

# Gestión Sustentable del Agua Subterránea

## Conceptos y Herramientas

Serie de Notas Informativas Nota 9

### Requerimientos de Monitoreo del Agua Subterránea

para manejar la respuesta de los acuíferos y las amenazas a la calidad del agua

2002-2006

**Autores** (Grupo Base del GW•MATE)

 Albert Tuinhof<sup>1</sup> Stephen Foster<sup>1</sup> Karin Kemper<sup>2</sup> Héctor Garduño Marcella Nanni  
 (<sup>1</sup>autor líder <sup>2</sup>autor de apoyo principal)

#### ¿Cuáles son los objetivos, beneficios y retos del monitoreo del agua subterránea?

- El agua subterránea es un recurso muy extendido, pero oculto e inaccesible (**Notas Informativas 1 y 2**) y en contraste con el agua superficial, los cambios en su cantidad y calidad frecuentemente son procesos muy lentos que ocurren debajo de la tierra en grandes extensiones. Puesto que no es posible determinar estos cambios simplemente con un único recorrido breve de campo, es necesario utilizar redes de monitoreo e interpretar los datos obtenidos. El monitoreo de la respuesta de un acuífero y de sus tendencias de calidad son básicos para lograr una gestión eficaz del agua subterránea y cumplir con la principal meta de gestión, o sea, controlar los impactos de la extracción del agua subterránea y de las cargas de contaminantes.
- Para evaluar aspectos importantes del agua subterránea y poder implementar soluciones de gestión se requieren datos hidrogeológicos, tanto de la 'condición básica inicial' como de las 'variaciones en el tiempo' (Tabla 1). La recolección de los datos que registran las '*variaciones en el tiempo*' es lo que generalmente se considera

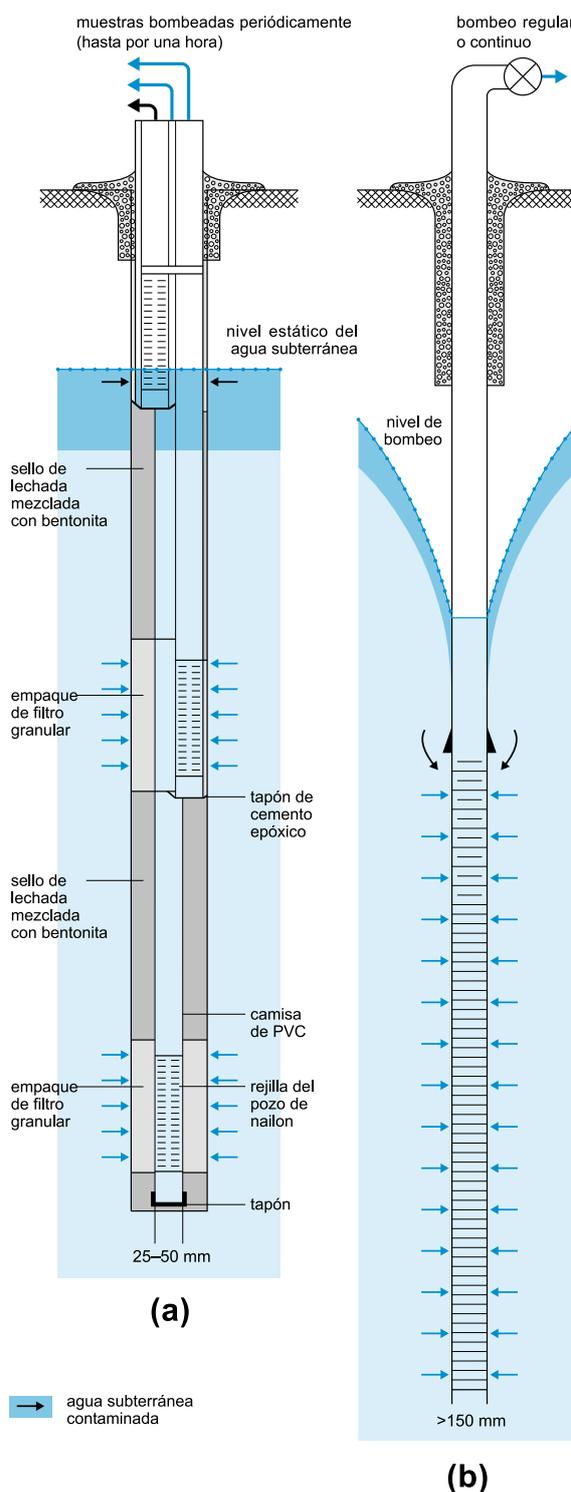
**Tabla 1: Tipos de datos que se requieren en la gestión del agua subterránea**

TIPO DE DATOS	INFORMACIÓN BÁSICA INICIAL (de archivos)	DATOS VARIANTES EN EL TIEMPO (de estaciones de campo)
<b>Ocurrencia del Agua Subterránea y Propiedades del Acuífero</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>registros de pozos de producción (perfiles hidrogeológicos, niveles y calidad instantáneos del agua subterránea)</li> <li>pruebas de bombeo en pozos y acuífero</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>monitoreo del nivel del agua subterránea</li> <li>monitoreo de la calidad del agua</li> </ul>
<b>Uso del Agua Subterránea</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>instalaciones de bombeo de pozos de producción</li> <li>inventarios de los usos del agua</li> <li>registros y pronósticos de población</li> <li>consumo de energía para riego</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>monitoreo de la extracción de pozos de producción (directo o indirecto)</li> <li>variaciones del nivel del agua subterránea en los pozos</li> </ul>
<b>Información de Apoyo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>datos climáticos</li> <li>inventarios de uso del suelo</li> <li>mapas y secciones geológicas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>medición del flujo en los ríos</li> <li>observaciones meteorológicas</li> <li>levantamientos con satélite del uso del suelo</li> </ul>

como el 'monitoreo del agua subterránea'. Dicho monitoreo comprende la recolección, análisis y almacenamiento de un número determinado de datos en forma regular, conforme a circunstancias y objetivos específicos. El tipo y volumen de datos requeridos varía considerablemente en función del aspecto de gestión de que se trate, pero inevitablemente también dependerá de los recursos financieros disponibles.

- A continuación se describen dos tipos básicos de pozos que son el núcleo para cualquier proyecto de investigación y monitoreo de agua subterránea. Dichos pozos constituyen *perforaciones clave para observar los acuíferos*, y sirven para efectuar mediciones de presión y de calidad del agua subterránea que proporcionan información para diagnosticar la salud del sistema acuífero.
- **Pozos de producción.** Cuando se perfora un pozo de producción, se obtienen datos *in situ* que no pueden volverse a obtener sobre el recurso de agua subterránea, en particular su variación con la profundidad. Los datos adquiridos durante dicha perforación (perfil geológico) y la prueba inicial de bombeo constituyen la información inicial básica de referencia sobre la cantidad y calidad del agua subterránea, además de ser datos valiosos para determinar el potencial de extracción del pozo. Normalmente, es más difícil interpretar datos obtenidos de pozos cuando ya están en operación, ya que los niveles del agua subterránea se ven afectados por el ciclo de abatimiento-recuperación, y la calidad del agua en la muestra bombeada refleja la mezcla variable de aguas que provienen de un amplio rango de profundidades del acuífero con diferentes tiempos de residencia (Figura 1).
- **Pozos de Observación.** Constituyen estaciones dedicadas exclusivamente al monitoreo, y se ubican y diseñan para detectar cambios potenciales del flujo y de la calidad del agua subterránea. Sus parámetros de diseño incluyen: la profundidad de la rejilla de entrada, la frecuencia de las mediciones (en caso de no ser continuas) y los parámetros de calidad seleccionados. Con objeto de contrarrestar la

**Figura 1: Comparación del ingreso de agua subterránea y los detalles de construcción en (a) piezómetros anidados de monitoreo y (b) un pozo de producción**



presencia generalizada de variaciones de profundidad en la carga hidráulica y/o la calidad del agua, se pueden utilizar piezómetros anidados (Figura 1) o grupos de pozos contiguos. A costos iguales, los piezómetros anidados son más efectivos que los grupos de pozos contiguos, pero solamente se deben usar si se pueden sellar en forma adecuada para evitar el flujo vertical entre sus rejillas.

- Una **red de monitoreo** está formada normalmente por un conjunto de pozos de observación acoplado con una selección de pozos de extracción. Dicha red se diseña de forma que se tenga acceso a los datos requeridos del recurso de agua subterránea. Los sistemas y redes de monitoreo se clasifican en tres grupos principales, que no son mutuamente excluyentes (Tabla 2):
  - los **Sistemas Primarios** sirven para detectar cambios generales en el flujo del agua subterránea y sus tendencias de calidad, con objeto de aportar el conocimiento científico necesario para entender el recurso de agua subterránea
  - los **Sistemas Secundarios y Terciarios** son para evaluar y controlar el impacto de riesgos específicos del agua subterránea.

**Tabla 2: Clasificación de los sistemas de monitoreo de agua subterránea según su función**

SISTEMA	FUNCIÓN BÁSICA	UBICACIÓN DE LOS POZOS
<b>Primario (Monitoreo de Referencia)</b>	evaluación del comportamiento general del agua subterránea: <ul style="list-style-type: none"> <li>● las tendencias resultantes de cambios en el uso del suelo y la variación climática</li> <li>● los procesos tales como recarga, flujo y contaminación difusa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● en zonas con hidrogeología y uso del suelo uniformes</li> </ul>
<b>Secundario (Monitoreo de Protección)</b>	protección contra impactos potenciales en: <ul style="list-style-type: none"> <li>● un recurso de agua subterránea que sea estratégico</li> <li>● los campos de pozos o manantiales para abastecimiento público de agua</li> <li>● la infraestructura urbana por el asentamiento del suelo</li> <li>● el afloramiento del manto freático en sitios arqueológicos</li> <li>● los ecosistemas que dependen del agua subterránea</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● alrededor de las zonas, instalaciones o sitios peculiares que requieran protección</li> </ul>
<b>Terciario (Contención de la Contaminación)</b>	alerta oportuna del impacto en el agua subterránea por: <ul style="list-style-type: none"> <li>● el uso agrícola intensivo del suelo</li> <li>● las industrias</li> <li>● los rellenos sanitarios y depósitos no controlados de basura</li> <li>● las zonas de recuperación de suelos</li> <li>● las minas y canteras</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● inmediatamente gradiente arriba o gradiente abajo de de la situación que represente el peligro</li> </ul>

### ¿Cómo asegurar que el monitoreo del agua subterránea vale lo que cuesta?

- Las dos características fundamentales de un monitoreo de agua subterránea eficaz son:
  - perseguir un objetivo específico, ya que *monitorear por monitorear frecuentemente lleva a un uso ineficiente de recursos humanos y económicos*
  - almacenamiento de datos y su uso inmediatamente después, porque *hay demasiados casos de datos de monitoreo que se pierden “por ahí”*
- Frecuentemente se considera que el monitoreo del agua subterránea es caro. Los principales componentes de sus costos incluyen los de inversión (instalación de la red), el costo de muestreo (de personal, instrumentación y logística) y los costos de los análisis (de laboratorio, y procesamiento y almacenamiento de datos). A pesar de que es poco probable que los beneficios de la inversión inicial resulten evidentes de inmediato, a la larga el beneficio puede ser sustancial si el monitoreo forma parte integral de un proceso de gestión y evita que:
  - (a) se pierdan fuentes valiosas de agua subterránea,
  - (b) tengan que introducirse tratamientos costosos o

(c) se requiera de un proceso costoso de remediación del acuífero. Las ventajas del monitoreo son más fáciles de apreciar si durante la fase del diseño se incluye un análisis de costo/beneficio.

- La eficacia del monitoreo del agua subterránea se puede aumentar considerablemente si, además de poner atención en el diseño de la red, la implementación del sistema y la interpretación de los datos (Tabla 3), también:
  - se utilizan los datos obtenidos en actividades previas de monitoreo de la mejor manera posible
  - se seleccionan los sitios de monitoreo para que, en la medida de lo posible, sean de fácil acceso
  - se utilizan parámetros indicadores al máximo con objeto de reducir los costos de los análisis
  - se promueve que los usuarios realicen un auto-monitoreo complementario
  - se incorporan procedimientos de control y aseguramiento de calidad

**Tabla 3: Reglas básicas para lograr programas de monitoreo del agua subterránea exitosos**

<b>DISEÑO DE LA RED</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● el programa debe adaptarse a objetivos previamente definidos</li> <li>● debe entenderse con antelación el sistema del flujo de agua subterránea</li> <li>● los sitios de muestreo y los parámetros por monitorear son seleccionados de acuerdo con los objetivos</li> </ul>
<b>IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● deben utilizarse pozos de observación y extracción apropiadamente construidos</li> <li>● el equipo de campo y las instalaciones de laboratorio debe ser apropiadas a los objetivos</li> <li>● debe establecerse un protocolo completo de operación así como un sistema de manejo de datos</li> <li>● debe integrarse el monitoreo del agua subterránea y el del agua superficial cuando proceda</li> </ul>
<b>INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● debe verificarse regularmente la calidad de los datos mediante controles internos y externos</li> <li>● a los tomadores de decisiones deben proporcionárseles conjuntos de datos ya interpretados y que sean relevantes para la gestión</li> <li>● el programa debe ser evaluado y revisado periódicamente</li> </ul>

adaptado de UN-Task Force on Groundwater Monitoring & Assessment (2000)

### **¿Cómo debe compartirse la responsabilidad del monitoreo del agua subterránea?**

- En la legislación correspondiente debe incluirse el monitoreo del uso y estado del agua subterránea, y asignar partes de esta tarea a la administración de los recursos hídricos y a los usuarios del agua. Para que la legislación sea eficaz, debe establecer requerimientos realistas que tomen en cuenta la capacidad institucional (**Nota Informativa 4**). Una asignación típica de responsabilidades puede ser:
  - Gobierno Central/Autoridad Nacional de Aguas – red básica de referencia
  - Nivel Regional/Cuenca/Agencia de Recursos Hídricos del Acuífero – regulación y protección del recurso
  - Contratistas de Pozos de Producción/Empresas Perforistas – obligación de entregar perfiles geológicos y hacer pruebas de bombeo
  - Grandes Usuarios de Agua Subterránea – llevar registros de la extracción y los niveles de agua subterránea medidos
  - Pequeños Usuarios de Agua Subterránea – retroalimentación general sobre las características y desempeño de los pozos
  - Contaminadores Potenciales del Agua Subterránea – monitoreo defensivo de la calidad del agua en sus instalaciones.
- El almacenamiento de los datos de monitoreo del agua subterránea (que incluyen los generados por grupos interesados del sector privado) es un asunto importante, pero frecuentemente no se coordina en forma apropiada entre las agencias nacionales y locales. Es necesario tanto que todas las agencias acuerden protocolos

claros de recolección y almacenamiento de datos, como que se establezca una base de datos sistemática con acuerdos para compartir los datos por medio del Internet. Lo más eficaz es almacenar los datos en el nivel territorial más bajo posible, aunque resulta útil mantener conjuntos de datos representativos a escala nacional en las oficinas de la Autoridad del Agua o del Servicio Geológico. Generalmente algunos datos requeridos para la gestión del agua subterránea (Tabla 1) son almacenados por el Servicio Meteorológico y el Servicio Geológico, pero es necesario asegurar el acceso público a estos sistemas de datos.

*No es posible, dentro del espacio disponible para esta Nota Informativa, proporcionar un catálogo completo sobre las técnicas de monitoreo ni una guía exhaustiva sobre el diseño de una red de monitoreo, pero pueden encontrarse referencias útiles en la sección de Lecturas Adicionales. A continuación se presentan dos aplicaciones comunes y clásicas que también sirven como ilustración de los fundamentos del enfoque requerido.*

## (A) MEDICIÓN DEL USO DEL AGUA SUBTERRÁNEA Y DEL COMPORTAMIENTO DEL ACUÍFERO

### ¿Como puede el monitoreo del agua subterránea y del acuífero mejorar la evaluación y gestión de los recursos de agua subterránea?

- La meta principal de la gestión de acuíferos es explotar los recursos de agua subterránea con base en un plan que obedezca a una política dada, así como monitorear y controlar los impactos de su extracción en el propio recurso. El desarrollo y evolución de la política requiere de un buen conocimiento hidrogeológico, el cual mejorará en la medida en que la red de monitoreo detecte cambios en el nivel del agua subterránea ocasionados por su extracción. Puesto que el flujo de agua subterránea se relaciona con los niveles del acuífero, es posible determinar cambios en el régimen del flujo a partir de los cambios observados en dichos niveles. Por lo tanto, el monitoreo de la extracción y de los niveles del agua subterránea proporcionan información clave para la gestión del recurso.
- El agua subterránea se explota mediante la perforación de pozos de extracción, frecuentemente en campos de pozos. Tales campos se diseñan con base en una **respuesta** (cambio en los niveles y flujo del agua subterránea) **pronosticada y aceptable del acuífero** para un cierto nivel de extracción. Esos pronósticos generalmente se hacen con modelos numéricos que simulan la respuesta del acuífero bajo diferentes escenarios de extracción. Los permisos de perforación y extracción para los campos de pozos son otorgados con base en tales pronósticos. Dentro de este contexto, el monitoreo del acuífero juega un papel importante porque:
  - los datos históricos son fundamentales para calibrar los modelos numéricos de acuíferos y por lo tanto constituyen la base de simulaciones confiables bajo escenarios futuros de extracción
  - la medición y el archivo de la situación de referencia cuando se perforan nuevos pozos de extracción es importante con objeto de proporcionar información básica a partir de la cual evaluar cambios futuros
  - las observaciones sobre los niveles del agua subterránea durante la operación del campo de pozos proporcionan información para verificar la respuesta pronosticada del acuífero y, si es necesario, para tomar acciones oportunas con objeto de reducir la extracción
  - la información recolectada puede también jugar un papel importante para crear conciencia en los usuarios, con objeto de facilitar la introducción de las medidas de gestión de la demanda que se requieran.

### ¿Qué técnicas existen para medir y monitorear la extracción y el uso del agua subterránea?

- El **monitoreo directo de la extracción del agua subterránea** con medidores en cada pozo de producción proporciona información precisa pero, especialmente en las naciones en desarrollo, puede resultar incosteable y difícil de sostener si no se cuenta con la plena cooperación de los usuarios de agua. Las lecturas de los

medidores generalmente son llevadas a cabo por el usuario de agua, quien las presenta a la autoridad reguladora. La autoridad también lleva a cabo inspecciones periódicas, siempre que cuente con personal y transporte adecuados.

- También es posible obtener datos valiosos con el **monitoreo indirecto de la extracción de agua subterránea** mediante
  - **la recolección de datos indicadores** – por ejemplo el uso en riego agrícola puede estimarse indirectamente a partir del número de horas de bombeo (a partir del consumo de energía) multiplicado por el caudal promedio de bombeo
  - **el uso de sensores remotos** – los sensores en satélite o avión pueden proporcionar mediciones objetivas en áreas regadas a escalas potencialmente grandes, con una cobertura casi continua y a bajo costo por km<sup>2</sup>

#### POTENCIAL DE LOS SENSORES REMOTOS

Comúnmente se emplean para el *mapeo de geología Cuaternaria, uso del suelo, tipos de cultivos, ensalitramiento del suelo y asentamientos del terreno*. Recientemente esta

técnica se ha complementado con la interpretación de datos de sensores de energía térmica para *estimar las tasas de evaporación real*. Si se cuenta con imágenes adecuadas con la frecuencia suficiente y el relieve de la superficie del suelo no es muy abrupto, entonces puede determinarse la *evaporación real diaria y total en estiaje a nivel de parcela y acuífero*, lo cual puede servir para verificar los datos sobre el uso del agua subterránea y precisar en dónde conviene hacer una inspección de campo. Las imágenes requeridas pueden obtenerse de:

- satélites comerciales (tales como el LandSat), que obtienen imágenes de alta resolución pero pasan por el mismo sitio solamente cada 16 días y pueden no generar suficientes conjuntos de datos en regiones frecuentemente nubladas
- satélites meteorológicos especializados, que pasan más frecuentemente, pero las imágenes que generan pueden no siempre tener la resolución adecuada.

Sin embargo, esta técnica produce errores crecientes de medición en la medida en que los flujos de vapor son más bajos; no es posible entonces usarla para determinar *la evaporación real acumulada, el déficit de humedad del suelo y las tasas de recarga de acuíferos para coberturas naturales de vegetación de zonas áridas*. No obstante, las imágenes de satélite y los reconocimientos en avión tienen un gran potencial futuro para ampliar la cobertura y reducir el costo de la investigación y monitoreo del agua subterránea.

- **estimaciones de cambio** – la estimación de la extracción regional del agua subterránea puede también obtenerse mediante información sobre cambios demográficos y verificaciones aleatorias sobre el uso de agua per cápita.

### ¿Qué problemas pueden encontrarse en el monitoreo de las fluctuaciones y tendencias del nivel del agua subterránea?

- Las mediciones de los niveles del agua subterránea (en pozos de observación, de extracción o fuera de operación) pueden hacerse en forma manual o automática (Figura 2). Los registradores manuales de nivel de agua proporcionan una señal visual o auditiva al introducir la sonda en el agua. Los registradores automáticos consisten en sondas pequeñas (divers) instaladas en pozos de observación o extracción. Estos registradores almacenan datos de nivel del agua y temperatura en intervalos pre-establecidos, los cuales pueden descargarse a un sistema de almacenamiento de datos (data logger) durante visitas de inspección o transmitirse en forma telemétrica para realizar el monitoreo remoto.
- Las redes de monitoreo de agua subterránea deben ser diseñadas por especialistas con base en los requerimientos de gestión (Tabla 2), pero las restricciones financieras frecuentemente constituyen una limitante que también hay que tomar en cuenta. Puede incrementarse el número de puntos de monitoreo si se incluyen pozos en

producción y fuera de operación. Pero también puede ser importante identificar la presencia de zonas con variaciones fuertes en la carga piezométrica que tienden a ocurrir debajo de zonas de recarga o descarga de agua subterránea y en sistemas de varias capas.

- Para asegurar que la operación de una red de monitoreo genere datos confiable en forma continua, hacen falta recursos humanos y logísticos, junto con procedimientos claros. La falta de tales recursos frecuentemente constituye un obstáculo para mantener el nivel necesario de recolección de datos y el control apropiado de calidad. Delegar la responsabilidad del monitoreo a nivel local, mediante el auto-monitoreo de los usuarios de agua, puede ayudar a superar este problema.
- El almacenamiento, la evaluación y la recuperación de los datos de agua subterránea, son componentes esenciales de un buen monitoreo. Debe asegurarse tanto el flujo de datos de las estaciones de campo a una instalación central de almacenamiento (base de datos), como la existencia de personal calificado para revisar los datos obtenidos. Los cambios en los niveles del agua subterránea observados durante el monitoreo se pueden deber a una gran variedad de causas y deben ser evaluados cuidadosamente con objeto de determinar la acción de gestión requerida.

## **(B) DETECCIÓN DE CAMBIOS EN LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA**

### **¿Por qué se requieren procedimientos de muestreo especiales en el monitoreo del agua subterránea?**

- El proceso de bombeo de pozos y el manejo de las muestras ocasionan modificaciones importantes en la muestra de agua debido a fenómenos tales como la entrada de aire, la desgasificación y la pérdida de compuestos volátiles que pueden potencialmente introducir errores más significativos que el análisis de la muestra). Estos problemas deben abordarse mediante procedimientos apropiados de muestreo (Tabla 4).

### **¿Qué requerimientos y limitaciones tiene el monitoreo de la calidad del agua subterránea en fuentes de abastecimiento público?**

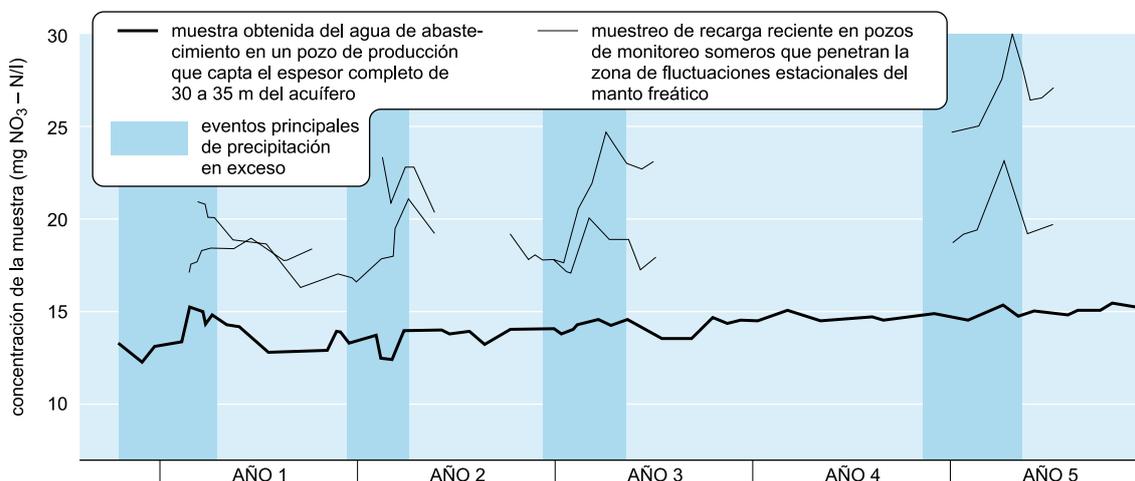
- La vigilancia (o control de la calidad) de pozos de producción y manantiales utilizados para abastecimiento público que alimentan las redes de distribución, es fundamental en el monitoreo de la calidad del agua, y de hecho es la práctica más común de muestreo de agua subterránea. El rango de parámetros que se analizan inicialmente incluye como referencia todos los considerados en la guía de calidad de agua potable de la OMS, pero, en la práctica, generalmente sólo se monitorea parte de ellos en forma permanente y periódica. Sin embargo, inmediatamente después de que se detecta un cambio significativo en algún compuesto, se procede a hacer análisis más completos. Esta función es esencial para el 'control del producto' con objeto de confirmar la aceptabilidad de la materia prima (el agua bombeada) y/o de la eficacia de los procesos de tratamiento, y como tal presenta pocos problemas específicos para el agua subterránea.
- Los resultados de este tipo de monitoreo normalmente no reflejan las condiciones del agua subterránea *in situ*, sino sólo las del suministro, y es fundamental conocer estas últimas para definir la distribución sub-superficial del agua subterránea que tenga calidad inferior, así como sus variaciones con el tiempo y como respuesta a medidas de gestión de mitigación. Esto se debe a la variabilidad e incertidumbre del origen de la muestra, puesto que los pozos de producción, como ya se mencionó, facilitan el ingreso de agua subterránea proveniente de un amplio rango de profundidades del acuífero y a que la proporción de cada tipo de agua de diferentes profundidades puede variar ampliamente tanto con el caudal como con el tiempo de bombeo

**Tabla 4: Resumen de procedimientos de muestreo y precauciones para grupos específicos de parámetros de calidad del agua subterránea**

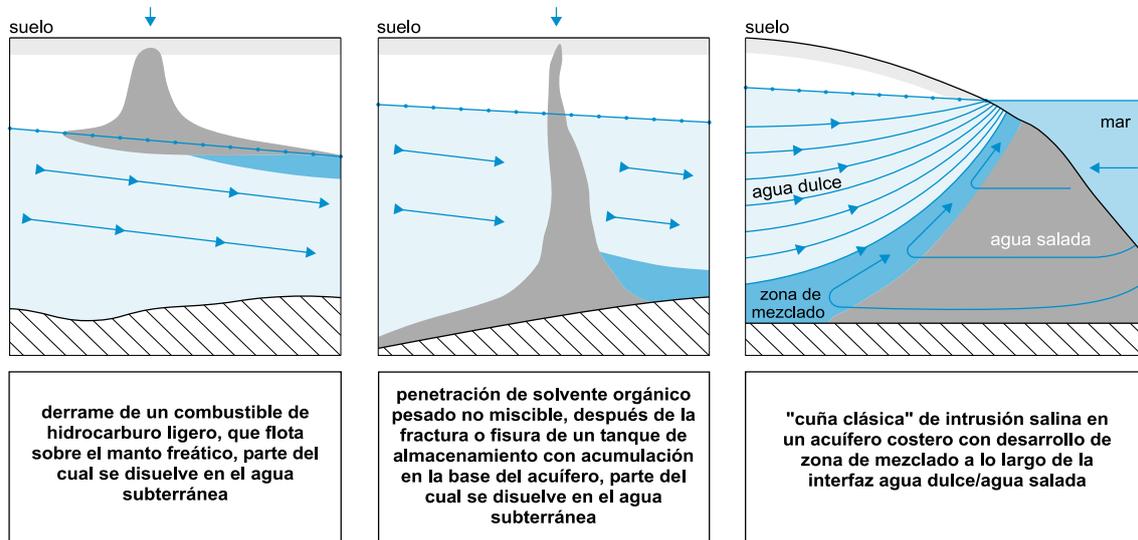
GRUPO DE PARÁMETROS	PROCEDIMIENTO DE MUESTREO	MATERIALES PREFERIDOS	TIEMPO DE ALMA - CENAMIENTO/ TEMPERATURA	COSTOS Y/O DIFICULTAD EN LA OPERACIÓN
<b>Iones Mayores</b> Cl, SO <sub>4</sub> , F, Na, K	<ul style="list-style-type: none"> <li>solamente filtro de 0,45 <math>\mu</math>m</li> <li>no acidificar</li> </ul>	cualquiera	7 días/4°C	mínimo
<b>Metales Traza</b> Fe, Mn, As, Cu, Zn, Pb, Cr, Cd, etc.	<ul style="list-style-type: none"> <li>filtro sellado de 0,45 <math>\mu</math>m</li> <li>acidificar (pH&lt;2)</li> <li>evitar aireación por salpicado o por no llenar completamente el frasco de muestreo</li> </ul>	plástico	150 días	moderado
<b>Especies de N</b> NO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> (NO <sub>2</sub> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>filtro sellado de 0,45 <math>\mu</math>m</li> </ul>	cualquiera	1 día/4°C	moderado o bajo
<b>Microbiológicos</b> TC,FC,FS	<ul style="list-style-type: none"> <li>condiciones estériles</li> <li>muestra no filtrada</li> <li>de preferencia análisis <i>in situ</i></li> </ul>	vidrio oscuro	6 horas/4°C	moderado o bajo
<b>Equilibrio de Carbonatos</b> pH, HCO <sub>3</sub> , Ca, Mg	<ul style="list-style-type: none"> <li>muestra no filtrada de pozos sellado</li> <li>análisis <i>in situ</i> (pH, HCO<sub>3</sub>) (Ca/Mg de muestra acidificada en el laboratorio base)</li> </ul>	cualquiera	1 hora  (150 días)	moderado
<b>Estado del Oxígeno</b> pE (EH), OD, T	<ul style="list-style-type: none"> <li><i>in situ</i> de celda de medición</li> <li>evitar aireación</li> <li>muestra no filtrada</li> </ul>	cualquiera	0,1 hora	alto o moderado
<b>Orgánicos</b> COT, COV, HC, CIHC, etc.	<ul style="list-style-type: none"> <li>muestra no filtrada</li> <li>evitar volatilización</li> <li>(de preferencia absorción directa en cartuchos)</li> </ul>	vidrio oscuro o teflón	1-7 días  (no definido para cartuchos)	alto

(Figura 1). Puede ser costoso superar estos obstáculos, por lo cual en ocasiones no queda más remedio que aceptar un muestreo de agua subterránea aunque tenga importantes limitaciones. Sin embargo, al interpretar los resultados, estas limitaciones siempre se deben tomar en cuenta, así como también se debe considerar la posibilidad de mejorar el método de muestreo cuando se justifique desde el punto de vista económico o de salud pública.

**Figura 2: Detección de tendencias en la calidad del agua subterránea durante la renovación de un acuífero en la vecindad de un pozo de abastecimiento de agua**



**Figura 3: Procesos que ocasionan variaciones verticales importantes en la calidad del agua subterránea dentro de un sistema acuífero y que requieren detectarse mediante monitoreo**

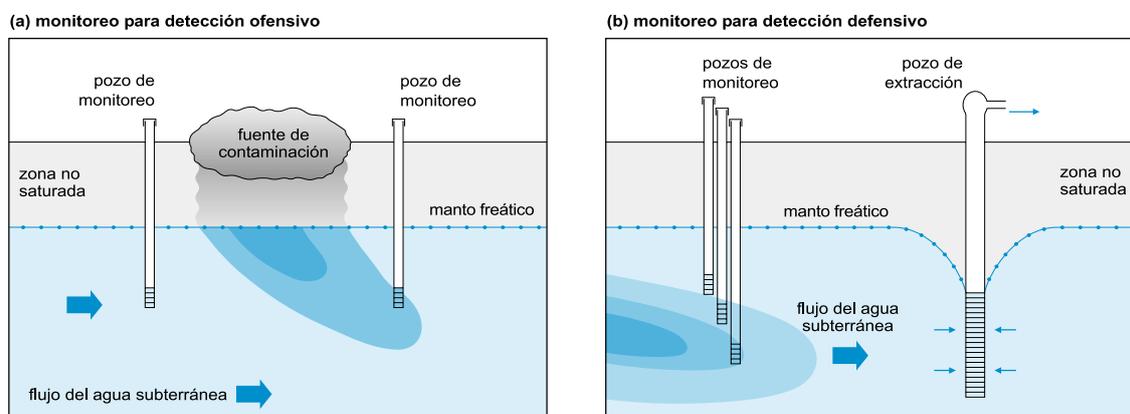


### ¿Cómo puede lograrse una alerta oportuna de amenazas potenciales a un acuífero o a la calidad del agua subterránea?

- En muchos casos es crítico contar con una alerta oportuna sobre los problemas potenciales de calidad que pongan en riesgo la fuente de agua subterránea y al sistema acuífero del cual depende. Para este propósito, es necesario diseñar redes de monitoreo capaces de proporcionar información sobre la variación en las tres dimensiones espaciales del flujo y la calidad del agua subterránea (Figura 2), de tal manera que se obtengan muestras representativas de la calidad del agua de recarga (renovación) más reciente en el acuífero. Frecuentemente esta calidad es muy diferente de la calidad promedio del agua subterránea contenida en el almacenamiento, a causa de los grandes volúmenes almacenados y los largos tiempos de residencia en muchos sistemas de agua subterránea. Cuando existan otros factores que también puedan ocasionar una variación vertical pronunciada de la calidad del agua subterránea, el monitoreo debe tener un enfoque similar al descrito (Figura 3).
- El uso creciente del suelo como sitio para depósito final de desechos urbanos e industriales y la intensificación de la agricultura en décadas recientes, hacen necesario expandir en forma importante el monitoreo enfocado a la gestión de la calidad del agua subterránea, mediante piezómetros de muestreo diseñados e instalados para una aplicación específica (Figura 4) con los siguientes tipos de objetivo:
  - para facilitar un alerta oportuna del inicio de la contaminación del agua subterránea proveniente de una cierta actividad y permitir tomar a tiempo las medidas de control requeridas
  - para proporcionar un alerta anticipada de la llegada de agua contaminada a una fuente de abastecimiento de agua subterránea y así poder tomar provisiones
  - para identificar cualquier contaminación que llegue a un acuífero desde una fuente importante de polución y así poder tomar acciones oportunas para remediar el problema
  - para establecer las evidencias necesarias con objeto de determinar la responsabilidad legal en caso de incidentes de contaminación

Frecuentemente la complejidad de los regímenes de flujo y calidad del agua subterránea es tal que se requiere que expertos en hidrogeología diseñen las redes de monitoreo e interpreten sus resultados.

**Figura 4: Representación esquemática del diseño de una red de monitoreo de la calidad del agua subterránea para objetivos específicos de gestión**



### Lecturas Adicionales

- ASTM. 1994. *Standard Practice for Design and Installation of Ground Water Monitoring Wells in Aquifers*. American Society for Testing and Material Standards. Philadelphia, USA.
- UN-ECE Task Force on Groundwater Monitoring & Assessment. 2000. *Guidelines on Monitoring and Assessment of Transboundary Groundwater*. RIZA Publication, Lelystad, The Netherlands.
- Foster, S. and Gomes, D. 1989. *Groundwater Quality Monitoring – an appraisal of practices and costs*. WHO-PAHO-CEPIS Publication, Lima, Perú.
- Foster, S , Hirata, R., Gomes, D , D’Elia, M. and Paris, M. 2002. *Protección de la Calidad del Agua Subterránea: guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales*. World Bank Publication: Washington D.C , USA.
- Meijerink, A. 2000. *Groundwater*. Remote Sensing in Hydrology & Water Management 27 (eds. Schultz, G. A. and Engman, E. T.). Springer Verlag, New York, USA.
- Nielsen, D. 1991. *Practical Handbook of Groundwater Monitoring*. Lewis Publishers. Chelsea (Michigan), USA.

#### Publicación

La Serie de Notas Informativas del GW•MATE ha sido publicada por el Banco Mundial, Washington D.C., EEUU. La traducción al español fue realizada por Héctor Garduño. También está disponible en formato electrónico en la página de Internet del Banco Mundial ([www.worldbank.org/gwmate](http://www.worldbank.org/gwmate)) y la página de Internet de la GWP – Asociación Mundial del Agua ([www.gwpforum.org](http://www.gwpforum.org))

Los resultados, interpretaciones y conclusiones expresados en este documento son responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan los puntos de vista del Directorio Ejecutivo del Banco Mundial ni de los gobiernos en él representados.

#### Patrocinio económico



El GW•MATE (Groundwater Management Advisory Team – Equipo Asesor en Gestión de Aguas Subterráneas) es parte del Bank-Netherlands Water Partnership Program (BNWPP) y usa fondos de fideicomiso de los gobiernos holandés y británico.

