



Reflexión sobre conceptos relacionados con la recarga de acuíferos

Reflection on concepts related to aquifer recharge

Miguel Ángel González Núñez , Humberto Silva Hidalgo , Adán Pinales Mungía , Alejandro Villalobos Aragón , Rodrigo De la Garza Aguilar

Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ingeniería, Chihuahua, México. Circuito Universitario, Nuevo Campus Universitario II, 31100 Chihuahua, Chih., México

Resumen

La recarga de acuíferos es imprescindible para asegurar el uso sostenible y continuo de agua subterránea dulce alrededor del mundo. Desde el siglo XX, han proliferado proyectos para incrementar la recarga de agua subterránea, así como diversos conceptos y definiciones, generando debate por su interpretación. El objetivo del artículo fue analizar el origen y evolución de términos, observando que Manejo de Recarga de Acuíferos (MAR, por sus siglas en inglés) predomina sobre Recarga Artificial (AR, por sus siglas en inglés) en la literatura. Los otros conceptos son casos particulares de los dos anteriores, por lo que se reflexiona en la posibilidad de homogeneizar términos buscando unificar esfuerzos en el desarrollo de proyectos de esta naturaleza.

Palabras clave: Recarga artificial, Recarga gestionada de acuíferos, Hidrogeología.

Abstract

Aquifer recharge is key to the sustainable use of groundwater and to ensuring a global supply of fresh water. Since the 20th century, recharge projects have proliferated along with a variety of concepts such as AR, MAR, ASR, SAT, among others, sparking debate over their definitions. The aim of this article was to analyze the origin and evolution of these terms, observing that MAR predominates over AR in literature. It is concluded that there is no consensus on which term to use, as their application varies depending on professional perspectives, and many of the concepts are considered specific cases of MAR and AR, which are used interchangeably. The article also raises the potential benefit of unifying terminology to facilitate understanding and application.

Keywords: Artificial recharge, Managed aquifer recharge, Hydrogeology.

Introducción

Para satisfacer la creciente demanda de agua del siglo XXI, la dependencia de las aguas superficiales y subterráneas ha aumentado con rapidez, especialmente en zonas áridas y semiáridas. Este incremento ocurrió debido a una explosión demográfica global, la cual generó un aumento de las actividades socioeconómicas relacionadas al agua. Sin embargo, estas actividades trajeron consigo efectos secundarios imprevistos y a menudo irreversibles como eutrofización de cuerpos de agua, explotación intensiva de aguas subterráneas, retorno de riego (recarga incidental de acuíferos), abatimiento de niveles estáticos, pérdida de flujo base, secado de pozos, deterioro de la calidad del agua subterránea, incremento en los costos de bombeo, impacto en los ecosistemas, subsidencia del terreno y conflictos sociales (Custodio y Llamas, 2001; Fetter, 2014).

Por lo tanto, la adecuada gestión de los recursos hídricos es un tema que no puede posponerse si se desea un desarrollo sostenible. En las últimas décadas, ha surgido una preocupación por la crisis del agua, la cual es una realidad

en muchos países y una amenaza que inquieta a otros. En sus orígenes, las civilizaciones dependían del agua superficial, excepto en algunas regiones donde este recurso era prácticamente nulo (Jha *et al.*, 2007). El uso generalizado del agua subterránea comenzó en el siglo XX, con la expansión de las redes de distribución de energía eléctrica en áreas rurales, con el aumento del conocimiento en hi-

Historial

Manuscrito recibido: 31 de octubre de 2025

Manuscrito aceptado: 20 de abril de 2026

Manuscrito publicado: agosto de 2026

Autor para correspondencia

Humberto Silva Hidalgo

hsilva@uach.mx

Como citar

González-Núñez MA, Silva-Hidalgo H, Pinales-Mungía A, Villalobos-Aragón A, De la Garza-Aguilar R (2026). Reflexión sobre conceptos relacionados con la recarga de acuíferos. *Ciencia Nicolaita* 97:21-30. doi:10.35830/cn.vi97.923

drogeología y con el desarrollo de equipos de bombeo con mayor capacidad de extracción (Arreguín-Mañón, 1998). Desde su aprovechamiento inicial, la extracción de agua subterránea ha crecido hasta representar el 26% del uso mundial (Margat y Van Der Gun, 2013).

En cuanto al uso global de agua subterránea, 70% (688 km³/año) es para riego, 21% (209 km³/año) es para uso doméstico, y 9% (85 km³/año) es para uso industrial (Conagua, 2018). En México, el uso intensivo del agua subterránea comenzó alrededor de 1935, y desde ese momento, la extracción sólo aumentó (Arreguín-Mañón, 1998). En 2002, se bombeaban 27.4 km³/año, en 2010, 29 km³/año, y en 2017 se extrajeron 34.3 km³/año de agua del subsuelo. En 2017, el 39% del volumen total utilizado provenía de agua subterránea, lo que convirtió a México en uno de los 10 países que más extrae agua de esta fuente (**Figura 1**).

Muchos países como India, China, Estados Unidos, Pakistán, España y Australia dependen en gran medida del agua subterránea, por lo que han identificado acciones que les permiten preservar este recurso escaso, tales como modernizar el riego agrícola, reutilizar aguas grises, reducir la extracción de agua subterránea, disminuir fugas, comprar derechos de agua por parte del gobierno y aumentar la eficiencia en el uso del agua. Aunque efectivas, estas soluciones requieren tiempo y dinero, y ofrecen resultados

parciales, por lo que ninguna constituye una solución efectiva (Misra *et al.*, 2015).

La recarga de agua subterránea puede incrementarse mediante diversas actividades como manejo de la vegetación, técnicas de captación de agua, sistemas de redistribución, estanques de infiltración y pozos de inyección (Scanlon *et al.*, 2016). Los sistemas de recarga inducida de acuíferos son específicos para cada sitio, por lo que con frecuencia se requiere investigación local para su desarrollo, diseño y gestión, con el fin de lograr un rendimiento óptimo.

En los climas secos el porcentaje de recarga natural en los acuíferos es bajo y, considerando el agotamiento actual del agua subterránea, existe el riesgo de abatimiento de los niveles estáticos con efectos indeseables. Si reducir el bombeo de agua subterránea es difícil, una opción a considerar es incrementar la recarga. Esto puede lograrse de diversas formas, tales como modificar la vegetación, establecer diversas técnicas y estructuras como llanuras de inundación, estanques de infiltración, almacenamiento subterráneo y pozos de inyección. La regla de oro para aumentar la recarga de acuíferos es hacerlo cuando el agua está disponible (periodos húmedos) para prepararse para sequías posteriores, y no durante periodos prolongados de sequía (Sharma, 1989).

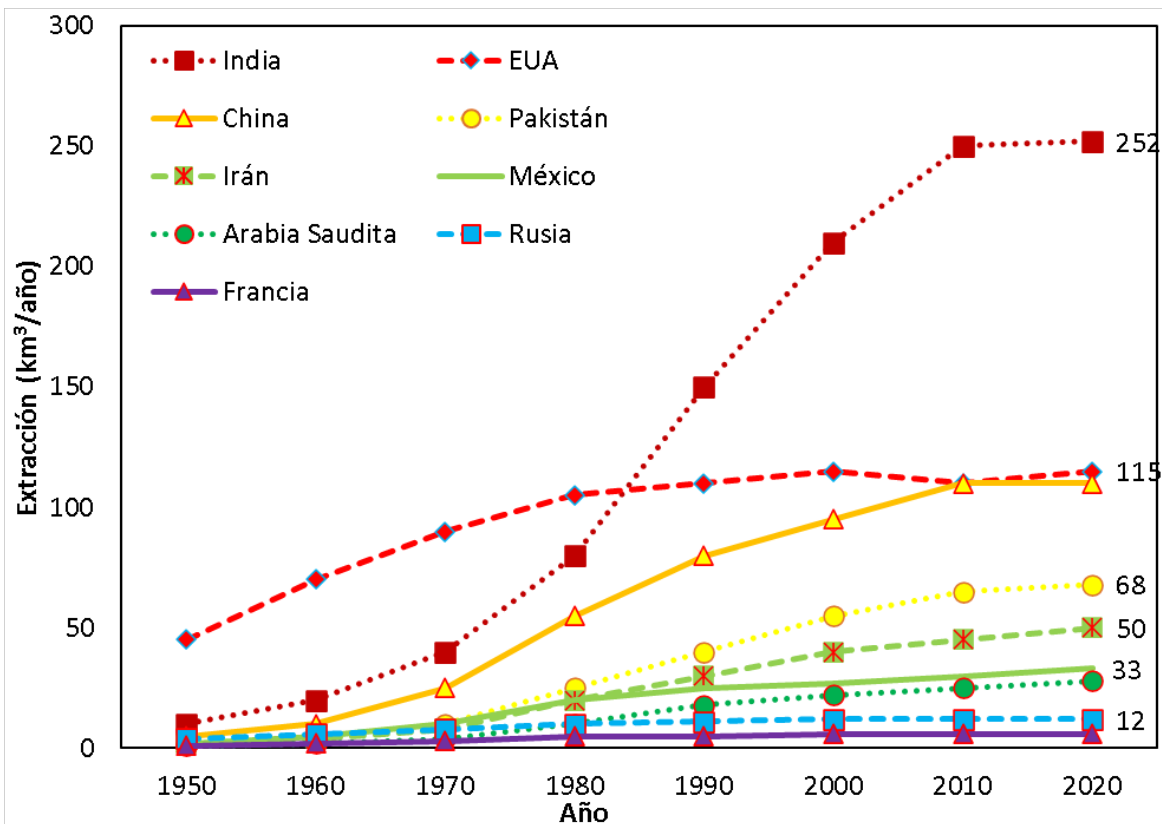


Figura 1. Aprovechamiento de agua subterránea en km³/año (1950-2020) (Unesco, 2022)

Otra alternativa para mejorar la gestión del agua es incrementar la recarga de acuíferos. Esto podría verse como una alternativa para el uso sostenible del agua subterránea que permita la continuidad de esta fuente de suministro de agua dulce, no solo en regiones áridas, sino en todo el mundo (USGS, 2023).

Desde mediados del siglo XX hasta la actualidad, se ha presentado un desarrollo sin precedentes de proyectos que tienen como objetivo incrementar la recarga de acuíferos a nivel mundial; inicialmente la recarga era de forma accidental y posteriormente de manera intencional. Por lo tanto, surgieron metodologías, técnicas y una diversidad de conceptos y términos relacionados con la recarga de aguas subterráneas, como el origen del agua a recargar, la forma o procedimiento y profundidad a la que el líquido es introducido en el suelo, y la ubicación del proyecto (Chenini *et al.*, 2010; Ghazavi *et al.*, 2018).

Algunas variantes de la recarga intencional, en orden cronológico son: Recarga Artificial (AR, por sus siglas en inglés) (Signor *et al.*, 1959), Recarga de Agua Subterránea (AGR, por sus siglas en inglés) (Brown *et al.*, 1978), Tratamiento Suelo-Acuífero (SAT, por sus siglas en inglés) (Quanrud *et al.*, 1984), Almacenamiento y Recuperación de Acuíferos (ASR, por sus siglas en inglés) (Pyne, 1994), Recarga Gestionada de Acuíferos (MAR, por sus siglas en inglés) (Gale y Dillon, 2005), Almacenamiento Subterráneo Sostenible (SUS, por sus siglas en inglés) (Bouwer *et al.*, 2008), Almacenamiento, Transferencia y Recuperación de Acuíferos (ASTR, por sus siglas en inglés) (Page *et al.*, 2010), Filtración en Borde de Río (RBF, por sus siglas en inglés) (Sandhu *et al.*, 2011), Banca de Agua (Megdal y Dillon, 2015) y Recarga Mejorada de Acuíferos (EAR, por sus siglas en inglés) (Sasidharan *et al.*, 2018).

En países como Estados Unidos se utiliza el concepto Recarga Artificial, mientras que en la Unión Europea predomina Recarga Gestionada de Acuíferos. También se analizaron los retos que existen en la traducción del significado completo de estos términos del inglés a otros idiomas como el español en la comunidad científica, ya que se han traducido como “Manejo de recarga de acuíferos” y “Gestión de recarga de agua subterránea” respectivamente, por mencionar algunos (Escolero-Fuentes *et al.*, 2018).

En este trabajo, se consideró esta diversidad de términos e interpretaciones, con el objetivo de realizar un análisis de: (1) artículos científicos y técnicos, (2) sitios web de instituciones gubernamentales, (3) tesis de licenciatura y posgrado, (4) artículos de revisión, (5) libros y (6) reportes técnicos; cubriéndose el periodo de 1959 a 2025. La intención fue identificar áreas de oportunidad para unificar criterios y esfuerzos para el desarrollo de proyectos para incrementar la recarga de acuíferos de forma intencional, así

como promover y facilitar el intercambio de conocimiento entre expertos, tomadores de decisiones y no expertos.

Estimación de la recarga natural

La recarga de acuíferos forma parte del ciclo hidrológico y ha ocurrido durante millones de años, principalmente en zonas montañosas, regiones fracturadas, sitios granulares y homogéneos. Sin embargo, este fenómeno se ha modificado por factores como el cambio climático, modificaciones en el ciclo hidrológico, riego agrícola, disposición de aguas residuales tratadas y no tratadas en ríos y lagos, y la impermeabilización continua de los suelos en áreas urbanas.

Diversos estudios han estimado los valores de recarga natural de acuíferos considerando factores como tiempo, espacio, clima y geología. En el sur de Estados Unidos, la recarga representa entre el 6 y el 22% de la precipitación (Hogan *et al.*, 2004), mientras que en Etiopía alcanza el 20% (Andualem *et al.*, 2021) y en India el 17% (Mohan y Pramada, 2023). En rocas ígneas, la recarga varía entre el 4 y el 19%, con una alta infiltración en rocas fracturadas (Cai y Offerdinger, 2016). Por su parte, en climas húmedos la recarga oscila entre el 30 y el 50% de la precipitación, en climas mediterráneos entre el 10 y el 20%, y en climas secos entre el 0 y el 2% (Bouwer, 2002). Además, en medios granulares como sedimentos, arenas y gravas, la recarga se ubica entre el 5.6 y el 8.3%; mientras que en rocas sedimentarias (calizas y dolomías) alcanza el 34.3%; en margas, yesos, limos y arcillas el 3.3% y en rocas duras el 1.3% (Sanz *et al.*, 2011).

De estudios previos en regiones húmedas, la recarga de agua subterránea se estima con precisión a partir de estudios de balance hídrico, calculando la recarga como precipitación menos escurrimiento menos evapotranspiración (Healy y Scanlon, 2010). Por otro lado, en áreas con climas secos, la recarga de agua subterránea es difícil de calcular a partir de estudios de precipitación y evapotranspiración porque ambas son casi de igual magnitud (Healy y Scanlon, 2010); para estas situaciones, se consideran más apropiados otros métodos. Estos incluyen el monitoreo del perfil de agua en el suelo en la zona saturada, la medición de la humedad del suelo y la conductividad hidráulica, la evaluación del movimiento de trazadores como tritio o cloro-36, la determinación del enriquecimiento de agua en la zona saturada con sales, oxígeno-18 o deuterio por evaporación y el uso de lisímetros (Healy y Scanlon, 2010).

Los métodos indirectos para cuantificar la recarga natural de acuíferos incluyen estudios de modelación de aguas subterráneas utilizando modelos de diferencias

finitas o de elementos finitos y la estimación de la recarga como un parámetro de entrada que permita lograr un buen ajuste entre los datos conocidos de nivel freático y los valores simulados (predicciones) por el modelo (Hogan *et al.*, 2004). El valor resultante será menos preciso a medida que la tasa de recarga sea menor.

Algunas fuentes comunes de error al evaluar la tasa de recarga de agua subterránea en áreas específicas son: (1) variabilidad espacial de la infiltración cuando la precipitación excede la tasa de infiltración donde ocurre escurrimiento en el suelo, (2) variabilidad espacial del contenido de humedad y otros parámetros en el perfil del suelo, (3) histéresis debido a la alternancia de humedecimiento y secado, (4) flujo preferencial y (5) cálculo erróneo de la evaporación del agua a mayor profundidad en la zona saturada.

La cuantificación precisa de las tasas de recarga de agua subterránea es esencial para la evaluación, la gestión sostenible y la protección de los sistemas acuíferos para evitar la sobreexplotación y la contaminación. Se requieren medidas y métodos predictivos y novedosos para mejorar la comprensión de los procesos de recarga; asimismo, es necesario profundizar en temas tales como: a) procesos y mecanismos de recarga y los factores que los afectan, b) técnicas precisas y adecuadas para estimar la recarga en tiempo y espacio (diferentes regiones y escalas de tiempo), y c) áreas prioritarias para investigaciones futuras.

Historia y conceptos relacionados con la recarga intencional de acuíferos

Al examinar las raíces de los conceptos, se busca proporcionar una mejor comprensión de sus significados y usos en las áreas de gestión del agua, reutilización, abastecimiento y aprovechamiento ecológico. Para este análisis se colocó la cita textual entre comillas y letra itálica. Así, algunas variantes de la recarga intencional, en orden de aparición, son:

1. Recarga Artificial (Artificial Recharge, AR). Primera referencia en 1959. Definición: “Un nuevo y muy eficiente método de recarga ha sido implementado adoptando pozos colectores de tipo horizontal que introducen el agua superficial en el flujo subterráneo. En la recarga artificial, el agua superficial debe ser limpiada de sus partículas suspendidas más gruesas. Sin embargo, la contaminación mineral restante todavía causa un taponamiento lento pero continuo. Por lo tanto, debe eliminarse de vez en cuando. En comparación con los pozos verticales comunes, donde esta lim-

pieza resulta ser muy complicada y bastante incierta en cuanto a sus efectos, el tipo horizontal de colector ofrece grandes ventajas” (Signor *et al.*, 1959).

- 2. Recarga de Agua Subterránea en acuíferos (Aquifer Groundwater Recharge, AGR).** Primera referencia en 1978. Definición: “La recarga artificial de aguas subterráneas de la Formación Ogallala de edad Terciaria tardía es una técnica de gestión del agua... mediante el uso de estanques de dispersión de agua o pozos de inyección, es un método comprobado de almacenamiento de agua” (Brown *et al.*, 1978).
- 3. Tratamiento Suelo-Acuífero (Soil Aquifer Treatment, SAT).** Primera referencia en 1984. Definición: “El nombre SAT indica su característica principal: la purificación durante el flujo del efluente a través del suelo de la zona no saturada y en el acuífero. Las aguas residuales reciben solo un tratamiento parcial antes de la recarga; se confía en el sistema suelo-acuífero para proporcionar un tratamiento adicional” (Idelovitch y Michail, 1984).
- 4. Almacenamiento y Recuperación de Acuíferos (Aquifer Storage and Recovery, ASR).** Primera referencia en 1994. Definición: “El Almacenamiento y Recuperación de Acuíferos puede definirse como el almacenamiento de agua en un acuífero adecuado mediante un pozo durante los periodos en que el agua está disponible, y la recuperación de agua del mismo pozo durante los periodos en que se necesita” (Pyne, 1994).
- 5. Recarga Gestionada de Acuíferos (Managed Aquifer Recharge, MAR).** Primera referencia en 2005. Definición: “Almacenamiento y tratamiento intencional de agua en acuíferos. El término ‘recarga artificial’ también se ha utilizado para describir esto, pero las connotaciones adversas de ‘artificial’, en una sociedad donde la participación comunitaria en la gestión de recursos hídricos es cada vez más frecuente, sugirieron que era momento de un nuevo nombre. La recarga gestionada es intencional, a diferencia de los efectos de la deforestación, el riego y la instalación de tuberías principales de agua donde los aumentos de recarga son incidentales. MAR también ha sido llamada recarga mejorada, banca de agua y almacenamiento subterráneo sostenible” (Gale y Dillon, 2005).
- 6. Almacenamiento Subterráneo Sostenible (Sustainable Underground Storage, SUS).** Primera referen-

cia en 2008. Definición: “La capacidad de almacenar de manera segura grandes volúmenes de agua potable a gran profundidad ha surgido como una estrategia rentable y viable en Estados Unidos y en muchas otras partes del mundo. Si la operación de instalaciones principales se interrumpe, pero el agua potable puede recuperarse rápidamente del almacenamiento, desinfectarse y distribuirse para satisfacer las demandas del sistema, la confiabilidad del suministro de agua se ve reforzada. Estas experiencias exitosas son cada vez más comunes a medida que un número creciente de empresas de agua integra el Almacenamiento Subterráneo Sostenible (SUS) en sus operaciones normales, reduciendo riesgos de interrupciones operativas y proporcionando días o incluso meses de reserva de agua potable” (Bouwer et al, 2008).

7. Almacenamiento, Transferencia y Recuperación de Acuíferos (Aquifer Storage Transfer and Recovery, ASTR). Primera referencia en 2005. Definición: “El almacenamiento, transferencia y recuperación de acuíferos consiste en la inyección de agua en un pozo para almacenamiento y recuperación desde un pozo diferente, generalmente para proporcionar un tratamiento adicional del agua” (Page, 2010).

8. Filtración en márgenes de ríos (River Bank Filtration, RBF). Primera referencia en 2011. Definición: “La filtración en borde de río (RBF) es una tecnología de tratamiento de agua que consiste en extraer agua de los ríos mediante pozos ubicados en el acuífero aluvial adyacente. Durante el paso subterráneo, ocurre una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que mejoran la calidad del agua superficial, sustituyendo o reduciendo el tratamiento convencional de agua potable” (Sandhu et al., 2011) (Jaramillo, 2011).

9. Bancos de Agua (Water Banking, WB). Primera referencia en 2015. Definición: “Los bancos de agua mediante pozos de inyección, también conocida como almacenamiento y recuperación de acuíferos (ASR), es una alternativa al almacenamiento en superficie. El ASR consiste en la inyección de agua dulce proveniente de ríos, lagos o incluso agua pluvial almacenada en un acuífero, a través de un pozo único o un conjunto de pozos durante periodos de excedencia, y su extracción en el momento de necesidad desde el mismo pozo por el cual se inyectó” (Megdal y Dillon, 2015).

10. Recarga Mejorada de Acuíferos (Enhanced Aquifer Recharge, EAR). Primera referencia en 2018. De-

finición: “la implementación de prácticas de gestión para capturar agua de tormenta y mejorar su recarga en acuíferos... que puede tener una gran influencia en muchos aspectos de calidad y cantidad de agua” (Sasidharan et al., 2018).

11. Recarga Antropogénica de Acuíferos (Antropogenic Aquifer recharge, AAR). Primera referencia en 2020. Definición: “los procesos humanos que incrementan el flujo de agua desde la tierra o las masas de agua superficiales hacia los acuíferos subyacentes. La RAA presenta diversos grados de planificación e intención. La recarga gestionada de acuíferos (MAR), un subconjunto importante de la RAA, se caracteriza por el uso intencional de los acuíferos para almacenar y tratar aguas. La RAA puede ser un resultado secundario de actividades intencionales, como el uso de cuencas de infiltración para la gestión de aguas pluviales y sistemas sépticos para la eliminación de aguas residuales, así como cambios en el uso y la cobertura del suelo. La RAA también incluye la recarga derivada de procesos no deseados, como fugas de las tuberías principales de agua y alcantarillado” (Maliva, 2020).

En la **Figura 2** se presenta una línea de tiempo que muestra la evolución del concepto de recarga artificial de acuíferos desde que se mencionó por primera vez en el siglo XX, y las variantes que han surgido hasta la actualidad.

Áreas de oportunidad para unificar esfuerzos para incrementar la recarga

La recarga de acuíferos es una tarea impostergable para la gestión del agua subterránea en el siglo XXI. Asimismo, la recarga intencional proporciona una forma económica y segura de abastecimiento de agua para ciudades y pequeñas poblaciones (Donovan et al., 2003). Aun cuando existe un conocimiento sólido sobre el tema a nivel mundial, la implementación de instalaciones de recarga es todavía muy limitada, siendo posibles causas la falta de difusión de los proyectos, el bajo interés de los tomadores de decisiones, la escasa comprensión de la hidrogeología o por limitaciones económicas. Con el establecimiento de proyectos piloto, la recarga intencional tiene el potencial de ser un elemento importante al Objetivo de Desarrollo Sostenible seis de la ONU, relacionado con el suministro de agua, especialmente en regiones áridas y semiáridas.

En las ciudades equipadas con sistemas de drenaje pluvial y alcantarillado, se podría potenciar el aprovecha-

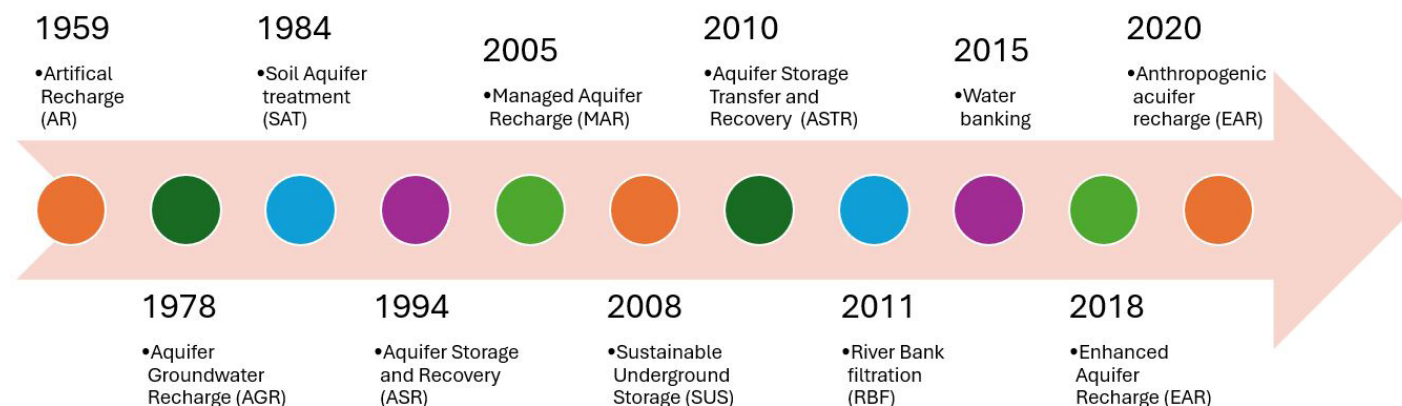


Figura 2. Línea de tiempo de términos asociados a la recarga de acuíferos (1959-2020).

miento de agua de lluvia, almacenándola en acuíferos para fines de agua potable e irrigación; dependiendo su uso de la calidad del agua disponible para recarga. En áreas con sistemas de agua potable, alcantarillado y de drenaje pluvial, con mantenimiento deficiente, la recarga de acuíferos ocurre a menudo de forma no intencional. Por lo tanto, la recarga intencional solo puede alcanzar su máximo potencial para el abastecimiento de agua si se abordan varios factores clave:

- Una comprensión clara de las capacidades y limitaciones de las técnicas de recarga, tanto dentro del sistema de captación como en el acuífero, alineada con las necesidades de la sociedad.
- El estado y cobertura de la infraestructura de agua existente.
- La disponibilidad de espacio para la captación de agua.
- La existencia de marcos legales y normativos de apoyo.
- La experiencia técnica del personal involucrado.

Para maximizar el impacto de la recarga intencional, una alternativa viable es que las instituciones educativas y gubernamentales generen y difundan nuevo conocimiento en colaboración con otras organizaciones, en relación con esta práctica y especialmente de proyectos que han sido exitosos.

Un área de oportunidad es analizar la diversidad de criterios existentes respecto a la recarga intencional. Los conceptos MAR, AR, SAT, ASR, ASTR, RBF, EAR, AGR y Bancos de Agua suelen utilizarse de forma intercambiable,

pero presentan diferencias en su aplicación y propósito. Por ello, la etimología de estos términos ha sido objeto de discusión entre académicos y profesionales, proponiendo diferentes interpretaciones y definiciones (Gale y Dillon, 2005).

Tras el análisis de la frecuencia de uso de los conceptos en publicaciones técnicas y científicas, parece que los dos conceptos principales empleados son MAR y AR, mientras que los demás términos pueden incluirse como casos particulares de ambos. Para mostrar lo anterior, se llevó a cabo un muestreo aleatorio de la frecuencia de uso de todos los términos en el periodo 2000-2025, utilizando Google Scholar, Science Direct, Elsevier, Scopus, entre otros. Como resultado, se obtuvo que los términos más utilizados son MAR y AR, con una ligera preponderancia del primero sobre el segundo. A pesar de que el concepto MAR sigue incrementando su frecuencia, AR está lejos de desaparecer (**Figura 3**).

Es evidente que no existe consenso en la comunidad de hidrólogos e hidrogeólogos respecto a qué término relacionado con la recarga intencional de acuíferos debe utilizarse, ya que cada profesional emplea los conceptos de forma distinta, según su propio criterio. Por lo tanto, se presenta una lista de términos en la **Tabla 1**, indicando si, de acuerdo con su definición, forman parte de MAR o AR.

En la **Tabla 2** se presentan ejemplos de aplicación de cada concepto en diferentes ubicaciones en el planeta. Esta recopilación de proyectos que tienen el objeto de aumentar la recarga de acuífero de forma intencional, evidencia que la diversidad terminológica no es un tópico que se ubica en el ámbito académico, sino que ha trascendido al plano pragmático que tiene implicaciones directas en la gestión del recurso hídrico. Esta información también muestra el interés que tienen las instituciones gubernamentales, pri-

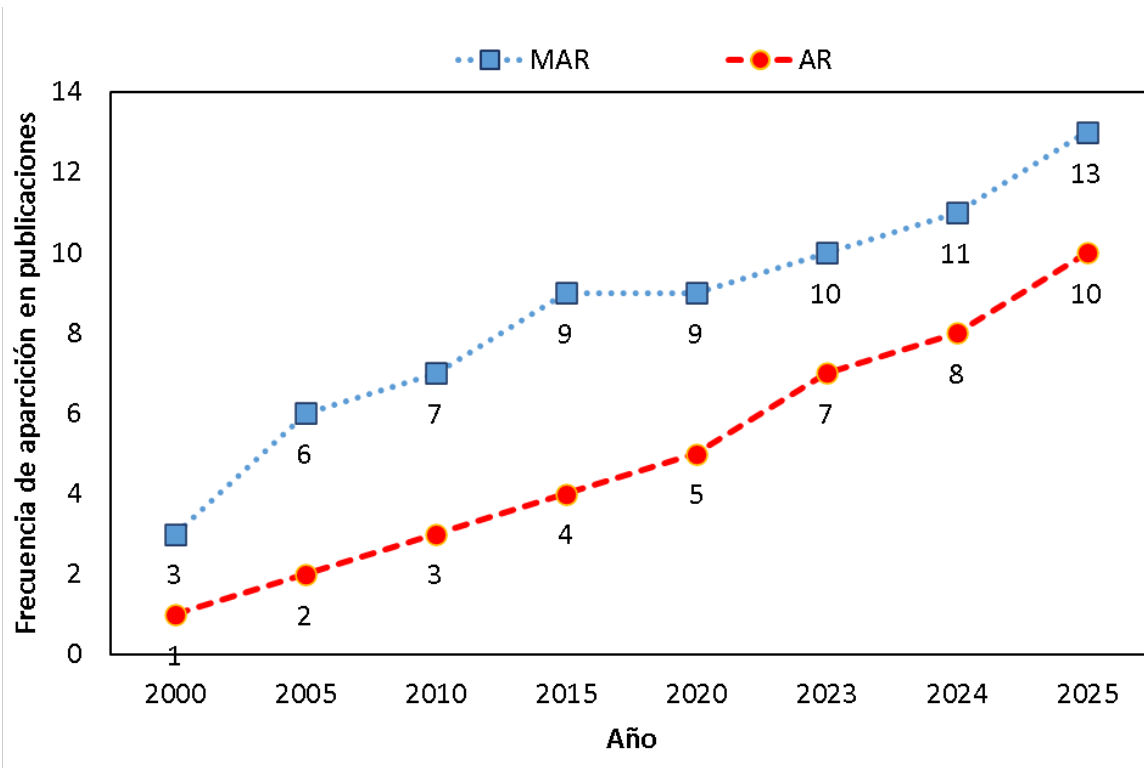


Figura 3. Frecuencia de aparición de términos en literatura reciente (200-2025).

Tabla 1. Conceptos relacionados con MAR/AR

Concepto	Definición	¿Es un método MAR/AR?
Recarga Artificial (AR)	El proceso de aumentar la infiltración natural del agua superficial en un acuífero por medios artificiales, como esparcir agua sobre la superficie del terreno o utilizar pozos de inyección.	-
Recarga Gestionada de Acuíferos (MAR)	La recarga intencional de agua a los acuíferos para su posterior recuperación o para beneficio ambiental.	-
Recarga de Agua Subterránea (AGR)	El proceso natural o artificial de añadir agua a un acuífero.	AR/MAR
Almacenamiento y Recuperación de Acuíferos (ASR)	El proceso de inyectar agua en un acuífero para su almacenamiento y recuperación posterior para uso.	AR/MAR
Almacenamiento, Transferencia y Recuperación de Acuíferos (ASTR)	Similar al ASR, pero implica transferir agua entre diferentes acuíferos o secciones de un acuífero.	AR/MAR
Tratamiento Suelo-Acuífero (SAT)	Un proceso donde el agua superficial es tratada mediante filtración natural a través del suelo y acuíferos antes de alcanzar el agua subterránea.	AR/MAR
Filtración en Borde de Río (RBF)	El proceso de inducir la infiltración de agua de río en un acuífero mediante bombeo de pozos cercanos a la ribera.	AR/MAR
Banco de Agua	La práctica de almacenar agua en reservorios superficiales o subterráneos para usarla en épocas de escasez.	AR/MAR
Recarga Mejorada de Acuíferos (EAR)	Métodos mejorados u optimizados de recarga artificial para aumentar la eficiencia y efectividad de la recarga de acuíferos.	AR/MAR
Almacenamiento Subterráneo Sostenible (SUS)	Hace referencia a prácticas y tecnologías que aseguran el uso y la gestión sostenibles de los recursos de agua subterránea, incluyendo los acuíferos.	AR/MAR

Tabla 2. Ejemplos de investigaciones con conceptos diversos

Concepto	Ejemplos de investigaciones	Referencia
AR	Recarga artificial de acuíferos: un caso de estudio en la zona de El Caracol, ubicado en el municipio de Ecatepec de Morelos, en el Estado de México	(Escolero-Fuentes <i>et al.</i> , 2018)
MAR	Proyectos de recarga MAR en el acuífero principal-Región Lagunera, México	(Escolero-Fuentes <i>et al.</i> , 2018)
AGR	Recarga artificial de aguas subterráneas como técnica de gestión del agua en las altas llanuras del sur de Texas y Nuevo México	(Brown <i>et al.</i> , 1978)
ASR	Impactos de la heterogeneidad en el almacenamiento y la recuperación de acuíferos salinos	(Li <i>et al.</i> , 2022)
ASTR	Evaluación de riesgos de la transferencia y recuperación del almacenamiento de acuíferos con aguas pluviales urbanas para la producción de agua potable	(Page <i>et al.</i> , 2010)
SAT	De la recarga gestionada de acuíferos al tratamiento de acuíferos en suelos agrícolas Conceptos y desafíos	(Grinshpan <i>et al.</i> , 2021)
RBF	Evaluación numérica de la filtración de riberas fluviales mediante filtros de grava para mejorar la calidad del agua en regiones áridas	(Abd-Elaty <i>et al.</i> , 2022)
Banco de Agua	Bancos de agua: el manejo de la recarga de acuíferos como herramienta para alcanzar los objetivos de la política hídrica	(Escolero-Fuentes <i>et al.</i> , 2018)
EAR	Imágenes de resistividad eléctrica de un sitio de recarga mejorada del acuífero	(Fields <i>et al.</i> , 2022)
SUS	Control de inundaciones y sequías mediante el almacenamiento subterráneo: del concepto a la implementación piloto en la cuenca del río Ganges	(Escolero-Fuentes <i>et al.</i> , 2018)

vadas, así como la comunidad científica en el tema, denotándose que hay diferentes grupos de trabajo que utilizan los términos y conceptos, aunque no necesariamente de manera homogénea.

Es por esta razón que se considera que un área de oportunidad es el potenciar el uso más unificado posible términos y conceptos, con lo que podría esperar que los esfuerzos que realizan los diferentes grupos interesados en el tema, como son los sectores académicos, científicos, gubernamentales, usuarios del agua, sociedad organizada, puedan desarrollar sus investigaciones, y proyectos de forma unificada, con un mínimo de divergencias, en un ámbito favorezca la comunicación, la cooperación, la transferencia de conocimientos y experiencias, así como resalte la importancia del tema en la atención de la creciente problemática que observan los sistemas de agua subterránea.

El concepto recarga artificial (AR) se publica en el año 1959 y posteriormente aparecieron otros términos que, en esencia, pueden clasificarse dentro de este mismo marco. Posteriormente, en 2005 surgió el término Recarga Gestionada de Acuíferos (MAR) con el fin de englobar todas las distintas prácticas en un solo término. Sin embargo, es evidente que los esfuerzos de unificación aún no se han alcanzado y vale la pena insistir en la importancia de lograr un espacio unificado de trabajo-

Lo cierto es que alcanzar una unificación conceptual tendría claras ventajas: permitiría superar la fragmentación

del conocimiento, alinear esfuerzos de grupos que actualmente trabajan bajo distintas denominaciones y establecer un lenguaje común que favorezca tanto la cooperación internacional, nacional y local, así como el desarrollo de nuevas iniciativas, favoreciendo la difusión de los proyectos y la consolidación de estrategias globales de gestión de acuíferos.

Conclusiones y perspectivas futuras

Las definiciones relacionadas con la recarga intencional son complejas y multidisciplinarias. Comprender estos conceptos requiere dominio de temas diversos como ingeniería, geología, hidrología e hidrogeología. En este trabajo, el objetivo fue analizar el origen, evolución, similitudes y diferencias de los conceptos asociados a la recarga intencional. Asimismo, se determinaron los principales acrónimos relacionados con la recarga intencional (AR, MAR, SAT, entre otros) y los desafíos existentes en la traducción de estos términos entre idiomas. Una homogeneización de términos podría ser útil tanto para la comunidad científica como para los tomadores de decisiones, favoreciendo la innovación, el desarrollo tecnológico y de proyectos, la transferencia de conocimientos, la cooperación, que eventualmente conduzca a una mejor gestión de los recursos hídricos subterráneos

En general se puede observar que SAT, ASR, ASTR,

RBF, EAR, AGR y Bancos de Agua, de acuerdo con las definiciones propuestas por sus propios creadores, son casos específicos de MAR y AR. Asimismo, MAR y AR se utilizan generalmente de forma intercambiable y no presentan diferencias claras en su aplicación y propósito. Homogenizar términos es deseable, pero representa un desafío complejo. Para los propósitos de este artículo, todos los términos relacionados con la recarga de acuíferos fueron englobados como recarga intencional. Esta se considera un conjunto de tecnologías y técnicas para contribuir a la solución de problemas como el aumento de los volúmenes en acuíferos, la restauración de ecosistemas, la mejora en la calidad de las fuentes de abastecimiento, entre otros. Cualquiera que sea el término utilizado en relación con la recarga de acuíferos, un potenciador del desarrollo de proyectos en el ámbito de la ingeniería (en la praxis), es la comunicación clara, el uso homogéneo de conceptos, teorías y métodos.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua por el apoyo institucional a los autores.

Referencias

- Abd-Elaty I, Saleh OK, Ghanayem HM, Zelenáková M, Kuriqi A (2022). Numerical assessment of riverbank filtration using gravel back filter to improve water quality in arid regions. *Frontiers in Earth Science* 10. [doi:10.3389/feart.2022.1006930](https://doi.org/10.3389/feart.2022.1006930)
- Andualem TG, Demeke GG, Ahmed I, Dar MA, y Yibeltal M (2021). Groundwater recharge estimation using empirical methods from rainfall and streamflow records. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 37. [doi:10.1016/j.ejrh.2021.100917](https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100917)
- Arreguín Mañón J (1998). *Aportes a la Historia de la Geohidrología en México 1890-1995* (CIESAS, Ed.; 1 Ed). AGH.
- Bouwer H (2002). Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. *Hydrogeology Journal* 10:121–142. [doi:10.1007/s10040-001-0182-4](https://doi.org/10.1007/s10040-001-0182-4)
- Bouwer H, Pyne D, Brown J, St Germain D, Morris T, Brown CJ, Dillon P, Rycus M (2008). Design, operation, and maintenance for sustainable underground storage facilities. *Awwa Research Foundation* (Issue May 2014).
- Brown RF, Signor DC, Wood WW (1978). Artificial ground-water recharge as a water-management technique on the southern high plains of Texas and New Mexico. *Texas Dept. of Water Resources, Austin, Report*, 220.
- Cai Z, Ofterdinger U (2016). Analysis of groundwater-level response to rainfall and estimation of annual recharge in fractured hard rock aquifers, NW Ireland. *Journal of Hydrology* 535:71–84. [doi:10.1016/j.jhydrol.2016.01.066](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.066)
- Chenini I, Mammou A Ben, May M El. (2010). Groundwater recharge zone mapping using GIS-based multi-criteria analysis: A case study in Central Tunisia (Maknassy Basin). *Water Resources Management* 24(5):921–939. [doi:10.1007/s11269-009-9479-1](https://doi.org/10.1007/s11269-009-9479-1)
- Conagua (2018). *Estadísticas del Agua en México, Edición 2018* (First Ed). Comisión Nacional del Agua.
- Custodio E, Llamas R (2001). *Hidrología Subterránea* (2 Ed). Omega.
- Escolero-Fuentes O, Gutiérrez-Ojeda C, Mendoza-Cázares EY (2018). *Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica* (O. Escolero-Fuentes C Gutiérrez-Ojeda, y E. Y. Mendoza-Cázares, Eds.; 1 Ed). IMTA.
- Fetter CW, Charles W (2014). *Applied hydrogeology* (4 Ed). Pearson New International Edition.
- Fields J, Tandy T, Halihan T, Ross R, Beak D, Neill R, Groves J (2022). Electrical resistivity imaging of an enhanced aquifer recharge site. *Journal of Geophysics and Engineering* 19(5):1095–1110. [doi:10.1093/jge/gxac073](https://doi.org/10.1093/jge/gxac073)
- Gale I, Dillon P (2005). *Strategies for Managed Aquifer Recharge (MAR) in semi-arid areas*.
- Ghazavi R, Babaei S, Erfanian M (2018). Recharge Wells Site Selection for Artificial Groundwater Recharge in an Urban Area Using Fuzzy Logic Technique. *Water Resources Management* 32(12):3821–3834. [doi:10.1007/s11269-018-2020-7](https://doi.org/10.1007/s11269-018-2020-7)
- Grinshpan M, Furman A, Dahlke HE, Raveh E, Weisbrod N (2021). From managed aquifer recharge to soil aquifer treatment on agricultural soils: Concepts and challenges. *Agricultural Water Management* 255:106991. [doi:10.1016/j.agwat.2021.106991](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106991)
- Healy R, Scanlon B (2010). *Estimating groundwater recharge* (1ST ED). Cambridge.
- Hogan JF, Phillips FM, Scanlon BR (2004). Groundwater Recharge in a Desert Environment: The Southwestern United States. In *Water Science and Application* 9 (1st ed.). American Geophysical Union.
- Idelovitch E, Michail M (1984). Soil-aquifer to an old treatment a method new of wastewater approach reuse. *Water Environment Federation* 56(8):936–943.
- Jha MK, Chowdhury A, Chowdary VM, Peiffer S (2007). Groundwater management and development by integrated remote sensing and geographic information systems: Prospects and constraints. *Water Resources Management* 21(2):427–467. [doi:10.1007/s11269-006-9024-4](https://doi.org/10.1007/s11269-006-9024-4)
- Li H, Lu C, Werner AD, Irvine DJ, Luo J (2022). Impacts of Heterogeneity on Aquifer Storage and Recovery in Saline Aquifers. *Water Resources Research* 58(5). [doi:10.1029/2021WR031306](https://doi.org/10.1029/2021WR031306)

- Maliva RG (2020). Anthropogenic Aquifer Recharge. *Springer Hydrogeology*. Springer Cham. doi:[10.1007/978-3-030-11084-0](https://doi.org/10.1007/978-3-030-11084-0)
- Margat J, Van Der Gun J (2013). *Groundwater around the World A Geographic Synopsis* (Unesco, Ed.; First Edit).
- Megdal SB, Dillon P (2015). Policy and economics of managed aquifer recharge and water banking. *Water (Switzerland)* 7(2):592–598. doi:[10.3390/w7020592](https://doi.org/10.3390/w7020592)
- Misra AK, Pachouri A, Kaur A (2015). Watershed Management Structures and Decision Making Frameworks. *Water Resources Management* 29(13):4849–4861. doi:[10.1007/s11269-015-1094-8](https://doi.org/10.1007/s11269-015-1094-8)
- Mohan S, Pramada SK (2023). Natural groundwater recharge estimation using multiple methods combined with an experimental study. *Water Supply* 23(5):1972–1986. doi:[10.2166/ws.2023.090](https://doi.org/10.2166/ws.2023.090)
- Page D, Dillon P, Vanderzalm J, Toze S, Sidhu J, Barry K, Levett K, Kremer S, Regel R (2010). Risk Assessment of Aquifer Storage Transfer and Recovery with Urban Stormwater for Producing Water of a Potable Quality. *Journal of Environmental Quality* 39(6):2029–2039. doi:[10.2134/jeq2010.0078](https://doi.org/10.2134/jeq2010.0078)
- Pyne RDG (1994). *Groundwater recharge and wells : a guide to aquifer storage recovery*. First edition. edn. CRC Press, Boca Raton, FL
- Quanrud DM, Drewes J, Milczarek M, Conroy O, Ela WP, Lansey KE, Arnold RG (1984). *Soil Aquifer Treatment: A sustainable process for organics removal?* July, 1–23.
- Sandhu C, Grischek T, Kumar P, Ray C (2011). Potential for Riverbank filtration in India. *Clean Technologies and Environmental Policy* 13(2):295–316. doi:[10.1007/s10098-010-0298-0](https://doi.org/10.1007/s10098-010-0298-0)
- Sanz E, Menéndez I, Menéndez M, y De Navascú P (2011). Calculating the average natural recharge in large areas as a factor of their lithology and precipitation. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss* 8:4753–4788. doi:[10.5194/hessd-8-4753-2011](https://doi.org/10.5194/hessd-8-4753-2011)
- Sasidharan S, Bradford SA, Šimůnek J, DeJong B, Kraemer SR (2018). Evaluating drywells for stormwater management and enhanced aquifer recharge. *Advances in Water Resources* 116:167–177. doi:[10.1016/j.advwatres.2018.04.003](https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.04.003)
- Scanlon BR, Reedy RC, Faunt CC, Pool D, Uhlman K (2016). Enhancing drought resilience with conjunctive use and managed aquifer recharge in California and Arizona. *Environmental Research Letters* 11(3):35013. doi:[10.1088/1748-9326/11/3/035013](https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/035013)
- Sharma ML (1989). *Groundwater recharge* (M. L. Sharma, Ed.; 1 Ed, Vol. 1). CRC PRESS.
- Signor D, Growitz D, Kam W (1970). Annotated bibliography on artificial recharge of ground water, 1955-67. Water Supply Paper. doi:[10.3133/wsp1990](https://doi.org/10.3133/wsp1990)
- Naciones Unidas, Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2022: Aguas subterráneas, Hacer visible el recurso invisible. Unesco, París, Fr.
- USGS. (2023). El ciclo del agua. *U.S. Department of the interior* (Vol. 1, Issue 1, p. 1). USGS.