



Universidad de Concepción

ECOSISTEMAS DEPENDIENTES DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN AMBIENTES SEMIÁRIDOS

Longel Durán Llacer / Lien Rodríguez López / José Luis Arumí
Rebeca Martínez Retureta / Roberto Urrutia



Serie Comunicacional CRHIAM

SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

Versión impresa ISSN 0718-6460

Versión en línea ISSN 0719-3009

Directora:

Gladys Vidal Sáez

Comité editorial:

Sujey Hormazábal Méndez

María Belén Bascur Ruiz

Serie:

Ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas
en ambientes semiáridos.

Longel Durán Llacer, Lien Rodríguez López, José Luis Arumí,
Rebeca Martínez Retureta y Roberto Urrutia.

Noviembre 2023.

Agradecimientos:

Centro de Recursos Hídricos
para la Agricultura y la Minería
(CRHIAM)

ANID/FONDAP/15130015

Victoria 1295, Barrio Universitario,
Concepción, Chile

Teléfono +56-41-2661570

www.crhiam.cl



Universidad de Concepción

ECOSISTEMAS DEPENDIENTES DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN AMBIENTES SEMIÁRIDOS

Ionel Durán Llacer / Lien Rodríguez López / José Luis Arumí
Rebeca Martínez Retureta / Roberto Urrutia

SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

PRESENTACIÓN

El Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería -Centro Fondap CRHIAM- está trabajando en el tema de "Seguridad Hídrica", entendida como la "capacidad de una población para resguardar el acceso sostenible a cantidades adecuadas de agua de calidad aceptable para el sustento, bienestar y desarrollo socioeconómico sostenibles; para asegurar la protección contra la contaminación transmitida por el agua y los desastres relacionados con ella, y para preservar los ecosistemas, en un clima de paz y estabilidad política" (ONU-Agua, 2013).

La "Serie Comunicacional CRHIAM" tiene como objetivo potenciar temas desde una mirada interdisciplinaria, con la finalidad de difundirlos a los tomadores de decisiones públicos, privados y a la comunidad general. Estos textos surgen como un espacio de colaboración colectiva entre diversos investigadores ligados al CRHIAM como un medio para informar y transmitir las evidencias de la investigación relacionada a la gestión del recurso hídrico.

Con palabras sencillas, esta serie busca ser un relato entendible por todos y todas, en el que se exponen los estudios, conocimiento y experiencias más recientes para aportar a la seguridad hídrica de los ecosistemas, comunidades y sectores productivos. Agradecemos el esfuerzo realizado por nuestras y nuestros investigadores, quienes han trabajado de forma mancomunada y han puesto al servicio de la comunidad sus investigaciones para aportar de forma activa en la búsqueda de soluciones para contribuir a la generación de una política hídrica acorde a las necesidades del país.

Dra. Gladys Vidal
Directora de CRHIAM

DATOS DE INVESTIGADORES



Jongel Durán Llacer

Geógrafo.
Diplomado en Geografía, Medio Ambiente y
Ordenamiento Territorial, Universidad de La Habana, Cuba.
Doctor en Ciencias Ambientales,
Universidad de Concepción.
Investigador Postdoctoral asociado al centro Hémera
"Centro de Observación de la Tierra", Universidad Mayor.



Lien Rodríguez López

Ingeniera Informática.
Máster en Bioinformática y Biología Computacional.
Doctora en Ciencias Ambientales.
Profesora Asistente, Investigadora
Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño,
Universidad San Sebastián.
Colaboradora CRHIAM.



José Luis Arumí

Ingeniero Civil.
Doctor of Philosophy, Major on Engineering.
Profesor Titular Facultad de Ingeniería Agrícola,
Universidad de Concepción.
Investigador Principal CRHIAM.



Rebeca Martínez Retureta

Geógrafo.
Universidad de La Habana, Cuba.
Doctora en Ciencias Ambientales,
Universidad de Concepción.
Investigador Postdoctoral Universidad de La Frontera.



Roberto Urrutia

Biólogo.
Doctor en Ciencias Ambientales,
Universidad de Concepción.
Profesor Titular Facultad de Ciencias Ambientales
Universidad de Concepción.
Investigador Principal CRHIAM.

RESUMEN

El agua subterránea es el principal recurso hídrico en regiones áridas y semiáridas. Su uso se ha intensificado actualmente, por lo que existe un riesgo creciente de agotamiento a nivel mundial. El agua subterránea juega un papel crucial en el mantenimiento de ciertos tipos de ecosistemas acuáticos, terrestres y costeros, particularmente en aquellos conocidos como Ecosistemas Dependientes de las Aguas Subterráneas (EDAS). Estos ecosistemas pueden verse afectados por este descenso significativo, lo que indica la necesidad de estudiar a profundidad la interacción existente entre las aguas subterráneas y los ecosistemas que sustenta. Además, los principales esfuerzos de protección de los recursos hídricos subterráneos se concentran para el uso humano, pero referidos a los EDAS es muy limitado. Por ende, en la presente Serie Comunicacional se introduce al estudio de los ecosistemas dependientes, su conceptualización y la necesidad de conservación y protección. Se proponen medidas de gestión sostenible, se mencionan métodos para su correcta ubicación geográfica o mapeo y, finalmente, se muestra un estudio de caso en el centro Chile. Este tema se desarrollará con el objetivo de sentar las bases sobre el estudio de los EDAS, ya que estos ecosistemas de gran biodiversidad han sido muy poco estudiados en Chile, y es crucial investigarlos y protegerlos.

INTRODUCCIÓN

El agua subterránea es un recurso muy valioso ya que representa el 96% del agua dulce no congelada del planeta y representa una fuente esencial de agua para el consumo humano, las actividades agrícolas e industriales y los ecosistemas (Duran-Llacer *et al.*, 2022; El-Hokayem, De Vita, Usman *et al.*, 2023a; Hosseini *et al.*, 2019). En regiones áridas y semiáridas representa la principal fuente de agua y se estima que existe un agotamiento en muchas regiones del mundo, dado principalmente por el incremento del riego agrícola (Arshad *et al.*, 2022). Este recurso tan valioso juega un papel crucial en el mantenimiento de ciertos tipos de ecosistemas acuáticos, terrestres y costeros, así como en sus paisajes asociados (Howard & Merrifield, 2010; Rohde *et al.*, 2019). Proporciona un aporte que mantiene el nivel del agua y los parámetros necesarios para la biodiversidad que sustenta, por lo que conserva la integridad ecológica de muchos ecosistemas que dependen estrictamente de este recurso, en particular aquellos conocidos como Ecosistemas Dependientes de las Aguas Subterráneas (Duran-Llacer *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2021).

¿QUÉ SON LOS ECOSISTEMAS DEPENDIENTE DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS?

Para los Ecosistemas Dependientes (EDAS) la presencia o el soporte de las aguas subterráneas es indispensable para mantener su composición, estructura y función ecológica (Eamus *et al.*, 2016). Esto puede ser de forma permanente o temporal, siempre que le permita mantener su flora y fauna, procesos y servicios ecosistémicos (Doody *et al.*, 2017; Fildes *et al.*, 2023). Estos ecosistemas brindan una gran biodiversidad, contribuyen a la filtración y mitigación de inundaciones, regulan el clima, constituyen hábitat para diferentes especies, previenen la erosión y representan una fuente de producción de alimentos, recreación y turismo, etc. (Doody *et al.*, 2017; Link *et al.*, 2023). Se dividen básicamente en ecosistemas terrestres y acuáticos, incluyendo ríos, lagos, bosques y matorrales, humedales, praderas naturales, vegetación ribereña, así como ecosistemas estuarinos y costeros (Duran-Llacer *et al.*, 2022). Ver Figura 1.

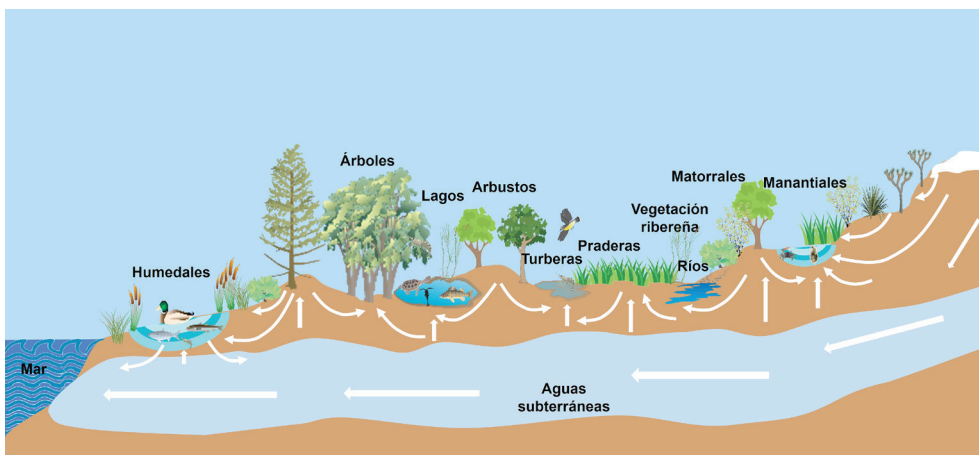


Figura 1.

Esquema conceptual de los Ecosistemas Dependientes de las Aguas Subterráneas en regiones semiáridas. Fuente: Elaboración propia.

TIPOS DE ECOSISTEMAS DEPENDIENTES DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Existen otras clasificaciones de los EDAS según diferentes autores. La más común los clasifica en tres grupos, que se mencionan a continuación:

Grupo 1: Ecosistemas de acuíferos subterráneos y de cuevas donde reside la estigofauna (Figura 2).

Es importante conceptualizar que los acuíferos son aquella capa o secuencia de rocas, que comprende una o más formaciones geológicas, y son capaces de almacenar y transmitir el agua subterránea. Por otra parte, la estigofauna, son las especies adaptadas a vivir en aguas subterráneas, ya sea en cuevas, fisuras y cavidades (Eamus & Froend, 2006; Klausmeyer et al., 2019).

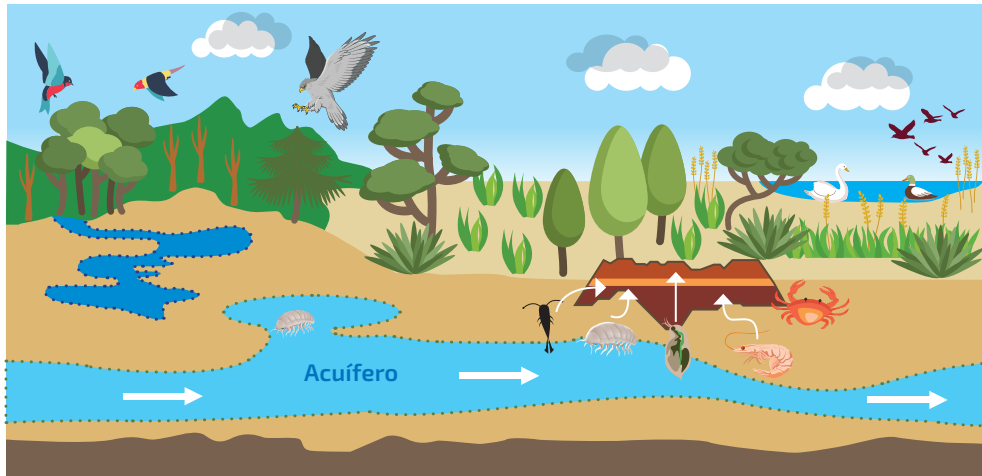


Figura 2.

Esquema conceptual de Ecosistemas Dependientes de las Aguas Subterráneas, específicamente de los clasificados como acuíferos y cuevas (Grupo 1). Fuente: Elaboración propia.

Grupo 2: Aquellos ecosistemas que dependen del aporte en superficie del agua subterránea, incluidos los manantiales, los humedales, esteros y los ríos de flujo base, cuyo flujo aumenta con el agua subterránea (Eamus *et al.*, 2016; Link *et al.*, 2023) (Ver Figura 1).

En el caso de los ríos de flujo base o de descarga de aguas subterráneas, se evidencia la interacción entre las aguas subterráneas y las aguas superficiales, así como la dependencia de este ecosistema y otros presentes en las inmediaciones del río (Figura 3). Esta dependencia relacionada con los procesos de recarga y descarga de las aguas subterráneas varía estacionalmente (Arumí *et al.*, 2012). En verano el río recibe aguas por exfiltración desde el sistema de aguas subterráneas (Figura 3a), mientras en invierno, el río puede recargar el sistema de aguas subterráneas al cual está conectado (Figura 3b) o perder agua por infiltración hacia un sistema de aguas subterráneas al cual no está conectado (Figura 3c).

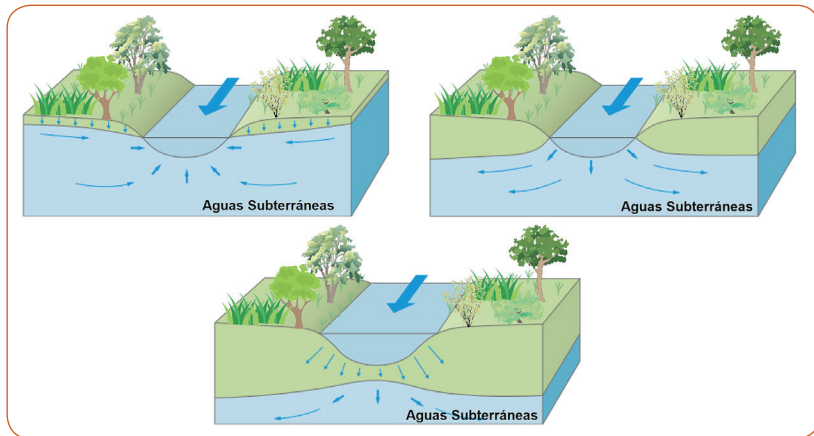


Figura 3.

Interacción entre las aguas subterráneas – aguas superficiales – ecosistemas dependientes. Fuente: Elaboración propia a partir de Arumí *et al.*, (2012).

Grupo 3: Ecosistemas que dependen del aporte sub-superficial del agua subterránea, como los ecosistemas de vegetación terrestre, por ejemplo, las freatófitas, que son aquellas plantas que reciben una porción importante del agua necesaria para vivir de las aguas subterráneas dentro de la profundidad de sus raíces (Eamus *et al.*, 2016; Klausmeyer *et al.*, 2019; Link *et al.*, 2023) (Figura 4).

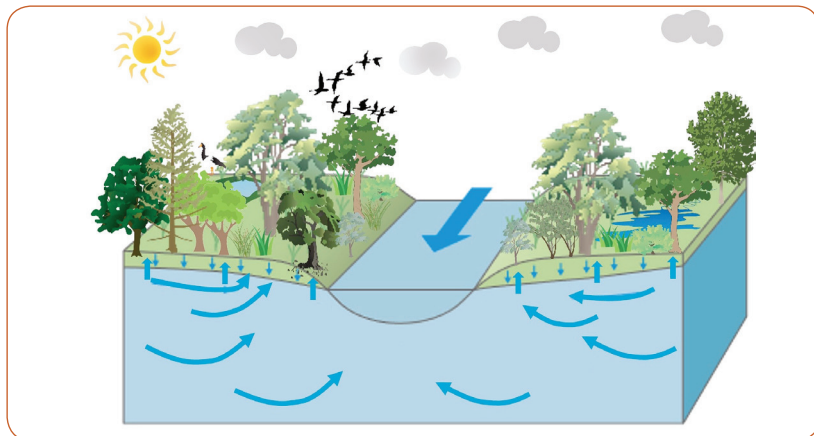


Figura 4.

Esquema conceptual de Ecosistemas Dependientes de las Aguas Subterráneas, específicamente de los clasificados como ecosistemas de vegetación terrestre (Grupo 3). Fuente: Elaboración propia.

Otra clasificación propone cuatro tipos de EDAS basado en el entorno geográfico (Dresel *et al.*, 2010).

Grupo 1: Ecosistemas de vegetación terrestre. Estos representan aquellas comunidades de vegetación y fauna que presentan cierta dependencia estacional o periódica a las aguas subterráneas.

Grupo 2: Los sistemas de flujo base o de descarga a ríos. Representan aquellos ecosistemas acuáticos y ribereños que se alimentan del flujo base o aporte del agua subterránea.

Grupo 3: Ecosistemas de acuíferos y cuevas. Son ecosistemas acuáticos que ocupan cuevas o acuíferos.

Grupo 4: Humedales. Este tipo se caracteriza por aquellas comunidades acuáticas y de vegetación que dependen de los lagos y los humedales alimentados por las aguas subterráneas.

GESTIÓN SOSTENIBLE DE LOS ECOSISTEMAS DEPENDIENTES DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Las extracciones de agua subterránea están provocando un descenso del nivel freático e incluso un agotamiento global bien marcado debido a la falta de gestión sostenible (Duran-Llacer *et al.*, 2020; Hosseini *et al.*, 2019). Esta problemática puede traer una menor descarga de las aguas subterráneas a los EDAS, y por tanto, una alteración en su estructura y funcionamiento, así como una pérdida de su valor ecológico y socioeconómico (Doody *et al.*, 2017; Eamus *et al.*, 2015). En algunas partes del mundo ya se han superado los límites ecológicos del bombeo de agua subterránea (Link *et al.*, 2023). Debido a la gran amenaza a que están siendo sometidos los EDAS, se están dando algunas iniciativas de gestión hídrica, por ejemplo, en Australia, Sudáfrica y los EE.UU. (Rohde *et al.*, 2017) No obstante, los principales esfuerzos de conservación y gestión se centran en la protección de las aguas subterráneas para el uso humano, pero el enfoque en los EDAS es aún limitado (Duran-Llacer *et al.*, 2022; Kløve *et al.*, 2014).

Es necesario comprender mejor la estrecha relación entre las aguas subterráneas y los ecosistemas que sustentan como indicador esencial para vincular las necesidades hídricas humanas y ecológicas. Estas necesidades

aparecen como usos diferentes, pero deben abordarse de manera integrada y multidisciplinaria (Kløve *et al.*, 2014; Zurek *et al.*, 2015). Por lo tanto, se necesitan enfoques prácticos que garanticen un monitoreo eficiente para proteger los EDAS (Rohde *et al.*, 2017). A continuación, se proponen algunas medidas como propuestas para lograr una adecuada gestión sostenible de estos importantes ecosistemas:

1. Mapeo y monitoreo de los EDAS, así como de las aguas subterráneas.
2. Implementar leyes mundiales y nacionales para la protección de los EDAS y definir escalas de gestión sustentable (Erostate *et al.*, 2020).
3. Establecer un marco institucional para la gestión integrada de cuencas hidrográficas.
4. Priorizar aquellos ecosistemas de mayor valor ecológico y establecer un marco regulatorio que evite extracciones cercanas de las aguas subterráneas (Dabovic *et al.*, 2019).
5. Mejorar los sistemas de riego para lograr una mayor eficiencia en el uso del agua subterránea y disminuir su extracción.
6. Implementar medidas de restauración ecológica.
7. Realizar investigaciones interdisciplinarias que determinen la vulnerabilidad de los EDAS ante los cambios climáticos y antrópicos.
8. Desarrollar talleres de educación ambiental para garantizar una conciencia ciudadana en relación con la protección de estos ecosistemas.
9. Diseñar plataformas interactivas para su monitoreo espacial y temporal.
10. Confeccionar y poner a disposición pública, infraestructuras geoespaciales de este tipo de ecosistemas a nivel mundial y nacional (Duran-Llacer, 2021).
11. Mejorar el conocimiento científico sobre los EDAS.
12. Crear vínculos científicos y académicos con agricultores, tomadores de decisiones, usuarios de aguas, organizaciones ambientales, gobierno y diferentes organismos locales para desarrollar planes de gestión que permitan el uso sostenible de las aguas subterráneas.

Estas medidas son hitos para la gestión sostenible de los EDAS, pero para garantizar el real grado de dependencia del agua subterránea, su respuesta ecológica al cambio y lograr una gestión eficaz, se hace imprescindible primeramente determinar su ubicación exacta y extensión.

MÉTODOS PARA LA UBICACIÓN O MAPEO DE LOS ECOSISTEMAS DEPENDIENTES DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Identificar los EDAS es el primer paso para lograr su protección y, desde el 2010, se vienen realizando estudios con diferentes aproximaciones para mapearlos o cartografiarlos (Howard & Merrifield, 2010). Unas de las tecnologías usadas actualmente son los datos satelitales, ya que, en ausencia de datos biofísicos de campo, los índices de detección remota asociados con la humedad de la vegetación y la clorofila pueden proporcionar una métrica indirecta del crecimiento vegetativo y el estrés hídrico, garantizando una alternativa rentable para su monitoreo y localización (Klausmeyer *et al.*, 2019). Los principales enfoques utilizados se presentan a continuación:

1. Análisis de fluctuaciones sub-diarias en los niveles freáticos, ya que los EDAS tienden a transpirar más agua durante el día que durante la noche (Eamus *et al.*, 2015).
2. Análisis isotópico del agua en el xilema de las plantas, ya que el agua subterránea normalmente tiene una firma isotópica diferente a la del agua superficial (Eamus *et al.*, 2015; Zurek *et al.*, 2015). Este método es una técnica muy efectiva, pero no es práctica ante un estudio a gran escala por todo el coste de trabajo de campo y de laboratorio.
3. Análisis de datos satelitales para comparar el verdor de la vegetación a lo largo del tiempo, ya que se considera que las áreas donde permanezca el verdor de la vegetación durante períodos de sequía son indicadores de la presencia de ecosistemas sustentados por las aguas subterráneas (El-Hokayem, De Vita, & Conrad, 2023a; El-Hokayem, De Vita, Usman, *et al.*, 2023b; Liu *et al.*, 2021).
4. Recopilación de datos de vegetación existentes en función de la geología local, la forma del relieve, el suelo y la profundidad del agua subterránea para identificar las áreas con mayor probabilidad de albergar los EDAS (Doody *et al.*, 2017; Howard & Merrifield, 2010).
5. Análisis integradores que han utilizado tanto datos existentes (geología, geomorfología, nivel del agua, etc.), como parámetros topográficos e índices satelitales (Índice de Humedad Topográfica, Elevación, Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI) y variables climáticas (lluvia, Índice de Aridez). Los cuales se han combinado con el criterio científico de investigadores y el trabajo de campo (Duran-Llacer *et al.*, 2022; El-Hokayem, De Vita, Usman, *et al.*, 2023b; Pandey *et al.*, 2023).

LOS ECOSISTEMAS DEPENDIENTES EN EL CENTRO DE CHILE

A nivel mundial están aumentando los estudios sobre el mapeo e identificación de los EDAS (El-Hokayem, De Vita, & Conrad, 2023b; Link *et al.*, 2023). No obstante, en Chile la información que existe o las investigaciones sobre estos específicos tipos de ecosistemas es muy escasa. En el trabajo de Duran-Llacer *et al.* (2022) se propone una metodología para el mapeo de los EDAS en las cuencas de La Ligua y Petorca en la Región de Valparaíso, Chile. Esta investigación generó un nuevo método geoespacial con un enfoque integrado y temporal que permite mapear EDAS y analizar sus cambios espacio-temporales. El mismo utilizó datos satelitales y un enfoque multicriterio SIG, complementado con el criterio de experto y el trabajo de campo. Esta metodología es aplicable en regiones áridas y semiáridas y contribuye a la gestión sostenible de los EDAS en medio de los cambios climáticos y antrópicos actuales (Duran-Llacer *et al.*, 2022).

Las cuencas objeto de estudio (Figura 5a) presentan un clima semiárido y la principal actividad económica en ellas es la agricultura de exportación, principalmente de palto. En estas cuencas, se ha manifestado una sequía prolongada desde antes del 2010, que, unido a la influencia humana caracterizada por la expansión de las tierras agrícolas y una inadecuada gestión hídrica, se ha generado un descenso de las aguas subterráneas (Duran-Llacer *et al.*, 2020). Un esquema conceptual de este problema ambiental se puede observar en la Figura 6.

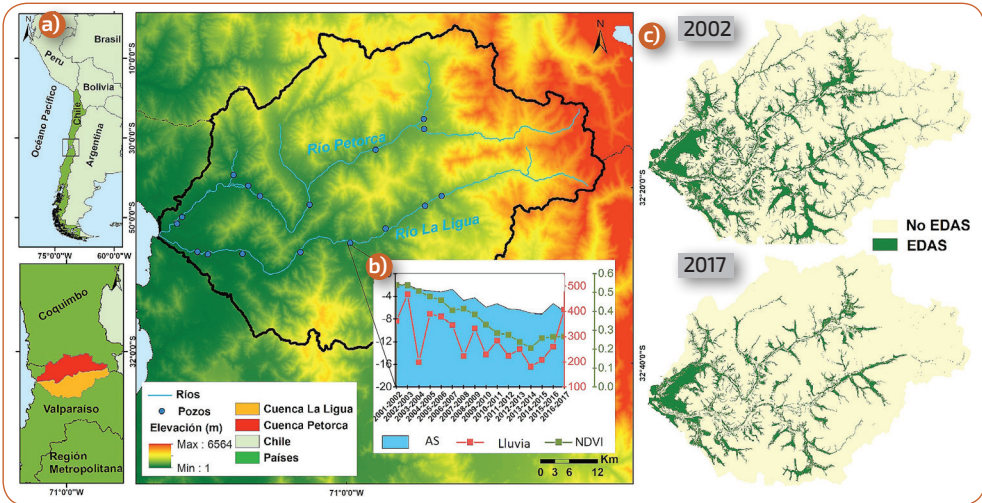


Figura 5.

Ubicación de las cuencas La Ligua y Petorca (a), comportamiento entre las aguas subterráneas (relleno azul AS), la lluvia (líneas rojas) y el verdor de los EDAS (línea verde NDVI) (b) y (c), EDAS en el 2002 y 2017. Fuente: Elaboración propia a partir de Duran-Llacer *et al.*, (2022).

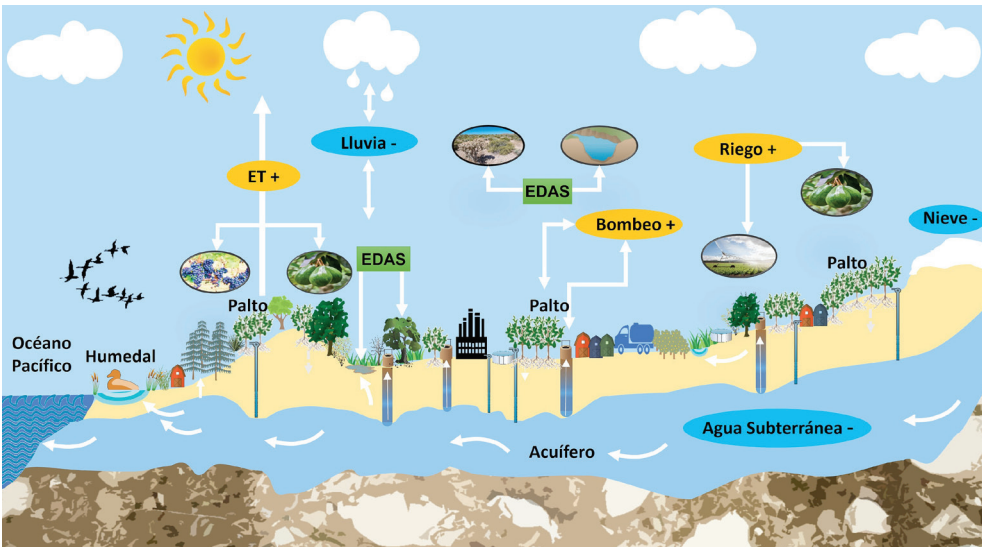


Figura 6.

Esquema conceptual del descenso de las aguas subterráneas y factores causales en el centro de Chile. Fuente: Elaboración propia.

Esta disminución de las aguas subterráneas no solo se presenta en estas cuencas, sino en gran parte del centro y norte de Chile, de ahí la importancia del estudio mencionado anteriormente. En el mismo se emplearon datos convencionales (geología, geomorfología, uso del suelo), parámetros topográficos a partir de un Modelo Digital de Elevación (Índice de Humedad Topográfica, Densidad de Lineamientos, Índice de Posición Topográfica), índices multispectrales (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI, Índice de Agua de Diferencia Normalizada NDWI), y variables climáticas (lluvia, Índice de Aridez) (Duran-Llacer, 2021). Estas variables geoespaciales fueron ponderadas a través de encuestas, normalizadas y reclasificadas, lo que permitió un análisis multicriterio y determinar zonas de alta o baja probabilidad de encontrar estos ecosistemas en dos momentos temporales (2002 y 2017). A partir de ahí se evaluó el nivel de las aguas subterráneas, la precipitación y el verdor de la vegetación en los EDAS, resultando en una disminución de la extensión superficial y una relación directa entre el descenso de las aguas subterráneas con el vigor de la vegetación de los ecosistemas (Duran-Llacer *et al.*, 2022), tal como se observa en la Figura 5b y c. Esto nos indica que, en los momentos actuales caracterizados por los efectos del cambio climático y la intensa intervención humana, un agotamiento de las aguas subterráneas no solo afecta a la sociedad, sino también a diferentes ecosistemas de gran biodiversidad como son los EDAS. En la Figura 7 se muestran algunas fotografías de estos tipos de ecosistemas en el área estudiada para una mejor contextualización y visualización.



Figura 7.

Fotografías de Ecosistemas Dependientes de las Aguas Subterráneas tomadas en las cuencas La Ligua y Petorca. Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIÓN

Los Ecosistemas Dependientes de las Aguas Subterráneas proveen grandes servicios ecosistémicos. Los mismos se están viendo afectados por el descenso de las aguas subterráneas, acontecido por el cambio climático, la sequía, la expansión agrícola y otros factores antrópicos. Su estudio es aun muy limitado y surge la necesidad de protegerlos a nivel mundial. En esta serie comunicacional se trató de conceptualizar resumidamente a los EDAS y mostrar la importancia ecológica de los mismos. Se propusieron medidas que pueden contribuir a su gestión sostenible. Además, se expusieron métodos empleados para su mapeo y se mostró una investigación desarrollada en las cuencas La Ligua y Petorca de la Región de Valparaíso. Los ecosistemas dependientes están siendo cada vez más amenazados, y en el centro de Chile quedó demostrado que se han visto afectados en su extensión superficial y alterados ecológicamente ante el descenso de las aguas subterráneas. De ahí la importancia de poder mapearlos correctamente y tomar medidas para su conservación y protección.

REFERENCIAS

- Arshad, A., Mirchi, A., Samimi, M., & Ahmad, B. 2022. Combining downscaled-GRACE data with SWAT to improve the estimation of groundwater storage and depletion variations in the Irrigated Indus Basin (IIB). *Science of the Total Environment*, 838. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156044>
- Arumí, J. L., Rivera, D., Muñoz, E., & Billib, M. 2012. Interacciones entre el agua superficial y subterránea en la región del Bío Bío de Chile. *Obras y Proyectos*, 12, 4–13.
- Dabovic, J., Dobbs, L., Byrne, G., & Raine, A. 2019. A new approach to prioritising groundwater dependent vegetation communities to inform groundwater management in New South Wales, Australia. *Australian Journal of Botany*, 67(5), 397–413. <https://doi.org/10.1071/BT18213>
- Doody, T. M., Barron, O. V., Dowsley, K., Emelyanova, I., Fawcett, J., Overton, I. C., Pritchard, J. L., Van Dijk, A. I. J. M., & Warren, G. 2017. Continental mapping of groundwater dependent ecosystems: A methodological framework to integrate diverse data and expert opinion. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 10, 61–81. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.01.003>
- Dresel, P. E., Griffioen, P., & Reid, M. 2010. *Development of a Method to Map Sensitivity of Groundwater Dependent Ecosystems in Victoria*. <https://www.researchgate.net/publication/266023009>
- Duran-Llacer, I. 2021. *Agotamiento de las Aguas Subterráneas y su relación con la Agricultura y los Ecosistemas Dependientes en cuencas del Centro-Norte de Chile* [Universidad de Concepción]. <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/9158>
- Duran-Llacer, I., Arumí, J. L., Arriagada, L., Aguayo, M., Rojas, O., González-Rodríguez, L., Rodríguez-López, L., Martínez-Retureta, R., Oyarzún, R., & Singh, S. K. 2022. A new method to map groundwater-dependent ecosystem zones in semi-arid environments: A case study in Chile. *Science of the Total Environment*, 816. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151528>

- Duran-Llacer, I., Munizaga, J., Arumí, J. L., Ruybal, C., Aguayo, M., Sáez-Carrillo, K., Arriagada, L., & Rojas, O. 2020. Lessons to be learned: Groundwater depletion in Chile's ligua and petorca watersheds through an interdisciplinary approach. *Water (Switzerland)*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/w12092446>
- Eamus, D., & Froend, R. 2006. Groundwater-dependent ecosystems: The where, what and why of GDEs. *Australian Journal of Botany*, 54(2), 91–96. <https://doi.org/10.1071/BT06029>
- Eamus, D., Fu, B., Springer, A. E., & Stevens, L. E. 2016. Groundwater dependent ecosystems: Classification, identification techniques and threats. In *Integrated Groundwater Management: Concepts, Approaches and Challenges* (pp. 313–346). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23576-9_13
- Eamus, D., Zolfaghar, S., Villalobos-Vega, R., Cleverly, J., Eamus, D., Zolfaghar, S., Villalobos-Vega, R., Cleverly, J., & Huete, A. 2015. Groundwater-dependent ecosystems: Recent insights, new techniques and an ecosystem-scale threshold response. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss*, 12, 4677–4754. <https://doi.org/10.5194/hessd-12-4677-2015>
- EL-Hokayem, L., De Vita, P., & Conrad, C. 2023a. Local identification of groundwater dependent vegetation using high-resolution Sentinel-2 data – A Mediterranean case study. *Ecological Indicators*, 146. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109784>
- EL-Hokayem, L., De Vita, P., Usman, M., Link, A., & Conrad, C. 2023b. Mapping potentially groundwater-dependent vegetation in the Mediterranean biome using global geodata targeting site conditions and vegetation characteristics. *Science of the Total Environment*, 898. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166397>
- Erostate, M., Huneau, F., Garel, E., Ghiotti, S., Vystavna, Y., Garrido, M., & Pasqualini, V. 2020. Groundwater dependent ecosystems in coastal Mediterranean regions: Characterization, challenges and management for their protection. In *Water Research* (Vol. 172). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115461>

- Fildes, S. G., Doody, T. M., Bruce, D., Clark, I. F., & Batelaan, O. 2023. Mapping groundwater dependent ecosystem potential in a semi-arid environment using a remote sensing-based multiple-lines-of-evidence approach. *International Journal of Digital Earth*, 16(1), 375–407. <https://doi.org/10.1080/17538947.2023.2176557>
- Hosseini, S. M., Parizi, E., Ataie-Ashtiani, B., & Simmons, C. T. 2019. Assessment of sustainable groundwater resources management using integrated environmental index: Case studies across Iran. *Science of the Total Environment*, 676, 792–810. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.257>
- Howard, J., & Merrifield, M. 2010. Mapping groundwater dependent ecosystems in California. *PLoS ONE*, 5(6). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0011249>
- Klausmeyer, K. R., Biswas, T., Rohde, M. M., Schuetzenmeister, F., Rindlaub, N., Housman, I., & Howard, J. K. 2019. *GDE Pulse: Taking the Pulse of Groundwater Dependent Ecosystems with Satellite Data*.
- Kløve, B., Balderacchi, M., Gemitzi, A., Hendry, S., Kværner, J., Muotka, T., & Preda, E. 2014. Protection of groundwater dependent ecosystems: Current policies and future management options. *Water Policy*, 16(6), 1070–1086. <https://doi.org/10.2166/wp.2014.014>
- Link, A., El-Hokayem, L., Usman, M., Conrad, C., Reinecke, R., Berger, M., Wada, Y., Coroama, V., & Finkbeiner, M. 2023. Groundwater-dependent ecosystems at risk - Global hotspot analysis and implications. *Environmental Research Letters*, 18(9). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acea97>
- Liu, C., Liu, H., Yu, Y., Zhao, W., Zhang, Z., Guo, L., & Yetemen, O. 2021. Mapping groundwater-dependent ecosystems in arid Central Asia: Implications for controlling regional land degradation. *Science of the Total Environment*, 797. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149027>
- Pandey, H. K., Kumar Singh, V., Kumar Singh, S., & Kumar Sharma, S. 2023. Mapping and validation of groundwater dependent ecosystems (GDEs) in a drought-affected part of Bundelkhand region, India. *Groundwater for Sustainable Development*, 23. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100979>

- Rohde, M. M., Froend, R., & Howard, J. 2017. A Global Synthesis of Managing Groundwater Dependent Ecosystems Under Sustainable Groundwater Policy. *Groundwater*, 55(3), 293–301. <https://doi.org/10.1111/gwat.12511>
- Rohde, M. M., Sweet, S. B., Ulrich, C., & Howard, J. 2019. A Transdisciplinary Approach to Characterize Hydrological Controls on Groundwater-Dependent Ecosystem Health. *Frontiers in Environmental Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00175>
- Zurek, A. J., Witczak, S., Dulinski, M., Wachniew, P., Rozanski, K., Kania, J., Postawa, A., Karczewski, J., & Moscicki, W. J. 2015. Quantification of anthropogenic impact on groundwater-dependent terrestrial ecosystem using geochemical and isotope tools combined with 3-D flow and transport modelling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(2), 1015–1033. <https://doi.org/10.5194/hess-19-1015-2015>



Universidad de Concepción

ECOSISTEMAS DEPENDIENTES DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN AMBIENTES SEMIÁRIDOS



UNIVERSIDAD
DE LA FRONTERA



Universidad del Desarrollo
Universidad de Excelencia



10
AÑOS
CRHIAM
CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA LA AGRICULTURA Y LA MINERÍA
ANID/FONDAP/15130015

Serie Comunicacional CRHIAM