

Guía para el : Seguimiento General de las Aguas Subterráneas

Grupo de Trabajo Internacional 1

Utrecht Junio 2006

Informe n° GP 2006 – 1

Agradecimientos

La publicación de esta Guía, en su versión inglesa original, ha sido posible gracias a la generosa colaboración aportada por diferentes organizaciones internacionales, en particular holandesas, así como por la valiosa contribución de diversos profesionales pertenecientes a distintos países de todo el mundo.

La versión original de la Guía ha sido publicada por el Centro Internacional para el Estudio de los Recursos en Aguas Subterráneas (*International Groundwater Resources Assessment Center*, IGRAC). IGRAC es una iniciativa de UNESCO y de OMM. El Centro está integrado en la Organización Holandesa para la Investigación Científica Aplicada TNO, en Utrecht. En el período 2003 a 2006 la financiación de IGRAC ha sido asumida por la Oficina interministerial holandesa “Asociación para el Agua”.

Esta Guía es el resultado de la colaboración entusiástica entre un grupo de profesionales de diferentes áreas geográficas y con experiencia en distintas disciplinas relacionadas con el agua subterránea.

La versión española ha sido llevada a cabo por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), organismo del Ministerio de Educación y Ciencia del Gobierno de España.

Nota de la versión en Español

.....
.....

Guía general para el: Seguimiento de las Aguas Subterráneas.

Coordinador: Gerrit Jousma, IGRAC, Países Bajos

Con las contribuciones de:

*Premadasa Attanayake, Bechtel Corporation, USA
John Chilton, BGS, Reino Unido
Armin Margane, BGR, Alemania
Carlos Martínez Navarrete, IGME, España
María Teresa Melo, Universidade de Aveiro, Portugal
Pedro Nieto López-Guerrero, IGME, España
Maurizio Polemio, CNR-IRPI, Italia
Frans Roelofsen, IGRAC, Países Bajos
S. K. Sharma, GRI, India
Mike Streetly, ESI, Reino Unido
Ali Subah, MWI, Jordania
Ahmed Al Yaqoubi, PWA, Gaza/Palestina*

Utretch
Junio 2006

Madrid
Octubre 2007

Informe nº GP 2006-1

Índice

1	Introducción	9
1.1	La Guía – antecedentes y planteamiento.....	9
1.2	Etapas en el seguimiento de las aguas subterráneas.....	10
1.3	Enfoque y alcance de la Guía	11
1.4	Descripción general de la Guía	12
1.5	Cooperación internacional... ..	14
2	Seguimiento de las aguas subterráneas; aspectos generales y diseño.....	16
2.1	El seguimiento del agua subterránea – conceptos y aspectos generales.....	16
2.2	Propuesta de procedimiento para el diseño.....	22
2.3	Planteamiento por módulos del programa de seguimiento.	26
2.4	Opciones básicas en los programas de seguimiento.....	27
3	Identificación del caso; estudios preliminares.....	31
3.1	Objetivo y planteamiento.....	31
3.2	Caracterización preliminar de la zona.....	33
3.3	Caracterización preliminar de los acuíferos.....	34
3.4	Estudio preliminar del estado del agua subterránea.....	36
3.5	Valoración preliminar de los resultados y definición de temas clave.....	41
3.6	Definición de una escala para el seguimiento sostenible.....	43
4	Análisis del sistema Agua Subterránea.....	46
4.1	El modelo conceptual.....	46
4.2	Recopilación de datos.....	47
4.3	Definición del marco hidrogeológico.....	48
4.4	Estudio del flujo subterráneo	50
4.5	Estudio de la calidad del agua subterránea.....	53
5	Análisis del marco institucional.....	57
5.1	Marco institucional del seguimiento de las aguas subterráneas.....	57
5.2	Política del sector del agua y legislación.....	58
5.3	Mandatos y responsabilidades de los diversos entes.....	60

5.4	Capacidad técnica necesaria en las instituciones del agua.....	59
5.5	Intercambio de información y publicación de resultados.....	63
6	Diseño de un programa para el seguimiento de la cantidad.....	65
6.1	Objetivos del seguimiento y datos necesarios.....	65
6.2	Diseño de la vigilancia del agua según las necesidades de información.....	69
6.3	Diversas opciones para el seguimiento y su evaluación.....	75
6.4	Utilización de los sondeos existentes; planeamiento de otros nuevos.....	77
7	Diseño de un programa para el seguimiento de la calidad	79
7.1	Objetivos del seguimiento y datos necesarios.....	79
7.2	Diseño del seguimiento según las necesidades de información.....	81
7.3	Distintas opciones de seguimiento y su estudio	92
7.4	Utilización de los sondeos existentes; previsión de otros nuevos.....	93
8	Viabilidad de las diversas opciones para el programa de seguimiento.....	95
8.1	Documentos necesarios.....	95
8.2	Definición y elaboración de las diversas opciones del programa.....	96
8.3	Cálculo de las inversiones y de los costes anuales.....	97
8.4	Valoración de las diversas opciones del programa de seguimiento.....	99
9	Implementación.....	102
9.1	Introducción al capítulo.....	102
9.2	Fase 1: Orientación e inicio	103
9.3	Fase 2: Diseño del programa para el seguimiento.....	103
9.4	Fase 3: Implementación de las mejoras en el programa de seguimiento.....	104
9.5	Fase 4: Organización del seguimiento y toma de muestras.....	104
10	Gestión de los datos: almacenamiento, procesado y validación.....	106
10.1	Introducción a la organización de los datos.....	106
10.2	Almacenamiento de los datos.....	107
10.3	Procesado de los datos	110
10.4	Presentación de los datos y de los resultados.....	111
10.5	Validación de los datos.....	113
	Referencias y bibliografía.....	121

Anejos

Anejo A: Seguimiento del agua subterránea en diferentes entornos hidrogeológicos.....	122
Anejo B: Selección e instalación de los pozos para el seguimiento.....	126
Anejo C: Registro de los niveles de agua y medición de las descargas.....	140
Anejo D: Toma de muestras para la calidad del agua subterránea.....	155
Anejo E: Documentación relativa al seguimiento – Ejemplos de fichas tipo.....	170
Anejo F: Costes operacionales – Ejemplos en Europa.....	177
Anejo G: Revisión general y optimización de la red de vigilancia.....	183
Anejo H: Un ejemplo de seguimiento del agua subterránea en Jordania.....	185

Figuras

FIGURA 1.1: ESQUEMA GENERAL DE LA GUÍA	12
FIGURA 2.1: EL CICLO DEL CONOCIMIENTO EN LA CALIDAD DEL AGUA.....	15
FIGURA 2.2: ESQUEMA PARA EL DISEÑO DE UN PROGRAMA DE SEGUIMIENTO.....	22
FIGURA 2.3: ESTRUCTURA POR MÓDULOS DE UN PROGRAMA DE SEGUIMIENTO....	24
FIGURA 4.1: CORTE ESQUEMÁTICO DE UN MODELO CONCEPTUAL.....	45
FIGURA 4.2: CORTE ESQUEMÁTICO CON DIVERSOS SISTEMAS DE FLUJO.....	47
FIGURA 4.3: EJEMPLOS DE INTERACCIÓN HIDRÁULICA.....	48
FIGURA 6.1: EJEMPLOS DE (SUB)CUENCAS EN UNA LLANURA COSTERA.....	66
FIGURA 6.2: EJEMPLOS DE (SUB)CUENCAS EN UN VALLE DE MONTAÑA.....	67
FIGURA 6.3: RED PARA EL SEGUIMIENTO: OPCIÓN 1.....	68
FIGURA 6.4: RED PARA EL SEGUIMIENTO: OPCIÓN 2	69
FIGURA 6.5: RED PARA EL SEGUIMIENTO: OPCIÓN 3	69
FIGURA 7.1: RED ESTABLECIDA PERPENDICULARMENTE A LA COSTA	81
FIGURA 10.1: HIDROGRAMA DE UN POZO SECO OCASIONALMENTE.....	113
FIGURA 10.2: DIAGRAMA DE PIPER CON CASOS ANÓMALOS	115

Tablas

TABLA 1.1: ENFOQUE Y ALCANCE DE LA GUÍA	10
TABLA 1.2: PARTICIPANTES EN EL GRUPO DE TRABAJO	13
TABLA 2.1: CUESTIONES ESENCIALES SOBRE LA INFORMACIÓN NECESARIA.....	17
TABLA 2.2: POSIBLES OBJETIVOS DEL SEGUIMIENTO DEL AGUA SUBTERRÁNEA.....	18
TABLA 2.3: EJEMPLO DE DATOS NECESARIOS EN UN SEGUIMIENTO.....	19
TABLA 3.1: DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	30
TABLA 3.2: ÁREAS CON, Y SIN ACUÍFERO EN LA ZONA DE ESTUDIO.....	31
TABLA 3.3: GEOLOGÍA DE LA ZONA.....	32
TABLA 3.4: CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA ACUÍFERO POR ÁREAS.....	33
TABLA 3.5: SITUACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS, EN LA CANTIDAD	34
TABLA 3.6: SITUACIONES POTENCIALMENTE CONFLICTIVAS, EN LA CANTIDAD.....	35
TABLA 3.7: TENDENCIAS OBSERVADAS, EN LA CANTIDAD DEL AGUA.....	36
TABLA 3.8: SITUACIONES POTENCIALMENTE CONFLICTIVAS, EN LA CALIDAD.....	36
TABLA 3.9: TENDENCIAS OBSERVADAS, EN LA CALIDAD DEL AGUA.....	37
TABLA 4.1: BALANCE DE UN ACUÍFERO CON ENTRADAS Y SALIDAS DE AGUA	49
TABLA 6.1: DENSIDAD Y FRECUENCIA DE OBSERVACIÓN EN LAS REDES.....	71
TABLA 7.1: FRECUENCIAS DE MUESTREO EN DISTINTOS ACUÍFEROS.....	89
TABLA 8.1: CÁLCULO DE LA INVERSIÓN EN LAS OPCIONES DISPONIBLES.....	95
TABLA 8.2: CÁLCULO DE LOS COSTES ANUALES EN OPCIONES DISPONIBLES.....	96
TABLA 8.3: EVALUACIÓN DE LAS DISTINTAS OPCIONES, EN CANTIDAD.....	97
TABLA 10.1: PROBLEMAS FRECUENTES, SU DETECCIÓN Y SOLUCIÓN.....	116

1 Introducción

1.1 La Guía – antecedentes y planteamiento.

El agua subterránea es en muchos países una de las más importantes fuentes de suministro de agua para el consumo humano, agrícola y ganadero, especialmente en las regiones áridas y semiáridas. Es igualmente un elemento vital para los ecosistemas que dependen de ella, como son los humedales. Un seguimiento regular y sistemático de este recurso subterráneo resulta indispensable en una gestión eficaz que pueda dar respuesta a las necesidades hídricas del medio ambiente y de los ciudadanos.

Según un inventario a escala mundial llevado a cabo por el Centro Internacional para el Asesoramiento en los Recursos de Agua Subterránea (*International Groundwater Resources Assessment Centre, IGRAC*), en muchos países no existe, o es mínimo, un seguimiento sistemático de las aguas subterráneas en cantidad y en calidad, ni siquiera a nivel regional. (Jousma and Roelofsens, 2004). Una falta de vigilancia tal puede conllevar que pase inadvertida la degradación de los recursos en agua, ya sea por sobreexplotación o por contaminación, pudiendo derivar en escenarios como los siguientes:

- ◆ Bajada de niveles del agua subterránea y agotamiento de las reservas en el acuífero;
- ◆ Disminución del caudal base aportado a ecosistemas sensibles, como humedales;
- ◆ Restricción en extracciones de agua subterránea para suministro humano o agrario;
- ◆ Limitación en el uso del agua subterránea a causa de la degradación de su calidad;
- ◆ Aumento en los costes del bombeo y del tratamiento del agua subterránea;
- ◆ Subsistencia y daños en los cimientos de edificios.

Se pueden identificar algunos factores que contribuyen a esta falta de vigilancia. Entre los más importantes se encuentran probablemente la ausencia de recursos financieros y una capacidad técnica insuficiente. Otros factores pueden residir en una responsabilidad institucional insuficientemente definida así como en la inexistencia de unos requerimientos legales, en cuanto a esta vigilancia. Incluso cuando hay programas de seguimiento ya operando, pueden fallar a la hora de proporcionar la información adecuada para una organización efectiva, y ello porque:

- ◆ Los objetivos no están debidamente definidos;
- ◆ El programa se ha establecido sin un conocimiento suficiente del sistema acuífero;
- ◆ Hay una planificación inadecuada en cuanto a la toma, transporte y almacenamiento de las muestras;
- ◆ Los datos se encuentran archivados de manera poco operativa y no resulta fácil obtenerlos en formato conveniente para una gestión efectiva y para informar a otros entes interesados.

Se encuentran disponibles varias Guías o manuales para desarrollar un seguimiento de las aguas subterráneas; sin embargo, la mayoría de ellas no contemplan adecuadamente los primeros pasos de este desarrollo, los cuales con frecuencia se caracterizan por disponer de una información hidrogeológica pobre, además de contar con limitaciones en su capacidad tanto

financiera como institucional. A efectos de mejorar esta situación, IGRAC constituyó un grupo internacional de trabajo formado por profesionales de las aguas subterráneas, con la tarea de desarrollar una Guía para el seguimiento de las aguas subterráneas en países con recursos financieros limitados. El resultado es el presente documento. Esta Guía se centra en la primera etapa del seguimiento de las aguas subterráneas, como una referencia general, requisito previo para una gestión profunda de los acuíferos. Esta Guía se plantea como un complemento de las demás publicaciones ya existentes.

1.2 Etapas en el seguimiento de las aguas subterráneas

Existen diversos tipos, tamaños y funciones, en las redes para el seguimiento de las aguas subterráneas. Respecto al tamaño, se puede hacer una distinción entre redes “regionales” amplias (subnacionales) y redes “locales”: las regionales se diseñan normalmente para caracterizar y controlar los sistemas acuíferos de ámbito regional, de gran importancia y extensión, mientras que las locales se centran más en observar la situación del agua subterránea con un detalle mayor, como ocurre en el entorno de un campo de bombeos o cuando existe alguna fuente puntual de contaminación, como un vertedero o un área industrial.

En el inicio de los estudios hidrogeológicos para determinar los recursos existentes y su potencial de desarrollo, cuando la información relativa a las aguas subterráneas es todavía muy escasa, normalmente se pensará en una escala regional en cuanto a su evaluación y seguimiento. Cuando la disponibilidad financiera es limitada, la observación o el muestreo del agua subterránea se llevarán normalmente a cabo en cualquier punto acuífero útil que sea accesible. Por ello, la red inicial suele establecerse con un cierto grado de improvisación.

Esta red de partida para el seguimiento regional, así como algunos de sus objetivos específicos, se podrán mejorar a la vista de la primera tanda de resultados mediante la selección de los puntos iniciales que resulten más adecuados, complementándolos con puntos nuevos que se encuentren en condiciones particulares. De esta manera puede evitarse un coste económico excesivo. Una red de vigilancia de las aguas subterráneas de este tipo, a gran escala, orientada en un principio a determinar el estado y las tendencias de los sistemas acuíferos regionales, se puede considerar como una “*red de referencia para el seguimiento general*”.

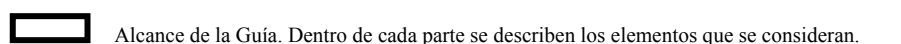
En una etapa posterior en el desarrollo de las aguas subterráneas, esta red de referencia podrá ser mejorada y pasar a constituir una “red primaria”, tornándose una herramienta especial para todo tipo de observación en las masas de agua de la región. Para entonces ya se contará con un conocimiento suficientemente extenso del potencial de estas aguas; además, el retorno económico de su seguimiento, que se habrá ido haciendo más evidente, dará pie a una mayor inversión para incrementar el nivel de detalle en esta investigación. Las redes primarias de vigilancia pueden a su vez combinarse con las “redes secundarias” locales, diseñadas con un detalle local o bien para necesidades específicas. En esta fase, los elementos del programa de seguimiento (red de puntos acuíferos elegidos, grupos de parámetros seleccionados, frecuencia de los muestreos) podrán ser ajustados de una manera mejor de acuerdo con los distintos propósitos perseguidos, mediante la aplicación del conocimiento adquirido sobre los procesos hidrológicos y geoquímicos, y la ayuda de técnicas estadísticas sofisticadas.

1.3 Enfoque y alcance de la Guía

Esta Guía plantea el desarrollo de un “programa de referencia de seguimiento general” desde los inicios, tanto de la investigación de partida como de la explotación y de la gestión de las masas de agua subterránea, según se indica en la Tabla 1.1. Los objetivos de dicho programa consisten en proporcionar datos para la caracterización de los sistemas acuíferos regionales, para la identificación de las tendencias a lo largo del tiempo y para el pronóstico de los impactos regionales debidos a la explotación del agua subterránea. Se comentarán los aspectos tanto técnicos como institucionales y de presupuesto.

Tabla 1.1: Enfoque y alcance de la Guía

Etapas del estudio y desarrollo de los recursos de agua subterránea	Objetivos del programa de seguimiento de las aguas subterráneas	Escala de la observación del agua subterránea	
		Escala regional	Escala local, redes específicas
Reconocimiento de partida del sistema acuífero	<ul style="list-style-type: none"> • Caracterizar las masas de agua subterránea (en cantidad y calidad) • Estimar el potencial de desarrollo del agua subterránea 	Puntos acuíferos existentes	Eventual seguimiento a escala local
Etapa inicial en la investigación y en el desarrollo de las aguas subterráneas	<ul style="list-style-type: none"> • Identificar las tendencias en el tiempo del almacenamiento del agua subterránea • Identificar las tendencias en el tiempo de la calidad del agua subterránea • Estudiar y prever el impacto regional de las extracciones de agua subterránea 	Red de vigilancia regional mejorada, denominada “red general de referencia”	Eventual seguimiento a escala local
Etapa de gestión intensiva con explotación intensa de las aguas subterráneas	<ul style="list-style-type: none"> • Cuantificar los impactos de las extracciones sobre la calidad y la cantidad de las masas de agua • Determinar el estado de la degradación y las medidas correctoras • Determinar la incidencia de la gestión aplicada al agua subterránea 	Red de vigilancia regional optimizada, denominada “red primaria”	“Redes secundarias”: redes específicas, especialmente diseñadas y orientadas a problemas locales

 Alcance de la Guía. Dentro de cada parte se describen los elementos que se consideran.

Limitaciones

Esta Guía contempla la caracterización y el seguimiento de los sistemas acuíferos más a escala regional que local. Los procedimientos que aquí se describen van orientados a conseguir un programa de seguimiento que sea aplicable en sentido general. Estos programas a escala regional no son capaces de proporcionar el nivel de detalle necesario para evaluar escenarios a escala local tales como la incidencia que tienen los bombeos individuales sobre el manto acuífero, la degradación local de un abastecimiento urbano, o el impacto de fuentes puntuales de contaminación originadas por vertederos o polígonos industriales. Cuando estos problemas surjan hará falta disponer de una mayor información, lo cual requerirá unas redes adicionales, locales y específicas, para la observación correspondiente: el diseño de este último tipo de redes trasciende el marco de la presente publicación.

1.4 Descripción general de la Guía.

La Figura 1.1 muestra un esquema general de la Guía, junto con los capítulos y los anejos donde se encuentran diferentes temas y explicaciones.

El procedimiento de diseño que se presenta consta de dos fases. La primera (en azul claro), aborda la viabilidad del programa de seguimiento; esta fase contempla el estudio de los temas técnicos clave, así como la disponibilidad de recursos financieros para la puesta en práctica del programa en cuestión. De ser viable este programa, la segunda fase (en azul intenso) lleva a consideraciones posteriores, mostrando cómo un programa de seguimiento de las aguas subterráneas puede diseñarse de manera equilibrada con los datos necesarios y los recursos humanos y materiales disponibles. La Guía también aborda los aspectos de índole institucional y los de tipo práctico para la implementación del programa, así como para el almacenamiento de los datos, su procesado, validación y presentación.

Los capítulos de la Guía se refieren a los siguientes temas: (ver Figura 1.1)

- Capítulo 1: descripción del propósito, enfoque, alcance y limitaciones de la Guía, aportando información sobre las motivaciones que subyacen a esta iniciativa. El capítulo contiene también el esquema general de la Guía.
- Capítulo 2: ofrece una introducción general al seguimiento de las aguas subterráneas y muestra un esquema detallado de los pasos necesarios para valorar la situación en cada caso y para diseñar un programa adecuado. También se recomienda un planteamiento del programa por módulos y se muestra cómo éste puede ajustarse a los medios disponibles a través de las características de la red de vigilancia.
- Capítulo 3: *Fase 1* del procedimiento efectivo. Proporciona criterios para estimar si un seguimiento sistemático de las aguas subterráneas es deseable, y en qué zonas. De serlo, se indica la manera de conseguir una visión preliminar del acuífero, de las masas de agua subterránea y de sus condiciones, por un lado; y por otro, la manera de definir los elementos principales del programa de seguimiento así como las conclusiones más importantes a las que se puede llegar, dada la situación de las aguas subterráneas y las condiciones presupuestarias y de organización disponibles.
- Capítulos 4, 5, 6, 7 y 8: conjuntamente, constituyen la *Fase 2* del procedimiento para diseñar el programa de seguimiento, y ello de forma adaptada a las circunstancias particulares de las aguas subterráneas de que se trate.
 - El Capítulo 4 describe el estudio del sistema que constituyen las aguas subterráneas, así como el establecimiento de un modelo conceptual para este sistema.
 - El Capítulo 5 muestra cómo tener en cuenta las circunstancias institucionales, en relación con el seguimiento de las aguas subterráneas.
 - Los Capítulos 6 y 7 plantean el diseño de un programa para el seguimiento de las aguas subterráneas, en cantidad y en calidad, respectivamente.
 - El Capítulo 8 se centra en el adecuado tratamiento de los datos necesarios a efecto de seleccionar el programa de seguimiento más apropiado.

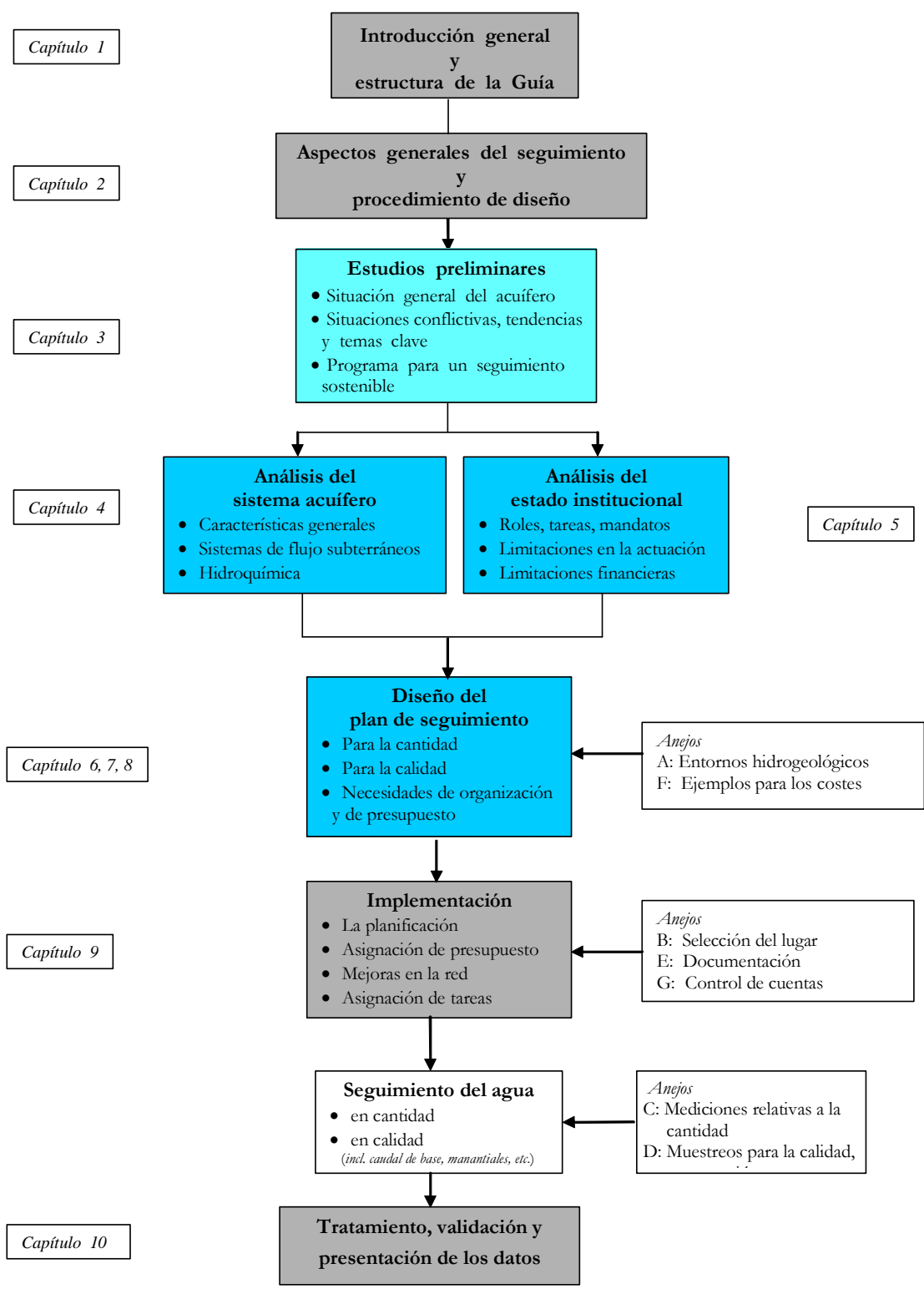


Figura 1.1 : Esquema general de la Guía

- Capítulo 9: describe el proceso de implementación del programa de seguimiento con una finalidad general de referencia. Tanto el diseño como la puesta en funcionamiento de un programa requieren una buena planificación, unos acuerdos claros, suficiente comunicación para asegurar el apoyo de los entes involucrados, la disponibilidad a tiempo de los medios presupuestados, los recursos humanos necesarios, etc.
- Capítulo 10: trata de la gestión de los datos, con su almacenamiento, procesado, validación y presentación. Esta organización es especialmente importante para la continuidad en el seguimiento sistemático de las aguas subterráneas: facilita el acceso a los datos y la posibilidad de su intercambio, asegura la uniformidad en su almacenamiento y tratamiento, y garantiza su integridad.

Los anejos de la Guía:

Los anejos proporcionan una información práctica complementaria, respecto al diseño y optimización del programa de seguimiento, al cálculo de los costes, a ciertos aspectos operativos en la elección de los emplazamientos, a las mediciones en sí, y a la toma y conservación de las muestras.

1.5 Cooperación internacional

Esta Guía ha sido posible gracias a la generosa financiación aportada a IGRAC por la Oficina interministerial holandesa “Asociación para el Agua”. Un grupo internacional de profesionales se formó con tal fin, posibilitándose la incorporación de expertos en varias disciplinas, procedentes de distintos lugares geográficos y con diferentes experiencias (Tabla 1.2). Este grupo de trabajo estuvo funcionando desde septiembre 2004 hasta julio 2006.

Tabla 1.2: Participantes en el grupo de trabajo

Nombre	Afiliación	País
Premadasa Attanayake	Corporación Bechtel	USA
John Chilton	Servicio Geológico Británico (BGS)	Reino Unido
Gerrit Jousma	Centro Internacional de los Recursos en Aguas Subterráneas (IGRAC)	Países Bajos
Armin Margane	Instituto Federal para las Geociencias y los Recursos Naturales (BGR)	Alemania
Carlos Martínez Navarrete	Instituto Geológico y Minero de España (IGME)	España
María Teresa Melo	Universidad de Aveiro	Portugal
Pedro Nieto López-Guerrero	Instituto Geológico y Minero de España (IGME)	España
Mauricio Polemio	Consejo de la Investigación Nacional (CNR-IRPI)	Italia
Frans Roelofsen	Centro Internacional de los Recursos en Aguas Subterráneas (IGRAC)	Países Bajos
S. K. Sharma	Instituto de Investigación Geológica, Dehradun	India
Mike Streetly	Simulaciones Ambientales Internacional (ESI)	Reino Unido
Ali Subah	Ministerio del Agua y Regadío	Jordania
Ahmed Al Yaqoubi	Autoridad Palestina del Agua (PWA)	Palestina/Gaza

2 Seguimiento de las aguas subterráneas – Aspectos generales y procedimiento para su diseño

En este capítulo se pretende proporcionar una introducción general al seguimiento de las aguas subterráneas, así como ofrecer un procedimiento para el diseño y la evaluación de un programa general de referencia para dicho seguimiento.

- *Se describe este tema en el contexto de la gestión del agua y del desarrollo internacional en sentido amplio;*
- *El procedimiento propuesto para el diseño comprende una evaluación práctica y una sucesión de pasos, cada uno de ellos vinculado a un capítulo (o capítulos) con descripciones detalladas;*
- *Se dan unas recomendaciones sobre cómo establecer un programa transparente de seguimiento multiobjetivos que garantice la flexibilidad y la eficiencia;*
- *Se muestra cómo las características básicas de un programa de seguimiento pueden servir como elementos para una efectiva ‘confección a la medida’ de este programa, que se ajuste a las necesidades y medios disponibles.*

2.1 El seguimiento de las aguas subterráneas – Conceptos y aspectos generales

Conocimiento y seguimiento de las aguas subterráneas

Se entiende aquí como *conocimiento de las aguas subterráneas*, la estimación del estado físico, químico y biológico de la(s) masa(s) de agua subterránea, en relación con las condiciones naturales y las interferencias humanas. El proceso para establecer esta caracterización y su seguimiento comprende una serie de pasos consecutivos, que se muestran en la Figura 2.1.

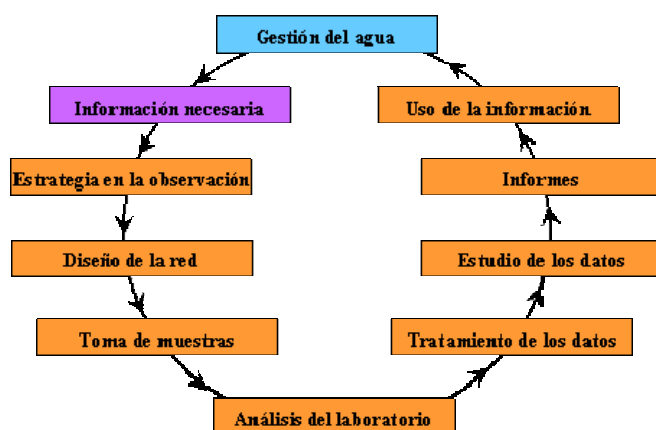


Figura 2.1: El ciclo del conocimiento de la calidad del agua (según Timmerman, 2000)

El seguimiento del agua subterránea puede definirse como la observación de las masas de agua a través de mediciones continuadas, sobre una base científicamente diseñada, y debe comprender también su interpretación y descripción en informes. En un programa de seguimiento, los datos del agua tienen que tomarse en un conjunto de puntos de observación determinados y con una cierta frecuencia regular en el tiempo, siempre que sea posible. Aunque el soporte legal, junto con el marco institucional y las posibilidades económicas, van a imponer sus propias metas y limitaciones, sin embargo el objetivo científico o técnico subyacente consiste en cualquier caso en describir la situación de las aguas subterráneas en el tiempo y en el espacio.

La necesaria garantía de estabilidad y de continuidad en el programa de seguimiento obliga a disponer con seguridad de:

- una planificación a largo plazo y el consiguiente compromiso en personal y presupuesto;
- un conocimiento suficiente de las características hidrogeológicas y de la situación hidrológica;
- un acceso sin interrupciones a los puntos acuíferos de observación.

El programa de seguimiento constituye un elemento clave en el conocimiento del acuífero y en su gestión, de tal manera que comprende todas las etapas mostradas en la Figura 2.1 a excepción de las tres superiores. El mismo ciclo es aplicable para el seguimiento de la cantidad en el agua subterránea, con sólo sustituir los pasos “Toma de muestras” y “Análisis de laboratorio” por “Mediciones en el agua subterránea”. Las sucesivas actuaciones en esta parte inferior del ciclo deberán ser especificadas y diseñadas de acuerdo con la información que se persiga y con las necesidades correspondientes a las otras etapas del ciclo.

Definición de la zona de seguimiento.

Como principio general, la zona a vigilar debe ser definida según criterios hidrológicos o hidrogeológicos, más que administrativos; incluso cuando los bordes políticos o administrativos conlleven responsabilidades de tipo institucional, la interpretación y la evaluación deberán adaptarse a las unidades físicas. Este fundamento principal de la gestión se viene reconociendo en la Legislación de manera cada vez más convencida, como es el caso de la Directiva Marco del Agua en la Unión Europea. Los programas de seguimiento deben ser diseñados a la escala correspondiente al acuífero, a la masa de agua subterránea o a la cuenca hidrográfica del río; de esta forma se dispone de la base para una aproximación hidrológica integral, en la cual se contemplen conjuntamente las aguas superficiales y subterráneas y sus interacciones, así como su potencial relación con entornos costeros o estuarios. En consecuencia, para poder establecer un programa de seguimiento es necesario tener una comprensión, a escala de cuenca y de subcuenca, del comportamiento hidrológico e hidrogeológico del agua y de sus interacciones. La aplicación de esta escala posibilita también una visión unitaria completa de las actividades humanas, sociales y económicas involucradas, y de sus interrelaciones, a la hora de su estudio.

La escala de cuenca posibilita el proceso de estudio centrado en la gestión y en la consiguiente información necesaria. Así, cuando se detecta que el agua a la salida de la cuenca o del sistema acuífero presenta una degradación en su calidad, es necesario indagar dentro de la cuenca qué es lo que está causando este deterioro y dónde se está produciendo. Identificar la sub-

cuenca donde se dan los problemas requerirá un mayor detalle de escala en la observación y el estudio, así como para determinar si el camino hidráulico seguido ha sido vía superficial o subterránea (ver Capítulo 7).

Definición de la información necesaria

Uno de los primeros pasos en un estadio preliminar, dentro de la planificación y ejecución del programa de seguimiento, consiste en definir qué información se necesita como base para gestionar la cantidad y la calidad del agua subterránea. Esto significa decidir quién (entre un amplio grupo de personas o cargos involucrados) desea o requiere la información relativa a las masas de agua subterránea, con qué finalidades u objetivos, y qué tipo de información supone esto. Análogamente, se precisa conocer el formato conveniente para dar esta información, según los diversos objetivos asignados, así como el grado de precisión requerida y la rapidez en su entrega a los diversos destinatarios. Esta información necesaria debe especificarse con el detalle suficiente, a efectos de cubrir los criterios en el diseño del sistema para el estudio y seguimiento de las masas de agua consideradas.

Tabla 2.1: Interrogantes esenciales en relación con la información necesaria

Información necesaria, preguntas	Ejemplos de respuesta ilustrativos
¿Quién desea recibir la información?	Organismos gubernamentales, responsables medioambientales, usuarios, autoridades sanitarias, el público en general, organismos internacionales (UE, AEMA, UNEP)
¿Qué tipo de información?	Estado y tendencias de los niveles de la masa de agua y de su calidad, datos auxiliares para estudios, marco DPSIR
¿Para qué finalidad?	Conocimiento, regulación, preceptivo, control de valores, información al público
¿Con qué precisión?	Escala de la observación en tiempo y espacio, grandes cifras, resultados analíticos
¿En qué plazo?	Control semanal/mensual, informes periódicos
¿En qué formato?	Informes, mapas, Internet

Estas preguntas y respuestas deberían formularse lo antes posible en el diseño de un programa de seguimiento nuevo; o, lo que es más probable, al actualizarse un programa ya existente con miras a su mejora, como consecuencia de que la información necesaria evoluciona con el tiempo.

Definición de los objetivos del seguimiento

En aras a la efectividad, el programa para el seguimiento de las aguas subterráneas requiere ajustarse al tipo de datos que son demandados por los usuarios, los cuales pueden ser instituciones gubernamentales, universidades, empresas privadas, etc., con intereses o responsabilidades en el sector del agua (subterránea) o en otras áreas relacionadas. Los datos pueden ser necesarios para investigar la situación actual de la masa de agua, para planificar el desarrollo de las aguas subterráneas o para observar el efecto que tiene la gestión aplicada. Para el diseño, la implementación o la valoración de un programa de seguimiento, hará falta tener un co-

nocimiento suficientemente amplio de los usuarios relevantes, de sus objetivos y de los consiguientes datos que harán falta.

Los datos necesarios pueden ser muy diversos, por lo cual hay que concretar las metas a alcanzar mediante la vigilancia aplicada. Estos “objetivos del programa de seguimiento” deben estar especificados claramente en un documento escrito por expertos en hidrogeología, de acuerdo con los gestores y usuarios del cuerpo de agua subterránea al que va dirigido el programa de seguimiento. La Tabla 2.2 ofrece algunos casos de estos objetivos:

Tabla 2.2: Ejemplos de objetivos en un seguimiento de aguas subterráneas

<p><i>En relación con el estado de la masa de agua subterránea y su explotación:</i></p> <ul style="list-style-type: none">• Datos del manto acuífero para el desarrollo (sostenible) de los recursos disponibles;• Datos para definir los mejores sitios donde situar los sondeos de explotación;• Información periódica sobre el estado del agua subterránea para la gestión o la publicación; <p><i>En relación con la protección de la masa de agua subterránea y de su entorno:</i></p> <ul style="list-style-type: none">• Datos para evitar su sobre explotación;• Datos para garantizar la conservación de las áreas naturales protegidas, frente a bajadas del nivel de agua;• Datos para controlar la intrusión salina o marina en el acuífero;• Datos para controlar la subsidencia originada por las explotaciones;• Datos para proteger la masa de agua de la degradación por fuentes difusas de contaminación.
--

Además de los aspectos técnicos relativos a los objetivos anteriormente mencionados, también los aspectos operativos de la gestión pueden tener influencia sobre el programa de seguimiento y la presentación de los datos. Por ejemplo, el periodo de ejecución en los planes de cuenca puede requerir un tiempo equivalente en la vigilancia y en la elaboración de sus resultados; otro caso es el que se refiere a los datos solicitados por la Directiva Marco del Agua en relación con las redes de vigilancia que estipula ella misma (UE, 2000). Estos requisitos pueden tener una influencia sobre el calendario de las mediciones, así como sobre la forma y la frecuencia para presentar los datos obtenidos (mapas específicos, gráficos, parámetros estadísticos, etc.).

Por último, tanto los objetivos del seguimiento seleccionados como los datos que requieren, tendrán que verse traducidos y representados en las características del programa correspondiente (establecimiento y densidad de la red para el seguimiento, selección de los parámetros a determinar y frecuencia de observación).

Los datos y sus diversas fuentes

Para los objetivos de la gestión mencionados anteriormente pueden servir datos de diversa procedencia. La Tabla 2.3 muestra estas posibles fuentes, con arreglo a los objetivos que re-

coge la Tabla 2.2. La importancia relativa de estas fuentes viene expresada por (x) para los datos deseables y por (xx) para los necesarios.

Tabla 2.3: Ejemplo de datos necesarios según su origen, para los objetivos señalados.

Objetivos del seguimiento	Puntos acuíferos de observación							Puntos en aguas superficiales	
	niveles	descarga	calidad	nivel	calidad	nivel	calidad	nivel	calidad
<i>Explotación de la masa de agua</i>									
1 Caracterización del acuífero	xx	n.a.		x		x		x	
2 Potencial de desarrollo del agua (en cantidad y en calidad)	xx	n.a.	xx		xx xx		xx xx		xx x
3 Situación óptima de los sondeos	xx		xx		xx		x		(x)
<i>Control y protección</i>									
4 Tendencias a la sobreexplotación	xx	n.a.		x	xx		xx		xx
5 Requisitos ambientales	xx	n.a.			xx	x	xx		xx
6 Intrusión salina y marina	x	n.a.	xx*	x	xx xx*			x	x (x)
7 Subsistencia	x	n.a.			xx				
8 Contaminación de acuíferos		n.a.	xx		xx		xx		xx

x = dato deseable; xx = dato necesario; xx* = principalmente Cloruros y/o Sulfatos; n.a. = no aplicable

En los capítulos 6 y 7 se presenta la aplicación de estas especificaciones al planteamiento del programa de seguimiento y sus particularidades.

Utilización de los datos disponibles

La estrategia para el diseño del programa de seguimiento y su aplicación, debe tener adecuadamente en cuenta la información existente. Para empezar, se debe reunir en inventarios la información disponible aunque dispersa en las distintas agencias e instituciones de organismos diversos. Interesa que estos inventarios cubran los principales aspectos que sean de relevancia para la identificación y análisis de las alternativas posibles, lo cual incluye, por ejemplo: usos y demandas de agua, niveles piezométricos, calidad del agua subterránea, uso del territorio y consiguientes fuentes difusas de contaminación tales como las asociadas con productos fitoquímicos. Con los reconocimientos iniciales relativos a la calidad del agua, se tendrá una primera aproximación sobre el funcionamiento del ecosistema acuático, así como la posible existencia de contaminación y su incidencia en los sistemas acuíferos. Al diseñar la red de vigilancia y seleccionar los puntos acuíferos correspondientes, se debe también tener en cuenta la disponibilidad de registros previos de niveles y análisis químicos, puesto que es muy deseable para el seguimiento continuar series de datos a largo plazo.

Prioridades en el seguimiento

Ningún programa de seguimiento es capaz de proporcionar todos los datos que se necesitan para definir las posibles alternativas relativas a la gestión del acuífero y su protección. Un presupuesto insuficiente suele ser una de las mayores limitaciones con que tropieza un seguimiento de este tipo. De igual manera, la falta de marco institucional, competencias, cualificación, experiencia, etc., por parte de las instituciones puede lastrar sustancialmente el desarrollo de programas de seguimiento, por muy ambiciosos que éstos sean. Para conseguir un equilibrio firme entre el valor de los datos perseguidos y el coste que conlleva obtenerlos, serán condiciones necesarias diferenciar los distintos programas posibles y tener claras las prioridades.

Una manera de establecer prioridades consiste en utilizar el concepto de riesgo. En cuanto a la calidad de la(s) masa(s) de agua, y a efectos de establecer prioridades en las actividades del seguimiento, puede utilizarse el enfoque universalmente aplicado de calcular y representar gráficamente la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación. En función de las características físicas y químicas del suelo y de los materiales geológicos que cubren el manto acuífero, se puede evaluar y cartografiar su potencial para frenar el avance de los eventuales contaminantes y atenuar su acción. Si estos mapas ya existen, su aplicación ayudará a priorizar la vigilancia en aquellas áreas donde las aguas subterráneas tienen aplicaciones importantes y además su vulnerabilidad es mayor.

Reducir las ambiciones iniciales ayudará seguramente a distinguir el programa adecuado, lo cual puede hacerse por muy diversos caminos como por ejemplo centrándose en zonas piloto, o eligiendo puntos de observación sensibles o bien reduciendo la frecuencia de las observaciones. Un nivel de exigencia menor conllevará un nivel de información menor, pero es muy posible que incluso este nivel menor sea suficiente para los usuarios.

Aproximaciones sucesivas

Diseñar un programa de seguimiento es una tarea compleja que requiere conocimiento y experiencia. Incluso cuando estos dos elementos se dan, el diseño ha de seguir un proceso iterativo cuya meta final normalmente se alcanzará después de considerar y sopesar varias opciones. En caso de que se tenga poca experiencia en este tipo de diseño, puede ser aconsejable comenzar aplicándolo de forma práctica en algún acuífero: la progresiva aproximación posterior irá proporcionando una visión más clara sobre la labor y el coste que conllevará el diseño final y la puesta en práctica del programa de seguimiento.

Presentación de los resultados

La inversión realizada en el programa de seguimiento se verá garantizada únicamente si los datos proporcionados por la red de vigilancia cumplen con los objetivos y las necesidades de los usuarios. En consecuencia, el conjunto de datos e informes presentados debe considerarse como un elemento primordial a la hora de argumentar que es necesaria la continuidad en las aportaciones económicas. No entregar la información requerida puede ser una razón para que

el interés y la inversión decaigan, pudiendo llegar en el peor de los casos hasta la anulación total del programa de seguimiento.

2.2 Propuesta de procedimiento para el diseño

Diseñar un programa de seguimiento para una(s) masa(s) de agua subterránea comprende una serie de pasos, como se muestra en los cuadros de color de la Figura 2.2. Con estos pasos se pretende asegurar que el programa proporcione los datos óptimos a los posibles usuarios: instituciones y personas involucradas con el agua subterránea a través de su estudio, explotación, gestión y protección, entre otras actividades.

El cuadro de color claro representa la Fase 1 del procedimiento de diseño y cubre el estudio preliminar (Capítulo 3). Los pasos de color más intenso corresponden a la Fase 2 de dicho procedimiento y constituyen la investigación detallada que se describe en los Capítulos 4 a 8. El procedimiento propuesto para disponer de un programa de seguimiento de aguas subterráneas (ver la Figura 2.2) comprende los pasos siguientes:

- ***Paso 1: Descripción preliminar de la situación de las aguas subterráneas, sus problemas y tendencias, así como de la magnitud de un programa sostenible para el seguimiento del agua.***

Este paso pretende estimar si es deseable o no hacer un seguimiento sistemático del agua subterránea en una zona y cuáles deben ser su alcance y objetivos, dadas las condiciones existentes de presupuesto y organización. Las actuaciones que se mencionan tienen por finalidad proporcionar una base que ofrezca una “visión rápida” de la situación del acuífero y sus problemas actuales, y disponer de una lista de temas clave para el seguimiento.

- ***Paso 2: Análisis del sistema acuífero y desarrollo de un modelo conceptual***

En este paso se estudia el sistema acuífero (con su flujo) y se establece un modelo conceptual, con base en la información hidrológica e hidrogeológica disponible. Este modelo constituye a su vez el marco técnico para el diseño de la red de vigilancia del manto acuífero. Igualmente se estudia en este contexto la calidad del agua subterránea.

- ***Paso 3: Análisis del entorno institucional***

Se realiza en esta fase un inventario de las instituciones involucradas en la explotación de la(s) masa(s) de agua subterránea, en su protección y gestión, así como un análisis de sus funciones, competencias, responsabilidades y medios asignados, humanos y presupuestarios. El estudio de estas circunstancias debiera llevar a una mejor visión del alcance y limitaciones en cuanto a la eventual mejora o ampliación del seguimiento del agua.

- ***Paso 4: Inventario de los datos necesarios y definición de objetivos para el seguimiento***

El inventario de los datos necesarios incluye el listado de las personas que van a utilizar la información obtenida, así como sus propias necesidades de datos. Los objetivos del seguimiento pueden considerar igualmente la obtención de datos para el estudio, desarrollo, explotación, gestión y protección de los recursos subterráneos.

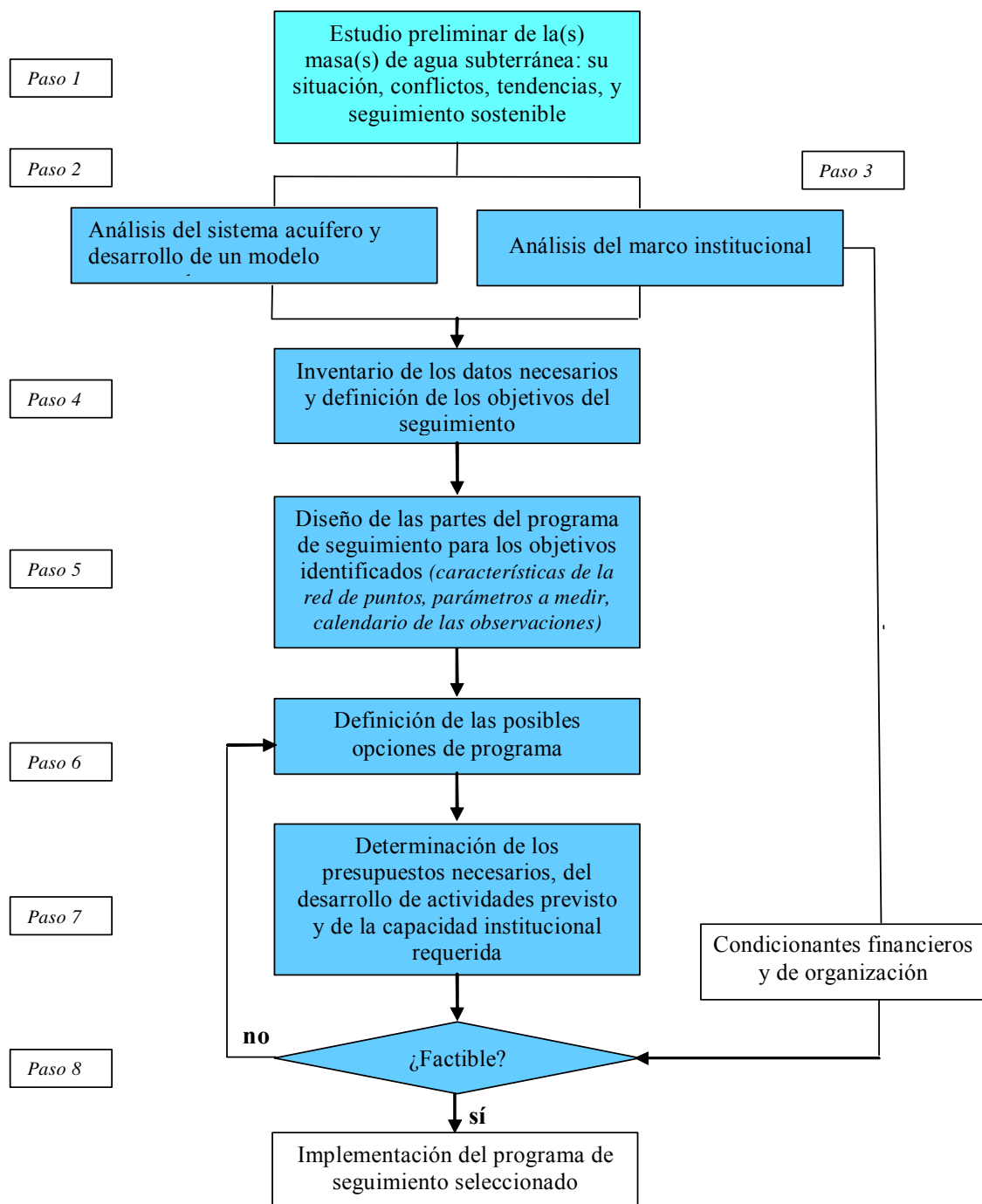


Figura 2.2: Esquema del diseño de un programa para el seguimiento de las aguas subterráneas

- **Paso 5: Diseño de las partes del programa de seguimiento, según los objetivos identificados**

A partir de los objetivos establecidos para el seguimiento, en este paso se lleva a cabo su estudio y la definición de los componentes de la vigilancia correspondiente. Cada objetivo con-

siderado se asocia con un componente que tiene sus propias exigencias específicas: área a considerar, red de puntos preferentes, parámetros necesarios, frecuencia de muestreo, etc. La disposición de todos estos componentes en un esquema permitirá relacionar con claridad las diversas funciones y necesidades del programa de vigilancia. Se recomienda adoptar en este esquema una estructura de módulos para manejar mejor la complejidad de cada situación.

- **Paso 6: Definición de las diversas opciones para el programa de seguimiento**

La viabilidad de un programa de seguimiento depende entre otras cosas del presupuesto y de la capacidad institucional disponibles. Una buena práctica consiste en considerar sólo un número limitado de opciones posibles para el programa, por ejemplo en función de su grado de complejidad. En ocasiones, estas opciones pueden diferir entre sí en cuanto al alcance del programa, el área comprendida o las características involucradas (p.ej., densidad de puntos de la red, frecuencia de las medidas, etc.). Por parte de las instituciones responsables de la gestión y del seguimiento del agua subterránea, es aconsejable la participación de representantes suyos en la definición precisa de las opciones que interese considerar. Los diversos aspectos de los programas sujetos a consideración deberán quedar claramente detallados en mapas y/o tablas.

- **Paso 7: Especificación del presupuesto requerido, del desarrollo programado y de la capacidad institucional necesaria, en cada opción contemplada**

Para llevar a cabo la selección entre las diferentes opciones hacen falta más precisiones en cada una de ellas, como son:

- a) el cálculo de las inversiones necesarias y de los costes anuales requeridos en cada opción;
- b) la descripción del nivel de información esperado (áreas cubiertas, objetivos alcanzados, precisión estimada, etc.); también deben indicarse los puntos fuertes y las limitaciones.
- c) la consideración pormenorizada de la capacidad institucional necesaria y de las posibles limitaciones.

- **Paso 8: Evaluación de viabilidad y selección de la mejor opción de programa**

Este paso comprende la evaluación de la viabilidad de las diversas opciones consideradas para el programa de seguimiento, sobre la base de la información obtenida en el paso 7, y la posterior selección de la mejor para su implementación. En caso de que ninguna de estas opciones resultara factible o suficientemente atractiva, habría entonces que definir otras opciones (paso 6) y estudiarlas detenidamente (paso 7) de nuevo.

2.3 Planteamiento por módulos del programa de seguimiento

Los puntos elegidos para tomar medidas son unos puntos especiales de observación que cumplen en ocasiones diversas funciones dentro del programa de vigilancia: algunos pueden tener una única función (p.ej., medir niveles sólo), mientras que otros pueden tener varias funciones (p.ej., medir niveles y observar la calidad del agua). Esta diferencia repercute generalmente en el coste, especialmente en los programas de vigilancia de la calidad del agua subterránea: así, pueden seleccionarse unos cuantos puntos “indicadores” para tomar medidas anuales sobre las tendencias, mientras que puede utilizarse un número mayor de puntos para estudios sobre la distribución de la calidad regional del agua subterránea, estudios que se pueden hacer cada cinco años por ejemplo.

Interesa que el programa de seguimiento sea transparente a efectos de disponer de flexibilidad en su planificación y control, particularmente en cuanto a la función de los distintos puntos de observación. Cuando las prioridades en la gestión del acuífero cambian, el enfoque del programa tendrá también modificaciones. Algunos cambios en el programa pueden llevar a retirar puntos de la red porque hayan perdido su función, lo cual supone un ahorro económico; también pueden darse modificaciones en el calendario del muestreo, por aparecer otras prioridades o nueva información. La experiencia de haber trabajado con programas de seguimiento complejos aconseja relacionar claramente las diversas funciones asignadas a los puntos de observación con los distintos objetivos definidos en la gestión del acuífero y con los datos perseguidos para ello.

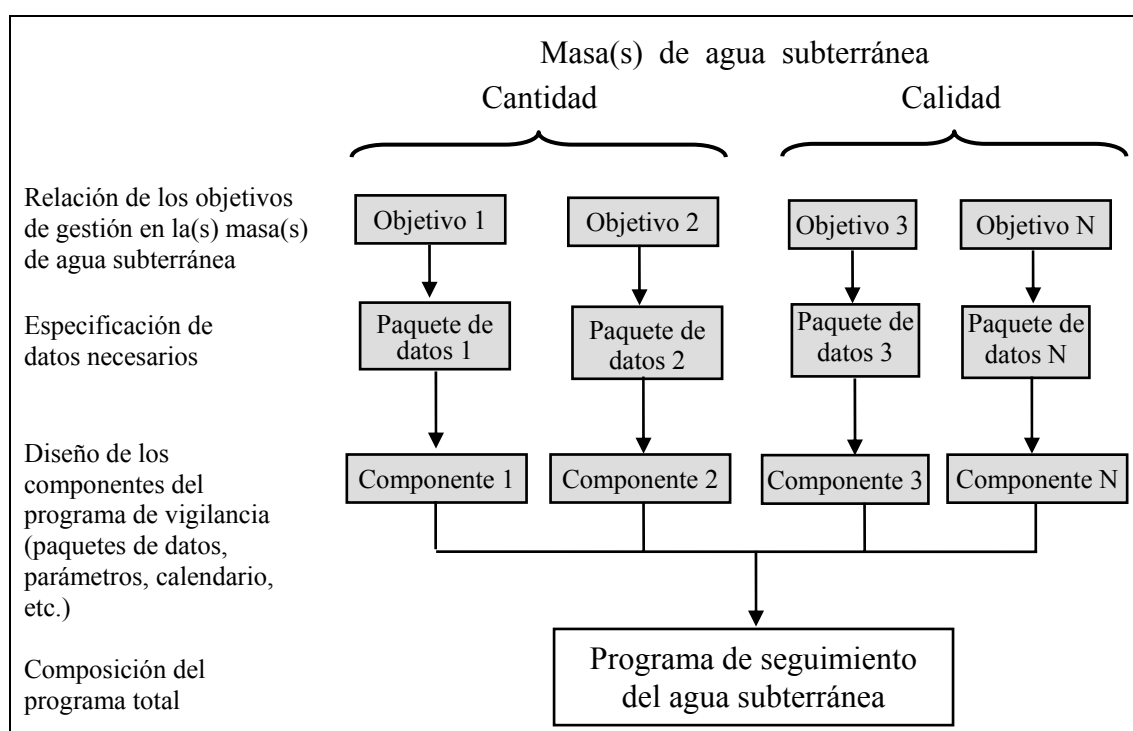


Figura 2.3: Composición por módulos de un programa de seguimiento

La Figura 2.3 muestra cómo se puede formar el programa de seguimiento con diversos componentes en la vigilancia, cada uno de ellos relacionado con cada objetivo de gestión del agua subterránea y con el paquete de datos requerido para ello.

Los distintos componentes de un programa para el seguimiento del agua subterránea derivan de la necesidad de datos relativos a la explotación del acuífero en la zona considerada, así como de su gestión y protección. A veces hay que dar respuesta simultáneamente a varios de los objetivos planteados: por ejemplo, si se está lejos aún de conocer cual es el potencial de desarrollo de las aguas subterráneas en una región, los datos que interesará conocer abarcarán las masas de agua de toda esa región; pero mientras se consigue ese conocimiento, puede interesar averiguar si alguno de los usos que se hace del territorio viene afectando a la calidad de

las aguas subterráneas más someras, aspecto muy a destacar para las zonas vulnerables de la región. Por otro lado, en las zonas costeras conocer la interfase agua dulce / agua marina puede ser la razón para observar la calidad del agua subterránea a una cierta profundidad. Estos objetivos y la necesidad consiguiente de datos plantean distintas exigencias al programa de vigilancia, pudiéndose dar un solapamiento entre ellas.

Para establecer un programa de seguimiento multifuncional en las aguas subterráneas es necesario disponer de una cartografía con la distribución espacial de los objetivos que se persiguen, derivados de las necesidades que conlleva la exploración del acuífero, su explotación, gestión o protección. Dicha cartografía puede incluir mapas sobre información básica tal como el uso del territorio, con miras a detectar potenciales amenazas a la calidad del agua subterránea. Los diversos objetivos así perseguidos van a dar generalmente lugar a solapamientos espaciales en los cuales los puntos de observación cumplirán varias funciones simultáneamente. Los mapas mencionados serán de ayuda a la hora de seleccionar los puntos de observación más adecuados para los distintos propósitos. Los sondeos existentes elegidos y los nuevos que se instalen pueden dar respuesta a varios requerimientos al mismo tiempo.

2.4 Opciones básicas en los programas de seguimiento

Además de los objetivos del seguimiento y de la situación hidrogeológica, el comportamiento dinámico de las variables a medir (niveles piezométricos y calidad del agua) constituye un factor esencial para el diseño del programa de seguimiento. Las propiedades básicas del programa se pueden ajustar al ámbito espacial y temporal de estas variables, en el supuesto de que su variación y valores medios esperados puedan ser aproximadamente estimados. Incluso cuando el comportamiento de estas variables no es conocido se puede a menudo hacer estimaciones sobre la base de: a) información local, y b) experiencia con procesos hidrológicos y químicos en otras áreas. En los apartados siguientes se comentan algunos ejemplos de redes de vigilancia diferentes.

Aplicación de redes regionales frente a redes locales

La elección de una red de vigilancia depende en gran parte de la variabilidad de los datos a observar. En un parámetro que mide una variable, cuando su variación espacial es alta (únicamente cuando las distancias entre los puntos de observación son cortas, entonces se da una correlación significativa entre sus registros) los puntos de la red sólo van a proporcionar valores representativos locales, como ocurre con: los valores de la humedad del suelo en la zona no saturada, los niveles del agua en los sistemas cársticos o las concentraciones de nitrato en áreas agrícolas. Si, por el contrario, la variación espacial de los datos es baja, los puntos de la red pueden ser representativos para un área mayor que la medida: un ejemplo es el nivel piezométrico en un acuífero confinado.

Redes locales densas. Como regla general, para conseguir una imagen fiable con parámetros representativos a nivel local hace falta que los puntos de la red se encuentren próximos; tomar datos de este tipo, representativos localmente, en una red amplia espacialmente es susceptible de no dar una imagen representativa, ya que esos datos sólo pueden ser considerados como aleatorios en una población grande. Por lo tanto, incluso desde el punto de vista estadístico

una red ampliamente distribuida en el espacio puede no dar los resultados apetecidos. Cuando se trata de estudiar fenómenos representativos localmente que tienen un grado de variabilidad alto —por ejemplo, como apoyo en una primera investigación somera del acuífero— la mejor opción consiste en elegir una *red local de suficiente densidad especialmente diseñada* para ese fin.

En el caso de investigaciones que pretendan cubrir una zona más amplia, entonces probablemente se obtenga una información suficiente con estas redes especiales diseñadas localmente en *áreas piloto elegidas*. Esta solución va a ser mucho más práctica y rentable económicamente que una red regional de alta densidad.

Las redes de vigilancia regionales ampliamente repartidas deberían reservarse para medir variables o parámetros representativos en áreas relativamente amplias (p.ej. los niveles piezométricos en acuíferos confinados o semiconfinados): la red ampliamente distribuida va a proporcionar una impresión espacial, más o menos continua, de los parámetros o variables en estudio. Otra manera de utilizar este tipo de redes regionales reside en determinar un parámetro estadísticamente representativo para esa área (p.ej., un parámetro que representa el grado de contaminación de origen difuso en el agua subterránea); en este caso, habrá que tomar los datos mediante una *campana de muestreo* en puntos que tengan condiciones hidrogeológicas comparables: los pozos muestreados pueden estar aislados unos de otros, pero deben de ser suficientemente numerosos para poder aplicar un análisis estadístico. Este método se utiliza frecuentemente en los estudios relativos a la calidad del agua subterránea, por ejemplo para determinar la degradación de la masa de agua en zonas con distintos tipos de suelo y de uso del territorio.

Aplicación de redes dispersas y puntos de vigilancia indicativos

Redes de vigilancia dispersas. Este tipo de redes constituye la forma habitual en aguas subterráneas. La distribución de los puntos de observación que se requiere en una red regional es función de los parámetros a medir (definidos por los objetivos del seguimiento) y de las condiciones que determinan su valor espacial, entre las que suelen ser relevantes: la altitud, las características hidrogeológicas, la hidráulica de superficie, el tipo de ordenación aplicada al territorio, las propiedades del suelo, etc. Al establecer la red de vigilancia es importante que estén representados adecuadamente los factores que tengan una influencia relevante en la variación espacial de los parámetros estudiados.

Para la piezometría, conviene que las redes de vigilancia estén en consonancia con las condiciones hidrogeológicas prevalecientes en la región, por ejemplo asignando una distinta densidad de puntos de observación según que los acuíferos sean confinados o no. En cuanto a la calidad del agua subterránea, las diferencias dentro de una misma región pueden deberse a un conjunto de factores más complejos, tales como el uso del territorio, las condiciones hidrológicas (áreas de carga y descarga) y las propiedades del suelo. Puesto que los datos disponibles sobre estos factores no suelen tener el detalle adecuado, sólo la información que sea asequible constituirá la base útil para el diseño de la red.

Puntos de observación indicativos. El término “indicativo”, dentro del propósito de esta Guía, significa que el punto es representativo de la respuesta que da una parte del sistema acuífero en sí, o del constituido por las aguas subterráneas regionales, ante las presiones que inciden

sobre dicho sistema. Como ejemplo de estos fenómenos regionales se tiene la bajada del nivel acuífero a causa de la explotación de los sondeos, o la degradación de la masa de agua por la acción de fuentes difusas de contaminación.

Un punto indicativo debe ser como un *termómetro* en el sistema acuífero que se encuentra sometido a una presión. Sus registros han de ser indicativos del comportamiento del sistema en su conjunto, de tal manera que proporcionen a los gestores del agua subterránea una información específica sobre el estado actual del sistema, y sean capaces de ponerles en alerta ante ciertas posibles tendencias; en caso de peligro para el sistema, esta información facilitará la planificación y el posterior desarrollo de las medidas oportunas. Sin embargo, la observación de los puntos indicativos no será suficiente a lo largo de la explotación en los sistemas acuíferos extensos; en estos casos será normalmente necesario utilizar una red de vigilancia más consistente.

En los primeros momentos al aplicar una red, los pozos de observación indicativos son muy valiosos. Según la red se va desarrollando su densidad generalmente aumenta, incrementándose igualmente su distribución.

Aplicación de un planteamiento bi-dimensional o tri-dimensional

Con frecuencia las condiciones del agua subterránea son esencialmente tridimensionales, teniéndose entonces que considerar adecuadamente este aspecto al ir a desarrollar el programa de seguimiento correspondiente. Sin embargo, en algunos casos se tiene una situación predominantemente bidimensional, por ejemplo en secciones netamente perpendiculares a la línea de costa, en valles extensos, en proximidad de discontinuidades geológicas, etc. En este sentido, es determinante el hecho de que la diferencia entre el perfil hidrogeológico y el nivel piezométrico sea mínima, o nula, a lo largo de una dirección: entonces los niveles pueden ser medidos según una dirección perpendicular a la anterior, p.ej. en áreas litorales a lo largo de la línea de costa. La red de vigilancia puede también consistir en una serie de filas de puntos perpendiculares al eje principal, separadas según la variación mínima que se da a lo largo de dicho eje, resultando dicha red mucho menos costosa que las equivalentes íntegramente tridimensionales y garantizando una precisión análoga.

3 Identificación del caso y estudios preliminares.

En este capítulo se describe la primera fase del procedimiento de diseño. Pretende ser una ayuda para saber si es conveniente o no un seguimiento sistemático de las aguas subterráneas en una determinada zona y, de ser el caso, también para definir cuales pueden ser los objetivos y el alcance del programa o programas para ello, a partir de la situación existente en cuanto a la(s) masa(s) de agua subterránea y a las condiciones presupuestarias e institucionales. Este capítulo contiene:

- *Una exploración preliminar sobre la existencia o ausencia de sistemas acuíferos en la zona prevista y la posible necesidad de un seguimiento para el agua subterránea, discriminando entre zonas con acuífero y zonas sin acuífero.*
- *Una evaluación preliminar del estado del acuífero, de las situaciones en conflicto (potencial) y de las tendencias que se observan para el agua subterránea en la zona de estudio, deduciéndose de ello los temas clave para el programa de seguimiento. Se pueden establecer prioridades utilizando valores aproximados.*
- *Un estudio preliminar sobre el alcance del programa de seguimiento acorde con la capacidad institucional y el presupuesto disponible. De igual manera, este diseño debe guardar un equilibrio con la escala de trabajo a efectos de que sea sostenible.*

Se llama la atención sobre el hecho de que las tablas y propuestas que se presentan en este capítulo son unos ejemplos que pueden ser aplicados, modificados o ignorados según las necesidades de cada caso.

3.1 Objetivo y planteamiento

Este capítulo pretende aportar una ayuda para estimar si, y dónde, un seguimiento sistemático del agua subterránea es conveniente y, en caso afirmativo, también para definir cuáles pueden ser los objetivos y alcance del programa o programas de ese seguimiento, todo ello teniendo en cuenta la situación del acuífero y las condiciones presupuestarias y de organización existentes.

Un inventario de los datos necesarios para el desarrollo, gestión y control de los recursos subterráneos puede llevar a una amplia gama de metas en el seguimiento, a conseguir de una manera ideal con el programa. No obstante, al considerar las limitaciones en los recursos financieros y en la capacidad institucional disponibles, el seguimiento se verá obligado en la realidad a guardar un equilibrio con ambos factores. Esto significa que habrá que establecer unas prioridades, en el estado actual, entre los diversos objetivos del seguimiento. Análogamente debe haber un equilibrio entre los costes (de personal y de material) del diseño en sí del programa, y el alcance esperado de dicho programa. Este capítulo aborda:

- Un vistazo rápido sobre la situación del problema y una definición preliminar de los temas clave para el programa de vigilancia (apartados 3.2 a 3.5);
- Una estimación preliminar del tamaño de una red de vigilancia sostenible, acorde con los presupuestos y capacidad institucional disponibles (apartado 3.6).

Exposición somera de la situación de las aguas subterráneas especificando los temas clave

La Fase 1 de la Guía incluye una rápida revisión sobre el estado del acuífero en la zona de estudio, sobre sus usuarios y sobre las actividades que contiene; una aproximación a las situaciones de conflicto llevará a un listado de los asuntos clave a tratar en el programa de seguimiento. Los resultados de esta primera fase facilitarán el planteamiento de las posteriores investigaciones a realizar, en orden de importancia, asegurándose además que los presupuestos serán invertidos en los mejores temas y de la manera más eficaz. Puede también utilizarse para indicar la dirección de investigaciones futuras, sirviendo además para llamar la atención de los gestores sobre posibles cuellos de botella.

Cuando se conocen muy bien las características de la(s) masa(s) de agua subterránea y de sus problemas, y además los medios asignados al diseño y/o al programa mismo de seguimiento están muy claramente definidos, entonces esta parte puede obviarse. Sin embargo, si no se tiene una idea suficientemente detallada del sistema acuífero y de sus problemas, entonces este capítulo puede ser de ayuda al analizar la situación (en sus aspectos técnicos e institucionales) en que dicho acuífero se encuentra; además propicia una mayor conciencia sobre la complejidad del asunto y contribuye a enmarcar adecuadamente las actividades del seguimiento así como su alcance real. Si el alcance que se pretende, excediera con mucho los medios humanos y económicos disponibles, debe llamarse la atención de los gestores sobre la imposibilidad de llevar su demanda a buen puerto.

Definición de una escala sostenible para el seguimiento

Uno de los primeros aspectos a aclarar y precisar consiste en concretar hasta qué punto el programa de seguimiento que resulte de su fase de definición podrá ser desarrollado y mantenido, habida cuenta de la capacidad institucional y presupuesto disponibles: no deben subestimarse los costes que conlleva dicho establecimiento y su mantenimiento. En el capítulo 8 y en el anejo F se incluyen unas tablas que recogen varios tipos de estos costes. Para tener una panorámica del alcance de un programa que sea sostenible es necesario tener una idea razonable del presupuesto y de la capacidad disponibles, así como de los costes unitarios correspondientes a las diferentes partes del programa (Apartado 3.6).

Observaciones

Es de notar que las tablas y los valores que se presentan en este capítulo son unos ejemplos que se proponen y que pueden ser utilizados, modificados o ignorados, en función de las necesidades de cada caso. Los resultados que se obtengan pueden servir de base para un “informe de partida” que describa el marco de referencia aplicable en la fase de diseño del programa de seguimiento de las aguas subterráneas en cuestión.

3.2 Caracterización preliminar de la zona

Características generales del área de trabajo

En la Tabla 3.1. se han listado las características generales del área en cuestión que son esenciales para una estimación posterior, y que comprenden:

- Situación y magnitud del área a considerar, y zonas en sus bordes incluyendo el mar.
- Clima del área, posiblemente dividido en diversas partes.
- Zona de captación (eventual). El área de trabajo puede pertenecer a una única zona de captación o a varias simultáneamente. Los bordes de montaña en las zonas acuíferas no sólo separan las cuencas de aguas superficiales, sino que también limitan con frecuencia las masas de agua subterráneas.
- Topografía: montañas, colinas o llanuras. Estas características topográficas suelen estar relacionadas con la geología de la región.

Es importante el hecho de que esta zona se encuentre lejos o cerca del mar, a efectos de problemas potenciales de salinización o subsidencia. El clima –además de esencial para la zona en cuanto a su naturaleza, a sus habitantes y a la evolución de su geología— es un factor determinante para la recarga de los acuíferos y para las pérdidas por evapotranspiración. Hay que destacar la extensión de las áreas de captación (eventual) en el sistema acuífero, al considerar su balance de entradas y salidas así como su potencial de desarrollo. Las divisorias prominentes, como las crestas de montaña, pueden dividir los acuíferos o aislarlos del todo; también, en los cuerpos de agua someros sus divisorias se corresponden a menudo con los bordes de sus áreas de recarga, mientras que en los acuíferos profundos suele no darse una relación tan clara, necesitando su estudio una atención cuidada.

Tabla 3.1: Descripción general de la zona de trabajo

Características generales	Respuesta	Tipo de respuesta
Localización y magnitud:		
• Amplitud de la zona		(km ²)
• Tierra adentro totalmente		Sí / no
• Zona con áreas de costa		Sí / no
• Extensión del área de costa		(km)
Clima:		
• Húmedo		% de la zona
• Semi-árido		% de la zona
• Árido		% de la zona
Características de la cuenca hidrográfica o fluvial:		
• La zona pertenece a una sola cuenca		Sí / no
• La zona pertenece a varias cuencas		Sí / no
Topografía:		
• Zona montañosa (laderas escarpadas, valles estrechos)		% de la zona
• Zona accidentada /ondulada (crestas suaves, valles amplios)		% de la zona
• Llanura o pendiente muy ligera (incluyendo valles amplios)		% de la zona

La cota del terreno constituye un factor de los más importantes al originar y mantener el flujo natural del agua subterránea, y también para la vegetación correspondiente, siempre y cuando la geología lo permita (capítulo 4); incluso pequeñas diferencias de altitud pueden condicionar significativamente el tipo de vegetación. Por ejemplo, en los aluviales de los ríos o en los valles cuaternarios la vegetación va a depender mucho del nivel del agua subterránea, mientras que a cierta cota y con un manto acuífero profundo va a depender únicamente de la lluvia. Esto naturalmente tiene sus consecuencias en cuanto a la función a desempeñar por un programa de seguimiento del agua subterránea.

Como conclusión, los mapas relativos a los sistemas de agua superficial y a la topografía constituyen una información indispensable para el estudio del flujo subterráneo y para el diseño del programa de seguimiento del agua subterránea. También es necesario un mapa de las zonas climáticas en los cálculos para evaluar la recarga y las pérdidas a través de la evapotranspiración.

3.3 Caracterización preliminar de los acuíferos

Características hidrogeológicas de la zona de trabajo

La geología de una zona determina el “marco hidrogeológico” de los acuíferos, acuitardos y acuíclulos, que contienen las masas de agua subterránea. Las características hidráulicas de este marco van a determinar a su vez si pueden almacenarse volúmenes significativos de agua subterránea o bien únicamente cuerpos de agua aislados y de poca entidad; la composición química de las formaciones es un factor igualmente determinante para la calidad del agua subterránea. El almacenamiento y la calidad de las aguas subterráneas van a condicionar las perspectivas de su explotación y, de manera indirecta, las necesidades del programa de seguimiento.

De una forma general, pueden contemplarse dos situaciones distintas:

- Situación A: se dispone de un mapa hidrogeológico de la zona.
- Situación B: se dispone únicamente de información de tipo geológico.

Situación A: Se dispone de un mapa hidrogeológico de la zona de estudio.

En este caso puede utilizarse dicho mapa para distinguir en la zona “entornos con acuífero” y “entornos sin acuífero”, según la clasificación de UNESCO (Tabla 3.2).

Tabla 3.2: Áreas con y sin acuíferos en la zona de estudio

Hidrogeología	Respuesta	Tipo de respuesta
Entorno con acuíferos	* Acuíferos porosos regionales	% de la superficie total
	* Acuíferos fisurados regionales	% de la superficie total
Entorno sin acuíferos	* Áreas con acuíferos sólo locales	% de la superficie total
	* Áreas sin materiales acuíferos significativos	% de la superficie total

Con base en el mapa hidrogeológico, se deben indicar las áreas que tengan acuíferos y las que no. La extensión de estas superficies es un primer indicador en relación con las posibilidades de desarrollo de las aguas subterráneas.

Situación B: Sólo se dispone de información geológica en la zona de estudio.

La falta de un mapa hidrogeológico para la zona obliga a determinar las áreas con y sin acuíferos a partir de los mapas geológicos, pudiéndose utilizar entonces la clasificación siguiente (Tabla 3.3):

Tabla 3.3: Geología de la zona

Geología	Respuesta	Tipo de respuesta
• Materiales no consolidados		% de la superficie total
• Depósitos sedimentarios consolidados		% de la superficie total
• Terrenos volcánicos		% de la superficie total
• Basamento complejo principalmente intrusivo		% de la superficie total

Con base en los mapas geológicos, se podrá representar en un borrador de mapa hidrogeológico las áreas que indican acuíferos potenciales y las que no. De igual manera, la extensión de las áreas con acuíferos potenciales es una primera aproximación al posible desarrollo de las aguas subterráneas.

Atención: si la zona de estudio, o una gran parte de ella, pertenece a un “entorno sin acuífero” y si sólo se tienen manchas locales de acuíferos someros –por ejemplo, en zonas meteorizadas del basamento— entonces no hará falta un seguimiento sustancial y sistemático del agua subterránea, evitándose las posteriores indagaciones para el diseño del programa correspondiente.

División de la zona de estudio en áreas

Si la zona es compleja hidrogeológicamente –p.ej., porque está constituida por distintas áreas con y sin acuíferos, que comprenden varias superficies de explotación (eventual), con diversos usos del suelo— puede entonces resultar útil dividirla en áreas de tipo práctico: en total de 5 a 20, por ejemplo. Una división según estas extensiones locales será recomendable especialmente cuando los acuíferos sean susceptibles de interacción directa con el sistema de aguas superficiales, como ocurre en llanuras o rellenos aluviales con el manto acuífero somero. Pero cuando el nivel es profundo y fuera del alcance directo de las aguas superficiales, esta división en subáreas normalmente no será útil.

Para un mayor conocimiento sobre el estado de la(s) masa(s) de agua subterránea, el potencial de su desarrollo y la necesidad de un programa para su seguimiento, hará falta seguramente elaborar un mapa combinado que contenga:

- Los distintos elementos topográficos (o sea: montañas, áreas accidentadas, llanuras);
- Las distintas áreas y subáreas de captación (eventual), siguiendo pautas topográficas y de drenaje (ríos, lagos, cursos fluviales, mar);
- Las partes con y sin acuífero de la zona, con base en la información (hidro)geológica.

En el caso de acuíferos someros, la división en áreas puede apoyarse en la topografía y en los bordes de estas (sub)áreas, con una eventual subdivisión posterior, por ejemplo, según el uso del terreno. Para los acuíferos profundos, la división puede adaptarse, por ejemplo, a los grandes cuerpos de agua subterránea.

Características del sistema acuífero en cada área de estudio

Las estimaciones preliminares relativas a las características de los sistemas acuíferos, recogidas en la Tabla 3.4, pueden proporcionar la siguiente información:

- *Extensión, espesor saturado y porosidad estimada*, contribuyen a determinar las áreas con aguas subterráneas significativas, en términos de volumen almacenado.
- El *tipo de confinamiento* indica dónde el agua subterránea del acuífero superior se encuentra desprotegida, o con una protección relativa, ante las fuentes de contaminación superficiales.
- La *profundidad hasta el manto acuífero* es importante para decidir si la masa de agua subterránea está interactuando a menudo con las aguas superficiales o bien está desconectada de ellas.

Tabla 3.4: Características del sistema acuífero en cada área de estudio

Área	Características del sistema acuífero – estimaciones preliminares					
	Tipo:	Confinamiento de la capa superior	Extensión en horizontal (km ²)	Espesor total (m)	Profundidad del nivel (m)	Volumen total almacenado (hm ³)
Área 1						
Área 2						
Área 3						
.....						
Área N						

Tipo de respuestas

Tipo: Capa simple (CS) Multicapa (MC)

Confinamiento (capa superior): Libre (L) (Semi-)Confinado (C) (% L ; % C)

Extensión lateral: (km²)

Espesor total estimado: < 20 m 20 – 50 m > 50 m

Profundidad estimada hasta el manto: < 5 m 5 – 50 m > 50 m

Volumen total almacenado: (millones m³)

3.4 Estudio preliminar del estado del agua subterránea

Situación del agua subterránea – estimaciones preliminares

Se puede utilizar la Tabla 3.5 para obtener una panorámica preliminar en relación con la recarga y el almacenamiento del agua en cada área, y sobre el tanto por ciento de agua extraída.

- Una estimación de las recargas directa e indirecta proporciona más o menos un límite superior del volumen anual de agua subterránea disponible para las extracciones y la descarga natural.

- El porcentaje de la recarga que está siendo extraído puede servir de indicación, un tanto aproximada, sobre qué áreas se encuentran sometidas a una explotación intensa y cuáles no.
- La relación entre el volumen anual extraído y el volumen promedio almacenado, muestra si la capacidad amortiguadora del acuífero es suficiente para las épocas de sequía.
- En las zonas áridas y semiáridas el volumen de agua retenido en los acuíferos extensos y potentes se utiliza a veces para el abastecimiento urbano, provocando una lenta disminución progresiva de esas reservas (p.ej., en la región del Líbano).

Sobre la base de estas estimaciones preliminares, resulta difícil o imposible precisar las salidas naturales del sistema tanto subterráneas como superficiales. Para determinar los volúmenes anuales de agua subterránea susceptibles de una explotación posterior, hará por lo tanto falta una investigación más pormenorizada.

Tabla 3.5: Estado de la cantidad de agua subterránea – estimaciones preliminares

Área	Recarga estimada en la masa de agua subterránea			Volumen total almacenado (hm ³) (Tabla 3.4)	Calidad del agua para abastecimiento	Extracción total / recarga total (%)
	Directamente de la lluvia (hm ³ /año)	Indirectamente de ríos y canales (hm ³ /año) ⁽¹⁾	Recarga total estimada (hm ³ /año)			
1						
2						
3						
.....						
N						

Tipo de respuestas:			
Calidad del agua subterránea para abastecimiento	Apta	Uso restringido	No apta
Extracción total dividido por recarga total (en %) (en porcentaje o según la clasificación adjunta):	< 25 %	25 – 50 %	50 – 75 % > 75 %

Nota ⁽¹⁾: En algunos casos la recarga indirecta puede provenir también de los terrenos en regadío, y en áreas urbanas extensas de las pérdidas en las redes de suministro y de saneamiento así como de los aliviaderos de aguas de tormenta. La existencia de estas eventuales fuentes de recarga debe ser tenida en cuenta para investigaciones de más detalle (capítulo 4).

Situaciones de conflicto en relación con la cantidad del agua subterránea

La red de vigilancia de referencia general tendrá que describir de una manera representativa la situación del agua subterránea a nivel regional (Capítulo 1); esta función deberá cubrir el estado natural del agua así como los impactos regionales debidos tanto al uso de estas aguas subterráneas como a la gestión de las superficiales.

Situaciones de conflicto potencial en relación con la cantidad del agua subterránea.

La Tabla 3.6 puede utilizarse para indicar qué tipos de extracciones, aplicaciones y procesos pueden darse con el agua subterránea en las áreas señaladas. Pueden surgir conflictos, por ejemplo, cuando distintos grupos de usuarios entren en competencia por el agua subterránea de una zona, o cuando actividades y procesos dependientes del acuífero se resientan de otras extracciones intensas. Esta tabla puede completarse con los datos que figuran en la leyenda, o con otros de cualquier tipo que se consideren más apropiados; los de la leyenda son unos va-

lores cualitativos simples que van del “no” al “muy importante”; en el caso de sondeos esto también se puede expresar mediante valores estimados. La tabla y los valores se modificarán según las necesidades y la información disponible.

Tabla 3.6: *Situaciones de conflicto potencial – cantidad del agua subterránea*

Área	Aguas superficiales	Abastecimiento con agua subterránea		Funciones dependientes del agua subterránea			Procesos dependientes del agua subterránea	
		Abastecimiento público mediante sondeos	Regadío mediante sondeos	Abastecimiento urbano mediante pozos abiertos	Manantiales y cursos superficiales	Ecosistemas	Intrusión salina / marina	Subsistencia
1								
2								
3								
.....								
N								

Legenda:	importancia	cantidad	intensidad
-	no	no	no
+	pequeña	pocos	baja
++	media	algunos	media
+++	alta	muchos	alta

Los resultados de la Tabla 3.6 se analizan en el Apartado 3.6

Tendencias observadas en la cantidad de las aguas subterráneas

La Tabla 3.7 puede utilizarse para localizar en la zona de estudio los impactos negativos de los que se tengan noticia por la información disponible o bien a través de los dueños de los pozos, de los gestores del agua, de la Administración local, etc. que están al tanto de la situación en el lugar.

Se han distinguido las siguientes categorías de tendencias:

- Aumento observado de medidas de gestión en el agua de superficie que afectan al acuífero;
- Aumento observado de abastecimientos con aguas subterráneas;
- Aumento observado de problemas relacionados con el agua subterránea;
- Aumento observado de procesos dependientes del agua subterránea.

El abastecimiento urbano a partir de pozos abiertos (uso minoritario) puede clasificarse como una función vulnerable debido a que estos pozos habrán de ser profundizados o abandonados cuando los niveles del agua descendan demasiado. Si alguno de estos pozos abiertos es usado al mismo tiempo para regadío, que suele consumir cantidades considerables de agua, entonces esta actividad debe ponerse en la columna “Riego con agua subterránea”. Los problemas observados en las funciones dependientes del agua subterránea suelen aumentar cuando los niveles bajan, al igual que los procesos del tipo salinización o subsidencia del terreno.

Tabla 3.7: Tendencias observadas – cantidad del agua subterránea

Área	Aumento observado de medidas	Aumento observado en la extracción de aguas subterráneas		Aumento observado de problemas en funciones dependientes del agua subterránea			Aumento observado en procesos dependientes del agua subterránea	
	Aguas de superficie con incidencia en subterráneas	Abastecimiento público a partir de sondeos	Regadío a partir de pozos	Abastecimiento urbano con pozos abiertos	Aportaciones a manantiales y cauces superficiales	Ecosistemas en conexión con aguas subterráneas	Intrusión salina y marina	Subsistencia del terreno
1								
2								
3								
.....								
N								

Leyenda	importancia	cantidad	intensidad
-	ninguna	ninguno	ninguna
+	pequeña	pocos	débil
++	media	algunos	media
+++	alta	muchos	alta

Situaciones de conflicto en relación con la calidad del agua subterránea

Situaciones potenciales de conflicto respecto a la calidad del agua subterránea

La Tabla 3.8 puede utilizarse para indicar qué amenazas tiene la masa de agua subterránea en un área y cuáles son las funciones que dependen de ella. Existen aguas subterráneas salinas y contaminantes naturales que, inducidos por los bombeos, pueden degradar ampliamente los acuíferos. De igual manera, la agricultura o las zonas urbanas extensas pueden afectar negativamente a la calidad del agua subterránea a través de una contaminación difusa; en caso de que la zona urbana tenga un grado apreciable de industrialización, conviene apuntarlo en el estudio preliminar para una investigación posterior de mayor detalle. Si bien el vertido sin depurar de una pequeña industria se considera una fuente puntual de contaminación, si se trata de múltiples industrias sin control dispersas en una zona urbana, entonces puede convertirse en una contaminación difusa para los acuíferos someros. Las funciones o los procesos que dependen de la(s) masa(s) de agua subterránea pueden verse afectadas por esa degradación progresiva.

Tabla 3.8: Situaciones de conflicto potencial – calidad del agua subterránea

Área	Amenazas a la calidad del agua subterránea				Funciones dependientes del agua subterránea			
	Contaminantes naturales (F, As)	Salinización	Agricultura intensiva	Urbanización	Abastecimiento con sondeos	Abastecimiento con pozos abiertos	Manantiales y cursos de superficie	Ecosistemas
1								
2								
3								
.....								
N								

Leyenda:	importancia	intensidad	cantidad
-	ninguna	no	ninguno
+	pequeña	débil	pocos
++	media	media	algunos
+++	alta	alta	muchos

Se puede completar la tabla con los datos de la leyenda, o con otros que resulten útiles; los propuestos en la leyenda son simplemente cualitativos y van del “ninguno” al “muchos”, o similar. La tabla y la leyenda son susceptibles de cambios acordes con las necesidades y con la información disponible.

Tendencias observadas en la calidad del agua subterránea

La Tabla 3.9 puede servir para indicar si el deterioro en la calidad de la masa de agua es ya un hecho en determinadas áreas de la zona de estudio. Se rellena a partir de la información disponible o preguntando a los dueños de los pozos, a los gestores del agua, a los responsables oficiales, y a otras personas que estén al tanto de la situación en la zona.

Se consideran las siguientes categorías en las tendencias:

- Aumento observado en la degradación del agua subterránea, de origen difuso (no se consideran las fuentes locales de contaminación, dado que no están contempladas en el programa de seguimiento de referencia a escala regional).
- Aumento observado de contaminantes en el agua bombeada para abastecimiento.
- Aumento observado de problemas con la calidad del agua subterránea en funciones que dependen de ella: manantiales, cursos de agua superficiales o ecosistemas.

Tabla 3.9: Tendencias observadas – calidad del agua subterránea

Área	Incremento observado en la contaminación del agua subterránea a causa de fuentes difusas				Incremento observado de los problemas con la calidad del agua subterránea en funciones que dependen de ella			
	Contaminante natural (F,As)	Salinización	Agricultura intensiva	Urbanización	Abastecimiento con sondeos	Abastecimiento con pozos abiertos	Manantiales o cursos	Ecosistemas
1								
2								
3								
.....								
N								

Leyenda:	intensidad
-	ninguna
+	débil
++	media
+++	alta

En el siguiente apartado 3.5 se desarrolla una estimación preliminar de las situaciones en conflicto.

3.5 Valoración preliminar de los resultados y definición de temas clave

Los resultados preliminares encontrados en este capítulo conducen a un cierto número de tablas o cuadros, que proporcionan una panorámica sobre la situación de las aguas subterráneas y sus usuarios, así como de los posibles impactos de su explotación sobre otros usuarios, y también sobre otras funciones en la zona de estudio que dependen del acuífero; todo ello hasta donde lo permite la información disponible. El estudio de las respuestas condensadas en las tablas debiera proporcionar una buena idea sobre los problemas existentes, más y menos importantes, y también facilitar un listado de prioridades en cuanto a los temas clave a considerar y cubrir con el programa de seguimiento. El alcance y tamaño de dicho programa sólo podrá concretarse después de una investigación de mayor detalle con base en las estimaciones preliminares obtenidas en este capítulo (ver capítulos 4 a 8). Los comentarios que siguen pretenden contribuir a una mejor evaluación de los hechos a partir del contenido de las tablas.

Estimación preliminar de las condiciones del acuífero

Al estudiar las posibilidades de los acuíferos en la zona considerada, la Tabla 3.2 y la Tabla 3.3 van a dar una idea sobre la magnitud de los entornos con y sin acuíferos.

- En áreas de entorno-sin-acuífero (p.ej., áreas de basamento), los cuerpos de agua subterránea pueden verse limitados a zonas locales o incluso no existir; resulta entonces improbable la necesidad de un programa sistemático y sustancial. En caso de haber una exigencia local por controlar el agotamiento o la degradación del agua subterránea, el seguimiento correspondiente puede hacerse en (algunos) pozos singulares.
- En áreas de entorno-con-acuífero la evaluación preliminar en cuanto a la situación del agua subterránea y a los temas clave, debiera verse continuada por una investigación de mayor detalle

Si no se han encontrado áreas de entorno-con-acuífero que sean sustanciales, el estudio puede plantearse en este punto iniciar la elaboración del informe final sin emprender más investigaciones. En el caso de que sean necesarias investigaciones posteriores, debiera considerarse la división de la zona en partes prácticas con base en la topografía, los bordes de las áreas de captación (eventual) y las superficies con acuífero. La Tabla 3.4 está llamada a proporcionar una panorámica sobre la extensión, espesor y profundidad de la zona saturada, y sobre el volumen de agua subterránea almacenado en las diversas áreas con acuíferos.

Evaluación preliminar de la situación del agua subterránea

La Tabla 3.5 proporciona una visión preliminar de conjunto sobre el estado del agua subterránea y su aplicación potencial a diversos usos en diversas áreas. A pesar de apoyarse en estimaciones un tanto aproximadas, esta tabla debiera proporcionar una idea de partida sobre las áreas prometedoras para un abastecimiento de agua subterránea (volumen almacenado y recarga suficientes), y sobre las que resultan menos productivas. También permite calcular el coeficiente de utilización actual (extracción dividida por recarga), así como proporcionar —en combinación con la recarga estimada— una idea preliminar de qué áreas se encuentran ya intensamente explotadas y de cuáles presentan oportunidades para un desarrollo futuro. En cualquier caso, la calidad del agua subterránea puede ser un factor limitante para ciertos usos.

Por último, conviene subrayar que el programa de seguimiento puede ser de ayuda en los estudios para cuantificar la recarga anual y para determinar el potencial de un desarrollo futuro con mucha mayor certeza. Así, uno de los objetivos de la red de vigilancia de referencia consiste en proporcionar datos para el estudio y la gestión de los recursos de agua a escala regional.

Evaluación de las tendencias observadas y de los conflictos en potencia

El seguimiento puede servir como herramienta para controlar el equilibrio entre asuntos de interés contrapuestos (p.ej., rechazar una bajada de niveles inaceptable o una contaminación de los recursos, frente al abastecimiento para el consumo humano o el regadío) o entre grupos diferentes (p.ej., el suministro urbano frente al abastecimiento para regadío). La prioridad que se establezca en esos casos dependerá en parte de decisiones políticas o administrativas.

- Las Tablas 3.6 y 3.8 muestran los diversos tipos de conflicto que pueden presentarse en las distintas áreas de la zona de estudio, simplemente haciendo una lista con los usuarios y las funciones y procesos que dependen de la masa de agua, e indicando su importancia relativa mediante los índices que se señalan.
- Las Tablas 3.7 y 3.9 muestran cuándo las situaciones de conflicto potencial ya han desembocado en tendencias negativas que se pueden observar, aunque no haya seguridad de que todas estén registradas. Por ejemplo, el impacto que diversos abastecimientos pueden crear unos sobre otros sólo se puede concretar de manera indirecta.

Las situaciones de conflicto se pueden analizar área por área o bien en conjunto para toda la zona de estudio, y lo mismo al inventariar los asuntos clave, diferenciando posteriormente las prioridades por áreas en lo que concierne al programa de seguimiento del agua subterránea.

Valoración de la situación del agua subterránea en cantidad

Conviene tener en cuenta los siguientes tipos de situación conflictiva:

1. entre las extracciones y otras funciones dependientes del agua subterránea;
2. entre las extracciones y los procesos dependientes del agua subterránea;
3. entre diferentes usuarios: sus bombeos pueden estorbarse unos a otros.

Valoración de la situación del agua subterránea en calidad

Se pueden considerar los siguientes tipos de conflicto:

1. degradación del agua subterránea por sustancias naturales, con consecuencias negativas sobre el abastecimiento y sobre las funciones que dependen de este agua;
2. amenazas de contaminación difusa sobre la calidad del agua subterránea por actividad agraria o urbanización intensivas, con consecuencias negativas sobre el abastecimiento y las funciones que dependen de esta agua.

Clasificación de las situaciones conflictivas – ejemplos de conflicto entre funciones dependientes del agua subterránea y extracciones para abastecimiento en una misma área.

Se tendrá una situación conflictiva siempre que sea positiva (+) una columna de los usuarios (suministro de agua) o de las funciones dependientes del agua subterránea (Tabla 3.6). El riesgo de conflicto es tanto mayor cuanto más numerosas sean las funciones dependientes involucradas y más alto su índice en la tabla; de igual manera, cuanto más numerosos sean los

suministradores de agua que se vean afectados y más alto sea su índice respectivo. Incluso existe ya un riesgo de conflicto si dan positivo las tendencias observadas en una de las columnas de las funciones dependientes (Tabla 3.7), siendo aún más grave la situación si esa tendencia es intensa.

Definición de los temas clave

Se puede establecer una lista de asuntos clave tomando como base la necesidad del desarrollo posterior y las situaciones conflictivas encontradas en toda la zona de estudio.

- La Tabla 3.5 y los mapas correspondientes pueden servir para establecer prioridades en estudios posteriores, así como en el desarrollo y control de los recursos del acuífero.
- Las Tablas 3.6 a 3.9 dan una idea preliminar de los diversos usuarios, procesos y funciones que rivalizan entre ellos por el agua del acuífero.

Una clasificación de las situaciones conflictivas existentes facilita el establecimiento de prioridades en la lista de temas clave encontrados.

3.6 Definición de una escala para el seguimiento sostenible

A efectos de precisar hasta qué punto un programa de seguimiento va a poder ser llevado a cabo, es necesario conocer la capacidad del equipo técnico encargado de ello y el presupuesto disponible, así como los costes del mantenimiento de la red de vigilancia, de la toma de datos, de los análisis y de la gestión en general. El capítulo 8 y el anejo F ofrecen unos grandes números de costes unitarios, aun cuando en cada país sean diferentes y deban ser comprobados en cada caso. Estos valores pueden servir para hacer estimaciones aproximadas en el presente apartado.

Presupuesto anual y capacidad permanente del equipo de trabajo, para el programa de seguimiento.

Para mantener el programa de seguimiento de las aguas subterráneas que se pretende, es necesario disponer de un presupuesto anual y de un grupo encargado de ello que tenga capacidad técnica probada. Es necesario conocer lo siguiente:

1. Una estimación del presupuesto disponible para las actividades normales del seguimiento en la zona de trabajo, que debiera ser preparada por el director/gestor que encarga el diseño y el establecimiento del programa.
2. El número de técnicos disponibles para el mantenimiento de la red de vigilancia y para el tratamiento normal de los datos, que aportará el gestor mencionado.
3. El coste de la perforación, instalación y desarrollo de los sondeos que tengan que sustituir a puntos de observación actuales, que será confirmado por las empresas perforadoras. Se puede tener una estimación de la vida media de los pozos preguntando entre los dueños locales.
4. El tiempo y los costes involucrados en la toma de datos y muestras, que puede calcularse de manera aproximada a partir del calendario de las salidas al campo, de las distancias medias a recorrer, del precio del km, del equipo necesario y del material fungible, etc.

5. Los costes relativos a la conservación y análisis en laboratorio de las muestras de agua.
6. El tiempo y los costes que conlleva el procesado de los datos, su validación y almacenamiento, estimados en función de la experiencia de gabinete que haya.

El tamaño de una red de vigilancia sostenible puede calcularse repartiendo el presupuesto disponible entre: “mantenimiento de la red (incluyendo reparaciones y recambios)”, “recogida de datos”, “coste del laboratorio”, y “trabajo de gabinete”, y dividiendo cada uno de estos presupuestos parciales por el coste unitario de sus diversas actividades. Después de varios ajustes (redistribuyendo los medios disponibles de distinta manera) se obtiene un valor medio para el número de puntos de observación, número que significa una aceptable referencia para el programa de seguimiento sostenible.

En caso de que haya varios organismos o instituciones—cada uno con su experiencia y objetivos particulares— involucrados en la recogida, procesado y estudio de los datos, entonces las actividades pueden compartirse, sumándose las capacidades totales para el programa, si bien hay que contar con un cierto solapamiento y tiempo extra para coordinarse y comunicarse.

Presupuesto aparte para diseño y mejora de la red.

Se requiere un presupuesto independiente para llevar a cabo el diseño del seguimiento y también una inversión para actualizar la red, una vez asumido que la red existente es insuficiente.

Coste y tiempo relativos al diseño. Dependen del alcance y complejidad del programa de seguimiento que se vaya a desarrollar, de la experiencia del diseñador y del tiempo para la organización necesaria (visitas, reuniones y preparativos). El tamaño estimado del programa sostenible, la complejidad de la situación y la información de la que ya se dispone (apartados 3.3, 3.4 y 3.5) conforman la base en el cálculo de las inversiones necesarias para el diseño de la red y para su mejora mediante la instalación de nuevos pozos.

Coste de ampliación de la red. Si es necesario ampliar la red formada por los pozos disponibles, hará falta un presupuesto adicional para la instalación de nuevos sondeos de observación, presupuesto que se podrá distribuir a lo largo de varios años. Las partidas para estos capítulos tienen que estar separadas del presupuesto normal relativo al desarrollo del programa, según se indicó anteriormente.

Resultados esperados de este capítulo:

Se ha pasado revista en este capítulo a una serie de hechos y estimaciones relevantes que constituyen la plataforma para tomar decisiones relativas a la necesidad, alcance posible y prioridades del programa para el seguimiento de las aguas subterráneas que se persigue. Son de esperar los siguientes puntos:

- *Un mapa provisional de las superficies con y sin acuíferos en la zona de trabajo, mapa que puede estar dividido en unidades más pequeñas atendiendo a los bordes de las sub-áreas de captación (eventual) y a los distintos tipos de acuífero, a efectos de un estudio posterior más detallado.*
- *Una visión preliminar de la recarga, almacenamiento y uso presente del agua subterránea en las diferentes áreas de la zona de trabajo.*
- *Una aproximación preliminar a las situaciones conflictivas, actuales o potenciales, a partir de las tendencias observadas y de las interferencias posibles entre los propios usuarios del acuífero, y también con los procesos y funciones dependientes del agua subterránea en la zona considerada.*
- *Una lista de temas clave, con prioridades, para el programa de seguimiento del agua subterránea regional.*
- *Una estimación aceptable del tamaño de la red de vigilancia que puede ser gestionada, teniendo en cuenta el presupuesto y la capacidad institucional disponibles.*

Todo ello conviene que sea recogido en un informe inicial que utilice este material de partida para establecer sin demora el alcance y escala del programa que se propone para el seguimiento de las aguas subterráneas.

Análisis del sistema Agua Subterránea

Este capítulo se centra en el análisis del sistema formado por las aguas subterráneas y en el desarrollo de un modelo conceptual, a partir de la información hidrológica e hidrogeológica disponible. El resultado de estas actuaciones constituye la base del diseño del programa de seguimiento.

- *La descripción del modelo conceptual debe incluir el marco hidrogeológico de los acuíferos, acuitardos y acuiclusos, así como el sistema de flujo dentro de estas formaciones y entre ellas. Por otro lado, este modelo debiera identificar las zonas de recarga y descarga del sistema subterráneo, y esbozar el grado de interacción entre las aguas subterráneas y de superficie.*
- *Se pueden estudiar los registros del nivel del agua, si están disponibles, como orientación de la sobre-explotación.*
- *El análisis comprende igualmente la calidad del agua subterránea, la cual puede aportar luz sobre el origen del agua y los procesos químicos susceptibles de darse en los acuíferos. El estudio de esta calidad puede también dar indicaciones sobre eventuales degradaciones del agua debidas al uso del terreno.*
- *El modelo conceptual constituye el marco técnico básico para diseñar la red de vigilancia de la masa de agua subterránea. Al mismo tiempo, las primeras indicaciones de deterioro en el acuífero son importantes para la planificación del programa de seguimiento.*

4.1 El modelo conceptual

El diseño de un programa de seguimiento para el agua subterránea requiere un conocimiento básico del marco hidrogeológico y del sistema de flujo del agua en los acuíferos, acuitardos y acuiclusos que tengan relevancia. El modelo conceptual consiste en la descripción del escenario constituido por el marco hidrogeológico y por los procesos hidrológicos e hidroquímicos que se están dando en él; su nivel de complejidad debe ser el correspondiente a los objetivos del programa y a los datos disponibles. En los primeros momentos del estudio de la masa de agua subterránea, cuando sólo se tienen unos datos elementales normalmente escasos sobre estos temas, sólo suele disponerse de una visión rudimentaria como representación del sistema real; más adelante, según los datos van acumulándose, el nivel de complejidad de esta representación va creciendo también. Además de jugar un importante papel en el análisis preliminar del sistema acuífero, el modelo constituye la base para el diseño del programa de seguimiento de las aguas subterráneas; los datos reunidos con esta finalidad, preexistentes o de reciente obtención, deben también ser analizados con miras a descubrir indicaciones sobre impactos potenciales. Por todo ello, el desarrollo de un modelo conceptual debe ser una de las primeras acciones a acometer en el procedimiento de diseño, aun cuando este primer intento haya de ser muy simplificado.

Para establecer un modelo conceptual del sistema acuífero hay que repasar los datos disponibles que sean de interés en relación con la topografía, la hidrología, la hidrogeología y la hidroquímica, y en muchos casos plantear un programa para conseguir datos adicionales. El modelo se apoya tanto en la interpretación de estos datos como en la impresión visual obtenida en campo: en gran medida, este modelo significa la concepción que el hidrogeólogo experimentado se ha hecho sobre cómo “funciona” el sistema acuífero en estudio.

No existe un procedimiento específico que conduzca al modelo conceptual en todos los casos y condiciones imaginables. En su lugar, para definir el modelo conceptual apropiado, en su caso particular y en el momento dado, el usuario tendrá que combinar la información relevante y la observación en campo con su conocimiento, prudencia y sentido común. Los modelos numéricos aplicados en hidrogeología, incluso los relativamente simples, pueden ser de una ayuda considerable a la hora de comprender y precisar las pautas del comportamiento del flujo subterráneo. Preparar un modelo conceptual puede ser entre simple y relativamente complicado, según los datos disponibles y el propósito para el que se esté construyendo: si se trata del seguimiento del agua, esa preparación debe guardar un equilibrio con la escala del programa de vigilancia y con los datos disponibles; para un seguimiento de referencia, con una red a gran escala, no se necesita un nivel de detalle muy preciso. La descripción de un modelo conceptual no requiere necesariamente mucha literatura: un buen esquema gráfico prevalece a menudo sobre muchas palabras (ver p.ej. las figuras que siguen). Conviene además tener presente que un modelo conceptual resulta de la comprensión global sobre cómo “funciona” el sistema acuífero en el momento de hacerse el estudio, y que este nivel de entendimiento va generalmente creciendo al ir apareciendo nuevos detalles: consiguientemente el modelo conceptual y el programa de seguimiento irán madurando con el paso del tiempo.

En los apartados siguientes se describen de manera concisa los componentes principales que intervienen en un modelo conceptual, así como un posible procedimiento para conseguir un resultado apropiado.

4.2 Recopilación de datos

La fase de inventario de datos incluye a menudo los pasos siguientes:

1. Recopilación y estudio de los documentos publicados en relación con la topografía, la hidrología, la hidrogeología, así como con información de la zona de trabajo;
2. Recopilación y estudio de datos específicos del lugar, como pueden ser los relativos al sistema (o sistemas) acuífero en cuestión: registros litológicos y geofísicos de los sondeos, resultados de los ensayos de bombeo, etc.; datos relativos a la masa de agua subterránea: niveles y análisis químicos; datos relativos a la relación entre el agua subterránea y superficial (caudales ecológicos, manantiales); y, cuando sea necesario, datos de pluviometría y evaporación.
3. Recopilación y estudio de nueva información relativa al sistema acuífero, que puede abarcar desde rápidos reconocimientos en superficie aplicando GPS y ensayos con equipos portátiles, hasta sondeos de investigación y ensayos de bombeo.

El estudio de material publicado en casos semejantes (p.ej., mediante búsquedas en Internet) puede ser de utilidad, especialmente cuando es muy escasa la información disponible de partida.

4.3 Definición del marco hidrogeológico

Las formaciones geológicas constituyen la estructura básica del marco hidrogeológico, a través del cual fluye el agua subterránea desde la zona de infiltración hasta la de descarga. Este marco está formado a menudo por materiales con una permeabilidad relativamente alta (acuíferos) o bien limitada (acuitardos), y materiales prácticamente sin permeabilidad alguna (acuiclusos). Dado que el agua (subterránea) siempre tiende a seguir el camino que ofrece la menor resistencia, la mayor parte del flujo tiene lugar a través de los acuíferos: en correspondencia, la mayor parte de los pozos de observación para niveles y calidad tienen sus rejillas instaladas predominantemente en las capas de mayor permeabilidad de los acuíferos. Por ello, un marco hidrogeológico bien establecido es una información esencial para el diseño de un programa de seguimiento de las aguas subterráneas.

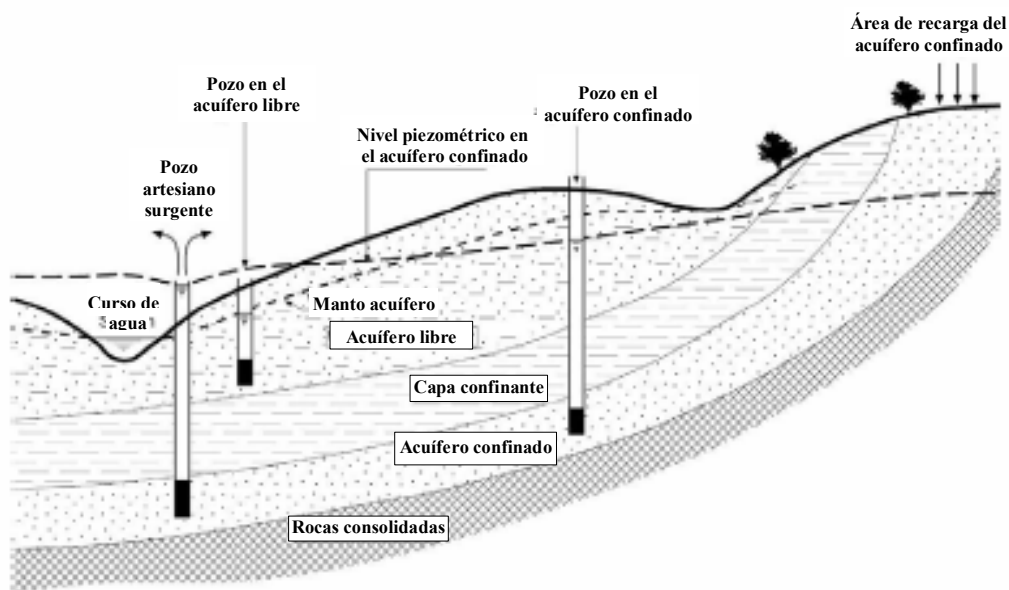


Figura 4.1: Perfil esquemático de un modelo conceptual

Los mapas hidrogeológicos y las secciones o cortes a gran escala ya existen en algunos países y muestran el marco hidrogeológico, el tipo de permeabilidad (porosa, fracturada, fisurada) y a menudo también los niveles del agua subterránea y las direcciones de flujo.

Sin embargo, en muchos países estos mapas todavía no existen, y entonces el marco hidrogeológico básico tendrá que deducirse de los mapas y cortes geológicos que haya de la zona de estudio. No obstante, esta información geológica raramente está disponible para hacer directamente una representación del modelo conceptual, por lo que entonces será necesario crear una serie de mapas y perfiles a la medida. Se pueden dar las siguientes situaciones:

- Los mapas geológicos regionales no existen o bien, debido a su gran escala, la información que proporcionan no tiene el suficiente detalle. Habrá entonces que llevar a cabo registros en sondeos y toma de muestras de agua y estudiar los resultados. También pueden aportar ayuda los informes de geofísica y la información relativa a la génesis de las formaciones geológicas, a la hora de crear el modelo conceptual.

- Una posterior simplificación o esquematización puede resultar conveniente. Por ejemplo, si los acuíferos se encuentran separados por delgadas capas discontinuas de baja permeabilidad, puede interesar representarlos juntos como un único sistema acuífero, con nombre compuesto normalmente; de manera parecida, unos estratos poco permeables pueden ser agrupados como un único acuitardo, p.ej., si van acompañados por unas capas intermedias de arenas relativamente poco importantes.
- Puede ocurrir también que los mapas y cortes geológicos tengan información que no sea necesaria para el diseño del programa de seguimiento regional en cuestión: estos detalles no directamente necesarios conviene dejarlos de lado a efectos de simplificar el concepto del conjunto.

Los mapas que representen el modelo conceptual deben ser a la vez equilibrados y realistas, a una escala regional. Su elaboración requiere una cierta experiencia.

Se debe conceder una especial atención a aquellas áreas donde los sistemas acuíferos profundos afloran en superficie, áreas que pueden encontrarse fuera de las zonas de estudio o de captación (eventual), incluso en un país vecino. Si éste es el caso, una parte considerable de la recarga del acuífero provendrá en el futuro de una superficie alejada de los sondeos de extracción; en la práctica, esto conlleva a menudo una falta de datos que impone límites a los cálculos que se hagan sobre dicha recarga y el balance del agua: la definición del potencial de desarrollo en estos acuíferos dependerá más entonces del registro de los niveles profundos, lo cual puede tener implicaciones para el programa de seguimiento.

Cuando los mapas y los cortes hidrogeológicos todavía no existen, es recomendable que el modelo conceptual del marco hidrogeológico se visualice mediante los puntos siguientes:

- Un mapa (o mapas) de contorno mostrando la extensión y espesor de los sistemas acuíferos principales, así como los alineamientos de las zonas con discontinuidades;
- Un mínimo de dos cortes/secciones, perpendiculares entre sí, que atraviesen las partes clave de los sistemas acuíferos y que muestren la secuencia de acuíferos y acuitardos así como la base hidrológica;
- Una o varias tablas que recojan la secuencia de acuíferos y acuitardos con la profundidad, el tipo de roca atravesada y los valores estimados o calculados para sus parámetros hidráulicos (p.ej., valores medio y extremos), valores que también se representarán en los mapas.

4.4 Estudio del flujo subterráneo

Sistemas de flujo en el agua subterránea

Los sistemas de flujo en el agua subterránea se definen como las unidades espaciales o celdas por las cuales fluye el agua subterránea desde la zona de recarga hasta la zona de descarga o extracción (Figura 4.2).

Tienen una importancia especial al estudiar el origen del agua subterránea y sus interacciones con el entorno. Un sistema acuífero puede comprender diversos subsistemas de flujo subterráneo, estando los pequeños y superficiales normalmente integrados dentro de los más grandes y profundos; los someros suelen drenar a través de pequeños cauces superficiales mientras que los más grandes descargan en ríos principales o directamente al mar. Estos sistemas de

flujo están separados unos de otros por capas impermeables o divisorias de agua subterránea de tipo “tenue”.

El flujo del agua subterránea es conducido por la gravedad, causa del desplazamiento del agua, desde las zonas de recarga con relativamente alto nivel hacia las de bajo nivel, siguiendo las líneas de flujo. El recorrido o trazado de estas líneas se ve condicionado por las propiedades hidráulicas del subsuelo, discurriendo preferentemente por los materiales acuíferos. Esta mutua relación entre el sistema de flujo subterráneo y el marco hidrogeológico correspondiente, depende también de la escala considerada: puede haber diversos sistemas de flujo pequeños en acuíferos someros, o bien sistemas de flujo extensos y profundos que atraviesan varios acuíferos o acuitardos.

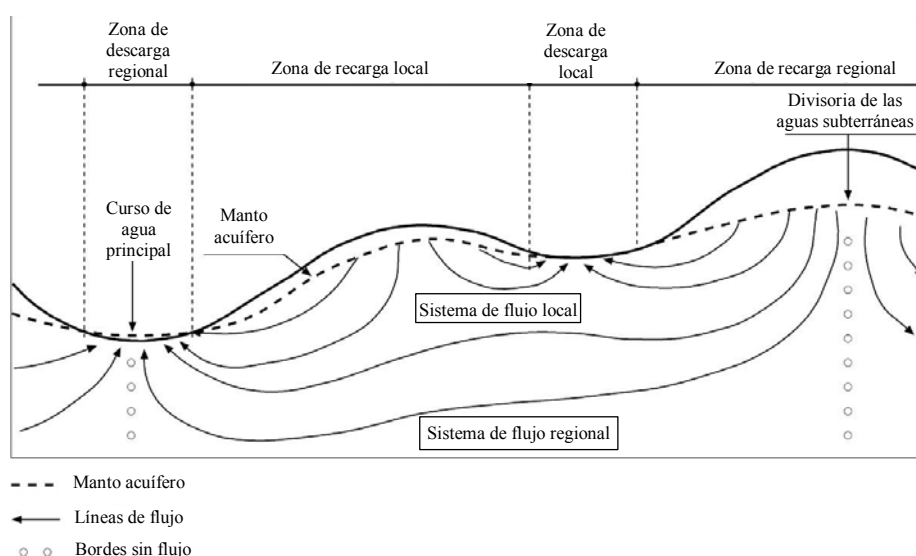


Figura 4.2: Sección esquemática de los sistemas de flujo del agua subterránea

El análisis del sistema de flujo y de sus líneas direccionales proporciona una información esencial para el estudio a) de la evolución en la calidad del agua subterránea, b) del posible impacto de contaminantes, y c) del efecto derivado de las medidas medioambientales que se apliquen. El tiempo de residencia en grandes sistemas acuíferos puede superar varias decenas de millares de años; la calidad del agua subterránea es por lo tanto normalmente el resultado de su interacción química con la matriz rocosa por la que circula a lo largo de muy largos periodos de tiempo: esta prolongada relación química entre el agua y su entorno inmediato puede ser utilizada para diferenciar diversos tipos de calidades en las aguas subterráneas. Por su lado, los acuíferos pequeños y someros tienen unas líneas de flujo relativamente cortas y los tiempos de desplazamiento a su través son breves; la calidad de sus aguas puede presentar todo tipo de influencias recientes.

Sistemas de flujo profundos y someros

Acuíferos libres con el nivel somero. En los acuíferos libres someros puede darse una interacción directa entre las aguas de superficie y la masa de agua subterránea. Cuando ésta drena a

través de ríos, manantiales o lagos, el nivel del agua en superficie se corresponde aproximadamente con el nivel del agua subterránea (Figura 4.3a); cuando es el agua superficial quien alimenta al acuífero, se suele dar una situación similar (Figura 4.3b). La resistencia hidráulica del fondo del cauce o lago (“resistencia a la entrada”) puede causar pequeñas diferencias entre estos dos tipos de niveles, lo cual suele resultar insignificante a escala regional; sin embargo, en una situación de recarga conviene estar atentos a la aparición de una zona insaturada debajo del lecho superficial que interrumpa la continuidad hidráulica entre ambos niveles de agua, superficial y subterráneo (Figura 4.3c). En aquellos sistemas con el manto acuífero somero, la divisoria de las aguas subterráneas se corresponde más o menos con la de las aguas de superficie.

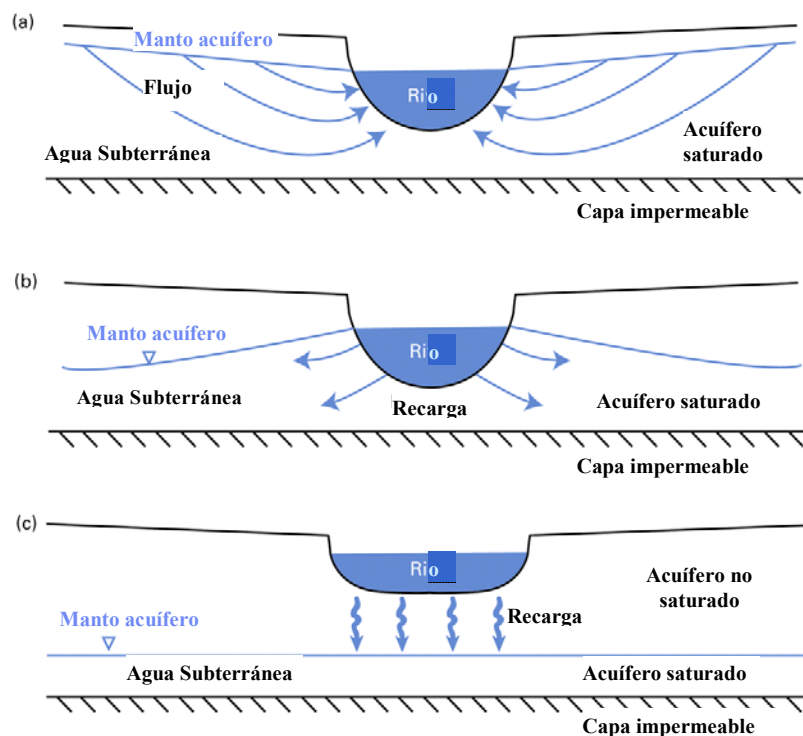


Figura 4.3: Ejemplos de conexión hidráulica entre aguas subterráneas y superficiales

La relación anterior entre los niveles de las aguas subterráneas y superficiales, puede servir para dibujar los límites del manto acuífero. Por otra parte, ciertos puntos de observación utilizados para medir el nivel de las aguas de superficie también pueden servir de complemento de la red de vigilancia del agua subterránea.

Acuíferos libres con el manto profundo. En aquellos casos de acuíferos libres con la zona insaturada profunda (p.ej., con el nivel a más de 20 m de profundidad) las vías de drenaje sólo pueden descargar el agua de superficie, sin conexión con la masa de agua subterránea: la descarga subterránea se verificará entonces a través de los ríos grandes. En las áreas entre ríos, las medidas que se realicen en pozos y sondeos indicarán únicamente la profundidad del manto: las medidas de nivel tomadas en estos puntos constituyen la base necesaria para representar el flujo subterráneo.

Acuíferos confinados. En estos acuíferos, los niveles medidos en los puntos de observación representan la carga hidráulica en la base de su formación confinante; estos puntos constituyen el único modo de medir la presión hidráulica en este tipo de sistemas. Los acuíferos confinados profundos pueden aflorar a la superficie lejos de la zona de estudio o de captación (eventual) considerada, incluso en otro país; en este caso el análisis del sistema acuífero puede complicarse, adquiriendo importancia los puntos de observación en las áreas fronterizas.

Cuantificación del flujo y del agua subterránea almacenada

Cálculo del balance de agua. Este cálculo es un paso importante que servirá para cuantificar los distintos componentes que intervienen en la recarga y descarga, así como los correspondientes cambios (aumento o disminución) del volumen almacenado, durante un cierto periodo de tiempo, proporcionando una visión cada vez mejor de la magnitud de dichos componentes e indicando además dónde resultan escasos los datos. Este balance del agua ayudará también a dilucidar si la situación corriente del acuífero es sostenible, así como a estimar el potencial del sistema acuífero para un desarrollo futuro. En caso de que este cálculo no consiga facilitar una estimación razonable de los componentes clave, esto significará que el nivel de confianza en el modelo conceptual debiera ser más bien bajo. Se indican a continuación los componentes típicos en un balance de agua (Tabla 4.1):

Tabla 4.1: Balance del agua subterránea y componentes de las entradas y salidas

Entradas	Salidas
Recarga directa por agua de lluvia	Descarga a los ríos
Recarga desde los cuerpos de agua superficial	Evapotranspiración
Pérdidas en conducciones urbanas (colectores,...)	Extracciones
Retorno del regadío	Salidas subterráneas laterales
Entradas subterráneas laterales	
<i>Almacenamiento decreciente</i> <i>(caída en los niveles piezométricos)</i>	<i>Almacenamiento creciente</i> <i>(subida en los niveles piezométricos)</i>

El aumento en el agua almacenada (subida de los niveles) se da cuando la suma de las entradas excede a la suma de las salidas, en el tiempo considerado. La disminución en el almacenamiento ocurre en el caso opuesto.

A notar que la mayoría de estos componentes son difíciles de medir directamente y pueden tener que ser estimados (p.ej., recurriendo al consumo de agua per cápita o a índices genéricos de fugas en conducciones de agua o en colectores).

Aplicación de modelos numéricos al flujo de las aguas subterráneas. Estos modelos, incluso los sencillos, pueden ayudar considerablemente a comprender el flujo del agua subterránea y la evolución de su calidad en la zona de estudio, llegando a ser extremadamente útiles para determinar la dirección y velocidad de dicho flujo. Un análisis de sensibilidad a través del modelo indicará dónde faltan datos o dónde el resultado es poco firme.

Los modelos para aguas subterráneas requieren un mínimo de datos básicos en cuanto a la topografía, el marco del acuífero, la profundidad del manto y los niveles del agua. Cuando aún no se tiene una idea suficiente sobre el funcionamiento del acuífero, incluso un modelo conceptual aproximado –por ejemplo, el de sistema acuífero simple— puede facilitar la dirección

principal del flujo; es por lo tanto importante en estos casos describir las simplificaciones que se han aplicado y las distintas variables que pueden darse. Si se dispone de suficiente hardware, software, experiencia y presupuesto, entonces se recomienda un cierto nivel apropiado para el modelado de la masa de agua subterránea, como soporte para el diseño de su seguimiento.

4.5 Estudio de la calidad del agua subterránea

Un repaso de los datos hidroquímicos disponibles va a proporcionar una visión importante sobre cómo se encuentra la calidad del agua en el acuífero, sobre los procesos y cambios químicos que se están dando y sobre sus posibles causas. Los cambios químicos pueden deberse a la recarga por agua de lluvia, a la infiltración de aguas superficiales, a la entrada lateral subterránea desde otro acuífero, a la (considerable) evaporación, a la intrusión salina o a la contaminación. La variación de la calidad a lo largo de las líneas del flujo subterráneo también puede tener su origen en la interacción química entre el agua y la matriz rocosa.

La interpretación de los datos relativos a la calidad del agua subterránea ayudará a determinar su origen y edad, contribuyendo así al estudio del flujo, y al mismo tiempo las amenazas potenciales (intrusión marina o salina, contaminación, etc.) y las perspectivas y limitaciones para un desarrollo en el futuro. En este apartado sólo se ofrece una lista concisa de las acciones que se necesitan para definir en qué estado se encuentra dicha calidad, para comprender mejor los mecanismos y procesos que la han precedido, y para tener una identificación preliminar de las posibles amenazas para su futuro. Los métodos para interpretar en detalle los procesos hidroquímicos vienen descritos en muchas guías y manuales (p.ej., Davis & DeWiest 1996; Hem 1992; EPA 1989; Freeze & Cherry 1979), a los que se remite al lector.

Acuíferos con sistema de flujo somero

La mayoría de los sistemas de flujo en aguas subterráneas someras presentan unas líneas de circulación cortas y unos tiempos de desplazamiento breves, lo cual proporciona una cierta vulnerabilidad (en el espacio y en el tiempo) ante cambios rápidos en la calidad del agua motivados por variaciones locales en el uso del suelo. La experiencia demuestra que pozos próximos pueden mostrar calidades significativamente diferentes, mientras que por el contrario muestras tomadas en manantiales o en cursos superficiales alimentados por aguas subterráneas, tenderán a mostrar valores medios representativos de una parte del acuífero o de todo el sistema en sí.

Cuando existen varios acuíferos someros parecidos a lo largo de una gran extensión —como ocurre en las llanuras costeras, con unos sistemas de drenaje o de riego que se repiten— es fácil encontrar diversos sistemas someros semejantes, en proximidad unos de otros y difiriendo poco entre sí. Con miras a una buena economía de costes, la recogida de datos en este tipo de áreas debe llevarse a cabo sobre la base de un plan bien preparado que tenga en cuenta la similitud y las diferencias entre estos sistemas, plan que puede contemplar un número limitado de áreas piloto (unidades) seleccionadas en función de la situación del acuífero y de las diferencias en el uso del suelo. Una posible división simple según el uso del suelo podría ser: área urbana, área agrícola con o sin regadío, pastizal, bosque o área silvestre. Este plan para la toma de datos puede constituir el punto de partida para un futuro programa de seguimiento.

Para obtener una imagen general de la calidad del agua que incluya sus diversos tipos, su origen y los indicadores primarios de una eventual contaminación, se deben analizar en las muestras los siguientes elementos y parámetros: Ca, Mg, Na, K, NH₄, Fe^c, Mn^c, SiO₂, HCO₃, SO₄, Cl, NO₃, PO₄ (iones principales), además de las mediciones directas en el campo del pH, CE y T. La determinación de una eventual contaminación requiere el análisis complementario de compuestos o elementos específicos, que se basará en la información disponible relativa al contexto hidrogeológico (p.ej., F en áreas volcánicas o en el basamento, y As en grandes deltas aluviales o en zonas mineras), y al uso del suelo también (p.ej., B, Zn o compuestos orgánicos en áreas urbanas).

Acuíferos con sistema de flujo profundo o semi-profundo

Según se indicó anteriormente (Apartado 4.4), el muestreo de aguas subterráneas en acuíferos que tengan el manto profundo sólo es factible en sondeos profundos y en grandes ríos (ocasionalmente, también en manantiales) que básicamente se alimenten de su drenaje. Como en estos casos la masa de agua subterránea es generalmente extensa y profunda, con líneas de flujo largas y tiempos de desplazamiento grandes (cientos a miles de años), la influencia del hombre sobre la calidad del agua suele limitarse a la parte superior. Las tendencias en la calidad del agua a lo largo del recorrido del flujo van a ser importantes, como consecuencia de los procesos naturales que tienen lugar en esos acuíferos. Una distribución regular en los pozos de observación será ideal para conseguir una buena descripción regional; sin embargo, la disponibilidad de estos sondeos va a ser muy variable a lo largo de estos sistemas profundos.

Para un reconocimiento general de la calidad del agua subterránea, que incluya los tipos de agua, sus orígenes e indicaciones sobre eventuales contaminaciones, se deberían igualmente analizar los siguientes parámetros: Ca, Mg, Na, K, NH₄, Fe^c, Mn^c, SiO₂, HCO₃, SO₄, Cl, NO₃, PO₄ (iones principales), y medición directa en campo de pH, CE y T. La determinación de una eventual contaminación requiere el análisis complementario de compuestos o elementos específicos, que se basarán en la información disponible relativa al contexto hidrogeológico (p.ej., F en áreas volcánicas o en el basamento, y As en secuencias deltáicas de gran espesor).

Acuíferos costeros con agua subterránea salina

Los acuíferos del litoral tienen con frecuencia agua salobre y salina en profundidad. La interfase agua dulce / agua salada se encuentra cerca de la superficie en la costa y va descendiendo a mayor profundidad al irse alejando tierra adentro. Esta “interfase” está constituida por una zona de transición salobre, con un espesor variable entre algunos metros y decenas de metros según la dinámica del sistema de flujo subterráneo. En condiciones naturales la interfase agua dulce / agua salada puede estar en reposo; sin embargo, el bombeo de la parte superior de la masa de agua puede provocar el desplazamiento de la interfase hacia el interior y hacia arriba poniendo en peligro los pozos y el medio ambiente en la zona. En consecuencia, los sondeos próximos a la costa (p.ej., a menos de unos 20 km) deben ser muestreados en cuanto a la calidad de su agua, especialmente su contenido en cloruros. Si ya se dispone de registros, en el caso de que exista intrusión marina éstos deben mostrar niveles de cloruros progresivamente más altos hacia las partes más profundas. No obstante, suele ser difícil obtener información de sondeos profundos.

En caso de requerir información adicional, el valor de la CE es un buen indicador de la salinidad del agua en el rango agua salobre / agua salina. Como sus valores pueden medirse direc-

tamente en campo, resulta así una manera directa, rápida y barata para explorar la situación en que se encuentra el acuífero en relación con la intrusión marina.

Resultados que se esperan de este capítulo:

Con este capítulo se deberían conseguir unos mapas, cortes o secciones y cuadros o tablas, útiles para describir un modelo hidrogeológico conceptual, sobre la base de la información existente completada con observaciones en campo. La información necesaria para ello comprende:

- Un mapa (o mapas) de base donde se muestra la extensión y espesor de los principales sistemas acuíferos, así como el trazado de las eventuales discontinuidades en la zona de trabajo.
- Un mínimo de dos cortes, perpendiculares entre sí, mostrando las secciones clave de los sistemas acuíferos y en particular la secuencia de acuíferos y acuitardos, así como la base hidrológica de superficie.
- Una tabla (o tablas) con la lista de acuíferos y acuitardos en secuencia desde la superficie hasta el basamento, con los tipos de roca cortados y con el rango de valores y valor medio de sus parámetros hidráulicos; estos valores irán igualmente indicados en los mapas.
- Un mapa mostrando la piezometría (niveles, curvas) en la zona de trabajo.
- Mapa(s) y/o secciones que muestren la extensión y profundidad previstas para los sistemas de flujo principales y unas indicaciones aproximadas sobre las áreas de recarga y descarga. También interesa que vengan indicadas en los mapas las divisorias de agua entre los diversos sistemas de flujo, así como las direcciones estimadas para los distintos flujos.

Si la calidad del agua subterránea va a intervenir en el diseño del programa de seguimiento, deben prepararse también los siguientes mapas:

- En los cuerpos de agua profundos, mapas de los parámetros más relevantes de su calidad, o bien tipos de agua que caracterizan el sistema acuífero en cuestión, y mostrando las tendencias de esa calidad a lo largo de las líneas de flujo.
- En las masas de agua someras, mapas que indiquen las áreas piloto seleccionadas, con la situación de los puntos muestreados, además de tablas o gráficos mostrando la calidad del agua en cada una de ellas.

En los acuíferos costeros con problemas (eventuales) de salinización, se necesita la siguiente información:

- Un corte (o varios) en la dirección perpendicular a la costa que muestre la situación hidrogeológica así como la distancia en profundidad hasta el agua salobre y la interfase agua dulce / agua salada.
- Un mapa marcando el contorno de la profundidad hasta el agua salobre y la interfase agua dulce / agua salada. Si la información relativa a la profundidad no está disponible, un mapa mostrando la distribución espacial de la CE.

5 Análisis del marco institucional

En este capítulo se comentan los aspectos legales e institucionales susceptibles de determinar el éxito o el fracaso de los programas para el seguimiento a gran escala de las aguas subterráneas, dentro de la gestión nacional o regional de estos recursos subterráneos. La implantación y el posterior mantenimiento de un programa de este tipo, dependen en gran medida de que exista un marco legal e institucional suficiente. Esto significa que el programa se vea apoyado por leyes, políticas y reglamentos, así como claridad en las responsabilidades y en las competencias institucionales, además de la necesaria disponibilidad de conocimiento, capacidad técnica y presupuestos, que habrán de ser suficientes: cuanto mejor sea el apoyo al programa de seguimiento, mayor será la probabilidad de que su aplicación resulte un éxito. A lo largo del capítulo se comentan los puntos siguientes, supuestos en un contexto internacional:

- Aspectos legales, institucionales y administrativos relevantes en relación con los programas de seguimiento de las aguas subterráneas;
- Política y legislación en el sector del agua. Se enfatiza la importancia que tiene definir en la política nacional y en las leyes y normativas del sector del agua, la necesidad de un seguimiento y gestión de los recursos en aguas subterráneas;
- Los mandatos y responsabilidades de los entes del sector, en relación con los derechos y las obligaciones de los grupos interesados;
- La capacidad técnica necesaria en los organismos del agua que tengan mandatos y responsabilidad en el seguimiento del agua subterránea;
- El intercambio de información y la publicación de los resultados del seguimiento constituyen un requisito esencial para el éxito en la cooperación entre instituciones y para el apoyo de los entes interesados.

5.1 Marco institucional del seguimiento de las aguas subterráneas

Las normas que regulan el uso de todos los recursos de agua figuran habitualmente en una ley nacional específica, la cual puede verse complementada con una política del agua que recoge los objetivos particulares que el gobierno pretende conseguir en ese sector. Estos documentos legalmente vinculantes debieran cubrir también aspectos relativos al seguimiento del agua subterránea, dado que éste sólo puede ser efectivo si las instituciones responsables tienen un mandato legal para realizarlo, y al mismo tiempo tienen la capacidad de implementar las decisiones relativas a la gestión de este recurso que surjan como resultado de dicho seguimiento.

Los objetivos del seguimiento pueden ser diversos (calidad del agua subterránea, nivel del agua, seguimiento en un determinado acuífero o área, o durante un cierto tiempo, seguimiento de un parámetro específico), y por ello puede necesitarse la instalación y funcionamiento de diversas redes de vigilancia del agua subterránea. Igualmente puede ocurrir que se requieran redes para observar aguas de superficie, o áreas de explotación (eventual) subterránea, que

pertenezcan a más de una unidad administrativa territorial (cada una con sus propias responsabilidades institucionales en cuanto al seguimiento) o incluso a distintos países (seguimiento de acuíferos transfronterizos). Por otro lado, las redes de vigilancia pueden estar al cargo de la Administración o del sector privado. Con tan variadas posibilidades para redes de vigilancia funcionando en paralelo, hace falta asegurar que los objetivos individuales del seguimiento sean coherentes entre sí y que las opciones de su gestión puedan ciertamente ser aplicadas.

A efectos de conseguir el mayor beneficio posible de la información proporcionada por el seguimiento, se recomienda establecer unas estructuras adecuadas para el intercambio de datos entre las distintas instituciones responsables, organizaciones de usuarios del agua, organismos y ONGs; en ocasiones es oportuno formalizar este intercambio de información mediante la regulación o decreto correspondiente. Por otro lado, los datos pueden ser obtenidos por diversos organismos; en consecuencia, sus respectivos sistemas habrán de ser compatibles en términos de estándares, garantía de calidad, acceso electrónico y transferencia de datos.

La razón de ser del seguimiento del agua subterránea consiste en obtener datos que ayuden a ajustar la gestión de los recursos de agua (subterránea). En este sentido, es importante facilitar los resultados del seguimiento –junto con las conclusiones obtenidas para la gestión de dichos recursos— a todos los entes interesados y población afectada, a efectos de conseguir el acuerdo sobre las necesarias medidas correctoras a aplicar. Esto puede resultar de gran ayuda, por ejemplo, cuando la vigilancia de la calidad del agua subterránea pone de manifiesto riesgos de contaminación, o cuando el seguimiento de los niveles piezométricos muestra que están bajando de una manera que amenaza claramente a ciertos entes interesados. La Administración o los organismos responsables pueden verse obligados a publicar los datos del seguimiento. Entre todos los entes involucrados debe convenirse de qué manera y con qué frecuencia han de publicarse los datos.

A menudo, el seguimiento implica adoptar decisiones de interés nacional en relación con la gestión de las aguas subterráneas, motivo por el cual es en este nivel nacional donde se encuentra normalmente el mayor interés por una información amplia sobre el seguimiento de estas aguas. La mejor alternativa consiste en que sea una institución gubernamental de alto nivel quien se encargue de recoger y estudiar todos los datos del seguimiento, y que sea ella también la responsable de decidir la gestión correspondiente, con el apoyo necesario para su implementación. Debe evitarse el solapamiento de competencias.

5.2 Política del sector del agua y legislación

La ley del agua de un país debiera comprender, entre otros, los siguientes elementos (modificado de Asociación Internacional para las Leyes, *International Law Association*, 2004):

- Objetivos.
- Competencias, responsabilidades y control de funciones, en la Administración.
- Definición de los derechos de agua (p.ej., propiedad pública o privada).
- Regulación de las extracciones y del derecho de inyección (p.ej., aguas residuales), y de los usos del agua.

- Principios que rigen la gestión de los recursos de agua (p.ej., establecimiento de los planes de gestión del agua: Art. 13 de la Directiva Marco del Agua, UE).
- Temas relacionados con la protección del agua, como son las zonas de protección de las aguas de superficie y subterráneas, y los efectos sobre los usos del suelo (p.ej., construcciones susceptibles de afectar a la calidad o cantidad del agua, aplicación al medio ambiente de sustancias peligrosas, etc.).
- Precio del agua y regulación del mercado del agua.
- Obligaciones, responsabilidades y penalizaciones, así como compromisos de los usuarios.

La Cumbre Mundial para el Desarrollo Sostenible identificó la buena gobernanza como uno de los factores clave para alcanzar la sostenibilidad. Según el Programa para el Desarrollo, de la ONU, la gobernanza del agua se refiere a: "... el conjunto de sistemas políticos, sociales, económicos y administrativos que se han establecido para regular el desarrollo y la gestión de los recursos de agua, así como la provisión de los servicios de agua, en los distintos niveles de la sociedad". El plan de acción presentado en la Cumbre de Evián por el G-8 en 2003 establece que es esencial el desarrollo de "marcos apropiados legal, reglamentaria, institucional y técnicamente" para promover una buena gobernanza del agua. El desarrollo sostenible únicamente es factible si los derechos de uso y las obligaciones de los usuarios son objeto de negociación y acuerdo entre todos los entes interesados.

Es muy común que algunos temas que pueden afectar a la calidad y cantidad de los recursos en agua estén regulados en otras leyes, tales como las relativas al medio ambiente, a la ordenación del territorio, a la agricultura, etc. En cualquier caso tiene que quedar asegurado que estas normas no debiliten la propia ley del agua o sus reglamentos en cuanto a la protección de estos recursos, en términos de calidad y de cantidad.

Puede también que haya que adaptar la ley nacional o estatal del agua, u otras regulaciones, a las leyes internacionales cuando éstas son de rango superior, como es el caso en la Unión Europea (p.ej., las Directivas sobre el Agua de Bebida y sobre los Nitratos, la Directiva Marco del Agua y la relativa a la Protección de las Aguas Subterráneas). De igual manera, las leyes nacionales habrán de tener en cuenta los tratados internacionales o multilaterales que se firmen y que regulen la gestión de los recursos de agua (p.ej., en el marco de la gestión de los planes hidrológicos o de planes de desarrollo de acuíferos transfronterizos).

Puede ocurrir que el seguimiento de las aguas subterráneas haya de hacerse como determina la ley en algunos aspectos particulares, tales como en el caso de la calidad base (p.ej., de acuerdo con la Directiva Marco del Agua europea), o en el de las zonas de protección del agua subterránea (p.ej., de acuerdo con las leyes del agua, en los Estados Federados de Alemania), o en el de sitios contaminados y su recuperación efectiva (p.ej., de acuerdo con la Ley Federal Alemana para la Protección del Suelo), etc.

Si las leyes no proporcionan suficiente detalle en algunos temas relacionados con el agua, puede resultar de ayuda el establecimiento de políticas del agua, como se hizo en Jordania (*WORLD BANK*, 1999; *MWI*, 2003).

La política del agua jordana comprende los siguientes elementos:

- Política del Sector del Agua.

- Política de Gestión del Agua Subterránea.
- Política de Servicio Público del Agua.
- Política del Agua de Riego.
- Política de Gestión de las Aguas Residuales.

En lo concerniente al seguimiento de las aguas subterráneas, es útil que en el marco legal vayan incluidos algunos aspectos, tales como:

- La necesidad del seguimiento (por qué hace falta un seguimiento);
- Los objetivos de la información (qué se debe alcanzar con el seguimiento);
- Las funciones y las responsabilidades administrativas;
- El derecho de acceso (a los puntos de observación);
- Los costes (quién tiene que pagar el seguimiento);
- El proceso de la publicación (de los datos obtenidos: de qué manera se publican los resultados del seguimiento y quién tiene derecho de acceso a esa información);
- Las consecuencias de la gestión de los recursos en agua subterránea, etc.

En resumen, el seguimiento de las aguas subterráneas será más efectivo si existe la base legal para llevar a la práctica las medidas que alivien los efectos negativos sobre la disponibilidad y la calidad de los recursos de agua, que este mismo seguimiento haya puesto obviamente de manifiesto. Debe existir un apropiado marco legal, regulador, institucional y técnico a fin de proporcionar una buena gobernanza del agua, con una clara definición legal de las responsabilidades y las funciones de control, de los instrumentos para la gestión de los recursos, y de las responsabilidades y obligaciones de todos los usuarios del agua.

5.3 Mandatos y responsabilidades de las instituciones y de los grupos interesados en el sector del agua

Previo a la instalación de una red de vigilancia, es conveniente analizar las tareas y responsabilidades de todas las instituciones, organizaciones de usuarios del agua, empresas del agua y ONGs, involucradas en el sector del agua en la zona de estudio (quién hace qué y quién tiene el mandato legal). Con este paso se consigue una buena visión de conjunto sobre los entes interesados en el sector del agua, sus derechos y responsabilidades, así como qué datos hacen falta. Es necesario también identificar los problemas relacionados con las responsabilidades, competencias y prioridades de las instituciones a cuyo cargo se encuentran el seguimiento y la gestión de los recursos de agua subterránea: la ausencia de una asignación o mandato propio, o la duplicidad de estas tareas y mandatos, puede entorpecer gravemente el seguimiento efectivo del agua subterránea así como el intercambio de datos relativos a los recursos de agua. A veces se impone alguna modificación para mejorar estas condiciones y hacer así que funcione adecuadamente el programa de seguimiento.

La distribución de responsabilidades respecto al seguimiento y gestión de las aguas subterráneas, presenta a menudo un alto grado de complejidad:

En diversos aspectos de la gestión de las aguas superficiales / subterráneas, y de la cantidad / calidad del agua, las responsabilidades se encuentran con frecuencia divididas entre varias

instituciones diferentes (a veces pertenecientes a diversos ministerios) y a distintos niveles (nacional, estatal/regional, provincial, municipal). Aún más cuando las compañías de agua, las organizaciones de usuarios y algunas ONGs disponen de sus propias redes de observación.

La responsabilidad en cuanto al seguimiento de las condiciones básicas de la masa de agua subterránea puede situarse al nivel de la nación, del estado o región, del distrito o del municipio. No obstante, en el caso de vigilancia de la calidad del agua para bebida (agua de grifo, agua embotellada, bebidas envasadas, leche) la responsabilidad normalmente se encuentra en las compañías suministradoras. Estas compañías disponen a menudo de pozos de observación aguas arriba de las áreas de captación, con el fin de derivar el suministro de agua en caso de contaminación de estas fuentes, y están obligadas a proporcionar sus datos de vigilancia a las instituciones que tienen el deber de supervisarlas.

En relación con el seguimiento de los vertederos, de las eventuales pérdidas o reboses en colectores y depuradoras, minas, balsas de residuos, refinerías, instalaciones de procesado y almacenamiento de productos químicos y sustancias peligrosas, etc., la responsabilidad puede situarse al nivel estatal / nacional (y ser pagada por el operador) o bien pertenecer al operador en sí mismo, el cual tendrá entonces el deber de proporcionar los datos.

La vigilancia relativa a derrames normalmente corresponde a (y es llevada a la práctica por) un organismo estatal, corriendo los gastos obligadamente a cargo del contaminador (si el principio contaminador-pagador está vigente). En los casos de contaminación dispersa en que no se puede atribuir a un único origen —como ocurre con la agricultura, áreas industriales, urbanizaciones, tráfico o cursos de agua superficial contaminados— la vigilancia tendrá que llevarse a cabo y ser costeadada por la Administración.

El seguimiento de la salinización por intrusión deberá formar parte de la responsabilidad de la Administración o bien, si puede atribuirse a la sobreexplotación de usuarios individuales, corresponderá a estas personas.

Existen muchos modelos diferentes aplicables para asignar las responsabilidades en relación con el seguimiento del agua subterránea, y resulta por lo tanto difícil dar unas recomendaciones generales al respecto. Se pueden considerar las siguientes:

La responsabilidad última en la gestión y protección de los recursos de agua subterránea que sean de interés nacional, debe pertenecer a un organismo de alto nivel a escala de gobierno nacional o regional; y para que la mencionada gestión a estos niveles sea efectiva, igualmente los programas de seguimiento que justifican esas medidas debieran estar bajo la responsabilidad de la misma institución gubernamental. Algunas labores pueden ser delegadas, como son la recogida de datos, los análisis en laboratorio y el mantenimiento de la red; sin embargo, para los programas de seguimiento nacional o regional, para la supervisión de las tareas delegadas y para la provisión de presupuestos, la responsabilidad debe pertenecer al organismo gubernamental que se encuentre al cargo de la gestión de los recursos en agua subterránea.

La mejor manera para garantizar el uso sostenible de los recursos en agua subterránea es proveer al organismo anterior de la autoridad suficiente. Con el fin de crear una buena base para la necesaria cooperación, este organismo debe encontrarse situado al mismo nivel que las instituciones responsables de la gestión en aquellos sectores relevantes que están en relación con el agua subterránea, como son medio ambiente y ordenación del territorio.

Respecto al intercambio de datos debe quedar claro cómo se va a dar respuesta a las necesidades individuales de datos y a los objetivos del seguimiento, para cada uno de los diversos en-

tes interesados en el sector del agua. Con tal fin, interesará que haya un derecho legal para reunir la necesaria información del seguimiento que esté originada por diversas fuentes (ver también el apartado 5.5).

En lo que concierne al establecimiento espacial de las redes de observación, es preferible basarse en los límites propios de los cuerpos de agua subterránea, o de las grandes explotaciones de agua de superficie, más que en los límites de las unidades administrativas.

5.4 Capacidad técnica necesaria en las instituciones del agua

El seguimiento del agua subterránea requiere de aquella institución que pretenda establecer una red de vigilancia (para desarrollarla y evaluar los datos así obtenidos), que dicha institución disponga de la cualificación necesaria para esa tarea y que además tenga la capacidad de mantener la red en funcionamiento durante un tiempo suficientemente largo. Esto supone disponer de personal adecuado, infraestructura y logística, además de fondos económicos.

El seguimiento requiere diversas habilidades que han de estar disponibles o bien desarrollarse. El proceso del estudio inicial y establecimiento de los puntos de observación requiere una comprensión hidrogeológica avanzada del sistema acuífero, correspondiente a hidrogeólogos experimentados, mientras que para el diseño de las estructuras útiles al seguimiento hace falta un conocimiento en relación con las técnicas de perforación y desarrollo de sondeos. La tarea de recogida de datos en campo es llevada a cabo normalmente por técnicos con una preparación especial en el empleo de los aparatos utilizados con ese fin; por otro lado, el mantenimiento de los equipos y el acondicionamiento de los pozos de la red necesitan una destreza de otro tipo más técnico. Cuando haya un gran volumen de datos para procesar, será probablemente necesaria la contribución de un experto en informática que instale y aplique una base de datos. El tratamiento en sí mismo de estos datos debe ser realizado por un hidrogeólogo especializado en el procesado de datos y en estadística. La publicación de los resultados obtenidos con el seguimiento podrá necesitar un especialista en técnicas informáticas de publicación en página-web, si se quiere utilizar este sistema.

Respecto a la infraestructura y la logística, el organismo responsable habrá de contar con los medios necesarios. Esto supone disponer, por ejemplo, de medios de transporte adecuados en las salidas al campo para reconocimientos y mantenimiento, disponer de un lugar adecuado para el trabajo de gabinete, de los equipamientos para el almacenamiento, tratamiento y procesado de los datos y para su publicación. En relación con los fondos económicos, la institución ha de tener aseguradas las sucesivas asignaciones correspondientes a las tareas del seguimiento durante un tiempo suficientemente largo.

5.5 El intercambio de la información y la publicación de los resultados

Desde los primeros esbozos del seguimiento, conviene discutir sobre los resultados que se van a obtener, para qué van a servir, quién los va a necesitar y qué va a hacer con ellos, y también de cómo esos resultados van a ser publicados; este intercambio de información puede incluso

que sea conveniente establecerlo por ley, e igualmente la publicación. Congruentemente, es importante que todas las instituciones implicadas en principio, junto con los suministradores de agua y demás entes interesados, sean informados sobre los objetivos del seguimiento y cómo podrán acceder a los datos obtenidos y a la evaluación resultante. En caso de que los datos del seguimiento sean de gran interés para otras instituciones debe establecerse un procedimiento formal; a este respecto, es deseable que todos los datos se encuentren bajo el mismo formato e incluso que las bases de datos tengan la misma estructura, de tal manera que dichos datos puedan ser integrados cómodamente. Igualmente, la frecuencia en el intercambio de datos habrá de ser negociada y convenida.

En lo que concierne a la publicación de los datos, el formato adecuado también interesa que sea convenido. Cuando los datos constituyen un bien público hay que ponerlos a disposición del ciudadano regularmente, de tal manera que puede ser necesaria una puesta en Internet inmediata, trimestral o anual. En cualquier caso, el hecho de que los datos sean transparentes para el público redundará en una mejor comprensión y una mayor conciencia de la situación. Se recomienda publicar informes sobre los resultados del seguimiento todos los años; a este respecto, tiene que quedar explícito quién está autorizado u obligado a publicar los datos y/o los resultados del seguimiento, en qué formato, con qué periodicidad, y en qué medio (por Internet o en versión impresa, descargable, centro de consulta para dar respuesta a las peticiones de los clientes, etc.).

En lo concerniente al derecho de acceso, seguramente las instituciones gubernamentales o bien estén obligadas a proporcionar los datos del seguimiento de una manera gratuita para el solicitante, o bien tengan la autorización para venderlos. Esto último probablemente ayude a reducir costes pero al mismo tiempo dificulta la transparencia.

Resultados que se esperan de este capítulo:

Como resultado de este capítulo debiera obtenerse una evaluación y un planteamiento críticos sobre los diversos aspectos del estado legal e institucional del tema que nos ocupa, aspectos que se consideran esenciales para el éxito de los programas de seguimiento de las aguas subterráneas a gran escala, nacional o regional.

Las instituciones a cuyo cargo se encuentre este seguimiento, habrán de tener el nivel, mandato, competencia, capacidad y medios, que les permitan cumplir la tarea propiamente. Un rango insuficiente, la carencia de mandato y una fuerte limitación en la capacidad técnica o en el presupuesto, pueden entorpecer gravemente el programa de seguimiento del agua subterránea y volverlo imposible.

Las siguientes condiciones se consideran esenciales para conseguir un seguimiento exitoso:

- Existe un marco legal, regulador, institucional y técnico, que posibilita la gestión y protección sostenibles de los recursos de agua. El tema del seguimiento del agua subterránea recibe ya la atención correcta en los documentos que recogen la política y regulación relativas al sector del agua.
- La institución gubernamental responsable de los programas de seguimiento en las aguas subterráneas nacionales o regionales, tiene el rango mayor deseable. Aun cuando algunas tareas de dicho seguimiento puedan ser delegadas, la responsabilidad final por el programa correspondiente debe encontrarse en la misma institución gubernamental que tiene a su cargo la gestión de los recursos nacionales o regionales en agua subterránea.
- El organismo con el mandato y la responsabilidad sobre el seguimiento de las aguas subterráneas, recibe los medios y apoyos necesarios por parte del gobierno para cumplir con esta tarea.
- La capacidad del organismo que lleva el seguimiento de las aguas subterráneas, es la oportuna para cumplir su labor: cuenta con un personal técnico suficiente y adecuadamente preparado, y con la infraestructura técnica, logística y fondos económicos necesarios.
- El organismo encargado del seguimiento de los acuíferos está coordinado con todas las demás instituciones que trabajan en el campo de la gestión de los recursos de agua.
- La estructura para el intercambio de datos se ha establecido de tal manera que todas las partes involucradas obtienen el máximo beneficio posible. Los resultados obtenidos en, y las conclusiones derivadas de, el seguimiento del agua subterránea se hacen públicos de manera periódica.

La lista anterior puede servir como una relación de puntos a comprobar en el planteamiento y evaluación de la situación en consideración: cuantas más condiciones de las mencionadas se cumplan, mayor será la probabilidad de alcanzar el éxito en el programa de seguimiento. Si alguna de las condiciones legales e institucionales no se ve realizada, se deben proponer y perseguir las medidas oportunas para mejorar la situación.

6 Diseño de un programa para el seguimiento de la cantidad en las aguas subterráneas

En este capítulo se describe cómo se puede diseñar un programa de seguimiento de referencia a escala regional para las aguas subterráneas en cuanto a su cantidad, siguiendo el procedimiento propuesto en el Capítulo 2.

- Se ofrece una lista con los objetivos aceptados internacionalmente para el seguimiento de sistemas acuíferos regionales, los cuales se toman como punto de partida para el diseño. Se expone y comenta otra lista con los datos típicos necesarios para alcanzar esos objetivos.
- El procedimiento de diseño incluye la división de la zona de estudio en unidades más pequeñas, con características hidrogeológicas propias y la preparación de un mapa de base. A partir de estas características, se proponen unas estrategias para un seguimiento efectivo que puedan al tiempo cumplirse con un presupuesto limitado.
- Se comenta y presenta de manera gráfica una selección de puntos de observación y de mejoras aplicables a las redes de vigilancia, para tres opciones distintas.

6.1 Objetivos del seguimiento y datos necesarios

En la fase inicial del estudio, suelen ser necesarios datos del agua subterránea para explorar el estado y comportamiento del sistema acuífero, y para establecer las posibilidades de su desarrollo posterior. En esta fase, los objetivos del seguimiento de las aguas subterráneas se formulan habitualmente de la siguiente manera:

1. *Caracterización del (o de los) sistema(s) acuífero(s);*
2. *Identificación de posibles tendencias, en relación con el uso del agua subterránea;*
3. *Estimación del potencial para un desarrollo posterior de las aguas subterráneas.*

Las instituciones responsables del control y gestión de las aguas subterráneas nacionales o regionales son las primeras interesadas en los datos del acuífero. Sin embargo, cuando la explotación del mismo ya es un hecho, también las compañías suministradoras y demás partes implicadas (otros usuarios, instituciones de agricultura o de medio ambiente, etc.) pueden beneficiarse de estos datos con miras a planificaciones, autorizaciones o concesiones. En consecuencia, es prudente realizar un inventario de las partes involucradas o interesadas, con una lista de sus necesidades de datos.

A causa de su importancia en el desarrollo nacional o regional, los grandes sistemas acuíferos a escala regional (subnacional) tienen con frecuencia prioridad sobre los sistemas a escala local. La gestión de estos grandes sistemas requiere unas redes de vigilancia a gran escala que no son útiles para el reconocimiento de los problemas locales, los cuales necesitan unas redes específicas a otra escala más pequeña. No obstante, aquella(s) red(es) regional(es) tendrá(n)

que proporcionar valores de referencia para los casos locales. Esto lleva a un cuarto objetivo, a saber:

4. *Provisión de datos históricos y valores de referencia para las investigaciones de detalle*

Se comenta a continuación el diseño del programa de seguimiento a escala regional, en relación con los datos necesarios para cumplir con los objetivos mencionados.

1. *Caracterización del o de los sistemas acuíferos*

El agua subterránea fluye por gravedad desde las áreas de recarga hacia las de descarga, donde es drenada por manantiales, ríos o el mar. Este proceso origina sistemas de flujo subterráneo que discurren a través de las formaciones acuíferas. Los grandes sistemas acuíferos pueden contener varios sistemas de flujo de agua subterránea, cada uno de ellos con sus propias áreas de carga y de descarga. Los bordes de estos sistemas pueden corresponderse con las capas que los limitan (acuitardos o acuiclusos) o bien consistir en divisorias del agua subterránea dentro de un acuífero; la posición de estas divisorias entre sistemas puede variar por cambios en la extracción del agua subterránea. En los sistemas de flujo extensos las divisorias suelen permanecer estables, pero puede resultar necesario observar su posición si hay razones fundadas para su posible desplazamiento.

La caracterización de un sistema de aguas subterráneas comprende:

- La demarcación de la extensión de los sistemas de flujo, las áreas de recarga y de descarga, y las direcciones de flujo del agua subterránea;
- La estimación del balance de agua subterránea, incluyendo los volúmenes de recarga y descarga;
- El análisis de la respuesta del sistema de agua subterránea a las influencias naturales y antropogénicas.

La información que se necesita para caracterizar este sistema (o sistemas) incluye:

- Mapas que muestren los sistemas acuíferos a escala regional;
- Mapas de isolíneas que muestren el comportamiento regional del nivel del agua subterránea, y las direcciones y divisorias del flujo dentro de los límites del acuífero, para cada sistema acuífero principal identificado;
- Mapas que muestren la profundidad del manto en los acuíferos seleccionados;
- Gráficos con la fluctuación anual de los niveles piezométricos, como respuesta al clima y a la extracción;
- Gráficos con la variación anual de la descarga de los manantiales encontrados en la zona;
- Gráficos con la variación anual del caudal base de los ríos que procede de los acuíferos.

Esta lista contiene lo idealmente necesario para caracterizar el sistema de agua subterránea. En la realidad, estos datos no van a estar disponibles a menudo, por lo que habrá que establecer prioridades en su obtención (apartado 6.5). A lo largo de la estimación de los recursos en agua subterránea y de su potencial para un desarrollo posterior, los datos recogidos se combi-

narán con los registros de pluviometría, evaporación, extracción, etc. Se ha considerado que una exposición detallada de los datos meteorológicos excede los objetivos de esta Guía.

2. Identificación de posibles tendencias, en relación con el uso del agua subterránea

La mayoría de los sistemas acuíferos conocidos estarán ya en explotación para abastecimiento o regadío. De cara al porvenir de los acuíferos y de sus usuarios, es importante saber si su uso actual es o no sostenible y si hay o no perspectivas para un desarrollo futuro. Para saber si la masa de agua subterránea es capaz de satisfacer las demandas de los usuarios a largo plazo, sin que aparezcan demasiadas consecuencias negativas, hace falta estudiar la respuesta del acuífero.

La respuesta del acuífero a la explotación queda expresada en los niveles del agua subterránea, en la descarga de los manantiales y en el flujo de base de los ríos que le drenan: al incrementarse los bombeos, el manto va a bajar y las descargas por manantiales y ríos van a disminuir. Cuando estas variables alcanzan después de algún tiempo un nivel más bajo pero estable, vuelve a tenerse un equilibrio entre los componentes de la recarga y de la descarga. Pero incluso entonces, los niveles pueden ya ser inaceptablemente bajos al secarse pozos y manantiales y languidecer la vegetación que se nutre con el agua subterránea.

No obstante, cuando las medidas piezométricas muestran una disminución continua durante un periodo de tiempo largo (p.ej., varios años), puede ocurrir que ya no sea alcanzable un equilibrio último, o si éste se alcanza es ya con el agua a una profundidad excesiva. A lo largo de la descarga, con los niveles del agua bajando, las salidas naturales y los bombeos exceden a la recarga originando una disminución del volumen de agua almacenado: esto puede causar unos daños considerables a los campos de pozos, a la agricultura y a la vegetación. Se ha establecido el término “tendencia” para las bajadas (o subidas) del nivel del agua, o para las descargas, que ocurren durante un periodo sustancial de tiempo de no-equilibrio. Estas tendencias pueden ser lineales o no lineales, en función de los procesos subyacentes.

Los mejores indicadores de tendencia para la masa de agua subterránea, almacenada en el sistema “como un todo”, son las descargas naturales de los manantiales y de los ríos que tienen su origen en dicho sistema, en el supuesto de que los haya; estas observaciones permitirán seguramente tener una visión representativa del sistema acuífero o de una gran parte de él. Sin embargo, para tener una imagen espacial más diferenciada de la bajada de los niveles que acompaña a la disminución del volumen almacenado, será necesaria una red de pozos de observación: el registro de su nivel mostrará la respuesta en las diversas partes de la superficie cubierta. Así, los registros obtenidos en los pozos de vigilancia complementarán los datos de manantiales y ríos, y darán una imagen de mayor detalle. Como los pozos de observación suelen ser representativos sólo para el entorno de cada uno de ellos, el seguimiento de la(s) masa(s) de agua subterránea requerirá probablemente un grupo de puntos acuíferos representativos para tomar medidas, o bien una red repartida de puntos de observación (ver el apartado 6.2). La densidad de puntos de la red determina el grado de detalle, así como los costes que conlleva.

Como conclusión, la sostenibilidad de un sistema de aguas subterráneas y sus posibilidades para un desarrollo futuro pueden ser estimadas de manera fiable mediante el registro de la

descarga por manantiales, el registro del flujo de base en los ríos y el registro del nivel del agua en los pozos de observación elegidos. Estos tipos de variables pueden servir como indicadores de la estabilidad y potencial del sistema acuífero, y su combinación proporciona la mejor vigilancia posible.

3. Estimación del potencial para el desarrollo de las aguas subterráneas en el futuro

Para determinar las posibilidades de desarrollo que tiene el agua subterránea en una zona, se requiere información sobre su recarga, descarga y almacenamiento.

1. *Estimaciones iniciales aproximadas.* Una primera estimación del potencial de desarrollo de una masa de agua subterránea puede basarse en las características de la descarga y del almacenamiento del agua en la zona considerada. Los componentes de la descarga comprenden las descargas en aguas de superficie, las salidas del flujo subterráneo y los bombeos. Una estimación de la explotación subterránea posible ha de tener en cuenta la fracción no explotable del acuífero (p.ej., una gran parte de las salidas del flujo subterráneo), así como los caudales mínimos que se necesitan para la protección de las funciones medioambientales. También hace falta un almacenamiento suficiente para cubrir los periodos de sequía. Cuanto más pequeña sea la capacidad de almacenamiento, más pequeña será la flexibilidad de la masa de agua.
2. *Estudios de detalle.* Un conocimiento más detallado de la(s) masa(s) de agua subterránea que sean explotables —por ejemplo, diferenciando entre áreas e incluso subáreas y entre periodos húmedos y épocas secas— requiere igualmente una serie de datos de mayor detalle, como son registros de pluviometría y de evapotranspiración, datos sobre el uso del agua subterránea con suficiente precisión espacial, datos repartidos sobre los niveles del agua en superficie y mediciones frecuentes de niveles en muchos más puntos del agua subterránea.

Evidentemente, este conocimiento detallado no es la primera prioridad en los inicios del estudio del agua subterránea.

4. Inventario de series de datos históricos y de referencia para una investigación en detalle de los recursos de agua subterránea

En el momento de seleccionar los pozos de vigilancia para una red regional, debe tenerse presente la función de referencia que poseen estos puntos de observación: van a ser utilizados para desarrollar series de datos históricos, de aplicación en la gestión y control de las aguas subterráneas regionales, y también como valores de referencia para estudios de mayor detalle y, a menudo, para el diseño de redes específicas de vigilancia de ámbito local (Van Lanen, 1998). Por lo tanto, los pozos de observación deben ser representativos de su área particular y en las condiciones generales del sistema acuífero: no deben encontrarse sometidos a la acción de fuertes influencias, como p.ej. las originadas por campos de bombeo; estas condiciones serán importantes cuando la red de partida pase a ser una red primaria. En la fase inicial de la red de vigilancia puede no ser siempre posible cumplir con estas condiciones, debido a la falta de pozos de observación adecuados; sin embargo, debe recordarse esta función de referencia al hacer la selección entre los pozos existentes o al decidir la localización futura de la red para el seguimiento regional.

6.2 Diseño de la vigilancia del agua subterránea con miras a obtener la información identificada como necesaria.

Elaboración de mapas de la zona y división en unidades lógicas

Previo al comienzo del proceso en sí para diseñar un programa de seguimiento, hay que preparar unos mapas básicos de la zona con sus características relevantes. Hay que preparar los siguientes puntos para el planeamiento posterior:

1. una división de la zona considerada en áreas y subáreas de captación (eventual) hasta un grado tal que las unidades más pequeñas tengan todavía entidad a escala regional (sugerencia: en total, no más de 5 – 10 unidades; tamaño mínimo preferible: 50 – 100 km²)
2. una división de las áreas de captación (eventual) en subzonas, en base a la elevación del terreno: montañas, laderas, valles, llanuras;
3. modelo(s) conceptual(es) especificado(s) para cada una de estas áreas / subáreas, indicando la extensión, espesor y profundidad de los sistemas acuíferos (ver también el capítulo 4);
4. una clasificación de los sistemas acuíferos en a) libres (manto acuífero) y b) confinados o semiconfinados.

Los mapas resultantes van a mostrar una imagen aproximada de la zona considerada y de sus unidades más pequeñas, variando estas últimas según el tipo de zona. Por ejemplo, si la zona en cuestión es una larga franja costera, las unidades podrán estar formadas sólo por las áreas de captación (Figura 6.1); pero en zonas montañosas el resultado puede ser más complejo, como por ejemplo una llanura de inundación con valles de montaña alrededor (Figura 6.2).

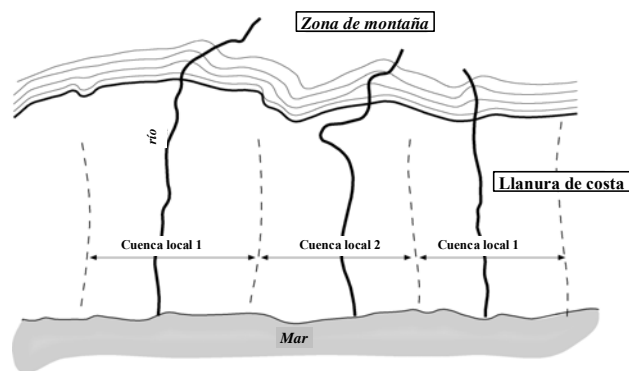


Figura 6.1: Ejemplo de áreas de captación (eventual) en una llanura costera

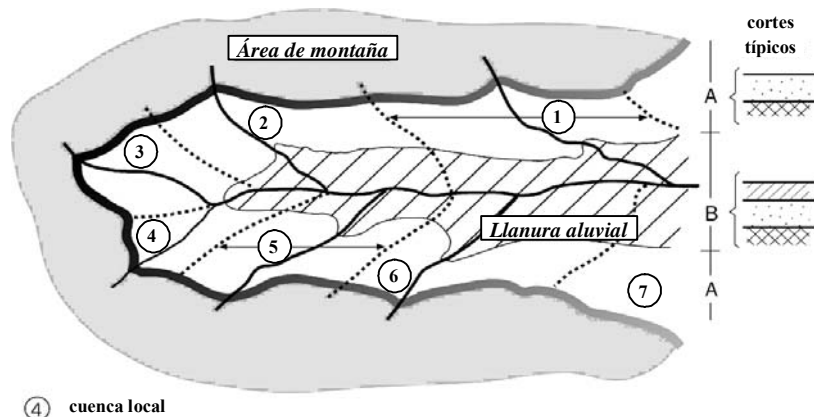


Figura 6.2: Ejemplo de áreas de captación en un valle de montaña
(el número de áreas no es el definitivo)

Las unidades establecidas se utilizarán como base para el planeamiento de la red de vigilancia.

Diseño de la red para el seguimiento en sistemas de aguas subterráneas someras

En acuíferos someros, la magnitud del sistema de flujo del agua subterránea es un factor esencial en el diseño del programa de seguimiento.

1. Si los sistemas de flujo someros son numerosos (p.ej., decenas, cientos o miles, acorde con un drenaje intensivo del agua en superficie), entonces el seguimiento de estos sistemas requeriría numerosos pozos de observación; o sea, un trabajo considerable y grandes presupuestos. En un caso así conviene considerar un “seguimiento en áreas piloto / ejemplo”, seleccionando algunos de estos sistemas someros por sus características representativas y vigilando los componentes relevantes, por ejemplo incluyendo aspectos de la calidad del agua. La gestión de estos recursos subterráneos puede basarse por lo tanto en las medidas y en la experiencia relativas a las áreas piloto.
2. En el caso de acuíferos someros o de media profundidad y de gran extensión, p.ej. sobre decenas de kilómetros, entonces la estrategia para el seguimiento del agua puede ser diferente:
 - *la opción de menor intensidad* consiste en vigilar solamente el flujo de los manantiales y el flujo de base en este sistema de agua subterránea, si ello es posible (Figura 6.3). La descarga puede a menudo estar relacionada con el agua almacenada por encima del nivel de drenaje: en este sentido, los datos suministran una visión de la variación en el almacenamiento. El efecto último de las extracciones puede relacionarse con los registros de la descarga, lo cual da una indicación sobre la sostenibilidad de dichos bombeos. No obstante, esta alternativa de vigilancia no proporciona información espacial en cuanto a los niveles del agua, y tampoco ofrece datos a propósito de la relación con cauces de superficie, por lo que no es deseable en los casos en que esta interconexión sea substancial.

- *una segunda opción* consiste en combinar la vigilancia del nivel del agua en sitios representativos seleccionados, con la observación del flujo de manantiales y del flujo de base (Figura 6.4). Es preferible que los pozos seleccionados o que se instalen, correspondan a zonas topográficas relativamente altas (p.ej., cerca de la divisoria de aguas) donde proporcionarán la mejor información sobre las posibles tendencias en el almacenamiento del agua subterránea. Estos registros pueden utilizarse en combinación con los del flujo de base y con los del uso del agua subterránea, como indicadores de un desarrollo sostenible. Esta alternativa no proporciona todo tipo de detalles espaciales en relación con los niveles del agua, pero sí proporciona una mejor indicación espacial sobre las direcciones del flujo subterráneo y las posibles tendencias en el almacenamiento. Si se consideran importantes las entradas y salidas en cauces de superficie, allí donde éstas se estimen sustanciales se podrán seleccionar más puntos de observación.
- *una tercera opción* reside en combinar una red de pozos de observación relativamente densa con la vigilancia del flujo de los manantiales y del flujo de base (Figura 6.5). Esta alternativa proporciona una información espacial completa sobre las tendencias posibles y las direcciones del flujo subterráneo. Los sondeos para el seguimiento del agua subterránea pueden seleccionarse o instalarse en lugares altos así como en laderas y cerca de los ríos, si resultan relevantes para conseguir la imagen regional. Esta opción conlleva los presupuestos más grandes pero también ofrece la información más detallada: se puede observar a lo largo del espacio la fluctuación del manto, las tendencias y las direcciones del flujo, con un grado de detalle que es función de la densidad de la red.

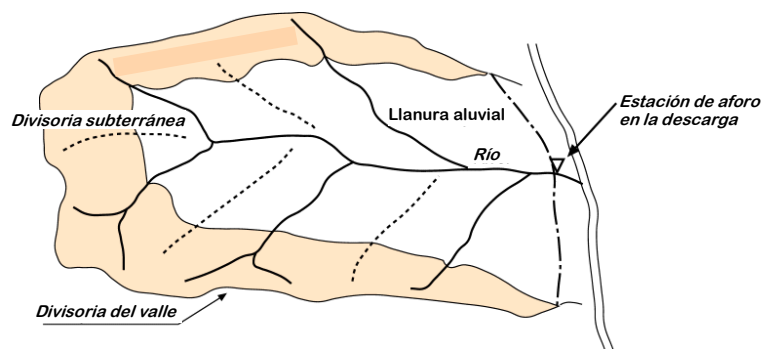


Figura 6.3: Red de seguimiento, alternativa 1

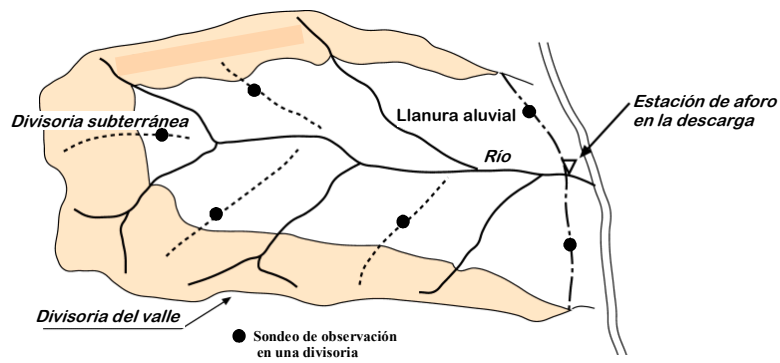


Figura 6.4: Red de seguimiento, alternativa 2

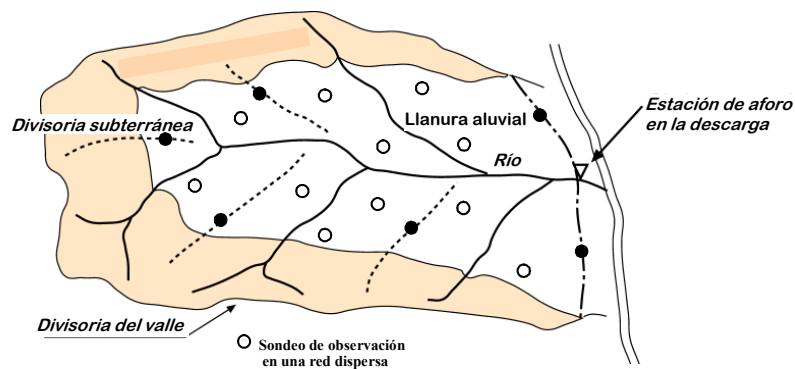


Figura 6.5: Red de seguimiento, alternativa 3

Diseño de la red para el seguimiento en sistemas de aguas subterráneas profundas

Los sistemas acuíferos profundos son habitualmente extensos: su magnitud puede alcanzar entre decenas y millares de kilómetros cuadrados (p.ej., los sistemas del Sahara). El agua subterránea fluye a una velocidad extremadamente lenta desde las zonas relativamente altas de infiltración hacia las más deprimidas, siendo drenada por grandes ríos o por el mar. El tiempo de recorrido puede variar entre miles y decenas de millares de años.

Si el agua de estos sistemas no está siendo (todavía) explotada, por ejemplo a causa de problemas en su calidad, puede que no sea verdaderamente necesario un programa de seguimiento para la cantidad de las aguas subterráneas. Pero si están teniendo aplicación en abastecimientos o regadíos, entonces valdrá la pena conocer en qué estado se encuentran los sistemas y su eventual deterioro. Una observación fiable de estos acuíferos profundos y extensos no suele exigir una red densa de puntos de observación; la variación espacial de su manto acuífero debida a los campos de bombeo, suele ser pequeña con la distancia, fluctuando suavemente, y las medidas de nivel tomadas en algunos puntos de observación son representativas para un área relativamente grande.

- Una vigilancia fiable del almacenamiento del agua subterránea y de su eventual reducción, puede conseguirse con una cantidad limitada de puntos de observación (p.ej., un punto por cada 25 – 100 km²) que estén bien situados, especialmente en las zonas de infiltración y cerca de la divisoria subterránea. En los acuíferos (semi) confinados también puede ser conveniente que haya (algunos) pozos de observación en las zonas de “exfiltración” (zonas de transferencia), puesto que así se obtiene una visión de los gradientes verticales que drenan el agua subterránea hacia la superficie.
- Para una vigilancia de la masa de agua subterránea más intensa (p.ej., mejor definición de la dirección del flujo), hará falta una red más densa (p.ej., un pozo de observación cada 10 – 25 km²). La densidad de red y la profundidad de rejilla que son necesarias dependen de las propiedades hidráulicas del sistema acuífero.

Frecuencia en la observación

La frecuencia en la observación va a determinar que el registro de los datos obtenidos en la vigilancia refleje una respuesta del sistema suficientemente buena.

La respuesta de las masas de aguas subterráneas a las influencias naturales y humanas suele mostrar unas variaciones que se pueden clasificar como fluctuaciones y/o tendencias. Las fluctuaciones se pueden dividir en:

- Fluctuaciones a largo plazo, que se corresponden con (largos) periodos de años relativamente secos y húmedos;
- Fluctuaciones estacionales, que se corresponden con la estaciones secas y húmedas;
- Fluctuaciones a corto plazo, que se corresponden con la lluvia o las influencias humanas, en el día a día.

Las tendencias pueden ser graduales o repentinas (tendencias en bloque) y suelen deberse a la actividad humana, como la sobreexplotación o la interferencia con los sistemas fluviales.

Que estas fluctuaciones o tendencias se detecten mediante la observación de los niveles piezométricos depende de las condiciones locales, o sea de su clima, de la relación agua superficial / agua subterránea y de la magnitud de la intervención humana. La intensidad de la respuesta a estas influencias es función de las propiedades hidráulicas del sistema acuífero, especialmente de su grado de confinamiento y de su coeficiente de almacenamiento. La frecuencia en la observación de los niveles debiera ajustarse a la respuesta que se mide o que se espera en el agua subterránea y a los objetivos expresados en el plan de seguimiento. No existe una única frecuencia que sea la mejor para la vigilancia en una región o país, porque las condiciones (y expectativas) pueden variar de un sitio a otro. A este respecto, se indican a continuación unas consideraciones de tipo general:

- En climas muy secos (zonas áridas), donde virtualmente no existen fluctuaciones estacionales, la frecuencia en las observaciones puede ser muy baja, p.ej. 1 ó 2 veces al año. Esto bastará para detectar y controlar las posibles tendencias debidas a la (sobre) explotación.
- En climas húmedos, y en menor medida en los semi-áridos, las fluctuaciones estacionales no pueden ser ignoradas. En relación con las tendencias a largo plazo, estas fluctuaciones constituyen un ruido que se superpone a la señal buscada: es por lo tanto posible que haga falta una mayor frecuencia (p.ej., 4 observaciones al año) para eliminar dicho ruido y poder

detectar y precisar una eventual tendencia. En estas zonas climáticas llega a ser necesaria una frecuencia incluso mayor, de 12 a 14 veces al año, en los estudios de recarga de acuíferos.

Densidad de la red y frecuencia de observación, según las propiedades del acuífero

La respuesta de la masa de agua subterránea a las influencias de superficie está relacionada con la profundidad y el grado de confinamiento del acuífero. Estudios matemáticos y geoestadísticos muestran que la correlación espacial entre las diversas medidas del nivel aumenta con la profundidad, en especial cuando hay capas separadas: si dos acuíferos están separados por una capa consistente, para obtener una misma precisión en la interpolación la densidad de puntos de observación en el acuífero semiconfinado inferior puede ser una fracción de la correspondiente al superior (p.ej., de un tercio a un cuarto), redundando ello en una mejor inversión en la red al instalar menos pozos profundos. Otra forma de reducir la densidad de puntos en los acuíferos profundos es planteando algunas filas de puntos en profundidad que sigan la dirección estimada del flujo (tal y como se hizo por ejemplo en Flandes, Bélgica).

También es posible reducir la frecuencia de observación en los acuíferos semicautivos profundos (menor fluctuación a mayor profundidad). Sin embargo, esta reducción puede no conllevar unos menores costes anuales apreciables si hay que ir hasta el mismo lugar para medir pozos más someros cercanos.

Tabla 6.1: Diferencias posibles en la densidad de la red y en la frecuencia de la observación, relacionadas con la profundidad del acuífero y su grado de confinamiento

Tipo de acuífero	Detalles	Variación espacial (respuesta a la recarga)	Densidad de red necesaria para una imagen espacial	Variación temporal (respuesta a la recarga)	Frecuencia necesaria para una imagen temporal
	Libre				
Somero (< 20 m)	- Sistema de drenaje denso	Muy variable	OOOO	Rápida	OOOO
	- Sistema de drenaje limitado	Discretamente variable	OOO	Rápida	OOO
	- (Semi)Confinado	Discretamente variable	OOO	Restringida	OO
	Libre				
Profundidad media (20 – 100 m)	- Manto somero	Muy variable	OOOO	Restringida	OOO
	- Manto profundo	Discretamente variable	OOO	Lenta	OO
	- (Semi)Confinado	Poco variable	OO	Lenta	OO
	Libre				
Profundo (100 - > 500 m)	- Manto somero	Variación muy somera	OOO ó (O)	Rápida	OOO
	- Manto profundo	Muy lento	O	Lenta	OO
	- (Semi)Confinado	Extremadamente lento	O	Muy lenta	O

OOOO, OOO, OO, O: indicadores de la densidad de red o frecuencia de observación, de mayor a menor.

La Tabla 6.1 presenta distintas densidades de red y varias frecuencias de medición para acuíferos de diferentes tipos y profundidades, como función de su respuesta a las influencias naturales en superficie.

El registro fijo de datos se utiliza cada vez más para medir los niveles del agua subterránea en aquellos países donde los costes salariales son elevados. Estos aparatos pueden ser programados para distintas frecuencias teniendo en cuenta las fluctuaciones esperadas; en algunos lugares y para estudios densos sobre la variación del nivel, estos almacenadores de datos se usan de manera rotativa a efectos de precisar la mejor frecuencia en la medición. No obstante, entra dentro de lo razonable para los países con ingresos bajos, que las ventajas técnicas de estos registros fijos no guarden todavía proporción con su coste.

6.3 Diversas opciones para el seguimiento y su evaluación

Establecer una red de vigilancia será muy a menudo un proceso iterativo y gradual (para mejorarlo), cuyo resultado final se alcanzará después de considerar más de una alternativa. Con miras a ofrecer aquí una plataforma para el proceso de tomar decisiones, se propone definir y considerar un número limitado de opciones distintas. La elaboración consistente de estas alternativas va a proporcionar una visión mucho mejor de la información que se puede esperar con las diversas opciones para el programa de seguimiento, así como de los costes anuales involucrados en éstas: se facilita de esta manera la elección de la mejor solución, en las condiciones dadas. Conviene que las distintas alternativas sean planteadas por los profesionales del agua subterránea de común acuerdo con sus directores, ya que esta definición conjunta tendrá la ventaja de evitar falsas expectativas. Una vez acordadas las alternativas, los profesionales pueden proceder a su elaboración.

Opciones para el programa de seguimiento

El diseño de los programas de seguimiento puede variar en:

- El número de zonas a vigilar;
- Los componentes de la red (puntos de descarga, pozos de observación, o una combinación de ambos);
- El número de sondeos de observación y la distribución vertical de los piezómetros;
- Los parámetros seleccionados (importante en el caso del seguimiento de la calidad, en particular);
- Los métodos de medición (manual, aparatos, combinaciones)
- La frecuencia de observación.

Existe casi una infinidad de posibles programas de seguimiento; el desafío consiste en definir y organizar un número limitado de opciones realistas. Se muestra la manera de abordar el problema con ayuda de un ejemplo hipotético: un valle aluvial rodeado de montañas y drenado por un río.

En el siguiente ejemplo se consideran tres alternativas de programa para el seguimiento de las aguas subterráneas en cantidad:

1. Sólo se toman medidas regularmente en la descarga del río y en el caudal del manantial (Figura 6.3). Este programa de seguimiento proporciona una indicación aproximada sobre la estabilidad de la situación del agua subterránea en esta cuenca local, pero no aporta información espacial sobre sus niveles y líneas de flujo. Esta opción sólo va a alertar a los gestores sobre las tendencias negativas del agua subterránea y cuando ya estén asentadas.
2. Se miden la descarga del río y el flujo del manantial, junto con los niveles del manto acuífero en áreas representativas de topografía elevada en el aluvial (Figura 6.4). Este programa indica mucho mejor en qué situación se encuentran las aguas subterráneas, especialmente en cuanto a cómo varía el almacenamiento en las distintas partes del aluvial. Sin embargo, la imagen espacial de las curvas del nivel de agua puede ser relativamente incompleta, sólo con las direcciones del flujo subterráneo.
3. Se aforan el río y los manantiales y además se toman niveles en una red repartida de pozos de observación que se distribuye por todo el aluvial (Figura 6.5). Este programa proporciona una información sólida sobre la situación en las diversas partes del acuífero, y además permite un análisis más detallado de las isopiezas y de la dirección del flujo. En consecuencia, con esta alternativa se está en condiciones de llevar una gestión del agua subterránea diferenciada a lo largo del espacio.

Las tres opciones son claramente distintas en cuanto al grado de información que proporcionan para la gestión del agua subterránea. Pero, junto con la extensión del programa de seguimiento también van a crecer los costes anuales.

En el capítulo 8 se comenta el estudio de otras alternativas que incluyen la calidad del agua y los aspectos institucionales.

6.4 Uso de los pozos existentes y planeamiento de otros nuevos

En el caso de *una única campaña de observación* del nivel del agua, como parte de la exploración inicial, se pueden medir los pozos disponibles, y esto llevará a un mapa de isolíneas de precisión variable según las distancias: es decir, mucho detalle cuando la distancia entre pozos es pequeña y poco detalle cuando es grande.

En el caso de un *programa estable de seguimiento*, la selección de los pozos de observación entre los existentes debiera apoyarse en el plan de seguimiento (o en sus diferentes opciones) y en las características de dichos pozos, ya que éstos constituyen a menudo la base que permitirá una extensión del seguimiento especialmente en los primeros pasos del programa. Si hay diferentes opciones a considerar, también habrá en principio distintas posibilidades disponibles; sin embargo y en la práctica, esta situación favorable raramente se da.

El plan de seguimiento o sus alternativas (apartado 6.3), indicarán qué sitios son los preferibles para los pozos de observación, según diversos componentes del programa. El plan tiene en cuenta habitualmente la situación de los pozos ya existentes; a este respecto, en el programa de seguimiento regional deben evitarse los grupos de pozos locales —salvo que haya una razón particular— dado que no mejoran sustancialmente la precisión de la imagen regional mientras que sí incrementan el coste del seguimiento: interesa seleccionar de entre todos los pozos del grupo local, el que sea más útil y representativo para el seguimiento.

Con respecto a las propiedades de los pozos existentes, a menudo aparecerán inconvenientes en el proceso de su selección. Estos pozos raramente cumplen con todas las condiciones técnicas y logísticas establecidas en el diseño del programa de seguimiento, por lo cual se presentará la disyuntiva de seleccionar o no un pozo que no satisface plenamente las condiciones requeridas. Sin embargo, es verdad que al inicio de un programa de seguimiento la única vía para mantener los costes de inversión bajos consiste probablemente en hacer uso de los pozos que ya existen. Entonces, las exigencias mínimas son:

- El dueño concede permiso para tomar medidas en el pozo de forma regular;
- Los datos sobre la profundidad y construcción del sondeo son conocidos con suficiente detalle;
- La situación de la rejilla se conoce aproximadamente;
- El sondeo está equipado y el agua está limpia, o se puede limpiar purgándolo;
- El contacto hidráulico con el acuífero es bueno (tras el purgado, el nivel se recupera en cuestión de minutos);
- El pozo está protegido contra el vandalismo durante todo el tiempo que se va a utilizar.

Resulta muy importante rellenar un formulario con los datos básicos de cada uno de los pozos de observación, indicando su localización, profundidad, diámetro(s), profundidad y altura de la(s) rejilla(s), etc.; este impreso (llamado *pasaporte del pozo* en algunos países) posibilita un trabajo de gabinete adecuado con los datos registrados sobre el nivel del agua para la confección de isolíneas y gráficos diversos. Con miras a la continuidad del programa de seguimiento, hace falta que quede claro con los dueños de los pozos todo lo relativo a la frecuencia y duración de las visitas que se vayan a realizar, así como el tiempo durante el cual la extracción será interrumpida, en caso de que el sondeo se utilice para abastecimiento público (ver también el Anejo C).

La ubicación de los sondeos nuevos, su profundidad deseable y la situación de la(s) rejilla(s), todo esto vendrá especificado en la opción definitiva del plan de seguimiento (apartado 6.3). Las características de cada rejilla se pueden estimar a partir de los mapas hidrogeológicos de la zona, si bien su posición concreta no se podrá fijar hasta que se haya realizado la perforación.

Resultados que se esperan de este capítulo:

Los resultados obtenidos en el capítulo 6 debieran ser:

- Una panorámica de las diversas opciones de diseño para el programa de seguimiento de las aguas subterráneas en cantidad, que se incluirá en la evaluación de posibilidades (capítulo 8);
- Un mapa de la zona de captación (eventual), dividida en subzonas (p.ej. 5 - 10), cada una de ellas posteriormente dividida en áreas, en función de la morfología del terreno (montañoso, áreas de pendiente, valles, llanuras);
- Un mapa y un cuadro donde se muestren los modelos conceptuales establecidos, uno para cada zona o subzona diferenciada, con una descripción clara respecto a la profundidad calculada del manto y al grado estimado de confinamiento del sistema acuífero (acuífero libre, semicautivo, etc.);
- Un mapa y un cuadro con los objetivos para el seguimiento del agua subterránea en cada subzona diferenciada, tan detallados como interese;
- Un mapa y un cuadro que recojan el diseño de la red de vigilancia de las aguas subterráneas para cada una de las diversas opciones consideradas. Conviene señalar de manera distinta los diferentes puntos de observación, con identificadores unívocos: el símbolo puede representar el tipo de punto y el rango de su profundidad.
- Una tabla que recoja la frecuencia de la medición en relación con el objetivo, diferenciándose para cada zona o subzona de captación (eventual).

7. Diseño de un programa para el seguimiento de las aguas subterráneas en calidad.

En este capítulo se describe cómo se pueden diseñar los programas de seguimiento a escala regional para la calidad de las aguas subterráneas, de acuerdo con el procedimiento propuesto en el Capítulo 2. Se distinguen cuatro objetivos muy habituales para estos programas; debido al enfoque regional de esta Guía, se han dejado de lado los problemas de contaminación del agua subterránea de índole local que requieren unas redes específicas locales.

Se comentan los siguientes temas:

- El diseño de un programa para el seguimiento sistemático de la calidad del agua subterránea, que se necesita cuando no se pueden obviar los cambios motivados por las extracciones a gran escala o por las actuaciones en la gestión del agua.
- El diseño de los componentes particulares para el seguimiento de la salinidad en acuíferos costeros o de parámetros específicos que limitan el uso del agua subterránea, como son los Cloruros y los Fluoruros.
- El diseño de un programa de seguimiento para identificar una eventual degradación debida a fuentes difusas de contaminación, con base en el uso del territorio y en la vulnerabilidad del acuífero.

7.1 Objetivos del seguimiento y datos necesarios

La calidad del agua subterránea se determina mediante una gran cantidad de parámetros, de tipo físico, químico y biológico, cuyo interés varía con los objetivos del análisis. Estos objetivos pueden ser de tipo general, por ejemplo: “caracterización general del agua subterránea” en relación con la situación actual y sus posibles aplicaciones; o pueden ser más específicos, como los estudios desarrollados sobre la calidad del agua subterránea bajo la influencia de una contaminación o de las actuaciones para su recuperación. La complejidad de estos problemas es proporcional normalmente a la intensidad del aprovechamiento del acuífero, siendo necesarios análogamente unos datos más específicos.

Los entes interesados por los datos de la calidad de las aguas subterráneas son las instituciones que asesoran a los ministerios del agua, de la salud pública, de agricultura, de industria o de medio ambiente (organismos gubernamentales, universidades, otros) así como organizaciones privadas y empresas que trabajan en el sector del agua. Conseguir un panorama detallado sobre qué datos hacen falta, puede requerir hacer un inventario de los usuarios, de sus programas en relación con el agua (subterránea) y de sus necesidades particulares. Sin embargo, los objetivos al inicio de estos estudios pueden discrepar con las posibilidades del presupuesto y habrá entonces que establecer prioridades.

Los objetivos para el seguimiento de la calidad del agua subterránea que se comentan en esta Guía cubren la caracterización general y la consiguiente vigilancia de la calidad de las masas de agua subterránea importantes, así como la identificación a gran escala de su eventual degradación, a menudo difusa, debida al uso del agua y del suelo. Los estudios de detalle de contaminación local, que requieren redes de vigilancia ajustadas específicamente a las condiciones y circunstancias particulares, se consideran fuera del alcance de esta publicación.

Al comenzar el proceso de diseño, deben considerarse para su realización los objetivos siguientes:

1. Caracterización y vigilancia de la calidad en la(s) masa(s) de agua subterránea regionales más importantes;
2. Determinación y vigilancia de la posición de la interfase agua dulce / agua salada entre ambos tipos de agua subterránea, a destacar particularmente en los acuíferos costeros o con aguas formacionales;
3. Determinación y vigilancia de la situación en que se encuentran los parámetros que limitan el uso de la masa de agua y que son específicos de su calidad natural, (p.ej. arsénico, fluoruros, etc.);
4. Identificación de los efectos que tienen sobre la calidad de la(s) masa(s) de agua subterránea las fuentes de contaminación difusa, tales como la aplicación de fertilizantes o plaguicidas.

La identificación y la vigilancia de la degradación del acuífero por *fuentes puntuales* de contaminación, no se considera una prioridad en esta fase inicial del seguimiento. No se niega que las grandes fuentes puntuales de contaminación pueden tener una incidencia regional, pero diseñar una red de vigilancia para determinar el desarrollo, extensión, niveles de concentración, etc., de un penacho de contaminación requiere un enfoque particular, basado en un planteamiento de detalle, y unos métodos de cálculo precisos. Abordar estos casos de degradación generalmente locales exigiría una cantidad de tiempo desproporcionada, por lo cual se ha considerado fuera de lugar en relación con los objetivos de esta Guía.

Esta Guía también presenta limitaciones en cuanto a los efectos de las fuentes difusas de contaminación (objetivo 4). La identificación en el acuífero de dichos efectos y su relación, de tipo cualitativo, con el origen de la degradación puede considerarse como una de las posibles funciones de la red de vigilancia regional aquí propuesta; pero si esto deriva hacia una investigación de detalle con sus comprobaciones estadísticas sobre, por ejemplo, el alcance preciso de dicha contaminación, entonces la red de referencia no será normalmente capaz de aportar los datos suficientes, para lo cual será necesaria una red especialmente diseñada con tal fin.

7.2 Diseño de un seguimiento del agua subterránea que dé respuesta a las necesidades de información definidas

Se analizan a continuación los objetivos mencionados anteriormente, en relación con sus requerimientos generales en cuanto a grupos de parámetros a medir, particularidades en el desarrollo de la red y frecuencias en el muestreo. En función de cada objetivo, así difiere la manera de abordar el diseño del programa de seguimiento y de los preparativos para obtener los da-

tos básicos; por esta razón, se comenta separadamente para cada objetivo el procedimiento completo de dicho diseño, incluyendo el trabajo preparatorio.

Las aguas subterráneas pueden encontrarse en muy diversas circunstancias y no se puede diseñar un programa de seguimiento sin tener una comprensión razonable de la situación de partida en que se encuentran: esa comprensión se representa mediante un *modelo conceptual*, construido con base en los conocimientos e información disponibles (ver capítulo 4). También, por lo que concierne a la contaminación regional en particular, habrá que localizar las causas potenciales y estudiarlas razonablemente, para lo cual puede hacer falta preparar mapas adicionales como son los mapas de uso del suelo, con la finalidad de identificar las amenazas de contaminación difusa para el acuífero.

En muchos casos, un modelo numérico de flujo a escala regional, relativamente simple, puede ayudar significativamente a comprender el comportamiento de las aguas subterráneas. Un modelo así, elaborado con experiencia y conocimiento suficientes, va a indicar dónde se recargan y descargan los sistemas y qué se puede deducir de las líneas y velocidades del flujo, de los tiempos de residencia, etc.; a su vez, la profundidad de estas líneas y los tiempos hallados van a dar una mejor idea de los sitios donde la calidad del agua subterránea puede verse más o menos influida por las actividades recientes (p.ej., para un periodo de menos de 50 – 100 años). Aun cuando tener un modelo de flujo pueda no ser prioritario, se recomienda su aplicación siempre que el presupuesto lo permita; si bien no se le debe atribuir un peso considerable en el programa, sí interesa que guarde una cierta proporción con el conjunto del diseño.

1. Caracterización y seguimiento de la calidad en las masas regionales de agua subterránea

Esta caracterización es necesaria para determinar las posibilidades de desarrollo que tiene(n) una(s) masa(s) de agua subterránea, así como para predecir y controlar eventuales cambios regionales en su calidad debidos a bombeos o a otras influencias externas, como pueden ser regadíos a gran escala o trabajos de ingeniería civil. Cuando la explotación del acuífero sea susceptible de provocar conflicto de intereses, será necesario normalmente mantener el seguimiento del agua subterránea de forma permanente.

- *Grupos de parámetros:*

Para una exploración general de la calidad del agua subterránea que comprenda los distintos tipos de agua, su origen y las primeras señales de contaminación, hay que analizar: Ca, Mg, Na, K, NH₄, Fe^c, Mn^c, SiO₂, HCO₃, SO₄, Cl, NO₃, PO₄ (iones mayoritarios). Los análisis deben llevar también las mediciones directas en campo de pH, CE y Temperatura.

- *Establecimiento de la red:*

a) *Caracterización de la calidad del agua subterránea.* La caracterización inicial de la calidad del agua en una región puede basarse en una única campaña de muestras, normalmente tomadas en los pozos existentes (de explotación y de observación), y en los manantiales y ríos de la zona; la selección ideal de los pozos conllevará una distribución razonable en todo el área, siempre y cuando capten el (o los) acuífero(s) que interesa(n). Sin embargo, esta situación favorable va a darse raramente y uno tendrá que arreglarse

con los pozos de todo tipo que haya disponibles, desde pozos de boca ancha someros hasta sondeos profundos. Es necesario tomar notas sobre la situación y las condiciones técnicas de los pozos observados, de manera que la primera interpretación de los resultados de la calidad del agua subterránea se fundamente en datos suficientes.

b) Vigilancia de la calidad del agua subterránea. Puede que el seguimiento de la calidad en la masa regional de agua subterránea sea necesario con cierta regularidad, si no puede descartarse la posibilidad de cambios graduales en las condiciones de dicha calidad debidos por ejemplo a modificaciones en la explotación del acuífero o en la gestión de las aguas de superficie. Para tener una observación con continuidad y fiable, resulta útil organizar una red de vigilancia “primaria” que consista en unos pozos cuidadosamente seleccionados, junto a otros de observación de reciente construcción si los disponibles no son suficientes. La selección entre los pozos disponibles debe hacerse con base en criterios que contemplen sus características técnicas y también su accesibilidad, los derechos del dueño, etc. (ver anejo D). Un programa de seguimiento continuo proporcionará unos datos históricos que resultarán esenciales para la gestión del agua en el futuro. El muestreo del agua subterránea con este propósito no requiere unos volúmenes demasiado grandes (ver los parámetros anteriores), pudiéndose a menudo obtener en los mismos piezómetros. No obstante, a la hora de interpretar los resultados numéricos se deberán tener en cuenta las particularidades del sondeo, tales como la profundidad de la obra y la situación de la rejilla.

- *Frecuencia del muestreo con miras al seguimiento*

La frecuencia del muestreo depende de la rapidez que se espere en los cambios de la situación en la calidad del agua. Pensando en una observación mínima (sin razones particulares que hagan esperar cambios importantes) la frecuencia del muestreo para la calidad en las masas regionales de agua subterránea, puede ser muy baja: una toma cada cinco años o incluso cada diez años, por ejemplo, en el caso de sistemas profundos que únicamente se vean afectados por procesos evolutivos naturales. No obstante, esta frecuencia puede incrementarse a por ejemplo una vez al año o cada dos años, cuando se sospechen grandes cambios; en el caso de una observación general y en acuíferos someros especialmente vulnerables, puede ser mayor (p.ej. anual) si se encuentran influidos por alguna explotación o por cambios en la gestión de las aguas superficiales. Por otra parte, los intervalos en el muestreo pueden adaptarse a la publicación de los datos, por ejemplo a los informes previstos cada 5 años.

2. *El seguimiento de la interfase agua salada / agua dulce*

El seguimiento de la posición de la interfase entre las masas de agua salada y de agua dulce es uno de los aspectos a destacar en los acuíferos costeros y en los que contienen aguas congénitas (formacionales) salinas. Su posición puede ser relativamente estable cuando el régimen del agua subterránea obedece exclusivamente a procesos naturales; sin embargo, muchos acuíferos de agua dulce están sometidos a explotación para abastecimiento, con el correspondiente riesgo de intrusión del agua marina y/o del domo salino. Es por lo tanto necesario mantener una vigilancia ordenada sobre la posición de la interfase.

- *Parámetros*

La salinidad del agua puede determinarse aplicando los métodos siguientes, que por orden de complejidad son:

- la medida de la conductividad eléctrica (valor de la CE) y de la temperatura, tomando el valor de referencia de la CE generalmente para una temperatura de 20 ó 25 °C;
- la determinación del Total de Sólidos Disueltos (TSD);
- la determinación de la concentración de los iones mayoritarios, mediante análisis químico.

El primer método puede llevarse a cabo en el lugar mismo; el segundo y tercero son métodos típicos de laboratorio.

Por debajo de un valor para la CE de aproximadamente 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25 °C el agua se considera dulce, siendo los Cloruros (Cl^-) y Bicarbonatos (HCO_3^-) los iones mayoritarios que condicionan su salinidad, en un sistema hidrogeológico y geoquímico homogéneo; por encima de ese valor, suele ser suficiente la determinación sólo de los Cl^- (a veces SO_4^{2-}) para estimar la salinidad del agua.

- *Diseño de la red*

La red para el seguimiento de los efectos de la intrusión del agua marina o de aguas congénitas, depende mucho de cada situación: el planteamiento de la red será mejor cuanto mayor sea la comprensión que se tenga de la hidrogeología y de los sistemas de flujo (modelo conceptual). Sin embargo, incluso sabiendo poco de la situación en que se encuentra el agua subterránea, se puede establecer un diseño preliminar de la red de vigilancia sobre la base de una versión aproximada del modelo conceptual y de un razonamiento fundamentado. En muchas situaciones semiestáticas la forma de la interfase puede predecirse aproximadamente con ayuda de la fórmula de Ghyben-Herzberg, según la cual la forma de la interfase tiende a ser la versión especular de la superficie piezométrica, en una proporción que depende de la diferencia de densidades entre el agua marina y el agua dulce (p.ej. Bear & Verruijt, 1987): cuando el manto está bajo, la interfase se encontrará a poca profundidad, y cuando el manto está alto, la interfase se va a encontrar normalmente a mayor profundidad. Por ejemplo, para una densidad del agua marina de 1025 kg/m^3 y una densidad (estándar) para el agua dulce de 1000 kg/m^3 , la cuña estará por debajo del nivel medio del mar (nivel de referencia o espejo) a una profundidad de 40 veces la altura del manto sobre él. Esta relación general puede aplicarse para planificar la distribución de la red de seguimiento.

- En zonas de litoral, por ejemplo, la cuña agua dulce / agua marina en situaciones semiestáticas penetra desde el nivel del mar cerca de la línea de costa hacia profundidades mayores tierra adentro. La fuerte bi-dimensionalidad de la interfase a lo largo de la costa puede ser de una utilidad muy eficaz a la hora de determinar su posición mediante una red de pozos seleccionados que estén dispuestos en perfil(es) perpendicular(es) a la costa (Figura 7.1). En zonas de estuario, con formas menos regulares, la situación puede presentarse más complicada, pero también en estos casos se puede aplicar la misma fórmula para el diseño de la red.
- De manera parecida, en la formación de conos de aguas salinas congénitas inducida por bombeos, la interfase que se forma en la base del sondeo con el cono inducido ascendente tiende a ser una imagen especular del cono de depresión en sí: una red de vi-

gilancia efectiva deberá tener una disposición de puntos radial, con perfiles (dos o más) de sondeos que pasen por el centro del bombeo.

Idealmente, los pozos que se utilicen con este específico propósito de muestreo, deben tener su rejilla en la zona de interfase (Figura 7.1), con lo cual los muestreos periódicos irán indicando las tendencias. La profundidad hasta la interfase salina también puede determinarse con ayuda de cables dotados de pares de electrodos, haciendo uso de la relación que existe entre la conductividad eléctrica específica y el contenido salino del agua (subterránea), o bien utilizando sondas de conductividad para obtener registros continuos de la misma.

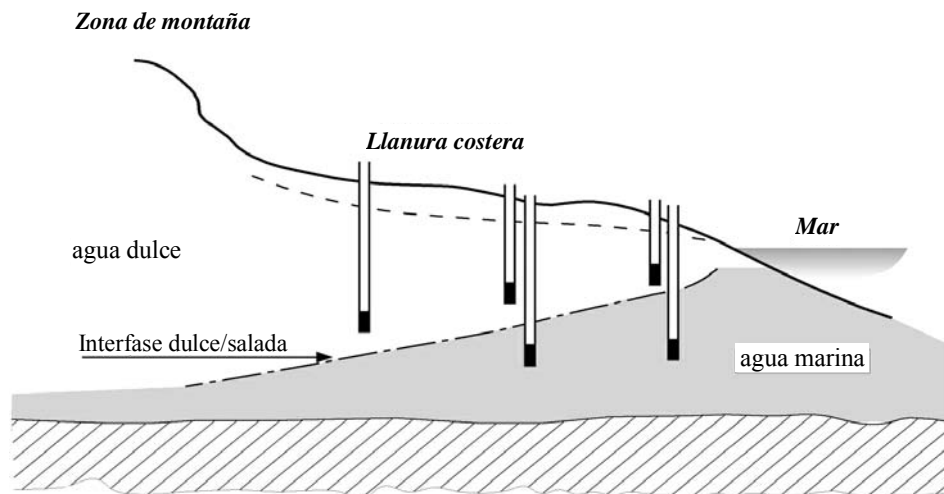


Figura 7.1: Red de vigilancia situada perpendicularmente a la línea de costa

- *Frecuencia de muestreo*

La frecuencia de los muestreos depende de la rapidez de los cambios. Si bien el desplazamiento de la interfase a escala regional suele ser relativamente lento, la extracción del agua subterránea puede provocar cambios locales mucho más rápidos. La frecuencia en el muestreo puede variar entre una toma cada cinco o diez años en condiciones de estabilidad, hasta tomas anuales o trimestrales en casos de inestabilidad, e incluso mensuales si la situación varía con rapidez.

3. *El seguimiento de los parámetros naturales en el agua subterránea que limitan su uso*

Incluso a concentraciones bajas, el arsénico y los fluoruros son peligrosos para la salud y el agua que supera los límites reglamentarios no debe utilizarse para el consumo humano. Hay parámetros de calidad de origen natural que son aportados al agua subterránea por los materiales geológicos, y ello a cualquier profundidad. Aun cuando los ambientes geológicos normales susceptibles de crear problemas de arsénico o fluoruros pueden ocupar extensiones muy amplias (decenas a centenares de kilómetros para los fluoruros en el este de África, y para el arsénico en Bangladesh), dentro de esas áreas las concentraciones pueden variar mucho en

distancias cortas; además, los procesos por los que se liberan estos elementos pueden verse influenciados por condiciones locales. Es a menudo característico de estas regiones tener unos gradientes hidráulicos muy pequeños y por lo tanto un desplazamiento del agua subterránea muy lento, especialmente en ambientes deltáicos favorables a la presencia de arsénico. El muestreo de pozos o sondeos muy próximos entre sí puede dar resultados muy diferentes, lo cual hace difícil el seguimiento general de tipo regional.

La situación y extensión de las aguas subterráneas afectadas puede determinarse con una única actuación mediante el muestreo de pozos y sondeos, en el área geológicamente presumible de encontrarse en riesgo; si estos puntos de muestreo son insuficientes habrá probablemente que perforar o instalar otros nuevos pozos de investigación. El desplazamiento lateral de estos constituyentes va a verse restringido por las bajas velocidades del flujo; en condiciones naturales el agua subterránea afectada puede haber alcanzado un estado más o menos estático, con lo cual la vigilancia regular puede limitarse a una toma cada pocos años. Si la explotación del acuífero está influyendo sobre el flujo, el estado de la masa de agua subterránea puede encontrarse fuera de equilibrio y su flujo tener desviaciones en otras direcciones. A efectos de controlar estas situaciones, la frecuencia de las observaciones en la red de seguimiento puede tener que incrementarse a lo largo de la masa de agua afectada: es posible que haya que aumentar esta frecuencia a una toma al año o cada dos años. Las propiedades espaciales de la red de vigilancia tendrán que ajustarse al área y movimiento del agua subterránea afectada.

Como conclusión, si no se esperan cambios en las condiciones del flujo se puede determinar la localización de las aguas subterráneas afectadas por arsénico o fluoruros mediante una única actuación. En caso contrario, hará falta un programa de seguimiento para observar y gestionar la situación: si se estiman los cambios como graduales y lentos, la frecuencia del muestreo puede ser relativamente baja (cada pocos años); pero si los cambios pueden ser considerables, p.ej. debido a una explotación de intensidad cada vez mayor, la red de vigilancia y la frecuencia de muestreo deberán adaptarse a la rapidez que se espera en el cambio.

4. Efectos de las fuentes de contaminación difusa sobre la calidad de las aguas subterráneas: identificación y pruebas

La contaminación de las aguas subterráneas de origen difuso es un problema serio en la parte superior, a menudo relativamente somera, de los acuíferos de muchos países en todo el mundo. La degradación difusa puede estar causada por la aplicación de productos agroquímicos (fertilizantes o plaguicidas) o por la deposición de NO_x , SO_x y metales de la atmósfera, pero en el caso de las aguas subterráneas este tipo de contaminación puede también provenir de muchas fuentes locales dispersas a lo largo de grandes superficies, como ocurre en áreas urbanas.

Una manera común de abordar el seguimiento y la cuantificación de la contaminación de un acuífero, consiste en considerar su origen, las líneas de su trayectoria y los receptores efectivos, tal y como se hace actualmente en los países de la Unión Europea (Directiva Marco del Agua, UE, 2000).

Tres son los factores principales que condicionan la composición del agua subterránea sometida a la influencia de una contaminación (p.ej. Broers, 2002):

1. El tipo y la carga de contaminación que llega a la masa de agua subterránea.
2. Las líneas de flujo del agua subterránea. Estas trayectorias indican qué materiales va a encontrar el agua en su desplazamiento susceptibles de reaccionar con ella, la distribución de edades del agua subterránea y el tiempo disponible tanto para interaccionar químicamente con la matriz rocosa como para reducirse la intensidad de la contaminación (p.ej. Engelen, 1981).
3. La actividad química de los materiales geológicos que atraviesa el agua. Las reacciones hidrogeoquímicas entre el agua y la roca van a alterar la composición química de aquélla.

De una manera ideal, el diseño de la red para el seguimiento de la contaminación del agua subterránea debiera tener en cuenta todos estos factores. Sin embargo y especialmente al principio del estudio y de la vigilancia, la información que se va a conseguir será normalmente demasiado escasa como para tener en cuenta diferenciaciones de detalle. La información relativa al tipo y carga de la contaminación podrá estimarse a partir del uso del suelo, por ejemplo. Las líneas del flujo podrán deducirse del modelo conceptual (Capítulo 4) y servirán para distinguir entre acuíferos someros y profundos, o entre acuíferos libres y cautivos, en relación con la vulnerabilidad del agua. La actividad química de la roca continúa siendo todavía una de las grandes incógnitas, al menos en términos cuantitativos. En consecuencia y respecto a los factores que intervienen en la contaminación, la estrategia adecuada para el seguimiento sólo se podrá definir hasta donde lo permita la información de que se disponga. Los factores que son ampliamente desconocidos no se pueden tener en cuenta, lo cual puede hacer que lamentablemente queden ocultas las relaciones que se están buscando, cuando esos factores son relevantes.

Un método simplificado para determinar la *contaminación difusa* consiste en aplicar el concepto de *tipos de zonas homogéneas o características*, los cuales se definen mediante la combinación de uno o más factores de los estimados como destacables en la distribución de la contaminación en el sistema acuífero considerado. Por ejemplo, si se contempla la degradación causada por fertilizantes, se puede seleccionar el uso del suelo y la vulnerabilidad del sistema en estudio como factores potenciales a destacar en relación con el grado de contaminación. Se tendrán en consideración los distintos tipos de uso del suelo para hacer una clasificación de las presumibles diferencias en cuanto a la carga de contaminación. Por su parte, la vulnerabilidad del sistema acuífero se puede discriminar con base en la dirección del flujo subterráneo —es decir, las correspondientes zonas de recarga, de transición y de descarga— con un riesgo decreciente para la degradación del agua subterránea (igualmente se puede utilizar la conductividad hidráulica de la capa superior o la textura del suelo, para determinar esta vulnerabilidad). Cada “tipo de zona característica” representa una combinación particular de un tipo de uso del suelo y de una clase de vulnerabilidad del sistema acuífero.

Después de haber definido los tipos de zonas características, se divide el área de investigación en subáreas tales que se correspondan con la clasificación anterior. Los pozos disponibles en toda el área pueden entonces separarse en grupos, cada uno de ellos representativo de un tipo de zona característica. (Puede ocurrir que haya pozos de un grupo particular que se encuentren en diversas subáreas del mismo tipo). El grado de contaminación encontrado en las muestras de agua tomadas en cada grupo de pozos se considera representativo para todo el tipo de zona característica correspondiente. Cuando el número de pozos de un grupo sea suficientemente

amplio, puede validarse la distribución de los parámetros de calidad del agua subterránea en estudio (p.ej., nitratos o fosfatos) mediante representaciones estadísticas.

Este enfoque simplificado permite dilucidar la existencia de contaminación del agua subterránea en varios tipos de zonas características. De esta forma, la contaminación en la zona de estudio puede clasificarse en un sentido indicativo / cualitativo si hay poca información disponible, y en un sentido más cuantitativo si los datos existentes son suficientes para aplicar un análisis estadístico. Este método de clasificaciones proporciona una buena base para las campañas preliminares de muestreo de la calidad del agua subterránea, así como para el diseño de un programa más continuo en su seguimiento. También puede utilizarse, por ejemplo, como punto de partida para una política de desarrollo que contemple el uso del suelo y la aplicación de productos agroquímicos.

Contaminación difusa por la agricultura

La identificación y demostración de afección en la calidad del agua subterránea debida a actividades agrícolas, requiere un enfoque crítico en relación con su seguimiento. Cuando haya incertidumbre en cuanto a la posible incidencia sobre el agua subterránea de los fertilizantes y plaguicidas aplicados, se propone la siguiente manera de abordar el tema, en dos fases:

- *El primer paso* debe centrarse en mostrar si y dónde las concentraciones superan los estándares o límites establecidos, y en demostrar si análogamente existe una relación entre el origen de los contaminantes (aplicación agrícola de fertilizantes y plaguicidas) y la calidad del agua subterránea muestreada.
- *El segundo paso* debe buscar relacionar de una manera más cuantitativa la aplicación de los productos químicos, sus impactos y el efecto de unas posibles medidas correctoras (reductoras).

La puesta en práctica de esta segunda fase será efectiva siempre que se hayan obtenido unos resultados positivos en la primera.

Primer paso. A efectos de identificar una posible contaminación y de relacionarla con el uso del suelo, debe muestrearse la calidad del agua subterránea en las áreas susceptibles de afección y en las zonas de referencia (habitualmente bosques o zonas con otra vegetación natural). La aplicación del método de tipos de zonas características (ver la descripción anterior) conlleva las actuaciones siguientes:

- Representar en mapas los distintos tipos de uso del suelo en la(s) zona(s) de interés, diferenciando por ejemplo entre áreas urbanas, agrícolas (diversos cultivos), pastizales intensivos, bosques o arboledas, y otros tipos de vegetación natural.
- Dividir la zona considerada en subzonas con vulnerabilidades distintas, basándose en la información relativa al marco hidrogeológico y al sistema de flujo subterráneo (ver Capítulo 4). Como una versión preliminar de la contaminación difusa, puede ser importante distinguir entre las áreas de recarga, de transición y de descarga, con riesgo decreciente en la degradación del sistema de agua subterránea. Por razones semejantes, puede interesar tener en cuenta la textura y las propiedades hidráulicas de la capa superior.
- Definir un número limitado de tipos de zonas características, sobre la base del uso del suelo y/o de las particularidades de la vulnerabilidad.

- Hacer una selección de los pozos en cada uno de estos tipos definidos, cubriendo tanto las áreas potencialmente afectadas como las de referencia que no lo están.
- Hacer una selección de indicadores químicos. El muestreo incluirá los parámetros que sean típicos para la clase de contaminación que se está investigando: para los nutrientes, los parámetros destacables son los nitratos, nitritos y fosfatos, principalmente; en cuanto a los plaguicidas, esa decisión derivará del inventario de los compuestos aplicados en la agricultura de la zona que presentan riesgo de alcanzar el manto acuífero.
- Tomar muestras para la calidad de las aguas subterráneas en los pozos seleccionados y analizar los parámetros relacionados con la contaminación sospechada.
- Determinar y si es posible cuantificar el grado de contaminación en los diversos tipos de zonas características definidos.
- Mostrar que las concentraciones encontradas en las zonas potencialmente afectadas son significativamente superiores a las correspondientes a las zonas de referencia y que están probablemente relacionadas con las fuentes de contaminación.

El primer paso conlleva una “investigación preliminar”: una campaña de una única toma de muestras, normalmente. La calidad de las conclusiones resultantes dependerá mucho de la cantidad de pozos adecuados disponibles en los distintos tipos de zonas características. (Los pozos útiles tienen su rejilla en el acuífero de estudio). Algunos de estos tipos pueden estar bien representados, mientras que otros pueden estarlo sólo en parte o nada en absoluto.

Segundo paso. La decisión de dar el segundo paso en este estudio depende de si se ha detectado la contaminación en relación con su origen y de si es necesario tomar medidas correctoras. Se pueden distinguir dos situaciones:

- Si no se ha encontrado una contaminación significativa (no hay concentraciones por encima de los límites nacionales o internacionales aceptables), la red de seguimiento de referencia general puede servir para detectar en el futuro eventuales señales de contaminación en el agua subterránea. De ser conveniente, aquellas zonas que se encuentren insuficientemente representadas pueden mejorarse añadiendo algunos pozos más. La frecuencia del muestreo tiene que ajustarse a las expectativas que haya en cuanto a posibles cambios; la toma de muestras puede repetirse cada pocos años, en función de las expectativas, los objetivos y los medios disponibles.
- Si se encuentra una contaminación grave en una subzona (vulnerable), puede decidirse mejorar significativamente la red de referencia existente o bien instalar una red especial de vigilancia de uso permanente. Esta red debe ser diseñada específicamente para observar las tendencias regionales y temporales en la calidad del agua subterránea, y para hacer el seguimiento de la incidencia de las posibles medidas correctoras. La estrategia del seguimiento requiere formular los objetivos de una política / gestión (p.ej., localizar aplicaciones excesivas de fertilizante en el agua subterránea), precisar qué información es necesaria (p.ej., qué nutrientes, qué áreas, qué profundidades) y también qué alcance deberán tener los datos estadísticos (p.ej., porcentaje del área contaminada con una precisión relativa del 10 al 95 % en el nivel de confianza).

Estos estudios cuantitativos de detalle de la contaminación difusa requieren unas estrategias y unas redes para su seguimiento que precisan explicaciones de una amplitud tal, que su descripción se entiende excede el marco de esta Guía.

Contaminación difusa en áreas urbanas

La degradación difusa en áreas urbanas suele ser el resultado de muchas fuentes puntuales locales. La experiencia prueba que la contaminación difusa en acuíferos someros originada por estas fuentes locales puede variar considerablemente de un lugar a otro, incluso en distancias muy cortas; de aquí que los pozos seleccionados para el muestreo sean sólo representativos a una escala muy reducida (distancias de algunos metros). En tales circunstancias y para desarrollar una actuación, una vía efectiva en la recogida de datos consiste en elegir algunas áreas piloto (p.ej., la extensión de un núcleo de población) y muestrear la contaminación y su variación local en estas áreas piloto a lo largo de una campaña.

Cuando en un área urbana el agua subterránea se encuentra seriamente degradada, por ejemplo con nitratos, las actuaciones dirigidas a mejorar la situación podrán basarse en los resultados obtenidos en las investigaciones llevadas a cabo en las áreas piloto. Entre estas medidas correctoras puede haber campañas para aumentar la conciencia de la población en relación con las fuentes contaminadoras que están amenazando sus aguas subterráneas, así como los caminos para reducir aquéllas y proteger éstas.

La campaña de muestreo puede repetirse después de un cierto tiempo a efectos de comprobar la incidencia de las actuaciones emprendidas sobre el valor medio, o la mediana, de las concentraciones o de los parámetros indicadores.

En resumen

La existencia de una degradación difusa del agua subterránea se puede identificar y demostrar mediante pozos escogidos en la red de referencia general, si esos pozos son adecuados y representativos. Para demostrar que la contaminación difusa es significativa, con unas concentraciones por encima de los niveles naturales, el muestreo tendrá que llevarse a cabo en las zonas supuestamente afectadas y en las que no lo están. La aplicación del método de los tipos de ‘zonas características’ permite adoptar diferentes vigilancias en la calidad del agua subterránea de la zona, a condición de poder definir y estudiar factores que sean relevantes, sobre la base de una información suficiente. Este método también permite la aplicación del análisis estadístico a los resultados obtenidos —siempre y cuando sea suficientemente grande el número de pozos utilizados— y puede igualmente ayudar en el planteamiento y mejora de la red de seguimiento.

En caso de una degradación grave, donde la eficacia de las medidas correctoras tenga que estar garantizada, el programa de vigilancia habrá de ser formulado de una manera muy precisa en cuanto a las metas de su actuación, a la información necesaria y a los criterios estadísticos que se aplicarán sobre los datos obtenidos. Estas metas pueden requerir unas redes especiales que resulten muy exigentes con los pozos de observación. Un planteamiento amplio en relación con estas redes especiales de vigilancia, se considera fuera del marco de esta Guía.

Posibilidades para incrementar la eficiencia del seguimiento mediante una elección esmerada en el planteamiento de la red, de los componentes determinantes y de la frecuencia del muestreo.

Los programas para el seguimiento de la calidad de las aguas subterráneas pueden volverse fácilmente muy caros cuando se diseñan con múltiples objetivos. Entre los elementos más onerosos están las campañas de toma de muestras y los análisis en laboratorio, en íntima rela-

ción con el número de puntos a muestrear y con la frecuencia de los muestreos. Será necesario un planteamiento muy crítico sobre las necesidades de información y sobre las posibilidades de obtener la máxima información con el mínimo coste, y ello especialmente cuando los presupuestos sean limitados.

Se comentan a continuación algunas vías para mantener bajo el coste de un programa nacional de seguimiento de la calidad de las aguas subterráneas:

- Limitar el programa de seguimiento al nivel mínimo indispensable para satisfacer los objetivos de vigilancia estipulados en la reglamentación (nacional) del agua subterránea. Esto significa especificar las necesidades de información para cada uno de los objetivos de vigilancia por separado y la(s) zona(s) y profundidad(es) para las cuales este objetivo es relevante, así como restringir el programa de seguimiento a lo estrictamente necesario.
- Definir el programa de seguimiento de acuerdo con el uso del suelo y la vulnerabilidad del sistema acuífero. Una práctica corriente consiste en dar claramente prioridad a la calidad del agua subterránea en aquellas zonas que corren un mayor peligro de degradación: las masas de agua subterránea profundas y bien protegidas por capas impermeables, necesitan una vigilancia menor que las freáticas. De igual manera, como forma de mejorar la eficiencia del programa de seguimiento —y de mantener sus costes bajos— se acepta hacer la separación siguiendo los tipos de uso del suelo (p.ej., agricultura frente a naturaleza libre).
- Para cada uno de los objetivos, ajustar la amplitud de los distintos grupos de parámetros (componentes determinantes) que han de ser analizados. Un número reducido de parámetros individuales no siempre conlleva un coste menor, dado que muchos laboratorios modernos han estandarizado procedimientos que cubren grupos enteros de componentes principales (Environmental Agency, 2002); la elección de estos grupos de parámetros determinantes, de acuerdo con el uso del suelo y la vulnerabilidad del acuífero, puede suponer un aumento de eficiencia y una reducción de costes muy significativos.
- Ajustar el número de pozos de muestreo a un mínimo aceptable, de forma que sea compatible con el cumplimiento de los objetivos de seguimiento seleccionados. Por ejemplo, para tener una imagen espacial de la calidad del agua subterránea una vez cada varios años, puede hacer falta una densidad de pozos relativamente grande, mientras que un acuífero en peligro puede ser vigilado con una frecuencia mucho mayor sólo en un grupo limitado de pozos especialmente elegidos. La densidad de la *red de seguimiento de referencia* debe ser suficiente para asegurar con una certeza razonable la detección de tendencias negativas, lo cual conlleva un mínimo de pozos de observación (no menos de 10) en los sistemas acuíferos de ámbito regional que estén bajo riesgo de degradación, o bien en cada una de sus unidades características más vulnerables que se hayan diferenciado.
- Definir el programa de muestreo teniendo en cuenta el rango de profundidades de los pozos de observación. Esto es posible cuando los sondeos mencionados, o los correspondientes piezómetros, atraviesan varios acuíferos o tienen una profundidad muy variable. Se puede elegir entonces la toma de muestras según el alcance que se espera puedan tener las influencias de superficie sobre los distintos acuíferos o profundidades.
- Adaptar la frecuencia de los muestreos a un mínimo compatible con un seguimiento estándar y con la detección de eventuales tendencias. Existen claros indicios de que incluso frecuencias en el muestreo relativamente bajas (p.ej., semestral o trimestralmente) pueden ser capaces de detectar tendencias en aguas subterráneas contaminadas (Environmental Agency, 2002). No obstante, para tener una cuantificación más afinada de la rapidez media en la tendencia, probablemente haga falta que dicha frecuencia sea mayor (mensual,

p.ej.) si el tiempo para esa cuantificación es limitado. Por lo tanto, puede resultar necesario intensificar la toma de muestras allí donde se haya encontrado una tendencia negativa grave; entonces, posiblemente se requiera para el seguimiento un nuevo conjunto de objetivos y de programas especiales.

En la Tabla 7.1 se presenta un ejemplo práctico de matriz para el muestreo, propuesta por el British Geological Survey (Environmental Agency, 2002), donde se indica cómo la frecuencia en las muestreos se puede adaptar de manera eficiente a las características hidrogeológicas del subsuelo.

Tabla 7.1: Cuadro de frecuencias en el muestreo, para acuíferos distintos con comportamientos diferentes en la respuesta de los componentes químicos, propuesto por el BGS

			Componentes hidroquímicos	
			No sensible	Sensible
Hidro - geología	Flujo lento	Libre	3 años	semestral
		Cautivo	6 años	anual
	Flujo rápido	Libre	anual	trimestral
		Cautivo	3 años	semestral
			Vigilancia	Operativo
			Seguimiento	

Explicación de los términos utilizados en la tabla anterior:

Componente:	Parámetro químico o físico-químico que puede ser medido en un laboratorio de análisis.
Sensible:	Componente susceptible de cambiar rápidamente ante la incidencia humana.
No sensible:	Componente no susceptible de cambiar rápidamente ante la incidencia humana.
Flujo lento:	Flujo intergranular, principalmente.
Flujo rápido:	Flujo en roca fracturada, principalmente.
Estándar:	Grupo de componentes medidos en todos los puntos de la red.
Selectivo:	Grupo de componentes medidos sólo en los puntos de la red relacionados con un uso del suelo particular.
Seguimiento de Vigilancia:	De acuerdo con la Directiva Marco del Agua (DMA), seguimiento de una serie amplia de parámetros con una muestra al menos cada seis años, para complementar y validar el procedimiento de evaluación de impacto así como para proporcionar información útil en la estimación de las tendencias a largo plazo que resulten de los cambios en las condiciones naturales o que sean consecuencia de la actividad antrópica.
Seguimiento Operativo:	De acuerdo con la DMA, seguimiento de una serie limitada de parámetros al menos con una muestra al año dentro de los períodos establecidos para el seguimiento de la vigilancia en las masas de agua subterránea que se consideran “en riesgo”.
En riesgo:	De acuerdo con la DMA, las masas de agua subterránea que se encuentran en riesgo de no alcanzar un buen estado químico según el Artículo 4 y el Anejo V.

7.3 Distintas opciones para el seguimiento y su valoración

Es conveniente considerar una o varias propuestas para la red, dentro del seguimiento de la calidad de las aguas subterráneas, con el fin de hacer una estimación de su viabilidad. Estas distintas posibilidades deben estar definidas por profesionales, en colaboración con los gestores responsables del agua subterránea, y basarse en las prioridades que haya en cuanto a selección de zonas, objetivos a alcanzar, elección de los paquetes de parámetros y frecuencia de los muestreos y análisis. El primer resultado que se obtenga, indicado en el Capítulo 3, va a

proporcionar ya una primera aproximación a los objetivos y a los temas importantes; posteriores consideraciones en relación con la situación del agua subterránea, las capacidades institucionales y la disponibilidad de los pozos (Capítulos 4, 5, 6 y 7) llevarán a una descripción particular más clara de estas varias opciones. Es importante que el número de alternativas consideradas sea limitado y que las diferencias consistan en aspectos esenciales y no en detalles irrelevantes.

Las propuestas para una red de vigilancia del agua subterránea comprenden normalmente pozos ya existentes así como nuevos emplazamientos. Interesa que las opciones contempladas se pongan en listas, apoyándose en figuras y tablas, y que estén suficientemente descritas. Al principio, en la evaluación de la factibilidad, no hace falta que los mapas que muestran las diversas alternativas sean de gran exactitud. Trabajar con una (pequeña) base de datos relativa a los pozos existentes puede suponer un ahorro de tiempo considerable al preparar los mapas para las diversas propuestas.

7.4 Uso de los pozos existentes y planeamiento de otros nuevos

Para *un único examen* de la calidad del agua subterránea, como parte del reconocimiento y caracterización del estado en que se encuentra, se pueden analizar los pozos que estén disponibles. Esto a menudo llevará a unos mapas con lagunas o vacíos, y un grado de detalle variable en el espacio; o sea, con mucho detalle donde la distancia entre pozos es pequeña, y con poco detalle donde esa distancia es grande.

Para un *programa de seguimiento normal* la selección, con miras a la observación, entre los pozos que ya existen debe basarse en el plan del seguimiento (o de sus distintas opciones) y en las características de dichos pozos. Éstos constituyen a menudo la base sobre la cual se puede ampliar el programa, especialmente en sus primeros momentos. Si se contemplan varias alternativas, también se pueden hacer en principio distintas elecciones; sin embargo, esta situación tan favorable se da raramente en la práctica.

El plan de seguimiento, o sus alternativas, indicará(n) cuáles son los sitios preferidos para tomar las muestras que proporcionarán los diferentes componentes considerados en el programa. El plan tendrá en cuenta normalmente la ubicación de los pozos ya existentes, y conviene evitar hacer agrupaciones locales de pozos en el programa regional de seguimiento, salvo que haya alguna razón particular, dado que estas agrupaciones no aportan mejoras sustanciales a la precisión de la imagen regional mientras que sí conllevan un incremento de los costes en el seguimiento. Por esta razón, se elegirá para la observación el pozo que resulte ser el más útil y representativo de todo el grupo.

Con respecto a las características de los pozos existentes, en el proceso de selección habrá con frecuencia dificultades debido a que estos pozos no van a satisfacer probablemente todos los requisitos; no obstante, al arrancar un programa de seguimiento puede ocurrir que el único camino para mantener los costes de inversión a niveles bajos consista en recurrir a estos pozos. En el apartado 6.3. se listan unos cuantos requisitos mínimos, esenciales a la vez para el seguimiento del nivel y de la calidad del agua subterránea; otros requisitos adicionales para el seguimiento de la calidad son:

- el lugar de los pozos elegidos debe ser representativo del estado de la calidad del agua subterránea regional (deben evitarse sitios próximos a fuentes locales de contaminación);
- debe conocerse el material del revestimiento y anotarlo en la ficha del sondeo;
- el diámetro del sondeo no debe ser inferior a 2 pulgadas (indispensable para introducir sondas);
- la posibilidad de purgar el sondeo es una necesidad absoluta en aquellos casos que no están en uso regularmente.

Es muy importante elaborar una ficha con los datos básicos de cada pozo de la red, con un plano de situación y los datos esenciales (profundidad, diámetros, profundidad y longitud de la rejilla, material de construcción, etc.). Para la continuidad en el programa de seguimiento, es necesario establecer unos acuerdos claros con los dueños de los pozos en cuanto a su accesibilidad; estos dueños pueden estar interesados en disponer de una copia de los resultados relativos a sus pozos.

La ubicación de los sondeos nuevos, su profundidad deseable y la situación de lo(s) filtro(s) vendrán dadas por la opción que se elija para el plan de seguimiento (apartado 7.3). La profundidad y la situación de estos filtros pueden preverse con base en los mapas hidrogeológicos de la zona, si bien su posición exacta sólo podrá definirse después de la perforación.

Resultados que se esperan de este capítulo:

Además de los resultados indicados para el capítulo 4 (modelo conceptual) y el 6 (seguimiento de la cantidad del agua subterránea), el capítulo 7 debería aportar los siguientes frutos:

- Una visión del conjunto de las opciones de diseño para el seguimiento de la calidad del agua subterránea, que se tendrán en cuenta al hacer la estimación de su viabilidad (capítulo 8).
- Un mapa del área de captación (eventual) o zona de interés, con los objetivos para la calidad del agua subterránea indicados en las áreas destacables identificadas (áreas de costa, áreas con una calidad particular del agua subterránea).
- Un mapa con el diseño de la red para la vigilancia de la calidad del agua subterránea, con el listado de los puntos de observación seleccionados y el método de muestreo especificado (CE o iones, o ambos), así como la frecuencia de las tomas.
- Un mapa con el diseño de la red específica para los parámetros Fluoruros, Arsénico, y otros (sólo si son destacables), con el listado de los sondeos elegidos para muestrear, y la frecuencia de los muestreos indicada.
- Un mapa con el diseño de la red de puntos para identificar la contaminación difusa, y una tabla con los parámetros elegidos y la frecuencia de los muestreos especificada. Los mapas se basarán en el uso del suelo y en la vulnerabilidad del acuífero.

Interesa considerar varias alternativas para la mejora de la red de vigilancia.

8 Viabilidad de las diversas opciones para el programa de seguimiento

En este capítulo se trata de la preparación de los documentos que se necesitan para estimar la factibilidad de las diversas alternativas del programa de seguimiento, o en sus combinaciones. Se comentan los siguientes temas:

- La definición de las opciones esencialmente distintas para el programa de seguimiento. Pueden incluirse combinaciones entre las componentes de la cantidad y de la calidad de las aguas subterráneas.
- El cálculo de a) las inversiones a hacer en la red de vigilancia y b) los costes anuales asociados con el mantenimiento de las redes (incluyendo la sustitución de pozos), la recogida de datos y su tratamiento (almacenamiento, procesado y validación de los datos). Se incluyen unas tablas como ejemplo para la validación.
- La valoración de las distintas opciones consideradas. Se presenta y comenta una tabla de síntesis con los puntos principales para tomar decisiones.

8.1 Documentos necesarios

Las decisiones relativas al establecimiento de un programa de seguimiento, o a la mejora de uno ya existente, se tomarán generalmente por los responsables de las instituciones que han asignado la tarea, el mandato y la financiación del estudio del agua subterránea y de su seguimiento. Estas decisiones requerirán un plan bien preparado, con los objetivos y datos necesarios, con el programa de seguimiento definido y los beneficios que se esperan de él, y por último los costes y necesidades implicados. En la fase preparatoria del plan se pueden contemplar diversas opciones para su mejora, cada una con su propio nivel de información, sus costes y sus consecuencias organizativas. Se da por hecho que las opciones serán preparadas conjuntamente por los responsables del agua subterránea y los expertos en su seguimiento.

Para la evaluación y la toma de decisiones relativas al establecimiento de la(s) red(es) de vigilancia necesaria(s), harán falta los siguientes documentos:

1. Un archivo con los mapas relativos al diseño de las distintas alternativas que se proponen para la viabilidad de la red de vigilancia, indicando claramente los pozos de observación existentes y los nuevos.
2. Un documento con a) la inversión que hay que hacer en la red de vigilancia y b) el coste anual que conlleva el mantenimiento de la red (incluida la sustitución de pozos), la obtención de datos y su tratamiento.
3. Un esquema para evaluar las diversas alternativas del plan, que contenga las opciones consideradas y para cada una de ellas a) qué información se espera conseguir, b) los aspectos institucionales y organizativos involucrados, y c) la inversión y los costes anuales implicados.

El presente capítulo comenta de una forma concisa cómo hacer la selección entre las distintas propuestas y cómo preparar los documentos para la evaluación y la toma de decisiones, entre los cuales figuran unas tablas para calcular costes y unos esquemas para hacer estimaciones. Para mayor claridad, los ejemplos que se dan en este capítulo son relativamente sencillos; en la realidad, las opciones para mejorar el programa de seguimiento pueden ser evaluadas con mucho mayor detalle. En el anejo F se adjunta una hoja de costes medios para facilitar el cálculo de cada una de las alternativas.

8.2 Definición y elaboración de las diversas opciones para el programa de seguimiento

Cualquier hidrólogo, hidrogeólogo o ingeniero especializado en aguas al que se le pida un plan cuyo propósito sea el establecimiento o mejora de una red para el seguimiento del agua subterránea, necesitará tener claras las indicaciones relativas al nivel de inversión que puede hacerse así como el presupuesto anual disponible para el mantenimiento de la(s) red(es) de vigilancia y para la gestión de los datos; debe también quedar clara la situación del personal y de los equipos que serán necesarios para los trabajos correspondientes. Con este fin y dentro del marco de las condiciones generales, pueden considerarse para su evaluación y selección diferentes opciones sobre el programa de seguimiento. Estas opciones pueden diferir según distintas vías, tal como se muestra a continuación:

- *Alcance y planteamiento del programa de seguimiento*
El alcance del programa puede diferir en sus propósitos principales: puede comprender el seguimiento del nivel del agua subterránea, la toma de muestras para la vigilancia de su calidad, o una combinación de ambas cosas.
El seguimiento del agua subterránea en cantidad puede incluir manantiales y flujos de base (ver las posibilidades en el capítulo 6); en cuanto a la calidad, el programa puede variar en objetivos y en amplitud (ver capítulo 7).
- *Zonas del seguimiento*
En lugar de elegir toda una zona para su seguimiento desde el inicio, también puede considerarse la implantación de sucesivos programas para el seguimiento en distintas áreas de esa zona. Por ejemplo, estas áreas pueden seleccionarse en base a la urgencia en obtener datos, derivada de la gravedad de los problemas en sus aguas subterráneas.
- *Intensidad del seguimiento*
Los programas para el seguimiento del agua subterránea pueden variar también en cuanto a su intensidad. Tanto la densidad de puntos de observación en la red como la frecuencia de estas observaciones pueden ser diversas (ver también los capítulos 6 y 7); con la ayuda de métodos geoestadísticos se puede ver cómo la precisión de los mapas de isolíneas depende de la cantidad de puntos de observación por unidad de superficie. Lamentablemente, no hay una regla simple que indique la relación adecuada.

Las distintas alternativas seleccionadas deben diferir en *aspectos esenciales* que se fundamenten en planteamientos claros, y deben ser técnicamente consistentes. Si bien la puesta en práctica gradual de un plan va a repartir las inversiones a lo largo de varios años, al final la magnitud del coste total será la misma. Puesto que el diseño de un programa de seguimiento conlle-

vará seguramente una cantidad considerable de tiempo y medios, será útil resaltar los puntos clave en el proceso de su implementación, puntos que van a ser decisivos en la negociación de las opciones y de los planes propuestos, con los responsables de los acuíferos.

Las decisiones en cuanto a la viabilidad van a requerir un plan, con mapas que muestren el diseño de la(s) red(es) para el seguimiento de diferentes alternativas. Conviene que estos mapas indiquen la situación de los pozos de observación ya existentes y de los nuevos que se prevén, así como el rango de sus profundidades. Si hay más de un acuífero en estudio, los planes deben hacerse para cada uno de ellos por separado. El diseño de la red de vigilancia y el papel de los pozos existentes ya han sido comentados en los capítulos 6 y 7.

8.3 Cálculo de las inversiones y de los costes anuales.

Cálculo de la inversión

En el ejemplo que se presenta (Tabla 8.1) se ha considerado la propuesta de tres opciones. Para el programa de seguimiento harán falta pozos existentes y otros nuevos; también se utilizarán seguramente estaciones de aforo. El coste de la puesta a punto de los pozos actuales puede incluir su limpieza, una testificación sencilla y alguna obra pequeña tal como poner una llave para tomar muestras en la cabeza del sondeo; también, la limpieza y protección del emplazamiento (p.ej., cementar la base, poner una tapa de cierre, cercar o vallar, etc.) y eventuales costes administrativos. Cuando los presupuestos son bajos estas mejoras pueden omitirse. El coste de los pozos nuevos comprende su perforación, instalación, desarrollo y la protección del sitio, además de posibles costes administrativos. Los precios unitarios para la perforación y la instalación dependen de la profundidad del sondeo, y por lo tanto se pueden dar como costes medios para distintas clases de profundidad o bien calcularse para cada pozo por separado.

El presupuesto total para la puesta a punto de los pozos ya existentes y para la instalación de los nuevos se calcula sobre la base de la cantidad de pozos necesarios en las diferentes alternativas. Estas estimaciones pueden hacerse con la ayuda de hojas de cálculo o con programas específicos. La precisión de esta evaluación depende de lo ajustado de los precios unitarios; éstos pueden variar mucho de un país a otro y tendrán que ser estimados y cotejados en cada situación local.

Tabla 8.1: Ejemplo de cuadro para calcular la inversión de diferentes alternativas para el programa de seguimiento

Elementos:	Opciones:	Opción 1		Opción 2		Opción 3	
	Coste unitario	Cantidad	Coste Total	Cantidad	Coste Total	Cantidad	Coste total
Acondicionamiento de los pozos existentes		n 1		n 2		n3	
- Limpieza, testificación, obras menores, llave	x		x		x		x
- Protección del sitio (cementado, tapa, vallado,...)	x		x		x		x
- Costes administrativos	x		x		x		x
Instalación de pozos nuevos		m1		m2		m3	
- Perforación – profundidad de clase 1	x		x		x		x
- Perforación – profundidad de clase 2	x		x		x		x
- Instalación del pozo – profundidad de clase 1	x		x		x		x
- Instalación del pozo – profundidad de clase 2	x		x		x		x
- Limpieza y desarrollo	x		x		x		x
- Protección del sitio (cementado, tapa, vallado,...)	x		x		x		x
- Costes administrativos	x		x		x		x
Estaciones de aforo (sólo si tienen relevancia)		p1		p2		p3	
- Instalación	x		x		x		x
- Protección del sitio	x		x		x		x
- Costes administrativos	x		x		x		x
Registros (sólo si tienen relevancia)		q1	x	q2	x	q3	x
Inversión total			X		Y		Z

n, m, p y q : número de unidades consideradas

Cálculo de los costes anuales

Los costes anuales para un programa de seguimiento (Tabla 8.2) están compuestos por:

- Costes anuales de estaciones de medida (incluyendo recambios y mantenimiento)
- Costes anuales de toma de datos (incluyendo salarios, desplazamientos, etc.)
- Costes anuales de gestión de datos (incluyendo salarios, gastos de oficina, etc.)

La estimación de los costes anuales para un programa de seguimiento no requiere gran cantidad de conocimiento ni de experiencia, pero conocer los costes unitarios de los diferentes conceptos de gasto con cierta precisión suele llevar tiempo; las mejores estimaciones de los costes unitarios se basan en años de experiencia. Una parte difícil reside en la evaluación de las inversiones anuales dado que dependen de la vida útil estimada para los pozos y el equipamiento, lo cual es a veces arriesgado de prever. Los costes anuales de sustitución se calculan dividiendo la inversión correspondiente a la instalación de los pozos de observación por el número de años estimados para su vida útil.

- Para sondeos de observación bien protegidos, la vida útil puede estar entre 25 y 50 años.

- Si se utiliza equipamiento para la observación, el coste anual por recambios debe calcularse también: la vida útil media está limitada a menudo a 10 ó 15 años.

Para la medida de niveles del agua, los costes anuales que supone utilizar equipos de registro automático deben compararse con los gastos que conllevan los operarios: en muchos países de renta baja la medida de niveles por operarios locales resultará más barata.

Tabla 8.2: Ejemplo de cuadro para calcular los costes anuales de las diferentes alternativas para el programa

Elementos:	Opciones:	Opción 1		Opción 2		Opción 3	
	Coste unitario	Cantidad	Coste Total	Cantidad	Coste Total	Cantidad	Coste total
Coste anual de cambios y reparaciones							
- pozos de observación	x	m1	x	m2	x	m3	x
- estaciones de aforo (si es relevante)	x	n1	x	n2	x	n3	x
- equipos de medida (sondas, registros, etc.)	x	p1	x	p2	x	p3	x
- otros							
Coste anual de toma de datos y de análisis							
- medidas de nivel del manto acuífero *)	x	q1	x	q2	x	q3	x
- toma de muestras de calidad del agua *)	x	r1	x	r2	x	r3	x
- análisis de laboratorio *)	x	s1	x	s2	x	s3	x
- medidas de aforo *)	x	t1	x	t2	x	t3	x
Coste anual de la gestión de datos							
- medidas de nivel del manto acuífero	x	u1	x	u2	x	u3	x
- medidas de la calidad del agua	x	v1	x	v2	x	v3	x
- resultados del laboratorio	x	w1	x	w2	x	w3	x
Coste anual de oficina							
			x		x		x
Costes anuales totales							
			X		Y		Z

*) Los costes unitarios deben incluir la frecuencia en la observación, los gastos de desplazamiento, etc.

Los tipos de cálculo indicados anteriormente pueden hacerse con ayuda de una hoja de cálculo o de algún programa. En IGRAC se puede obtener una versión detallada de una tabla para el cálculo de costes.

8.4 Valoración de las diversas opciones de programa para el seguimiento de las aguas subterráneas

El proceso de toma de decisiones requiere una visión clara del programa de seguimiento elegido, de la puesta en práctica que se espera para él (funciones asignadas y posibles limitaciones), de la inversión y costes anuales implicados, y de las incidencias previsibles en relación con la organización. La tabla 8.3 muestra un ejemplo de cuadro de evaluación para un programa de seguimiento del agua subterránea en cantidad, según las alternativas del Apartado 6.3. La mayor complicación suele residir en cómo describir el desarrollo verosímil del programa; lo menos difícil es indicar qué funciones van a asumirse, en base al tipo y situación de

cada unidad del seguimiento disponible o que se considere. En cualquier caso, resulta más difícil adelantar el desarrollo de la red de vigilancia cuando las alternativas difieren en la cantidad de unidades de seguimiento.

Las técnicas (geo)estadísticas suelen ser de ayuda para cuantificar la precisión de los resultados calculados, al relacionarlos con la densidad de la red o la frecuencia en la observación; por ejemplo, la precisión de un mapa de isolíneas frente a la densidad de la red, o la precisión de las tendencias temporales frente a la frecuencia de las medidas. No obstante, la aplicación de estas técnicas lleva tiempo y requiere además una densidad relativamente alta de datos, lo cual no suele ocurrir al comienzo de un seguimiento de las aguas subterráneas; en este caso, la precisión de la red tendrá que describirse en términos cualitativos (ver diversas descripciones en la Tabla 8.3). Aparte de los costes, la situación institucional puede igualmente ser un argumento que marque la elección entre las diferentes opciones; por lo tanto, será conveniente hacer una lista con estas implicaciones también. Debieran estar claras qué limitaciones en personal, conocimientos o equipos pueden entorpecer el programa de seguimiento; habrá también que estudiar los aspectos de organización cuando sea necesaria la cooperación entre diversas instituciones.

Tabla 8.3: Cuadro-ejemplo de evaluación de diversas opciones para el seguimiento en cantidad del agua subterránea

<i>Opción:</i>	Opción 0	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Observaciones
	(situación actual)				
Temas:					
Propiedades del programa de seguimiento:					
- número de pozos existentes en uso	n0	n1	n2	n3	
- número de sondeos nuevos previstos	-	m1	m2	m3	
- frecuencia de observación (veces/año)	x	x	x	x	
Desarrollo contemplado:					
- control limitado de las tendencias globales	+ / -	+	+	+	
- control del nivel del manto en puntos clave			+	+	
- control del nivel del manto en toda el área				+	
Costes correspondientes:					
- inversión de una vez	-	x	x	x	
- costes medios anuales	x	x	x	x	
Aspectos de organización considerados:					
- Personal		x	x	x	
- Equipos		x	x	x	
- Conocimiento		x	x	x	
- Otros Organismos implicados		?	?	?	

Las alternativas del programa para el seguimiento de la calidad del agua subterránea pueden evaluarse de una forma semejante, si bien es más complicada debido al mayor número de variables. Estas opciones diferirán posiblemente en el alcance del programa (objetivos de seguimiento elegidos y área cubierta) así como en su intensidad (grupos de componentes, frecuencia de las observaciones y densidad de la red de vigilancia).

Definir las alternativas más apropiadas de un programa para hacer su estudio detallado y evaluar su relación coste / beneficio, puede ser una tarea nada sencilla. No obstante, el procedimiento propuesto en esta Guía (Figura 2.2) irá dando una visión cada vez más aproximada de la situación de la calidad de las aguas subterráneas, de los temas clave de esta calidad y de la viabilidad de las diferentes opciones para el programa de su seguimiento.

El diagnóstico preliminar de la situación en que se encuentran las aguas subterráneas (Capítulo 3) debiera señalar a una escala regional las fuentes potenciales de contaminación que las amenazan y los temas clave que requieren la atención del programa de seguimiento. El procedimiento debiera también dar una indicación aproximada en cuanto a la viabilidad económica de las principales metas y funciones del seguimiento. Sobre la base de esta información pueden entonces definirse las prioridades más destacables de dicho programa; sus distintas alternativas, en la fase de su evaluación y selección final, debieran entonces poder limitarse en función de dichas metas prioritarias y diferenciarse únicamente en detalles, los cuales se pueden definir y elaborar con ayuda del Capítulo 7 y utilizando también la información del Capítulo 4. Las opciones se diferenciarán unas de otras posiblemente en la cantidad de subáreas implicadas, en los paquetes de componentes elegidos o en la frecuencia de las observaciones a realizar.

Cuando el estado de la calidad del agua subterránea sea complicado, y el presupuesto disponible limitado, interesa considerar un posible comienzo del programa para el seguimiento de esta calidad que se haga por fases en el tiempo, lo cual permitirá una inversión más gradual.

Resultados que se esperan de este capítulo:

1. Una serie de mapas con el diseño de las distintas opciones de redes del seguimiento que ayuden a evaluar su viabilidad, indicando claramente los sondeos de observación ya existentes y los nuevos. Las alternativas presentadas pueden llevar combinaciones de los componentes relativos a la cantidad y la calidad de las aguas subterráneas.
2. Un documento con a) las inversiones que hay que hacer en la red de seguimiento y b) los costes anuales de su mantenimiento (incluyendo la sustitución de sondeos), de la recogida de datos y de su tratamiento (almacenamiento, procesado y validación).
3. Un esquema para evaluar las diversas alternativas contempladas. En cada una de ellas debe ir una lista concisa con a) la información que se espera conseguir, b) los aspectos institucionales y de organización implicados y c) las inversiones y costes anuales correspondientes.

9 Implementación

En este capítulo se describe de una manera concisa el proceso de implementación, fase a fase, de un programa de referencia para el seguimiento de las aguas subterráneas. El diseño y la puesta en práctica de un programa así representan un trabajo considerable que requiere una buena planificación, unos compromisos claros, una comunicación suficiente que asegure el apoyo de los entes interesados, un libramiento a tiempo de los presupuestos, una mano de obra competente, etc. Se han distinguido cuatro fases, a saber: orientación / inicios, diseño, realización, y obtención y gestión de los datos. Se hace referencia a los capítulos anteriores y a los anejos siempre que es posible.

9.1 Introducción al capítulo

En la práctica, implementar con éxito un programa de seguimiento de las aguas subterráneas depende de muchas condiciones, como son: comenzar con un cometido claramente definido, unos objetivos acordados y una planificación realista, un apoyo seguro por parte de los entes involucrados, unos presupuestos necesarios librados a tiempo, un intercambio de datos y unas actividades comunes convenidos claramente, etc. Estas condiciones no se van a dar por sí mismas, sino que requieren un planteamiento activo. Cuando la situación general es compleja puede interesar aplicar un desarrollo por fases: así se presenta en este capítulo, con un proyecto para un seguimiento relativamente largo y varios entes implicados. El procedimiento seguido puede servir también como guión para aquellas situaciones menos complejas; alguna(s) de sus partes puede(n) dejarse de lado si carece(n) de interés.

El procedimiento que se propone consta de cuatro fases que serán brevemente comentadas, y que son:

- Fase 1: Orientación / inicio;
- Fase 2: Diseño del programa de seguimiento;
- Fase 3: Realización de las mejoras en la red;
- Fase 4: Vigilancia y gestión de datos.

Se describen estas fases de una forma muy concisa, haciendo referencia a los anteriores capítulos de la Guía siempre que es posible.

9.2 Fase 1: Orientación e inicio

Se puede necesitar una fase de orientación e inicio cuando la atribución de la realización de una red de vigilancia es algo esencial y complejo; por ejemplo, cuando hay varios entes implicados cada uno con sus objetivos propios (ministerios, instituciones estatales, organizaciones regionales), cuando la información ha de ser tomada de diversas fuentes (entes gubernamentales, compañías privadas, universidades, etc.), o cuando ha de asegurarse un apoyo internacional.

La fase del inicio cubre una orientación general respecto a los roles, los mandatos, las necesidades de datos y las posibles contribuciones de los entes interesados, así como la disponibilidad de redes (secundarias o específicas) y bases de datos que contengan información sobre las aguas subterráneas o relacionada con ellas. El informe de esta fase inicial puede cubrir los siguientes puntos:

- Términos de referencia / atribución;
- Descripción del inventario y de la orientación a seguir;
- Listado descriptivo de los entes interesados destacables y de sus intereses;
- Línea de actuación concreta para la fase 2;
- Compromiso de las instituciones colaboradoras;
- Propuesta relativa al lugar (o lugares) para la implementación;
- Calendario de actividades y reuniones;
- Estimación del presupuesto y personal requeridos para la fase 2.

9.3 Fase 2: Diseño del programa de seguimiento

La fase 2 es la del diseño y evaluación del programa de seguimiento. No puede dar comienzo hasta tanto no se tenga un compromiso nítido sobre el presupuesto y personal disponibles para el diseño del programa. En el procedimiento para obtener este diseño —descrito en los capítulos 3 a 8 de esta Guía— hay que poner en relieve los puntos clave de decisión, tales como el momento de definir las opciones de diseño. Es el momento de presentar los resultados preliminares y de acordar de una manera firme las actividades posteriores. Para este procedimiento, con dichos hitos decisorios clave, un calendario o esquema de tiempos tentativo puede ser el siguiente:

- Investigación sobre el contexto general (paso 3);
- Convenios relativos a objetivos, alcance, planificación y compromisos;
- Desarrollo de las investigaciones siguientes (pasos 4 a 7);
- Preparación y presentación de los resultados intermedios;
- Acuerdo sobre las opciones a desarrollar;
- Investigación de las opciones y preparación de los resultados (paso 8);
- Acuerdo sobre la opción final;
- Desarrollo de un plan de trabajos concreto para la fase 3;
- Definición del presupuesto y personal requeridos para llevar adelante la fase 3.

9.4 Fase 3: Implementación de las mejoras en el programa de seguimiento

La fase 3 comprende la instalación de nuevos sondeos de observación, la adecuación de los puntos existentes (si es necesaria) y los preparativos relativos a la vigilancia. Estas mejoras pueden llevarse a cabo por partes. Si hay muchos sitios en perspectiva se puede considerar la posibilidad de hacer contratos, con arreglo a un formato establecido. Esta fase comprende las siguientes actividades:

- Planificación de los aspectos operativos para la mejora de la red;
- Salida al campo para elegir los sitios;
- Negociación con los dueños de los sitios;
- Elaboración de los contratos para la ejecución de sondeos nuevos, incluyendo la perforación, la instalación del sondeo, su desarrollo y el acondicionamiento del lugar;
- Elaboración de los contratos para la puesta al día de los puntos de observación existentes, incluyendo reparaciones, limpieza y acondicionamiento del lugar;
- Elaboración de los contratos para la preparación de las estaciones de aforo (sólo si se van a aplicar);
- Control de la perforación, instalación, desarrollo y acondicionamiento de los sondeos de observación nuevos;
- Instalación de los equipos de medida;
- Selección, contratación y formación de los operarios para medir los niveles del agua;
- Administración de los datos particulares de todos los sitios (ver Anejo E).

9.5 Fase 4: Organización del seguimiento y toma de muestras

Un programa para el seguimiento de las aguas subterráneas puede incluir varios tipos de datos (p.ej., niveles del manto, calidad del agua, caudales de base y de manantiales), datos cuya recogida puede ser llevada a cabo por diferentes instituciones o incluso por varias unidades de las mismas. Por ejemplo, la toma de datos de aguas de superficie (datos fundamentales para el estudio de los caudales de base) puede ser tarea que corresponda a un organismo hidrometeorológico, mientras que la toma de niveles en el agua subterránea puede ser responsabilidad de un organismo hidrogeológico; de manera semejante, diversos tipos de datos relativos a la calidad pueden ser tomados por instituciones distintas. Así, las mediciones y los muestreos pueden involucrar a diversos entes, cada uno de ellos con sus objetivos y competencias particulares: una comunicación fluida entre ellos, en cuanto al programa de seguimiento del agua subterránea, será por lo tanto indispensable para asegurar que una eventual combinación de datos permita su interpretación correcta.

Respecto a la medida de la piezometría su organización será a menudo menos compleja, con varias posibilidades. Los niveles pueden ser tomados por grupos de campo pertenecientes al organismo responsable, o por voluntarios del lugar (p.ej. maestros locales), o por una mezcla de los dos. Se puede pensar también en utilizar registros automáticos de nivel, pero ésta será probablemente una solución demasiado cara para unos presupuestos bajos. En el Anejo C se incluye información con mayor detalle relativa a distintos métodos y equipos.

El muestreo para la calidad del agua subterránea, con mediciones en campo, purgado de sondeos, toma de muestras, estabilización y transporte de las mismas, es una actividad mucho más complicada y requiere, en consecuencia, un personal técnico más especializado. También necesita aparatos que se puedan transportar, razón por la cual suele ser realizada principalmente por un equipo de campo dotado con una furgoneta. La frecuencia del muestreo suele ser menor que la de toma de niveles. En el Anejo D se incluye información con mayor detalle relativa a distintos métodos y equipos.

Los datos tendrán que ser analizados (muestras para la calidad), procesados, almacenados y validados. Todo esto requiere una buena planificación y coordinación con los laboratorios. Igualmente puede ser aconsejable el intercambio de datos, de forma que unos puedan ser validados con otros. En el capítulo 10 de esta Guía se presentan algunas indicaciones e información adicional sobre estas actividades.

10 Gestión de los datos: almacenamiento, procesamiento y validación

En este capítulo se describe la gestión de los datos con su almacenamiento, procesamiento, presentación y validación. Este tratamiento es especialmente importante como continuación del seguimiento sistemático del agua subterránea, puesto que mejora el acceso a los datos y su intercambio, la uniformidad en su almacenamiento y procesamiento, y la integridad de los mismos.

- Se comenta y aconseja la aplicación de Formatos Electrónicos de Datos para su procesamiento y almacenamiento;
- Se aportan referencias de herramientas para el manejo y almacenamiento de datos, y de software comercial y de bajo coste, libre de impuestos;
- Se concede una gran atención al proceso de validación de los datos. La descripción que se da cubre procedimientos operativos estándar, certificación de la calidad y control para los análisis de laboratorio. Se añaden unos comentarios en relación con tres niveles para la evaluación de la calidad de los datos, que se ilustran con unos ejemplos.

10.1 Introducción a la organización de los datos

Gestión de los datos es un término amplio que, aplicado a los datos hidrogeológicos, cubre todo su ciclo de vida “de la cuna a la tumba”, lo cual comprende cómo son tratados desde su toma hasta el informe para los entes interesados, así como todos los pasos intermedios que tienen lugar y que incluyen su almacenamiento, procesamiento, análisis y validación.

El propósito de un sistema de gestión de datos consiste en posibilitar un uso efectivo de los mismos, asegurando su integridad y aportando un depósito centralizado para su almacenamiento. Una de las consecuencias principales que conlleva la carencia de uno de estos sistemas reside en que los datos no son plenamente dignos de confianza al no haber pasado por ningún filtro de validación definido y riguroso, pudiéndose además haber incorporado datos erróneos o introducido errores en los existentes.

Ejemplos relativos a incorrecciones en los datos de la calidad son los siguientes:

- El agua es muestreada de forma incorrecta en el campo, de tal manera que se purga demasiado poco volumen previo a la toma.
- Las muestras de agua no se conservan correctamente durante su transporte al laboratorio para su análisis.
- Pasa demasiado tiempo entre la toma de la muestra y la realización de su análisis químico.
- Hay fallos en la calibración de las técnicas e instrumentos analíticos en el laboratorio.

- El receptor de los datos analíticos no realiza una evaluación de la calidad de los mismos.
- Se introducen errores en los datos al ser almacenados con un método cualquiera. Errores típicos son los de transcripción al introducirlos a mano y los de conversión de unidades en las concentraciones químicas que resultan mayores o menores que las esperadas.

Como consecuencia, el producto final en forma de datos o de informe puede verse seriamente comprometido en cuanto a su integridad. En un sistema de gestión de datos el objetivo número uno es prevenir la introducción de datos erróneos en el sistema y mantener su integridad una vez dentro. Este capítulo se centra en las partes específicas de uno de estos sistemas y en cómo esas secciones se acoplan de manera a proporcionar unos datos que puedan ser utilizados eficazmente.

Los aspectos de la gestión de datos que se presenta aquí, son:

- Almacenamiento de los datos
- Procesado de los datos
- Representación de los datos
- Validación de los datos

Mientras que los tres primeros son procesos de tratamiento manual de los datos, la validación es un proceso de garantía de calidad orientado a mejorar la integridad de los datos. La validación de los datos es una actuación de gran importancia en relación con el seguimiento del agua subterránea, dado que asegura la calidad de los paquetes de datos recogidos a través de los programas realizados.

10.2 El almacenamiento de los datos

Formato estándar de los datos

Históricamente, los datos de aguas subterráneas se han venido guardando en formatos típicos tales como estadillos, cuadros de doble entrada y otros tipos de filas y columnas que tienen como resultado un modo ineficiente de almacenamiento. Hay muchas razones por las que este método no conduce a datos fiables, siendo la principal que los datos no puedan ser recuperados, utilizados y comprobados fácilmente. Muy a menudo los datos se encuentran en formatos diversos, con lo cual su uso inmediato es imposible antes de aplicarles algún tipo de normalización.

Esta dificultad puede ser superada adoptando un Formato Electrónico de Datos (FED) consistente, y se aconseja su aplicación por dos razones principales, como son que proporciona una forma para distribuir los datos a sitios muy dispares y que asegura un formato consistente incluso si se interrumpe la relación con el laboratorio o los consultores en medio de una investigación. Un tema clave al elegir un FED adecuado es que su aplicación no encadene al usuario a un sistema de software determinado, sino que le permita cambiar libremente de un sistema a

otro si así lo prefiere. Para formatos electrónicos de datos no comerciales, se pueden encontrar ejemplos en:

- La Asociación de Especialistas en Geotecnia y Geo-ambiente (*Association of Geotechnical and Geo-environmental Specialists*, Reino Unido) www.ags.org.uk
- El Sistema de Inventario de Pozos de Agua (*Water Well Inventory System*, Canadá) <http://www.ene.gov.on.ca/envision/techdocs/4197e.htm>
- La Ley 2886 de la Asamblea de California (*California Assembly Bill 2886*, EEUU) http://www.swrcb.ca.gov/ust/cleanup/electronic_reporting/docs/EDF%201.2i%20Training%20Manual.pdf
- EPA Region 5 (EEUU) <http://www.epa.gov/region5/superfund/edman/index.html>

Tras adoptar un FED, es importante que el usuario tenga activo un “diccionario de datos”. Los diccionarios de datos se aplican con todos los FEDs y son en esencia una tabla de consulta con todos los códigos que se utilizan en el FED; son necesarios para hacer una verificación electrónica de una copia en papel. A los administradores de bancos de datos que vayan a instalar un sistema de gestión de datos en aguas subterráneas, se les aconseja sin lugar a ninguna duda que adopten un FED ya sea entre los indicados arriba o bien otro que se adapte mejor a sus necesidades.

Tipos de datos

Los datos hidrogeológicos brutos son en general datos puntuales, cuya descripción según Kovalevsky, V. S., G. P. Kruseman y K. R. Rushton (2004), es:

“Los datos puntuales son aquellos generados en un punto geográfico específico. En términos hidrogeológicos, estos datos pueden adoptar muchas formas. Ejemplos son:

- *los datos geológicos, como los registrados en un sondeo;*
- *los datos hidrogeológicos, como la profundidad del agua y los caudales extraídos;*
- *los datos de construcción, como entubado, piezómetro, desarrollo del sondeo y costes;*
- *el tipo de equipamiento, como grupo motobomba y aparatos de registro;*
- *los datos de geofísica, incluyendo mediciones en superficie y en sondeo;*
- *las propiedades hidráulicas del acuífero, como transmisividad y almacenamiento;*
- *las medidas de explotación y de nivel piezométrico;*
- *la hidroquímica;*
- *otra información, como la topografía y la escorrentía superficial.*

Aun cuando muchas de estas variables tienen connotaciones espaciales, se refieren en última instancia al punto del cual sale el agua y son, por este motivo, agrupadas como datos del punto de agua. Entre los ejemplos de variables con connotación espacial en la lista anterior se puede indicar los datos geológicos del sondeo, con una dimensión vertical, y la geofísica de superficie que tiene dimensiones horizontal y vertical a la vez.”

Idealmente, toda la información anterior debiera ser almacenada electrónicamente y en un depósito centralizado, de manera que pueda ser procesada posteriormente para preparar su presentación. Sin embargo, guardar todo ello en una base de datos digital exige un esfuerzo considerable que puede no estar al alcance de una primera fase en el estudio de las aguas subterráneas. Si se trata de un presupuesto limitado, se recomienda dar una alta prioridad al alma-

cenamiento de las variables propias del agua (niveles y datos de calidad), porque el volumen de dichos datos va a crecer rápidamente al empezar el seguimiento y además porque así podrá hacerse una validación esencial con el procesado electrónico mucho más rápida y fácilmente.

Manejo de los datos y herramientas para su almacenamiento

En los estudios de agua subterránea en que intervienen cientos de pozos, el número de análisis de laboratorio manejados puede ser enorme. Las copiosas cantidades de datos que se generan en estos estudios se han venido reuniendo históricamente en bases de datos o, peor, en estadi- llos; o, todavía peor, agrupados en su formato original en papel. Estos problemas pueden re- solverse utilizando una estrategia de organización centralizada con los datos relativos al agua subterránea, y es por lo tanto importante aplicar un plan de gestión de los datos durante la eta- pa de planeamiento del proyecto. La proliferación del hardware y software que existe hoy en día, en combinación con la adopción de un FED, hace que este tema sea mucho más sencillo con un almacenamiento centralizado de datos.

Se presentan en esta sección unos ejemplos asequibles de software, para diferentes áreas de aplicación. IGRAC ha desarrollado un banco de datos accesible por Internet (Módulo de Me- ta-información, *Meta information Module*, MiM), que ofrece diversas referencias sobre herramientas de software gratuito o de bajo coste, para el procesado y la representación (ver http://igrac.nitg.tno.nl/ggis_mim.html).

Sistemas operativos

- Ubuntu Linux <http://www.ubuntu.org>
- Mandriva Linux <http://www.mandriva.com>
- Apple (de pago) <http://www.apple.com>
- FreeDOS <http://www.freedos.org>

Bases de datos

- Base <http://www.openoffice.org/product2/base.html>
- MySQL <http://www.mysql.com>
- PostgreSQL <http://www.postgresql.org>
- Access (de pago) <http://office.microsoft.com/en-us/FX010857911033.aspx>

Sistemas de Información Geográfica

- GRASS <http://grass.itc.it>
- ArcView (de pago) <http://www.esri.com>

Sistemas Integrados para la Gestión de Datos

- Terrabase <http://www.terrabase.com>
- MonitorPro <http://www.monitor-pro.co.uk>
- Enfos <http://www.enfos.com>
- GIS Key <http://www.giskey.com>
- Equis <http://www.eathsoft.com>
- Geotech <http://www.geotech.com>

10.3 Procesado de los datos

El procesado de datos es el mecanismo mediante el cual se transforman los datos puntuales (Apartado 9.1.2) en información espacial, en series temporales o en estadísticas. Esta tarea está normalmente reservada a, y llevada a la práctica por, el hidrólogo o el hidrogeólogo. Ejemplos de información espacial son:

- Mapas hidrogeológicos (UNESCO, 1983).
- Perfil hidrogeológico.
- Isolíneas del manto acuífero.
- Profundidad de la interfase agua dulce / agua salada.
- Mapas de distribución hidroquímica (Hem, 1992)

El procesado de los datos permitirá interpretar el recurso agua subterránea. Se comentan a continuación unos ejemplos de tipos de procesado aplicables a una base de datos.

Niveles del agua subterránea

Los datos relativos al nivel del agua subterránea se presentan normalmente mediante mapas de isolíneas (imagen espacial) o con hidrogramas (series temporales).

Mapas de isolíneas de nivel (isopiezas) en las aguas subterráneas

Estos mapas presentan la altura del nivel del agua respecto a un nivel de referencia, generalmente el nivel del mar. Pueden corresponder a una fecha determinada o indicar el valor medio a lo largo de un periodo de tiempo, y también mostrar los niveles del manto acuífero o bien la profundidad a la que éste se encuentra. Las medidas de nivel deben ser llevadas al mapa para cada sondeo señalado y de forma separada para cada una de las diversas unidades hidrogeológicas. La fecha o el periodo de tiempo correspondiente a las medidas, debe quedar reseñado en el mapa.

Para marcar las líneas de igual potencial, los puntos se pueden unir a mano o bien mediante un programa de trazado. A este propósito, se deberá tener un especial cuidado en unir solamente medidas de la misma fecha o periodo de tiempo y correspondientes a la misma unidad hidrogeológica, para evitar resultados equivocados. No es aceptable utilizar programas para el trazado automático de isolíneas si no se presta la debida atención a los rasgos geológicos que puedan influir sobre el régimen del flujo subterráneo: los paquetes informáticos para ese trazado no “entienden” de ríos, discontinuidades, y barreras diversas ante el flujo del agua subterránea, lo cual puede afectar a la configuración de las isolíneas en el acuífero. La dirección del flujo subterráneo puede indicarse trazando líneas perpendiculares a las isopiezas; el sentido del flujo va de la altura más alta a la más baja y esto se puede indicar mediante unas flechas. Una aplicación de estos mapas de isopiezas es la supervisión visual de los datos de nivel representados: ubicaciones o valores incorrectos van a saltar a la vista en el mapa, facilitando su localización y corrección (ver el apartado 9.4).

Hidrogramas

Los hidrogramas relativos al nivel del agua subterránea muestran la variación del nivel piezométrico a lo largo del tiempo para un sitio en particular (punto de medida). Constituyen un

componente fundamental del estudio hidrogeológico ya que proporcionan un medio para relacionar la incidencia que tienen las influencias naturales y humanas sobre el recurso agua subterránea. En estos estudios una práctica común reside en representar también la precipitación sobre los mismos ejes, a efectos de dar una observación visual de la respuesta que tiene este recurso ante este evento. Otros datos suplementarios, tales como los caudales extraídos, pueden también ser de utilidad a la hora de interpretar los hidrogramas del agua subterránea en relación con la potencial influencia antrópica sobre el medio ambiente. Los hidrogramas juegan igualmente un papel esencial en la validación de los datos de niveles en el acuífero (ver el apartado 10.5).

Química del agua subterránea

Los diagramas de la calidad del agua se elaboran para averiguar el tipo de agua de que se trata. La evaluación y clasificación de los tipos de agua es un componente clave para comprender la hidrogeología de una región y no debieran soslayarse. Como mínimo, se recomienda que se haga una representación gráfica de los componentes químicos principales mediante diagramas interpretativos tales como los de Piper, de Durov expandido o de Stiff: estas figuras pueden ayudar a caracterizar el agua subterránea y a ilustrar los cambios de facies hidroquímica. Al estudiar la química del agua debe tenerse cuidado en utilizar los resultados analíticos de muestras tomadas aproximadamente en la misma fecha, dado el carácter temporal de las características del agua: una muestra de agua tomada en un medio no árido va a mostrar seguramente unas características distintas si se toma al final del verano que si se hace durante la época de lluvias.

10.4 Presentación de los datos y de los resultados

La manera en que se presentan los datos y su disponibilidad para el público (a menudo llamado acceso a los datos) constituyen uno de los resultados finales del sistema de gestión de datos de un acuífero. Esta fase podría incluso considerarse la componente más importante de todo el sistema, porque es a través de la distribución de estos informes cómo se fomenta la conciencia de los asuntos relacionados con las aguas subterráneas. La disponibilidad y accesibilidad de los informes posibilita su amplia distribución a los entes interesados, ya sea al público mediante publicaciones tales como los informes de calidad, a la Administración para aclarar asuntos tales como el consumo del agua y los temas de contaminación, o a los organismos de investigación y a las universidades. La divulgación de los datos favorece también la toma de conciencia de los aspectos políticos y de investigación, por todo lo cual esta distribución de los datos debe verse como un proceso esencial.

Existen dos tipos fundamentales de informe sobre las aguas subterráneas: el informe que presenta los datos y el que los interpreta. En este apartado se describen los componentes nucleares de cada uno de estos tipos de informe.

Informes de presentación de datos

Tal y como su nombre indica, un informe de presentación de datos transmite pura y simplemente los datos (validados) sin interpretación alguna. Su propósito consiste en distribuir los datos a las partes que están interesadas en ellos, y generalmente contienen representaciones de los mismos en tablas y gráficos. El uso particular del informe y su audiencia determinan su periodicidad, información, detalle y contenido de la publicación; por ejemplo, un informe relativo a la construcción de un sondeo será un informe único, preparado para un cliente con los detalles del método y ejecución de la obra, y los datos relativos a:

- Identificación
- Localización
- Método de perforación
- Profundidad total
- Diámetro de perforación
- Tipo de tubería
- Diámetro de la tubería
- Tipo de rejilla
- Tamaño de ranuras
- Intervalos entre rejillas
- Material del relleno filtrante
- Intervalos con material filtrante

En contraposición con este informe de edición única, la normativa vigente puede exigir la elaboración de otros a remitir periódicamente, como son los informes anuales de las medidas de nivel del manto acuífero o los informes trimestrales sobre la calidad del agua subterránea. Estos últimos llevarán series de datos temporales, lo cual no ocurrirá en el ejemplo primero.

Como se ve, el contenido de un informe de datos varía según los casos, pero los datos que generalmente se presentan suelen pertenecer a alguno de los tipos siguientes:

- Datos del agua subterránea (niveles y/o química)
- Datos de manantiales (niveles, descargas y/o química)
- Datos de aguas superficiales (niveles, descargas y/o química)

Conviene tener en cuenta ciertas reglas básicas para la presentación de datos en cuadros y gráficos, como son:

- Que sean claros, concisos y legibles;
- Comprobar que se presentan únicamente datos relevantes;
- Asegurarse de que los necesarios encabezamientos, títulos, leyendas y notas van incluidos, para facilitar la comprensión de los datos.

Informes de interpretación de datos

Un informe de interpretación de datos pretende ayudar a comprender conceptualmente la hidrogeología y la evolución de la calidad del agua subterránea y utiliza el de presentación como base para ello. Igual que ocurre con los anteriores, tampoco en un informe de interpretación viene fijado su contenido a priori; probablemente vendrá determinado por los requisitos del cliente y por los estándares legales y administrativos, así como por los propios del organismo que prepara el informe. Si bien para un informe de interpretación hay una amplia gama de tipos y contenidos, es importante seguir ciertos protocolos en el análisis de los datos y en las fases de modelización; de entre los más generales se indican algunos a continuación.

Respecto al contenido, el informe debe describir:

- El propósito y el alcance del informe;
- Los paquetes de datos utilizados (lugar, periodos de tiempo, etc.);
- Los métodos seguidos para condensar e interpretar los datos;
- Los modelos o fórmulas utilizados y su propósito, limitaciones y ajustes;
- Los resultados obtenidos;
- Las conclusiones y recomendaciones

Respecto a la presentación en tablas y gráficos, el informe debe:

- Ser claro, conciso y legible;
- Comprobar que se presentan únicamente datos relevantes;
- Adjuntar los encabezamientos, títulos, leyendas y notas necesarios para facilitar la comprensión de los datos.

Distribución y accesibilidad de los datos e informes

La distribución de los datos del agua subterránea a los tomadores de decisiones, al público y a otros entes interesados, es vital para el éxito de un programa de seguimiento. Mediante el desarrollo de la habilidad en la comunicación de esta información relativa al acuífero a una audiencia tal, se puede conseguir lo siguiente:

- Las deficiencias de datos y programas pueden ser identificadas y las medidas para su consideración puestas en marcha;
- La transparencia y la seriedad en el trabajo quedan patentes;
- Un ambiente para compartir se ve así favorecido; y
- Un compromiso con las metas del trabajo resulta palpable.

10.5 Validación de los datos

La validación constituye un proceso integrado dentro de la estrategia para gestionar los datos del agua subterránea; su propósito reside en asegurar la integridad de los datos y la ausencia de errores durante su transcripción, depuración, almacenamiento y posterior uso. Esta validación se lleva a cabo en varias etapas, dentro del proceso de gestión total. En este apartado se describen algunos de los aspectos que deben aplicarse como parte de la estrategia de gestión de los datos del acuífero. Más información sobre este tema se puede encontrar en Uil et al. (1999) y en UN/ECE (2000).

1. Procedimientos operativos estándar

Los Procedimientos Operativos Estándar (POEs) son unos informes o manuales donde se describen en detalle los protocolos para la toma y el análisis de los datos. Su propósito es mejorar la recogida de datos y su calidad aplicando uniformidad, consistencia y completión a los paquetes de datos. Los protocolos van a permitir al personal técnico comprender el trabajo que tienen asignado y seguir las pautas que se proponen, asegurando que se realiza un tratamiento completo y total. Los POEs deben establecerse en el principio de una investigación para pre-

cisar que los trabajos se harán con arreglo a un estándar consistente y defendible científicamente. Unos ejemplos de grupos de estándares y un caso particular, son los siguientes:

- American Society of Testing and Materials International (ASTM)
<http://www.astm.org/cgi-bin/SoftCart.exe/index.shtml?E+mystore>
ASTM D5092 = Procedimiento Estándar para el Diseño e Instalación de Pozos de Observación en Aguas Subterráneas.
- BSI British Standards (BSI) <http://www.bsi-global.com/index.xalter>
BSI 1377 – Métodos de Pruebas en Suelos para Trabajos de Ingeniería Civil

2. *Recogida de datos en campo*

Se deben seguir ciertos pasos en el campo para estar seguro de que la información hidrogeológica básica ha sido tomada. Un método corriente para ello consiste en asegurarse de que las hojas de campo tienen campos obligatorios a rellenar. Para un operario encargado de tomar niveles piezométricos, esta información obligatoria debe incluir:

- Identificación del pozo.
- Fecha y hora de la medición.
- Profundidad hasta el agua.
- Profundidad hasta el fondo del sondeo.
- Tiempo que lleva sin bombear (para pozos en activo).
- Condiciones climáticas.

Para un operario que toma muestras de agua en campo para calidad, la información adicional necesaria será:

- Tiempo de bombeo previo a la toma en la instalación.
- Tiempo de purgado en la bomba de muestreo.
-

Otros campos, opcionales, incluyen Observaciones donde el operario puede hacer anotaciones tales como deterioros en la instalación o dificultades en el acceso.

Además de asegurar la recogida de los elementos específicos en los datos, es conveniente que el centro donde se depositan (base de datos o SIG) tenga unos campos obligatorios que verifiquen los correspondientes a las hojas de campo: cumpliendo con estos requisitos mínimos, los datos no pueden ser volcados en el sistema si no están completos. Otro paso básico para mantener la integridad de los datos reside en que las notas de campo que se tomen sean sucintas y claras, y adecuadamente archivadas.

3. *Garantía y control de la calidad en el laboratorio (QA/QC)*

Los procedimientos de QA/QC en el laboratorio conllevan el proceso de pasar una serie de pruebas de comprobación con los datos para garantizar su coherencia. Esta labor corresponde hacerla al laboratorio de análisis y debe incluir lo siguiente:

1. ¿Cumplen los datos con los valores límite relativos al trabajo?

2. ¿Se corresponden los identificadores de las muestras con los enviados al laboratorio?
3. ¿Se encuentran los métodos analíticos entre los inventariados?
4. ¿Se han consignado todas las determinaciones solicitadas para cada una de las muestras?
5. ¿Se ajustan los resultados unitarios a la matriz de la muestra?
6. ¿Se ha utilizado algún método adicional?
7. ¿Son correctos los identificadores de las determinaciones?
8. ¿Son aceptables los valores límite utilizados y los umbrales de detección, así como los resultados?
9. ¿Cumplen los resultados con los requisitos impuestos?

Hay unos pasos específicos que puede dar el Especialista para complementar estas pruebas hechas por el laboratorio, que se indican a continuación:

- Las Instrucciones relativas a las Muestras (IrM), o instrucciones para el laboratorio relativas a los análisis de las muestras tomadas, deben ser revisadas para asegurar su totalidad, precisión y comprensión, no más tarde de un día después de haber hecho el envío al laboratorio.
- Cualquier error o ajuste en las IrM ha de ser inmediatamente modificado y el laboratorio informado al respecto.
- La persona encargada de la relación con el laboratorio debe contactarlo al menos una vez antes de finalizar el plazo convenido, para garantizar que el trabajo se está llevando según lo establecido.
- A la recepción de los datos del laboratorio, éstos deben revisarse para asegurar que el laboratorio ha aplicado toda la información recogida en las IrM.
- Los datos del laboratorio deben recibirse en el formato electrónico prescrito.
- La persona encargada debe revisar el QA/QC relativo a los datos del laboratorio, para garantizar que se ha cumplido con todos los protocolos de precisión, integridad y exactitud.
- Posiblemente, la prueba más importante a realizar sea comparar el FED con la copia en papel de los datos recibidos del laboratorio.
- Si hay alguna razón para dudar de los resultados del laboratorio, se repetirán (algunos de) los análisis en otro laboratorio.

4. Evaluación de la calidad de los datos

La evaluación de la calidad de los datos puede dividirse en tres categorías, que constituyen unas pruebas que hace el Especialista más allá de cualquier otra verificación que puedan realizar internamente los laboratorios.

4a. Validación de primer grado

Este tipo de validación puede hacerse mediante una inspección visual de los datos y su finalidad es detectar errores. En el caso de datos relativos al nivel del manto acuífero, unos ejemplos son:

- Un registro de la profundidad del agua mayor que la profundidad del pozo.
- Errores debidos a una lectura equivocada (errores de lectura de 0,5 ó 1,0 metro).
- Errores debidos a un cambio en la altura del punto de medida.

- Errores debidos a asignar la medida del nivel de agua a un sondeo o rejilla equivocado.

La inspección visual identifica normalmente valores sospechosos del nivel de agua que únicamente pueden ser confirmados como erróneos por comparación con otras medidas de nivel que hayan sido tomadas en la misma zona y al mismo tiempo.

En la *Figura 10.1* se ofrece otro ejemplo de valores equivocados.

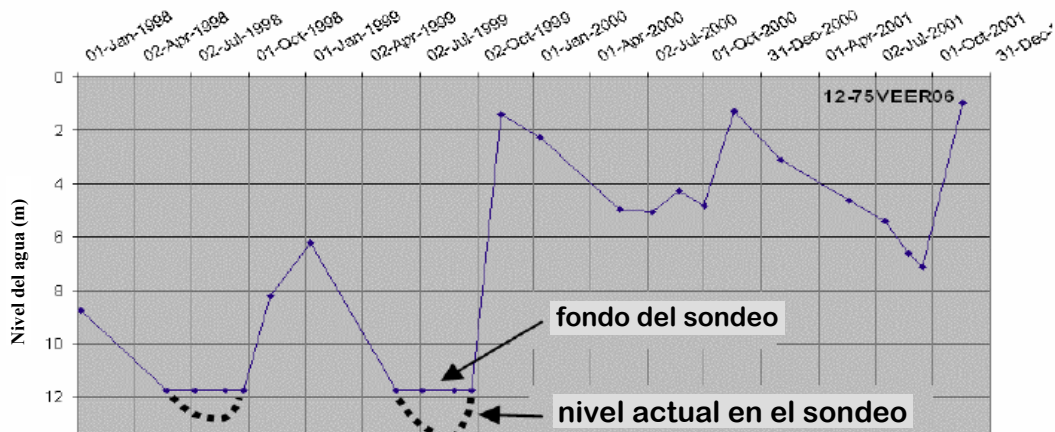


Figura 10.1: Hidrograma de un pozo, seco en ocasiones

Un ejemplo de datos malinterpretados, relativos al nivel de agua, se presenta en la Figura 10.1. Los datos que se muestran en este gráfico son incorrectos para los periodos marcados de 1998 y de 1999, dado que el pozo estaba seco: la manera correcta de presentarlos es añadiendo una nota a la figura, indicando que el pozo estaba seco y que el verdadero nivel del agua se desconoce.

Corregir las medidas dudosas identificadas no resulta inmediato de por sí. El problema siempre es: ¿Cuál era el valor correcto? Consecuentemente, sólo se deben modificar estas medidas si se puede determinar sus valores correctos sin lugar a dudas; en los demás casos el valor hallado debe ir codificado o etiquetado como “valor dudoso”.

En lo concerniente a los datos de *calidad del agua subterránea* se pueden aplicar unas pruebas específicas, más allá de los pasos descritos para determinar la integridad de los datos que vienen del laboratorio. La omisión de estas pruebas puede llevar a otro tipo de interpretación incorrecta de dichos datos. Las pruebas, básicas, que se presentan a continuación utilizan el sentido común en la evaluación.

- Al ser el agua neutra eléctricamente, la relación entre aniones y cationes (en meq/L) tiene que ser la unidad. Como esto no suele ocurrir, se acepta un margen del 5 % en la mayoría de los casos. Un balance iónico igual a 1 no significa necesariamente que el análisis sea exacto; es posible que haya más de un error y que se compensen unos con otros.
- Asegurarse que todos los iones mayoritarios han sido analizados; la falta de uno de ellos va a incidir en una relación aniones / cationes anómala.
- El valor numérico del Total de Sólidos Disueltos (mg/L) va a ser generalmente del orden del 70 % de la Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) (ver Hem, 1992).

- Relación Na a Cl: en las aguas predominantemente sódicas la mayor parte del Na está normalmente asociada con el Cl, por lo cual la relación entre Na y Cl (en meq/L) debe mantenerse entre 0,8 y 1,2.
- Relación CE a TSD: en las aguas dulces su Conductividad (CE, en $\mu\text{mhos/cm}$) y su Total de Sólidos Disueltos (TSD, en mg/L) normalmente siguen la regla: $\text{TSD} = A \times \text{CE}$, donde "A" es una constante para cada tipo de agua que varía entre 0,55 y 0,9 siendo normalmente alta para las aguas cloruradas y baja para las sulfatadas.
- Relación DQO a DBO: los valores obtenidos en un agua para su DQO deben ser siempre mayores que los correspondientes a su DBO.
- Relación Carbonatos a pH: para valores de pH por debajo de 8,3 la alcalinidad del $\text{CO}_3^{=}$ (alcalinidad a la fenolftaleína) debe ser nula.

4b. Validación de segundo grado

Este grado de validación utiliza ciertas técnicas para indicar los valores de la desviación; sus resultados deben ser juzgados con conocimiento del régimen hidrogeológico que se está estudiando. El propósito de esta acción reside en determinar si los valores seleccionados son errores o valores extremos naturales. Existen sencillos métodos estadísticos disponibles, para comprobar si los valores que son aparentemente erróneos lo son también estadísticamente. Unos ejemplos de pasos en la validación para medidas de niveles piezométricos, son:

- Utilizar los mapas de piezometría (isopiezas) para una fecha o periodo determinado, a efectos de localizar casos anómalos, los cuales destacan por tener una gran concentración de líneas alrededor del pozo en cuestión. Los valores que originan estas supuestas discrepancias en los mapas de isopiezas regionales, debieran ser comprobados otra vez y posiblemente resulten equivocados.
- Al preparar gráficos de varios hidrogramas con series temporales y al inspeccionarlos visualmente, se pueden detectar errores en las medidas. La comparación de hidrogramas va a mostrar normalmente tendencias y fluctuaciones semejantes, y si no es así puede ocurrir que haya errores en las medidas de piezometría.
- Existen algunos métodos estadísticos sencillos para comprobar las medidas de los niveles, p.ej. la desviación de la media o de la mediana. Se pueden repasar las series de datos que difieran en más de tres veces la desviación media del valor medio o de la mediana.

Para validar las medidas de la calidad del agua subterránea, los diagramas especiales como el de Piper o el de Stiff pueden detectar valores desviados. Unas condiciones extremas en la calidad del agua pueden venir señaladas por unos puntos anómalos en un diagrama de Piper, o por unos contornos desviados en un diagrama de Stiff. No obstante, unos resultados así también pueden estar indicando valores erróneos en los componentes manejados, por ejemplo en el caso de que la concentración de un elemento se haya deducido a partir de fijar un equilibrio iónico en un cierto valor.

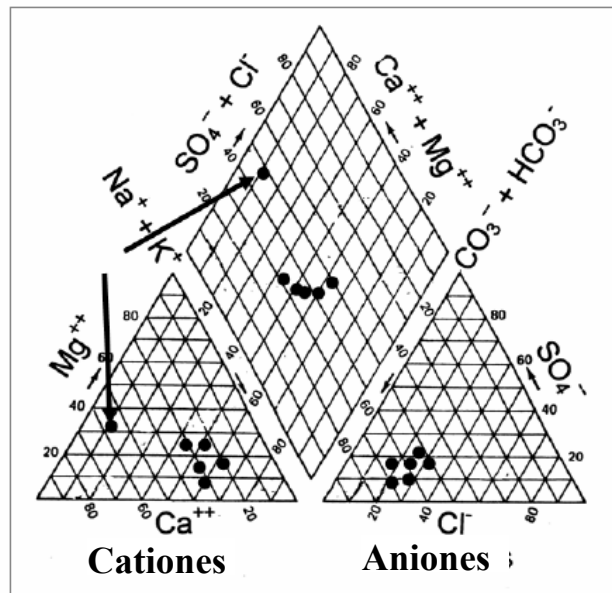


Figura 10.2: Diagrama de Piper con valores anómalos

4c. Validación de tercer grado

Este tercer tipo de validación aplica técnicas avanzadas para analizar y validar datos espaciales y temporales, incluyendo por ejemplo estadística avanzada y estudios comparativos de distintos tipos de datos. Los métodos de estadística avanzada pueden utilizarse para detectar los valores anómalos: se han desarrollado técnicas de detección de tendencias estadísticas paramétricas y no-paramétricas para series temporales, a efectos de disponer de estimaciones más probables para los cambios en el nivel del agua a lo largo del tiempo y para los correspondientes intervalos de confianza; la determinación de los puntos anómalos conlleva comparar estas estimaciones con los valores medidos. Helsel y Hirsch (1995) describen varias pruebas de tendencias, con aplicación en el estudio de los recursos de agua.

Errores comunes durante el procesado y la presentación de los datos

En la tabla que sigue se lista una serie de errores que ocurren con cierta frecuencia, así como la manera de prevenirlos y evitarlos.

Tabla 10.1: Errores frecuentes; detección y soluciones

Error en potencia	Etapa de trabajo	Detección y soluciones
Datos del nivel de agua erróneos	Recogida de datos en campo	<ul style="list-style-type: none"> • El técnico de campo debiera tener consigo, en las salidas, un hidrograma con los datos más actualizados. Después de tomar la medida, debiera poder marcarla sobre el hidrograma y comprobar que responde a la expectativa estacional esperada.
Datos equivocados para el flujo de manantiales / cursos de agua superficial	Recogida de datos en campo	<ul style="list-style-type: none"> • El técnico de campo debe poder tomar más de una medida (p.ej., 3) y anotar su valor medio, con una tolerancia previa entre medidas. • El técnico de campo debiera tener consigo un gráfico de flujo de las surgencias / cursos superficiales, con los datos más actualizados, para comprobar que la medida recién tomada se corresponde con la expectativa estacional del gráfico.
Resultados analíticos inusualmente altos o bajos	Depuración de datos	<p>Comprobar las posibilidades siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Problemas en la conversión de unidades durante la transferencia de los datos. • Cambios en los valores límite de detección del laboratorio. • Cambio de laboratorio. • Cambio en el método analítico. • No se siguieron protocolos de purgado y muestreo adecuados.
Mapas de isopiezas con formas extrañas	Interpretación de los datos	<ul style="list-style-type: none"> • Comprobar que todos los pozos medidos corresponden al mismo acuífero. • Estudiar el calendario de las extracciones en la zona.



Centro Internacional de Estudios en Recursos de Aguas Subterráneas
International Groundwater Resources Assessment Centre

una iniciativa de



Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO)



Organización Meteorológica Mundial (OMM)
World Meteorological Organization (WMO)

patrocinada por



Gobierno de Holanda
Government of The Netherlands

desarrollada por



Instituto de Geociencia Aplicada de Holanda – Servicio Geológico Nacional
Netherlands Institute of Applied Geoscience TNO - National Geological Survey

traducida al español por



Instituto Geológico y Minero de España (IGME)
Spanish Geological Survey

Para más información contactar con:

IGRAC

P.O. Box 80015
3508 TA Utrecht
Holanda

teléfono: +31 30 256 42 70
fax: +31 30 256 47 55
e-mail: info@igrac.nl
internet: <http://www.igrac.nl>

IGME

Ríos Rosas, 23
28003 Madrid
España

teléfono: +xx xx 91 349 57 28
fax: +xx xx 91 349 57 42
correo-e: xxxxx@igme.es
internet: <http://www.igme.es>

Referencias y bibliografía relacionada

- Bear, J and A. Verruijt (1987): Modeling Groundwater Flow and Pollution. D. Reidel Publishing Company, A Member of the Kluwer Academic Publishers Group. Dordrecht. Holland.
- Bogdanovic, S. (2001): International law of water resources : contribution of the International Law Association (1954-2000), The Hague. – Kluwer Law International, International and national water law and policy series. Dordrecht. The Netherlands.
- Broers, H.P. (2002). Strategies for regional groundwater quality monitoring. Geographical Studies 306. ISBN 90-6809-342-8. Utrecht, The Netherlands
- Burchi, S. (1999): National Regulations for Groundwater: Options, Issues and Best Practices. – In: WORLDBANK: Groundwater: Legal and Policy Perspectives, Technical Paper 456, 262 p.; Washington. USA.
- Caponera, D.A. (1992): Principles of Water Law and Administration – National and International. 279 p. Balkema. Rotterdam.
- Davis, Stanley N. and Roger J.M. DeWiest (1996): Hydrogeology. ISBN 0 471 19900 1, John Wiley and Sons. New York. USA.
- El Nasser, H. & Macoun, A. (1999): Groundwater Resources Management in Jordan: Policy and Regulatory Issues. – In: WORLDBANK: Groundwater – Legal and Policy Perspectives, Technical Paper No. 456, 105-115; Washington. USA.
- Engelen, G.B. (1981). A systems approach to groundwater quality – methodological aspects. The Science of the Total Environment 21, pp 1-15.
- Environmental Agency (2002). Development of a Methodology for Selection of Determinand Suites and Sampling Frequency for Groundwater Quality Monitoring. National Groundwater and Contaminated Land Centre Project NC/00/35. ISBN 1857 05864X. Environmental Agency, Almondsbury, UK.
- EPA (1987): Handbook - Ground Water. EPA/625/6-87/016. Office of Research and Development. Cincinnati, Ohio, USA.
- EU (2000). EU Water Framework Directive. Official Journal L 327 , 22/12/2000, P1 - P73
- Freeze, R. Alan and John A. Cherry (1979): Groundwater. Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J., USA.
- Helsel, D.R. and Hirsch, R.M., 1995. Statistical methods in water resources. Studies in Environmental Science 49. USGS, Elsevier, page 529.
- Hem, John (1992). Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. United States Geological Survey Water-Supply Paper 2254.
- Hildering, A. (2004): International Law, Sustainable Development and Water Management. – 226 p; Delft/The Netherlands (Eburon Publishers).

Hilderling, A. (2004): International Law, Sustainable Development and Water Management. – 226 p.; Delft/The Netherlands (Eburon Publishers).

International Law Association (2004): Water Resources Law – Berlin Conference 2004. – 55 p.; Berlin.

Jousma G. and F.J. Roelofsens (2004), World-wide inventory on groundwater monitoring, IGRAC, Report nr. GP 2004-1

Kovalevsky, V. S., G. P. Kruseman and K. R. Rushton (2004). An International Guide for Hydrogeological Investigations CH4, IHP-VI, SERIES ON GROUNDWATER NO.3

MWI (1998): Groundwater Management Policy. – In: WORLDBANK (1999): Groundwater – Legal and Policy Perspectives, Technical Paper No. 456, 207-218; Washington.

MWI (2003): Jordan' Water Strategy and Policies. – Ministry of Water and Irrigation, 68 p.; Amman.

Uil, H., F.C. van Geer, J.C. Gehrels, F.H. Kloosterman (1999), State of the art on monitoring and assessment of groundwaters, ISBN 9036952778, Netherlands Institute of Applied Geoscience TNO

UN/ECE Task Force on Monitoring and Assessment (1999). Inventory of transboundary groundwaters. Problem-oriented approach and the use of indicators; Application of models; State of the art on monitoring and assessment of groundwaters (four volumes). Lelystad, September 1999.

UN/ECE Task Force on Monitoring and Assessment (1999). Guidelines on Monitoring and Assessment of Transboundary Groundwaters, Lelystad, March 2000. ISBN 9036953154.

UN/ECE (2000), Guidelines on Monitoring and Assessment of Transboundary Groundwaters, ISBN 9036953154 (UN/ECE Task Force on Monitoring & Assessment)

UNESCO (1983). International Legend for Hydrogeological Maps. Revised edition, UNESCO, Paris. Van Lanen, Henny A.J. (1998), Monitoring for Groundwater Management in (Semi-) Arid Regions. UNESCO. ISBN 92-3-103579-7. Studies and Reports in Hydrology, 57

WMO (1994): Guide to hydrological practices. Fifth edition. WMO No.168.

WORLDBANK (1999): Groundwater: Legal and Policy Perspectives. – Technical Paper 456, 262 p.; Washington.

La versión en español de las principales Normas se puede encontrar en la Asociación Española de Normalización y Certificación (www.AENOR.es).

Anejo A: Seguimiento del agua subterránea en diferentes contextos hidrogeológicos

Énfasis en el seguimiento para diferentes tipos de acuíferos

Existe una relación estrecha entre el tipo (o los tipos) de acuífero que predomina(n) en una zona, y las posibilidades y énfasis en el seguimiento de los diversos componentes del sistema subterráneo. El tipo de acuífero, su geometría y sus características, son factores principales que van a determinar la eficiencia de las redes de seguimiento y la selección de los parámetros de control.

La descripción siguiente ha sido en parte adoptada del *UNESCO Studies and reports in Hydrology 57*.

La Tabla A-1 –tomada del “*Monitoring for groundwater management in (semi-)arid regions*”; *Unesco: Studies and reports in hydrology 57*— muestra la relación entre la intensidad dentro del seguimiento del agua subterránea y el tipo de acuífero considerado.

Tabla A-1: Prioridad de las variables para el seguimiento del agua subterránea en diversos sistemas hidrogeológicos

Régimen dominante	Sistema hidrogeológico						
	No consolidado			Cuencas sedimentarias		Volcánico	Basamento complejo
	Cauces aluviales	Llanuras aluviales	Dunas	Areniscas	Calizas		
	L, P	L-C, P	L, P	L-C, F-P	L-C, F	SC-C, F	L-SC, F
Variable:							
Nivel piezométrico	A	A	M	M	A	A	A
Extracción	A	A	A	B	M	M	A
Manantiales	B	B	B	M	A	A	B
Pérdidas por evaporación	B	A	M	M	M	B	M
Flujo de superficie	A	A	B	M	A	A	A
Meteorología	M	M	M	M	M	M	A
Humedad del suelo	B	M	A	B	B	B	M-B
Coste de la red	B	M-A	B	M-A	M-B	M	B

Notas: A: alta prioridad L: libre F: flujo por materiales fisurados predominantemente
M: media prioridad SC: semicautivo P: flujo por materiales porosos predominantemente
B: baja prioridad C: cautivo

Seguimiento en cantidad de las aguas subterráneas – Materiales no consolidados

Los acuíferos aluviales son a menudo la fuente de agua normalmente más explotada para el abastecimiento en muchas regiones debido a su alta permeabilidad, a su recarga más frecuente, a su accesibilidad y a su relación con suelos aptos para el cultivo.

Estos sistemas aluviales pueden subdividirse en dos grandes tipos: las ramblas (habitualmente en zonas de relieve pronunciado), y las llanuras aluviales (cuencas al pie de los frentes montañosos formadas a partir de abanicos aluviales coalescentes y depósitos de llanura).

Las ramblas.

En las regiones áridas y semi-áridas, los ríos fluyen en gran parte sólo como respuesta a precipitaciones intensas, ocasionales y breves, a pesar de lo cual suelen ser la mayor fuente de recarga. La infiltración viene determinada principalmente por las características del cauce y del caudal (volumen, velocidad y duración) y en menor grado por la profundidad del manto acuífero. Se ha llevado a cabo un cierto número de estudios sobre las pérdidas de agua a lo largo de sistemas de rambla en áreas de captación (eventual) representativas, como se ha hecho en Arabia Saudita (p.ej. Abdulrazzak et al., 1989; Sorman & Abdulrazzak, 1993) o en Siria (Khouri, 1982).

Las llanuras aluviales.

Las llanuras aluviales en zonas de clima árido y semiárido han sido objeto de estudio en muchas partes del mundo, como en el suroeste de EEUU. Su recarga deriva principalmente de la escorrentía procedente de zonas colindantes más altas. En general, la mayoría de la recarga suele darse en la parte superior de la llanura, mientras que la mayoría de las extracciones ocurren en la parte central de la misma, a menudo muy cerca de los cauces fluviales. La descarga tiene lugar por evaporación del agua subterránea somera (lagunas salobres), por evapotranspiración de la vegetación alrededor de estas lagunas, y por flujo subterráneo en áreas de costa.

Frecuentemente, la escorrentía de la lluvia caída en la zona alta recarga la llanura aluvial, en la que suele llover menos, de donde se deriva posteriormente la descarga en el borde de costa o en playas y sabkhas (lagunas salobres).

En consecuencia, se recomienda que cada área de captación (eventual) importante sea tratada, a efectos de la gestión del agua, como una unidad hidrológica en sí, cuya extensión vaya desde la zona de alimentación principal de montaña hasta la línea de costa. Las prioridades en el seguimiento debieran centrarse en los datos necesarios para los estudios del balance de agua subterránea, en particular al borde de las ramblas que es donde se produce la mayor recarga.

Las llanuras aluviales en zonas de clima templado o húmedo contienen a menudo acuíferos muy productivos e intensamente explotados. En estas zonas, las redes de pozos de observación tienen una gran importancia en la gestión de los recursos subterráneos; la vigilancia del agua subterránea en la parte baja, con niveles piezométricos someros, está con frecuencia orientada a controlar el delicado equilibrio entre las extracciones y otras aplicaciones del agua (p.ej. agricultura, medio ambiente, etc.).

Arenas eólicas.

Estos depósitos eólicos, si bien de amplia extensión en regiones áridas, suelen tener una importancia limitada en el abastecimiento de agua: aun cuando su porosidad es grande, la mayor parte del agua de lluvia infiltrada tiende a quedar retenida en los primeros metros del terreno,

perdiéndose por evaporación. Estudios sobre la recarga llevados a cabo en India, Israel, Arabia Saudita, Túnez, Botswana y Nuevo Méjico, muestran que el mecanismo dominante en las áreas de dunas es la recarga directa. En estos casos el seguimiento debiera centrarse en los datos meteorológicos y en la medición de la humedad del suelo, junto con los datos de variación del nivel piezométrico.

Seguimiento del agua subterránea en cantidad – Cuencas sedimentarias consolidadas

A lo largo de las zonas semiáridas se extienden grandes y complejas secuencias de areniscas / calizas / pizarras, con unas características hidráulicas variables. En la actualidad estos sistemas acuíferos están siendo explotados progresivamente para el abastecimiento humano, como ocurre en Oriente Medio y en el Norte de África. Este desarrollo tiende a depender, más que de la recarga en vertical, del sistema de explotación seguido y del flujo subsuperficial desde las áreas adyacentes, de forma que hoy en día la recarga en estos sistemas puede considerarse limitada y restringida a sus zonas de borde.

En las zonas semiáridas las secuencias carbonatadas tienden a mostrar un karst con rasgos menos desarrollados que en las zonas húmedas. No obstante, estas rocas suelen tener una permeabilidad secundaria a considerar, ya sea debida a pequeños y frecuentes canales de disolución dispersos a lo largo de las capas y las diaclasas (p.ej. Jordania), o bien a caminos de tipo kárstico asociados con la disolución de yesos (p.ej. Qatar). La recarga a través de fracturas y diaclasas puede ser un mecanismo de importancia en terrenos calizos; las características de la recarga en este tipo de terrenos vienen descritas en UNESCO (1984a).

Caudalosos manantiales pueden surgir de formaciones carbonatadas cuando los principales sistemas de fractura drenan extensas áreas o dirigen las aguas subterráneas a la superficie. Los cauces de rambla profundos pueden llegar a cortar el manto acuífero regional, dando entonces lugar a caudales de base significativos (p.ej. Jordania).

La descarga en manantiales y la medición de niveles de agua en dolinas de hundimiento pueden aportar información sobre la frecuencia, la magnitud y la variabilidad de la recarga, cuando se conoce con una certeza razonable la zona de captación (eventual) y su capacidad de almacenamiento (*specific yield*).

Las prioridades del seguimiento en las cuencas sedimentarias suelen estar relacionadas con su extensión y grado de confinamiento, y debieran centrarse en las partes no cautivas del sistema así como en las áreas de descarga. En general, el mecanismo de recarga normalmente dominante consiste en una recarga indirecta a lo largo de sistemas de rambla que siguen zonas estructurales.

La caracterización del “estado de salud” en que se encuentra el sistema acuífero en estas zonas puede realizarse a través del seguimiento regular de los manantiales y/o del caudal de base en los cursos superficiales: los datos resultantes definirán la descarga natural de las masas de agua subterránea en cuestión. El nivel del agua en los pozos puede medirse también, pero éstos representarán unos valores más locales.

En el caso de las ramblas, el seguimiento del agua subterránea debiera centrarse en observar los niveles del agua en los pozos a distancias adecuadas del sistema activo. La recarga a través de la rambla del acuífero adyacente puede evaluarse a partir de las medidas obtenidas en las aguas subterráneas y del coeficiente de almacenamiento de estos materiales. Los datos medi-

dos o estimados que se utilicen y las pérdidas de agua subterránea (incluyendo el regadío) completarán el panorama del balance hídrico.

***Seguimiento del agua subterránea en cantidad –
Terrenos volcánicos***

Extensas superficies en India Central, en partes de la Península Arábiga, en la parte central de Suramérica y de EEUU, y en África Oriental, están cubiertas por potentes mesetas de lavas con una permeabilidad secundaria desarrollada por meteorización, diaclasamiento y fracturación, pudiendo encontrarse con frecuencia sistemas acuíferos estratificados con muchos manantiales pequeños (p.ej. Yemen). La recarga directa puede verse limitada por la presencia de suelos pardo-negros mientras que la indirecta representa a menudo el principal mecanismo de recarga.

Entre las prioridades iniciales para el seguimiento destacan los datos relativos a la escurrimiento en el tiempo, a las descargas de los manantiales y a las variaciones del nivel de agua a diferentes profundidades.

***Seguimiento del agua subterránea en cantidad –
Basamentos complejos***

En las regiones semiáridas se encuentran grandes extensiones con materiales complejos de basamento, como en India y en África, donde proporcionan fuentes locales de abastecimiento de agua, si bien de alcance muy limitado debido a sus pobres características hidráulicas, a menos que se den en una zona profundamente alterada con depósitos fisurados o canales aluviales. Las zonas más áridas suelen tener agua de baja calidad (p.ej. Red Sea Hill, Sudán). Los rasgos típicos de estos acuíferos de Basamento Complejo vienen descritos en Wright & Burgess (1922) o en UNESCO (1984b).

Para su seguimiento, las prioridades debieran centrarse en las características de la escurrimiento del agua de lluvia, allí donde la superficie meteorizada tiene poco espesor, y en los factores que influyen sobre la recarga directa cuando el área alterada es profunda.

Referencias y bibliografía relacionada

- Abdulrazzak, M.J.; Sorman, A.U.; Alhames, A.S. 1989. Water balance approach under extreme arid conditions - a case study of Tabalah Basin, Saudi Arabia. *Hydrological Processes* 3: 107-122.
- FAO, 1981. Arid Zone Hydrology. FAO Irrigation and Drainage Paper 37. Rome.
- Gee W.G.; Hillel, D. 1988. Groundwater recharge in arid regions: review and critique of estimation methods. *Hydrological Processes* 2: 255-266.
- Heath, R.C. 1976. Design of groundwater level observation well programmes. *Groundwater* 14(2): 71-77.
- IAHS, 1986. Integrated design of hydrological networks. IAHS Publ. No. 158. Budapest Symposium.
- IAHS, 1990. Groundwater monitoring and management. IAHS Publ. No. 173.
- Khouri, J. 1982. Hydrogeology of the Syrian steppe and adjoining arid areas. *Quart. J. Eng. Geol.* (London) 15: 135-154.
- Lerner, D.N.; Issar, A.I.; Simmers, I. 1990. Groundwater recharge. A guide to understanding and estimating natural recharge. IAH International *Contribution to Hydrogeology*, volume 8. Hanover.
- Made, J.W. van der (ed.) 1986. Design aspects of hydrological networks. TNO Committee on Hydrological Research, The Hague.
- Nielsen, D.M. 1991. *Practical handbook of groundwater monitoring*. Lewis (Publ.), USA.
- Schulze, R.E. 1984. Regional potential evaporation mapping in areas with sparse climatic data. Proc. Symp. in Reg. Hydrol. 25th Intern. Congress, Freiburg.
- Sorman, A.U.; Abdulrazzak, M.J. 1993. Infiltration-recharge through wadi beds in arid regions. *Hydrological Sciences* 38(3); 173-186.
- UNESCO 1972. Groundwater studies. An international guide for research and practice. Paris.
- UNESCO 1984a. Guide to the hydrology of carbonate rocks. *Studies and reports in hydrology* 41. Paris.
- UNESCO 1984b. Groundwater in hard rocks. *Studies and reports in hydrology* 33. Paris.
- UNESCO/WMO 1988. Water resource assessment activities. Handbook for National Evaluation.
- UNESCO 1998. Monitoring for groundwater management in (semi-)arid regions. *Studies and reports in hydrology* 57. Paris.
- WMO 1972. Casebook on hydrological network design practice. WMO Publ. No. 324. Geneva.
- WMO 1981. Guide to hydrological Practices. WMO Publ. No. 168. Geneva.
- WMO 1982. Concepts and techniques in hydrological network design. Operational Hydrology Report No. 19. Geneva.
- WMO 1989. Management of Groundwater observation programmes. Operational Hydrology Report No. 19. Geneva.
- WMO 1989. Management of groundwater observation programmes. Operational Hydrology Report 31. Geneva.
- Wright, E.; Burgess, W. (eds.) 1992. The hydrogeology of crystalline basement aquifers in Africa. *Geological Society of London Special Publication* No. 66.

Anejo B: Selección e instalación de los pozos para el seguimiento de las aguas subterráneas

B.1 Introducción

La selección y la instalación de sondeos para el seguimiento de las aguas subterráneas son actividades complementarias al análisis del sistema acuífero (capítulo 4) y forman parte del plan documentado para este seguimiento, como se describe en los capítulos 6, 7 y 8 de esta Guía. Dicho plan contiene los mapas que muestran los pozos existentes que han sido elegidos, así como la localización posible de los nuevos. Sobre la base del plan para el seguimiento y de la información esencial a conseguir, se puede programar la posterior implementación de la red de vigilancia.

En la fase inicial de un programa de seguimiento se pueden utilizar los diferentes tipos de pozos que ya existen, incluyendo los excavados y los sondeos, entubados o no (roca dura); los pozos abandonados pueden servir también, pero sólo si cumplen con los criterios que se hayan especificado. Los pozos seleccionados del inventario, posiblemente tengan que ser inspeccionados de nuevo para un análisis y descripción más detallados, para su limpieza y reparación, y para concretar un acuerdo con el dueño en cuanto a su acceso, la frecuencia de las mediciones o muestreos, etc. Estas visitas de campo deben ser cuidadosamente planeadas.

En los sondeos nuevos, como su instalación suele ser muy cara, se les considera a menudo con múltiples usos. A efectos de combinar fácilmente las mediciones de nivel con la toma de muestras para calidad, el diámetro de los sondeos de observación tiene que ser suficiente para que puedan pasar los aparatos de muestreo estándar. Si los sondeos van a ser utilizados también para abastecimiento, las características de la rejilla y el diámetro del entubado deberán además tener en cuenta el caudal requerido y la instalación de la bomba.

Este Anejo B reúne información de distintas procedencias, como ACSAD-BGR (2004), cuyo texto ha sido incluido con permiso del autor.

B.2 Selección entre los pozos existentes para el seguimiento del agua subterránea

B.2.1 Formulación de criterios para la elección entre los pozos ya existentes

Se pueden utilizar diversos tipos de pozos para el seguimiento del agua subterránea:

- Pozos de observación (pozos con uno o varios piezómetros);
- Pozos para el abastecimiento de agua (sondeos o pozos excavados que se utilizan para suministrar agua a un particular o población, a la agricultura o industria).

Cuando se trata de elegir de forma sistemática un sondeo para el seguimiento —aparte de los ya disponibles— es esencial definir unos criterios de selección, lo cual deberá ser hecho por un hidrogeólogo experimentado. Como criterios esenciales se consideran los siguientes:

- El pozo requiere una cierta ubicación (dentro del plan de seguimiento).
- Esta situación es representativa de los objetivos perseguidos en el seguimiento. No debiera estar demasiado cerca de actividades susceptibles de perturbar el propósito del seguimiento, tales como bombeos que tengan una influencia directa sobre el nivel del agua registrado, o fuentes locales de contaminación que puedan alterar la imagen regional de la calidad del agua subterránea.
- Se conocen los datos principales del pozo (profundidad, diámetro, situación de la rejilla, etc.) o se pueden conseguir.
- La descripción de la litología está disponible (una columna litológica del sondeo), a efectos de interpretar la unidad hidrogeológica asociada a la rejilla.
- La rejilla deberá estar asociada con un único acuífero (principal), y no con varios.
- Si un punto de observación tiene varios piezómetros, las respectivas rejillas habrán de estar separadas nítidamente mediante sellados adecuados.
- El pozo está limpio y es representativo en cuanto a las variaciones de nivel del agua.
- Los operarios tienen acceso al punto de observación en cualquier temporada de medición.
- El pozo se encuentra razonablemente protegido frente al vandalismo y ante cualquier posible peligro o daño.
- Si se piensa en un sondeo de explotación para tomar medidas de nivel, es necesario ponerse de acuerdo con el dueño sobre el tiempo suficiente durante el cual el bombeo deberá estar parado para recuperarse, y que las medidas sean representativas. Este tiempo depende del propio sondeo y será el hidrogeólogo quien lo determine, en base a un ensayo de recuperación o bien según su experiencia en condiciones parecidas.

Unos criterios son más determinantes que otros. Por ejemplo, disponer de la columna litológica o de su descripción no es un criterio decisivo en pozos relativamente someros, en tanto en cuanto el hidrogeólogo conoce con una certeza razonable qué capas corta; de igual manera, disponer de los registros históricos de la calidad o de la cantidad (niveles) del agua, se considera que es importante pero tampoco un criterio decisivo al hacer la selección. No obstante, disponer de dichas medidas puede ser un argumento a favor de un sondeo que le dé prioridad sobre otros próximos, si las demás condiciones son equivalentes.

B.2.2 Selección preliminar de pozos en gabinete

El diseño del programa de seguimiento y la selección preliminar de los pozos de observación se basan habitualmente en información recogida a lo largo del inventario de los pozos disponibles, información sobre la cual puede hacerse una selección preliminar en el gabinete de donde resultarán unas listas o mapas con un primer grupo de puntos elegidos, e incluso un segundo grupo. De todas formas, la aptitud de los pozos para el seguimiento tendrá que ser decidida en base a la lista de criterios técnicos y logísticos de selección ya definidos, los cuales muy a menudo requerirán comprobaciones extra en campo para verificar directamente estas condiciones. Disponer de un registro histórico puede considerarse una razón importante para elegir un pozo dentro de todo un grupo, si las demás condiciones son semejantes.

¡Atención con los pozos abandonados!

Los pozos de extracción abandonados no deberían en general ser tenidos en cuenta al pensar en el seguimiento del agua subterránea, sobre todo porque su funcionalidad no está básica-

mente garantizada: más bien al contrario, a menudo es su falta de funcionalidad la razón de su abandono. Un programa de seguimiento no debiera generar datos de validez cuestionable, pues esto socavaría su aceptación global.

Sin embargo, cuando el motivo del abandono de algún sondeo ha sido que su explotación ya no era necesaria, entonces puede ser inspeccionado y puesto en servicio, si cumple con todos los requisitos importantes.

B.2.3 Verificación en campo del estado de los pozos y selección final

A efectos de verificar la operatividad total de los pozos para el seguimiento del agua subterránea, es a menudo necesaria una inspección en campo con diversos objetivos, como son:

- Comprobar la información relativa a las condiciones destacables que han llevado a elegir este pozo;
- Recoger información que falte sobre el pozo y su situación, para completar la ficha del punto de seguimiento (ver también Anejo E);
- Seleccionar el pozo más adecuado para el seguimiento, entre todos los de un grupo;
- Establecer comunicación con el dueño para el acuerdo necesario sobre la frecuencia de los muestreos o de las mediciones, una eventual compensación, etc.;
- Verificar si pueden aparecer otras condiciones limitantes a lo largo del seguimiento; por ejemplo, la forma de estar instaladas las bombas puede suponer un impedimento para tomar el nivel del agua.

Cuando los pozos no satisfagan los criterios establecidos posiblemente haya que buscar otros pozos alternativos o bien otros sitios; la correspondiente visita en campo puede servir también para ver otros lugares que presenten lagunas en el seguimiento o donde haya que instalar sondeos nuevos.

Al preparar esta salida conviene tener unos mapas de campo donde vengán indicados los sitios que se van a visitar. Es posible que, como resultado de la primera comprobación, algunos de los pozos resulten inservibles, por lo que interesa llevar también información relativa a los pozos que se encuentren cerca.

Las actividades anteriores culminarán con una selección definitiva de los pozos para el seguimiento. Conviene que estos puntos sean señalados en campo de una forma inconfundible. Interesa recoger todo un conjunto completo de datos en cada uno de estos pozos elegidos y rellenar con ellos en gabinete una ficha de datos del punto (ver también el Anejo E). Se recomienda incluir un pequeño gráfico o dibujo del sitio, así como fotos que faciliten su posterior identificación.

B.2.4 Rehabilitación de pozos elegidos (para el seguimiento)

Antes de incluir un pozo de observación en una red para el seguimiento puede ocurrir que sea necesaria su rehabilitación, especialmente si no está limpio o si requiere alguna reparación. En muchas publicaciones la rehabilitación se refiere a restaurar la capacidad de extracción, ciñéndose mayormente a mejorar su caudal; sin embargo, no hace falta una gran capacidad de extracción para proporcionar un buen nivel o una buena muestra del agua subterránea. Mien-

tras que el sondeo siga bombeando adecuadamente, se puede considerar que tiene un contacto razonable con el agua en el acuífero, y su limpieza puede no ser necesaria.

La rehabilitación de un pozo con miras al seguimiento del agua, presenta aspectos físicos, químicos y biológicos. Algunas de las actuaciones comunes a todos ellos son: retirar los sedimentos, acondicionar el contacto hidráulico con el acuífero mediante el purgado del sondeo, restaurar el cierre de superficie y/o la tapa protectora.

La rehabilitación de sondeos de observación de pequeño diámetro, o piezómetros, requiere un tratamiento cuidadoso con un equipo especial de pequeñas dimensiones, además de llevar un tiempo apreciable. Por ejemplo, para retirar los sedimentos se pueden extraer por achique o bien por arrastre con agua o aire; en el primer caso el caudal de la bomba deberá ajustarse a la capacidad (disminuida) del sondeo y también tener en cuenta la resistencia de los materiales de la tubería y de la rejilla: una capacidad de bombeo o de arrastre (demasiado) alta puede llevar fácilmente a la implosión del entubado o de su rejilla, especialmente si están contruidos con materiales relativamente débiles (ver también el capítulo B6).

La Sociedad Americana de Pruebas de Materiales (*American Society of Testing Materials*, ASTM) tiene preparado un estándar sobre *mantenimiento y rehabilitación de los sondeos para observación*, con número D 5978-96.

A propósito del estándar ASTM D 5978-96:

En esta Guía se ofrece una manera de seleccionar e implementar una sistemática para el mantenimiento y rehabilitación de los pozos de observación del agua subterránea. La información proporcionada es relativa a los síntomas de los problemas o deficiencias, que indican la necesidad de mantenimiento y rehabilitación. Se limita a los sondeos de observación, diseñados y utilizados para dar acceso a la toma de muestras representativas y aporta también información sobre las propiedades hidráulicas de la zona saturada, para que la incidencia sobre la parte observada sea mínima. Algunos de los métodos que se describen más abajo pueden ser de aplicación en otros tipos de sondeos, si bien la metodología para los sondeos de observación es mucho más exigente que para los demás. Con los sondeos de observación se incluyen las bombas y equipo de superficie asociados. Además de esta Guía se tendrán en cuenta las condiciones específicas del lugar, de naturaleza geológica, hidrogeológica, geoquímica, climatológica y biológica, así como la normativa oficial.

Los programas de rehabilitación pueden tener un éxito incierto, tal y como indica uno de los participantes en la elaboración del estándar antes aludido:

“En la práctica sin embargo resultan ‘inservibles’ ya que prácticamente no pueden usarse productos químicos, ni siquiera aire, para la rehabilitación de los sondeos de observación que están sucios. Sólo es posible hacer un nuevo desarrollo [del sondeo], el cual raramente proporciona resultados excelentes por sí mismo. La única esperanza de conseguir unos resultados válidos en el sondeo de observación a largo plazo, reside en un buen diseño y desarrollo desde el primer momento. Esto es doctrina firmemente establecida.”

Si los sondeos seleccionados no reúnen los criterios esenciales, incluso después de haber aplicado un programa de rehabilitación, entonces ¡deberán ser excluidos del programa para el seguimiento!

B.3 Procedimiento para seleccionar la ubicación de los nuevos sondeos de observación

Se pueden necesitar sondeos de observación nuevos en sitios señalados por la red planeada para el seguimiento del agua subterránea, en caso de que no haya ningún pozo disponible o bien que ninguno de los existentes reúna las condiciones requeridas. Hace falta entonces un procedimiento para elegir los sitios más adecuados para estos sondeos.

B.3.1 Enumeración de los criterios para seleccionar la ubicación

La localización adecuada del sondeo va a requerir un conjunto de criterios de selección, los cuales pueden cubrir aspectos técnicos tanto como logísticos o relativos a la propiedad del mismo. Se indican a continuación algunos ejemplos de estos criterios:

- El sitio es un lugar ya determinado, que encaja suficientemente bien en el plan para el programa de seguimiento.
- El sitio es representativo en cuanto a los objetivos del seguimiento (regional), dentro de la red de referencia. Debe estar libre de incidencias locales en lo concerniente al seguimiento del nivel del agua, sin que la influencia de las extracciones del entorno provoque alteraciones tales como fluctuaciones inducidas por el régimen de bombeo; igualmente, las fluctuaciones rápidas, como las causadas por el retorno del regadío, etc. debieran no afectar a las mediciones. Por ello, el sondeo deberá situarse a una distancia segura, a salvo de estas actividades. En cuanto al seguimiento de la calidad del agua subterránea, debe evitarse la posible incidencia (micro-tendencias) de fuentes locales de contaminación.
- La instalación del sondeo no causa ningún perjuicio a los lugares ambientalmente sensibles del entorno.
- La propiedad del lugar se encuentra claramente definida y el dueño está en disposición de aceptar la perforación de un nuevo sondeo de observación para el seguimiento continuado del agua.
- El sitio es accesible para los operarios durante todo el año y se encuentra al abrigo razonable del vandalismo.
- El sitio tiene accesibilidad para la máquina de perforación y demás vehículos de apoyo.
- Hay espacio suficiente y adecuado en el sitio para instalar el equipo de perforación, acondicionar la balsa de lodos y facilitar el drenaje del efluente: debe estar libre de árboles, tendidos eléctricos, tuberías/cables/conducciones/etc. enterradas.

Observación: las amenazas locales sobre el nivel o la calidad del agua subterránea, pueden ser objeto de un seguimiento utilizando redes locales o específicas, que se establecerán con el propósito de realizar estos estudios de detalle, en otros emplazamientos.

B.3.2 Examen de las zonas previstas y selección del emplazamiento para los nuevos sondeos.

La posible determinación del emplazamiento adecuado puede comenzar con un estudio de gabinete; la información necesaria incluye mapas topográficos e hidrogeológicos, perfiles, mapas de isopiezas y de isopacas, mapas de isoconcentraciones, mapas de vulnerabilidad, etc.

A partir de la información reunida, conviene preparar un mapa que muestre las zonas presumiblemente de interés para la instalación de los sondeos de observación nuevos, lo cual puede hacerse mediante círculos que encierren las áreas convenientes. Entre la información que se llevará al campo interesa incluir la función (o funciones) que deberá(n) desempeñar los futuros sondeos, así como los criterios destacables a seguir, que pueden ser distintos para cada función de vigilancia.

La información disponible y la lista de criterios sirven para comprobar qué sitios pueden ser considerados como adecuados para los sondeos nuevos. No obstante, en algunos casos estos sitios inicialmente aceptados pueden tener que ser abandonados a causa de problemas tales como una predisposición desfavorable por parte del dueño del terreno, la inaccesibilidad del lugar para la maquinaria de perforación y/o de los operarios, la vulnerabilidad de la zona al vandalismo, etc. En tales casos, el encargado del diseño del plan de seguimiento debe ser consultado para buscar otro lugar.

Los sitios elegidos para los sondeos deben quedar claramente señalados en el mapa y en el campo. El hidrogeólogo encargado de esta selección debe también indicar la situación exacta al equipo responsable de la perforación.

B.4 Diseño de los sondeos para el seguimiento

El proceso de diseñar un sondeo debe dar como resultado un documento que contenga toda la información práctica necesaria para la ejecución e instalación del sondeo nuevo (profundidad esperada, litología prevista, especificaciones de la perforación y de la entubación, etc.). Para elegir el método de perforación, el material de la tubería y de los filtros, ver el apartado B.5.

ASTM ha desarrollado una “Práctica Estándar para el Diseño e Instalación de Sondeos en Acuíferos, para el Seguimiento de las Aguas Subterráneas [*Standard Practice for Design and Installation of Groundwater Monitoring Wells in Aquifers*] 2002)”, la cual proporciona una información técnica útil para el diseño del pozo. También se sugiere consultar el “Handbook of Suggested Practices for the Design and Installation of Groundwater Monitoring Wells” (Aller, L., et al. 1991).

Además de las orientaciones que indican los manuales, pueden ser de utilidad las siguientes consideraciones generales:

- El diseño de un sondeo de observación depende de las funciones asignadas al mismo (ver Capítulos 6 y 7) y de si será utilizado también para abastecimiento público en caso de que las condiciones hidrogeológicas sean favorables. Esto conlleva implicaciones en cuanto al número de piezómetros a instalar, la profundidad, longitud y tamaño del entubado y enrejillado, y por lo tanto en cuanto al diámetro de la perforación. En particular, si la perforación va a convertirse en un abastecimiento de agua, el diseño tendrá que ser considerablemente distinto.
- El diseño del sondeo debe basarse en la información disponible sobre las sucesivas unidades hidrogeológicas existentes en el sitio, según lo que indique el modelo conceptual. Debe tenerse en cuenta cualquier información de tipo geológico o geofísico.

- La descripción litológica de la columna del sondeo deducida a partir de las muestras de material obtenido, puede a menudo mejorarse de forma significativa aplicando un registro geofísico a lo largo de la perforación, especialmente cuando se utilizan métodos de perforación a rotación y el detritus en superficie tiende a llegar mezclado y con un cierto retraso. Estos registros suelen proporcionar unas indicaciones muy buenas en cuanto a la profundidad y permeabilidad de las distintas capas atravesadas.
- El diámetro de un sondeo de observación depende de los aparatos tomamuestras disponibles. Para muestrear la calidad del agua se considera como mínimo un diámetro de 2 pulgadas en tubería y rejilla si se dispone de un equipo pequeño, aunque en muchos países se prefiere un diámetro de 4 pulgadas. También será necesario un diámetro mayor en aquellos sondeos que vayan a ser utilizados además para el suministro de agua.
- Las rejillas habrán de situarse a las profundidades correctas, a la altura de las capas acuíferas. A su alrededor, el material utilizado para el empaquetamiento deberá tener el tamaño apropiado y formar una zona de transición adecuada entre el material del acuífero y el ranurado de la(s) rejilla(s). Esto es de aplicación igualmente en los sondeos de observación. El ranurado o mallado de la rejilla se calculará de manera que el relleno utilizado no se cuele a su través y que sólo una pequeña porción del material del acuífero pueda llegar a atravesarlo.
- En un sondeo de observación se evitará la entrada de aguas superficiales, ya sea de forma directa o vía entubado y empaquetado: es esencial realizar un sellado efectivo del sondeo cementando con arcilla o bentonita la parte superior, por encima del enrejillado. Lo mismo es aplicable a las partes entre rejillas, cuando se instala más de un piezómetro en la misma obra; estos cerramientos deben situarse a la altura de las capas menos permeables por encima o entre los materiales acuíferos.

B.5 Perforación, instalación y acondicionamiento de los sondeos de observación

B.5.1 La perforación

La perforación y la instalación de los sondeos de observación deben seguir unas técnicas reconocidas (internacionalmente). El método de perforación más adecuado para sondeos (de observación) depende de los tipos de roca que se espere cortar y de las funciones que se hayan asignado al sondeo. Sin embargo, en la práctica, la decisión sobre qué método se aplica viene determinada por los equipos de perforación que se encuentran disponibles, y por la experiencia del sondista.

Una lista detallada de los métodos de perforación, junto con ejemplos para su aplicación, las ventajas y limitaciones de cada uno de ellos, se encuentra en EPA (ver Tabla B1, al final de este Anejo).

Por lo que respecta a la aplicabilidad de los métodos de perforación, DVGW (2001) propone las siguientes técnicas para el caso de los sondeos de observación:

Rocas no consolidadas: Cualquier método de perforación por rotación; perforación a percusión; pozos encamisados (pozos filtrantes o con revestimiento avanzado).

Rocas consolidadas: Perforación a rotación directa; a percusión; a rotopercusión.

Información complementaria relativa a los métodos de perforación y sus (des)ventajas: Kovalevsky, 2004 (pág. 185 a 215); Lapham, 1997 (ver p.ej. tablas 15 y 16).

Para permitir una instalación adecuada, el diámetro de la obra habrá de tener por lo menos 2 pulgadas más que el diámetro del pozo previsto. Si se va a instalar más de un piezómetro o si el sondeo va a ser también de explotación, entonces el diámetro de la perforación tendrá que superar 4 ó 5 pulgadas, límite que puede ser aceptable en sondeos para un solo tipo de observaciones.

La ejecución de un sondeo de investigación de pequeño diámetro (por ejemplo, una perforación piloto o de prueba de 4 pulgadas) puede ser recomendable, especialmente si no se tiene certeza sobre la existencia o no de acuíferos significativos en el lugar elegido. La perforación debe llevarse a cabo en toda la profundidad prevista para el propio sondeo o incluso más: esta obra va a proporcionar la información litológica e hidrogeológica necesaria para un posterior diseño del sondeo (profundidad y longitud de las rejillas, de los empaquetamientos, etc.), así como para tomar decisiones relativas a ensanchar eventualmente la obra para instalar un bombeo de abastecimiento. Esta información es esencial para evitar el riesgo de realizar una inversión estéril en la perforación. Los métodos de perforación a rotación están especialmente indicados en estos casos piloto y en su eventual ampliación posterior, debido a su flexibilidad de trabajo con diversos tipos y tamaños de barrenas.

B.5.2 La instalación del sondeo

Es indispensable asegurarse de que el sondeo de observación está midiendo correctamente el nivel del manto acuífero o la presión hidráulica a la profundidad especificada, para lo cual tendrá que estar debidamente instalado y desarrollado. Entre las pruebas a realizar habrá que comprobar la estanqueidad de su revestimiento (p.ej., la posición y estanqueidad de los sellados anulares). No es extraño tener que rehabilitar un sondeo de observación después de un cierto tiempo; por ello, debe comprobarse su funcionalidad periódicamente.

Los *materiales del entubado y las rejillas* deben cumplir unos requerimientos particulares. Los indicados por EPA pueden servir de referencia (EPA, 1994), como son:

- Estos materiales deben mantener su integridad estructural y su conservación en el medio en el que están inmersos, a lo largo de toda su vida prevista;
- Deben ser resistentes a la corrosión química y microbiológica y a la degradación en el agua, esté o no contaminada;
- Deben tener la resistencia necesaria ante las fuerzas físicas que actúen sobre ellos durante la instalación y después de ella, y a lo largo de su uso;
- No deben provocar alteraciones químicas en el agua para el muestreo;
- Han de poderse instalar fácilmente durante la construcción del sondeo, y los materiales en sí o su estabilidad (resistencia a la tracción, a la compresión, a los esfuerzos laterales) no deben sufrir modificación después de su instalación.

Las empaquetaduras filtrantes han de instalarse de tal manera que no haya pérdida de material y que los bordes superior e inferior previstos permanezcan en su sitio. A profundidades eleva-

das se recomienda aplicar empaquetaduras ya preparadas, dado que ésta es la única manera suficientemente segura de que el filtro quede en el sitio adecuado. El material filtrante que se utilice habrá de estar bacteriológicamente limpio y durante la instalación se evitará cualquier tipo de contaminación, bacteriológica u otra. El tamaño que se elija para la grava correspondiente dependerá del material del propio acuífero (análisis granulométricos) y condicionará el mallado de la rejilla.

El sellado de las partes superior e inferior de la formación acuífera ha de ser realizado correctamente para evitar que eventualmente el agua alcance la tubería a través de alguna junta defectuosa. Los centralizadores estarán instalados a las distancias adecuadas, de manera que quede garantizado el funcionamiento apropiado de los sellados y del empaquetamiento.

B.5.3 La finalización del sondeo

Este apartado contiene algunas sugerencias prácticas para la culminación del sondeo.

- Asegurarse de que la superficie exterior del tubo-piezómetro, incluidas las uniones, está lo más alisada posible a efectos de facilitar su instalación;
- Utilizar centralizadores para mantener las rejillas (empaquetadura no prefabricada) bien centradas en el sondeo;
- Asegurarse de que la superficie interior del tubo-piezómetro está lo más alisada posible para evitar que el equipo de medición pueda atascarse;
- En el caso de que haya varios piezómetros en un mismo sondeo, conviene que sus bordes superiores por encima del suelo indiquen de alguna forma la profundidad de su rejilla (a mayor profundidad de piezómetro, más bajo su borde): los tubos de los piezómetros pueden estar cortados a distintas alturas, con diferencia de 5 cm, p. ej.
- No utilizar tapas a rosca para cerrar los tubos;
- Dar un único número a cada tubo y colocar una única etiqueta de identificación en el sondeo de observación;
- Cerrar con cemento la superficie exterior del sondeo para darle estabilidad y para prevenir eventuales infiltraciones directas por escorrentía superficial;
- Un encabezado de acero dará protección frente al vandalismo y evitará la entrada de agua;
- Poner un candado para prevenir el acceso al sondeo sin autorización, combinándolo con una verja alrededor si es necesario.

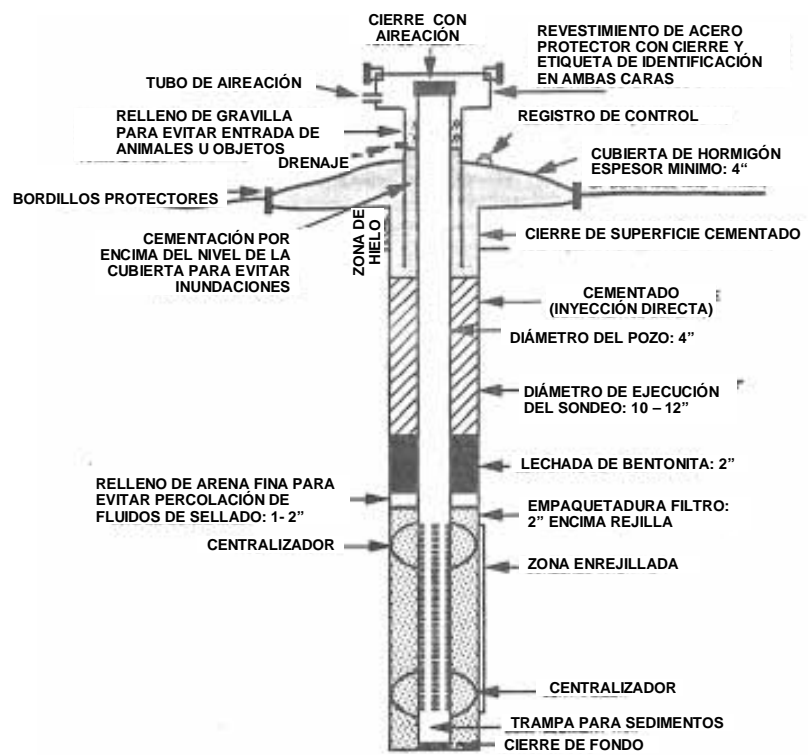


Figura B.1: Pozo típico de observación de las aguas subterráneas (adaptado de EPA 1994)

B.6 La limpieza y el desarrollo de los sondeos de observación

Con miras al seguimiento del agua subterránea, la limpieza y el desarrollo del sondeo de observación son necesarios para asegurar un contacto hidráulico correcto entre el sondeo mismo y su entorno acuífero. La medida del nivel de agua en el sondeo debe ser representativa del régimen hidrológico en el acuífero; de manera semejante, las muestras para calidad tomadas en el sondeo deben representar la calidad del agua subterránea en su entorno acuífero. La finalidad del desarrollo del sondeo consiste en comprobar la funcionalidad requerida para el seguimiento.

Tanto la limpieza como el desarrollo del sondeo pueden considerarse entre los elementos más cruciales de la instalación, especialmente si se ha utilizado un sistema de perforación por rotación. Deben aplicarse pronto, una vez terminada la obra: preferiblemente en la semana siguiente, dejando pasar un día desde su culminación, y debe ser llevado a cabo por personal experimentado con un equipo cuidadosamente seleccionado.

Debe ponerse énfasis en el hecho de que la vigilancia del nivel del agua subterránea (y de la calidad también) necesita de un buen contacto hidráulico entre el sondeo y el acuífero correspondiente (o acuíferos). Sin embargo la finalidad del seguimiento en sí, exclusivamente, *no requiere una gran capacidad de bombeo*.

Atención. La limpieza y el desarrollo de un sondeo de observación deben ser llevados a cabo con el máximo cuidado, en especial cuando el tamaño de la rejilla (longitud y diámetro) es pequeño y además está fabricada con un material de tipo vulnerable, al igual que la tubería. Un método demasiado agresivo en el desarrollo puede lastimar el sondeo (tubería y/o enrejillado), causar deformaciones en el paquete de filtrado y provocar pérdidas indeseables a través de las juntas o soldaduras de unión, haciendo que el sondeo quede inservible para la observación en el futuro.

Por lo tanto, al sondeo de observación conviene aplicarle un procedimiento de limpieza y acondicionado que sea gradual, mediante un equipo flexible de pequeña capacidad (un compresor de aire pequeño o una bomba de baja capacidad): comenzando a niveles bajos, tan pronto como el sondeo empiece a soltar agua se procederá a incrementar lentamente la intensidad del compresor o de la bomba. El caudal de agua extraída no debe nunca superar la capacidad estimada para el sondeo: se debería tener siempre presente que también los sondeos de observación ¡tienen una capacidad de extracción limitada!

Si el sondeo va a ser utilizado igualmente para abastecimiento de agua, su limpieza y desarrollo buscará optimizar la productividad del pozo. En este caso, el tamaño del entubado y del enrejillado deberá permitir normalmente una extracción mayor durante el bombeo y se seguirá un método más intenso para el desarrollo.

Al seleccionar el método apropiado para limpiar y acondicionar el sondeo, se han de considerar una serie de factores, como son:

- La ejecución del sondeo (para observación y/o abastecimiento) y los materiales utilizados (especialmente en la rejilla, así como su tamaño).
- El método de perforación aplicado: en particular si se han utilizado máquinas de rotación con lodo de alta viscosidad para extraer el ripio, entonces puede estar indicada una limpieza extensiva del sondeo.
- La litología del acuífero y las consiguientes propiedades hidráulicas que se le suponen: qué caudal de agua es razonable esperar.
- La profundidad del nivel estático del agua y la estimada para los métodos de bombeo o purgado.
- Las posibles sustancias o elementos introducidos en el sondeo y en el acuífero durante la perforación (de interés para el muestreo de la calidad del agua subterránea).

Para el desarrollo del sondeo se pueden utilizar los siguientes métodos:

- Extracción mecánica;
- Bombeo con aire comprimido;
- Bombeo y lavado a contracorriente;
- Chorro de agua a presión (alta);
- Chorro de agua a presión combinado con bombeo simultáneo.

Como se indicó anteriormente, los métodos suaves son preferibles a los agresivos. Los métodos a presión, antes de aplicarlos al sondeo en sí es conveniente ensayarlos sobre una rejilla de prueba del mismo material.

Cuando se trate de hacer un seguimiento para la calidad del agua subterránea, el sondeo deberá estar limpio de cualquier compuesto o elemento que sea extraño al entorno natural del acuí-

fero. El equipo para desarrollar el sondeo habrá de estar descontaminado y libre de cualquier sustancia susceptible de alterar la calidad del agua o los constituyentes que serán objeto de análisis, de manera a evitar o minimizar los efectos de cualquier contaminación, bacteriológica entre otras.

El desarrollo del sondeo se culminará con un informe sobre su realización. Los detalles correspondientes pueden encontrarse, por ejemplo, descritos en la norma D 5521, ASTM (1994).

Tabla B1

Pozos de Perforación Manual

Aplicaciones y Ventajas

- Vigilancia del nivel del agua en formaciones someras
- Facilidad en la toma de muestras de agua
- Coste bajo, estímulo para instalar más equipos para medidas

Limitaciones

- Profundidad limitada a unos 15 m. aprox.
- Pequeño diámetro de revestimiento
- Falta de recuperación de muestras de suelo, que imposibilita la interpretación litológica
- El acero del entubado puede interferir en la determinación de algunos constituyentes hidroquímicos
- La falta del detalle estratigráfico crea incertidumbre en relación con las zonas de rejilla y/o la contaminación transversal
- No sirve para materiales densos y/o algunos secos
- No hay espacio anular para el acabado del sondeo

Perforación con Tornillo Helicoidal

Aplicaciones y Ventajas

- Estudios de la zona somera
- Muestreos de suelos
- Sondeos de observación en la zona de aireación
- Sondeos de observación en zona saturada si el suelo es estable
- Determinación de la profundidad hasta la roca firme
- Rápido y desplazable

Limitaciones

- No sirve para muestrear suelos, salvo que utilice cuchara partida o desmuestreador de pared fina
- Datos de muestreo de suelos, limitados a superficies y profundidades con predominio de suelos estables
- No sirve en materiales sin consolidar por el desmoronamiento del terreno al retirar el tornillo
- La capacidad de profundizar disminuye según aumenta el diámetro del tornillo

Perforación con Tornillo Helicoidal Hueco

Aplicaciones y Ventajas

- Para investigaciones en todo tipo de suelos
- Permite un buen muestreo de suelos con cuchara partida o desmuestreadores de pared fina
- Muestreo del agua para la calidad
- Instalación de sondeos de observación en cualquier material no consolidado
- Puede servir como entubado momentáneo para testificar la roca
- Se puede utilizar en materiales estables para instalar el entubado de superficie

Limitaciones

- Dificultad para conseguir la muestra íntegra en materiales deformables
- Inundación de la formación por el agua o lodo de perforación, si se utiliza para controlar el abombamiento
- Posible contaminación transversal del acuífero cuando no hay un control positivo en el espacio anular con agua, lodo o revestimiento
- el diámetro del tornillo limita el diámetro del entubado
- La fricción con las arcillas puede enyesar las paredes y sellar la formación

Perforación a Rotación con Lodos

Aplicaciones y Ventajas

- Penetración rápida en arcillas, margas y formaciones arenosas o gravas poco compactadas
- Permite muestreo con cuchara partida o desmuestreador de pared fina, en materiales no consolidados
- Permite muestreo central en formaciones no consolidadas
- Variedad y flexibilidad de tamaños en herramientas de perforación y en profundidad alcanzable
- Existencia de numerosos programas para perforación y lodos muy sofisticados
- Facilidad para testificar el sondeo

Limitaciones

- En el desarrollo, dificultad para retirar lodo y torta fuera del perímetro exterior de la empaquetadura de filtro
- La bentonita u otros aditivos de perforación pueden afectar la calidad de las muestras de agua subterránea
- Las muestras (esquirlas) en el lodo circulado son pobres para definir el tipo de rejilla adecuado
- La cuchara partida y el desmuestreador de pared fina son caros y de efectividad relativa a más de 50 m
- Las técnicas de testificación con cable a menudo no están disponibles localmente
- Dificultad para la identificación de los acuíferos
- La invasión de zonas permeables por fluidos de perforación puede comprometer futuras muestras de agua

Perforación a Rotación con Aire

Aplicaciones y Ventajas

- Rapidez en la perforación de rocas consolidadas y semi-consolidadas
- Muestras de buena calidad representativas del terreno
- Permite una rápida y fácil identificación de los cambios de litología
- Permite identificar la mayoría de las zonas productivas
- Permite una estimación de caudales en zonas muy productivas, con paradas cortas

Limitaciones

- Frecuentemente es necesario el revestimiento en superficie para proteger el sondeo
- Limitado a formaciones semi-consolidadas y consolidadas
- Muestras de detritus pequeños difíciles de interpretar
- El efecto secado del aire puede enmascarar zonas poco productivas, identificando sólo las productivas altas
- El flujo del aire requiere un filtro descontaminador
- El aire puede modificar las condiciones químicas o biológicas, y el tiempo de recuperación es incierto

Perforación a Rotación con Aire y Entubación Simultánea

Aplicaciones y Ventajas

- Rápida en arcillas, margas y arenas sin consolidar
- Perforación para materiales aluviales
- El revestimiento mantiene la integridad del sondeo y minimiza la contaminación transversal entre acuíferos
- Elimina problemas de circulación habituales en la perforación a rotación con lodo en circulación directa
- Buena recuperación de las muestras de las formaciones
- Afección mínima a la formación al retirar el material

Limitaciones

- Las zonas de baja presión y productividad pasan desapercibidas fácilmente si no se para en los sitios apropiados para observar una eventual recuperación del nivel
- Interpretación difícil de las muestras debido a su pulverización
- El aire puede modificar las condiciones químicas o biológicas, y el tiempo de recuperación es incierto

Perforación a Rotación de Circulación Inversa con Tubería de Doble Pared

Aplicaciones y Ventajas

- Alta rapidez en formaciones consolidadas y no consolidadas
- Permite un muestreo continuo de la litología en cualquier tipo de formación
- Muy buenas muestras representativas de litología, con riesgo mínimo de contaminación para ellas y para la zona productiva

Limitaciones

- Diámetro limitado del sondeo que condiciona el diámetro del pozo de observación.
- En formaciones inestables el diámetro de los pozos viene limitado a 4 pulgadas aproximadamente
- El aire puede modificar las condiciones químicas o biológicas, y el tiempo de recuperación es incierto
- Imposible instalar empaquetadura de filtrado salvo que la terminación sea abierta

Perforación por chorro

Aplicaciones y Ventajas

- Permite medición del nivel de agua
- Posible muestreo mediante detritus
- Aplicación primordial en formaciones no consolidadas pero es posible para otras consolidadas no muy duras
- Aplicación óptima en sondeos de 4 pulgadas y revestimiento de 2 pulgadas, con instalación de rejillas

Limitaciones

- Pueden hacer falta lodos para retirar los detritus
- Diámetro limitado a 4 pulgadas
- Avance lento en arcillas densas, con bloques, o formaciones similares
- Posible alteración de la formación si el revestimiento no es inmediato

Perforación con Cable

Aplicaciones y Ventajas

- Perforación para cualquier tipo de formaciones geológicas
- Prácticamente para cualquier profundidad y diámetro
- Fácil instalación para pozos de observación
- Desarrollo del pozo fácil y asequible
- Muestras excelentes en materiales de grano grueso

Limitaciones

- Avance de la perforación lento
- El hinchamiento de los materiales no consolidados tiene que ser controlado

B. 7 Referencias y lecturas adicionales

- ACSAD-BGR, 2004, Management, Protection and Sustainable Use of Groundwater and Soil Resources in the Arab Region, Volume 7 of Guideline for Groundwater Monitoring
- Aller, L., et al. 1991. Handbook of Suggested Practices for the Design and Installation of Ground-Water Monitoring Wells. EPA/600/4-89/034 (NTIS PB90-159807), 221 pp. Also published in 1989 by National Water Well Association, Dublin, OH in its NWWA/EPA series, 39800. [Nielsen and Schalla (1991) contain a more up-dated version of material in this handbook that is related to design and installation of ground-water monitoring wells].
- ASTM (1999): Ground Water and Vadose Zone Investigations: Drilling, Sampling, Geophysical Logging, Well Installation and Decommissioning. – 2nd edition, 576 p.; West Conshohocken/PE/USA
- ASTM (2002): Standard Practice for Design and Installation of Ground Water Monitoring Wells in Aquifers. – American Society for Testing and Materials, Standard D5092-02, 14 p.; West Conshohocken/PE/USA.
- ASTM (2002), Standard Guide for Selection and Documentation of Existing Wells for Use in Environmental Site Characterization and Monitoring, reference: D5980-96e1
- ASTM (2005), Standard Guide for Maintenance and Rehabilitation of Ground-Water Monitoring Wells (D 5978-96).
- EPA (1994), RCRA Ground Water Monitoring – Draft Technical Guidance. – 220 p.; Rockville/USA (Gov.Inst.Inc.).
- Hydrology Project (2003), Field Manual Hydrological Information System, Volume 4 – Part I, Network design and site selection
- Hydrology Project (2003), Field Manual Hydrological Information System, Volume 4 – Part II, Drilling of lithospecific piezometer
- Kovalevsky, V., G. Kruseman and K. Rushton (eds.), 2004, Groundwater studies. An international guide for hydrogeological investigations, Series IHP Groundwater Series, (pag 199-214)
- Lapham, Wayne W. and Franceska D. Wilde, and Michael T. Koterba (1995), Ground-Water Data-Collection Protocols and Procedures for the National Water-Quality Assessment Program: Selection, Installation, and Documentation of Wells, and Collection of Related Data, <http://water.usgs.gov/nawqa/OFR95-USGS> open-file report 95-398 (download from: 399.html)
- Lapham, Wayne W., Franceska D. Wilde, and Michael T. Koterba (1997), Guidelines and standard procedures for studies of ground-water quality: selection and installation of wells, and supporting documentation, USGS water-resources investigations report 96-4233, (<http://water.usgs.gov/owq/pubs/wri/wri964233>)
- Nielsen, D. M. and R. Schalla. 1991. Design and Installation of Ground Water Monitoring Wells. In: David M. Nielsen (editor), Practical Handbook of Ground-Water Monitoring. Lewis Publishers, Inc.
- SHUTER, E. & TEASDALE, W.E. (1989): Techniques of Water Resources Investigation, Chapter F1: Application of Drilling, Coring and Sampling Techniques to test Holes and Wells (in short: TWRI 2 - F1).

- Smith, S.A. 1995. Monitoring and Remediation Wells: Problem Prevention, Maintenance and Rehabilitation, CRC Lewis Press, Boca Raton, FL.
- USACE (2001) : Operational Guidelines for Humanitarian Civic Assistance Water Well Drilling

Otras Fuentes:

IGRAC gestiona en red una base de datos en relación con ‘Guidelines and Protocols for groundwater data acquisition’ donde se puede encontrar una lista más detallada de documentos disponibles, con sus referencias (ver también: http://igrac.nitg.tno.nl/gpm_database.html)

Anejo C: Las medidas piezométricas y su registro

C.1 Alcance de este anejo C

En las páginas que siguen se describe cómo llevar a cabo mediciones representativas de los niveles y las descargas del agua subterránea para diversos entornos hidrogeológicos y bajo distintas condiciones de flujo y de explotación. Se comentan métodos de bajo, medio y alto coste, y también se describen las propiedades y aplicabilidad de los equipos correspondientes. Se consideran diversos tipos de punto de observación tales como sondeos, piezómetros, galerías horizontales, canales, cursos de agua superficial (caudales de base) y manantiales.

Este anejo se centra claramente en los métodos y dispositivos que se aplican para la medición del nivel del agua subterránea (datos piezométricos) y de su descarga a través de manantiales y cauces naturales (flujo de base), ya que éstos son los únicos datos relativos al agua subterránea susceptibles de medición directa. Estos datos constituyen sólo una parte de los necesarios en el cálculo del balance completo del agua, para analizar el comportamiento dinámico del sistema acuífero. Cualquier otro componente del agua subterránea en cantidad (en las entradas y salidas, naturales y artificiales) es determinado por caminos más indirectos, requiriendo diversas fuentes de datos con sus propios métodos de vigilancia. Una aproximación a estos métodos y fuentes de datos queda muy lejos del propósito de esta Guía.

C.2 La medición de la piezometría y su registro

En este anejo, se considera como punto piezométrico potencial cualquier punto desde el que se pueda tener acceso al agua subterránea. Por lo tanto, quedan incluidos los pozos de observación y los piezómetros, pero también los pozos de bombeo, los manantiales y las descargas en superficie del agua subterránea (UNESCO, 2000).

C2.1 La vigilancia en acuíferos de diferentes tipos

Roca compacta y sedimentos no consolidados

Desde un punto de vista teórico y en cuanto a la observación del nivel del agua subterránea, no existe diferencia entre los complejos sistemas de flujo en acuíferos consolidados, compactos o cársticos (donde está ligado en todo o en parte a las fracturas, diaclasas y/o oquedades), y los sistemas de flujo en sedimentos no consolidados (por los que discurre predominantemente a través del espacio poroso intergranular) (UN/ECE, 1999). Sin embargo y en la práctica, resulta a menudo mucho más difícil definir la geometría del sistema acuífero, elegir los emplazamientos adecuados para los pozos de observación y perforar los sondeos, en roca compacta que en sedimentos no consolidados, pudiendo hacer falta información adicional y un mayor nivel de gastos.

Formaciones heterogéneas o anisotrópicas

La dirección del flujo en el agua subterránea se determina con base en los datos del nivel del agua, para lo cual es necesario disponer de pozos o sondeos (rejilla) en la unidad estratigráfica correspondiente (USEPA, 1991). En acuíferos heterogéneos, donde los parámetros hidrogeológicos varían según el punto y su profundidad, debe definirse muy cuidadosamente la posición de las rejillas a efectos de evitar que un mismo piezómetro esté relacionado con distintas unidades hidroestratigráficas al mismo tiempo.

El nivel del agua medido en un pozo es una función de la presión hidráulica que está actuando en la parte enrejillada o permeable del mismo; la rejilla debiera ser lo más corta posible:

USEPA (1992) recomienda que salvo excepciones su altura sea inferior a 3m. De hecho, cuando hay una rejilla larga el nivel que se toma es una función de la distribución de la presión hidráulica a lo largo de toda la altura del tramo enrejillado. Este hecho habrá que ser tenido en cuenta al ir a interpretar los datos de nivel, cuando se trate de piezómetros que tengan tramos enrejillados de longitud apreciable y a lo largo de los cuales la variación piezométrica sea de consideración.

En aquellos casos en que la componente vertical del flujo del agua no es despreciable, o bien cuando existe un grado de heterogeneidad y/o de anisotropía significativo, la vigilancia debiera basarse, al menos en parte, en datos de múltiples piezómetros. Normalmente se vienen utilizando dos soluciones (UNESCO, 2004), que son:

- Grupos de piezómetros de pequeño diámetro situados dentro de una obra de diámetro amplio, con sus respectivas rejillas a distintas profundidades, aisladas unas de otras con arcilla u otro material impermeable;
- Grupos de piezómetros en sondeos separados perforados a distinta profundidad, con una sección enrejillada al final de cada piezómetro (esta solución es más sencilla pero habitualmente también más cara).

El primer paso en la implementación de un sistema de seguimiento se basa a menudo en hacer uso de los pozos existentes. En tal caso, las condiciones mínimas que les serán exigibles consistirán en disponer de los datos de construcción de estos sondeos, junto con la descripción litológica de los correspondientes materiales cortados, así como en que haya constancia de que los bombeos del entorno próximo no les afectan en la observación.

Acuíferos cautivos

En el caso de pozos artesianos en que el nivel piezométrico máximo no supera unos 2 m por encima del suelo, resulta útil prolongar el entubado por fuera del terreno y cerrar herméticamente el borde antes de comenzar el seguimiento, lo cual además es necesario para evitar que se salga el agua. Esta extensión, del mismo o (mejor) menor diámetro que la tubería, servirá para tomar las medidas del nivel; una alternativa consiste en que esta extensión sea transparente y con las referencias para las lecturas marcadas. La toma de estas lecturas requerirá previamente esperar a que se haya estabilizado el nivel.

Si el nivel del piezómetro supera la altura indicada anteriormente, hace falta instalar un dispositivo para medir la presión. Un buen manómetro de mercurio sirve para medir presiones de decenas de metros de columna de agua con una precisión de 0,03 m. Los manómetros convencionales son menos sensibles y precisos.

C2.2 Medición del nivel del agua en los sondeos de explotación

Los niveles medidos en los pozos deben representar el estado regional del agua subterránea dentro del acuífero en el momento de la medida. Cuando se utilizan los sondeos de extracción como puntos piezométricos, los conos de depresión causados por los bombeos son normalmente un factor de distorsión; por ello, la medición del nivel debe hacerse preferiblemente con el bombeo terminado y una vez que la recuperación de los niveles esté prácticamente completada.

La duración del periodo de recuperación depende de las características de la formación y, en el caso de acuíferos semiconfinados con respuesta retardada, también del caudal y duración del bombeo. Esta recuperación puede variar entre unos minutos y varias horas o días; en la práctica, interrumpir la extracción durante un largo periodo de recuperación puede ser un problema para los usuarios de los pozos. En consecuencia, se propone a continuación una manera distinta de abordar el tema, según que se trate de uno u otro caso:

- Cuando el tiempo de recuperación es relativamente corto, entre algunos minutos y horas, se puede buscar un acuerdo con el dueño/usuario del pozo a efectos de que detenga el bombeo durante un tiempo antes de tomar las medidas; un ejemplo podría ser que la parada comenzara la víspera de las mediciones. Si esta solución no es aceptable para el usuario, otra opción puede consistir en que el tiempo de parada sea menor y medir la recuperación; en este caso, hay que medir el nivel justo antes de interrumpir el bombeo y después cada cinco minutos, por ejemplo, hasta que se haya terminado la recuperación, más o menos (un criterio para ello puede ser que la diferencia entre dos medidas consecutivas sea inferior al 1 % del primer intervalo entre medidas tomadas). El tiempo transcurrido en este proceso, desde la interrupción del bombeo hasta el final aceptado de la recuperación, puede servir como referencia de tiempo mínimo para las futuras paradas previas a las tomas del nivel en el sondeo considerado. También interesa recoger los datos disponibles relativos a la extracción que ha habido antes de la parada para la medición.
- El método anterior probablemente no vaya bien para recuperaciones muy largas (p.ej., más de 24 horas), que a menudo corresponden a acuíferos semiconfinados de espesor considerable. En estas circunstancias, lo que se puede hacer es medir el nivel durante el bombeo, anotando el caudal medio extraído antes de la medición; si el nivel es muy inestable, puede ser necesario tomar varias medidas y calcular su valor medio. Cuando el bombeo no es un proceso del todo permanente, p.ej. si hay paradas de varias horas por la noche, entonces debe tenerse en cuenta la cantidad de horas de extracción diarias.

Para registrar los niveles piezométricos en los sondeos que están funcionando conviene definir el método mejor, en base a las condiciones hidrogeológicas e hidrológicas de la zona: es importante para una buena interpretación de los datos que la situación local esté correctamente descrita.

Por último, tiene que quedar claramente convenido entre los usuarios de los pozos y el grupo que gestiona el acuífero, todo lo relativo a la frecuencia y duración de las mediciones así como la duración de las paradas previas del bombeo.

El nivel piezométrico, o la medida de su presión, interesa que venga expresado como metros de altura sobre el nivel medio del mar, o sobre el nivel del suelo o mediante otro dato unifor-

me (UNESCO, 1998). Esto requiere una atención particular en el caso de acuíferos transfronterizos puesto que el nivel de referencia del mar podría ser distinto.

C2.3 Características y aplicabilidad de diversos aparatos de medida

Existen numerosos estudios sobre aparatos para medir los parámetros relativos a la cantidad del agua subterránea (Nielsen, 1991; WMO, 1994; UNESCO, 1998; Margane, 2004), los cuales pueden ser tanto de uso manual como de registro automático (Tabla C1). En esta parte del anejo C se ofrece una panorámica de los más utilizados y de su aplicabilidad y limitaciones, incluyendo algunos de los más recientes.

Cualquier equipo para medir piezometría debe estar construido con materiales inertes químicamente y ser descontaminado antes de su utilización, para asegurar la integridad en los muestreos y prevenir la contaminación transversal del agua subterránea.

La precisión de la toma de niveles es función de la metodología elegida y de las condiciones operativas seguidas. En la mayoría de los casos, una precisión de 0,01 m puede considerarse suficiente.

Cinta mojada

El método manual llamado frecuentemente *de la cinta mojada* ha sido el más aplicado en el pasado pero ya está en desuso. Consiste en suspender un peso de una cinta forrada de plástico o de un cable flexible, desde la boca del pozo hasta un punto por debajo del nivel del agua (UNESCO, 1998), con su último metro aproximadamente recubierto de tiza o de un engrudo que cambie de color al contacto con el agua. El nivel del agua subterránea se obtiene así descontando de la medida de referencia indicada en la boca del pozo la longitud de cable hasta la parte sumergida, que corresponde al tramo que ha perdido la tiza o cambiado de color. Esta medida puede conllevar errores porque se moje el cable por encima de la verdadera señal, con agua que haya o surja de las paredes del pozo. Este método no es recomendable si el pozo se utiliza también para vigilar la calidad del agua subterránea dado que la tiza o engrudo aportado puede contaminarla. Se pueden fácilmente medir así profundidades de 50 a 100 metros.

Sonda acústica (Dipper & Popper)

Se trata (Dipper) de una sonda cilíndrica enganchada a un cable, con un espacio hueco en su extremo que produce una señal audible al alcanzar la superficie del agua. Existe otro dispositivo muy parecido (Popper): un cilindro metálico con el fondo cóncavo que va atado al final de un cable o cuerda; al chocar el cilindro en su bajada con la superficie del agua, se oye un claro sonido ("pop"). La profundidad del agua suele determinarse después de subir y bajar la cuerda unos pocos centímetros, repitiendo el movimiento unas cuantas veces, y es igual a la longitud de la cuerda, normalmente medida tomando como referencia algún punto del borde del pozo.

Sonda con dos electrodos

Este equipo consta de una cinta o cable recubierto de plástico, con una sonda conectada en su extremo, que se transporta a mano enrollado en un carrete. La sonda contiene un par de electrodos dispuestos muy cerca uno del otro: el circuito eléctrico entre ellos se cierra al sumergirse en el agua subterránea. Si el metal de los electrodos es distinto se puede medir un potencial en superficie con un voltímetro; si no, la inserción de una batería en el circuito posibilita

que una señal, visible o audible, aparezca en el carrete a través de una bombilla o de un timbre: la profundidad del nivel se lee entonces en el cable. Con este método se pueden alcanzar profundidades mayores de 750 m, según sean la longitud del cable, el tipo de circuito eléctrico, y el material y peso de todo el equipo. La precisión obtenida es comparable a la que consiguen los aparatos inerciales (ver delante), si bien se han señalado errores de 0,15 m a grandes profundidades (del orden de 500 m); sin embargo, si sólo se trata de medir el nivel a estas grandes profundidades y si siempre va a usarse el mismo aparato de dos electrodos, entonces se puede alcanzar una precisión de milímetros. El pequeño diámetro de esta sonda permite su aplicación en piezómetros muy estrechos. Estas cintas de medida y cables marcados que se utilizan para medir los niveles, conviene que sean verificados periódicamente a causa de posibles estiramientos en su longitud.

Aparatos inerciales

Se denomina de esta manera a un peso sujeto por un cable que baja por el pozo a una velocidad constante: cuando el peso alcanza la superficie del agua un mecanismo de freno detiene el movimiento. Un contador indica la profundidad del nivel, que puede superar los 100 m, con una precisión alta si el estiramiento del cable es despreciable.

Transductor de presión

Este tipo de sonda transforma la presión del agua en una señal eléctrica, con un indicador de tensiones u otras técnicas más caras. La relación entre la presión del agua y la señal eléctrica emitida es prácticamente lineal, pero debe ser determinada en el laboratorio teniendo en cuenta la longitud real del cable y los efectos de las conexiones. Este aparato se introduce en el pozo por debajo de la mayor profundidad que pueda alcanzar el nivel del agua, quedando allí. La tecnología del sistema más barato garantiza una precisión suficiente sólo en un rango limitado. La temperatura afecta a esta sonda tanto en su parte electrónica como en la mecánica. Sus medidas de la presión del agua se hacen en relación a un valor de referencia que suele ser la presión atmosférica, dado que están abiertas a la atmósfera normalmente a través de un tubo fino de plástico que va con el cable de suspensión. Estas medidas pueden verse afectadas por obstrucciones o cambios de temperatura debidos al efecto de la luz del sol; se pueden obtener “medidas de presión absoluta” si el transductor calibra las mediciones en una cámara al vacío. Para reducir la frecuencia de las verificaciones se puede usar una sonda de presión sin contacto con el aire, pero este tipo conlleva una corrección de presión barométrica que ha de ser registrada aparte. Los inconvenientes frente a los registradores mecánicos son: presenta una vida útil más corta, es sensible a los rayos, los cambios de temperatura exterior pueden afectar, hay riesgo de infiltraciones y puede presentar desviaciones; estas desviaciones han de ser controladas con mediciones manuales periódicas, y los otros problemas podrían solventarse mediante un buen diseño e instalación. Este equipo puede ser una buena solución para puntos remotos expuestos al vandalismo, y en sondeos sometidos a fluctuaciones de tipo artesiano. La presión puede convertirse fácilmente en metros de columna de agua si se conoce la densidad del agua y ésta es prácticamente homogénea y constante, condiciones que no se dan en los casos de intrusión marina o de grandes cambios térmicos.

Registro mecánico con flotador (Limnógrafo)

Este registro, de gran aplicación, se basa en un flotador unido a un contrapeso mediante un cable que pasa por una polea: el aparato se coloca encima del pozo de observación, con el flotador y el contrapeso en su interior si el diámetro lo permite. La precisión, en general muy al-

ta, aumenta cuanto mayor sea el diámetro del flotador. El cable debe ser lo suficientemente largo como para asumir las oscilaciones del nivel durante el tiempo transcurrido entre las visitas del operario. El giro de la polea es transformado en el movimiento vertical de un marcador sobre una hoja de papel enrollada en un tambor cuya rotación mide el tiempo, o bien se transforma mediante un eje codificador en un formato digital que se almacena en un registrador de datos; en este caso, a diferencia del primero, el nivel del agua no queda registrado en continuo sino en intervalos de tiempo. Un mantenimiento cuidadoso del equipo es extremadamente importante: en cada visita que haga el técnico, deberá comparar el nivel registrado de esta manera con el que él mida manualmente. Los marcadores de tinta o los rotuladores pueden secarse rápidamente en ambientes áridos, por lo cual deberán revisarse con frecuencia; las hojas enrolladas suelen tener que cambiarse mensualmente, con el correspondiente coste elevado en personal. Alternativamente y especialmente en zonas remotas, puede resultar conveniente utilizar un registro automático de datos. Este aparato de flotador puede ser una buena solución de compromiso frente a otros métodos automáticos, en particular si se van a ir aplicando sensores de presión o ultrasónicos cada vez con mayor frecuencia.

Sensores ultrasónicos

Este tipo de sonda emite unos impulsos ultrasónicos que, reflejándose en la superficie del agua, alcanzan de nuevo la sonda: el tiempo que transcurre entre la emisión y la recepción de la señal, está relacionado linealmente con la profundidad del agua desde la sonda. Estas sondas se pueden situar igualmente encima o debajo de la superficie del agua, pero en este segundo caso se presentan muchos problemas de mantenimiento por lo que es preferible evitarlo. Son sensibles a la temperatura y a la humedad. Van generalmente conectados a un registrador automático de datos.

Sistema de tubo de aire o sensor de burbujeo

El método de la vía de aire se basa en el principio del burbujeo: un tubo fino de plástico, cobre o acero, de longitud conocida y con diámetro interior de unos 2 mm, se instala a lo largo del sondeo con el final siempre sumergido; tanto el tubo como sus conexiones han de ser estancos y permitir el paso del aire libremente. Al bombear aire desde la boca del pozo por este tubo, la presión en su interior aumenta hasta que toda el agua que contenía es expulsada y comienza a burbujear el aire: se determina entonces la presión del aire y se calcula con ella la altura de agua que hay por encima del fondo del tubo. En los pozos someros puede utilizarse una bomba de aire manual o un compresor. Los equipos modernos consisten en una unidad que contiene una bomba con micropistón y el registro automático de datos, todo junto en una especie de cilindro de unos 60 cm de largo y unos 5 cm de diámetro. La cadencia de las medidas deberá superar los 5 minutos, debido a la fase de llenado-vaciado del tubo y al funcionamiento de la bomba.

Sonda acústica de resonancia

La resonancia acústica del aire en el sondeo puede conseguirse cuando la longitud de la columna de aire en su interior es igual a un múltiplo impar de $\lambda / 4$ (siendo λ la longitud de onda) del armónico correspondiente (Margane, 2004); la señal acústica se crea mediante un generador de baja frecuencia emitiendo ondas entre 0,1 y 100 Hz. Puede ser de aplicación en sondeos curvados, profundos y de pequeño diámetro. La medición depende de la temperatura y de la humedad, y conlleva un alto consumo energético.

Tabla C1 – Equipos normalmente utilizados para medir el nivel piezométrico

Tipo	PA	CM	Método	Registro de datos	Ventajas, Precisión	Inconvenientes	Coste, Atenciones
Manual	Sí *	No	Cinta mojada o cable flexible	Señales marcadas en cinta (de acero)	Preciso si no es muy profundo (0,003 m máximo.)	Necesidad de varias medidas para encontrar la profundidad	Precio muy bajo / Fácil de construir y de usar
	Sí *	NR	Medida "de oído"	Señales marcadas en cinta (de acero)	Preciso dentro de 0,01 m / Rápido	No aplicable en ambientes con ruidos	Precio muy bajo / Fácil de construir y de usar
	Sí *	NR	Sonda con dos electrodos	Señales marcadas	Rápido, sencillo/ Pequeño diámetro y gran profundidad / Precisión decrece con profundidad	Calibración / Mantenimiento / Baterías / Supervisión de cables	Precio bajo a moderado / Fácil de manejar
	Sí *	Sí	Aparatos inerciales	Señales marcadas	Preciso dentro de 0,01m Rápido y sencillo	Calibrar contador	Precio moderado / Fácil de manejar
	Sí	No	Manómetro o medidor de presiones	Anotación o registro automático	Rápido y sencillo en pozos artesianos / Precisión 0,03 a 0,15 m	No útil cuando el sondeo ya no es artesiano / Calibración necesaria	Precio bajo moderado / Fácil de manejar / Comprobar
Automático	Sí	Sí	Transductor o sonda de presión	Registro automático	Máxima precisión entre 0,002 y 0,010 m / Sencillo	Afecta la temperatura / Conexión atmosférica / Calibración necesaria	Precio medio a alto / Comprobar con regularidad
	No	Sí	Registrador de flotador con boya	Hoja cilíndrica o registro automático	Precisión: 0,001-0,005m Utilizado ampliamente	Retraso del flotador / Fallos mecánicos / Diámetro sondeo ancho	Precio alto / Mantenimiento y comprobación habitual
	No	Sí	Sensores ultrasónicos	Registro automático	Precisión: 0,005-0,020m Sencillo / Sin contacto con el agua	Temperatura y humedad afectan/ Tipos subacuáticos no deseables	Precio alto / Comprobación con regularidad
Ambos	No	Sí	Tubo de aire o sensor de burbujeo	Anotación o registro automático	Precisión entre 0,01 y 0,08 cm	Instalación no tan sencilla/ Cadencia de medidas limitada	Precio medio a alto / Comprobar con regularidad
	No	No	Sensor acústico de resonancia	Anotación o registro automático	En sondeos profundos, de pequeño diámetro, con posible curvatura.	Temperatura y humedad afectan / Alto consumo energético	Precio muy alto

PA: Pozo Artesiano

CM: Aplicable en Canales y Manantiales

(*): Sólo con extensión de la tubería por encima del suelo (menos de 2 m)

NR: No Recomendado

Referencias: Nielsen, 1991; OHIEPA, 1995; WMO, 1994; UNESCO, 1998, 2004; Margane, 2004

C2.4 Recogida, almacenamiento y transferencia de los datos

La recogida de los datos puede hacerse sobre formularios impresos, hojas adosadas a un tambor o con registradores de datos (data-logger). Con un pequeño aprendizaje, los formularios pueden ser utilizados por los operadores o por los propios dueños de los pozos, para realizar las mediciones manuales.

Los data-loggers facilitan hoy en día el registro de los datos. Se trata de unas unidades sólidas, selladas, que no requieren cambios frecuentes de batería (anual o incluso menos, en función de la frecuencia de las tomas y descargas). La información puede ser registrada a distintos intervalos de tiempo o según un esquema variable. Una alternativa mejor reside en el *registro cuando hay evento*, que consiste en que se hace la lectura, p.ej. cada 15 s de intervalo, y sólo se guarda en memoria si difiere del anterior registro en una cantidad o porcentaje preestablecido (ISO, 2003). Los datos pueden ser volcados o recuperados con unos dispositivos específicos de descarga manual como, por ejemplo, un ordenador portátil o de mano tipo Palm, o

mediante una agenda electrónica. Se puede acceder a ellos también mediante equipos telemétricos.

Los data-loggers modernos a veces se integran en subsistemas de almacenamiento-y-control (WMO, 1994), los cuales pueden llevar a cabo complejos análisis de datos en tiempo real y utilizar estos análisis para calcular información derivada, comprimir datos o seleccionar una acción determinada. El subsistema actúa en función del valor que recibe desde la unidad de medición: por ejemplo, puede tomar más datos adicionales o bien enviar una señal al subsistema de telemetría lanzando un mensaje de alerta o de alarma.

El subsistema telemétrico se puede describir mediante tres elementos, que son: el sitio remoto (un pozo o un grupo de puestos de observación próximos), el medio de comunicación (por radio o vía telefónica) y la estación receptora central. La comunicación suele ser sólo desde el sitio remoto a la central receptora, si bien con algunas configuraciones es posible en ambos sentidos; en el primer caso, la estación remota está generalmente programada para transmitir los datos, y en el segundo el sitio remoto inicia la transmisión después de transcurrido un tiempo determinado o bien cuando los datos han superado un cierto umbral.

El suministro de energía eléctrica y el vandalismo son los mayores problemas en los sitios remotos. Si no hay electricidad, es ineludible recurrir a paneles solares y baterías recargables, lo cual no sólo tiene implicaciones en el coste sino que además puede incrementar el riesgo de vandalismo. Si los datos se transmiten sólo una vez al día, unas baterías estándares son suficientes; en cualquier caso, los equipos de acción remota son capaces en la actualidad de enviar datos relativos al estado de las baterías, reduciéndose así el peligro de fallos por su eventual descarga.

En los subsistemas de telemetría actuales se utiliza comunicación mediante microondas, radio o líneas telefónicas (WMO, 1994). En el primer tipo la transmisión se realiza sin soportes, mientras que en el segundo puede utilizarse también un medio adecuado, vía terrestre o vía satélites en órbita.

El flujo operativo de datos debe estar claramente organizado, con grupos de control planificados, sistemáticos y periódicos. Un procedimiento que se sugiere podría consistir en (UN/ECE, 1999):

1. Cargado de datos manual, desde formularios entregados por los operarios:
 - Un cargador controla y verifica los datos que introduce otro cargador. Después de esta comprobación, los datos pasan a un primer nivel de calidad.
 - Los datos cargados se almacenan en una base de datos primaria.
2. Cargado digital de datos, desde un soporte magnético o recibidos por el sistema telemétrico:
 - Se aplican comprobaciones estándares sobre los datos, relativas a equivocaciones triviales como errores al cargarlos, datos omitidos, casillas vacías, valores imposibles, códigos incorrectos en las cadenas o en los números, etc., antes de generar las bases de datos primarias.
3. Cargado de datos desde una hoja de tambor:
 - Un técnico especializado transforma los datos de dicha hoja en una tabla de datos acorde con los intervalos definidos, o bien digitaliza la hoja y obtiene la misma tabla de datos mediante un software adecuado.
 - Otro técnico comprueba el resultado.

- El resultado obtenido con el software pasa a las bases de datos primarias y si no es enviado al punto 1.
4. Operaciones periódicas de transferencia y confirmación de calidad:
- Al final del periodo de vigilancia definido (semana, mes, temporada, etc.) se cargan todas las bases de datos primarias en la base principal, después de pasar las comprobaciones estándares de calidad y cualquier control lógico relativo a la situación del pozo, a la profundidad del sondeo y de las rejillas, a la profundidad del nivel piezométrico medido, etc.
 - Se verifican las series temporales de piezometría aplicando pruebas típicas del análisis de series temporales para detectar valores extremos imposibles así como para comprobar la homogeneidad estadística de los datos.
 - Las series temporales y los datos nuevos se verifican aplicándoles representaciones gráficas (diagramas y mapas) y, si es el caso, herramientas geoestadísticas.
 - Los datos que son rechazados se verifican de nuevo.
 - Todo dato cargado recibe una etiqueta de calidad donde se indica el tratamiento que se le ha aplicado.

C2.5 Problemas encontrados frecuentemente

La práctica en el seguimiento de las aguas subterráneas muestra que los resultados pueden verse negativamente afectados por problemas de naturaleza diversa relacionados con aspectos de índole práctica o hidrogeológica, o por el tipo de equipo utilizado. A efectos de evitar una pérdida irreversible de los datos, o bien que no sirvan para los objetivos previstos en el seguimiento, se recomienda analizar estos problemas y ver la manera de superarlos. Algunos de estos aspectos están en relación directa con las características del sondeo, por lo que deberían tenerse en cuenta a la hora de diseñar la red de vigilancia. Sigue a continuación una descripción concisa de algunos problemas frecuentemente encontrados (Margane, 2004).

Vandalismo

Se trata de un gran problema, especialmente en zonas remotas. La mejor opción ciertamente consistiría en utilizar equipos sumergidos, que en consecuencia serían menos visibles; pero esto no es siempre posible, ya sea porque el nivel es demasiado somero o porque existe el riesgo de inundación por agua superficial o después de una lluvia, o bien porque se pretende enviar los datos de forma telemétrica. Conviene entonces que las instalaciones sobre el terreno se encuentren guardadas en una caseta suficientemente resistente, que a su vez esté protegida con un cierre lo bastante seguro; en áreas habitadas puede ser útil y necesario contratar un vigilante. Una alternativa mejor consiste a menudo en poner las instalaciones dentro de recintos públicos o privados de uso permanente; en este caso, puede que haya que aportar una compensación. Pero en cualquiera de los casos, es conveniente establecer un acuerdo claro y oficial sobre el derecho de acceso a estas instalaciones.

Se recomienda actuar siempre de manera que sea de conocimiento público; por ejemplo, indicar mediante una nota clara y sencilla, que el punto de vigilancia es un sitio público destinado para el bien común y que en su interior no hay nada que pueda ser de interés para las personas ajenas.

Desviación de la verticalidad y presencia de irregularidades en las paredes del sondeo

La perforación del sondeo debe ser recta y sus paredes lisas, especialmente en el caso de piezómetros. Si se desvía de la vertical o si tiene irregularidades en sus paredes, el pozo puede más adelante presentar problemas con los equipos, con los cables, sondas y flotadores, que se pueden atascar o no funcionar adecuadamente, como p.ej. los sensores ultrasónicos que requieren estar situados en la visual desde la boca del sondeo hasta el nivel del agua. Por lo tanto, se garantizará la verticalidad durante la perforación del sondeo y para el entubado se utilizarán sólo materiales que presenten una superficie interior lisa.

Registro del nivel de agua en roca dura

Cuando la matriz es rocosa y se entiende que la obra se va a mantener estable, como en calizas o areniscas, el entubado es frecuentemente innecesario en los sondeos de extracción, pudiendo considerarse la obra desnuda en sí. Sin embargo, en un sondeo de observación puede ser necesaria la instalación de una tubería con o sin rejilla, dependiendo de la profundidad del nivel del agua, de la profundidad a que se corta la capa productiva y del tipo de equipo utilizado para la observación; en particular, los flotadores pueden atascarse cuando el nivel baja, y esto sólo se va a notar al cambiar las hojas de tambor o al hacer la transferencia de los datos. Se recomienda en consecuencia revestir con la tubería, ranurada o no, por lo menos hasta la profundidad máxima que pueda alcanzar el nivel del agua.

Niveles piezométricos en bajada continua

Si el nivel del agua baja de manera continuada debido a una sobreexplotación, después de un cierto tiempo puede llegar a ser necesario tener que bajar también los transductores en el sondeo. En aquellos casos en que sea de esperar una evolución de este tipo, se recomienda adquirir un equipo que pueda adaptarse a esas variaciones; en consecuencia, el rango de las medidas debe ser suficientemente amplio, el cable lo bastante largo, y favorables las condiciones para prolongar el cable. Más aún, y más importante, es que los sondeos han de tener la profundidad suficiente para que las medidas puedan tomarse a lo largo de toda la vida del programa de seguimiento. Si el descenso del nivel ocurre en acuíferos heterogéneos, la variación de la sección saturada en el pozo y en el acuífero puede ser origen de problemas complicados en la interpretación y también de cambios en la composición hidroquímica (e isotópica) del agua subterránea. En este caso, se debería utilizar un piezómetro múltiple.

Sellado insuficiente

Si hay que vigilar sólo un horizonte particular en un acuífero, o en acuíferos superpuestos, es indispensable asegurar que las demás capas quedan perfectamente aisladas en los sondeos que las atraviesen. Normalmente esto se lleva a cabo haciendo la perforación en telescopio y cerrando los tramos “indeseables” con un sellado anular y/o cemento. Sin embargo, esto no siempre es posible y el sellado anular puede a veces no ser impermeable del todo, o bien encontrarse en un sitio que no es el que debiera (se puede verificar que está en el lugar correcto aplicando técnicas geofísicas, o sea utilizando arcilla salpicada de magnetita en el sellado y haciendo después un registro magnético en la perforación). También puede ocurrir que el entubado empiece a gotear no inmediatamente después de instalado sino un tiempo más tarde, es decir a causa de los trabajos de acondicionamiento o por afección de subsidencia en el terreno. Es por lo tanto recomendable controlar la posición de los sellados anulares, con o sin ce-

mentación, a lo largo de la instalación y comprobar la estanqueidad de las uniones a intervalos regulares.

Problemas relacionados con la subsidencia del terreno

En el seguimiento de la piezometría puede ocurrir que un objetivo consista en vigilar el nivel del agua en un área afectada por subsidencia (Kühn et al., 2003). A efectos de evitar que la medición de los niveles o de la composición hidroquímica llegue a perder representatividad en un pozo de observación en un área así, o bien para que no empiece a entrar agua en el sondeo procedente de otro acuífero que el estudiado, se recomienda lo siguiente: elegir los extremos superior e inferior del tramo enrejillado asumiendo el efecto de la subsidencia durante todo el tiempo que dure el seguimiento; hay que asegurar al construir el cabezal del sondeo, que tanto éste como el entubado pueden moverse libremente y adaptarse a las diferencias en la subsidencia y compactación del terreno.

C3 *La medición de la descarga en pozos y manantiales*

La descarga a través de pozos, galerías de drenaje, caudales de base y manantiales, puede determinarse con unos métodos sencillos, que se describen brevemente a continuación.

Los manantiales y los caudales de base representan una fuente destacable de abastecimiento en muchos lugares, especialmente en regiones áridas. La descarga artificial a través de galerías horizontales para regadío o consumo humano, significa también un suministro importante de agua en muchas zonas de Oriente Medio, Norte de África y partes de Asia (UNESCO, 1998); estas fuentes, que dan fácilmente ocasión al desarrollo mediante la aplicación de grupos moto-bombas en los pozos, pueden considerarse como si fueran manantiales.

Si en un manantial se miden su nivel y su descarga, ésta deberá medirse aguas abajo; una discontinuidad hidráulica, como un derrumbe, debiera poder detectarse entre dos medidas o dos puntos. En todo caso debiera evitarse cualquier tipo de alteración, relativa a los aparatos de medida de los niveles en el agua. Las medidas del flujo de base van normalmente incluidas en la red de vigilancia de las aguas de superficie. Se dispone de una cantidad considerable de literatura para el diseño de las redes hidrométricas (p.ej. WMO, 1972).

Conviene identificar los manantiales y galerías horizontales más importantes, y aforar sus descargas una vez al mes, en general, en el sitio mismo de la descarga o en un punto cercano. La descarga a través de manantiales difusos—como son los constituidos por muchos manantiales pequeños y próximos— suele medirse igual que un curso de agua, inmediatamente aguas abajo del área de surgencia. Una descripción detallada de cualquier tipo de aforo se puede encontrar en WMO (1972).

Método volumétrico

Este método es el más sencillo y probablemente el más barato para medir los caudales de descarga. Consiste en medir el tiempo que tarda en llenarse un recipiente (p.ej., un bidón de gasoil), cuya capacidad debe calcularse con la mayor precisión posible. Este método es aplicable sólo cuando el caudal de la descarga es pequeño en comparación con el volumen del recipiente (el tiempo de llenado no debe ser inferior a diez segundos), y también sólo cuando no hacen falta medidas continuas, puesto que tendrá que ser llevado aparte y vaciado antes de poder utilizarlo de nuevo.

Aforo mediante represa con vertedero

Un método simple para aforar un bombeo o un manantial pequeño consiste en utilizar un depósito que recoge el agua, de donde vierte por una salida en V o rectangular. La precisión de la medición depende sobre todo de las dimensiones de la salida y de la exactitud con que se mida la altura del agua, así como en la aplicabilidad del coeficiente usado en la fórmula de la descarga, coeficiente cuyo grado de incertidumbre no debería superar el 1% si se opera cuidadosamente (ISO, 1980, 2003). Resulta primordial eliminar cualquier turbulencia originada al entrar el agua, lo cual puede conseguirse aplicando un pequeño canal conductor rectangular o unos deflectores.

El depósito de recogida puede ser transportable, para mediciones periódicas, y debe estar dimensionado para un caudal máximo de 20 L/s, p.ej., pudiéndose utilizar dos depósitos iguales para descargas mayores o bien una estructura permanente; estos equipos fijos deben dimensionarse para un rango razonable de caudales. Con este método, el nivel del agua estabilizada se puede medir con más precisión si se utiliza un indicador de gancho o, en las instalaciones fijas, mediante un registro de flotador o una sonda de presión. En cualquiera de los casos, el registro debe ser capaz de medir el nivel del agua con una resolución de 1 mm.

Método del cubo con orificio

Este método consiste en un bidón o balde cilíndrico con unas aberturas circulares en su fondo (Kruseman & De Ridder, 1990), por donde sale el agua que entra en él. Se llena hasta un cierto nivel en el que la presión del agua hace que la saliente por los orificios sea igual a la entrante desde la bomba. Si el depósito llegara a rebosar, se le hacen uno o dos orificios más; y si no se consigue lámina de agua estable, se le cierran uno o varios agujeros. En la parte exterior del recipiente hay un tubo (piezómetro) que está conectado cerca del fondo, con una escala vertical que permite leer con precisión el nivel que alcanza el agua en el interior del recipiente; es necesaria una curva de calibración, con el valor de la descarga a través del o los orificios.

Método del contador volumétrico

Cuando es asequible hacer pasar el flujo por un tubo a presión, una solución fácil y barata consiste en utilizar un contador volumétrico comercial para el agua, junto con un cronómetro: el volumen total que ha pasado se lee periódicamente en el contador, y el caudal medio entre dos lecturas consecutivas se obtiene dividiendo su diferencia por el tiempo transcurrido. Se pueden utilizar caudalímetros totalizadores electrónicos, con la ayuda de un registrador de datos (data-logger)

Método del rotámetro

El medidor de área variable, llamado rotámetro, consiste esencialmente en un flotador pequeño dentro de un segmento de tubo (tronco-) cónico, que se instala fácilmente a lo largo de la tubería, pero en posición vertical. El flotador permanece quieto en el fondo del segmento si el flujo es nulo; al entrar el líquido por el fondo del segmento, el flotador comienza a subir, hasta una altura que depende del caudal que pasa: su posición de equilibrio se da en el punto en que la diferencia de presiones entre su base superior e inferior es igual a su peso, siendo por lo tanto esta diferencia de presiones constante. Entre sus ventajas figura que el caudal que está pasando puede leerse directamente y de manera continua sobre una escala al lado de la tube-

ría, sin necesidad de instrumentos secundarios de lectura; pero también pueden utilizarse sensores automáticos que detecten la posición del flotador. Los rotámetros se fabrican en vidrio, metal o plástico, para diversos rangos de caudal.

Método de la lámina delgada con orificio

La lámina con orificio es un dispositivo muy común para medir el caudal que pasa por una tubería a presión. Consiste prácticamente en una pequeña placa circular de acero con un orificio perfectamente circular en su centro, que se fija al final de la tubería, inmediatamente antes (o no) de la caída libre del agua en un tanque o depósito. El caudal de descarga del bombeo o del manantial se calcula midiendo la altura que alcanza el agua en un piezómetro fino, o en un manómetro, que se anexiona al orificio circular de la lámina, y teniendo en cuenta las características particulares de la geometría del tubo y del orificio, de las que existen muchas combinaciones posibles para su aplicación (ISO, 2003). También hay en el mercado unos dispositivos portátiles en forma de manguito que rodea a una lámina circular con orificio en su centro, y que son adaptables a cualquier tipo de instalación; pueden tener un orificio cilíndrico con una boquilla de borde afilado, redondeado en 180 grados o en 90, o bien un orificio con segmento o con doble cono, características acordes con las condiciones propias al uso deseado; la lámina en cuestión puede ir fijada al manguito mediante soldadura o rosca, o bien todo ello mecanizado en una sola pieza. Se puede hacer también un orificio en el tope que cierra la tubería, o en un trozo de chapa de 4 a 7 mm de grosor que se acopla después a la tubería, cuidando siempre que el orificio esté bien torneado, en forma verdaderamente circular de borde afilado y libre de óxido, picaduras o imperfecciones. La relación entre el diámetro del orificio y el diámetro interior de la tubería de descarga, se recomienda que sea de 0,4 a 0,85 (ISO, 2003).

Método del tubo Venturi

El tubo de Venturi es un dispositivo clásico que se inserta en la tubería para medir caudales en los casos también de flujos a baja presión. Consta, en la dirección del flujo, de un cilindro de entrada seguido de un estrechamiento cónico que se abre después mediante otro cono más largo, el cual se une nuevamente a la tubería a través de un cuello. Se obtiene la medida del caudal mediante la diferencia de presiones observadas antes de la sección Venturi y en su punto de estrechamiento mayor. Los tubos Venturi clásicos se construyen de diversas maneras; sus distintas partes pueden estar muy acabadas o no, el cono de entrada puede ir soldado. Los tubos Venturi provocan pérdidas de carga muy bajas y requieren espacios cortos aguas arriba.

Si se utiliza una bomba eléctrica y se conocen bien todas las características del sistema constituido por la fuente de energía, la bomba y las conexiones hidráulicas, entonces los volúmenes bombeados y la descarga pueden calcularse en función del consumo de energía eléctrica (López et al., 1998); la medición de la electricidad es prácticamente gratuita en el caso de suministro exclusivamente para el bombeo. Si las características del sistema mencionado no pueden llegar a conocerse bien, entonces deberá calibrarse.

Tabla C1: Selección de métodos simples normalmente utilizados para medir la descarga del agua subterránea

<i>Método</i>	<i>Pozo</i>	<i>Manantial</i>	<i>Canal abierto</i>	<i>Conducción a presión</i>	<i>Manual o automático</i>	<i>La Precisión es función de:</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Inconvenientes</i>	<i>Coste</i>
Depósito volumétrico	Sí	Sí	Sí	NR	M	el volumen del depósito y del tiempo de medida	Equipo transportable, muy fácil de manejar	Para descargas pequeñas, discontinuas	Muy bajo
Represa con vertedero	Sí	Sí	Sí	NR	Ambos	la altura de agua y del vertedero, requiere baja velocidad aguas arriba	Equipo transportable modular, fácil de instalar	Requiere operadores especializados y cálculos hidráulicos	Bajo
Depósito con orificio	Sí	Sí	Sí	NR	M	la medición de la altura de agua y de la calibración	Equipo transportable modular, fácil de instalar	Requiere operadores especializados, cálculos hidráulicos y calibración	Bajo
Medidor volumétrico	Sí	Sí	No	Sí	Ambos	la construcción mecánica y de la calibración	Medición fácil, pérdidas de energía bajas	Problemas en caso de turbidez o partículas en suspensión	Bajo a medio
Rotámetro	Sí	Sí	No	Sí	Ambos	la construcción mecánica y de la calibración	Medición fácil, en continuo, pérdidas de energía bajas	Disposición en vertical, rango no muy amplio	Bajo a medio
Lámina con orificio	Sí	Sí	No	Sí	Ambos	la medición de la altura de agua, de la construcción mecánica o de la calibración	Medición fácil, pérdidas de energía bajas, equipo obtenible por tornero o especialista	Problemas en caso de turbidez o partículas en suspensión	Bajo a medio
Tubo Venturi	Sí	Sí	No	Sí	Ambos	la medición de la presión y de la construcción mecánica o de la calibración	Medición fácil, pérdidas de energía bajas, equipo obtenible por tornero o especialista	Calibración útil si es de fabricación propia	Bajo a medio

NR: No Recomendado.

Referencias: UNESCO, 1998; WMO, 1972; ISO, 1980, 2003; Kruseman & De Ridder, 1990; López et al., 1998.

C4 Referencias y literatura recomendada

- Bartram J. & Balance R. (1996) - Water quality monitoring. UNEP, WHO, London.
- ISO (1980) - Water flow measurement in open channels using weirs and Venturi flumes - Part 1: Thin-plate weirs.. Int. standard, 1438-1, Geneva.
- ISO (2003) - Hydrometric determinations - Pumping tests for water wells - Considerations and guidelines for design, performance and use. Int. standard, 14686, Geneva.
- Kruseman G. P. & De Ridder N.A. (1990) - Analysis and Evaluation of Pumping Test Data. ILRI, Wageningen, 378 pp.
- Kühn F., Margane A., Tatong T., & Wever T. (2004): InSAR-based land subsidence map for Bangkok/Thailand. Zeitschrift für Angewandte Geologie (ZAG), 50, 104, Stuttgart, Germany.
- López Geta J.A., Rubio Campos J.C., González Ramón A., Delgado Pastor J. & Sánchez Pérez J. (1998) - Guía para la evaluación de extracciones de aguas subterráneas mediante contadores eléctricos. Rendimiento y coste del agua. IGME), Madrid, Spain.
- Margane A. (2004) – Guideline for groundwater monitoring. BGR and ACSAD Technical Cooperation Project “Management, protection and sustainable use of groundwater and soil resources in the Arab Region”, 7, Damascus.
- Nielsen (1991) - Practical handbook of ground-water monitoring. Lewis Publishers, Chelsea, pp 717.
- OHIEPA (1995) -Technical guidance manual for hydrogeologic investigations and ground water monitoring. Ohio Environmental Protection Agency, Columbus, Ohio, USA.
- USEPA (1991) - Handbook of suggested practices for the design and installation of ground-water monitoring wells. US-EPA, 160014-891034, Ed. by Aller L. T., Bennett W., Hackett G., Petty R. J., Lehr J. H., Sedoris H., Nielsen D.M. & Denne J. E. Las Vegas, Nevada.
- USEPA (1992) - RCRA Ground-Water Monitoring Draft Technical Guidance. U.S. EPA, Office of Solid Waste, Washington, D.C..
- UNESCO (2004). Groundwater studies. UNESCO IHP VI, Series on groundwater, 3, Ed. by Kovalevsky V.S., Kruseman G.P. & Rushton K.R., Paris.
- UNESCO (1998) - Monitoring for Groundwater Management in (Semi-) Arid Regions. UNESCO, Studies and Reports in Hydrology, 57, Ed. by Henny Dr. Ir & van Lanen A. J., Paris.
- UN/ECE (1999) – State of the art on monitoring and assessment of groundwater. Task force on monitoring & assessment, Lelystad.
- WMO (1972) – Casebook on hydrological network design. World Meteorological Organisation, 324, Geneva.
- WMO (1994) - Guide to hydrological practices. World Meteorological Organisation, 168. Geneva.

Literatura recomendada

- Taylor C. J. & Alley W. M. (2001) - Ground-Water-Level Monitoring and the Importance of Long-Term Water-Level Data. USGS, Circular 1217.
- UN/ECE (2000) – Guidelines on Monitoring and Assessment of Transboundary Groundwaters. Task force on monitoring & assessment, Lelystad.
- USEPA (1989) - Ground-Water Monitoring in Karst Terrains: Recommended Protocols and Implicit Assumptions. EPA, 600/X-89/050, Ed. by Quinlan J. F., 79 pp.

Anejo D: Toma de muestras para la calidad del agua subterránea

El Anejo D reproduce una parte de:
Volume 6 – Manual on “Groundwater Quality Sampling”
producido y publicado por el “*Hydrology Project*”, India.

Cuando se está llevando a cabo una campaña de muestreo de la calidad de las aguas subterráneas, el objetivo principal debe consistir en obtener una muestra representativa de la masa de agua que se está investigando, así como en guardarla y transportarla con las alteraciones mínimas hasta el laboratorio para su análisis. Los procedimientos para tomar, guardar y analizar estas muestras así como para evaluar los resultados analíticos correspondientes, deben garantizar que los datos son del tipo y calidad necesarios para alcanzar los objetivos del programa de seguimiento.

D.1 Mediciones en campo

Algunos parámetros relacionados con la calidad del agua subterránea van a sufrir probables alteraciones, de manera significativa, una vez tomada la muestra —como consecuencia del cambio de temperatura, de la desgasificación, de la precipitación de algún compuesto— así como otras modificaciones químicas, físicas y biológicas, por lo cual dichos parámetros debieran ser medidos de inmediato en el campo mejor que en el laboratorio. En el marco del presente programa, hay cinco parámetros físico-químicos que se toman normalmente en el campo (también llamados, parámetros de campo), que son: temperatura (T), pH, conductancia eléctrica específica (CEE), potencial de oxidación-reducción (POR), y oxígeno disuelto (OD). En los apartados siguientes se encontrará una descripción de las técnicas que se pueden aplicar en el campo para medir estos parámetros. La medición de los parámetros de campo ha de representar las condiciones en el acuífero, debiendo ser medidos tan cerca del origen del agua como sea posible, en el terreno o a través de una derivación en la salida del caudal en el punto de muestreo.

Figura D.1: Medición de parámetros de campo del agua subterránea, en la salida del bombeo



Medición de la Temperatura (T)

La temperatura del agua subterránea es una medida de lo caliente o fría que está el agua con referencia a un valor estándar. Normalmente se mide en grados Celsius, utilizando un termómetro de líquido en vidrio convencional o un termómetro con termistor, dispositivo eléctrico a menudo incorporado a la mayoría de los demás instrumentos utilizados para realizar otras medidas del agua en campo (p.ej., pH o CE).

El termómetro puede ser calibrado en el laboratorio comparando sus lecturas con las de otro de precisión certificada. Si ello no es posible, siempre se puede comparar en campo su lectura de una muestra con la proporcionada por otro termómetro.

La temperatura del agua subterránea proporciona una información valiosa para interpretar la química del agua muestreada (profundidad aproximada muestreada, grado de mezcla) y las variaciones térmicas inducidas por procesos naturales o antrópicos.

Medición del pH

El pH del agua subterránea mide la actividad del ión hidrógeno en unidades logarítmicas ($\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$). Esta medición se lleva a cabo para determinar el equilibrio ácido (H^+) o alcalino (OH^-) del agua, según una escala común entre 0 (fuertemente ácido) y 14 (fuertemente alcalino). En las aguas ácidas de mina es frecuente tener un pH menor que 0.

La medición del pH puede realizarse de forma electrométrica con un electrodo de ión hidrógeno, o colorimétrica con papel indicador reactivo (que cambia de color según el pH del agua). Actualmente al ser relativamente baratos los pH-metros portátiles, es un método que se prefiere al de las tiras de papel indicador que sólo dan valores aproximados. Los pH-metros deben calibrarse cada día, antes de salir al campo, utilizando soluciones tampón certificadas.

Medición de la Conductancia Eléctrica Específica (CEE)

La CEE del agua subterránea (también llamada Conductividad Eléctrica) mide la facilidad del agua para conducir la corriente eléctrica, y está directamente relacionada con el tipo y concentración de los iones que se encuentran en disolución, si bien la correlación no es lineal.

La conductividad viene indicada normalmente en microsiemens por centímetro a 25 grados Celsius ($\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C). Esta medición puede realizarse utilizando alguno de los variados tipos de aparatos que hay en el mercado, que incorporan un medidor de la conductividad y un sensor de temperatura (para la compensación manual o automática).

NOTA: Mejor que utilizar diversos aparatos para medir la temperatura, el pH y la conductividad, existen aparatos que miden los tres parámetros, si bien *puede* resultar un poco más caro.



Figura D.2: Conductivímetro con termistor incorporado

Medición del Potencial de Oxidación Reducción (POR o Potencial Redox)

El POR es una medida del potencial de equilibrio respecto al electrodo estándar de hidrógeno, que se crea en la interfase entre un electrodo de metal noble y una solución acuosa que contiene especies redox electroactivas. No obstante, en las aguas subterráneas naturales la medición del POR debe considerarse sólo como indicativa y nunca como valor de equilibrio.

El POR puede medirse en campo mediante un par de electrodos (uno de referencia y el otro de platino) y un voltímetro en mV, o bien mediante un electrodo diseñado para este fin con una combinación sensible al potencial redox, siendo muy importante usar la solución electrolítica adecuada para rellenarlo, especificada por el fabricante del electrodo.

Es necesario calibrar el aparato de medida, lo cual debe hacerse al menos una vez al día antes de efectuar la primera medición. ZoBell's es la solución estándar (solución 0,1 KCl molal, conteniendo cantidades equimolales de $K_4Fe(CN)_6$ y $K_3Fe(CN)_6$) para verificar los instrumentos correspondientes, y puede adquirirse en el mercado o prepararse.

Una vez hecha la calibración, el POR del agua subterránea se puede medir sumergiendo el electrodo en una muestra de agua justo recién cogida, evitando lo más posible su contacto con el aire. Es importante recordar que un electrodo POR requiere a menudo unos minutos para alcanzar la estabilidad: la lectura, por lo tanto, habrá de hacerse después de alcanzar este momento de estabilización.



Figura D.3: pH-metro y potenciómetro Redox con termistor

Medición del Oxígeno Disuelto (OD)

El OD es el oxígeno molecular (oxígeno gas) disuelto en el agua subterránea y es muy importante descubrir sus cambios, causados por actividades de origen natural o humano. Existen dos métodos de campo para llevar a cabo esta determinación: el amperimétrico y el espectrofotométrico (técnica del Rhodazine-DTM, 1). El método amperimétrico es el estándar y consiste en un aparato medidor, de temperatura compensada, que utiliza un sensor polarográfico de tipo membrana. Los procedimientos de calibración y el uso mismo de los métodos disponibles, difieren según los diversos tipos de aparatos y marcas, y deben ser verificados aplicando las instrucciones del fabricante.



Figura D.4: Medidor de OD con termistor

D.2 Muestreo del agua subterránea

En general, hay que:

- asegurarse de que todos los preparativos están hechos, lo más tarde en la víspera de la salida a campo (ver la lista de comprobación, Tabla D.1);
- verificar que se conoce bien el camino de acceso a todos los sitios del muestreo. Tomar nota de señales de situación destacables en su área, a partir del mapa local correspondiente. En caso de ocurrir cualquier alteración en el muestreo del punto, anotarla en el impreso de identificación de la muestra, indicando las razones.
- antes de llenar la botella con la muestra, enjuagarla al menos tres veces con el agua que se está muestreando;
- dejar un poco de aire en la botella para que se pueda agitar la muestra, al ir a analizarla;
- poner adecuadamente una etiqueta en la botella, preferiblemente adjuntándola al cuello, con el número o código de la muestra y la fecha de su toma claramente anotados, o rotulados directamente en la botella;
- rellenar el impreso de identificación (Tabla D.3) de cada una de las muestras;
- este impreso debe ser completado en el punto de muestreo, cada vez que se toma una muestra; si se toma más de una botella en un sitio, se anotará también;
- los impresos de identificación deben guardarse todos en un fichero maestro en el laboratorio de nivel II ó II⁺ donde se analice la muestra.

Tabla D.1: Lista de comprobación en las salidas al campo para muestreo de calidad

• Itinerario para la salida (ruta, puntos a ver, horas previstas de salida y regreso)	• Medio de transporte adecuado para el personal y las muestras
• Mapa de la zona	• Mapa de situación de los puntos a muestrear
• Nevera portátil, con hielo o bolsas de hielo	• Muestreador (botella) lastrado
• Botellas de muestreo para medir DBO	• Cuerda
• Botellas para muestras especiales: bacteriológico, metales pesados, etc.	• Botellas para muestras
• Estabilizadores para las muestras (p.ej. disoluciones ácidas)	• Termómetro
• Papel absorbente	• Otros aparatos de medida en campo, si necesario
• Impresos de identificación de muestras	• Etiquetas para las botellas de muestra
• Cuaderno de campo	• Rotulador / Marcador
• Jabón y toalla	• Caja de cerillas
• Mechero o lámpara de alcohol	• Linterna
• Agua para beber	• Navaja
• Bolsa para residuos	• Guantes y protector de los ojos

A notar que, según las condiciones locales, la masa de agua subterránea, los requisitos de los análisis, etc., no todos los puntos reseñados en la lista de verificación serán necesarios. Puede también requerirse otros distintos que no están reseñados.

Realización del muestreo

Las muestras deben tomarse en la salida del agua de bombeo, una vez que los principales parámetros de campo se hayan estabilizado.

- Las muestras para vigilar la calidad del agua subterránea debieran tomarse en algún tipo de pozo de los tres siguientes:
 - Pozos de boca ancha utilizados para abastecimiento doméstico o irrigación;
 - Pozos entubados que bombean agua a mano o mediante motor, utilizado para consumo humano o agrícola;
 - Piezómetros, contruidos para registro de niveles o muestreo del agua.
- Los pozos excavados abiertos que han sido abandonados o que no están en uso, no serán utilizados para tomar muestras.
- Si el pozo está sin equipar, se puede utilizar una botella lastrada para tomar la muestra de agua unos 30 cm por debajo de su nivel (ver Figura D.5). No usar cubos de plástico porque es muy probable tomar sólo el agua más superficial.
- Cuando el agua es extraída mediante bombeo, la muestra se tomará después de haber dejado correr el agua durante unos 5 minutos.
- Los sondeos que no se utilizan para extracción (piezómetros) deben ser purgados con una bomba sumergible antes de tomar la muestra: el volumen purgado debe ser unas 4 ó 5 veces el almacenado dentro del sondeo.
- Cuando las muestras para determinaciones bacteriológicas se tomen en el canalón de salida de la bomba (manual), éste debe ser esterilizado con la llama del mechero de alcohol antes de tomar la muestra de agua.

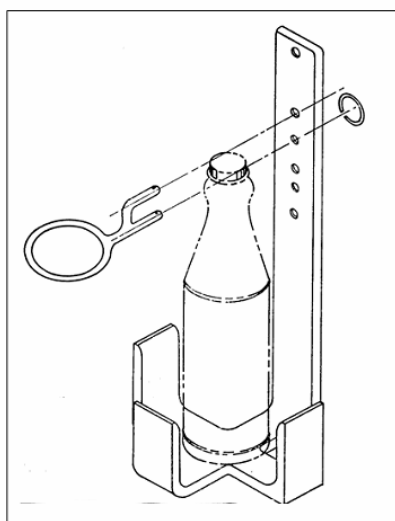


Figura D.5: Utensilio para lastrar la botella de muestreo

Elección del recipiente para la muestra

A efectos de cubrir el grupo de parámetros que se necesita muestrear y analizar, se utiliza toda una variedad de recipientes para muestras. Se pasa revista de nuevo a estos diversos tipos aquí, comentándolos brevemente:

- botellas de 1.000 mililitros, de vidrio (o teflón), con tapón recubierto de teflón – para plaguicidas y fenoles,
- botellas de 500 mililitros, de polietileno – para metales (excepto mercurio),
- botellas de 100 mililitros, de vidrio – para mercurio y fósforo,
- botellas de 1.000 mililitros, de polietileno, para todos los demás parámetros,
- botellas para DBO (con tapón esmerilado) de un volumen congruente con el de los muestreadores de oxígeno disuelto (300 mL probablemente),
- botellas resistentes de vidrio grueso, de 300 mL de capacidad por lo menos, para los análisis microbiológicos. Sus tapones, de rosca, deben conservar un buen cierre incluso después de múltiples esterilizaciones en autoclave.

A notar que el tipo de recipiente que se utilice y la cantidad que se necesite de ellos, van a depender de los parámetros que se hayan seleccionado para el muestreo.

La Tabla D.2 relaciona el tipo de recipiente que se necesita, el volumen de muestra que se sugiere y el acondicionamiento de la muestra que se recomienda, con los parámetros más corrientes.

Preparación y Esterilización de los equipos

En esta sección se resumen los requisitos necesarios en la preparación de los equipos para una campaña de muestreo en campo. En general, las botellas que van a utilizarse para tomar las muestras han de ser meticulosamente lavadas y enjuagadas antes de usarse, preferiblemente a mano salvo si hay muchas botellas en cuyo caso suele ser mejor hacerlo con máquina.

Las botellas que se van a utilizar para tomar muestras para análisis de microbiología habrán de ser atentamente lavadas y esterilizadas antes de su uso. La esterilización puede llevarse a cabo haciendo pasar las botellas por un autoclave a 121 °C durante quince minutos; si no tienen plástico ni las botellas ni sus tapones, se pueden esterilizar en un horno a 170 °C durante dos horas por lo menos. Por lo tanto, cualquier laboratorio que necesite preparar botellas para muestras de microbiología tendrá que disponer de un autoclave que sea capaz de esterilizar cómodamente al menos veinte botellas de una vez, o bien una estufa de esterilización de un tamaño semejante.

Las botellas que van a utilizarse para determinar plaguicidas tienen que enjuagarse con un disolvente orgánico (p.ej. hexano) previo a su uso, lo cual conviene hacerse en el laboratorio.

Tabla D.2: *Parámetros de la calidad del agua – Recipientes y acondicionamiento necesario para las muestras*

Grupo de Parámetros	Parámetro	Recipiente para la muestra	Acondicionamiento
General	Temperatura	Análisis a pie de pozo	Análisis a pie de pozo
	Sólidos en Suspensión	1	Ninguno *
	Conductividad Eléctrica	Análisis a pie de pozo	Análisis a pie de pozo
	pH	Análisis a pie de pozo	Análisis a pie de pozo
	Oxígeno Disuelto	2	7
	Sólidos Disueltos	1	Ninguno *
Nutrientes	Nitrógeno Amoniacal	3	8
	Nitrógeno Total Oxidado	3	8
	Fósforo Total	4	Ninguno *
Materia Orgánica	Demanda Química de Oxígeno	3	8
	Demanda Biológica de Oxígeno	2	4 °C, oscuridad
Iones Mayoritarios	Sodio	3	Ninguno *
	Potasio	3	Ninguno *
	Calcio	3	Ninguno *
	Magnesio	3	Ninguno *
	Carbonatos y Bicarbonatos	1	Ninguno *
	Cloruros	1	Ninguno *
	Sulfatos	1	Ninguno *
Otros Compuestos Inorgánicos	Sílice	1	Ninguno *
	Fluoruros	1	Ninguno *
	Boro	1	Ninguno *
Metales	Cadmio	3	9
	Mercurio	4	9
	Cinc	3	9
Compuestos Orgánicos	Plaguicidas (indicador)	5	4 °C, oscuridad
	Detergentes Sintéticos	1	Ninguno *
	Disolventes Orgánicos	1	4 °C, oscuridad
	Fenoles	5	8
Microbiológico	Coliformes Totales	6	4 °C, oscuridad
Biológico	Clorofila "a"	1	4 °C, oscuridad
NOTAS:			
<i>Recipientes:</i>			
<ol style="list-style-type: none"> 1.000 mililitros botella de polietileno Botella especial para DBO (normalmente 300 mililitros) Botella de polietileno de 500 mililitros Botella de vidrio de 100 mililitros Botella de vidrio (o teflón) de 1.000 mililitros, con tapón recubierto de teflón Botellas de vidrio de 300 mililitros de capacidad, de paredes gruesas y cierre a rosca. Sólo una buena calidad va a permitir un buen aislamiento en el cierre, después de múltiples esterilizaciones en el autoclave. 			
<i>Conservación:</i>			
<ol style="list-style-type: none"> Las muestras para el análisis del oxígeno disuelto se estabilizan añadiéndoles 1 mL de una solución de sulfato manganoso, 1 mL de una solución de iodidiazida y 1 mL de ácido sulfúrico concentrado, y mezclándolo bien. Hay que tener cuidado y asegurarse de que no ha entrado aire a la muestra durante esta operación. Las muestras deben acidificarse con 2 mL de ácido sulfúrico concentrado. Las muestras deben acidificarse con 2 mL de ácido nítrico concentrado. 			
<p>* Ninguno: Teóricamente, <i>todas</i> las muestras deben mantenerse en frío y en oscuridad después de su toma. Si esto no es posible, al menos las muestras para DBO, coliformes, clorofila, plaguicidas y otros compuestos orgánicos con probable pérdida de volátiles HAN DE SER mantenidos a 4 °C y en la oscuridad. Las demás muestras pueden no tener una conservación especial.</p>			

Etiquetado de las muestras

Poner una etiqueta adecuada en la botella con la muestra, que vaya atada preferiblemente; otra manera consiste en escribir directamente sobre el recipiente con un rotulador indeleble al agua. La información que se ponga en uno u otro caso deberá incluir:

- Número o código de la muestra (identificando el punto de muestreo)
- Fecha y hora de la toma
- Origen y tipo de muestra
- Acondicionamiento o estabilización que se le ha aplicado
- Cualquier anotación particular para el analista
- Nombre del operario que ha realizado la toma

Tabla D.3: Ficha de identificación para las muestras de agua subterránea

Código de la muestra											
Operario:			Organismo:				Proyecto:				
Fecha:			Hora:			Código del punto:					
Origen de la muestra: <input type="radio"/> Pozo de boca ancha <input type="radio"/> Bomba de mano <input type="radio"/> Sondeo <input type="radio"/> Piezómetro											
Código de los Parámetros	Recipiente				Conservación				Tratamiento		
	Vidrio	PVC	PE	Teflón	Nada	Frío	Ácido	Otra	Nada	Decant.	Filtro
(1) General											
(2) Bacteriológico											
(3) DBO											
(4) DQO, NH ₃ , NTO											
(5) Metales Pesados											
(6) Comp. Orgánicos											
Determinaciones en Campo											
Temperatura: ° C		p H:			E C:			µmho/cm			
Código de Olor	(1) Inodoro (2) A huevos podridos (3) A azúcar tostada (4) A jabón (5) A pescado			(6) Séptico (7) Aromático (8) A cloro (9) A alcohol (10) Desagradable				Código de Color			

Uso de las fichas de identificación de la muestra

El impreso de identificación para cada muestra proporciona un registro de toda la información importante correspondiente a la muestra tomada. Completar el impreso en cada punto de muestreo, indicando las muestras que se toman en él; tener en cuenta que si se toman varias botellas al mismo tiempo en el mismo sitio, para distintos tipos de análisis, esto se anotará en un único impreso.

También se anotarán en este impreso de identificación las condiciones locales encontradas en el momento del muestreo, tales como presencia de basura en el pozo o una contaminación visible a su alrededor. Esta información puede resultar enormemente útil al analizar los datos.

Una copia de estos impresos, debidamente rellenos, debe ser entregada junto con las muestras al laboratorio de análisis. Todos estos impresos se guardarán en un fichero maestro en el laboratorio de nivel II ó II⁺ donde se lleven a cabo los análisis.

En la Tabla D.3 se ofrece un tipo de impreso para identificar la muestra y anotar las medidas de campo y las observaciones locales.

Tabla D.4: Ficha para el purgado del sondeo

SI SE PURGA EL SONDEO, RELLENAR LA FICHA

Datos del Sondeo en Inventario			
Diámetro	D		cm
Profundidad	L		m
Nivel estático del agua (medio)	NEA		m
Columna de agua (= L - NEA)	H		m
Volumen inicial en el sondeo	V		L
Bomba para purgado prevista	QP		L/s
Tiempo de purgado previsto (= V / QP)	TP		min
Medición del Flujo en Campo			
Nivel estático al principio	NEA		m
Profundidad actual de la bomba			m
Duración del purgado			min
CAUDAL DE BOMBEO ANTES	Q		L/min
CAUDAL DE BOMBEO DESPUÉS	Q		L/min
Volumen purgado	V		L
Nivel dinámico del agua	NDA		m
Mediciones Químicas en Campo			
HORA AL INICIARSE EL MUESTREO	T (°C)	CE (µmho/cm)	pH
+ 10 min			
+ 20 min			
+ 30 min			
+ 40 min			

D.3 Manejo de las Muestras

La estabilización, el transporte y el almacenamiento de las muestras constituyen otro eslabón vital en la cadena del muestreo puesto que cualquier anomalía en el desarrollo de estas operaciones, que se deben hacer con suficiente esmero, puede modificar las características de la muestra y llevar a unos resultados analíticos incorrectos. En consecuencia, a continuación se indican unas pautas sobre cómo interesa llevar a cabo estos procedimientos.

Conservación de la Muestra

Como regla general, cualquier muestra de agua para calidad debe guardarse a una temperatura inferior a 4 °C y al abrigo de la luz, tan pronto como sea posible una vez tomada. Pero esto puede no ser operativo en una campaña de muestreo larga; entonces, al menos las muestras tomadas para determinar DBO, coliformes, plaguicidas y otros compuestos orgánicos susceptibles de inestabilidad, HAN DE GUARDARSE a 4 °C y en la oscuridad (ver Tabla D.2). En el campo, esto significa que hay que poner las muestras en un recipiente aislante y frío

(con hielo y agua); una vez en el laboratorio, deben ser colocadas lo antes posible en una nevera. Con el frío, se consigue reducir la cinética de todas las reacciones bioquímicas que se están verificando en su seno y, por consiguiente, se frenan las modificaciones de su calidad.

- Si las muestras tomadas para determinar DQO (Demanda Química de Oxígeno) no pueden ser analizadas el mismo día de su toma, deben conservarse por debajo de $\text{pH} = 2$ añadiendo ácido sulfúrico. Conviene actuar de la misma manera con las muestras tomadas para determinar el nitrógeno amoniacal y los óxidos de nitrógeno.
- Las muestras para determinar metales pesados deben también ser acidificadas por debajo de $\text{pH} = 2$ con ácido nítrico concentrado, pudiendo entonces esperar hasta seis meses para ser analizadas, excepto con el mercurio cuya determinación no tardará más de cinco semanas en realizarse.
- Una vez etiquetadas y estabilizadas, las muestras se guardarán en un recipiente aislante frío para su transporte (Figura 2) al laboratorio elegido (nivel II ó II⁺) lo antes posible, preferiblemente en las 48 horas siguientes a la toma.
- Los análisis de bacteriología deben empezarse en las 24 horas siguientes a la toma.
- Si las muestras se van a llevar a un laboratorio de nivel I para determinar los “parámetros de campo”, deben entregarse menos de 24 horas después de su toma.
- Algunas de las muestras requieren ser estabilizadas o fijadas directamente en campo. Para conservar el oxígeno disuelto, el operario encargado deberá llevar consigo tres botellas de vidrio o de plástico, de 500 mililitros, calibradas, cerradas, con la solución fijadora en su interior. Dado que esta solución puede ser corrosiva, las tres botellas deberán llevarse en un recipiente adecuado para su transporte, garantizado contra rotura o derrame.
- Para otros parámetros (p.ej. DQO, NH_3 , NO_2^- , NO_3^-), al tomar la muestra conviene añadir ácido sulfúrico concentrado, y ácido nítrico concentrado para los metales pesados. En consecuencia, el operario encargado del muestreo deberá llevar consigo al campo dos botellas de 100 mililitros, con tapón cuentagotas, que contengan estos dos ácidos.

Transporte de las Muestras

Para la campaña de muestreo se utilizará normalmente un vehículo que tenga una capacidad de transporte razonable, como es un coche adecuado o una furgoneta ligera, debido a que es fácil acumular muchas botellas de muestra a lo largo de un día (o varios) de campaña. Esto ocurre en particular cuando se trata de diversos parámetros cuya determinación requiere varias botellas de muestra para cada uno de ellos.

También es posible enviar las botellas mediante transporte público, como tren o autobús; sin embargo, el peso de la nevera portátil aislante con hielo dentro, además de las botellas de muestra, excede en seguida de 10 kg y resulta difícil de manejar.

Por razones económicas y por la necesidad de analizar lo antes posible las muestras (algunas incluso en el mismo día de la toma, preferiblemente) es mejor organizar la salida al campo de forma que dure una jornada. Idealmente, esto va a implicar que la visita a los puntos de muestreo deberá seguir un orden lógico que al final del día terminará en el laboratorio para el análisis de las muestras tomadas, o al menos guardadas en la nevera hasta el día siguiente. Un factor a tener en cuenta al programar la campaña de muestreo consiste en las eventuales fiestas o vacaciones del laboratorio de análisis.

En principio, las muestras serán enviadas al laboratorio previsto en la organización del seguimiento; pero en caso de necesidad, para determinados análisis especializados, se puede pensar en un laboratorio de nivel superior.

Almacenamiento de las Muestras

Este almacenamiento comienza, por definición, inmediatamente después de realizada la toma de la muestra, por lo cual se hacen algunos comentarios a continuación.

En teoría, todas las muestras deberían guardarse a 4 °C y al abrigo de la luz de forma que los valores de sus parámetros no sufran cambio alguno; pero en la práctica esto puede no ser factible para la totalidad de los parámetros. No obstante, las muestras tomadas para determinar DBO, coliformes, clorofila, plaguicidas y otros compuestos orgánicos susceptibles de fácil alteración, deben ser conservadas siempre a 4 °C y en la oscuridad; por este motivo conviene guardarlas en una nevera portátil con hielo, durante el resto de la campaña, hasta su llegada al laboratorio donde se pasarán a una nevera, hasta el momento de ser analizadas. Habitualmente, las muestras suelen guardarse en la misma ciudad en que se realizan los análisis.

D.4 Equipamiento

Muestreadores

El equipo de campo preferido para tomar la muestra de agua subterránea es la bomba sumergible. Los muestreadores han de ser lavados y aclarados, así como inspeccionados rápidamente para comprobar que funcionan bien, que los eventuales cierres no pierden, y que el cable para bajar la bomba en el pozo se encuentra en buenas condiciones.

Para conseguir una muestra representativa, el procedimiento de muestreo debe cumplir con los requisitos siguientes:

- Permitir extraer el agua retenida en el interior del pozo (es decir, purgarlo) mediante una bomba sumergible, de manera que la muestra que se tome represente al agua que circula por el acuífero;
- Evitar la pérdida de componentes volátiles y la desgasificación en la muestra;
- Eludir la oxidación a causa del contacto con el aire; y
- Prevenir la contaminación de la muestra y del pozo.

A continuación se recuerdan brevemente tres métodos convencionales y una técnica sofisticada, así como su aptitud para proporcionar muestras representativas:

Técnicas Convencionales (no recomendadas en calidad HP):

- Los *bailers* o *tomamuestras por inmersión*, operan bajando el aparato a una cierta profundidad en la columna de agua, cerrando la válvula del fondo, y subiéndolo a la superficie. Su mayor inconveniente reside en que tiene un gran tiempo de contacto con el aire, a lo largo de todo el proceso de toma; además tienen zonas muertas que dificultan su limpiado, siendo alto el riesgo de llevar la contaminación de un sondeo a otro (contaminación transversal). También puede darse la contaminación del agua del sondeo, especialmente si es estrecho, al rozar el tomamuestras sus paredes durante la bajada. Por último, purgar el sondeo antes del muestreo aplicando el bailer lleva mucho tiempo.
- Los *aparatos de aspiración* toman el agua succionándola directamente o a través de una botella de muestra. La aspiración puede ser practicada manualmente o mediante una bomba (de tipo peristáltica o centrífuga), pero el agua a muestrear no puede estar a más de 8 ó 9 m de profundidad. Su mayor inconveniente reside en la desgasificación y aireación de la

muestra, que no se pueden controlar. Al igual que en el caso anterior, purgar el sondeo con el propio aparato de aspiración lleva mucho tiempo.

- Los *aparatos a presión* utilizan gas (aire) para arrastrar directamente el agua del sondeo, evitando eventuales retrocesos de caudal con válvulas de retención. Normalmente se usan compresores para inyectar el aire dentro del sondeo mediante una tubería de llegada, siendo el agua forzada por el aire a subir a través de una segunda tubería (que actúa como un elevador a presión) y emergiendo la mezcla agua-aire por la cabeza del sondeo. El intenso contacto entre el aire a presión y el agua provoca la oxidación y la alteración en el equilibrio de los gases disueltos en el agua (residual), principalmente desgasificación y volatilización, lo cual a su vez puede provocar la precipitación de sustancias contaminantes. Todo esto significa que la muestra de agua tomada ya no es representativa de la masa de agua de que procede.

Técnica Sofisticada (recomendada en calidad HP)

- Las *bombas sumergibles* introducidas en el sondeo impulsan el agua hacia la superficie de una forma continuada, en virtud de alguno de los tres mecanismos siguientes: rotor o engranajes ensamblados (bomba centrífuga eléctrica), gas actuando sobre un émbolo (bomba de pistón) o sobre un diafragma (bomba neumática). Cualquiera de estos tres tipos sirve para muestrear aguas subterráneas en todos sus parámetros —incluyendo el carbón orgánico volátil, los metales pesados en trazas y los gases disueltos— y, consecuentemente, es el aparato extractor que se recomienda para los programas corrientes sobre calidad del agua en HP.

Si se utiliza una bomba sumergible para obtener muestras de agua subterránea, interesa, idealmente, que tenga las características siguientes:

- *Caudal de bombeo variable.* Una estimación de su capacidad se puede evaluar según se indica en el Anejo A. Hace falta también que el caudal sea regulable, a efectos de aplicar un valor alto para tener un purgado rápido y otro más bajo para tomar la muestra (menor o igual a 0,1 L/min).
- *Tamaño.* El diámetro exterior de la bomba conviene que sea considerablemente menor que el diámetro interior más pequeño de los sondeos o piezómetros que intervienen en el programa de seguimiento; es necesaria una diferencia anular de al menos 3 cm, para garantizar que la bomba no roza o daña las paredes al introducirla y extraerla en los sondeos: cuanto más estrecha sea la bomba en comparación con el diámetro interior del sondeo, más cómodas y seguras serán su bajada y subida. Si el sondeo está equipado con un registro automático del nivel de agua, se recomienda retirar dicho registro antes de introducir la bomba sumergible a efectos de evitar posibles daños físicos al equipo o a sus cables y tubos.
- *Material.* El material con que están construidos la bomba, la tubería y los accesorios (todas las partes en contacto con el agua del sondeo) deben ser inertes y anticorrosión. El material corriente más utilizado es el acero inoxidable.
- *Suministro de energía.* Se necesita un generador eléctrico portátil junto con un transformador graduable (para controlar la velocidad de la bomba).
- *Facilidad para el transporte.* El peso y el tamaño del equipo completo, generador y accesorios, debe ser tal que pueda ser transportado fácilmente incluso a través del campo. Un

equipo ligero será más fácil de manejar, con un transporte e instalación más cómodo y rápido.

- *Ruido.* Conviene que el nivel de ruido de los equipos sea aceptable y, con tal fin, se aconseja un silenciador para el tubo de escape.
- *Limpieza.* La bomba y las tuberías deben ser fáciles de limpiar (sin zonas muertas) para evitar la contaminación transversal de los sondeos.
- *Mantenimiento y reparaciones.* La bomba debe ser fácil de reparar en campo y todas las herramientas y repuestos necesarios deben ir incluidos en el equipo transportable.
- *Accesorios.* Merece la pena considerar la conveniencia de llevar también un medidor de nivel (sonda) y un equipo de mano (kit) con probetas para analizar o medir en campo parámetros como la temperatura, pH, conductividad y potencial Redox.

Para el muestreo de pozos excavados a mano (que no se pueden purgar) todo lo que se necesita es un recipiente lastrado atado a una cuerda (Figura D.5), que se hace bajar con cuidado por el pozo, se llena de agua y se saca al exterior. Si bien prácticamente cualquier tipo de recipiente puede servir para esta operación, hay una serie de aspectos que son deseables, como los siguientes:

- *Volumen y diámetro pequeños.* Es preferible que el diámetro y el volumen del recipiente sean relativamente pequeños, para que resulte más fácil sacarlo del pozo una vez lleno de agua y para tener mayor probabilidad de no tropezar con las paredes.
- *De plástico.* Esto hace que el recipiente sea más ligero, más fácil de limpiar y con una incidencia química probablemente menor sobre los parámetros a determinar en la muestra de agua. Por los mismos motivos, interesa que la cuerda para sujetarlo sea igualmente de fibra sintética.
- *Bordes lisos.* Este aspecto puede facilitar el llenado de las botellas de muestra.

El aparato más sencillo para tomar una muestra de agua es una botella atada a un cordel. Para que la botella de plástico o de vidrio penetre en el agua hace falta que su funda o soporte tenga el peso suficiente para vencer la flotación y permita así que se hunda de forma rápida hasta la profundidad deseada. Un soporte de este tipo, diseñado para una o dos botellas, se representa en la Figura D.5.

Recipientes para el Transporte

Las botellas etiquetadas y con los conservantes necesarios añadidos han de ser preparadas para su transporte, preferiblemente en un recipiente aislado y frío. Una vez muestreada el agua, ocurren en ella reacciones químicas o bioquímicas que se reflejan en muchos de sus parámetros de calidad, con las correspondientes variaciones en las concentraciones respecto de las existentes en la matriz rocosa originaria. Para prevenir estas alteraciones (en los valores de los parámetros, en particular) todas las muestras debieran idealmente conservarse a temperatura inferior a 4 °C y al abrigo de la luz, hasta el momento de ser analizadas. Si esto no fuera posible, entonces al menos las muestras para determinar DBO, coliformes, plaguicidas y otros compuestos orgánicos susceptibles de pérdidas por volatilización, HAN DE SER tenidas a 4 °C y en la oscuridad. Las demás muestras pueden no tener una conservación especial. En campo, la mejor forma de asegurar que las muestras están en frío consiste en mantenerlas dentro de un recipiente aislado con hielo/agua o bolsas de hielo en su interior; por ello, debe

haber suficientes neveras portátiles de este tipo disponibles para cada campaña de muestreo, tantas como sean necesarias para mantener las muestras recogidas durante un día de toma. Las muestras serán llevadas al laboratorio elegido (de nivel II ó II⁺) a la mayor brevedad posible, preferiblemente en las 24 horas siguientes a su toma, y si van a ser entregadas a un laboratorio de nivel I para las “determinaciones de campo”, entonces antes de las 24 horas.

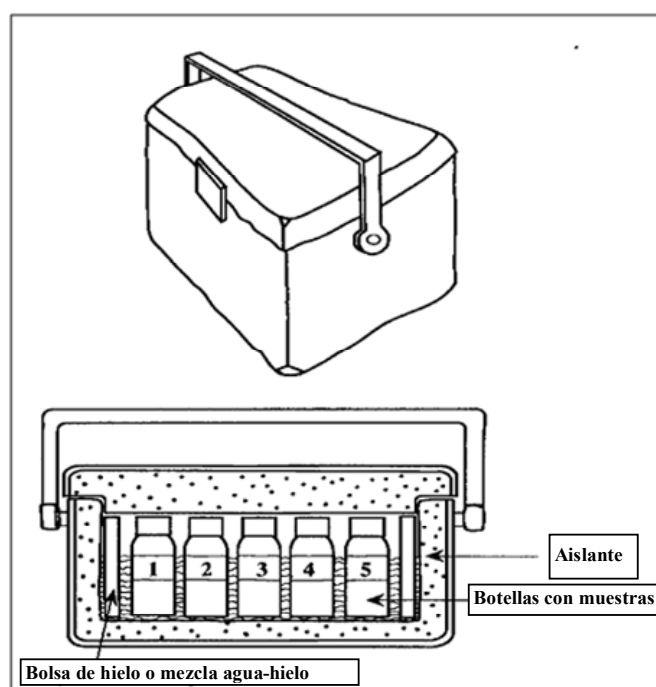


Figura D.6: Nevera portátil para transporte de botellas con muestras para calidad

Anejo E: Documentación en el seguimiento de las aguas subterráneas – Ejemplos de formularios estándar

Introducción

Un programa de seguimiento apropiado debe comprender:

- Un manual de mediciones que describa procedimientos a seguir para asegurar que los datos obtenidos tengan una buena calidad e integridad.
- Una ficha de punto de cada pozo de la red, con toda su información de interés.
- Un informe de campo, en forma de hoja impresa, que habrá de ser rellenado al llegar al sitio de observación y que contiene toda la información relevante sobre el trabajo de campo realizado.

Manual de mediciones

Al tomar los datos de observación en campo, habrán de seguirse diversos procedimientos para asegurar una buena calidad e integridad en dichos datos. Estos procedimientos han de venir recogidos en un manual de mediciones, manual que será diferente según sea el objetivo particular que se persigue con el seguimiento, motivo por el cual no se incluye en esta Guía. Un manual así evita que los diferentes operarios apliquen procedimientos distintos, impidiendo que los resultados de la vigilancia puedan resultar incoherentes o inutilizables.

Fichero de punto de la red

Es necesario que haya un fichero de cada punto de observación con toda la información de relevancia (nombre, coordenadas, esquema de situación, fotos, datos de la perforación y del sondeo, medidas tomadas anteriormente, etc.; Ver Anejo E-1). Una copia selectiva de esta información puede ser de utilidad en la salida a campo, como ayuda para identificar las causas de eventuales problemas.

Informe de campo

En el punto de observación se rellenará una hoja impresa con todo lo destacable en relación con el trabajo realizado, además de información de tipo general como por ejemplo las condiciones climáticas, el estado en que se encuentra el sitio, las medidas tomadas en campo (T, pH, CE, etc.), o si hace falta algún tipo de reparación o no (Anejo E-2). Se comprobará y anotará que el pozo se encuentra intacto, antes de realizar las mediciones o de tomar las lecturas que haya en el registrador. Si se va a observar la calidad, se rellenará un impreso de muestreo (Anejo E-3).

Anejo E-1: Ficha de punto de la red

Los datos básicos siguientes deben estar disponibles para cada punto perteneciente a la red de vigilancia del agua subterránea, todos ellos recogidos en un fichero del punto, almacenado en la oficina. Los puntos de la red estarán señalados de manera inconfundible en el campo; se recomienda adjuntar un esquema del lugar y fotos para facilitar su localización.

Asunto	Unidades	Observaciones
Nombre		
Nº de Identificación del pozo		Código único para facilitar la recuperación de datos, inconfundible en cada área
Nº de identificación en la red		Ídem
Nombre del pozo		
Dueño del pozo		
Emplazamiento		
Coordenada X	m	Eventual sistema de coordenadas locales
Coordenada Y	m	Eventual sistema de coordenadas locales
Origen de los datos		De dónde se han tomado estos datos
Sistema de determinación de estos datos		Mediante nivelación, un aparato GPS, sistema diferencial GPS, etc.
Altitud	m	
Origen del dato		De dónde se ha tomado este dato
Sistema de determinación de este dato		Mediante nivelación, un aparato GPS, sistema diferencial GPS, etc.
Ámbito administrativo		
Distrito		
Ciudad/Pueblo		
Nombre del emplazamiento		
Descripción del emplazamiento		
Esquema(s) de situación del emplazamiento		
Foto(s) del emplazamiento		
Datos del sondeo		
Equipo(s) de perforación		
Tipo(s) de perforación		
Empresa(s) o Agencia(s) de perforación		
Fluidos utilizados en la perforación		
Fecha de inicio de la obra de perforación		
Fecha de acabado de la perforación		
Profundidad total	m	
Profundidad de los niveles cortados	m	
Pérdida del fluido circulado a:	m	
Diámetros de perforación de / a	m; mm; pulg	
Cementación directa de / hasta, materiales	m	
Cementación inversa de / hasta, materiales		
Revestimiento / Rejillas desde / hasta	m	
Revestimiento / Rejillas: diámetros	pulg / mm	
Revestimiento / Rejillas : tipo, materiales, ranurado		
Situación de los centralizadores	m	
Empaquetaduras de grava desde / hasta	m	
Tipos de empaquetadura de grava		

Desarrollo del pozo		
Fecha del desarrollo		
Tipo de desarrollo		
Tiempo empleado		
Equipo y fluidos utilizados		
Volumen y fuente de agua (si utilizada)		
Resultados del desarrollo		
Empresa ejecutora		
Testificación geofísica del sondeo		
Log geofísica X desde / hasta	m	
Fecha de la testificación		
Empresa ejecutora		
Datos disponibles en:		
Ensayo de bombeo		
Ensayo X		
Tipo de prueba		Determinar parámetros hidráulicos / capacidad
Fecha del ensayo		
Profundidad de instalación de la bomba		
Tipo de bomba / nombre del modelo		
Descarga en el paso X		
Tiempo de la descarga X		
Distancia de los bordes del acuífero		
Distancia hasta el pozo más próximo		Pozo medido durante el ensayo de bombeo
Nivel estático del agua	m	
Punto de referencia		p.ej., superficie del terreno / borde del pozo, etc.
Nivel dinámico del agua	m	
Otros parámetros medidos		
Pérdida en pozo		
Pérdida en acuífero		
Descarga máxima propuesta	m ³ /h	depende de las unidades locales utilizadas
Capacidad específica	m ² /h	depende de las unidades locales utilizadas
Resultados: Transmisividad	m ² /h	depende de las unidades locales utilizadas
Resultados: Conductividad hidráulica	m/s	depende de las unidades locales utilizadas
Método de evaluación		
Resultados: Coeficiente de almacenamiento		
Método de evaluación		
Resultados: Porosidad efectiva	m ² /h	depende de las unidades locales utilizadas
Resultados: Factor de goteo	L/s	depende de las unidades locales utilizadas
Método de evaluación		
Geología / Litología		
Capa X desde / hasta	m	
Descripción: Roca / Detrítico		
Clasificación litoestratigráfica		
(Edad)		
Hidrogeología		
Acuífero X		
Clasificación del acuífero		Nombre del acuífero
Tipo del acuífero		Confinado / Libre / Semipermeable / Artesiano
Penetración		Total / parcial
Techo		
Muro		

Composición hidroquímica		
Fecha del muestreo		
Muestra nº		
Laboratorio nº		
Operario		Nombre / Organismo
Medidas en campo: pH		
Medidas en campo: CE	µS/cm a la T de referencia	
Medidas en campo: T	° C	
Medidas en campo: OD	mg/L	
Resultados del análisis: todos los parámetros analizados		
Instalaciones de medición en campo		
Nombre / Modelo X : para toma de datos		
Tipo de registro		
Fecha de instalación		
Instalado por		
Profundidad de la instalación		
Tipo(s) de material		
Entidad Responsable		Nombre, nº teléfono, etc.
Nombre / Modelo X: para almacenamiento de datos		
Entidad Responsable		Nombre, nº teléfono, etc.
Nombre / Modelo X: para transferir datos		
Entidad Responsable		Nombre, nº teléfono, etc.
Obra		
Nombre / Tipo de cierre del sondeo		
Tipo de obra		p.ej., caseta / vallado / estación telemétrica con panel solar / etc.
Fecha de construcción		
Rehabilitación del pozo		
Rehabilitación X		
Fecha		
Método		
Tiempo que ha durado		
Dirigido por		
Capacidad específica antes de rehabilitar		
Capacidad específica después rehabilitar		
Mantenimiento		
Mantenimiento X		
Fecha		
Descripción del problema		
Descripción de la solución		
Dirigido por		

Se añadirá al fichero del pozo un diagrama estándar de la ejecución del sondeo y otro de la litología testificada.

Anejo E-2: Observación de los niveles del agua subterránea – Informe de campo

Cada vez que se visita un pozo de observación para medir su nivel de agua, conviene rellenar un informe de campo al respecto.

Programa de seguimiento del agua subterránea “XYZ”	
Nombre del Organismo y División / Sección responsable	
Nº de identificación del pozo	
Nº de identificación del punto de la red	
Nombre del pozo	
(Otros datos básicos)	
Fecha de la visita	
Estado del punto de observación	respecto al sondeo, el equipamiento, la obra, etc. P.ej.: sondeo inundado (durante una lluvia,...), flotador atasado durante (fechas), baterías descargadas, panel solar dañado, etc.
Último mantenimiento	Fecha
Mantenimiento realizado por	
Descripción del problema	
Descripción de la solución	
Última rehabilitación	Fecha
Nivel medido con el equipo instalado	en m por debajo del punto de referencia
Nivel medido a mano	en m por debajo del punto de referencia
Equipo de medición instalado	Nº de identificación
Datos pasados a	p.ej., Cuaderno “XYZ”
Nombre del fichero	nombre único
Observaciones	p.ej., trabajos de mantenimiento / reparación necesarios, registrador ajustado, aparato calibrado, etc.
Otros parámetros en campo	p.ej., CE, pH, T, OD.
Toma de muestra de agua para calidad	sí / no, muestra nº.

Si se toma al mismo tiempo una muestra de agua para calidad, debe rellenarse también el impreso correspondiente (ver *Anejo E-3*).

Anejo E-3: Protocolo (impreso) para la toma de muestras

Protocolo para el muestreo	
Nombre del Programa de Seguimiento	
Nombre de la Entidad	
Nombre de la Oficina encargada del seguimiento	
Nombre del Ordenante de la muestra	
Datos del Emplazamiento	
Nº de identificación	
Nombre del punto de observación	
Nombre del dueño	
Coordenada X / Latitud	
Coordenada Y / Longitud	
Altitud (terreno)	
Altitud (punto de referencia)	
Datos del sondeo	
Profundidad total	
Posición de las rejillas en el pozo	
Acuífero(s)	
Descripción litológica	
Diámetro del entubado (interior)	
Purgado del pozo	
Tipo de purgado / Tipo de bomba	
Hora de comienzo del purgado	
Tiempo empleado [min]	
Caudal de la descarga [L/min]	
Profundidad de la bomba	
Toma de la muestra	
Fecha de la toma	
Nivel estático del agua (antes del purgado)	
Nivel estático del agua (después del purgado)	
Caudal durante la toma [L/min]	
Muestreador utilizado	
Número de muestras y tamaños (V)	
Tipo(s) y material(es) de los recipientes usados	
Medidas en campo	
CE [μ S/cm]	
pH	
RedOx [mV]	
OD [mg/L]	
T [°C]	
Color	
Turbidez	
Olor	

Protocolo para el muestreo	
Tratamiento de la muestra	
Método de filtrado	
Malla del filtrado	
Muestras filtradas	
Tratamiento de la Muestra 1	
Tratamiento de la Muestra 2	
Tratamiento de la Muestra 3	
Estabilización de la muestra	
Enfriamiento a + 4° C	Muestras n°
Congelación a - 20 °C	Muestras n°
Almacenamiento	
Nombre y localización del almacenamiento temporal para la Muestra X	
Tiempo de almacenamiento (desde / hasta) para la Muestra X	
Condiciones del almacenamiento de la Muestra X	
Laboratorio	
Nombre del Laboratorio	
Fecha del análisis	
N° de identificación del Laboratorio	
Métodos analíticos	
Referencia para resultados (p.ej. “XYZ estándar”)	
Recepción de los resultados de los análisis (Nombre / Fecha)	

Fotos, Esquemas de mapas, Firma

Anejo F: Coste de las operaciones – Ejemplos en Europa

Introducción

La instalación y el funcionamiento de una red para hacer el seguimiento de la piezometría de una masa de agua subterránea es una tarea que requiere mucho tiempo y dinero. En términos generales, puede decirse que los costes que conlleva dependen de lo que se pretende conseguir con el seguimiento, de la amplitud superficial que se cubre, del tipo de datos que se toman y procesan, de la composición química del agua y de su agresividad con ciertos materiales.

Hay que diferenciar entre los diversos costes siguientes:

- Costes para seleccionar emplazamientos (detección remota, interpretación de fotografía aérea, geofísica);
- Costes de perforación;
- Costes de acabado de sondeos;
- Costes de desarrollo de sondeos;
- Costes de ensayos de bombeo (ensayos parciales, ensayos en descarga continua);
- Costes de equipos para registro de datos, incluyendo su eventual instalación;
- Costes de otros equipos necesarios (bombas, tomamuestras, filtrado, tratamiento, transporte, almacenamiento, etc.);
- Costes de trabajos topográficos (determinación de coordenadas y altitudes);
- Costes de salidas al campo (incluyendo equipamiento de campo, medios de transporte, dietas, etc.);
- Costes del mantenimiento (rehabilitación de pozos, etc.);
- Costes de los análisis de agua (incluyendo muestreo, conservación, transporte, almacenamiento, etc.);
- Costes de la gestión de los datos, de su análisis, interpretación y elaboración de informes (hardware, software, personal, publicación mediante imprenta o a través de la Web, etc.);
- Costes para la seguridad del personal;
- Costes de formación (interna, externa);
- Costes de auditoría (interna, externa).

Antes de establecer una red de vigilancia hay que definir los costes generales de la instalación y los costes operativos anuales, lo cual es importante a efectos de asegurar que no se sobrepasan las cantidades asignadas. Los cuadros que siguen recogen unos costes típicos que pueden ser de utilidad para hacer unas consideraciones generales al ir a seleccionar el sistema de perforación o de instalación de sondeos, el método de observación o de transferencia de datos, la adquisición de equipos, qué hardware y software se va a utilizar, la amplitud y frecuencia de las campañas de muestreo, la línea de procesado de los datos, el tipo y frecuencia de la publicación de datos, la cualificación y capacitación del personal técnico y científico que será necesario, etc.

Un plan de financiación detallado que comprenda todas las actividades planeadas y propuestas para el seguimiento, tendrá que ser preparado para un periodo de tiempo previsto. Puede convenir que este plan cubra varias fases del seguimiento, a lo largo de las cuales vayan defi-

niéndose diferentes necesidades para el mismo. Periódicamente y de una forma regular, las necesidades del seguimiento y los costes deben ser estudiados y la red optimizada. En los últimos años se han venido desarrollando unas cuantas herramientas para que sirvan de apoyo en la toma de decisiones y ayuden a formular los planes de seguimiento a largo plazo de manera económicamente eficiente y reduciendo costes.

Según Van Bracht (2001), en los Países Bajos los costes para el seguimiento del agua subterránea (en cantidad y calidad) se distribuyen de la manera siguiente: adquisición de datos: 48 %, mantenimiento: 18 %, gestión de los datos: 18 %, depreciación: 16 %. Sin embargo, este cálculo no tiene desde luego en cuenta la instalación y los costes de personal.

Dentro del marco del programa RCRA (Resource Conservation and Recovery Act, USA), el análisis de los costes ofrece el siguiente reparto medio: 25 % para la toma de muestras, 45 % para la analítica y 30 % para la gestión de los datos (Horsey et al. 2004). En esta evaluación tampoco se han incluido los costes de instalación y de personal y sólo puede tomarse como referencia para el seguimiento de sitios contaminados.

La Agencia de Medioambiente (EA, 2002) ha analizado los costes del seguimiento de la calidad de las aguas subterráneas en el Reino Unido, con la finalidad de ofrecer una orientación en la estrategia para el establecimiento de un programa sistemático nacional para el seguimiento de la calidad de las aguas subterráneas en Inglaterra y Gales. Para la red actualizada se ha estimado aproximadamente que será necesario un 15 % del coste total anual para la toma de muestras en campo, un 70 % para la analítica correspondiente en el Laboratorio Nacional, y un 15 % para la gestión del programa y el estudio de los datos.

Los tres ejemplos comentados y la experiencia derivada del trabajo con otras redes de vigilancia del agua subterránea, muestran que hay una diferencia considerable entre los costes anuales para programas distintos.

No obstante, al establecer un plan para financiar el esquema de un seguimiento no se deben subestimar los costes ‘adicionales’ correspondientes a auditorías o inspecciones, actualizaciones de la red, rehabilitación de pozos, mantenimiento, capacitación, etc.

Resulta difícil hacer estimaciones para algunos de estos costes mencionados, como p.ej. los relativos a personal y capacitación, seguridad en el trabajo de los operarios, reconocimientos topográficos, análisis de aguas, gestión de datos y su estudio, y elaboración de informes, así como los correspondientes a auditorías o supervisiones, y ello porque todo esto depende fuertemente de las condiciones locales. Sin embargo, es necesario comentar de manera general algunos de estos aspectos:

- *Costes de personal y de capacitación.* La responsabilidad ha de recaer en personas adecuadamente cualificadas, por lo cual las actividades de formación y capacitación tienen que verse integradas en el programa de seguimiento. La capacitación contempla los métodos para tomar datos (p.ej., cómo manejar los almacenadores de datos, cómo hacer el mantenimiento y la rehabilitación de los pozos de observación, cómo tomar muestras de agua para el seguimiento de la calidad, etc.) así como para interpretarlos.
- *Costes para la seguridad del personal.* Tomar medidas de seguridad puede ser necesario, p.ej. en el caso de sitios contaminados. El personal involucrado requerirá estar entrenado y ser capaz física y mentalmente de llevar a cabo este tipo de trabajo. También será necesario disponer de una buena logística, p.ej. tener indumentaria protectora u otro tipo especial de equipamiento. El manejo de sustancias peligrosas recibirá una atención particular, la sa-

lud del personal implicado será objeto de vigilancia con regularidad, los procedimientos de descontaminación tendrán el seguimiento adecuado, estará disponible el equipamiento de emergencia oportuno así como planes de respuesta a emergencias y contingencias. Nielsen (1999) recoge un buen compendio de todas estas consideraciones relativas a salud y seguridad.

- *Costes de los reconocimientos topográficos.* Este tipo de costes se han visto reducidos drásticamente con el uso de sistemas GPS, de forma que la determinación de coordenadas y altitudes se ha vuelto económicamente asequible incluso en áreas remotas (p.ej., aplicando GPS diferencial). A este respecto es importante considerar con antelación qué nivel de precisión se va a necesitar, a efectos de elegir el método más apropiado teniendo en cuenta el coste.
- *Costes de los análisis de agua.* Al principio de los programas de seguimiento pueden ser necesarias unas listas de parámetros más ambiciosas que posteriormente, en su funcionamiento a largo plazo. Para reducir el coste del seguimiento se recomienda revisar periódicamente los parámetros a analizar en cada uno de los pozos de observación del programa. También se puede conseguir una reducción de estos costes haciendo una selección entre los métodos analíticos menos costosos y que den resultados apropiados.
- *Costes de la gestión y estudio de los datos, y de la elaboración de informes.* Una gran parte de los costes de personal corresponde a este apartado. Se puede ahorrar una cantidad apreciable de tiempo y dinero estableciendo procedimientos concisos sistemáticos y eficientes, una vez lleve el programa funcionando un cierto tiempo.
- *Costes de auditorías.* Puede ser conveniente comprobar cada cierto tiempo la marcha del programa de seguimiento para optimizarlo. Los objetivos pueden ser diversos con miras a mejorar la densidad de la red, los procedimientos seguidos en particular para las evaluaciones y la elaboración de informes, así como la optimización de la relación coste / eficacia.

Las Tablas F-1 a F- 4 recogen una lista de estos costes referidos a Alemania (modificado de Margane, 2004). Se ofrece así una panorámica de esta situación aun cuando algunos casos dependen naturalmente de las condiciones locales, las cuales pueden ser considerablemente diferentes a las existentes en Alemania.

Costes de la perforación y acabado del sondeo

Tabla F1: Costes para la vigilancia de los niveles del agua subterránea (pozos de 4 – 6”, a varias profundidades) – Perforación y acabado de los sondeos

Concepto	Coste en €
Desplazamiento (0 – 50 km, 50 – 100 km, 100 – 200 km)	1.500, 2.500, 3.250
Montar el sistema en el sitio de perforación , y desmontarlo	750, 1.500, 3.000
Coste de la perforación, a rotación, profundidad hasta 50 m, por metro	35
Coste de la perforación, a rotación, profundidad de 50 a 100 m, por metro	40
Coste de la perforación, a rotación, profundidad de 100 a 400 m, por metro	40 – 50
Revestimiento de acero galvanizado, diámetro 5 cm / 10 cm / 12,5 / 15 cm, por metro	10 / 27 / 55 / 70
Revestimiento de acero inoxidable, diámetro 10 cm / 12,5 / 15 cm, por metro	180 / 200 / 220
Revestimiento de PVC, diámetro 5 cm / 10 cm / 12,5 / 15 cm, por metro	10 / 20 / 30 / 36
Rejilla de acero galvanizado, mallado 0,5mm ancho,	
Rejilla de acero inoxidable, mallado 0,5mm ancho,	210 / 230 / 260
Rejilla de PVC, mallado 0,5mm ancho,	11 / 34 / 47 / 57
Cementación incluida la instalación, por m ³	40
Centralizadores, material e instalación, por unidad	20 (cada 20 m)
Empaque de filtro / grava incluida la instalación, por metro	20
Sellado (arcilla) incluida la instalación, por metro	40
Contrafiltro, por metro	20
Desarrollo del pozo (limpiado, bombeo)	500 + (según nivel de agua)
Sellado del fondo	15

La perforación en Alemania de un sondeo estándar para observación del nivel de agua subterránea, de 100 m de profundidad, con entubado y rejilla de PVC de 4”, con un desplazamiento de 100 km desde la sede de la Empresa, costaría unos 12.000 Euros (2006).

Costes de la observación del nivel del agua subterránea

Tabla F2: Costes para la vigilancia de los niveles del agua subterránea (pozos de 4 – 6”, varias profundidades) – Costes de los equipos y de su instalación

Concepto	Coste en €
Cabezal del pozo	según el tipo de instalación
Registro automático (gráfico) del nivel de agua, sin datos numéricos	2.000 – 5.000
Registro automático del nivel de agua, con datos numéricos	600 – 5.000
Sonda de presión	600 – 2.500
Dispositivo lector de datos	1.000 – 1.500
Sistema telemétrico con señal de radio	mediante pedido
Sistema telemétrico con GSM	mediante pedido
Sistema telemétrico vía satélite	mediante pedido
Costes de instalación	según el tipo de instalación

Costes de la observación de la calidad del agua subterránea

Los costes relativos a la vigilancia de la calidad del agua subterránea difieren considerablemente de los correspondientes a la piezometría. Además de los costes debidos a la perforación, instalación del revestimiento y de los filtros, desarrollo del pozo y algún equipamiento

básico en campo, que ya se han documentado anteriormente, hay que considerar los siguientes costes relativos a:

- Materiales especiales para la entubación y rejillas;
- Equipamiento para el campo;
- Precauciones de seguridad personal;
- Purgado del pozo;
- Tomamuestras;
- Filtrado;
- Recipientes para las muestras;
- Tratamiento de las muestras;
- Almacenamiento y transporte de las muestras; y
- Análisis en laboratorio.

Estos costes pueden resultar de consideración, siendo los relativos a la vigilancia de la calidad del agua subterránea bastante más altos generalmente que los correspondientes a la medición del nivel. Además, dichos costes dependen en gran parte de las condiciones y normativa locales, por lo cual sólo se puede dar aquí una orientación limitada.

Tabla F3: Costes para la vigilancia de la calidad del agua subterránea (pozos de 4 – 6”, varias profundidades) – Costes del equipamiento en campo

Concepto	Coste en €
Medidores del Nivel de Agua 50 m / 100 m / 200 m / 300 m / 500 m	250 / 300 / 450 / 600 / 900
Micro Filtros 0,45 µm (100 unidades) con jeringa incluida	según el tipo de material: 50 – 500
Conductivímetro, con 100 m de cable	700 – 1.400
pH-metro con medición de Redox incorporada, con 100 m de cable	400 – 1.600
Medidor del Oxígeno Disuelto (OD), con 100 m de cable	700 – 1.400
Medidores ISE (Electrodo Selectivo de Iones)	entre 200 y 700
Medición de DBO	semejante al Medidor de OD
Fotómetro portátil (para medición de parámetros especiales)	entre 1.000 y 4.000 aprox.

Tabla F4: Costes para la vigilancia de la calidad del agua subterránea (6"/150 mm)

Concepto	Coste en €
Fuente: Agua y Energía de Alemania [www.gwe-group.com] Entubado / rejilla (PVC-U) de 7,5 mm espesor de pared, por metro Entubado / rejilla (PVC-U) de 9,5 mm espesor de pared, por metro Rejilla (PVC-H con alambres robustos, espesor de pared) Entubado / rejilla (acero recubierto de epoxy - HAGULIT) Entubado / rejilla (acero inoxidable), por metro	26,4 – 39,5 36,8 – 56,4 115 86 / 135 según precio de mercado del acero inoxidable
Fuente: [www.johnsonscreens.usfilter.com] Entubado / rejilla (HDPE) en tramos de 6 m, por metro Entubado / rejilla (PTFE)	15,1 / 27,4
Fuente: Grundfos [www.grundfos.com] Bomba MP – 1 Bomba SQE – NE Bomba SP – NE	(los precios dependen de las alturas y caudales de impulsión) sobre 2.500
Bailer 1 L [www.seba.de] Desechable (PVC) [www.enviroequipment.com] Desechable (PE) [www.hoskin.ca; www.enviroequipment.com] Desechable (HDPE) [www.solinst.com; www.enviroequipment.com] Desechable (Teflón) [www.hoskin.com; www.enviroequipment.com] Bailer puntual [www.solinst.com]	650 3 4 9 – 16 precio no disponible
Frascos para muestra (vidrio) de 0,1 L / 0,25 L / 0,5 L : * transparente, unidad * opaco, unidad Frascos para muestra (PVC) de 0,5 L / 1 L , unidad Frascos para muestra (HDPE) de 0,1 L / 0,5 L , unidad Frascos para muestra (Teflón PFA) de 0,125 L / 0,25 L / 0,5 L	1,6 / 3,0 / 3,5 1,4 / 2,5 / 3,2 1,6 / 2,3 0,65 / 1,1 41 / 59 / 81
Detectores de gases [www.compur.com] De impacto (detección de O ₂ , inflamables, SH ₂ , CO ₂)	1.100

Referencias:

- Environment Agency (2002): Development of methodology for selection of determinant suites and sampling frequency for groundwater quality monitoring: Implementation Plan. – National Groundwater and Contaminated Land Centre Project NC/00/35, 18 p.; Almondsbury/UK.
- Horsey, H.R., Carosone-Link, P. & Loftis, J. (2004): Managing RCRA Statistical Requirements to Minimize Ground Water Monitoring Costs. – 7 p. [internet source: http://idt.nicusa.com/sanitas/pdfs/mng_rcra.pdf]
- Margane, A. (2004): Guideline for Groundwater Monitoring. – Technical Cooperation Project ‘Management, Protection and Sustainable Use of Groundwater and Soil Resources in the ‘Arab Region’, Technical Report Vol. 7, prepared by BGR & ACSAD, 318 p.; Damascus.
- Nielsen, D.M. (1991): Practical Handbook of Ground-Water Monitoring. – 717 p.; Boca Ratton/USA (Lewis Publ.)
- Van Bracht, M. J. (2001): Made to Measure – Information Requirements and Groundwater Level Monitoring Networks. – PhD thesis, Univ. Amsterdam, 210 p.; Amsterdam.

Anejo G: Auditorías y optimización de la red de seguimiento

Hay un gran número de circunstancias que pueden originar problemas en la toma de datos de nivel de las aguas subterráneas y en su estudio. A efectos de minimizar estas dificultades resulta útil analizar periódicamente el procedimiento de seguimiento en su totalidad, y en las posibles causas de sus fallos.

Los fallos más frecuentes en el seguimiento de la piezometría de las aguas subterráneas en países en desarrollo, suelen explicarse por lo siguiente (Margane, 1995, modificado):

- El estado y la operatividad de los puntos de observación a veces no se verifican a conciencia;
- Las mediciones a mano no se hacen siempre que son necesarias (p.ej., cuando el flotador se ha atascado);
- Se dan registros manuales y otros que no son suficientemente seguros (debido a errores en la lectura/escritura, en la situación del pozo, en el uso o funcionamiento de un aparato de medida, etc.);
- Mediciones en campo y mantenimiento irregulares y fuera de plazo (p.ej., cambio de baterías a destiempo: la fecha en que las baterías fueron cambiadas la última vez debiera haberse anotado a su lado y en el informe de campo; sólo se deben utilizar baterías de alta calidad);
- Vandalismo (p.ej., debido a una protección ineficaz);
- Informes de campo perdidos o traspapelados;
- Las medidas tomadas se encuentran fuera del rango del equipo instalado.

Otro objetivo de estas auditorías reside en la optimización de la red de vigilancia, en cuanto a su densidad y a todo el proceso de toma de datos, con su evaluación y publicación, así como a los costes de las operaciones. Una propuesta para ese proceso de optimización, se ofrece en la Tabla G-1 (basado en Margane, 2004; Lawa, 1999a y 1999b; EPA 2004).

A lo largo de los últimos años se han ido desarrollando una serie de conceptos para reducir costes en los programas de seguimiento. Por ejemplo, el Ejército de los EEUU (AFCEE, 1997) ha introducido herramientas de apoyo a la decisión para el diseño y optimización eficaces de las redes de vigilancia a largo plazo en el seguimiento de sitios en recuperación, reduciendo los costes en un 30 – 60 %. Se puede alcanzar un esquema más acabado del seguimiento elaborando mejor los puntos siguientes.

Tabla G1: *Proceso de optimización en el planteamiento del seguimiento del agua subterránea*

Optimización de la Densidad y de la Operatividad de la Red *
<ul style="list-style-type: none"> • Establecimiento del inventario de pozos y del control de la funcionalidad de la vigilancia • Controlar que el diseño de los pozos y los requisitos para su mantenimiento / rehabilitación son los adecuados • Controlar el marco hidrogeológico (unidad acuífera, geometría, parámetros hidráulicos, adecuadas situación y profundidad de los pozos, etc.) • Definición de los pozos de observación de referencia • Definición de los emplazamientos óptimos • Definición de los puntos de observación cuya información es redundante o sin interés • Definición de sitios nuevos para la observación
Optimización de los Procedimientos de Gestión
<ul style="list-style-type: none"> • Control y ajuste de las frecuencias en la observación
<ul style="list-style-type: none"> • Control y ajuste de los parámetros a analizar y de garantías de calidad en los resultados analíticos
<ul style="list-style-type: none"> • Control y ajuste de los métodos seguidos en la transferencia de datos y en sus procedimientos
<ul style="list-style-type: none"> • Control de los procedimientos seguidos para comprobar la verosimilitud de los datos
<ul style="list-style-type: none"> • Control para que sean apropiados y adaptables los métodos y procedimientos aplicados en el almacenamiento y procesado de los datos
<ul style="list-style-type: none"> • Control de los procedimientos utilizados para intercambiar datos con otras instituciones
<ul style="list-style-type: none"> • Control y ajuste de los métodos y procedimientos seguidos para la publicación de los datos
Optimización de los Procedimientos para el Trabajo en Campo
<ul style="list-style-type: none"> • Control y ajuste de los métodos y procedimientos aplicados para la toma de datos (registro manual / automático, transferencia telemétrica, parámetros medidos, aparatos utilizados, etc.)
Optimización de los Costes
<ul style="list-style-type: none"> • Control del coste de los análisis (efectividad del coste, garantía de la buena calidad de los datos)
<ul style="list-style-type: none"> • Control de los costes de equipamiento y de material
<ul style="list-style-type: none"> • Control de los costes de gestión incluyendo los de las comprobaciones (auditorías)
<ul style="list-style-type: none"> • Control de los costes de mano de obra incluyendo la capacitación / formación

Nota: este proceso de optimización comenzará con una evaluación sobre si el pozo de observación sigue cumpliendo con los criterios del seguimiento que fueron, o debieron haber sido, concretados al definir dicho seguimiento.

Referencias :

- AFCEE (1997): Long-Term Monitoring Guide – Version 1.1. –Air Force Center for Environmental Excellence, 40 p; Brooks Air Force Base/USA. [internet source: <http://www.afcee.brooks.af.mil/products/rpo/default.asp>]
- EPA (2004): Guidance for Monitoring at Hazardous Waste Sites: Framework for Monitoring Plan Development and Implementation. – OSWER Directive, 9355.4-28; Washington.
- LAWA (1999a): Empfehlungen zu Konfiguration von Messnetzen sowie zu Bau und Betrieb von Grundwassermessstellen (qualitativ). – 32 p.; Berlin/Germany (Kulturbuchverlag).
- LAWA (1999b): Empfehlungen zur Optimierung des Grundwasserdienstes (quantitativ). – 36 p.; Berlin/ Germany (Kulturbuchverlag).
- MARGANE, A. (1995): Groundwater Resources of Northern Jordan, Vol.2, Part 2: Monitoring of Groundwater Levels in Northern Jordan. - Technical Cooperation Project 'Advisory Services to the Water Authority of Jordan', BGR & WAJ, BGR archive no. 112708, 71 p. 3 app., 3 maps; Amman.
- MARGANE, A. (2004): Guideline for Groundwater Monitoring. – Technical Cooperation Project 'Management, Protection and Sustainable Use of Groundwater and Soil Resources in the Arab Region', Technical Report Vol. 7, prepared by BGR & ACSAD, 318 p.; Damascus.

Anejo H: Un ejemplo de seguimiento del agua subterránea en Jordania

Índice

1	Los recursos de agua y su gestión en Jordania.....	186
1.1	Recursos en agua subterránea.....	186
1.2	Organización de la gestión y del seguimiento del agua subterránea.....	187
2	Desarrollo del agua subterránea en la cuenca Amman-Zarqa.....	189
2.1	Descripción general de la cuenca.....	192
2.2	Recursos en agua subterránea y tendencias observadas.....	192
3	Valoración del programa para el seguimiento de las aguas subterráneas.....	195
3.1	Red de vigilancia de los niveles del agua subterránea.....	195
3.1.1	<i>Objetivos del seguimiento.....</i>	<i>195</i>
3.1.2	<i>Estado previo de la red de vigilancia.....</i>	<i>195</i>
3.1.3	<i>Mejoras introducidas en la red.....</i>	<i>195</i>
3.2	Red de vigilancia de la calidad del agua subterránea.....	197
3.2.1	<i>Objetivos del seguimiento.....</i>	<i>197</i>
3.2.2	<i>Estado previo de la red de vigilancia.....</i>	<i>197</i>
3.2.3	<i>Mejoras introducidas en la red.....</i>	<i>197</i>
3.3	Toma de datos y calidad de los datos.....	198
4	Referencias Bibliográficas.....	200

1 Los recursos de agua y su gestión en Jordania

1.1 Los recursos de agua subterránea

Los recursos en agua de Jordania consisten fundamentalmente en aguas superficiales y subterráneas. Los recursos renovables se estiman en aproximadamente 780 millones de metros cúbicos (MMC) al año, incluyendo el agua subterránea (275 MMC/año repartidos entre 11 cuencas) y el agua de superficie utilizable (505 MMC/año correspondientes a 15 áreas de explotación). Se estima disponible un complemento en agua subterránea fósil de unos 143 MMC/año. Los acuíferos salobres no están aún del todo investigados, pero se espera conseguir al menos unos 50 MMC/año para uso urbano una vez desalinizados (JICA, 1995). Las aguas residuales tratadas vienen siendo usadas de forma creciente para regadío, principalmente en el Valle del Río Jordán, y pueden proporcionar al menos unos 80 MMC/año adicionales de aquí al año 2010 (El-Naser and Elias, 1993).

El agua subterránea es la mayor fuente de suministro de agua en el país. Se han identificado 12 cuencas subterráneas en Jordania (ver Figura H1), la mayor parte de ellas con varios sistemas acuíferos.

El suministro de agua en Jordania durante el año 2003 fue aproximadamente de 810 MMC, de los cuales más de 520 MMC tuvieron origen subterráneo (433 MMC renovables, 87 MMC no renovables). La recarga anual de sus acuíferos a largo plazo es aproximadamente de 275 MMC; en consecuencia, en ese año se bombearon en exceso unos 245 MMC de los recursos subterráneos.

Las aguas de superficie contribuyeron al balance de 2003 aproximadamente con el 36 % (290 MMC), junto con unos 75 MMC de aguas residuales reutilizadas (9 % del balance total). En la última década las aguas residuales tratadas se han convertido en un recurso importante para usos restringidos, viéndose incorporadas activamente en la planificación estratégica dentro de la política de aguas del país.

La escasez de agua es la limitación natural singular más importante para el crecimiento y desarrollo de la economía de Jordania. El rápido incremento de la población y del desarrollo industrial ha creado unas exigencias sin precedentes sobre los recursos de agua. La demanda total se aproxima al millardo de metros cúbicos por año, lo cual está próximo al límite de los recursos de agua renovables y desarrollables económicamente en Jordania. Estos recursos renovables se han estado explotando durante varios años con una intensidad insostenible. Por otro lado, en algunas zonas la calidad del agua tanto subterránea como de superficie se está deteriorando. La demanda diaria del agua no está siendo cubierta satisfactoriamente a lo largo del país (ni espacial ni temporalmente) y los costes para desarrollar nuevos recursos de agua crecen rápidamente.

1.2 La organización de la gestión y del seguimiento de las aguas subterráneas

En el Reino Hachemita de Jordania, el Ministerio del Agua y del Regadío (MAR) es la institución gubernamental responsable de la gestión y supervisión de los recursos de agua (subterránea y superficial) en cantidad y calidad. Una de las importantes actividades de la División para la Gestión de los Recursos de Agua en este Ministerio, consiste en mejorar y rehabilitar la red de vigilancia en la Cuenca Amman-Zarqa (CAZ). Análogamente, el análisis de los datos proporcionados por esta vigilancia es responsabilidad del Departamento para el Estudio y la Planificación de los Recursos de Agua. Además, la vigilancia de algunos pozos (en la mayoría de los casos, durante cortos periodos de tiempo) es llevada a cabo dentro de proyectos realizados por el MAR, la Autoridad Jordana del Agua (AJA), la Real Sociedad de la Ciencia (RSC), el Alto Consejo para la Ciencia y la Tecnología (ACCT), u otros. Todos los datos relativos al seguimiento de la piezometría del agua subterránea se recogen en la base de datos del MAR.

El programa para el seguimiento de la calidad del agua subterránea comprende parámetros químicos y bacteriológicos. Esta vigilancia se lleva a cabo desde el año 1970 y desde 1984 es el AJA quien ha realizado el seguimiento de la calidad del agua subterránea. Desde 1998 la vigilancia de los abastecimientos de agua la hace el AJA y el seguimiento de los pozos de observación a través de todo el país lo hace el MAR.

Todos los datos químicos se recogen en la base de datos del MAR; sin embargo, los resultados de los análisis bacteriológicos van a la base de datos del laboratorio del AJA, si bien recientemente estas dos bases de datos se han conectado mutuamente. La razón de la existencia de estas dos bases de datos separadas en el pasado, consistía en que la primera tenía la responsabilidad del seguimiento de la calidad general de las aguas subterráneas, mientras que la segunda la tenía en relación con la aptitud del agua para consumo humano.

La División para el Seguimiento de las Aguas Subterráneas prepara anualmente un informe de seguimiento con la interpretación de los datos, especificando las áreas donde es crítico el descenso de los niveles del agua subterránea o bien el deterioro de su calidad. En la mayoría de los proyectos del MAR relativos a aguas subterráneas, se han utilizado tanto los datos existentes como los nuevos para evaluar los recursos disponibles de agua y construir nuevas estrategias con miras a la planificación y la sostenibilidad en el futuro.

La estructura orgánica de la División para el Seguimiento de las Aguas Subterráneas al igual que el número de técnicos e hidrogeólogos, resultan adecuados para llevar a cabo las tareas presentes y futuras. Una parte del equipamiento técnico (p.ej., registros automáticos del nivel de agua, recambios, indicadores de nivel, vehículos para el campo) es insuficiente y necesita completarse.

2 Desarrollo de las aguas subterráneas en la cuenca Amman-Zarqa

2.1 Descripción general de la cuenca

La cuenca Amman-Zarqa es una de las áreas más desarrolladas de Jordania. Es también la región con más rápido crecimiento, tanto industrialmente como en términos de población, estando implantándose en la actualidad nuevas industrias y proyectos de riego en la zona.

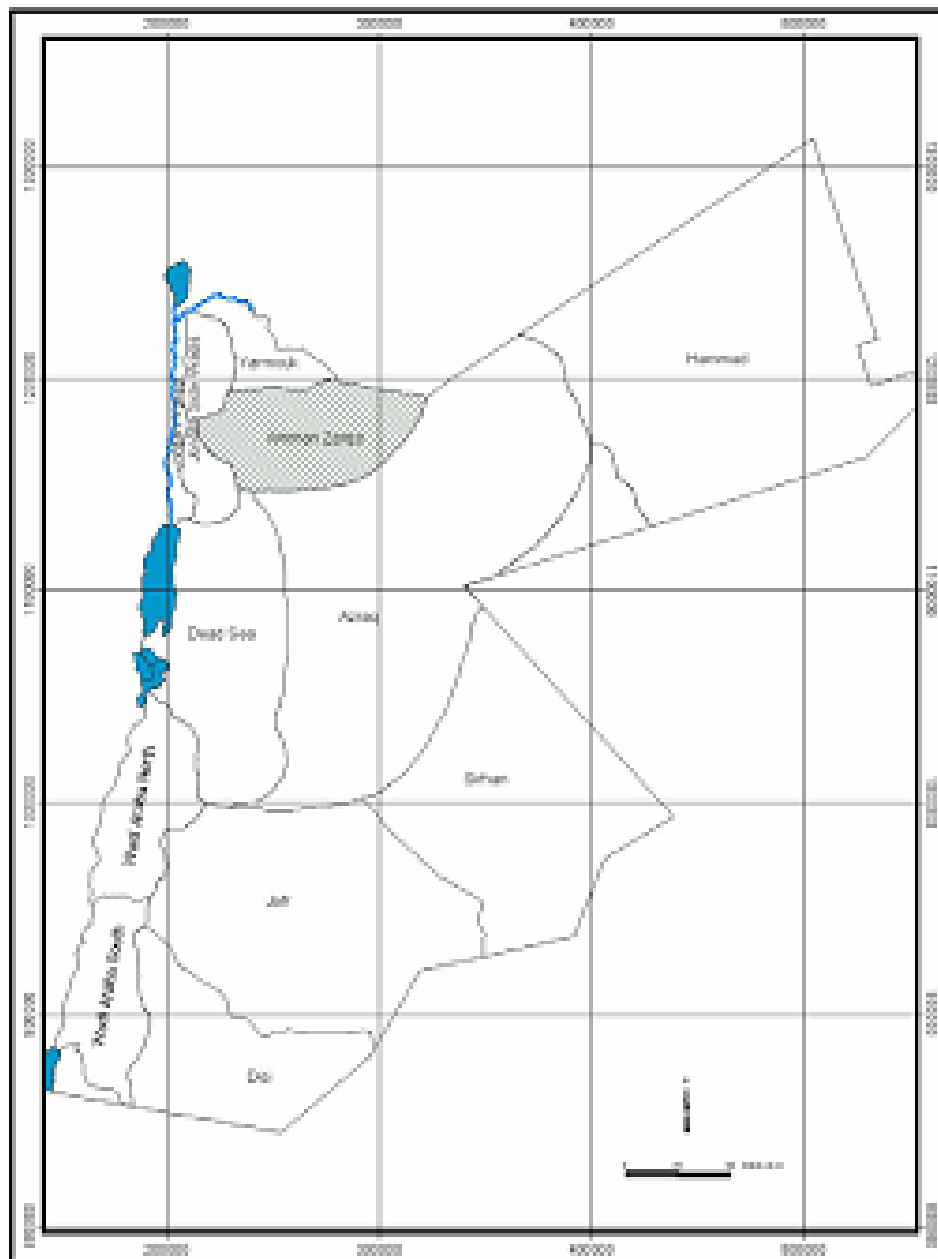


Figura H1: Cuencas subterráneas en Jordania. Situación del área de estudio

La cuenca Amman-Zarqa se extiende por el norte hasta la frontera con Siria, por el este hasta la cuenca Azraq, al noroeste hasta la cuenca Yarmouk y hasta el área de Amman en el suroeste. Cubre una extensión de 4.710 km², de los cuales 468 km² están en Siria (ver Figura H1).

La morfología de la zona se caracteriza por ser una superficie de colinas con pendientes de suaves a fuertes. La altitud varía desde unos - 50 m sobre el nivel del mar (snm) en la parte occidental de la zona de captación, hasta unos 1.200 m (snm) cerca de la Montaña Árabe.

La topografía es un reflejo de la geología, consistiendo principalmente en una elevación basáltica que desciende hacia una meseta central suavemente ondulada y bordeada en el norte y sur por unas colinas calcáreas escarpadas y entrecortadas. El clima es semiárido y caracterizado por inviernos fríos y húmedos con temperaturas bajas que dan heladas moderadas durante la noche, y veranos cálidos y secos. Según el mapa pluviométrico anual medio (50 años), la lluvia caída se sitúa entre 100 y 500 mm., con medias mensuales máximas en Diciembre, Enero, Febrero y Marzo. La evaporación media representa aproximadamente el 90 % de la precipitación total (AJA, 1989); la infiltración media estimada se sitúa entre 4 - 10 % (AJA, 1989).

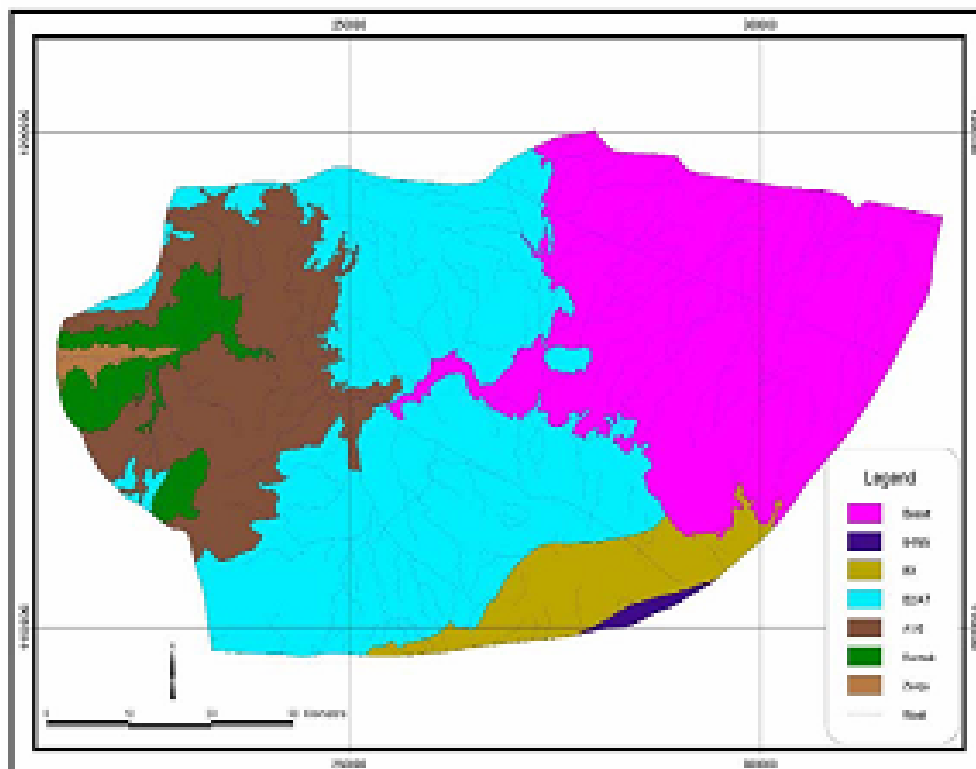


Figura H2: Formaciones aflorantes en el área de estudio

Se pueden distinguir diferentes unidades hidrogeológicas en cuanto a su dimensión y estructura (hidro)geológica (Figura H2):

- El Acuífero Zarqa (Z)
- El Acuífero Kurnub (K)
- El Sistema Hidrogeológico del Bajo Ajlun (A1/6)
- El Acuífero Nau'r (A1/2)
- El Acuitardo Fuheis (A3)
- El Acuífero Hummar (A4)
- El Acuitardo Shueib (A5/6)
- El Sistema Acuífero Amman-Wadi Sir (B2/A7)
- El Acuitardo Muwaqqar (B3)
- El Acuífero Rijam (B4)
- El Acuífero Basáltico (BS)

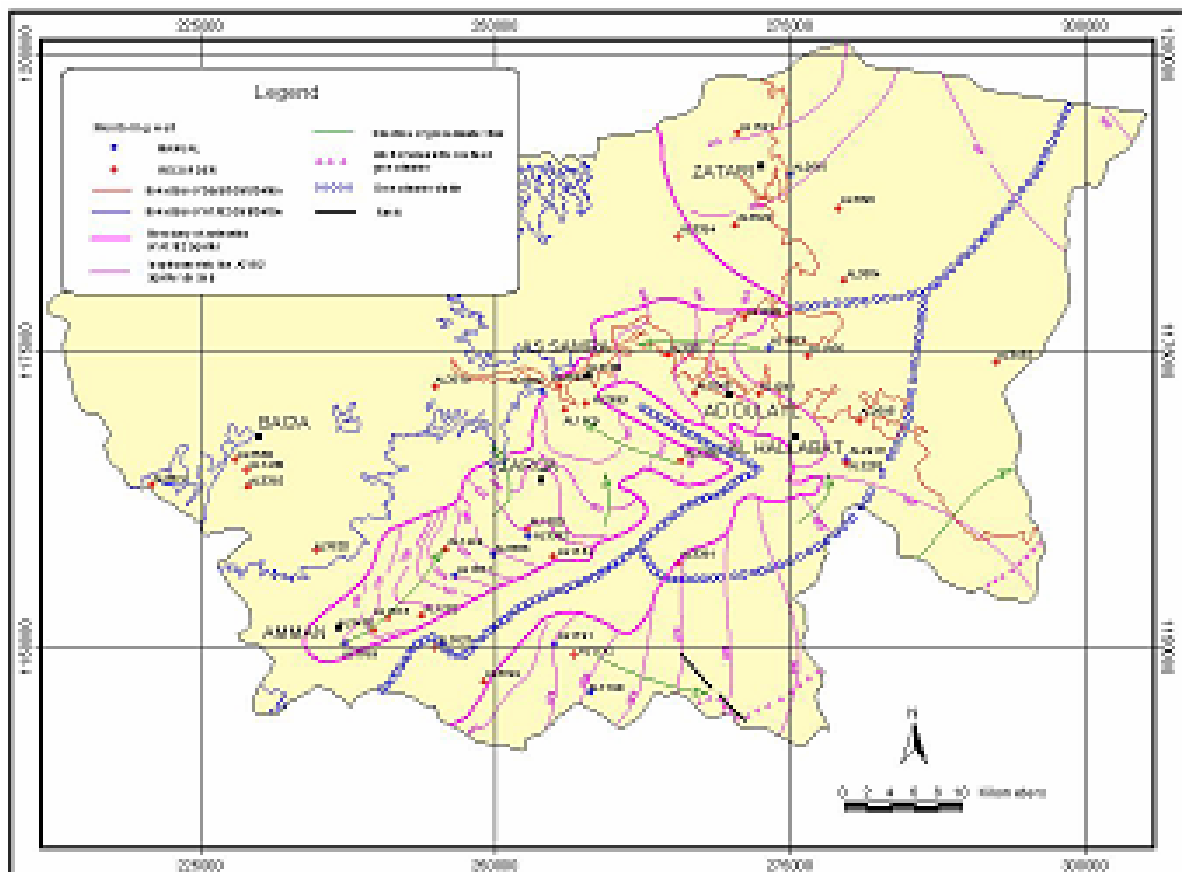


Figura H3: Piezometría del Acuífero B2 /A7, con los puntos de observación de los niveles

El grupo B2/A7 constituye el acuífero mayor y más importante de Jordania. Es un acuífero kárstico desarrollado en rocas carbonatadas representadas por calizas masivas, con depósitos cíclicos de creta, fosfatos, caliza y silex. Recibe la mayor parte de la recarga actual y está considerado como la fuente principal de agua dulce para el abastecimiento humano y la agricultura de regadío en la Meseta. El agua subterránea infiltrada en la colina de Amman se distribuye en cuatro direcciones según se indica en el mapa piezométrico de la Figura H3. La recarga se origina en las elevaciones occidentales y se estima para el conjunto de la cuenca en un total de 40 – 45 MMC/año; también recibía la transferencia adicional de unos 23 MMC/año desde el acuífero basáltico en la zona alta del valle Zarqa, con anterioridad a la sobreexplotación de ese acuífero.

2.2 Recursos en agua subterránea y tendencias observadas

El recurso subterráneo representa la fuente principal para el abastecimiento de agua en la cuenca Amman-Zarqa. La mayor parte del agua subterránea se encuentra en, y está siendo extraída de, las capas basálticas y del acuífero B2/A7, dentro de una zona circundada por el límite saturado de este acuífero. Esta área contiene la mayor concentración de pozos y es donde la bajada de niveles y la degradación de la calidad del agua han alcanzado un umbral crítico. Las extracciones en esta Cuenca Amman-Zarqa (CAZ) comenzaron a mediados de los años sesenta (1965: 8,46 MMC) y continuaron creciendo ininterrumpidamente hasta alcanzar unos 140 MMC en 2003. La recarga anual a largo plazo se estima en 70,0 MMC aproximadamente.

El seguimiento de los recursos de agua proporciona los datos básicos que se requieren para la planificación y la elaboración de directrices a adoptar, para determinar unas extracciones seguras y para realizar proyecciones de futuro. Basándose en esto, una red de vigilancia integrada del agua en cantidad y calidad es esencial y de importancia para comprender el estado presente y cambiante de los recursos en agua y para definir y acometer las medidas que implementen una política relativa al consumo de agua.

El desarrollo reciente del agua subterránea está provocando un impacto sobre el sistema acuífero, tanto en cuanto a la cantidad como a la calidad de este recurso.

En relación con el nivel del agua subterránea:

- A finales de los años 70 y principios de los 80, se observaron bajadas en los niveles del agua del acuífero B2/A7 y del basáltico en las zonas de Dulayl, Hallabat y Mafraq, tanto en los pozos del gobierno como en los particulares. La extensión e intensidad de estas bajadas varían considerablemente: en el acuífero B2/A7 van **desde 0,67 m hasta 2,0 m al año**.

- El acuífero A4, parcialmente confinado en la cuenca y conocido por sus manantiales, ya no tiene surgencias artesianas. Se sabe que la depresión de sus niveles en Ain Ghazal, al norte de Amman, supera los **70 metros**.
- El acuífero A1/2 no ha experimentado ninguna bajada significativa en los niveles: sus manantiales siguen dando agua en la parte occidental de la cuenca.
- En las zonas de Baqa y de Ain el Basha, con los pozos muy cerca unos de otros, el acuífero Kur-nub muestra una reducción excesiva: la bajada total del nivel en los últimos 30 años alcanza los **70 metros**.
- No se han observado descensos en los niveles del acuífero Zarqa.

En relación con la calidad del agua subterránea:

Con anterioridad a la sobreexplotación del agua subterránea, los datos históricos hasta 1970 muestran que todos los acuíferos de la CAZ tienen un agua de una calidad claramente buena que la hace apta para todos los usos. A finales de los 70, tanto los usuarios privados como el gobierno comenzaron a provocar descensos en los pozos, particularmente en los acuíferos B2/A7 y basáltico, que eran las fuentes principales para el abastecimiento humano y agrícola de la cuenca. Desde entonces la bajada en los niveles del agua se vio acompañada por una degradación de su calidad, como puede observarse en el gráfico de la serie temporal adjunta (ver Figura H4).

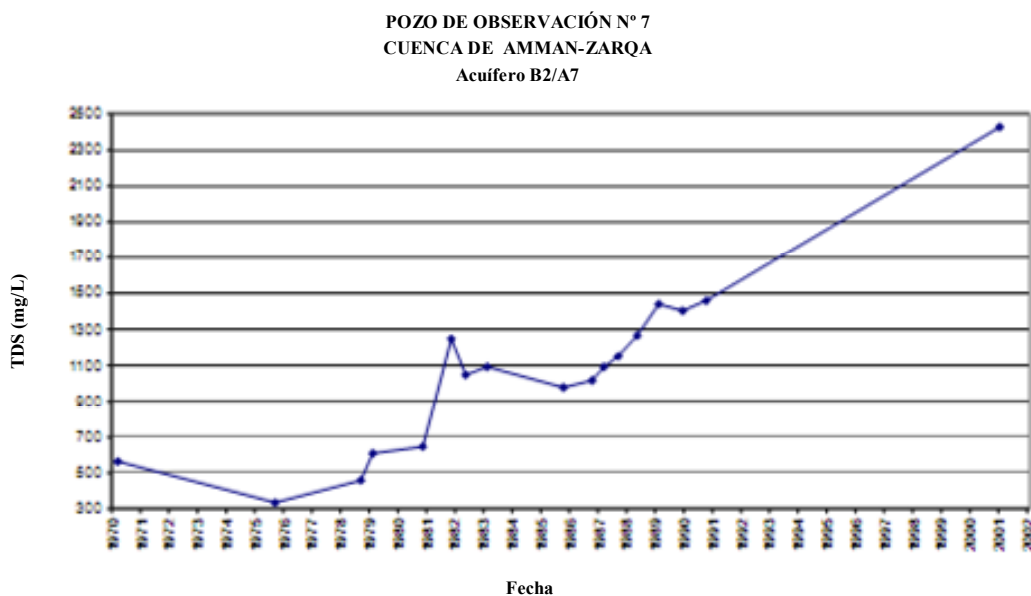


Figura H4: Incremento del TSD a lo largo de tres décadas

Muchos sondeos llegaron hasta los acuíferos profundos de peor calidad, y el bombeo simultáneo en varios de ellos alteró el equilibrio hidráulico subterráneo. Se presenta a continuación una breve descripción de la química del agua subterránea en el acuífero Amman-Wadi Sir (B2/A7).

Anteriormente a las extracciones excesivas, el TSD se encontraba entre 260 y 680 ppm y el tipo de agua era bicarbonatada cálcica y magnésica. En la actualidad se observa una subida de la salinidad en las partes norte, noreste y este de la cuenca; en algunos pozos privados del noreste, el TSD supera normalmente 2.700 ppm.

En el año 2001 y a través de un proyecto de cooperación con el MAR, los Asociados para el Desarrollo Rural (ADR) llevaron a cabo un estudio en la CAZ para evaluar las consecuencias de la sobreexplotación del agua subterránea y estudiar el comportamiento de los acuíferos ante los cambios presentes y futuros en las extracciones.

3 El programa para el seguimiento de las aguas subterráneas

En 1994 y en base al estudio de los datos disponibles sobre la piezometría, el Proyecto para la Conservación de la Calidad del Agua a través de la Agencia para el Desarrollo Internacional de los Estados Unidos (USAID) en cooperación con el MAR, llevaron a cabo la mejora y rehabilitación del sistema de vigilancia del agua subterránea en la CAZ mediante la perforación de una serie de sondeos de observación y la rehabilitación / instalación de nuevas estaciones para esta vigilancia. En 1995 el Instituto Federal Alemán para las Ciencias de la Tierra y los Recursos Naturales (BGR) junto con la AJA, a través de un proyecto de cooperación técnica, confeccionaron un informe sobre el seguimiento de los niveles del agua subterránea en Jordania.

En este capítulo se muestran los resultados de este estudio.

3.1 La Red para el Seguimiento del Nivel de las Aguas Subterráneas

3.1.1 *Objetivos del seguimiento*

El objetivo de la mayoría de los pozos de observación en Jordania es el seguimiento a largo plazo de las fluctuaciones del manto acuífero, lo cual es necesario para los trabajos de modelado y simulación de las aguas subterráneas a efectos de definir la porosidad efectiva regional de los acuíferos y poder calibrar los modelos hidrogeológicos que se requieren. Por lo tanto, estos datos serán utilizados para estudiar los cambios en el balance de agua del recurso subterráneo y servirán como herramienta de planificación para la gestión del mismo.

3.1.2 *Estado previo de la red*

El sistema para el seguimiento de las aguas subterráneas en la CAZ comprende pozos de observación del nivel estático del agua (NEA), del nivel dinámico del agua (NDA) y de la calidad del agua. El desarrollo histórico de la red de vigilancia viene expuesto en la Tabla H1.

Tabla H1: Desarrollo histórico de la red de vigilancia

Año	Pozos				
	Nº total en		Estático (NEA)	Dinámico (NDA)	Discontinuo
El país	La cuenca				
1977	32	11			
1994	92	18			
2004	208	78	47	10	21

3.1.3 Mejoramiento de la red

Unos estudios previos indicaron que la red existente era inadecuada para dar respuesta a las necesidades correspondientes a la gestión de los recursos de agua subterránea. En la actualidad, todos los pozos de observación han sido evaluados teniendo en cuenta el objetivo del seguimiento, la ubicación y el diseño del sondeo, y el estado técnico en que se encuentra su equipamiento para la observación, a efectos de definir en qué sitios se deben continuar las mediciones y dónde se deben dar por terminadas, añadiendo recomendaciones para pozos adicionales.

Durante el año 2000 se llevó a cabo un programa de **rehabilitación** en dos fases para ocho sondeos de observación NEA, rehabilitación lamentablemente fallida en tres de ellos al estar llenos de piedras y otros materiales.

Los pozos seleccionados en la rehabilitación se consideraron importantes para la red debido a varias razones, ya que:

- pertenecían a un área agrícola / industrial de importancia, con un consumo de agua identificable;
- tenían que indicar el efecto de las actividades del sector industrial sobre los recursos de agua subterránea en cantidad y en calidad;
- estaban situados en la zona de mayor consumo registrado para la actividad agrícola.

Por otro lado, en mayo de 2001 se llevó a cabo por el MAR / ADR un programa de acondicionamiento de 17 sondeos de observación en la cuenca, incluyendo la instalación de cubiertas protectoras de hormigón para seis de ellos y reparación externa para los otros 11, pintándolos y cambiando los cierres de sus cubiertas protectoras.



Figura H5: Rehabilitación de un sondeo para observación del nivel de agua en la CAZ

El estudio de los datos disponibles relativos al seguimiento de los niveles, aconsejó **separar** 21 pozos de la red de vigilancia correspondiente: 14 de ellos por su proximidad a sondeos de extracción y otros 7 porque se encontraban en explotación, aun cuando en un origen habían sido construidos para el seguimiento.

Para cubrir la falta de datos en la parte noreste de la CAZ, se recomendó la **perforación de dos pozos nuevos** en el acuífero B2/A7, así como otro más en el área de Jarash en el acuífero A1/A2.

3.2 La Red para el Seguimiento de la Calidad de las Aguas Subterráneas

3.2.1 *Objetivos del seguimiento*

El objetivo del seguimiento de la calidad del agua subterránea consiste en la supervisión de dicha calidad a lo largo y ancho de la cuenca. Los resultados obtenidos aportan información relativa a las condiciones de la calidad que tiene el agua, en particular sobre las tendencias a largo plazo o sobre el impacto de los contaminantes en el acuífero.

3.2.2 *Estado previo de la red*

La red de calidad en la CAZ consta de 114 pozos de los cuales 71 están operativos y 43 no están actualmente activos; en estos últimos se suspendieron las mediciones porque se encontraban demasiado cerca de otros sondeos de observación y no proporcionaban información adicional alguna. La gran mayoría de los pozos y manantiales se muestrean para determinar los parámetros principales, tales como la conductividad eléctrica (CE), el pH, la dureza total, Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^- , NO_3^- y recientemente hierro y sulfuros. También se miden parámetros bacteriológicos (coliformes totales y fecales) de una manera regular en aquellos pozos y manantiales utilizados para el abastecimiento humano. Otros componentes como los metales pesados, disolventes orgánicos o aditivos de la gasolina, también son objeto de observación en algunas áreas.

Según el informe anual de la División para el Seguimiento del Agua Subterránea, se ha observado un aumento de la salinidad y los nitratos durante 2003 en la CAZ.

3.2.3 *Mejoramiento de la red*

La revisión hecha en la red de vigilancia de la calidad del agua subterránea, indicó la necesidad de **reactivar** 26 pozos de observación, principalmente localizados en el campo.

El examen de la distribución de esta red en la CAZ indicó la carencia de puntos de observación en las áreas de Zatari y del norte de Badia, recomendándose incluir 10 **pozos nuevos** a esta red.

Se decidió **retirar** de la red 32 sondeos de observación que estaban en proximidad de bombeos.

3.3 Recogida y calidad de los datos

La ‘Sección para el Seguimiento del Agua Subterránea’ ha de continuar comprobando y corrigiendo las medidas tomadas para mejorar suficientemente la calidad de los datos de vigilancia, siendo ésta uno de las funciones principales de los hidrogeólogos responsables.

Existen problemas relativos a deficiencias técnicas y de organización, pero también de capacitación y financieras, a causa de los cuales los resultados del seguimiento todavía son insatisfactorios.

Deficiencias técnicas

- A menudo los sondeos de observación no han sido **diseñados ni construidos con este particular propósito**. En muchos casos los sondeos se han dejado para la observación por ser poco productivos, pudiendo entonces sus medidas de nivel no ser representativas de las fluctuaciones del manto acuífero (mala situación del sondeo, equivocada posición de las rejillas, corrosión o incrustaciones en el enrejillado, etc.).
- En algunos sondeos de observación **no está claro cuál es el acuífero vigilado**. A veces, la perforación atraviesa más de un acuífero.
- Es corriente que algunos de los aparatos **medidores se atasquen** debido a un mantenimiento insuficiente y a problemas derivados de la construcción (no vertical) del sondeo o por otros problemas técnicos, lo cual conduce a medidas no representativas.
- Con frecuencia los equipos son víctima de **robo o vandalismo**, ya que a veces no están protegidos suficientemente con un cabezal metálico con candados.
- Los pozos utilizados en mediciones manuales no tienen suficiente protección. Se hace un pequeño agujero en el cabezal del pozo como vía para introducir una sonda y medir el nivel, y este orificio queda después **desprotegido** al igual que el pozo, con lo cual a menudo es cegado con piedras.

Deficiencias de organización

- Normalmente, las hojas de los registros de tambor **deben cambiarse todos los meses**. El máximo intervalo de tiempo es de 32 días para los registros que hay funcionando en Jordania. Debido a la falta de vehículos para el transporte o por otros motivos,
- el mantenimiento de los registros es realizado por una persona que está a cargo de la reparación de todo el equipo de aparatos para las mediciones, los cuales además han de ser llevados a su taller: éste es el motivo, aparentemente, por el cual **no hay un mantenimiento suficientemente adecuado y frecuente**. Los técnicos de campo, a su vez, realizan un mantenimiento que es ineficiente al no estar equipados a menudo con las herramientas y piezas de recambio necesarias. Con frecuencia se ha observado, por ejemplo, que la tinta estaba completamente seca (a veces durante meses), o

bien que por momentos salía demasiada porque el cartucho no estaba ajustado; en algunos casos el gráfico original había sido sustituido por otro dibujado a mano.

- La mayoría de las veces, sólo han entrado en el banco de datos las medidas de nivel correspondientes al día en que se cambió el papel del tambor; normalmente esto representa un intervalo de tiempo de un mes, más o menos. Por otro lado, las fluctuaciones del nivel de agua son a menudo relativamente acusadas debido a los bombeos próximos o a las actividades de recarga. En consecuencia, los **intervalos de tiempo** correspondientes a las medidas almacenadas en el banco de datos debieran ser mucho más breves en algunos casos.
- En algunas zonas es insuficiente la **continuidad** en el seguimiento de la piezometría. Hay pozos de observación que han sido convertidos en bombeos de explotación de manera temporal o permanente, en momentos de escasez de agua. En ciertas áreas se ha pasado de tomar las medidas del nivel de agua en un pozo a tomarse en otro, y ello varias veces.
- La recepción de las medidas de campo y su carga en la base de datos **no son comprobadas** suficientemente. Muchos de los hidrogramas del banco de datos tienen que ser corregidos en gran manera. En general, hace falta mejorar la evaluación de los registros de tambor originales.
- Los **adecuados informes de campo** de los técnicos no están disponibles y raramente se encuentra anotada en las hojas de los tambores información sobre las medidas de nivel registradas y sobre los bombeos en los pozos próximos, sobre las razones del funcionamiento defectuoso de los aparatos, los requerimientos del mantenimiento, las causas de bruscas fluctuaciones en el nivel, etc. Esto hace difícil o imposible averiguar los motivos que originan ciertas fluctuaciones.
- Hay muestras para la calidad del agua subterránea que han sido tomadas con arreglo a **distintos planteamientos**, según el propósito y los parámetros perseguidos. La toma de muestras en el pasado ha sido defectuosa a menudo (datos inseguros, lagunas en los datos), por lo cual el estudio de los datos históricos sólo puede hacerse hasta cierto punto.
- Los registros de los aparatos deben ser controlados con las **medidas tomadas a mano** cada vez que se cambian los rollos de los tambores. De hecho, las mediciones a mano son escasas y realizadas con demasiada irregularidad (a veces menos de una vez al año).
- Lamentablemente, incluso muchas medidas tomadas a mano **no son fiables** (lecturas incorrectas, errores en sumas o sustracciones) debido a que a menudo se han retirado los indicadores del nivel de agua para su reparación y se ha variado su profundidad, a que hay errores de anotación, y a la falta de información sobre los puntos de referencia para estas mediciones.

4 Referencias

- Hobler, M., et al. (1991): Groundwater Resources of Southern Jordan, Vol. 1 5. Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR), Project No. 86.2068.4 and No. 88.2180.3, Report No. 108652 and 107375; Hannover.
- Howard Humphreys & SONS (1983): Monitoring and Evaluation of the Amman-Zerqa Aquifers. - Unpubl. Rep. prepared for Amman Water and Sewerage Authority; Amman
- JICA (2001) : Water Resources Management Master Plan – Final Report, Vol. I., Amman
- Margane, A., et al. (1995): Groundwater Resources of Northern Jordan, Vol. 2. – Part 2. Rep. Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR), BMZ-Project No.: 89.2105.8 , File No. 12548/94 ; Hannover.
- Ministry of Water and Irrigation (2003): Water information system. Amman, Jordan
- Hydrometeorological Stations Monitoring Upgrade Plan. Water Quality Improvement and Conservation Project. 1997.
- Water Quality Monitoring System Upgrade Plan-Appendix D-Water quality Improvement and Conservation Project. 1995.
- Water Quality Monitoring System Upgrade Plan-Appendix E-Water quality Improvement and Conservation Project. 1995.
- Abu Ajamieh, M.M., 1989. Assessment of Brackish Groundwater in Jordan. A report submitted to the USAID and to the MWI by Development Alternatives, Inc.
- AHT and BGR, 1977. National Water Master Plan of Jordan, Volume IV: Annexes III-VI
- Parker, D.H., 1970. Investigation of the Sandstone Aquifers of East Jordan. AGL: SF/JOR9, Technical Report 2, FAO, UNDP.
- National Water Master Plan of Jordan, 1977. (Groundwater Resources Volumes)
- Natural Resources Authority of Jordan (NRA): Open file reports.
- Water Resources Authority (WAJ): Annual Reports of 1989- 2003.
- Associates in Rural Development (ARD), 2001. Rehabilitation and Upgrade of the Groundwater and Wadi Flow Monitoring Networks for Amman Zarqa Basin.
- JICA (1996): The Study on the Improvement of the Water Supply System for the Zarqa District in the Hashemite Kingdom of Jordan (Final Report).