulación natural</li> <li>- Captación por pozos. Se puede aumentar de manera muy importante la regulación natural.</li> </ul>	(1) Travertinos Banyoles, Llanura Manchega. (2) Algunas cubetas calcáreas del Prebético y Subbético (Crevillente, Sierra del Cid). Acuíferos costeros en la zona Bética (Gador). (3) Cordillera Prelitoral Catalana-Capelliades. Banyoles. Acuífero profundo Llanura Manchega. (4) Zócalo depresiones litológicas mediterráneas (Sania-Vinarez, Castellón).
			CONFINADOS	"ENTRE CAPAS" (3) FLUJO REACTIVADO (4)			
	FLUJO POR CONDUCTOS	ACUIFEROS INTERMEDIOS FISURADOS Y KARSTIFICADOS	MIXTOS	ABIERTOS COSTEROS (5) CERRADOS CON DRENAJE CONCENTRADO (6)	ASCENDENTE O DESCENDENTE	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gradación desde los de flujo difuso hasta los kársticos</li> <li>- Formas kársticas abundantes</li> <li>- Tectónica frecuentemente compresiva</li> <li>- Red de drenaje preferencial que se superpone a una permeabilidad generalmente baja, existente en la matriz rocosa.</li> <li>- Discontinuidades abundantes más o menos conectadas</li> <li>- Anisotropía marcada</li> <li>- Piezometría relativamente continua</li> <li>- La circulación suele ser poco profunda</li> <li>- Permeabilidad apreciable en una estrecha franja bajo el nivel de saturación.</li> <li>- Almacenamiento moderado o pequeño. Se puede aumentar la regulación natural</li> <li>- Captaciones por pozos o galerías en las proximidades de los manantiales y otras zonas limitadas.</li> </ul>	(5) Vandellós, Alcoceber. Garral. (6) Sierra Cadi-Moixeró (7) Formaciones calcareníticas de las Baleares (Menorca, Mallorca). (8) Arteta, Aralar.
DOBLE POROSIDAD	POROSIDAD INTERGRANULAR (7) FISURACION Y MICROFISURACION (8)	ABIERTOS O CERRADOS					
SIN SATURACION GENERAL	FLUJO POR CONDUCTOS	ACUIFEROS KARSTICOS "SENSU STRICTO"	CON PEQUEÑA ZONA DE SATURACION (9) SIN ZONA DE SATURACION (10)		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Abundantes formas kársticas de absorción. Accesibilidad al interior del macizo</li> <li>- Drenaje mediante una red hidrográfica subterránea bien jerarquizada</li> <li>- Muy anisótropo</li> <li>- Piezometría virtual y discontinua</li> <li>- Discontinuidad hidráulica. Circulación por conductos</li> <li>- Grandes conductos con nula permeabilidad en la matriz rocosa</li> <li>- Zona de saturación reducida o inexistente. Almacenamiento muy escaso</li> <li>- Pequeña capacidad natural de regulación</li> <li>- Es muy difícil aumentar la regulación con pozos u otro tipo de captaciones</li> </ul>	(9) y (10) Larra-Navarra, Ufanes-Mallorca, Cadi-Bastareny, diversos casos en el Devónico Pirenaico (Lago San Mauricio, etc) y los Picos de Europa.	
		OTRAS TIPOLOGIAS	ACUIFEROS MULTICAPA	COSTEROS MESOZOICOS (11) BICAPAS O TRICAPAS EN CUENCAS TERCARIAS (12)		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Acuíferos de gran potencia en los que coexisten las tipologías básicas</li> <li>- Sistemas multicapas con situaciones particulares de flujo para el drenaje de cada capa. Sin embargo, se les puede asimilar una red de flujo virtual y única que demuestra la existencia de áreas de recarga con flujo vertical, transporte con flujo lateral, descarga con flujo ascendente y áreas de estancamiento.</li> </ul>	(11) Terminación suroriental del Maestrazgo. (12) Mallorca, algunas depresiones internas de las Béticas.
			ACUIFEROS AISLADOS CERRADOS EN GRANDES CUENCAS TERCARIAS (13)		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Acuíferos con estancamiento de flujo y aguas mineralizadas</li> <li>- Interés como almacén o geotérmico</li> </ul>	(13) Cuenca del Ebro	

## A) CONSIDERACIONES TÉCNICAS

En el cuadro 23 se ha reflejado la relación existente entre los diferentes métodos y algunas consideraciones técnicas como son:

- La facilidad de aplicación, se ha tenido en cuenta tanto la necesidad de contar con técnicos especialistas, como de apoyo informático, cantidad y tipo de datos requeridos, etc.
- Complejidad de los datos requeridos, evaluando si es posible obtener los datos de un estudio hidrogeológico general, de una base de datos o de estudios preexistentes o es necesario realizar ensayos de bombeo, campañas piezométricas o de muestreo, etc.
- Adaptabilidad al modelo hidrogeológico regional, es decir, hasta qué nivel el método empleado considera la singularidad de cada caso adaptándose a él, explicando cualquier hecho particular que pudiera surgir, o si es generalizable o extrapolable a otros casos similares.
- Precisión, ¿en qué medida el perímetro que se obtiene se ajusta al ideal?; si, por ejemplo, se utiliza un criterio de tiempo calculando una isocrona determinada ¿qué tanto por ciento del área encerrada en la isocrona calculada lo estaría en la isocrona real?.

**Cuadro 23. Selección del método en base a consideraciones técnicas**

Métodos	Facilidad de aplicación	Complejidad de los datos requeridos	Adaptabilidad al modelo hidrogeológico regional	Precisión
Radio fijado arbitrariamente	Alta	Baja	Baja	Baja
Radio fijo calculado	Alta	Baja	Media Baja	(1) Media/alta (2) Baja
Métodos analíticos	Media	Media	Media	(1) Alta (2) Media
Métodos hidrogeológicos	Baja	Media/Alta	Alta	(1) Media/baja (2) Media/alta
Modelos matemáticos de flujo y transporte	Baja	Alta	Alta	Alta
Poder autodepurador del terreno	Alta	Baja/Media	Baja	Baja/Media
Empleo de trazadores	Media	Baja/Media	Alta	Alta
Datación con tritio	Alta	Baja	Media/Alta	Media

(1) Gradiente hidráulico bajo y/o sin límites de flujo cercanos a la captación

(2) Gradiente hidráulico alto y/o límites de flujo cercanos a la captación

Fuente: Elaboración propia

Para poder evaluar correctamente la precisión que tienen los distintos métodos es muy interesante compararlos con algún caso en el que la abundancia de información sobre los parámetros hidrogeológicos permita aplicar aquellos de los que se tiene certeza de su elevada precisión.

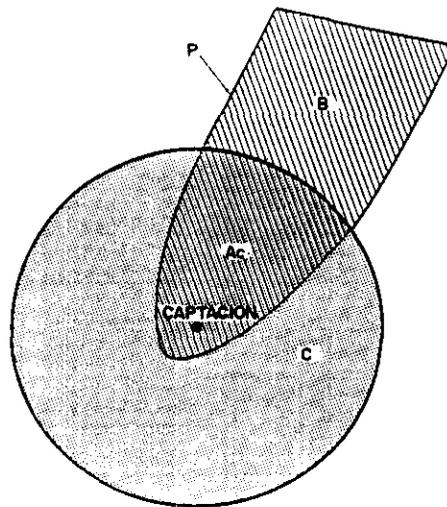
Se trataría de considerar estos métodos técnicamente muy fiables, como podría ser la utilización de modelos numéricos en algunos casos, como patrón, analizando las diferencias que respecto a él presentan los otros.

Por el momento no ha sido posible realizar este análisis en base a casos del territorio español por la escasez de captaciones en las que se ha realizado el perímetro de protección, si bien deberá ser un objetivo en los trabajos que sobre este tema están realizando el ITGE, la Confederación Hidrográfica del Júcar y otros organismos en la actualidad.

En el cuadro 24 se resume el resultado de un trabajo de este tipo realizado por la EPA en EE.UU., en base al perímetro de protección propuesto en tres captaciones, en las que fue posible calibrar con precisión un modelo numérico que se consideró como el patrón para las comparaciones efectuadas con otros métodos.

En dicho cuadro aparecen esquematizadas las principales características del acuífero, lo que permite, en una primera aproximación, extrapolar las conclusiones obtenidas a otros casos parecidos.

En la figura 74 se indica gráficamente lo que representan los porcentajes allí señalados.



Fuente: EPA, 1987

**FIG. 74 AREA PROTEGIDA MEDIANTE LA APLICACION DE DIFERENTES METODOS**

Donde:

*P* es el área dada por el método usado como standard para comparar

*C* es el área dada por el método que se quiere evaluar

Cuadro 24. Análisis comparativo de los perímetros de protección obtenidos por diferentes métodos

Localidad tiempo de tránsito	Sureste de Florida 500 días			Suroeste de Connecticut 5 años			Cape Cod (Massachusetts) 50 años			
Método	R.F.C.	M.A.	M.N.	R.F.C.	M.A.	M.N.	R.F.C.	M.A.	M.N.	
<b>Parámetro de comparación</b>	Función del tiempo de tránsito	Catálogo de formas simples	Modelo de diferencias finitas tridimensional de flujo y transporte	Función del tiempo de tránsito	Catálogo de formas simples	Modelo de diferencias finitas bidimensional de flujo y transporte	Función del tiempo de tránsito	Catálogo de formas simples Método de Horley	Modelo de elementos finitos tridimensional de flujo y transporte	
Porcentaje de área protegida común (A <sub>c</sub> )	57%	100%	100%	100%	91%	100%	41%	79%	100%	
Porcentaje de área sin proteger (B)	43%	0%	0%	0%	9%	0%	59%	21%	0%	
Porcentaje de área protegida sin ser necesario (C)	0%	21%	0%	290%	160%	0%	50%	52%	0%	
CA	Tipo	Libre			Libre			Libre		
	Materiales	Calizas y areniscas			Detriticos: arenas y gravas no consolidadas			Detriticos: arenas y gravas no consolidadas		
	Espesor saturado	b = 91 m			b = 20 m			b = 38 m		
	Transmisividad	T = 1800 m <sup>2</sup> /día			T = 1100 m <sup>2</sup> /día			T = 570 m <sup>2</sup> /día		
	Permeabilidad	K = 20 m/día			K = 55 m/día			K = 15 m/día		
	Gradiente	Bajo (i = n/c)			Alto (i = 0,005)			Alto (i = 0,003)		
	Proximidad a la captación de límites de flujo	No			Sí			Sí		
	Entradas	Infiltración lluvia, ríos, canales y lagos			Infiltración lluvia			Infiltración lluvia		
	Salidas	Bombeos			Bombeos y pequeñas descargas a ríos			Bombeos		

Fuente: Modificado de EPA, 1987

Leyenda: R.F.C.: Radio fijo calculado  
M.A.: Métodos analíticos  
M.N.: Métodos numéricos  
CA: Características del acuífero

Porcentaje de área protegida común (A<sub>c</sub>)  $A_c = \frac{(A_c)}{P} \times 100 \%$   
Porcentaje de área sin proteger (B)  $B = \frac{B}{P} \times 100 \%$   
Porcentaje de área protegida sin ser necesario (C)  $C = \frac{(C-A_c)}{P} \times 100 \%$

Se analizará seguidamente cada caso:

#### - Sureste de Florida

Los resultados obtenidos utilizando el RFC y un método analítico proporcionan unos perímetros con cierta similitud a los señalados mediante el uso de un modelo numérico. Esto se debe a que el gradiente hidráulico es bajo y no existen límites de flujo cercanos.

Aún así debe destacarse que en el primer caso (uso de RFC) queda un 43% del área necesaria sin proteger, en el caso del método analítico está cubierta toda la zona definida por el modelo matemático, representando la zona sobreprotegida tan solo un 21%.

#### - Suroeste de Connecticut

La aplicación del RFC y un método analítico protege prácticamente toda el área necesaria, pero incluyen en los perímetros amplias zonas que no sería necesario haber incorporado, esta sobreprotección es del 160% al usar procedimientos analíticos llegando hasta el 290% al utilizar el RFC.

La mala aplicabilidad de estos métodos en este caso se debe a que hay límites de flujo cercanos y un gradiente regional importante.

#### - Cape Cod, Massachusetts

La utilización de RFC da un resultado muy poco exacto al cubrir mucha menor área de la precisa e incluir muchas zonas que no sería necesario.

Respecto al empleo de métodos analíticos debe indicarse que al usar el catálogo de formas simples queda una superficie considerable sin proteger, principalmente aguas abajo de la captación y se sobreprotegen amplias zonas aguas arriba en el sentido del flujo.

Los resultados son más exactos al emplear el método de Horsley si bien la sobreprotección es aún elevada. En este caso las divergencias se deben también a la existencia de límites de flujo y un gradiente regional considerable.

En la figura 75 se indican los perímetros calculados por los métodos ya citados en esas mismas ciudades pero para distintos tiempos de tránsito.

Se observa claramente como las diferencias se agudizan al considerar tiempos superiores.

La conclusión general que se obtiene de estos ejemplos es la necesidad de realizar un estudio hidrogeológico previo que indique qué métodos serán compatibles con los condicionantes hidrogeológicos.

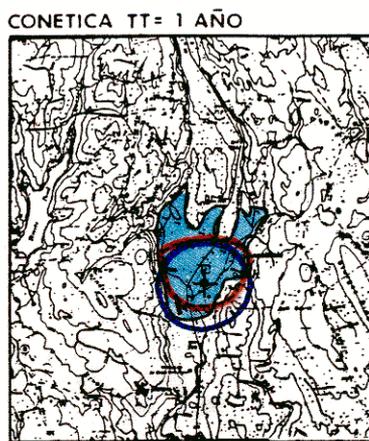
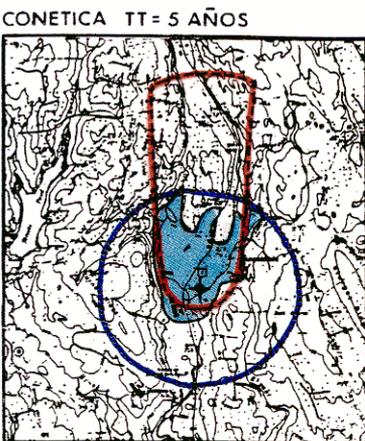
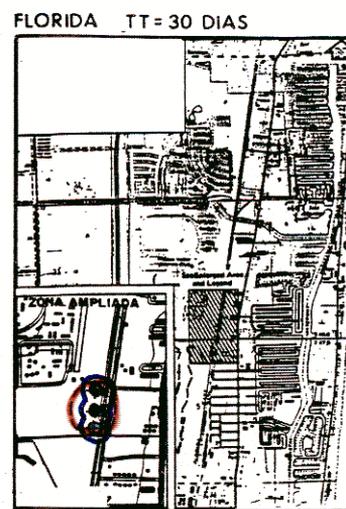
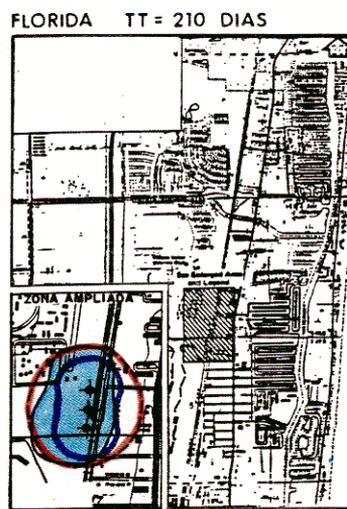
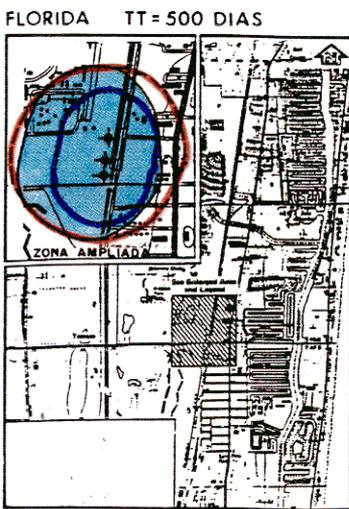
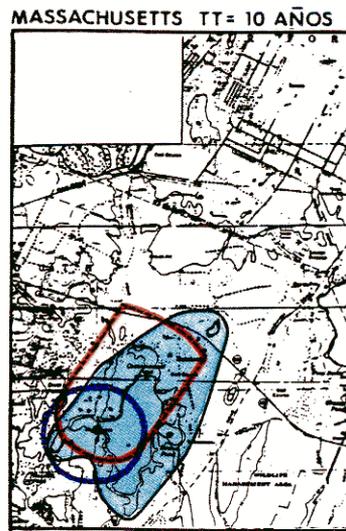
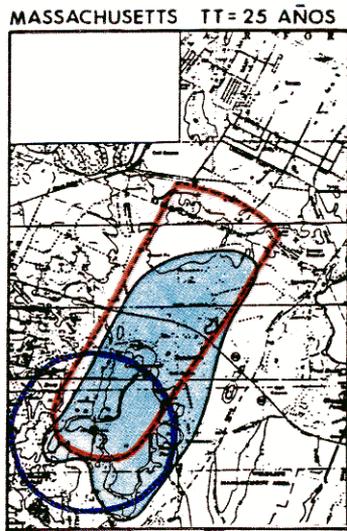
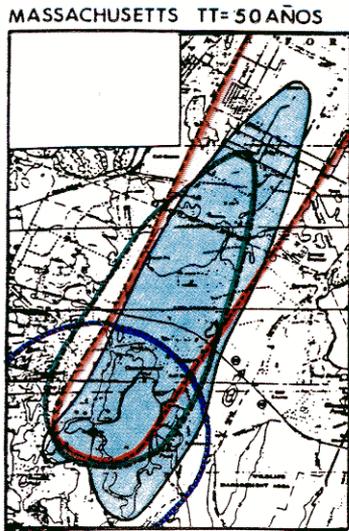
Así la existencia de límites de flujo cercanos a la captación y/o altos gradientes hidráulicos puede obligar a descartar el empleo de métodos que no los tienen en consideración, al disminuir enormemente su exactitud, como se puede observar en los ejemplos precedentes.

En el cuadro 25 se reflejan los datos necesarios para aplicar cada método, desde el radio fijado arbitrariamente en el que no se necesita dato alguno, hasta el empleo de modelos matemáticos con modelos muy elaborados que requieren una gran variedad de datos, pasando por prácticamente todas las situaciones intermedias. Para un análisis con mayor profundidad de cada uno se remite al lector al apartado 7.1.2. en el que aparecen descritos detalladamente.

De forma general aquellos métodos que necesitan más información para proporcionar una respuesta conseguirán mayor precisión pues tienen en cuenta más factores que pueden influir en las características del acuífero que se intenta proteger, no obstante y también dicho de forma general, es más importante la selección de un método adecuado al caso concreto que la circunstancia a veces superflua de que el método tome en consideración una gran variedad de datos de partida.

Prácticamente todos los métodos precisan «conocer» las características del acuífero ( $K$ ,  $b$ ,  $T$ ,  $S$ ,  $m_p$ ) así como el caudal de explotación de la captación. No obstante, no suele ser tenida en cuenta la existencia de límites hidrogeológicos, por lo que si en el estudio hidrogeológico, previo se constata su existencia e influencia sobre el desarrollo del perímetro habrá que añadir las consideraciones que se estimen oportunas a la aplicación del método, siendo en ocasiones un criterio excluyente para la elección del método aplicable como se vió previamente.

Un gran número de los datos requeridos provienen de la realización de un ensayo de bombeo en la captación a proteger, por lo que cabe recordar la importancia de la correcta ejecución e interpretación de dicho ensayo.



**LEYENDA**

- MODELO NUMERICO
- RADIO FIJO CALCULADO (FUNCION TIEMPO DE TRANSITO)
- MODELO ANALITICO CATALOGO DE FORMAS SIMPLES
- MODELO ANALITICO METODO DE HORSLEY
- + CAPTACION
- T.T. TIEMPO DE TRANSITO
- 0 600m ESCALA

LIMITES DE FLUJO CERCANOS A LA CAPTACION	GRADIENTE HIDRAULICO
SI	ALTO
NO	BAJO
SI	ALTO

Fuente: Modificado de EPA, 1987

Fig.75 ANALISIS COMPARATIVO DE DIFERENTES METODOS PARA DISTINTOS TIEMPOS DE TRANSITO EN EL SURESTE DE FLORIDA, SUROESTE DE CONETICA Y CAPE COD (MASSACHUSETTS).

Cuadro 25: Datos necesarios para poder aplicar los diferentes métodos existentes para la delimitación de los perímetros de protección

Método	K	b	T	S	me	i	Q	I	H	d	t	h	D.f	D.t	Dir y sent. de flujo	Limites hidrogeol.	Geometr. del aulf.	Lns	Ls	Análisis	Referencia
Radio fijado arbitrariamente																					7.1.2.A
Radio fijo	Función tiempo				***		***		***												7.1.2.B.1.1
	Función descenso			***	***			***													
Hoffman y Lillch	***	***	***	***	***	***	***			***	***										7.1.2.B.2
Wyssling	***	***			***	***	***								***						7.1.2.B.3
Catálogo de formas simples(1)	***	***		***	***	***	***								***						7.1.2.B.4
Albinet			***	***			***					***									7.1.2.B.5
Tiempo de tránsito por abacos	Sauty y Tyer		***	***		***	***	***								***					7.1.2.B.6.2./3.
	Jacobs y Bear			***	***		***	***	***							***					
Nomógrato de V.W. y V.D		***			***		***	***													7.1.2.B.7
Nomógrato de Pettyjon	***	***			***	***	***						***	***	***						7.1.2.B.8
Horsley		***					***	***	***	***	***	***			***	***					7.1.2.C
Hidrogeológicos												***			***	***	***				7.1.2.D
Modelos de flujo y transporte	***	***	***	***	***		***	***			***	***	***	***	***	***	***				7.1.2.E
Rehse	***				***	***												***	***		7.1.2.F.1
Folsenkoter	***				***	***												***	***		7.1.2.F.2
Transectos																				***	7.1.2.F.3
Transectos																				***	7.1.2.F.4

(1) Solo en la etapa de construcción de catálogo  
Fuente: Elaboración propia

**Leyenda del Cuadro 25**

Parámetros	Símbolo	Dimensiones
Permeabilidad	K	L/T
Espesor saturado del acuífero	b	L
Transmisividad	T	L <sup>2</sup> /T
Coefficiente de almacenamiento	S	Adimensional
Porosidad eficaz	me	Adimensional
Gradiente hidráulico	i	Adimensional
Caudal	Q	L <sup>3</sup> /T
Infiltración	l	L/T
Espesor saturado en la captación	H	L
Descenso	d	L
Tiempo bombeado	t	T
Piezometría previa al bombeo	h	L
Dispersividad longitudinal	D.l	L
Dispersividad transversal	D.t	L
Longitud en zona no saturada	L.ns	L
Longitud en zona saturada	L.s	L

El perímetro de protección propuesto en base a la aplicación del método elegido debe ser defendible, es decir que proponga proteger áreas con límites claramente definidos en base a sólidos argumentos científicos lo que dificultará las posibles acciones legales que pudieran plantear los afectados. A este respecto los métodos de mayor complejidad técnica como es el caso de los modelos matemáticos conllevan un elevado coste de ejecución como veremos en el siguiente apartado, pero los resultados que se obtienen de ellos son más fiables y por tanto será más difícil que prosperen los recursos que puedan plantearse que en el caso de aquellos de muy bajo coste pero de menor rigor científico como el empleo de radio fijo. Estos podrían obligar a realizar expropiaciones en zonas en las que no sería necesario hacerlo quedando otras que sí deberían protegerse fuera del perímetro o dar lugar a perímetros sobredimensionados que, si bien garantizarían la protección requerida, incrementarían notablemente los costes de su aplicación como se verá posteriormente.

## **B) CONSIDERACIONES ECONOMICAS**

### **B1. Coste de la determinación del perímetro según los diferentes métodos.**

El aspecto económico de la elección de un método es un factor muy importante, principalmente cuando se trata de realizar una planificación regional.

Una forma de actuar en dicha planificación podría ser calcular en un principio perímetros de protección mediante métodos sencillos y económicos en un gran número de captaciones, empleando estos resultados como base para la aplicación posterior de otros métodos más exactos pero que implican un desembolso económico mayor.

Es muy difícil cuantificar el coste de un modo general, puesto que los trabajos necesarios para su utilización pueden ser muy diferentes en los distintos

casos prácticos, incluso cuando el método elegido sea el mismo. Esto se debe a que el conocimiento de los parámetros hidrogeológicos es muy dispar en las diferentes regiones.

En el cuadro 26 puede observarse una estimación del coste que supone cada uno de los métodos.

El intervalo existente en el número de horas, y por tanto coste, se debe a la experiencia de los técnicos encargados de su realización y/o a la disponibilidad de los datos. En cualquier caso al elaborar dicho cuadro se ha partido de la presunción de que es fácil la obtención de los parámetros hidrogeológicos requeridos, es decir el importe calculado corresponde esencialmente al coste de las labores de gabinete en la utilización del método una vez que se dispone de los datos técnicos necesarios o cuando su obtención no supone un importe elevado.

Por su parte la columna de sobrecoste potencial que se ha incluido en el cuadro 26 se refiere principalmente a la obtención de los datos de los estudios previos, que fueron descritos en el capítulo 4, y que pueden hacer que el coste real de la delimitación del perímetro de protección se multiplique. En el cuadro 27 se exponen a modo orientativo algunos factores que pueden suponer un sobrecoste apreciable.

Así por ejemplo la obtención de la transmisividad y/o el coeficiente de almacenamiento puede hacer necesaria la realización de un ensayo de bombeo lo que implicaría un gasto adicional de unas 200.000 Ptas.

**Cuadro 26: Coste de la determinación del perímetro de protección según los diferentes métodos**

Métodos	Tiempo requerido para cada captación (horas)	Nivel de experiencia (*)	Coste aproximado por captación	Sobrecoste potencial
Radio fijado arbitrariamente	1-5	1	3500-17500	Bajo
Radio fijo calculado	1-10	2	4500-45500	Bajo
Métodos analíticos	2-20	3	11000-110000	Medio/Alto
Métodos hidrogeológicos	4-40	3	22000-221000	Medio/Alto
Modelos matemáticos de flujo y transporte	10-200	4	77000-1545000	Alto
Poder autodepurador del terreno	1-10	2	4500-45500	Bajo/Medio
Empleo de trazadores	2-20	3	11000-110000	Bajo/Medio
Datación con Tritio	2-20	3	11000-110000	Bajo

(\*) Proyectos por contrata (ITGE 1990)

1. Técnico superior con experiencia menor de cuatro años (3479 ptas/hora)
2. Técnico superior con experiencia entre cuatro y siete años (4562 ptas/hora)
3. Técnico superior con experiencia entre siete y diez años (5523 ptas/hora)
4. Técnico superior especialista (7724 ptas/hora)

Nota: Estos costes llevan incluidos los gastos generales de estructura. Se suponen jornadas de 8 horas, 20 días al mes, 11 meses al año.

Fuente: Elaboración propia.

**Cuadro 27: Sobrecoste potencial en la determinación del perímetro de protección**

CONCEPTO		Importe Unitario (*)	Total Estimado
ANALISIS DE LA SITUACION DEL ABASTECIMIENTO			50.000/150.000
ESTUDIO HIDROGEOLOGICO			100.000/500.000
INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA		7.500	75.000
INVENTARIO DE FOCOS POTENCIALMENTE CONTAMINANTES			100.000/200.000
ESTUDIO DE VULNERABILIDAD			50.000/200.000
ENSAYOS DE BOMBEO (CONTROL E INTERPRETACION)		200.000	200.000
TOMA DE MUESTRAS		5.300	53.000
ANALISIS QUIMICO NORMAL		7.500	37.500
ANALISIS QUIMICO COMPLETO		22.000	110.000
ANALISIS MICROBIOLOGICO		7.800	78.000
ANALISIS ISOTOPICO	TRITIO	25.000	25.000
	O <sup>18</sup> , DEUTERIO	15.000	15.000
TRAZADORES			**
ESTUDIO SOCIOECONOMICO SOBRE EL IMPACTO DE APLICACION DEL PERIMETRO			100.000/200.000
MECANOGRAFIA Y DELINEACION			200.000

\* Precio aplicable a los proyectos del ITGE en 1991

\*\* Precio muy variable dependiendo de las características hidrogeológicas locales

Fuente: Elaboración propia.

Así mismo el inventario de puntos de agua y la realización una campaña de control piezométrico para determinar el gradiente hidráulico y otros trabajos suponen un aumento considerable del gasto que debe realizarse.

En los perímetros de protección de captaciones de abastecimiento urbano realizados por el ITGE y la Confederación Hidrográfica del Júcar en los años 1989 y 1990 cuyo importe por población, en la que se protegen sus captaciones oscila de 700.000 a 1.400.000 en función del número de las mismas y sus peculiaridades, la aplicación del método una vez que se dispone de los datos previos necesarios supone tan solo un 20% a un 30% del importe total. Es decir la mayor parte del gasto corresponde a lo que en el cuadro 26 se ha llamado sobrecostes. En ninguna de esas poblaciones se utilizaron modelos matemáticos, resolviéndose mediante el empleo de diferentes métodos analíticos por lo que pueden variar dichos porcentajes en otros casos.

## **B.2. Impacto socioeconómico de la aplicación del perímetro de protección**

Una vez dimensionado el perímetro de protección, fijados sus límites y su distribución en zonas, establecidas las restricciones de actividad sobre la superficie de dichas zonas y diseñado el sistema de vigilancia y alerta que asegura su óptimo funcionamiento como sistema de salvaguarda contra la contaminación, es necesaria su implantación sobre el terreno, dicha implantación llevará consigo un coste que puede dividirse en dos apartados:

### **1. Coste técnico objetivo**

Derivado de la aplicación del perímetro e independiente de las características socioeconómicas del lugar donde se vaya a implantar, básicamente consiste en las obras e instalaciones en la captación, acondicionamiento de la zona inmediata o de protecciones absolutas, instalación de sistemas automatizados de control, etc.

### **2. Coste variable**

Producto de las posibles restricciones impuestas a la actividad socioeconómica sobre cada una de las áreas del perímetro se derivarán unos costes extraordinariamente variables en los cuales se engloban:

- Modificación del uso del suelo
- Expropiaciones, indemnizaciones
- Modificación de obras civiles
- Modificación/traslado de actividades potencialmente contaminantes (industriales, agrícolas, ganaderas, etc.)

En algunas ocasiones es muy recomendable incluir en estos gastos la realización de campañas informativas que expliquen la necesidad de su aplicación y los beneficios que reportará a la comunidad.

Para calcular estos costes es imprescindible estudiar la calificación de los terrenos que serán afectados por el perímetro (ver apartado 4.4.), analizar si será necesario indemnizar a los propietarios por las limitaciones o condicionantes al uso de los mismos que el perímetro suponga, y evaluar en su caso el coste de dichas indemnizaciones.

El ITGE y la Confederación Hidrográfica del Júcar realizaron en 1989 un estudio sobre el marco legal existente obteniendo las siguientes conclusiones:

En primer lugar se señala la improcedencia de solicitar indemnizaciones respecto a la limitación del otorgamiento de nuevas concesiones de agua o autorizaciones de vertidos dada su previa inexistencia.

El Artículo 173 del Reglamento de Dominio Público Hidráulico establece en sus apartados 4 y 5 la posibilidad de imponer limitaciones al otorgamiento de nuevas concesiones y autorizaciones de vertidos en los perímetros de protección, así como condicionamientos a las actividades que puedan afectar a la calidad o cantidad de las aguas subterráneas, las cuales aparecen listadas en el apartado 6 del citado artículo.

Por lo que respecta a actividades ya existentes, el problema es más complejo.

Como se vió anteriormente las actividades a las que pueden imponerse limitaciones aparecen reflejadas en el artículo 173, apartado 6 del Reglamento. Se indica en el apartado 7 del mismo artículo que dichos condicionamientos «*deberán ser tenidos en cuenta en los diferentes planes urbanísticos o de ordenación del territorio con los que se relacionan*».

La pregunta que debe plantearse es si se puede considerar como limitación al normal ejercicio de los derechos el cumplimiento de las obligaciones impuestas por la legislación hidráulica. De su respuesta dependerá la obligación de indemnizar por tales limitaciones y obligaciones.

Estas limitaciones aparecen reflejadas en los siguientes artículos:

Ley de Aguas. Art. 84, en el que se indica la necesidad de impedir la acumulación de compuestos que puedan contaminar las aguas subterráneas.

Ley de Aguas. Art. 89, en el que se prohíbe efectuar vertidos directos o indirectos que contaminen las aguas. Así como el ejercicio de actividades dentro de los perímetros de protección fijados en los Planes Hidrológicos cuando pudieran constituir un peligro de contaminación o degradación del Dominio Público Hidráulico.

Ley de Aguas. Art. 92, en el que se indica la necesidad de someter a autorización administrativa aquellas actividades susceptibles de provocar la contaminación o degradación del Dominio Público Hidráulico.

RDPH Art. 254 y sucesivos, establecen sendas relaciones de sustancias nocivas anexas a su título especificándose en el Art. 257 las prohibiciones y limitaciones de éstas.

La respuesta a ese interrogante ha de ser necesariamente negativa.

La legislación urbanística en el Art. 87 del actual texto refundido de la Ley del Suelo indica:

*«La ordenación del uso de los terrenos y construcciones enunciada en los artículos precedentes no conferirá derecho a los propietarios a exigir indemnización, por implicar meras limitaciones y deberes que definen el contenido normal de la propiedad según su calificación urbanística»*

Esta consideración del contenido del derecho de propiedad no limitado, sino definido como parte integrante del mismo por su función social, ha sido claramente expuesta por el Tribunal Constitucional en su Sentencia de 26 de marzo de 1987, que parte a su vez de la doctrina sentada sobre el contenido esencial de los derechos en su precedente sentencia de 8 de abril de 1981.

Así pues, en la medida que las limitaciones o condicionantes respondan a obligaciones impuestas por la legislación hidráulica, no generan indemnización por cuanto tales obligaciones conforman el contenido esencial del derecho de propiedad en este ámbito.

Es pertinente también la referencia, en este caso, a la normativa reguladora de las actividades molestas, insalubres, nocivas y peligrosas.

Tanto en el viejo Reglamento aprobado por Decreto 2415/61 de 30 de Noviembre, como en la más reciente Ley de la Generalitat Valenciana 3/89 de 2 de mayo (de aplicación sólo en su ámbito), se prevé la posibilidad de imponer, con posterioridad a la obtención de licencia de inicio de las actividades, las medidas

correctoras suplementarias que resulten imprescindibles, aún cuando excedan de las contempladas en el Proyecto y en la Licencia.

La conclusión final, obtenida en ese estudio, fue que surgirá el derecho a indemnizar tan sólo en aquellos casos en que actividades preexistentes ajustadas al ordenamiento de aplicación devengan radicalmente incompatibles o económicamente inviables a consecuencia de las limitaciones o condicionantes impuestos por la delimitación del perímetro; en tales supuestos, la indemnización procedente derivará del juego de los preceptos contenidos en la legislación de expropiación forzosa.

Si en base a las consideraciones efectuadas previamente se determinase que el coste final de aplicación del perímetro de protección propuesto fuese demasiado elevado, podría optarse entre:

- a) Aplicar otro método más exacto para la delimitación del perímetro cuando exista la posibilidad de que esté sobredimensionado, recurriéndose normalmente al empleo de modelos numéricos.

En esta elección se asume que el incremento en el coste de definición quedará compensado al reducir el área a expropiar a la estrictamente necesaria, lo que en ocasiones puede suponer un ahorro considerable.

- b) Evaluar la posibilidad de trasladar la captación a otro lugar en el que la actividad socioeconómica no suponga un riesgo para la calidad y cantidad del agua extraída.

Esta segunda opción debe analizarse con sumo cuidado sobre todo si se considera la necesidad de asegurar los caudales que proporciona la captación que pretende ser sustituida.

- c) Una solución intermedia consistiría en disminuir el caudal de explotación del sondeo (suplementando el déficit con alguna fuente alternativa) a fin de limitar la extensión del perímetro. Esta tercera solución es difícilmente aplicable en acuíferos kársticos (sensu stricto) donde se emplea como método para definir el perímetro la existencia de límites hidrogeológicos, pues la dinámica del agua en el acuífero, es muy rápida y una disminución del caudal de bombeo no modifica necesariamente la extensión del perímetro.

## 7.2. Protección de la cantidad

Todos los métodos que han sido descritos en el apartado 7.1. tienen como objetivo salvaguardar la calidad de las aguas extraídas en las captaciones de aguas subterráneas.

No obstante, la legislación española obliga a garantizar igualmente la permanencia de los caudales obtenidos en las mismas.

Esta protección debe enmarcarse en un contexto más amplio que el correspondiente a una sola captación, puesto que carecería de sentido salvaguardar unos volúmenes de extracción elevados en unas poblaciones, las primeras en las que se realizase el perímetro de protección, sin considerar su influencia en otras captaciones de abastecimiento urbano, por lo que debe analizarse en un marco más amplio que sería el correspondiente a los distintos planes hidrológicos.

Asimismo debe destacarse que la delimitación de áreas con el objetivo de salvaguardar los caudales extraídos por las captaciones de abastecimiento requiere una metodología diferente a la empleada en esta guía cuyo objetivo es proteger la calidad de las mismas, por lo que sólo cabe aquí hacer algunas consideraciones sobre el marco legal referente a esta materia.

En el Artículo 40 de la Ley de Aguas se especifica que los Planes Hidrológicos de cuenca comprenderán obligatoriamente:

- a) *El inventario de los recursos hidráulicos*
- b) *Los usos y demandas existentes y previsibles*
- c) *Los criterios de prioridad y de compatibilidad de usos, así como el orden de preferencia entre los distintos usos y aprovechamientos*
- d) *La asignación y reserva de recursos para usos y demandas actuales y futuras, así como para la conservación o recuperación del medio natural.*

Por otra parte respecto a las prioridades en la concesión de volúmenes de extracción, en el Artículo 58 de la misma Ley se indica:

1. *En las concesiones se observará, a efectos de su otorgamiento, el orden de preferencia que se establezca en el Plan Hidrológico de la cuenca correspondiente, teniendo en cuenta las exigencias para la protección y conservación del recurso y su entorno.*

2. *Toda concesión está sujeta a expropiación forzosa, de conformidad con lo dispuesto en la legislación general sobre la materia, a favor de otro aprovechamiento que le preceda según el orden de preferencia establecido en el Plan Hidrológico de cuenca.*

*A falta de dicho orden de preferencia regirá con carácter general el siguiente:*

- 1º. *Abastecimiento de población, incluyendo en su dotación la necesaria para industrias de poco consumo de agua situadas en los núcleos de población y conectadas a la red municipal.*
- 2º. *Regadíos y usos agrarios.*
- 3º. *Usos industriales para producción de energía eléctrica.*
- 4º. *Otros usos industriales no incluidos en los apartados anteriores.*
- 5º. *Acuicultura.*
- 6º. *Usos recreativos.*
- 7º. *Navegación y transporte acuático.*
- 8º. *Otros aprovechamientos.*

*El orden de prioridades que pudiere establecerse específicamente en los planes hidrológicos de cuenca, deberá respetar en todo caso la supremacía del uso consignado en el apartado 1º de la precedente enumeración.*

Por lo que respecta a las extracciones de aguas minerales y termales, al ser un recurso minero, no son contempladas por la Ley de Aguas, sino por la Ley de Minas, la cual en el artículo 26.3. señala: «... Asimismo, en todos los expedientes relativos a aguas minerales y termales, informarán los Ministerios de Obras Públicas y de Agricultura en relación con otros posibles aprovechamientos que se estimen de mayor conveniencia. De no existir conformidad entre los Departamentos citados y el de Industria, se resolverá el expediente por acuerdo del Consejo de Ministros».

No obstante debe considerarse que las competencias en materia de aguas minerales y termales están transferidas a las Comunidades Autónomas, por lo que será necesario dirigirse al organismo de éstas que se haya hecho cargo de las mismas.

Afortunadamente, la mayoría de las unidades hidrogeológicas poseen recursos suficientes para cubrir las necesidades de las poblaciones en ellas asentadas, así como otros usos (agrícolas, industriales, etc.).

El problema que suele plantearse es que la distribución de las captaciones no es homogénea por lo que podrían producirse afecciones entre ellas, aunque el volumen total no supere a los recursos medios renovables de la unidad hidrogeológica.

A este respecto cabe señalar que en el Artículo 184 del Reglamento del dominio público hidráulico (RDPH) se entiende por afección:

*«Una disminución del caudal realmente aprovechado o un deterioro de su calidad que lo haga inutilizable para el fin a que se dedicaba, y que sea consecuencia directa y demostrada del nuevo aprovechamiento, pero no la simple variación del nivel del agua en un pozo, o la merma de caudal en una galería o manantial, si el remanente disponible es igual o superior al anteriormente aprovechado».*

Los condicionantes generales que la legislación establece para evitar la afección de las nuevas captaciones a las ya existentes son escasos.

Así en el apartado 2 del Artículo 87 del RDPH se establece:

2. *Cuando la extracción de las aguas sea realizada mediante apertura de pozos, las distancias mínimas entre éstos o entre pozos y manantial, serán las que señale el Plan Hidrológico de cuenca y en su defecto, para caudales inferiores a 0,15 litros/segundo, la de diez metros en suelo urbano, de veinte metros en suelo no urbanizable, y de cien metros en caso de caudales superiores al mencionado. Iguales distancias deberán guardarse, como mínimo, entre los pozos de un predio y los estanques o acequias no impermeabilizados de los predios vecinos.*

En el Artículo 184 del RDPH, se establece que la concesión debería ajustarse a las siguientes condiciones:

- a) *Las que fije, en su caso, el Plan Hidrológico de cuenca para cada acuífero o unidad hidrogeológica. Dichas condiciones se referirán al caudal máximo instantáneo, distancias a otros aprovechamientos y corrientes de agua naturales o artificiales, profundidad de la obra y de la colocación de la bomba y demás características técnicas que se consideren en dicho plan.*

- b) *A falta de definición en el Plan Hidrológico, la distancia entre los nuevos pozos y los existentes o manantiales no podrá ser inferior a 100 metros sin el permiso del titular del aprovechamiento preexistente legalizado. Excepcionalmente, se podrán otorgar concesiones a menor distancia si el interesado acredita la no afección a los aprovechamientos anteriores legalizados. Si, una vez otorgada la concesión en las condiciones señaladas en este párrafo, resultaren afectados los aprovechamientos anteriores, se clausurará el nuevo sin derecho a indemnización.*

En base a estas limitaciones legales en las zonas en las cuales no está elaborado el Plan Hidrológico pueden realizarse nuevas captaciones con muy pocos condicionantes previos, pero éstas podrán ser clausuradas si afectan a aprovechamientos anteriores, por lo que parece necesario analizar esta posibilidad con antelación.

Los estudios necesarios para evaluar la posible afección entre diversas captaciones, y poder definir las regulaciones precisas en una zona para garantizar el volumen extraído en la captación objeto de análisis, serán de diferente índole en cada caso, obteniéndose zonas de protección de la cantidad de extensión muy variable.

En el caso de que el sondeo que se pretende proteger capte un acuífero en el cual las extracciones sean superiores o similares a los recursos, las restricciones a las extracciones podrán afectar a la totalidad del acuífero.

No obstante, en la mayoría de los casos su extensión será mucho menor, pudiendo incluso quedar incluida en el ámbito de las zonas de protección de la calidad.

Para definirla debe utilizarse el análisis hidrogeológico que permite estimar en una primera aproximación la posible interrelación entre diferentes captaciones, siendo muy recomendable complementarlo con otros métodos que permitan cuantificar la misma.

En este sentido el empleo de modelos matemáticos de flujo adquiere una gran importancia al poder simular diferentes hipótesis de extracción de aguas subterráneas obteniendo los efectos en el acuífero. Esto nos permitirá evaluar las interrelaciones existentes entre los diferentes aprovechamientos y la influencia que tendría en su área determinada la puesta en funcionamiento de nuevas captaciones, definiendo en

base a esto el área de protección y las restricciones adecuadas a cada caso.

Como se ve la definición de la zona de protección de la cantidad es un trabajo sumamente complejo, siendo un objetivo inabordable en la mayoría de los estudios para delimitar perímetros de protección de captaciones en aquellos casos en los que aún no esté elaborado el Plan Hidrológico de cuenca correspondiente.

### 7.3. Mecanismos de control de los perímetros de protección

#### 7.3.1. Sistema de vigilancia

El establecimiento de un perímetro de protección no garantiza por sí solo de forma absoluta la calidad del agua extraída en una captación ya que su propia delimitación dista a veces del «ideal teórico» y además la posibilidad de fenómenos accidentales suele ser grande, en especial en lugares donde la intensidad o características de la actividad humana (industrias, vías de comunicación, agricultura, etc.) impongan un fuerte riesgo añadido.

La forma más eficaz de asegurar esta protección consiste en el diseño de un sistema de vigilancia que permita detectar en cualquier momento la presencia de un fenómeno contaminante con tiempo suficiente para detener el bombeo, evitándose la entrada del contaminante en la red general de distribución y tomando las medidas más adecuadas, con el fin de eliminar la contaminación.

La necesidad de establecer un sistema de estas características ha de evaluarse en función de al menos tres parámetros:

- **Riesgo de accidentes contaminantes.** La ponderación de este riesgo resultará sencilla si en la definición del perímetro se realizó un buen estudio sobre focos potenciales de contaminación.
- **Vulnerabilidad del acuífero frente a la contaminación,** estudio que también parte de los trabajos previos de definición del perímetro.
- **Exactitud del perímetro.** En principio es adecuado suponer que aquellos perímetros realizados mediante el empleo de técnicas más elaboradas serán más exactos, proporcionando un mayor nivel de defensa frente a la contaminación.

El sistema de vigilancia, para ser eficaz ha de cumplir al menos dos objetivos:

- Detectar cualquier variación en la composición del agua que va a ser extraída en la captación. Este punto reviste una especial dificultad, sobre todo de orden económico, pues si bien teóricamente la realización de análisis «completos» solventaría el problema, éstos, en especial la determinación de metales y compuestos orgánicos traza, son muy caros. Será necesario pues, diseñar los análisis en función de los contaminantes que presumiblemente pueden aparecer, además de realizar controles de parámetros menos específicos pero fácilmente determinables (pH, Eh, Tª, Conductividad, etc.) debiendo ser valorada la conveniencia del establecimiento de controles continuos.
- Detectar la contaminación con tiempo suficiente para poder actuar. Para ello será preciso un estudio exhaustivo de los puntos en los que con mayor probabilidad pueda producirse un fenómeno puntual de contaminación, en especial vías de comunicación, depósitos, almacenes, nudos ferroviarios, industrias, zonas de vertidos, etc.

No obstante, es conveniente realizar algunas consideraciones en torno a las limitaciones que la propia dinámica del acuífero o de los contaminantes imponen al rendimiento exigido al sistema de vigilancia.

1. El movimiento del agua en el seno del acuífero es, por lo general, un proceso muy lento (excepto en materiales kársticos o fisurados), y pueden transcurrir meses o incluso años desde que se produjo la contaminación hasta que es detectada por el sistema de vigilancia. La velocidad del movimiento del contaminante en el acuífero está determinada fundamentalmente por la del agua (que a su vez, claro está, viene determinada por las características hidrodinámicas del acuífero) tratándose de un parámetro muy variable; basta como ejemplo considerar la diferencia en la velocidad del agua que puede haber cuando se mueve a través de unas gravas limpias (valores de  $K \approx 10^{-2}$  m/s o la de unas arenas finas arcillosas (con  $K$  del orden de  $10^{-9}$  m/s).

No obstante puede paliarse el problema del retardo entre el momento de la contaminación y su detección, incrementando la densidad de puntos de muestreo en las zonas con posibles focos de contaminación, con la esperanza de obtener una alerta más rápida al disminuir el recorrido que deberá hacer el

contaminante entre el vertido y su detección.

2. Los contaminantes sufren variaciones en su naturaleza, debido a procesos químicos o biológicos que modifican su estructura molecular, estos procesos serán más intensos cuanto mayor sea el tiempo transcurrido desde la liberación de la sustancia madre, debido a que el contacto con los agentes modificadores será también mayor.

La principal consecuencia de este hecho consiste en que, con gran frecuencia, la especie química detectada en el punto de control es muy diferente a la que produjo la contaminación primaria.

Los principales procesos que causan la modificación de los contaminantes son:

- El agua, al atravesar el terreno, sufre un filtrado mecánico cuya intensidad dependerá de las características del propio terreno (será menor a mayor tamaño de poro y así mismo, el filtrado es más eficiente cuanto más homogénea es la distribución del poro). Este filtrado es capaz en ciertas ocasiones de retener no sólo ramas, hojas, arena, limos, arcillas, residuos sólidos, etc., sino que pueden llegar a ser retenidas algunas bacterias, algas y hongos.

No se retendrán sustancias en disolución ni líquidos por este proceso, aunque, en función de la viscosidad del mismo (grasas o aceites muy viscosos), su avance puede llegar a ser inapreciable.

El proceso de filtrado es prácticamente inexistente en zonas kársticas o intensamente fisuradas.

- Una vez superada esta fase de filtrado comienza un proceso que perdurará durante todo el recorrido del contaminante por el acuífero. Se trata del fenómeno de dilución, que se produce al irse mezclando el contaminante con el agua que circula de forma natural. La dilución (especialmente en aguas superficiales) y dispersión de contaminantes, ha sido durante muchos años la única forma de deshacerse de productos no deseables; este método, nada recomendable en aguas de superficie lo es aún menos en las subterráneas, debido no sólo a que no se asegura la destrucción o inactivación del contaminante, sino que además, se produce un fenómeno de almacenamiento (de forma que, aunque en principio los niveles pueden ser aceptables), pueden provocarse situaciones puntuales de sobreconcentración y en cualquier caso a la larga se alcanzarían niveles no adecuados. Por otro

lado las características propias del medio subterráneo implican un lento movimiento del agua y por ello una lenta dilución.

- Otro proceso de gran influencia sobre la composición final del agua son los de absorción y adsorción, ambos muy dependientes tanto de la naturaleza del terreno como de los propios contaminantes, el principal efecto producido por estos fenómenos consiste en un fuerte retardo en la circulación del agente extraño por el terreno e incluso puede llegarse a una retención total.

La absorción y adsorción presentan un «límite de saturación» a partir del cual el terreno ya no es capaz de retener más sustancia; cuando se producen fenómenos de esta naturaleza se pueden producir aumentos repentinos y de difícil explicación en la concentración de alguna sustancia que al principio era fuertemente retenida hasta que, llegando al límite de saturación de forma repentina deja de serlo y aparece en las muestras de agua.

Los metales pesados, que pueden ser adsorbidos por otros iones y tradicionalmente se consideraban relativamente inmóviles, han sido descubiertos a grandes distancias de su lugar de vertido. Estos movimientos parecen estar favorecidos por coloides y macromoléculas, dispersándose más rápidamente que el flujo subterráneo medio, si bien su impacto está aún insuficientemente evaluado.

Hasta aquí se han descrito procesos cuyo único efecto es el de retener la sustancia extraña y aunque no modifican directamente su naturaleza, al aumentar el tiempo de contacto con el medio, facilitan la interacción con los agentes modificadores. Se hace a continuación una descripción de éstos:

### **Procesos de Oxidación-Reducción**

Los procesos de oxidación se relacionan generalmente de forma directa por el oxígeno disuelto en el agua, pudiendo oxidarse moléculas con un potencial reductor suficiente. El ambiente más fuertemente oxidante corresponde a los niveles superiores de la zona no saturada, pero también pueden continuar estos procesos en la zona saturada si aún queda oxígeno disuelto o existe algún otro oxidante.

Por otra parte existen procesos microbiológicos anaerobios capaces de producir la oxidación de materia orgánica a partir de la reducción de nitratos, sulfatos o compuestos férricos o mangánicos presentes en el medio.



Estos fenómenos son causa de la precipitación o redisolución de sustancias (es típica por ejemplo la producción de sulfuros insolubles, o la precipitación de sales ferrosas).

Los fenómenos bacterianos anaeróbicos dan lugar a una gran variedad de productos intermedios de reacción, que confieren al agua malos olores (producción de aminas, como la putrescina o cadaverina), malos sabores o incluso coloraciones anómalas. Es de destacar el comportamiento de los compuestos nitrogenados (pues muy frecuentemente son causa de contaminación y son empleados normalmente como índice de la misma). El producto final de degradación nitrogenado que se detecte en el agua dependerá fundamentalmente de las circunstancias redox por las que haya atravesado; así puede encontrarse  $\text{NO}_3^-$  o éste ser reducido a  $\text{N}_2$  o  $\text{NH}_4^+$  a su vez el  $\text{NH}_4^+$  se oxida con frecuencia al  $\text{N}_2$ ,  $\text{NO}_2^-$  o  $\text{NO}_3^-$ , etc.

El ion  $\text{NO}_2^-$  muy raramente se encuentra en las aguas naturales empleándose por ello como seguro indicador de contaminación orgánica;  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{S}_2$ ,  $\text{SH}_2$ , pueden ser producto no sólo de un medio reductor, porque la descomposición de materia orgánica en medio no muy oxidante también los produce.

### Intercambio iónico

Cuando existe en el terreno una cierta proporción de minerales de arcilla (algunos polímeros orgánicos naturales también producen estos fenómenos) se producen procesos de intercambio iónico, mediante los cuales pueden quedar retenidos de forma permanente iones como el amonio o, el potasio, o lo que es más frecuente variar la relación de concentraciones de iones como  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Sr}^{++}$ . Obsérvese como el amonio, que es en general un buen indicador de contaminación, puede llegar a ser retenido de forma irreversible por los materiales del suelo, es éste un claro ejemplo de cómo puede llegar a modificarse el contenido original en algunas sustancias del agua, debido a la interacción con el medio.

### Desintegración radiactiva

Como ya se ha explicado el movimiento del agua en el acuífero puede ser muy lento, si se produce una contaminación por isótopos radiactivos de muy corta vida (por ejemplo los empleados en medicina y biología como trazadores I-131 con una semivida de ocho días, el Na-24 con semivida de 15 h o el K-42 con semivida de 2,5 h) puede suceder que su presencia llegue a ser indetectable mediante las técnicas normalmente empleadas en análisis de aguas cuando llegue al punto de control.

## Fenómenos de precipitación y coprecipitación

Para valores de pH comprendidos entre 6 y 8 se provoca la formación de hidróxidos férricos y mangánicos ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Mn}(\text{OH})_3$ ) que al ser insolubles precipitan arrastrando consigo por fenómenos de precipitación y coprecipitación, cationes pesados y algunos aniones como  $\text{F}^-$  o  $(\text{PO}_4)_2^{3-}$ .

Otra de las causas frecuentes de precipitaciones es la formación de sulfuros insolubles a partir del  $\text{SH}_2$  procedente de la actividad bacteriana reductora.

Los contaminantes orgánicos serán transportados por el agua, mejor o peor, en función de su polaridad; los compuestos polares se disuelven con el agua formando puentes de hidrógeno, mientras que los apolares son generalmente inmiscibles.

La principal vía de degradación de estos compuestos es la metabolización bacteriana, pudiendo producirse tres tipos de procesos:

- Activación, si el producto resultante es más tóxico que la sustancia madre.
- Detoxificación o inactivación, si el metabolito pierde sus propiedades tóxicas.
- Degradación, si la molécula pierde complejidad al ser metabolizada, la degradación puede dar lugar a una nueva molécula, más o menos tóxica que la primitiva.

La adsorción y volatización son también de gran peso en el caso de sustancias orgánicas.

3. Una muestra de agua tomada en un punto representa, en el mejor de los casos la calidad de un área muy restringida. En realidad, la extensión de este área es muy variable, dependiendo básicamente de las características hidrodinámicas del acuífero. Cuando se esté ante un acuífero de alta permeabilidad, donde el agua se mueve de forma relativamente rápida, el área representada por cada punto de muestreo será mayor; también será mayor en acuíferos muy homogéneos. No obstante, como se ha dicho, ese área será siempre reducida.
4. Una vez introducida una sustancia en el seno del acuífero suele ser muy difícil de eliminar (a veces imposible), en especial cuando las características propias del acuífero impongan un movimiento muy lento al agua.

Establecida la necesidad de un sistema de vigilancia así como los objetivos que ha de cumplir y sus limitaciones, se debe establecer de forma práctica su

diseño. El éxito del sistema dependerá de un gran número de circunstancias difícilmente valorables de forma general, pero desde el punto de vista del diseño estrictamente, se puede decir que tendrá éxito si es posible responder adecuadamente a tres cuestiones:

- ¿Dónde han de ser localizados los puntos de control?
- ¿Qué determinaciones físicas o químicas es necesario realizar?
- ¿Cuál será la frecuencia de muestreo?

Los puntos de control estarán situados en el área de acuífero que alimenta a la captación, de forma que corten las líneas de flujo hacia ésta, a una distancia tal que permitan una actuación en el intervalo entre la contaminación, la detección, y su llegada al sondeo. Además los puntos del control deberán estar próximos a los focos potenciales de contaminación.

La frecuencia de muestreo viene dada por las características dinámicas del acuífero, siendo mayor cuando dicha dinámica implique un rápido movimiento del agua (acuíferos muy permeables como los kársticos o fisurados) pues presentan una rápida respuesta al vertido. También es necesario valorar el tipo de contaminante que presumiblemente puede encontrarse, pues su naturaleza física (sólido disuelto, o en suspensión, líquido miscible o no con el agua, gases), sus propiedades físico-químicas, el nivel de absorción y adsorción por el terreno, el factor de biodegradabilidad, fotosensibilidad, reactividad con compuestos del medio o con otros contaminantes, etc., son factores de fuerte influencia sobre la frecuencia idónea de muestreo. Así por ejemplo, una sustancia muy tóxica pero rápidamente neutralizable por algún agente del medio (sería el caso de algunos venenos orgánicos biodegradables) podría provocar la aparición de intoxicaciones puntuales difíciles de determinar si la red no dio la alarma a tiempo y el producto ya ha sido degradado.

Esta fácil transformación de algunas sustancias es causa por otro lado, de que en función del tiempo transcurrido entre la toma de muestras se puedan detectar especies químicas de diversa naturaleza, todas procedentes de una misma sustancia original.

Por último, los parámetros a controlar serán definidos según el tipo de actividad contaminante predominante en la zona ya sea industria (metalúrgica, textil, papelera, etc.), agricultura, actividad urbana, etc.

Ha de hacerse una mención especial de aquellos casos en los que exista riesgo de procesos de intrusión marina, pues el control de la posición del frente de intrusión requiere por lo general de la instalación de un sistema de registro continuo (conductividad y  $\text{T}^\circ$ , al menos) en cuantos puntos se estime necesario.



A título de ejemplo se refleja el esquema de funcionamiento del plan de socorro del Ministerio de Agricultura Francés (ver figura 76), que muy bien pudiera servir de base a la implantación de uno similar en nuestro país.

### 7.3.2. Plan de intervención

De nada serviría disponer de un eficaz sistema de alerta si luego se carece de los medios adecuados para combatir o evitar los efectos que conlleva el fenómeno contaminante, por ello ha de establecerse un plan general de intervención a nivel de cuenca, adaptándolo a cada caso concreto.

El plan contemplará al menos los siguientes puntos:

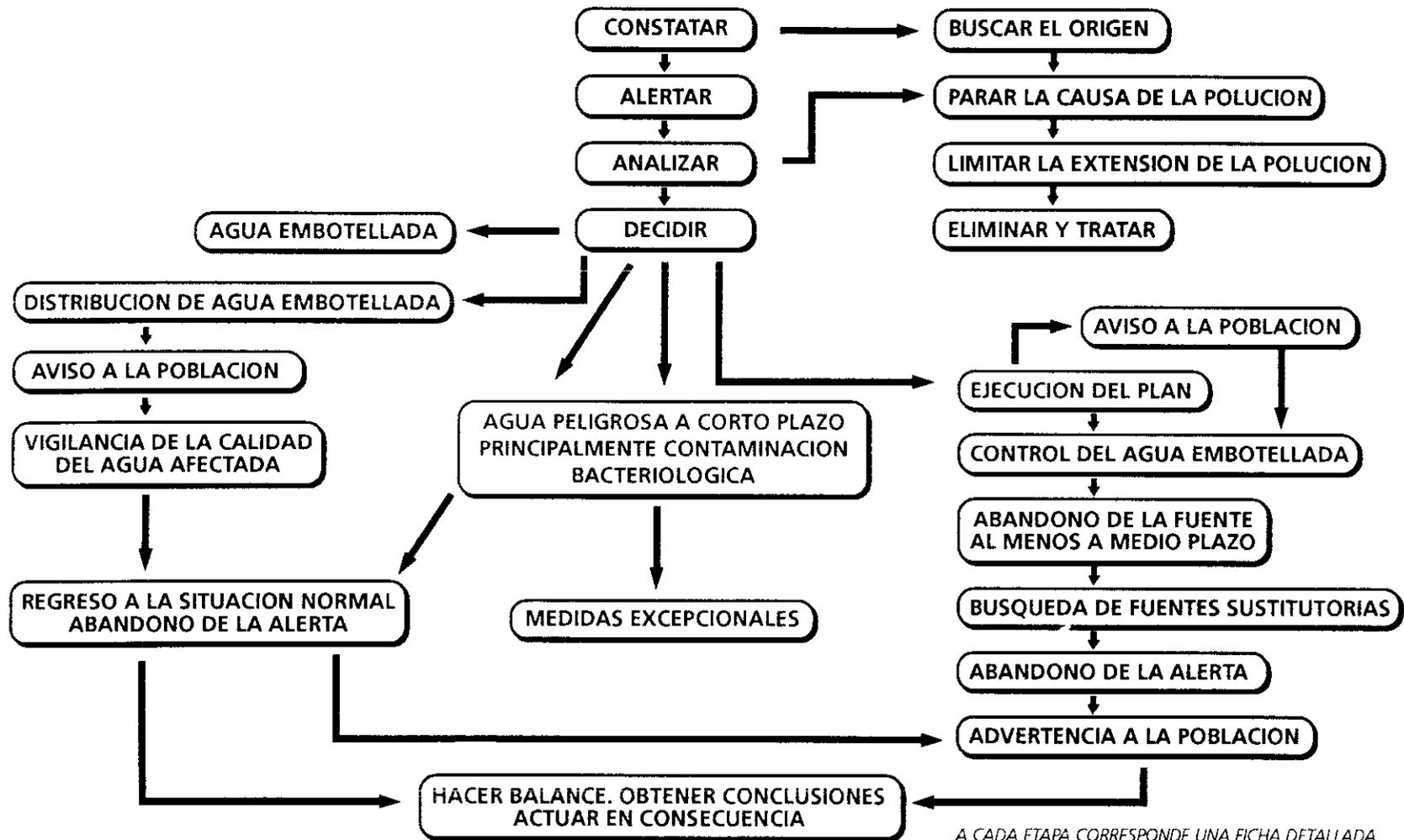
- Servicio centralizado de control, que poniendo en práctica los diferentes sistemas de vigilancia conoce en cada momento la situación de la calidad del agua y la aparición de posibles contaminaciones.
- Plan de intervención inmediato, con capacidad de actuar con vistas a parar el bombeo de agua cuando sea necesario, además debe disponerse

de un sistema de abastecimiento alternativo en previsión de que el corte de suministro se prolongue en el tiempo o incluso sea necesario cerrar la captación definitivamente.

- Sistema de lucha contra la contaminación.

Una vez asegurada la protección de la salud pública será necesario actuar frente a la contaminación, el problema es extraordinariamente complejo, requiriendo de personal muy cualificado que analizando cada caso concreto pueda decidir las medidas más adecuadas a tomar.

**POLUCION O AMENAZA DE POLUCION DE LAS AGUAS CONTINENTALES.  
MEDIDAS A TOMAR**



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

A CADA ETAPA CORRESPONDE UNA FICHA DETALLADA  
NO CORTAR EL SUMINISTRO SIN CONSULTAR ESAS FICHAS

**Fig. 76.- PLAN DE INTERVENCION ANTE UNA CONTAMINACION DEL AGUA DE CONSUMO**