

DOCUMENTO DE ORIENTACIÓN TÉCNICA Nº 3 SOBRE EL INDICADOR 6.3.2 DE LOS ODS:



MONITOREO Y PRESENTACIÓN DE INFORMES SOBRE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

En el marco del Indicador 6.3.2 de los ODS relativo a la calidad del agua ambiente, el presente documento ofrece orientaciones técnicas adicionales para hacer frente a los problemas que plantea monitorear e informar sobre las aguas subterráneas. Es un complemento de la Metodología Paso a Paso y forma parte de una serie de documentos y estudios de caso que proporcionan una orientación técnica más detallada sobre aspectos específicos de la metodología del indicador. Estos documentos se han creado en respuesta a los comentarios recibidos en la recopilación de datos de referencia de 2017. En la Plataforma de Conocimiento del Indicador 6.3.2 pueden consultarse estos y otros recursos (<https://communities.unep.org/display/sdg632>).

El presente documento está dirigido a los profesionales que deseen obtener más información sobre cómo implementar la metodología del indicador para las aguas subterráneas y sobre cómo fortalecer el monitoreo de las aguas subterráneas en su propio país. El presente documento:

1. Ofrece orientaciones sobre la identificación de acuíferos y la delimitación de las masas de aguas subterráneas.
2. Revisa las opciones para el muestreo de aguas subterráneas.
3. Analiza la elección de parámetros y los informes de Nivel 1 y Nivel 2 sobre la calidad de las aguas subterráneas.

INTRODUCCIÓN

Los datos de monitoreo recopilados para el indicador 6.3.2 de los ODS deberían proporcionar información suficiente sobre el estado de la calidad del agua ambiental a escala nacional, y permitir la identificación de tendencias a largo plazo. Para ello es necesario que los datos de los grupos de parámetros básicos de los emplazamientos de todo el país y que las mediciones se realicen de un modo estandarizado y coherente. La primera recopilación mundial de datos de 2017 fue significativamente menos productiva respecto de las aguas subterráneas que de las superficiales, dado que el número de países que informaron sobre la calidad de sus aguas subterráneas fue menor. Esto no es sorprendente y ha sido un elemento común y constante propio de tales actividades en el pasado. En el presente documento se analiza el motivo de ello y se sugieren formas de fortalecer los programas de monitoreo de las aguas subterráneas a fin de proporcionar mayor información sobre la calidad del agua ambiental, y de lograr que los informes relativos a las aguas subterráneas resulten más sólidos y susceptibles de ser comparados.

El presente documento fue elaborado por John Chilton, antiguo Director Ejecutivo de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos. Marzo de 2020, en nombre del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente GEMS/Agua.

¿POR QUÉ ES MÁS DIFÍCIL MONITOREAR LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS QUE LAS SUPERFICIALES?

Existen muchas razones por las que los programas de monitoreo de la calidad del agua no proporcionan la información que deberían. El monitoreo debe pensarse como un círculo o una cadena continua (CEPE, 2000), partiendo de las necesidades de información y pasando por la estrategia de monitoreo, el diseño de las redes, el muestreo, el análisis, el tratamiento de datos y la presentación de informes para proporcionar información de forma clara y oportuna. Si un paso o eslabón de la cadena (Figura 1) no se ejecuta adecuadamente, el proceso en su conjunto podría impedir que se generen datos útiles. Las contribuciones más comunes a este fracaso se derivan de:

- no definir las necesidades de información y los objetivos del programa de monitoreo;
- no tomar en cuenta adecuadamente el entorno físico al diseñar la red;
- una planificación insuficiente de la recopilación, la manipulación, el almacenamiento y el análisis de las muestras;
- la falta de control y garantía de calidad;
- una gestión e interpretación deficientes de los datos obtenidos;
- la falta de revisión, retroalimentación y modificación del diseño, de ser necesario.

El objetivo específico del indicador 6.3.2 es proporcionar un mecanismo para determinar si los esfuerzos por mantener y mejorar la calidad del agua ambiental dan resultado, utilizando datos extraídos de los programas nacionales de monitoreo, los cuales establecerán sus propios objetivos.

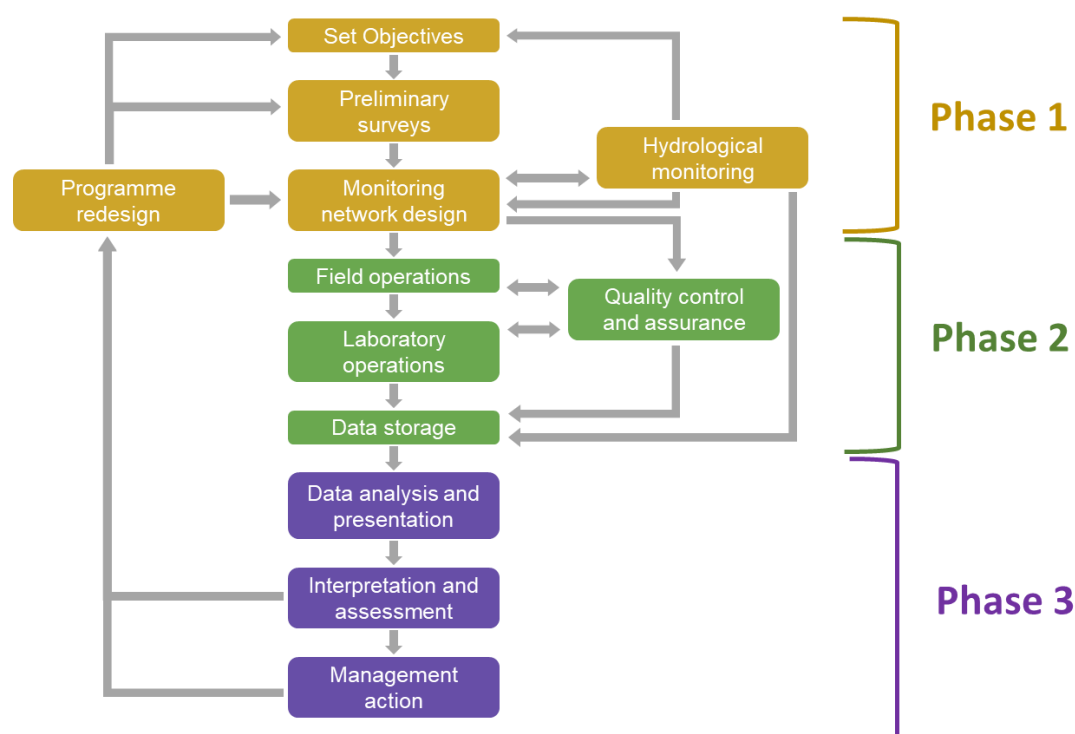


Figura 1. Diagrama de flujo del diseño del programa de monitoreo de la calidad del agua. Modificado a partir de Chapman y otros (2005)

El desafío de monitorear la calidad de las aguas subterráneas es fundamentalmente diferente al de los ríos y lagos (AIH, 2017). El monitoreo de los ríos puede proporcionar una imagen compuesta para una cuenca de captación extensa, amortiguando el efecto de los factores locales de la estación de muestreo. En general, ocurre lo contrario en el caso de las aguas subterráneas, en las que puede dominar la influencia de factores sumamente locales, como la contaminación de las bocas de los pozos, la profundidad de estos, los índices de bombeo, el entorno inmediato y los protocolos de muestreo. Esto puede distorsionar el panorama general de la calidad de las aguas subterráneas para los acuíferos, y es necesario comprenderlo y tenerlo en cuenta.

En el caso de las aguas subterráneas, las limitaciones generales descritas anteriormente suelen complementarse con un déficit de conocimientos hidrogeológicos, lo que debilita tanto el diseño de la red de monitoreo como la interpretación de los resultados. En ocasiones, esto se debe a que los profesionales de las aguas superficiales establecen el monitoreo de las aguas subterráneas como una extensión de un programa existente de aguas superficiales, sin tener debidamente en cuenta la hidrogeología; a menudo, la información hidrogeológica o los conocimientos técnicos sobre aguas subterráneas necesarios simplemente no existen. Esto es importante porque los acuíferos, y las masas de agua subterránea que contienen, suelen ser más complejos que las aguas superficiales y mucho menos accesibles para tomar muestras. La inaccesibilidad contribuye a la atracción de las aguas subterráneas como fuente de suministro. Si resulta más difícil acceder a los acuíferos, es probable que dispongan de una buena calidad de agua natural (con algunas excepciones) y que estén protegidos de actividades contaminantes en la superficie de la tierra. Sin embargo, una vez contaminados, el desplazamiento lento del agua en el acuífero implica que la calidad de las aguas subterráneas pueda tardar décadas en recuperarse.

La mayoría de las aguas subterráneas presentan tiempos de residencia mucho más largos que las aguas superficiales. Esto permite que se produzcan interacciones fisicoquímicas entre las aguas subterráneas de movimiento lento y el material que forma el acuífero, pudiendo variar la composición química del agua a medida que fluye (Chilton, 1996). Desde el punto de vista del monitoreo, el movimiento lento supone que, en general, las aguas subterráneas deben ser objeto de muestreo con menor frecuencia que las aguas superficiales, aunque para obtener una imagen representativa de la calidad de las aguas subterráneas puede ser necesario un muestreo de mayor densidad (AIH, 2017). Además, la profundidad y la complejidad del subsuelo de los acuíferos influyen considerablemente en la elección del punto de muestreo de la red de aguas subterráneas y en la interpretación de los resultados que se obtengan. Las muestras que se toman de pozos muy cercanos pueden ofrecer resultados muy diferentes, especialmente si se extrae agua de profundidades distintas del acuífero o incluso de acuíferos diferentes.

IDENTIFICAR LOS ACUÍFEROS Y DEFINIR LAS MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

Los dos primeros pasos de la metodología del indicador 6.3.2 comprenden: 1) la creación de reportes de distritos de cuencas (RBD, por sus siglas en inglés) basados en las cuencas fluviales y 2) la delimitación de las masas de agua dentro de estos. En el caso de las aguas subterráneas, esto conlleva a identificar la ubicación de los acuíferos productivos y el modo en que podrían subdividirse en masas de agua subterráneas. En cuanto a las aguas superficiales, los elementos definidos como masas de agua subterránea forman unidades discretas que se clasifican como «buenas» o «no buenas».

En algunos países, en particular en los Estados miembros de la Unión Europea y en otros cuya legislación ambiental se ajusta a la de la Unión Europea, los estudios geológicos nacionales o los organismos ambientales ya han realizado esfuerzos considerables para cumplir con sus obligaciones en cuanto a la delimitación de las masas de aguas subterráneas. La orientación técnica que respalda la legislación les ayuda a hacerlo de manera consistente y comparable (CE, 2004), pero los requisitos de datos y los conocimientos técnicos para llevar a cabo esa labor son considerables. Es probable que estos países también cuenten con programas de monitoreo de la calidad de las aguas subterráneas bien desarrollados y se los alienta a utilizar las mismas unidades a la hora de presentar informes sobre el indicador 6.3.2.

En muchos otros países se conoce la ubicación de los acuíferos y su importancia como fuentes de aguas subterráneas. Sin embargo, es posible que no se conozca bien la naturaleza de los sistemas de flujo de las aguas subterráneas en esos acuíferos, de dónde proceden y a dónde van, y que no existan requisitos nacionales para definir las masas de aguas subterráneas. Los programas de monitoreo existentes pueden variar considerablemente en lo que respecta a la cobertura de la red, la idoneidad de los puntos de muestreo, la frecuencia del muestreo y la elección de los parámetros. Otros países pueden saber aún menos acerca de sus acuíferos y aguas subterráneas, pueden ejercer un monitoreo periódico escaso o nulo y disponer de datos muy limitados sobre la calidad de sus aguas subterráneas. Es posible que algunos países no dispongan de datos de monitoreo de ningún tipo, pero aspiran a elaborar un programa de monitoreo de la calidad de las aguas subterráneas.

En todos estos casos, como base para identificar los acuíferos y comprender los sistemas de flujo de las aguas subterráneas, es esencial elaborar modelos hidrogeológicos conceptuales sencillos. Es posible que estos modelos no sean más sofisticados que un mapa que muestre la extensión superficial del afloramiento de diversos acuíferos y masas de otro tipo, así como secciones transversales simples. Estas secciones deben mostrar los orígenes de las aguas subterráneas, las direcciones del flujo y los lugares de descarga (Figura 2). Esto es importante, porque la fuente de abastecimiento, que podría ser la infiltración procedente de las precipitaciones o de las masas de agua superficiales, probablemente sea, asimismo, una fuente de contaminación del acuífero, contribuyendo así al deterioro de su calidad. Del mismo modo, los puntos de descarga en manantiales, ríos, lagos o humedales, o en pozos de agua, son los focos en los que la mala calidad de las aguas subterráneas repercute en los receptores (Figura 2).

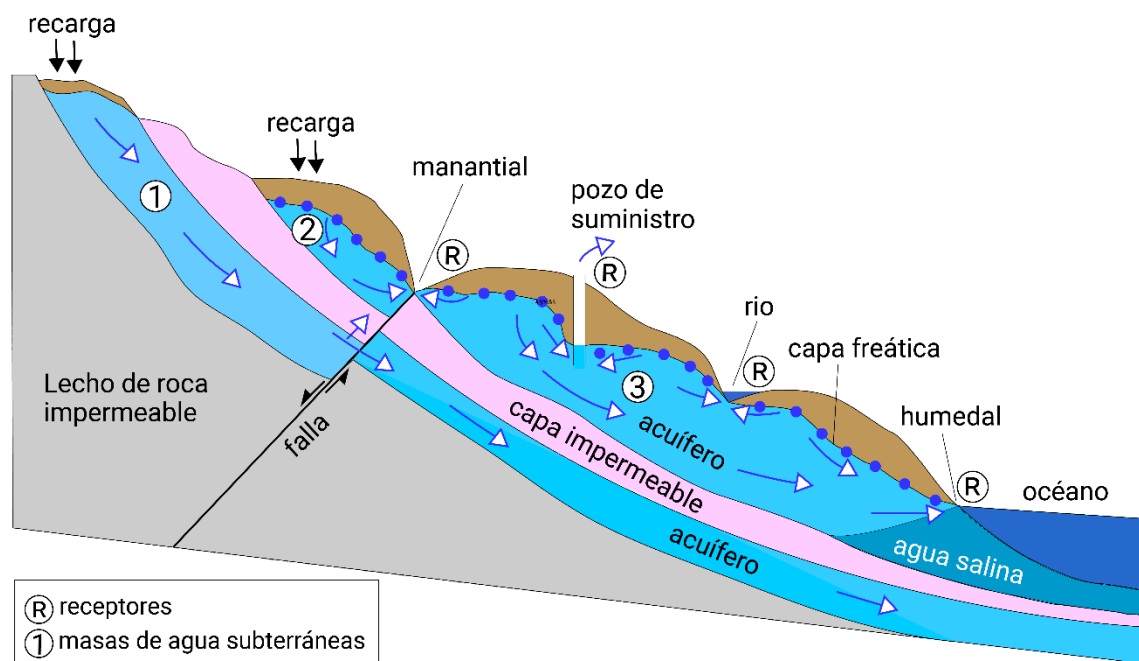


Figura 2: Modelo hidrogeológico conceptual simple para ayudar a visualizar los afloramientos de los acuíferos, los lugares de recarga de las aguas subterráneas, las direcciones del flujo de las aguas subterráneas y los puntos de descarga

Incluso cuando no se dispone de modelos hidrogeológicos conceptuales, casi todos los países cuentan con mapas geológicos, tal vez preparados para la prospección de recursos minerales o la exploración petrolera. A partir de ellos, pueden observarse los tipos de formación geológica más importantes e identificarse aquellos que puedan proporcionar acuíferos productivos. Por supuesto, esto puede confirmarse fácilmente si los acuíferos ya se utilizan profusamente para suministrar agua. Si el organismo encargado del monitoreo no tiene, por su parte, conocimientos especializados en materia de aguas subterráneas, deberá solicitar el apoyo correspondiente al servicio geológico nacional, a una universidad local o a una empresa consultora apropiada.

En el marco de los RBD basados en cuencas fluviales, deben definirse las masas de aguas subterráneas para poder describir la calidad ambiental. La metodología del indicador 6.3.2 prevé que, idealmente, las masas de agua deben dimensionarse para garantizar que sean homogéneas en cuanto a la calidad del agua, y pueden clasificarse utilizando relativamente pocos puntos de monitoreo (Documento de orientación 1). Sin embargo, como se ha aclarado, los acuíferos pueden ser complejos y distar mucho de ser homogéneos. Cuando un acuífero deba dividirse en masas de agua subterránea, estas deberían ser sistemas de flujo discretos en los que las aguas subterráneas no se desplacen a través de los límites. A continuación se presentan criterios útiles para efectuar dicha subdivisión.

- Cuando se dispone de datos suficientes a partir de los cuales pueden prepararse mapas del nivel de las aguas subterráneas, las masas pueden quedar delimitadas por las divisiones del flujo de las aguas subterráneas. En la Figura 3 se muestran tres de esas masas de aguas subterráneas en un acuífero que recubre rocas impermeables y se sumerge por debajo de estratos superpuestos. Sin embargo, a diferencia

de los límites de las masas de agua superficial, los límites de las masas de aguas subterráneas definidos de este modo no siempre son estáticos y pueden desplazarse estacionalmente, en respuesta al cambio climático, a la recarga a largo plazo y a los efectos del bombeo de los pozos cercanos a los límites.

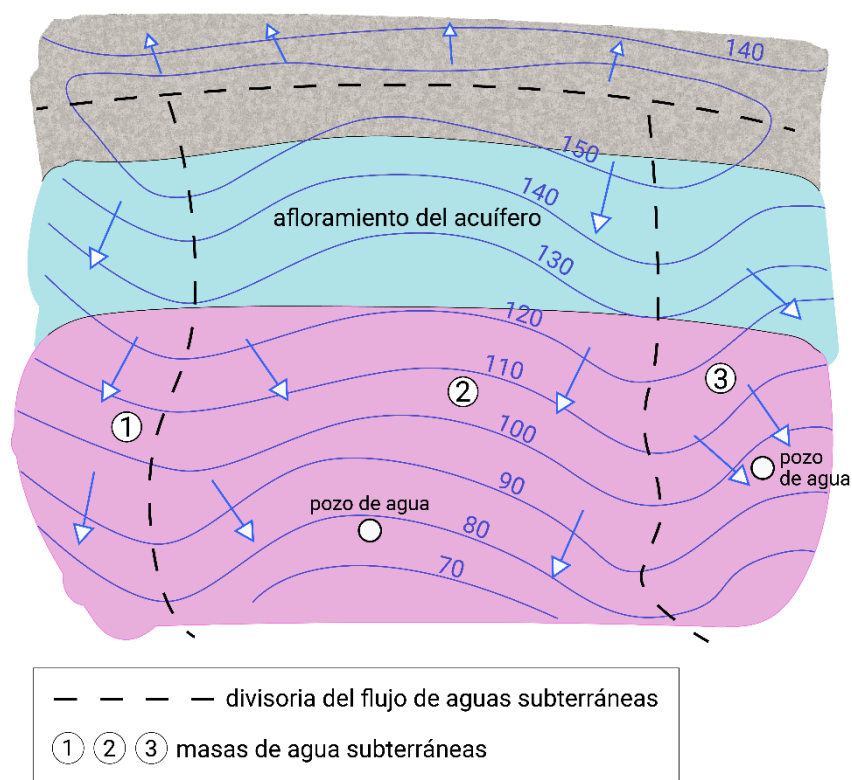


Figura 3. Masas de agua subterránea definidas por las divisiones del flujo

- Si no se dispone de dichos datos, los límites pueden basarse en las cuencas de captación de aguas superficiales, que en muchos casos se encuentran estrechamente seguidas por las divisiones de aguas subterráneas. En la Figura 4 se muestran dos masas de agua subterránea definidas de este modo.

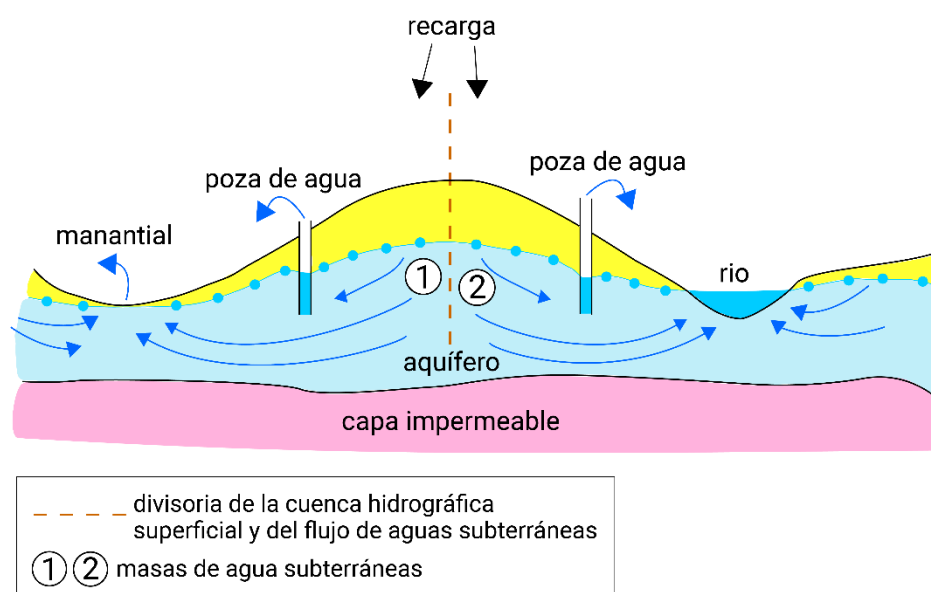


Figura 4 Masas de agua subterránea definidas por cuencas superficiales y divisiones de aguas subterráneas

- En los casos en que las grandes fallas geológicas arrastran material impermeable hacia un acuífero, lo que restringe el flujo de las aguas subterráneas, esto también puede constituir un límite adecuado. En la Figura 2, una gran falla divide el acuífero superior no confinado en dos masas de agua subterránea (una de las cuales es bastante pequeña). En el acuífero confinado subyacente, el desplazamiento de la falla no es suficiente para impedir el flujo de las aguas subterráneas.
- En el caso de acuíferos relativamente pequeños y poco profundos formados por sedimentos aluviales o glaciofluviales y que se encuentran sobre un lecho rocoso menos permeable, la totalidad del acuífero puede constituir una masa de agua subterránea.

Las complejidades de los acuíferos, su dimensión vertical en la variación de la calidad, y el movimiento lento implican que es poco probable que ni siquiera las masas de agua subterránea relativamente pequeñas estén representadas adecuadamente por uno, o incluso un pequeño número de puntos de monitoreo.

Los países áridos y semiáridos suelen caracterizarse por poseer acuíferos extensos y aguas superficiales escasas o nulas, por lo que apenas existen límites de cuenca para delimitar el RBD o la masa de agua subterránea. Además, estos acuíferos suelen ser profundos, gruesos, planos, con gradientes de aguas subterráneas bajos, y con tiempos de residencia de las aguas subterráneas medidos en siglos más que en décadas. A menudo, en las condiciones climáticas actuales sus aguas subterráneas no se recargan de manera significativa. Tales recursos de aguas subterráneas «fósiles», o no renovables, suelen ser objeto de una gran explotación, con considerables problemas de gestión en lo que respecta a la cantidad de agua. Sin embargo, están bien protegidos contra los posibles impactos en la calidad de las actividades en la superficie de la tierra, y la calidad de las aguas subterráneas solo variará muy lentamente. Por lo tanto, en estos entornos es apropiado utilizar unidades de informes basadas en el acuífero en relación con el indicador 6.3.2; además, puede tratarse de una de las pocas masas de agua subterráneas que pueden definirse mediante un número reducido de puntos de muestreo.

Sin embargo, es necesario actuar con cautela. Dentro de estas regiones áridas también existen acuíferos de arena y grava mucho más pequeños y poco profundos, a menudo vinculados a lechos de ríos secos, wadis y oasis. Estos acuíferos pueden ser muy importantes para las comunidades locales en lo que respecta al abastecimiento de agua y la agricultura de regadío intensiva, lo cual puede repercutir significativamente en la cantidad y calidad de sus aguas subterráneas. Cada uno de ellos puede constituir una masa de agua subterránea independiente, desvinculada de la siguiente, y necesitará un monitoreo más frecuente en consonancia con las presiones locales y las respuestas más rápidas propias de los sistemas de aguas subterráneas poco profundas.

Los acuíferos, y por lo tanto las masas de agua subterránea potenciales, pueden ser atravesados por fronteras internacionales. Un acuífero puede recargarse en un determinado país y descargar en un país vecino. Una vez más, los modelos conceptuales de aguas subterráneas pueden ayudar a determinar si ello podría ocurrir (Lipponen y Chilton, 2018) y, en caso afirmativo, podría ser necesario intercambiar información y colaborar en el monitoreo a nivel transfronterizo.

SELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Si se dispone de un buen número de opciones de muestreo, la ubicación general de los puntos de monitoreo debe elegirse de modo que refleje, en la medida de lo posible, la totalidad de la masa de agua subterránea, especialmente el sistema de flujo de agua subterránea fuente - vía - receptor descrito anteriormente. Además, es posible que en la red deba tenerse en cuenta la distribución de la población y del uso de la tierra, con una mayor densidad de puntos de monitoreo en los lugares en que las presiones agrícolas, urbanas e industriales son más frecuentes. Asimismo, es posible que la elección deba tener en cuenta factores muy localizados en torno al punto de monitoreo que podrían influir en la calidad de las aguas subterráneas y en la fiabilidad del muestreo. No deben utilizarse puntos de monitoreo que se vean seriamente comprometidos en este sentido.

La elección del tipo de punto de muestreo también influye en la fiabilidad y representatividad. Pueden tomarse muestras de aguas subterráneas de los pozos existentes que suministran agua para usos domésticos, municipales, de riego o industriales, de manantiales o de pozos de monitoreo construidos a tal efecto. Cada uno

de ellos presenta ventajas y desventajas (Tabla 1) en cuanto a la practicidad, el coste y los aspectos técnicos. Estos también deben entenderse en el contexto del entorno hidrogeológico local.

Tabla 1 Características de los posibles puntos de muestreo de aguas subterráneas

Punto de muestreo	Ventajas	Desventajas
Pozo de suministro municipal	• baratos y fáciles para tomar muestras • muestreo repetido, visitas regulares • alta descarga, representativa de la calidad del acuífero • las bombas suelen funcionar • pueden obtenerse series cronológicas de datos ya existentes	• es posible que la construcción y la fuente de la muestra sean inciertas, agua mezclada de varias profundidades • es posible que el lapso de tiempo transcurrido desde que se produce la contaminación sea muy largo • lugares fijados según la distribución de la población, sesga la cobertura especial • puede que el municipio o la compañía del agua no permita que se tomen muestras
Pozo de irrigación	• como los tres primeros indicados ut supra, si bien es menos probable obtener series cronológicas existentes	• como los dos primeros indicados ut supra, aunque es menos probable que se disponga de datos sobre la construcción • cobertura espacial distorsionada en las zonas agrícolas • puede funcionar solo estacionalmente
Pozo industrial	• remitirse a lo dispuesto para el pozo de irrigación	• remitirse a lo dispuesto para el pozo municipal, si bien es menos probable disponer de datos de construcción
Pozo doméstico	• baratos y fáciles para tomar muestras • muestreo repetido, visitas regulares	• descarga baja e intermitente, especialmente con las bombas manuales • puede ser necesario realizar una purga para eliminar el agua estancada del interior del pozo • puede averiarse y no bombear • puede ser poco profundo y poco representativo del acuífero • vulnerables a la contaminación local
Pozo de monitoreo poco profundo	• puede alertar anticipadamente de los contaminantes que alcanzan la capa freática • muestreo repetido y regular • es posible conocer la construcción por completo • se pueden utilizar materiales inertes	• costes de construcción moderados • se necesita una bomba para recoger la muestra • es necesario ser cuidadoso al extraer el agua estancada • poco representativo del acuífero
Piezómetros multinivel	• la construcción debe conocerse por completo • pueden utilizarse materiales inertes • alerta anticipada de los contaminantes de la capa freática • puede indicar una estratificación vertical de la calidad de las aguas subterráneas • puede indicar diferencias de altura vertical y movimientos ascendentes o descendentes del agua	• costes de construcción elevados • es necesario contar con un contratista especializado y materiales • puede ser difícil de instalar correctamente con buenos sellados entre los intervalos de muestreo • requiere dispositivos especiales de muestreo y un operador experto
Manantiales	• baratos y fáciles de tomar muestras • muestreo repetido y visitas regulares • Los manantiales de gran tamaño pueden representar importantes masas de agua subterránea • los manantiales de abastecimiento público pueden presentar series cronológicas de datos ya existentes	• vulnerables a las fuentes de contaminación locales • puede ser vulnerable a la lluvia directa • los manantiales pequeños pueden representar un flujo superficial

Muchos programas nacionales de calidad de las aguas subterráneas dependen enteramente, o prácticamente, de los pozos de suministro existentes debido a lo económico y fácil que resulta tomar muestras, y a la accesibilidad general para realizar visitas periódicas, siempre que el organismo de monitoreo haya llegado a un acuerdo con el operador del pozo para ello. Dado que estos pozos se explotan con frecuencia o incluso de manera más o menos continua, es probable que el agua extraída sea representativa de la existente en el acuífero (Tabla 1). Con frecuencia, la mayor desventaja de esos pozos radica en que puede haber escasa o nula información disponible sobre la profundidad de los pozos, los intervalos y las bombas examinadas, los niveles de agua, los materiales de construcción y los índices y tiempos de descarga de las bombas. Esta falta de metadatos puede obstaculizar la interpretación y la presentación de informes sobre los resultados del monitoreo: en algunos pozos se pueden extraer aguas subterráneas poco profundas y contaminadas de la parte superior de un acuífero, en otros tramos más profundos, agua menos contaminadas, o incluso de diferentes acuíferos en una secuencia de capas. Siempre que sea posible, los pozos de monitoreo deben seleccionarse entre aquellos de los que se disponga de datos de construcción.

Mediante una combinación de pozos municipales, industriales y de riego puede lograrse una cobertura adecuada de la red en las zonas urbanas y agrícolas. Cuando el desarrollo de la irrigación o la industria es escaso o nulo, la única otra opción puede ser tomar muestras de pozos domésticos en zonas rurales. La selección de pequeñas bombas motorizadas en escuelas o clínicas puede proporcionar un acceso regular más fiable y muestras más representativas que las que se obtengan en pozos comunitarios con bombas manuales.

Los manantiales suelen estar infravalorados como opción para el monitoreo de la calidad de las aguas subterráneas; son baratos y resulta fácil tomar muestras de ellos sin la inestabilidad derivada de sacar las aguas subterráneas a la superficie, y suelen ser accesibles para efectuar visitas regulares. Los manantiales grandes pueden ser representativos de las masas de agua subterránea importantes y presentan descargas fiables incluso en la estación seca. Las pequeñas filtraciones con trayectorias de flujo cortas y poco profundas se sostienen mucho menos y son muy vulnerables a la contaminación local, por lo que deben evitarse. En algunas zonas de caliza kárstica, el movimiento de las aguas subterráneas puede quedar limitado en gran medida por las fracturas y los conductos conectados a las descargas de los manantiales; por lo tanto, los manantiales pueden ser la única opción de monitoreo realista.

Los pozos de monitoreo contruidos específicamente para fines de observación se utilizan en algunos programas nacionales con el fin de mejorar la cobertura de la red en los casos en los que no existen pozos de bombeo previos, y para alertar anticipadamente de la contaminación que llega a la capa freática antes de que afecte a los pozos de suministro más profundos. Sin embargo, su utilización exige recursos técnicos y de capital considerables para la construcción y el muestreo de las bombas, además de conocimientos técnicos para efectuar los muestreos, incluida la purga de las aguas estancadas (Misstear y otros, 2017). Esos pozos se utilizan frecuentemente para monitorear las condiciones locales de las aguas subterráneas en torno a las fuentes de contaminación, como los vertederos. Las instalaciones específicas de profundidad, incluidos los piezómetros anidados y los dispositivos de muestreo de niveles múltiples, rara vez se utilizan para monitorear la calidad del agua ambiental a gran escala debido a su coste y a la complejidad de la instalación y del muestreo, que requiere contratistas de perforación y técnicos de muestreo altamente capacitados, respectivamente. Su uso se limita en gran medida al monitoreo de las fuentes de contaminación principales, como los vertederos o el humo industrial, en los que una dimensión de profundidad bien caracterizada para la evaluación de la calidad es esencial para observar el crecimiento y la propagación del humo o para evaluar el impacto de medidas correctivas de alto costo.

FRECUENCIA DE MUESTREO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Al igual que en el caso de las aguas superficiales (Documento de Orientación 1), la frecuencia de muestreo de las aguas subterráneas debería tener en cuenta los entornos hidrológicos e hidrogeológicos y su influencia en los posibles índices de variación de la calidad de las aguas subterráneas. Los datos históricos o los estudios preliminares proporcionan información de interés al respecto. Desde el punto de vista del diseño del monitoreo, es esencial saber si los acuíferos están compuestos de material no consolidado, como arenas y gravas en formaciones aluviales, o si se trata de formaciones consolidadas, como areniscas y calizas. En las primeras, el

agua subterránea se mueve lentamente entre los granos y en las segundas puede desplazarse mucho más rápido a través de las fracturas.

Así pues, la toma de muestras de aguas subterráneas debería realizarse, como mínimo, una vez al año, pero teniendo en cuenta las observaciones siguientes, modificando el régimen de toma de muestras según sea necesario. Se necesitan frecuencias más elevadas, de por lo menos dos veces al año, para las aguas subterráneas poco profundas que son sensibles a las influencias estacionales de las precipitaciones, la recarga, el bombeo y el riego, y también para las que son susceptibles de sufrir impactos urbanos. Las muestras deben tomarse antes y después de la estación de lluvias o en las épocas en que los niveles de las aguas subterráneas son altos o bajos, teniendo especialmente en cuenta los grupos de parámetros que mejor responden a esas influencias (Tabla 2) y que sirven de base para el informe de Nivel 1. Para las calizas kársticas se necesitan frecuencias más altas de, al menos, cuatro veces al año. Los acuíferos calizos costeros e insulares poco profundos son particularmente sensibles a los cambios acelerados de calidad porque suelen estar densamente poblados y el régimen de las aguas subterráneas sufre fuertes modificaciones por la extracción, lo que causa, o podría causar, una intrusión salina. Para los acuíferos confinados (Figura 2) y para los que poseen aguas subterráneas muy antiguas que no reciben actualmente una recarga activa, puede mantenerse el intervalo mínimo de muestreo de una vez al año. En ambos casos, es probable que los cambios cualitativos sean muy lentos. Es poco probable que los grupos de parámetros correspondientes a la presentación de informes del indicador 6.3.2 varíen mucho y resulta improbable que se detecten otros indicativos de impactos humanos específicos (Tabla 2). Este marco para establecer las frecuencias de monitoreo debería ser el objetivo de una red de monitoreo de las aguas subterráneas nueva o mejorada, aunque reconocemos que dependiendo de los recursos, tal vez no sea posible lograrlo de forma inmediata.

OPERACIONES SOBRE EL TERRENO PARA LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Muchos aspectos de las operaciones sobre el terreno relativas a las aguas subterráneas son los mismos que los de las aguas superficiales, incluidas las cuestiones en materia de salud y seguridad. Las operaciones sobre el terreno también deberían seguir un procedimiento operativo estándar (Documento de Orientación 1) para garantizar la coherencia y la fiabilidad. Las disposiciones de garantía de calidad (GC) y de control de calidad (CC) también son importantes para las aguas subterráneas y se aplican a todas las etapas del programa de monitoreo (Figura 1). Las notas de campo son útiles para respaldar la interpretación y la presentación de informes, y deben incluir la tasa de descarga estimada y el tiempo de funcionamiento de la bomba, junto con observaciones referentes a las condiciones en torno al punto de muestreo de las aguas subterráneas, como cualquier prueba de impactos de contaminación muy localizados.

La calidad de las aguas subterráneas puede verse influenciada por las condiciones hidrológicas y las variaciones estacionales en los niveles y descargas del agua subterránea. Aunque puede ser difícil o imposible acceder al pozo para medir el nivel de las aguas subterráneas, que en cualquier caso se verá afectado por el bombeo, el conocimiento de las variaciones locales del nivel y del posible nivel no alterado al momento de la toma de muestras, proporcionan un contexto valioso respecto de los datos sobre la calidad del agua. El operador del pozo puede proporcionar dicha información. En los casos en que se tomen muestras en manantiales, debe estimarse la descarga; las descargas muy elevadas después de lluvias intensas pueden diluirse por la escorrentía local y la calidad no sería necesariamente representativa de la del acuífero.

Para cerciorarse de que la muestra es representativa del agua del acuífero, debería tomarse de un grifo de muestreo en la tubería de impulsión lo más cerca posible del cabezal de la bomba, en lugar de un tanque o grifo en el sistema de distribución de agua. El hecho de extraer el agua subterránea desde las profundidades sometiéndola a diferentes condiciones de presión, temperatura y oxígeno en la superficie puede alterar su carácter, lo que constituye una de las razones de la medición de parámetros inestables en el lugar. En el caso de descargas bajas o intermitentes, la columna de agua estancada en el pozo debe retirarse con la bomba antes de tomar la muestra; existen orientaciones sobre la estimación del volumen que debe retirarse para estar seguros de extraer el agua del acuífero en lugar del pozo (ASTM, 2006). Esto también puede comprobarse monitoreando la temperatura de descarga y la conductividad hasta obtener una lectura estable representativa del agua del acuífero.

GRUPOS DE PARÁMETROS PARA LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Para mantener la comparabilidad global al informar sobre el indicador 6.3.2, se proponen como parámetros de Nivel 1 para las aguas subterráneas la conductividad eléctrica, el pH y el nitrato (Tabla 2), que junto con la temperatura, deben medirse en el campo, ya sea en el pozo, el pozo de monitoreo o el manantial. Estas características de fácil medición representan los impactos de la salinización, la acidificación y el enriquecimiento de nutrientes (Tabla 2) que son relevantes en todas partes, pero no pueden representar todos los impactos en la calidad de las aguas subterráneas, y la idoneidad de un pozo o manantial para el agua potable no puede basarse exclusivamente en una evaluación de Nivel 1.

Tabla 2 Grupos de parámetros para monitorear la calidad de las aguas subterráneas (adaptado de AIH, 2017)

Parámetros		Comentarios y motivos de inclusión
Grupo de parámetros de Nivel 1 para las aguas subterráneas a fin de realizar mediciones periódicas en todas las situaciones; la frecuencia dependerá de las características de flujo del sistema de aguas subterráneas		
CE	conductividad eléctrica	Mide la salinización y contribuye a describir la masa de agua
pH	acidez	Mide la acidificación y contribuye a describir la masa de agua subterránea
NO ₃	nitrato	Contaminante omnipresente, estable en condiciones óxicas, preocupante para la salud en caso de consumo humano
La temperatura (T) debe medirse y registrarse al mismo tiempo que el resto de los parámetros		
Parámetros adicionales entre los que se podrían seleccionar los correspondientes a los informes de Nivel 2 con una frecuencia menor, en función de los cambios marcados en los anteriores		
Ca, Mg, Na, K	cationes comunes	Ayudará a evaluar los procesos hidrogeológicos y a detectar y diagnosticar cambios temporales significativos. El cloruro puede ser un indicador sensible de una serie de impactos agrícolas, urbanos e industriales
Cl, HCO ₃ SO ₄	aniones comunes	
TDS	sólidos disueltos totales	CE utilizada en el Nivel 1 como sustituta
Monitoreo microbiológico de las fuentes de agua potable fuentes designadas como de riesgo tras la inspección sanitaria		
FC	coliformes fecales	Es necesario monitorear en cierta medida las fuentes que se utilizan rutinariamente sin desinfección, pero la elevada variabilidad temporal y las dificultades de muestreo hacen que esto deba combinarse con otros enfoques, incluida la inspección sanitaria para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación microbiana
FS	estreptococos fecales	
E Coli	<i>Escherichia coli</i>	
Parámetros adicionales requeridos en entornos hidrogeológicos específicos que podrían informarse en el Nivel 2		
F	fluoruro	Esencial en determinadas condiciones hidrogeológicas como indicadores de las variaciones de la calidad natural de las aguas subterráneas que afectan a la salud humana
As	arsénico soluble	
U	uranio soluble	
NH ₄	amonio	Solo en condiciones altamente anóxicas/reductoras
Fe	hierro soluble	
Mn	manganeso soluble	
P	ortofosfato	Solo en los acuíferos kársticos con presiones agrícolas intensas

Parámetros suplementarios indicativos de la contaminación cuando se han identificado presiones agrícolas, urbanas o industriales específicas		
	pesticidas específicos	Cada parámetro requerirá protocolos de muestreo específicos utilizados por personal especializado, y realizar análisis hasta límites de detección muy bajos en laboratorios con equipos costosos y personal especializado
	orgánicos volátiles seleccionados	
	hidrocarburos seleccionados	
	metales pesados	
	contaminantes emergentes	

De las fuentes de datos de Nivel 2 propuestas (documento de introducción, Figura 1), es probable que los parámetros químicos adicionales sean los indicadores más útiles del resto de las presiones sobre las aguas subterráneas, y también los que probablemente estén más disponibles en los programas nacionales de monitoreo. En la Tabla 2 se presenta un enfoque jerárquico para la selección de grupos de parámetros, que tiene por objeto informar y contribuir al establecimiento de nuevos programas de monitoreo de las aguas subterráneas o a la ampliación de los programas existentes, y que también puede utilizarse para informar a Nivel 2.

La elección de otros parámetros para el monitoreo y la presentación de informes debe estar relacionada con las presiones locales y con el entorno hidrogeológico (Tabla 2). A menudo se incluyen sistemáticamente los iones más comunes, los cuales pueden aportar pruebas de la evolución de la calidad a lo largo del sistema de flujo de las aguas subterráneas, por ejemplo cuando al interactuar con acuíferos carbonatados aumenta la mineralización. La calidad microbiana se incluye en la Tabla 2 como recordatorio de que, con frecuencia, es un requisito de monitoreo esencial relacionado con el consumo humano, aunque no para la calidad ambiental del indicador 6.3.2 de los ODS. Las presiones sobre las aguas subterráneas pueden resultar evidentes según el desarrollo agrícola, urbano o industrial establecido y los programas de monitoreo existentes, o pueden identificarse en estudios preliminares. Esto supone que no existe una respuesta única y universal «correcta» en lo que respecta a la elección de los parámetros de monitoreo, si bien la Tabla 2 puede proporcionar un marco adecuado. El profesional debe tener en cuenta que la recolección de muestras de aguas subterráneas puede requerir contenedores especiales o procedimientos sobre el terreno; por ejemplo, las muestras para los análisis de cationes y oligoelementos deben filtrarse, acidificarse y almacenarse en contenedores adecuados que no perjudiquen la calidad de la muestra (Misstear y otros, 2017).

Las variaciones naturales de la calidad de las aguas subterráneas de origen geológico pueden ser perjudiciales para la salud humana, principalmente el arsénico y el fluoruro (Tabla 2). Es posible que los efectos sobre la salud resulten evidentes y que se estén aplicando medidas de mitigación, como la eliminación del arsénico y el fluoruro de las aguas subterráneas extraídas. Es preciso mantener el monitoreo de las aguas subterráneas para determinar si existen tendencias en la calidad, teniendo en cuenta que la extracción de las aguas subterráneas puede modificar las condiciones del subsuelo y fomentar la movilización de estos contaminantes. Se deberían monitorear especialmente los entornos hidrogeológicos en los que es más probable que estos parámetros planteen problemas, como las grandes cuencas aluviales en el caso del arsénico y el volcánico, las fosas tectónicas y ciertas zonas de zócalos cristalinos en el caso del fluoruro.

FIJAR LOS OBJETIVOS PARA LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

La calidad de las aguas subterráneas ambientales puede variar mucho entre los distintos acuíferos, dependiendo de las condiciones hidrológicas e hidrogeológicas. Es probable que los acuíferos de las regiones húmedas y templadas presenten una mineralización global baja, indicada por los valores reducidos de CE ambiental, mientras que los de los terrenos más áridos con menor recarga pueden alcanzar valores de CE hasta cuatro o cinco veces superiores. Asimismo, las trayectorias de flujo largas en los acuíferos profundos tenderán a producir una elevada mineralización y valores de CE más elevados. Así pues, cabe esperar una serie de puntos de

referencia respecto al estado del medio ambiente, en los que unos valores de CE más elevados no suponen necesariamente la contaminación de los recursos hídricos subterráneos.

La utilización de los valores de referencia existentes para evaluar la calidad de las aguas subterráneas ambientales a efectos del indicador 6.3.2 de los ODS no resulta apropiada en todos los casos. El enfoque para establecer los objetivos consiste en determinar los valores que se derivan de la calidad de las aguas subterráneas de fondo o de referencia relevantes a nivel local. Esto implica que, al menos en lo que respecta a la CE, los objetivos fijados para los acuíferos o las masas de agua subterránea pueden resultar preferibles a los objetivos nacionales. Por otro lado, dado que el monitoreo y la presentación de informes sobre nitratos están relacionados con posibles impactos en la salud humana, es probable que los objetivos nacionales sean apropiados.

RESUMEN

En el presente documento se proporcionan orientaciones técnicas específicas sobre el monitoreo de la calidad ambiental de las aguas subterráneas en el contexto del indicador 6.3.2 de los ODS. Se exponen los problemas particulares que plantea el monitoreo de las aguas subterráneas. Los acuíferos deben identificarse y las masas de agua subterránea deben definirse utilizando modelos hidrogeológicos conceptuales sencillos basados en los datos disponibles. Se examinan las ventajas y los inconvenientes de utilizar los pozos de suministro existentes, los pozos de monitoreo nuevos o los manantiales para tomar muestras de aguas subterráneas. Se puede utilizar un marco propuesto de grupos de parámetros para el monitoreo de las aguas subterráneas a fin de determinar posibles grupos de parámetros de Nivel 2 y contribuir a la creación o la mejora del monitoreo de la calidad de las aguas subterráneas a nivel nacional.

REFERENCIAS

- ASTM, 2006. Standard Guide to Purging Methods for Wells Used for Ground-Water Quality Investigations, ASTM Standard D 6452, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- Chapman, D.V., Meybeck, M. and Peters, N.E., 2005. Water Quality Monitoring. In: Anderson, M.G. [Ed.] *Encyclopaedia of Hydrological Sciences*. John Wiley & Sons
- Chilton P. J., 1996. Chapter 9: Groundwater. In Chapman, D. [Ed.] *Water Quality Assessments – A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring*. Second Edition Published by E&FN Spon on behalf of United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, World Health Organization and United Nations Environment Programme. Disponible en: https://www.who.int/water_sanitation_health/resourcesquality/wqachapter9.pdf
- EC, 2004 Groundwater body characterisation. Technical Report No 2. Disponible en: <https://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/groundwater/activities.htm>
- IAH, 2017 The UN-SDGs for 2030: Essential indicators for groundwater. Disponible en: <https://iah.org/education/professionals/strategic-overview-series>
- Lipponen A. & Chilton P. J., 2018. Development of cooperation on managing transboundary groundwaters in the pan-European region: The role of international frameworks and joint assessments. *Journal of Hydrology Regional Studies*; 20: 145-157.
- Missteat B. D. R., Banks D. & Clark L., 2017. Water wells and boreholes, 2nd edition. J Wiley & Sons, UK.
- UNECE, 2000 Guidelines on monitoring and assessment of transboundary groundwaters. UNECE, Geneva.