



INDICADOR 6.3.2 DE LOS ODS. DOCUMENTO DE ORIENTACIÓN TÉCNICA N.º 3: SEGUIMIENTO Y PRESENTACIÓN DE INFORMES SOBRE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS



Este documento ofrece orientación técnica adicional sobre cómo abordar los desafíos que plantea el monitoreo y la presentación de informes sobre las aguas subterráneas en el marco del indicador 6.3.2 de los ODS. Es un documento complementario a la [Introducción al indicador 6.3.2 de los ODS](#) y forma parte de una serie que brinda orientación técnica detallada sobre aspectos específicos de la metodología del indicador. Estos documentos técnicos se crearon en respuesta a los comentarios recibidos de quienes informan sobre el indicador para su país. Estos y otros recursos están disponibles en la [Plataforma de apoyo al indicador 6.3.2 de los ODS](#)¹, accesible a través del [SDG Water Quality Hub](#)².

Este documento está dirigido a profesionales que buscan más información sobre cómo aplicar la metodología del indicador para las aguas subterráneas y cómo fortalecer el monitoreo de las aguas subterráneas en su propio país. El documento:

1. Proporciona orientación sobre la identificación de acuíferos y la definición de masas de agua subterránea.
2. Analiza las opciones para el muestreo de las aguas subterráneas.
3. Analiza la elección de parámetros y la presentación de 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 deben proporcionar información suficiente sobre el estado de la calidad del agua ambiental a escala nacional y deben permitir identificar tendencias a largo plazo. Esto requiere datos de los grupos de parámetros básicos de sitios en todo el país, y que las mediciones se realicen de manera estandarizada y consistente. La implementación de este indicador ha demostrado que son menos los países que tienen la capacidad de monitorear las aguas subterráneas en comparación con las aguas superficiales. Esto no es una sorpresa y ha sido una característica común y constante de este tipo de actividades en el pasado. Este documento explora las razones de ello y recomienda cómo se pueden fortalecer los programas de monitoreo de las aguas subterráneas para proporcionar mejor información sobre la calidad del agua ambiental, y cómo se puede hacer que los informes sobre las aguas subterráneas sean más sólidos y comparables.

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

Hay muchas razones por las que los programas de monitoreo de la calidad del agua no proporcionan la información que deberían. El monitoreo debe considerarse como un círculo o una cadena continua (UNEP, 2000), que comienza con las necesidades de información y pasa por la estrategia de monitoreo, el diseño de la red, el muestreo, el análisis, el manejo de datos y la presentación de informes para proporcionar información de manera clara y oportuna. Si un paso o eslabón de la cadena (Figura 1) no se lleva a cabo adecuadamente, todo el proceso puede fracasar en la generación de datos útiles. Las causas comunes del fracaso surgen de:

- no definir las necesidades de información y los objetivos del programa de monitoreo;

¹ <https://wwqa.info/knowledge-center/sdg632/>

² <https://www.sdg632hub.org>

³ Este documento fue elaborado por John Chilton, exdirector ejecutivo de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos, en marzo de 2020, en nombre del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) GEMS/Water, y revisado en marzo de 2026. Este documento ha sido traducido del inglés con la ayuda de una IA lingüística.



- no tener debidamente en cuenta el entorno físico en el diseño de la red;
- una planificación insuficiente de la recolección, el manejo, el almacenamiento y el análisis de las muestras;
- la falta de control y garantía de calidad;
- una gestión e interpretación deficientes de los datos resultantes;
- falta de revisión, retroalimentación y modificación del diseño si fuera necesario.

El objetivo específico del indicador 6.3.2 de los ODS es proporcionar un mecanismo para determinar si los esfuerzos por mantener y mejorar la calidad del agua ambiental están funcionando, utilizando datos extraídos de los programas nacionales de monitoreo, que tendrán sus propios objetivos.

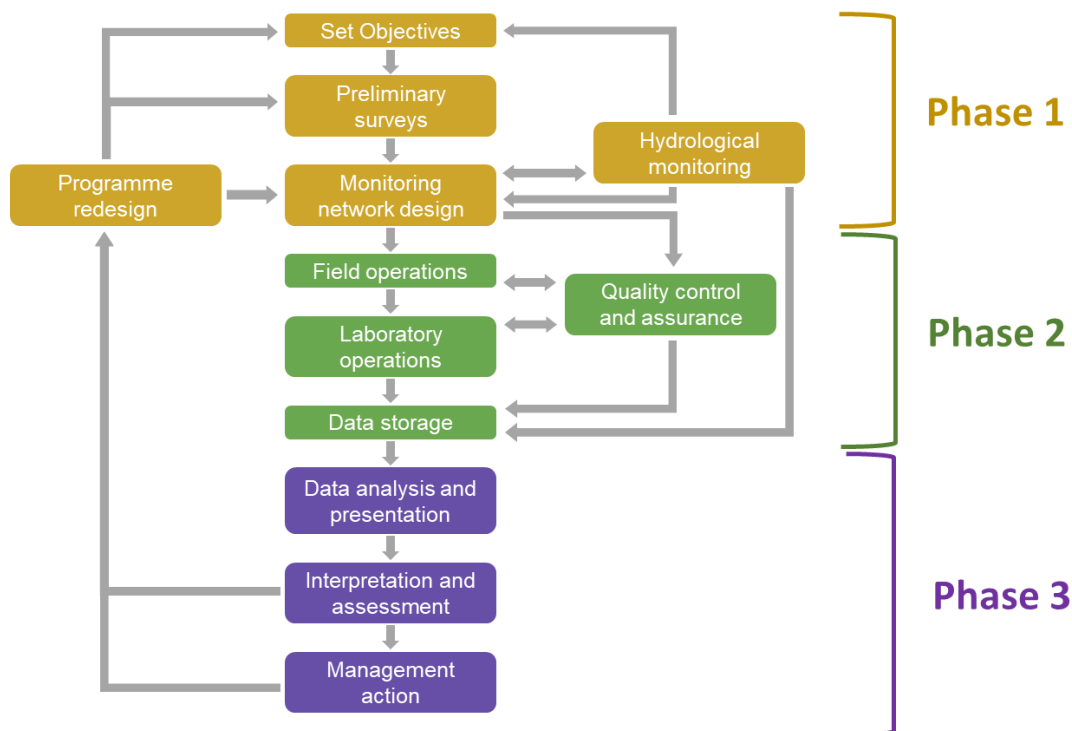


Figura 1. Diagrama de flujo del diseño del programa de monitoreo de la calidad del agua. Modificado a partir de Chapman et al. (2005)

El desafío que plantea el monitoreo de la calidad de las aguas subterráneas es fundamentalmente diferente al de los ríos y lagos (IAH, 2017). El monitoreo de los ríos puede proporcionar una imagen global de una cuenca extensa, amortiguando el efecto de los factores locales de la estación de muestreo. Por lo general, ocurre lo contrario con las aguas subterráneas, en las que pueden predominar factores muy locales, como la contaminación en la boca del pozo, la profundidad de los pozos, las tasas de bombeo, la cuenca inmediata y los protocolos de muestreo. Esto puede distorsionar la visión general de la calidad de las aguas subterráneas del acuífero, y es necesario comprenderlo y tenerlo en cuenta.

En el caso de las aguas subterráneas, las limitaciones generales descritas anteriormente suelen verse agravadas por la falta de conocimientos hidrogeológicos, lo que debilita tanto el diseño de la red de monitoreo como la interpretación de los resultados. A veces esto se debe a que el monitoreo de las aguas subterráneas es establecido por profesionales de las aguas superficiales como una extensión de un programa existente de aguas superficiales sin una consideración adecuada de la hidrogeología; a menudo, simplemente no existe la información hidrogeológica necesaria o la experiencia en aguas subterráneas. 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 el muestreo. La inaccesibilidad contribuye al atractivo de las aguas subterráneas como fuente de abastecimiento. Si los acuíferos son menos accesibles, es probable que tengan una buena calidad natural del agua (con algunas excepciones) y que estén protegidos de las actividades contaminantes en la superficie terrestre. Sin embargo, una vez contaminadas, el lento movimiento del agua en el acuífero implica que la calidad de las aguas subterráneas puede tardar décadas en recuperarse.



La mayoría de las aguas subterráneas tienen tiempos de residencia mucho más largos que las aguas superficiales. Esto da tiempo para que se produzcan interacciones físico-químicas entre el agua subterránea de movimiento lento y el material que forma el acuífero, y la composición química del agua puede cambiar a medida que fluye (Chilton, 1996). Desde el punto de vista del monitoreo, el movimiento lento significa que, en general, las aguas subterráneas deben muestrearse con menos frecuencia que las aguas superficiales, pero obtener una imagen representativa de la calidad de las aguas subterráneas puede requerir una mayor densidad de muestreo (IAH, 2017). Además, la profundidad y la complejidad del subsuelo de los acuíferos tienen una gran influencia en la elección del punto de muestreo para la red de aguas subterráneas y en la interpretación de los resultados obtenidos. Las muestras tomadas de pozos muy próximos entre sí pueden arrojar resultados muy diferentes, especialmente si extraen agua de diferentes profundidades del acuífero o incluso de diferentes acuíferos.

IDENTIFICACIÓN DE ACUÍFEROS Y DEFINICIÓN DE MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEAS

Los dos primeros pasos de la metodología del indicador 6.3.2 de los ODS consisten en: el establecimiento de distritos de cuenca de reporte (RBD) basados en cuencas fluviales; y la definición de masas de agua dentro de ellos. En el caso de las aguas subterráneas, esto significa identificar la ubicación de los acuíferos productivos y cómo podrían subdividirse en masas de agua subterráneas. En cuanto a las aguas superficiales, los elementos definidos como masas de agua subterránea forman las unidades discretas que se clasifican como «buenas» o «no buenas».

En algunos países, en particular en los Estados miembros de la UE y otros alineados con la legislación ambiental de la UE, los servicios geológicos nacionales o las agencias ambientales ya han realizado un esfuerzo considerable para cumplir con sus obligaciones de definir las masas de agua subterráneas. Las orientaciones técnicas que respaldan la legislación les ayudan a hacerlo de manera coherente y comparable (CE, 2004), pero los requisitos de datos y los conocimientos especializados necesarios para ello son considerables. Es probable que estos países cuenten también con programas bien desarrollados de monitoreo de la calidad de las aguas subterráneas, y se les anima a utilizar las mismas unidades de información para la presentación de informes sobre el indicador 6.3.2 de los ODS.

En muchos otros países se conoce la ubicación de los acuíferos y su importancia como fuentes de agua subterránea. Sin embargo, es posible que no se conozca bien la naturaleza de los sistemas de flujo de agua subterránea en estos acuíferos —de dónde viene y adónde va el agua subterránea— y que no exista un requisito nacional para definir las masas de agua subterránea. Los programas de monitoreo existentes pueden variar mucho en cuanto a la cobertura de la red, la idoneidad de los puntos de muestreo, la frecuencia de muestreo y la elección de los parámetros. Otros países pueden saber aún menos sobre sus acuíferos y aguas subterráneas; es posible que cuenten con poco o ningún monitoreo regular y que dispongan de datos muy escasos sobre la calidad de sus aguas subterráneas. Algunos países pueden carecer por completo de datos de monitoreo, pero aspiran a desarrollar un programa de monitoreo de la calidad de las aguas subterráneas.

En todos estos casos, como base para identificar acuíferos y comprender los sistemas de flujo de aguas subterráneas, es esencial desarrollar modelos hidrogeológicos conceptuales simples. Estos pueden no ser más sofisticados que un mapa que muestre la extensión superficial del afloramiento de diversos acuíferos y no acuíferos, y secciones transversales simples. Estas secciones deben mostrar los orígenes de las aguas subterráneas, las direcciones de flujo y las ubicaciones de descarga (Figura 2). Esto es importante, ya que la fuente de recarga, que podría ser la infiltración de la lluvia o de masas de agua superficiales, también es susceptible de ser una fuente de aportes contaminantes al acuífero, contribuyendo así al deterioro de la calidad. Del mismo modo, las ubicaciones de descarga hacia manantiales, ríos, lagos o humedales, o hacia pozos de agua, son los puntos en los que la mala calidad de las aguas subterráneas impacta en los receptores (Figura 2).

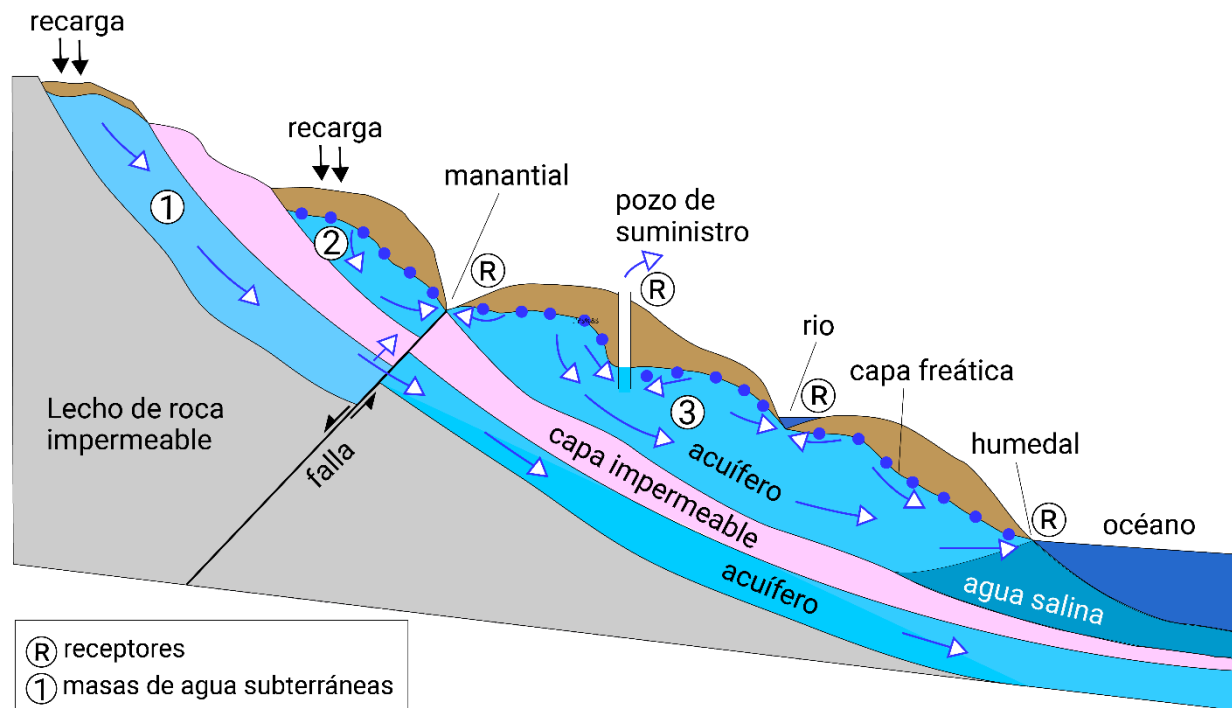


Figura 2: Modelo hidrogeológico conceptual sencillo que ayuda a visualizar los afloramientos de acuíferos, las ubicaciones de recarga de aguas subterráneas, las direcciones del flujo de aguas subterráneas y los puntos de descarga

Incluso cuando no se dispone de modelos hidrogeológicos conceptuales, casi todos los países cuentan con mapas geológicos, tal vez elaborados para la prospección de minerales o la exploración petrolera. A partir de estos, se pueden observar los principales tipos de formaciones geológicas e identificar aquellas que probablemente proporcionen acuíferos productivos. Por supuesto, esto puede confirmarse fácilmente si los acuíferos ya se utilizan ampliamente para el suministro de agua. Si el organismo responsable del monitoreo no cuenta con experiencia en aguas subterráneas, se debe solicitar apoyo al servicio geológico nacional, a una universidad local o a una empresa consultora adecuada.

Dentro de las RBD basadas en cuencas fluviales, se deben definir las masas de agua subterráneas para permitir la descripción de la calidad ambiental. La metodología para el Indicador 6.3.2 de los ODS prevé que, idealmente, las masas de agua deben dimensionarse para garantizar que sean homogéneas en términos de calidad del agua y que puedan clasificarse utilizando relativamente pocos puntos de monitoreo⁴. Sin embargo, como se ha dejado claro, los acuíferos pueden ser complejos y estar lejos de ser homogéneos. Cuando un acuífero deba dividirse en masas de agua subterráneas, estas deben ser sistemas de flujo discretos en los que el agua subterránea no se desplace a través de los límites. Lo siguiente puede proporcionar criterios útiles para dicha subdivisión.

- Cuando se disponga de datos suficientes para elaborar mapas del nivel de las aguas subterráneas, las masas podrán delimitarse mediante líneas divisorias de flujo de aguas subterráneas. La figura 3 muestra tres de estas masas de agua subterránea en un acuífero que recubre rocas impermeables y se inclina por debajo de los estratos suprayacentes. Sin embargo, a diferencia de los límites de las masas de agua superficiales, los límites de las masas de agua subterránea definidos de esta manera pueden no ser estáticos y pueden desplazarse estacionalmente, en respuesta al cambio climático a largo plazo y a la recarga, así como a los efectos del bombeo de los pozos cercanos a los límites.

⁴ https://wwqa.info/knowledge-center/sdg632/SDG632_Technical Guidance Document No1 Monitoring Programme Design_es

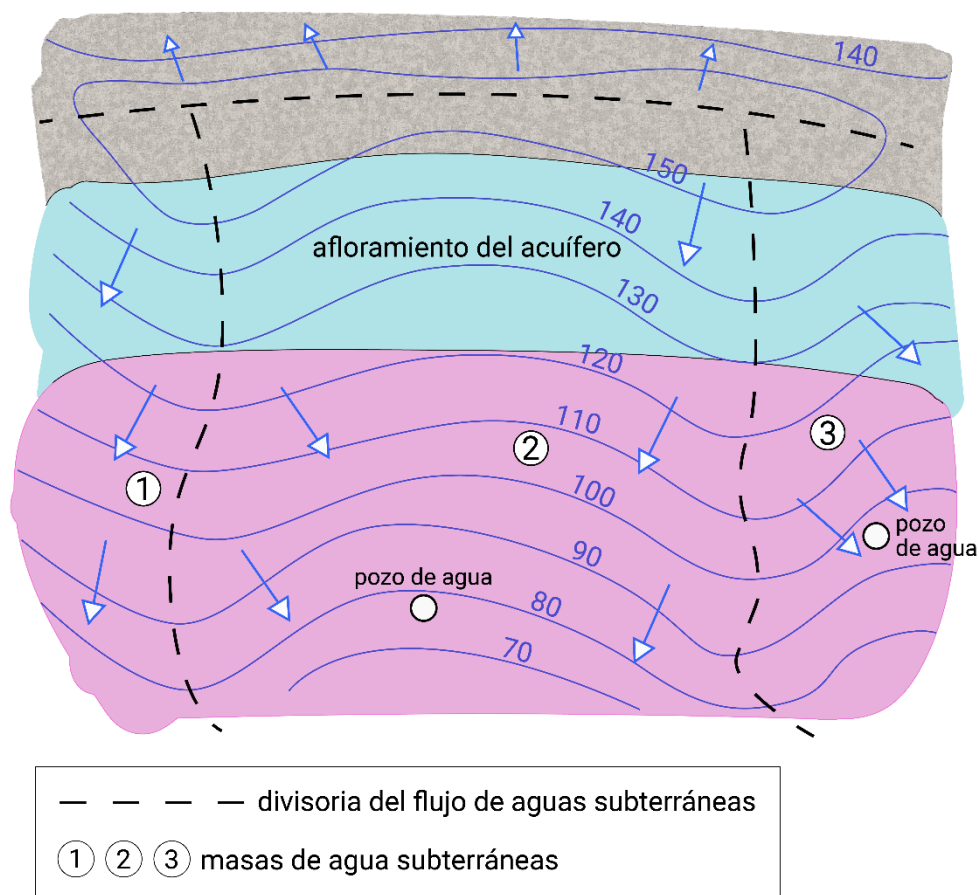


Figura 3. Masas de agua subterránea definidas por líneas divisorias de flujo

- Si no se dispone de dichos datos, los límites podrían basarse en las cuencas de aguas superficiales, que en muchos casos siguen de cerca las divisorias de aguas subterráneas. La figura 4 muestra dos masas de agua subterráneas definidas de esta manera.

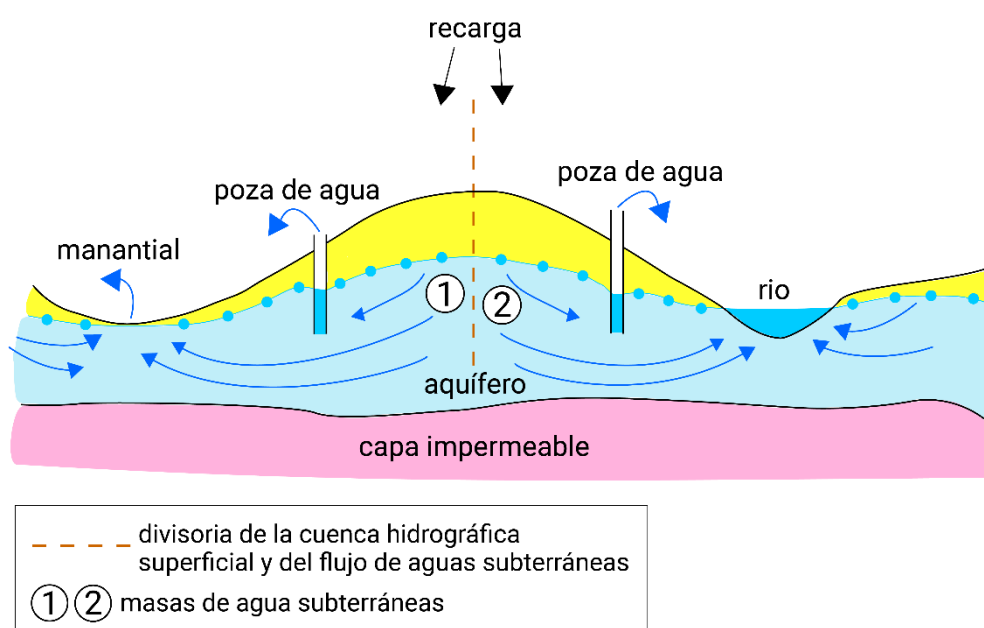


Figura 4. Masas de agua subterránea definidas por cuencas de agua superficial y divisorias de aguas subterráneas



- Cuando fallas geológicas importantes traen material impermeable contra un acuífero, restringiendo el flujo de agua subterránea, esto también puede formar un límite adecuado. En la Figura 2, el acuífero no confinado superior está dividido en dos masas de agua subterránea (una de las cuales es bastante pequeña) por una gran falla. En el acuífero confinado subyacente, el desplazamiento de la falla no es suficiente para impedir el flujo de agua subterránea.
- En el caso de acuíferos relativamente pequeños y poco profundos formados por sedimentos aluviales o glaciofluviales y con un lecho rocoso subyacente menos permeable, entonces todo el acuífero puede constituir una masa de agua subterránea.

La complejidad de los acuíferos, su dimensión vertical en cuanto a la variación de la calidad y el lento movimiento implican que es poco probable que incluso las masas de agua subterránea relativamente pequeñas puedan representarse adecuadamente mediante un solo punto de monitoreo, o incluso un número reducido de ellos.

Los países áridos y semiáridos suelen caracterizarse por acuíferos extensos pero con poca o ninguna agua superficial, por lo que apenas existen límites de cuenca para la definición de las cuencas hidrográficas o de las masas de agua subterráneas. Además, estos acuíferos suelen ser profundos, gruesos, de yacimiento plano con bajos gradientes de agua subterránea, y con tiempos de residencia del agua subterránea que se miden en siglos más que en décadas. A menudo, no reciben una recarga significativa de agua subterránea en las condiciones climáticas actuales. Estos recursos de agua subterránea «fósiles» o no renovables suelen ser objeto de una intensa explotación, lo que plantea considerables desafíos de gestión en términos de cantidad de agua. Sin embargo, están bien protegidos contra posibles impactos en la calidad derivados de actividades en la superficie terrestre, y la calidad de las aguas subterráneas cambiará muy lentamente. Por lo tanto, es apropiado utilizar unidades de información basadas en acuíferos para el indicador 6.3.2 de los ODS en estos entornos, que también pueden ser uno de los pocos ejemplos de masas de agua subterráneas que pueden caracterizarse mediante un pequeño número de puntos de muestreo.

Sin embargo, es necesario hacer una advertencia. Dentro de estas regiones áridas también hay acuíferos de arena y grava mucho más pequeños y poco profundos, a menudo asociados con lechos de ríos secos, uadis y oasis. Estos acuíferos pueden ser muy importantes para las comunidades locales en cuanto al abastecimiento de agua y la agricultura de regadío intensivo, con el consiguiente potencial de impacto significativo en la cantidad y la calidad de sus aguas subterráneas. Cada uno de ellos puede ser una masa de agua subterránea independiente, desconectada de la siguiente, y necesitará un monitoreo más frecuente adaptado a las presiones locales y a las respuestas más rápidas de estos sistemas de aguas subterráneas poco profundas.

Los acuíferos, y por lo tanto las posibles masas de agua subterráneas, pueden atravesar fronteras internacionales. Un acuífero puede recibir recarga en un país y producir descarga en un país vecino. Una vez más, los modelos conceptuales de aguas subterráneas pueden ayudar a determinar si es probable que esto ocurra (Lipponen y Chilton, 2018) y, de ser así, puede ser necesario el intercambio transfronterizo de información y la colaboración en materia de monitoreo.

SELECCIÓN DE PUNTOS DE MUESTREO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Si hay un buen número de opciones de muestreo, la ubicación general de los puntos de monitoreo debe elegirse de manera 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 la red deba tener en cuenta la distribución de la población y el uso del suelo, con una mayor densidad de puntos de monitoreo donde las presiones agrícolas, urbanas e industriales sean más frecuentes. La elección también podría tener que considerar factores muy localizados alrededor del punto de monitoreo que podrían influir en la calidad de las aguas subterráneas y la confiabilidad del muestreo. No se deben utilizar los puntos de monitoreo que se vean seriamente comprometidos de esta manera.

La elección del tipo de punto de muestreo también influye en la fiabilidad y la representatividad. Las muestras de aguas subterráneas pueden tomarse de pozos existentes que suministran agua para usos domésticos, municipales, de riego o industriales, de manantiales o de pozos de monitoreo construidos específicamente para ese fin. Cada uno tiene ventajas y desventajas (Tabla 1) en cuanto a practicidad, costo y aspectos técnicos. Estas también deben entenderse en el contexto de la configuración hidrogeológica local.



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

Punto de muestreo	Ventajas	Desventajas
Pozo de suministro municipal	- barato y fácil de muestrear - muestreo repetido, visitas regulares - alto caudal, representativo de la calidad del acuífero - Las bombas suelen estar en funcionamiento - puede haber datos de series temporales disponibles	- posible incertidumbre en cuanto a la construcción y el origen de la muestra, agua mezclada de varias profundidades - posible desfase temporal prolongado tras la contaminación - ubicaciones determinadas por la distribución de la población, lo que sesga la cobertura espacial - el municipio o la empresa de agua podrían no permitir el muestreo
Pozo de riego	igual que los tres primeros, pero es menos probable que haya series temporales disponibles	- igual que los dos primeros, pero es menos probable que haya datos de construcción - la cobertura espacial se inclina hacia las zonas agrícolas - puede funcionar solo estacionalmente
Pozo industrial	igual que el pozo de riego anterior	igual que el pozo municipal, pero es menos probable que se disponga de datos de construcción
Pozo doméstico	- barato y fácil de muestrear - muestreo repetido, visitas regulares	- descarga baja e intermitente, especialmente con una bomba manual - puede ser necesario purgarlo para eliminar el agua estancada del interior del pozo - puede estar averiado y no bombear - puede ser poco profundo y menos representativo del acuífero - vulnerable a la contaminación muy local
Pozo de monitoreo poco profundo	- puede proporcionar una alerta temprana de la llegada de contaminantes al nivel freático - muestreo repetido y regular - Es probable que se conozca completamente la construcción - se pueden utilizar materiales inertes	- costos de construcción moderados - necesita una bomba para recoger la muestra - se debe tener cuidado al eliminar el agua estancada - no es muy representativo del acuífero
Piezómetros de varios niveles	- se debe conocer completamente la construcción - Se pueden utilizar materiales inertes - alerta temprana de contaminantes en el nivel freático - puede indicar una estratificación vertical de la calidad del agua subterránea - puede indicar diferencias de carga vertical y movimiento ascendente o descendente del agua	- altos costos de construcción - Requiere contratistas y materiales especializados - puede ser difícil de instalar correctamente con buenos sellos entre los intervalos de muestreo - requiere dispositivos de muestreo especiales y un operador calificado
Manantiales	- baratos y fáciles de muestrear - muestreo repetido y visitas periódicas - los manantiales grandes pueden ser representativos de masas significativas de agua subterránea - los manantiales utilizados para el abastecimiento público pueden contar con series de datos temporales existentes	- vulnerables a fuentes locales de contaminación - pueden ser vulnerables a la lluvia directa - los manantiales pequeños pueden representar un flujo superficial



Muchos programas nacionales de calidad de las aguas subterráneas dependen total o casi totalmente de los pozos de abastecimiento existentes por su bajo costo y la facilidad de muestreo, así como por la accesibilidad general para visitas regulares, siempre que la agencia de monitoreo tenga un acuerdo para hacerlo con el operador del pozo. Debido a que estos pozos se operan con frecuencia o incluso de manera más o menos continua, es probable que el agua extraída sea representativa de la del acuífero (Tabla 1). Con frecuencia, la mayor desventaja de estos pozos es que puede haber poca o ninguna información disponible sobre las profundidades de los pozos, los intervalos de filtrado y las bombas, los niveles de agua, los materiales de construcción y las tasas y tiempos de descarga de las bombas. Esta falta de metadatos puede dificultar la interpretación y la presentación de los resultados del monitoreo: algunos pozos pueden extraer agua subterránea poco profunda y contaminada de la parte superior de un acuífero, otros de secciones más profundas y menos contaminadas, o incluso de diferentes acuíferos en una secuencia estratificada. Siempre que sea posible, los pozos de monitoreo deben seleccionarse entre aquellos para los que se disponga de datos de construcción.

Una combinación de pozos municipales, industriales y de riego puede proporcionar una cobertura de red adecuada de las zonas urbanas y agrícolas. Cuando hay poco o ningún desarrollo industrial o de riego, el muestreo en zonas rurales a partir de pozos domésticos puede ser la única otra opción. La selección de pequeñas bombas motorizadas en escuelas o clínicas puede proporcionar un acceso regular más confiable y muestras más representativas que los pozos comunitarios con bombas manuales.

Los manantiales suelen subestimarse como opción para el monitoreo de la calidad de las aguas subterráneas; son económicos y fáciles de muestrear sin la inestabilidad que supone llevar el agua subterránea a la superficie, y suelen ser accesibles para visitas regulares. Los manantiales grandes pueden ser representativos de masas de agua subterráneas sustanciales y tener caudales confiables incluso en la estación seca. Las pequeñas filtraciones con trayectorias de flujo cortas y poco profundas son mucho menos sostenidas y muy vulnerables a la contaminación local, por lo que deben evitarse. En algunas zonas de piedra caliza kárstica, el movimiento de las aguas subterráneas puede estar restringido en gran medida a fracturas y conductos conectados a las descargas de los manantiales y, por lo tanto, los manantiales pueden ser la única opción realista de monitoreo.

En algunos programas nacionales se utilizan pozos de sondeo construidos específicamente con fines de observación para mejorar la cobertura de la red en zonas donde no hay pozos de bombeo existentes, así como para proporcionar una alerta temprana de la contaminación que llega al nivel freático antes de que afecte a los pozos de abastecimiento más profundos. Sin embargo, su uso requiere una inversión considerable de capital y recursos técnicos para la construcción y las bombas de muestreo, así como conocimientos especializados para el muestreo, incluida la purga del agua estancada (Misstear *et al.*, 2017). Dichos pozos se utilizan ampliamente para monitorear las condiciones locales de las aguas subterráneas alrededor de fuentes de contaminación, como los vertederos. Las instalaciones específicas para cada profundidad, incluidos los piezómetros anidados y los dispositivos de muestreo multinivel, rara vez se utilizan en el monitoreo a gran escala de la calidad del agua ambiental debido a su costo y a la complejidad de la instalación y el muestreo, que requieren contratistas de perforación y técnicos de muestreo altamente capacitados, respectivamente. Su uso se limita en gran medida al monitoreo de las principales fuentes de contaminación, como los vertederos o las plumas industriales, donde una dimensión de profundidad bien caracterizada para la evaluación de la calidad es esencial para observar el crecimiento y la propagación de la pluma o para evaluar el impacto de costosas medidas de remediación.

FRECUENCIA DE MUESTREO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Al igual que en el caso de las aguas superficiales, la frecuencia de muestreo de las aguas subterráneas debe tener en cuenta las condiciones hidrológicas e hidrogeológicas y su influencia en las tasas probables de variación de la calidad de las aguas subterráneas. Los datos históricos o un estudio preliminar proporcionan información relevante. Desde la perspectiva del diseño del monitoreo, es esencial saber si los acuíferos están compuestos por material no consolidado, como arenas y gravas en formaciones aluviales, o si son formaciones consolidadas, como areniscas y calizas. En el primer caso, el agua subterránea se mueve lentamente entre los granos y, en el segundo, puede moverse mucho más rápidamente a través de las fracturas.

Por lo tanto, el mínimo absoluto para el muestreo de aguas subterráneas debe ser una vez al año, pero teniendo en cuenta las siguientes consideraciones para modificar el régimen de muestreo según sea necesario. Se requieren



frecuencias más altas, de al 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, así como para aquellas susceptibles a los impactos urbanos. Las muestras deben tomarse antes y después de la temporada de lluvias y/o en los momentos de niveles altos y bajos de las aguas subterráneas, teniendo especialmente en cuenta los grupos de parámetros más sensibles a estas influencias (Tabla 2) y proporcionando la base para los informes de Nivel 1. Se necesitan frecuencias más altas, de al menos cuatro veces al año, para las calizas kársticas. Los acuíferos de caliza costeros y de islas poco profundos son particularmente sensibles a cambios más rápidos en la calidad porque a menudo están densamente poblados y el régimen de aguas subterráneas está muy modificado por la extracción, lo que causa o pone en riesgo la intrusión salina. El intervalo mínimo de muestreo de una vez al año puede mantenerse para los acuíferos confinados (Figura 2) y para aquellos con aguas subterráneas muy antiguas que actualmente no reciben recarga activa. En ambos casos, es probable que los cambios en la calidad sean muy lentos. Es poco probable que varíen mucho los grupos de parámetros para la presentación de informes del indicador 6.3.2 y que se detecten otros indicativos de impactos humanos específicos (Tabla 2). Este marco para establecer las frecuencias de las operaciones de monitoreo de campo debería ser el objetivo de una red de monitoreo de aguas subterráneas nueva o mejorada, aunque se reconoce que es posible que los recursos no lo permitan de inmediato.

OPERACIONES DE CAMPO PARA LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Muchos aspectos de las operaciones de campo para las aguas subterráneas son los mismos que para las aguas superficiales, incluidas las consideraciones de salud y seguridad. El trabajo de campo también debe seguir un procedimiento operativo estándar (Documento de orientación 1) para garantizar la coherencia y la fiabilidad. Las medidas de aseguramiento de la calidad (QA) y control de calidad (QC) son igualmente 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 que la bomba ha estado funcionando, junto con observaciones de las condiciones alrededor del punto de muestreo de aguas subterráneas, como cualquier evidencia de impactos de contaminación muy localizados.

La calidad de las aguas subterráneas puede verse influida por las condiciones hidrológicas y las variaciones estacionales en los niveles y caudales de las aguas subterráneas. Aunque puede resultar difícil o imposible acceder al pozo para medir el nivel de las aguas subterráneas, que en cualquier caso se verá alterado por el bombeo, el conocimiento de las variaciones locales en el nivel y del nivel probable sin alteraciones en el momento del muestreo proporciona un contexto valioso para los datos de calidad del agua. El operador del pozo podría proporcionar dicha información. Cuando se toman muestras de manantiales, se debe estimar el caudal; los caudales muy elevados tras lluvias intensas pueden verse diluidos por la escorrentía local y la calidad no sería necesariamente representativa de la del acuífero.

Para tener la certeza de que la muestra es representativa del agua del acuífero, debe tomarse de un grifo de muestreo en la tubería ascendente lo más cerca posible de la cabeza de la bomba, en lugar de un tanque o grifo del sistema de distribución de agua. Llevar el agua subterránea desde las profundidades a las diferentes condiciones de presión, temperatura y oxígeno de la superficie puede alterar sus características, lo cual es una de las razones para medir los parámetros inestables in situ. En el caso de descargas bajas o intermitentes, la columna de agua estancada en el pozo debe eliminarse con la bomba antes de tomar la muestra; existen directrices sobre la estimación del volumen que debe eliminarse para asegurarse de extraer agua del acuífero en lugar de del pozo (ASTM, 2006). Esto también puede verificarse monitoreando la temperatura y la conductividad de la descarga hasta que una lectura estable represente el agua del acuífero.

GRUPOS DE PARÁMETROS PARA LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Para mantener la comparabilidad a nivel mundial en la presentación de informes sobre el indicador 6.3.2, los parámetros de nivel 1 propuestos para las aguas subterráneas son la conductividad eléctrica, el pH y los nitratos (Tabla 2), los cuales, junto con la temperatura, deben medirse sobre el terreno en el pozo, la perforación o el manantial. Estas características, fáciles de medir, 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 sobre la calidad de las aguas subterráneas, y la idoneidad de un pozo o manantial para el agua potable no puede basarse únicamente en una evaluación de Nivel 1.



Tabla 2. Grupos de parámetros para el monitoreo de la calidad de las aguas subterráneas (adaptado de IAH, 2017)

Parámetros		Comentarios y razón de la inclusión
Grupo de parámetros de nivel 1 para el agua subterránea		
para medición periódica en todas las situaciones; la frecuencia dependerá de las características de flujo del sistema de aguas subterráneas		
EC	conductividad eléctrica	Mida de la salinización y ayuda a caracterizar la masa de agua
pH	Acidez	Medida de la acidificación y ayuda a caracterizar la masa de agua subterránea
NO ₃	nitrato	Contaminante omnipresente, estable en condiciones oxídicas, motivo de preocupación para la salud en el consumo humano
Temperatura (T) Debe medirse y registrarse al mismo tiempo que los demás parámetros,		
Parámetros adicionales de los que podrían seleccionarse los destinados a la presentación de informes de nivel 2		
con menor frecuencia tras cambios marcados en los anteriores		
Ca, Mg, Na, K	Cationes principales	Ayudarán 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 principales	
TDS	sólidos totales disueltos	EC utilizado en el Nivel 1 como sustituto
Monitoreo microbiológico de las fuentes de agua potable		
fuentes designadas como de riesgo por la inspección sanitaria		
FC	coliformes fecales	Se requiere cierto control de las fuentes utilizadas habitualmente sin desinfección, pero la alta 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	Escherichia coli	
Parámetros adicionales		
requeridos en entornos hidrogeológicos específicos para los que podrían informarse en el Nivel 2		
F	Fluoruro	Esencial en algunas condiciones hidrogeológicas como indicador de variaciones en la calidad natural de las aguas subterráneas que afectan a la salud humana
Como	arsénico soluble	
U	uranio soluble	
NH ₄	amonio	Solo en condiciones fuertemente anóxicas/reductoras
Fe	hierro soluble	
Mn	manganeso soluble	
P	ortofosfato	Solo en acuíferos kársticos con intensas presiones agrícolas
Parámetros complementarios indicativos de contaminación		
en los que se han identificado presiones agrícolas, urbanas o industriales específicas		



pesticidas específicos	Cada parámetro requerirá protocolos de muestreo específicos aplicados por personal calificado, y análisis con límites de detección muy bajos en laboratorios con equipos costosos y personal especializado
compuestos orgánicos volátiles seleccionados	
hidrocarburos seleccionados	
metales pesados	
contaminantes emergentes	

De las fuentes de datos sugeridas para el Nivel 2 (Documento de Introducción, Figura 1), es probable que los parámetros químicos adicionales sean los indicadores más útiles de otras presiones sobre las aguas subterráneas, y también los que con mayor probabilidad estén disponibles en los programas nacionales de monitoreo. La Tabla 2 ofrece un enfoque jerárquico para la selección de grupos de parámetros, destinado a informar y respaldar el establecimiento de nuevos programas de monitoreo de aguas subterráneas o la ampliación de los programas existentes, y que también puede utilizarse para la presentación de informes de 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 contexto hidrogeológico (Tabla 2). Los iones principales suelen incluirse de forma rutinaria y pueden proporcionar indicios de la evolución de la calidad a lo largo del sistema de flujo de las aguas subterráneas, por ejemplo, cuando la interacción con acuíferos carbonatados aumenta la mineralización. La calidad microbiana se incluye en la Tabla 2 como recordatorio de que a menudo se trata de un requisito de monitoreo esencial relacionado con el consumo humano, aunque no para la calidad ambiental en el indicador 6.3.2 de los ODS. Las presiones sobre las aguas subterráneas pueden ser ya evidentes a partir del desarrollo agrícola, urbano o industrial establecido y de los programas de monitoreo existentes, o pueden identificarse en estudios preliminares. Esto significa que no existe una única respuesta «correcta» y universal en cuanto a la elección de los parámetros de monitoreo, pero 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 de campo; por ejemplo, las muestras para análisis de cationes y oligoelementos deben filtrarse y acidificarse, y almacenarse en contenedores apropiados que no afecten negativamente la calidad de la muestra (Misstear *et al.*, 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 flúor (Tabla 2). Los impactos en la salud pueden ser ya evidentes y es posible que se estén aplicando medidas de mitigación, como la eliminación del arsénico y el flúor de las aguas subterráneas extraídas. Se debe mantener el monitoreo de las aguas subterráneas para observar si hay tendencias en la calidad, teniendo en cuenta que la extracción de aguas subterráneas puede modificar las condiciones del subsuelo y favorecer la movilización de estos contaminantes. En los entornos hidrogeológicos donde estos parámetros son más propensos a ser problemáticos, como las grandes cuencas aluviales para el arsénico y los valles volcánicos y de rift, así como algunas zonas de sustrato cristalino para el flúor, se debe establecer un monitoreo si aún no existe.

ESTABLECIMIENTO DE OBJETIVOS PARA LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

La calidad ambiental de las aguas subterráneas puede variar considerablemente entre acuíferos, dependiendo de las condiciones hidrológicas e hidrogeológicas. Es probable que los acuíferos de regiones húmedas y templadas tengan una mineralización general baja, lo que se refleja en valores bajos de conductividad eléctrica (CE) ambiental, mientras que los de terrenos más áridos con menor recarga pueden presentar valores de CE hasta cuatro o cinco veces superiores. Las largas trayectorias de flujo en acuíferos profundos también tenderán a producir una mineralización elevada y valores de CE más altos. Por lo tanto, cabe esperar una variedad de valores de referencia para el estado ambiental, en los que los valores de CE más altos no representan necesariamente una contaminación de los recursos de aguas subterráneas.

El uso de los valores de referencia existentes para evaluar la calidad ambiental de las aguas subterráneas para el indicador 6.3.2 de los ODS puede no ser siempre adecuado. El enfoque para establecer metas consiste en determinar



valores derivados de la calidad de fondo o de referencia de las aguas subterráneas relevante a nivel local. Esto implica que, al menos en lo que respecta a la CE, las metas establecidas para los acuíferos o las masas de agua subterráneas pueden ser preferibles a las metas nacionales. Por otro lado, dado que el monitoreo y la presentación de informes sobre los nitratos están relacionados con posibles impactos en la salud humana, es probable que las metas nacionales sean adecuadas.

RESUMEN

Este documento ofrece orientación técnica específica sobre el monitoreo de la calidad ambiental de las aguas subterráneas en el contexto del indicador 6.3.2 de los ODS. Se explican los desafíos particulares del monitoreo de las aguas subterráneas. Se deben identificar los acuíferos y definir las masas de agua subterránea utilizando modelos hidrogeológicos conceptuales simples basados en los datos disponibles. Se analizan las ventajas y desventajas de utilizar pozos de abastecimiento existentes, nuevos pozos de monitoreo o manantiales para el muestreo de aguas subterráneas. Se puede utilizar un marco propuesto de grupos de parámetros para el monitoreo de las aguas subterráneas a fin de identificar posibles grupos de parámetros de nivel 2 y apoyar el establecimiento o la mejora del monitoreo nacional de la calidad de las aguas subterráneas.

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. Available at:
https://www.who.int/water_sanitation_health/resourcesquality/wqachapter9.pdf
- EC, 2004 Groundwater body characterisation. Technical Report No 2. Available at:
<https://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/groundwater/activities.htm>
- IAH, 2017 The UN-SDGs for 2030: Essential indicators for groundwater. Available at:
<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.
- Misstear 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.