

Perspectivas de calidad de agua en la presa de Alcolea (Huelva): un enfoque predictivo ante la contaminación por drenaje ácido de mina

Water quality outlook for the Alcolea Reservoir (Huelva): a predictive approach to acid mine drainage pollution

Jonatan Romero-Matos^{1*}, Gerardo A. Amaya-Yaeggy¹ y Laura Sánchez-López¹

¹ Departamento de Ciencias de la Tierra y Centro de Investigación en Recursos Minerales, Salud y Medio Ambiente (RENSMA). Universidad de Huelva, Campus "El Carmen" s/n, 21007, Huelva, España. jonatan.romero@dct.uhu.es, gerardo.amaya@dci.uhu.es, laura.sanchez@dct.uhu.es

*Corresponding author

ABSTRACT

Acid mine drainage (AMD) poses a grave threat to water resources in mining basins, such as the Odiel River basin (Huelva, Spain), where the Alcolea dam is planned. The present study evaluates the quality of the water that would be stored in the dam during a hydrological year (2023–2024), considering the severe impact of AMD on its main tributaries, the Odiel and Oraque. Continuous monitoring of water level and quality was carried out, with particular attention devoted to flood events, in order to estimate the flow-weighted monthly average concentration and acidity loads. The results indicate that, despite sporadic enhancements during floods, the pH remains acidic or slightly acidic (2–6) and metal concentrations exceed the limits established for agricultural and drinking water uses. Annual loads estimates account for 73598 t SO₄ and 7400 t of Al–Cu–Fe–Mn–Zn. The dam would receive a sulfate load roughly 2 times higher than that currently acidifying the Sancho reservoir, suggesting a high risk of acidification from the start of storing. A comparison with other reservoirs confirms the inadequacy of natural self-attenuation processes in this context. These findings call into question the feasibility of the dam upon the absence of a prior comprehensive restoration at a basin-scale.

Key-words: Annual loads, Acidification, Mine pollution, Restoration plan, Water resources.

RESUMEN

El drenaje ácido de mina (AMD) representa una grave amenaza para los recursos hídricos en cuencas mineras, como la del río Odiel (Huelva, España), donde se proyecta la presa de Alcolea. Este estudio evalúa la calidad del agua que embalsaría dicha presa durante un año hidrológico (2023–2024), considerando la severa afección por AMD de sus principales afluentes: Odiel y Oraque. Se realizó un monitoreo continuo del nivel y la calidad del agua, con especial atención a eventos de avenida, para estimar la concentración media mensual y cargas de acidez. Los resultados muestran que, aunque se registran mejoras puntuales durante crecidas, el pH se mantiene ácido o ligeramente ácido (2–6) y las concentraciones de metales exceden los límites para usos agrícolas y potables. Se estimaron cargas anuales de 73598 t de SO₄ y 7400 t de Al–Cu–Fe–Mn–Zn. La presa recibiría una carga de sulfatos casi 2 veces superior a la que actualmente acidifica el embalse del Sancho, lo que sugiere un riesgo de acidificación desde el inicio del llenado. La comparación con otros embalses confirma la insuficiencia de procesos naturales de autodepuración en este contexto. Esto pone en duda la viabilidad de la presa sin una restauración previa integral a nivel de cuenca.

Palabras clave: Cargas anuales, Acidificación, Contaminación minera, Plan de restauración, Recursos hídricos.

Geogaceta, 79 (2026), 71–14

<https://doi.org/10.55407/geogaceta117274>

ISSN (versión impresa): 0213–683X

ISSN (Internet): 2173–6545

Fecha de recepción: 18/07/2025

Fecha de revisión: 24/10/2025

Fecha de aceptación: 28/11/2025

Introducción

El drenaje ácido de minas (AMD) se considera actualmente una de las problemáticas medioambientales más severas que afectan a los cuerpos de agua en todo el mundo, ya que empeora la calidad del agua y restringe directamente el desarrollo en zonas circundantes, tanto a nivel social como económico. La liberación de acidez y metales, su transporte y la longevidad de los procesos de AMD representan una fuente importante de contaminación, cuyo tratamiento y posible solución han sido objeto de numerosas investigaciones en los últimos años

(Olías *et al.*, 2023). La gestión de los recursos hídricos en las cuencas afectadas por AMD debe caracterizar y mejorar la calidad del agua ante las crecientes presiones sociales, que exigen una mayor disponibilidad de agua.

La cuenca del río Odiel es un ejemplo destacado a nivel mundial de una red fluvial gravemente afectada por AMD (e.g. Olías *et al.*, 2023), donde se pretende construir la presa de Alcolea, localizada en la parte baja de la cuenca y que recibiría los aportes de sus dos mayores afluentes, el río Odiel y el río Oraque (Romero-Matos *et al.*, 2023) (Fig. 1). Las obras se encuentran actualmente paralizadas por

problemas con la constructora que las inició y serias dudas sobre la calidad del agua final que albergaría la presa (Olías *et al.*, 2022; Olías *et al.*, 2023), dada la intensa contaminación ácida y metálica de sus dos principales tributarios. Pese a ello, y previo a la adopción integral de medidas de restauración que mitiguen la contaminación minera a nivel de cuenca (Remesal, 2024), la presión política y social, ante la necesidad de recursos hídricos, ha concluido en un acuerdo para retomar la construcción de manera inminente sin resolver la incógnita sobre la calidad del agua embalsada (más información sobre contexto actual en: Morente, 2025).



Fig. 1. Contexto geográfico de la presa de Alcolea (Huelva, España). Niveles de afectación de ríos y minas generadoras de AMD. Ver figura en color en versión web.

Fig. 1.- Geographical context of the Alcolea reservoir (Huelva, Spain). AMD pollution on rivers and mine sources. See color figure in web version.

El objetivo de este trabajo es predecir la calidad del agua que embalsaría la presa de Alcolea durante un año hidrológico completo, atendiendo a las fuertes variaciones estacionales tanto hidroquímicas como hidrológicas, y registrando momentos de avenida, en los que se presupone que se embalsaría la mayor cantidad de agua. De esta manera, se podría evaluar, al menos para el año hidrológico registrado, las condiciones a las que se vería enfrentada la presa si no se toman medidas de restauración previas al comienzo de retención de agua en el embalse.

Metodología

Durante el año hidrológico 2023–2024 (octubre a septiembre), se llevó a cabo una campaña de muestreo en los ríos Odiel y Oraque, con dos puntos establecidos aguas abajo de fuentes AMD, previsiblemente ubicados en las futuras colas de la presa (Odiel: 29S 682355 -5848161; Oraque: 29S 677804 -5844176) (Fig. 1). El objetivo fue evaluar la influencia de la contaminación minera y sus variaciones estacionales.

Se emplearon dos automuestreadores Teledyne ISCO (24 botellas), programados según predicciones meteorológicas para incrementar la frecuencia de muestreo durante eventos de lluvia. Estos se integraron con sensores de nivel de agua en continuo. En todas las muestras

se midieron pH y conductividad eléctrica (CE, en mS/cm) (n=1365), con excepciones debido a fallos técnicos o vandalismo. Se tomaron muestras de agua (fracción filtrada-disuelta) al detectarse cambios significativos de CE ($\geq 0,2$ mS/cm) (n=322) y se analizaron elementos mayoritarios mediante ICP-OES. Además, se realizaron aforos en una sección del Odiel bajo diferentes condiciones hidrológicas para construir su curva de gastos, basada en la correlación con los datos de nivel en continuo. La curva de gastos del Oraque se estimó a partir de la relación entre las áreas de cuenca de drenaje (Odiel: 1.050 km²; Oraque: 574 km²), calibrándola en momentos de respuesta hidrológica similar entre ambos ríos.

Se calcula el caudal y las cargas metálicas, estimando la concentración media mensual ponderada al caudal según Olías *et al.* (2006). Así se obtiene una media más fiel de la calidad del agua embalsada cada mes, dando mayor peso a los momentos de avenida, cuando la presa acumula más agua. Este método mejora la resolución comparado con estudios anteriores, que no consideran esas avenidas. Además, dichos estudios suelen enfocarse solo en el río Odiel o analizan aguas abajo en Gibraleón—con menor nivel de contaminación—ignorando así el aporte del Oraque y las zonas más cercanas a los focos de AMD.

Resultados y discusión

Condiciones hidrológicas

Tomando como referencia la estación pluviométrica de El Campillo, próxima a Riotinto (Fig. 1), y sus datos históricos, durante el año hidrológico 2023-24 se registró una precipitación anual de 800 mm por encima del percentil medio his-

tórico de la estación (*i.e.* 729 mm), tratándose de un año relativamente húmedo o sobre la media. Los patrones de lluvia se caracterizaron por tormentas severas producidas en un corto periodo de tiempo, con respectivas crecidas en los ríos, seguidas de periodos más o menos largos sin lluvia, típicos del clima Mediterráneo, y que cada vez se acentúan más probablemente debido al cambio climático (Cramer *et al.*, 2018).

El caudal responde rápidamente ante los eventos de lluvia, creciendo exponencialmente por encima de 5-10 m³/s (hasta máx. de 345 m³/s en Odiel y 114 m³/s en Oraque a finales de Marzo-2024) (Fig. 2). Valores menores se corresponderían con condiciones de flujo base del río. Durante el verano, a partir de Junio, el caudal comienza a decaer progresivamente hasta el estancamiento o sequía del lecho.

Evaluación de la calidad del agua

Durante los eventos pluviométricos, los parámetros fisicoquímicos muestran una respuesta inmediata: aumentos de pH y descensos de CE (Fig. 2), reflejando procesos de dilución y neutralización de la acidez por efecto de las aguas no afectadas de lluvia y escorrentía (Olías *et al.*, 2023). La magnitud de estos procesos se incrementa con la intensidad de la precipitación, especialmente entre enero y abril. No obstante, entre octubre y diciembre se observa una alteración de esta tendencia, atribuida al lavado de sales evaporíticas acumuladas durante el verano y a la reactivación de la oxidación de sulfuros (Olías *et al.*, 2023), lo que genera plumas importantes de contaminación. Estas se manifiestan como descensos de pH y aumentos de CE, como en octubre, cuando se registraron valores mínimos de pH de 2,58, máximos de CE

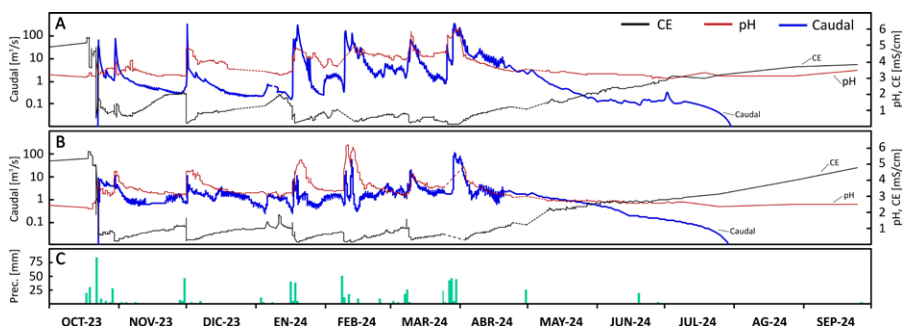


Fig. 2.- A) Evolución hidroquímica-caudal del río Odiel. B) Evolución hidroquímica-caudal del río Oraque. C) Precipitaciones (El Campillo). CE: Conductividad eléctrica. Ver figura en color en versión web.

Fig. 1.- A) Hydrochemical evolution-flow of the Odiel River. B) Hydrochemical evolution-flow of the Oraque River. C) Rainfalls (El Campillo). CE: Electrical conductivity. See color figure in web version.

de 5,06 mS/cm y un caudal de 14,7 m³/s en el Odiel.

En general, las mejores condiciones de calidad del agua se observan durante las avenidas, aunque el pH no supera valores de 6 (habitualmente entre 3 y 5), manteniéndose ácido o ligeramente ácido incluso en los máximos de caudal. La baja CE en estos momentos (entre 1 y 0,15 mS/cm) se debe a la dilución en las concentraciones de metales disueltos, aunque se requiere un análisis específico para confirmar si dichas condiciones son aptas para el agua embalsada.

Para ello, se han representado todos los datos de concentración de metales recogidos durante el año hidrológico (n=322) en un diagrama tipo Ficklin (Ficklin *et al.*, 1992) y se han establecido campos de calidad de agua según recomendaciones de entidades (Fig. 3) (FAO: Ayers y Westcot, 1985; WHO: World Health Organization, 2022). Además, se han representado valores medios de embalses de la zona, tanto afectados por AMD (Sancho, Olivargas y Andévalo) como no afectados (Jarrama y Corumbel) (Olías *et al.*, 2022). Se han representado en conjunto los elementos mayoritarios del AMD (i.e. Al, Cu, Fe, Mn y Zn). Para los datos recogidos (estiaje, avenidas, caudal base, etc.) se observa tendencia hacia la mejoría, principalmente asociadas a procesos de dilución y neutralización durante períodos de caudal alto (Fig. 2). No obstante, la calidad del agua registrada no cumplió en ningún momento con la normativa para aguas de riego (FAO) y potable (WHO) (Fig. 2).

Además, la rama del Odiel presenta mayores concentraciones metálicas que la del Oraque, aunque igualmente significativas, y esta última tendría valores de pH más bajos. Lo primero se debe a la gran influencia del río Agrío, que drena el complejo minero de Riotinto (Fig. 1), sobre la subcuenca del Odiel, siendo el principal aporte AMD a nivel de cuenca (Romero-Matos *et al.*, 2023). Lo segundo se explica fácilmente por la cercanía de la rama del Oraque en la presa a minas de Tharsis (Fig. 1), que a través de la riera Aguas Agrías, aportaría aguas ácidas con poca posibilidad de ser neutralizadas, o aumentar el pH, dada la estrecha distancia entre ese foco y el punto de muestreo del Oraque (Romero-Matos *et al.*, 2023), y los limitados aportes de aguas limpias en ese tramo, a diferencia del punto del Odiel más alejado de las fuentes AMD, y que aún así presenta un pH muy ácido y elevadas concentraciones.

Comparativamente, los valores medios de otros embalses son adecuados para la gestión de sus aguas, incluso dos de los que están afectados por AMD (i.e. Andévalo y Olivargas). No obstante, el embalse del Sancho presenta un pH ácido con un valor medio de 3,5 y concentraciones metálicas más altas que otros embalses. Esto se debe a que recibe una carga contaminante de las minas de Tharsis, a través de la riera del Meca (Fig. 1), mucho mayor que las recibidas por Andévalo y Olivargas (Olías *et al.*, 2022). El embalse del Sancho ha sufrido una acidificación progresiva a lo largo de los años (Cánovas *et al.*, 2016) y puede servir de referencia para conocer qué le ocurrirá a la presa de Alcolea.

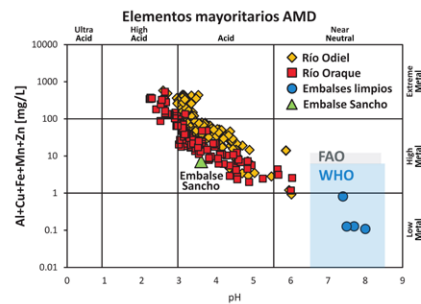


Fig. 3.- Diagrama Ficklin donde se representan las muestras de agua recogidas en Odiel y Oraque, y otros embalses de la zona. Los campos sombreados representan una calidad de agua adecuada para riego (FAO) y uso urbano (WHO). Ver figura en color en versión web.

Fig. 3- Ficklin diagram showing water samples collected in Odiel and Oraque, and other reservoirs in the area. The shaded fields represent water quality suitable for irrigation (FAO) and urban use (WHO). See the color figure in web version.

Transporte de contaminantes hacia la presa

En este sentido, una comparación entre las cargas estimadas de los ríos Odiel y Oraque, y cargas estimadas en otros estudios para la riera del Meca, permitiría conocer si las condiciones resultantes del año hidrológico serían peores o mejores que las presentes en el Sancho actualmente.

La figura 4 muestra el caudal mensual de ambos ríos, y las cargas disueltas mensuales de sulfato y elementos principales del AMD. Se ha estimado una carga anual de 56901 t de SO₄ y 5717 t de AMD transportadas por el río Odiel; y 16697 t de SO₄ y 1682 t de AMD transportadas por el río Oraque. Es evidente que la rama del Odiel descargaría la mayor parte de la contaminación sobre la presa, pero los

valores del Oraque siguen siendo muy significativos. Hay que destacar las altas cargas registradas durante los meses de otoño (30-40% del total anual) aún cuando el caudal era menor o similar a otros meses más húmedos, lo que evidencia el proceso de lavado de sales comentado previamente. Además, destacan los meses de Enero y Abril, donde se transportó la mayor cantidad de acidez y metales, sobreponiéndose el transporte a procesos de dilución y neutralización que pudieran ocurrir como producto de la mezcla con aguas no afectadas.

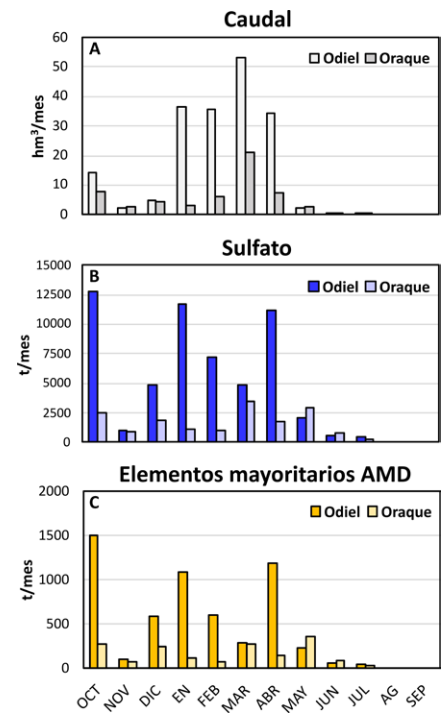


Fig. 4.- Caudal y cargas mensuales de los ríos Odiel y Oraque. A) Caudal. B) Cargas de sulfato. C) Cargas de elementos mayoritarios AMD (i.e. Al, Cu, Fe, Mn y Zn). Ver figura en color en versión web.

Fig. 4- Streamflow and monthly loads of the Odiel and Oraque rivers. A) Flow rate. B) Sulfate loads. C) AMD major elements loads (i.e. Al, Cu, Fe, Mn and Zn). See color figure in web version.

Galván *et al.* (2009) estimó que la riera del Meca aporta anualmente una media 8024t de SO₄ al embalse del Sancho, mientras que Cánovas *et al.* (2017) calculó 9173t durante el año hidrológico 2012–2013. Sin embargo, estas cifras representan menos del 15% de la carga total de SO₄ transportada por los ríos Odiel y Oraque. Esta diferencia se debe tanto al menor caudal del Meca como al menor grado de afección por drenaje ácido de mina (AMD) en su cuenca, que solo drena parcialmente las minas de Tharsis, en contraste con las subcuencas del Odiel y Oraque, que presentan múltiples fuentes de contaminación.

Por otro lado, Olías *et al.* (2022) estimó una aportación media anual al embalse del Sancho de 5635t de SO₄, con una media de 32hm³ de entrada anual, lo que representa 176t SO₄/hm³. En contraste, este estudio calcula una aportación anual significativamente mayor: 240hm³ entre ambas ramas de la presa de Alcolea, lo que equivale a 307t SO₄/hm³ durante un año hidrológico relativamente húmedo. Esto implica que la presa de Alcolea habría recibido casi 2 veces más acidez que el embalse del Sancho.

Estos resultados indican que los posibles mecanismos de autodepuración en Alcolea (como dilución, precipitación o estratificación) no serían suficientes para mantener una calidad de agua aceptable a largo plazo. Mientras que la acidificación del Sancho pudo ser progresiva debido a condiciones iniciales más favorables (Cánovas *et al.*, 2016), en Alcolea se esperaría una acidificación más rápida e intensa, o incluso la retención directa de agua de mala calidad. Además, se subraya la necesidad de considerar la presencia y comportamiento de otros elementos potencialmente tóxicos (e.g. Ni, Co, As, Cd, Pb, Cr...) en las aguas de los ríos Odiel y Oraque.

Conclusiones

Los resultados obtenidos durante la campaña de monitoreo del año hidrológico 2023-2024 en los ríos Odiel y Oraque revelan con claridad que, en ausencia de medidas previas de restauración ambiental, la calidad del agua que embalsaría la futura presa de Alcolea sería crítica y no apta para ningún uso previsto, como el riego o el abastecimiento humano. A pesar de tratarse de un año hidrológico húmedo, las condiciones fisicoquímicas del agua no alcanzaron en ningún momento los umbrales mínimos establecidos por organismos como la FAO y la WHO. Incluso durante los periodos de mayor caudal—donde se observaron procesos de dilución y neutralización del drenaje ácido—el pH no superó el valor de 6 y las concentraciones de metales permanecieron por encima de los límites normativos.

Las cargas anuales estimadas de contaminantes refuerzan este diagnóstico,

representando una carga global de contaminación 2 veces superior a la que actualmente recibe el embalse del Sancho, ya acidificado, lo que permite prever un escenario aún más severo para la presa de Alcolea. Asimismo, se ha comprobado que las mayores cargas contaminantes se concentran en los meses de otoño e invierno, coincidiendo con el inicio del periodo de retención de agua que naturalmente tendría lugar en la presa. Esto implica que el volumen embalsado inicial, crucial para la evolución química del sistema, estaría ya altamente contaminado desde el primer momento.

En conclusión, de no implementarse medidas integrales de restauración a escala de cuenca antes del inicio de la retención de agua, la presa de Alcolea podría embalsar un recurso de calidad extremadamente baja, generando un pasivo ambiental de gran envergadura.

Contribución de los autores

Romero-Matos, J.: Estructura del trabajo, metodología, análisis, figuras. **Sánchez-López, L.:** Metodología, análisis, revisión. **Amaya-Yaeggy, G.A.:** Metodología, análisis, revisión.

Agradecimientos

El trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades español a través del proyecto DYNAMICO (PID2023-151504OB-I00) financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033. L. Sánchez-López agradece el contrato «Formación de Personal Investigador» (PRE2021-097651) financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033. J. Romero-Matos agradece el contrato FPU (FPU20/04441) del Ministerio de Educación y Formación Profesional español. Agradecemos al editor Dr. Károly Hidas y a dos revisores anónimos por sus comentarios y recomendaciones.

Referencias

Olías, M., Cánovas, C. R., Basallote, M. D., Macías, F., Nieto, J. M., Pérez-López, R. y Sarmiento, A. (2023). *El problema del*

drenaje ácido de minas en la faja pirítica Ibérica: Diagnóstico y medidas de tratamiento. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Huelva. 220 p.

Romero-Matos, J., Macías, F., Olías, M., Basallote, M. D., Millán-Becerro, R. y Nieto, J. M. (2023). *Geogaceta*, 73, 27-30.

<https://doi.org/mdh9>

Olías, M., Cánovas, C. R., González, R. M., Macías, F., y Nieto, J. M. (2022). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 35(2), 28-40. <https://doi.org/md9r>

Morente, A. (2025). Luz verde a la presa de Alcolea, paralizada por el temor a aguas tóxicas: la acabará el Gobierno andaluz y el Estado compensará. En *el-diario.es*.

Olías, M., Cánovas, C. R., Nieto, J. M. y Sarmiento, A. M. (2006). *Applied Geochemistry*, 21(10), 1733-1749.

<https://doi.org/chjt5n>

Cramer, W., Guiot, J., Fader, M. et al. (2018). *Nature climate change*, 8(11), 972-980. <https://doi.org/gffhrg>

Ficklin, W. H., Plumlee, G. S., Smith, K. S. y McHugh, J. B. (1992). En: *International symposium on water-rock interaction*. Proceedings, 381-384.

Cánovas, C. R., Olías, M., Macías, F., Torres, E., San Miguel, E. G., Galván, L., Ayora, C. y Nieto, J. M. (2016). *Science of the Total Environment*, 541, 400-411.

<https://doi.org/gf2433>

Cánovas, C. R., Macías, F., Olías, M., Pérez-López, R. y Nieto, J. M. (2017). *Journal of Hydrology*, 550, 590-602.

<https://doi.org/gbnm79>

Galván, L., Olías, M., de Villarán, R. F., Santos, J. D., Nieto, J. M., Sarmiento, A. M. y Cánovas, C. R. (2009). *Journal of Hydrology*, 377(3-4), 445-454.

<https://doi.org/bc6b43>

Remesal, J.A. (2024). En: *XIII Spanish Dams Conference*. Proceedings, B.1. Environmental and social aspects of dams and reservoirs.

Ayers, R. S. y Westcot, D. W. (1985). *Water quality for agriculture*. Food and agriculture organization of the United Nations.

World Health Organization (2022). *Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first and second addenda*. Geneva: World Health Organization.