



Viabilidad y riesgos de la inyección de aguas residuales tratadas en el acuífero cárstico de Yucatán: revisión técnica, normativa e hidrogeológica

Roger Amílcar González-Herrera^a, Jesús Azael Suverbiel-González^a, Alejandro Canul-Chuil^b
& Mario Humberto Cortazar-Cepeda^a

^a Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, Yucatán, México. roger.gonzalez@correo.uady.mx, a12008238@alumnos.uady.mx
mario.cortazar@correo.uady.mx

^b Junta de Agua Potable y Alcantarillado de Yucatán (JAPAY), Operación y Control de Aguas Residuales, Mérida, Yucatán, México.
alejandro.canul@yucatan.gob.mx

Recibido: 19 de junio 2025. Recibido en formato revisado: 18 de octubre 2025. Aceptado: 20 de octubre 2025

Resumen

El presente estudio analiza la viabilidad de inyectar aguas residuales tratadas en el acuífero cárstico de Yucatán mediante pozos profundos. Esta técnica, usada internacionalmente para mitigar la intrusión salina y gestionar recursos hídricos, implica riesgos significativos en medios cársticos por su alta permeabilidad y vulnerabilidad a la contaminación. Se revisan experiencias globales y nacionales, destacando la necesidad de tratamientos avanzados, monitoreo riguroso y modelos hidrogeológicos especializados. En Yucatán, solo el 2.4% del agua residual se trata adecuadamente, lo que representa un riesgo elevado. La normativa mexicana exige estándares de calidad similares al agua potable para la inyección directa. Se concluye que esta práctica solo es viable si se cumplen estrictamente las condiciones técnicas, normativas y geológicas, recomendando estudios piloto, modelación numérica y fortalecimiento institucional para proteger el acuífero.

Palabras clave: acuífero; aguas residuales; aguas tratadas; inyección; recarga artificial.

Feasibility and risks of injecting treated wastewater into the Yucatan karst aquifer: technical, regulatory, and hydrogeological review

Abstract

The present study evaluates the feasibility of injecting treated wastewater into the karst aquifer of Yucatán through deep wells. This technique, used globally to manage water resources and combat saline intrusion, poses significant risks in karst environments due to high permeability and vulnerability to contamination. The paper reviews international and national experiences, emphasizing the need for advanced treatment, strict monitoring, and specialized hydrogeological modeling. In Yucatán, only 2.4% of municipal wastewater is adequately treated, increasing the risk of aquifer pollution. Mexican regulations require water quality comparable to drinking standards for direct injection. The study concludes that this practice is only viable under strict technical, regulatory, and geological conditions, recommending pilot projects, numerical modeling, and institutional strengthening to safeguard the aquifer.

Keywords: aquifer; wastewater; treated water; injection; artificial recharge.

1. Introducción

Los principales orígenes de la contaminación ambiental son de carácter antropogénico; ejemplo de esto son las descargas de efluentes industriales y de las aguas residuales

domésticas [1-4]. La contaminación del agua subterránea es una de las causas de enfermedades que atentan contra la vida humana; como referencia de la patología y su relación con la deficiente calidad hídrica, se han documentado padecimientos provocados por ingerir agua no apta para

How to cite: González-Herrera, R.A., Suverbiel-González, J.A., Canul-Chuil, A., and Cortazar-Cepeda, M.H., (2025). Viabilidad y riesgos de la inyección de aguas residuales tratadas en el acuífero cárstico de Yucatán: revisión técnica, normativa e hidrogeológica. BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA. 58, pp. 72-83. DOI:<https://doi.org/10.15446/rbct.n58.121034>

consumo [5-7]. Existen normas oficiales en las que se establecen límites máximos permisibles de elementos disueltos en el agua, para su consumo y diferentes usos [8]. De la misma manera, hay una normatividad que establece la calidad del agua tratada que puede inyectarse al acuífero para no contaminarlo [9-11].

En zonas cercanas a la costa se presenta el fenómeno de intrusión salina como una contaminación de manera natural [12]. La inyección a profundidad de agua residual tratada en sitios costeros puede crear una barrera de agua dulce [13,14]. En algunos casos, el objetivo de la inyección de agua dulce puede ser solamente el de reducir la salinidad del acuífero o el de incrementar la calidad del agua lo cual no necesariamente crea una barrera a la intrusión salina [15].

El estrato en el que se dispone el agua inyectada debe tener una extensión y espesor adecuados; debe estar debajo de cualquier acuífero que contenga agua subterránea utilizable y limitado en la parte superior e inferior por rocas impermeables o agua salobre.

El objetivo de esta investigación es revisar y analizar las experiencias nacionales e internacionales en la inyección de aguas residuales tratadas en acuíferos carbonatados, por recarga artificial, con el propósito de evaluar su aplicabilidad en el contexto hidrogeológico del acuífero cárstico de Yucatán.

2. Metodología

La metodología se centró en la revisión sistemática de la literatura académica, informes técnicos y normativas relevantes. Fue fundamental delimitar la viabilidad técnica, ambiental y regulatoria de la recarga artificial de acuíferos en el contexto de Yucatán. El enfoque desarrollado paso a paso para lograr el objetivo propuesto fue el siguiente:

Búsqueda y recopilación de información: Se utilizaron bases de datos académicas como Scopus, Web of Science, Google Scholar, ScienceDirect, y repositorios de organizaciones internacionales como la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) y la Organización Mundial de la Salud (OMS). Se usaron palabras clave combinadas para obtener mejores resultados. Los criterios de búsqueda se clasificaron según (i) temas principales: "managed aquifer recharge" (recarga gestionada de acuíferos), "aquifer storage and recovery" (almacenamiento y recuperación en acuíferos), "deep well injection" (inyección en pozos profundos), "wastewater reuse" (reuso de aguas residuales); (ii) tipos de acuíferos: "carbonate aquifer" (acuífero carbonatado), "karst aquifer" (acuífero cárstico), "limestone aquifer" (acuífero de caliza); (iii) impacto y riesgo: "groundwater contamination" (contaminación de agua subterránea), "plume movement" (movimiento de pluma), "water quality" (calidad del agua); (iv) aspectos regulatorios: "regulations for aquifer recharge" (normativas para recarga de acuíferos), "water quality standards" (estándares de calidad del agua) y (v) ubicaciones geográficas (para estudios de caso).

Criterios de selección de estudios y normativas: Se establecieron una serie de criterios, que actuaron como filtros

en la revisión, para asegurar la relevancia y calidad de la información consultada. Los criterios de inclusión fueron (i) relevancia temática: artículos y documentos que aborden directamente la inyección de aguas tratadas en acuíferos carbonatados o cársticos; (ii) actualidad: estudios publicados en los últimos 20 años, priorizando los más recientes; (iii) tipo de publicación: artículos científicos revisados por pares, tesis doctorales, informes técnicos de agencias gubernamentales o de investigación, y normativas oficiales; (iv) idioma: artículos en inglés y español; (v) contexto geográfico: se priorizaron estudios de regiones con acuíferos cársticos que tienen condiciones hidrogeológicas similares a las de Yucatán y (vi) resultados específicos: se buscaron estudios que incluyan datos sobre la calidad del agua inyectada y recuperada, el comportamiento de contaminantes (orgánicos, patógenos, etc.) y los riesgos asociados. Los criterios de exclusión consideraron (i) falta de relevancia: estudios que traten la recarga superficial o la inyección en acuíferos de tipo granular (areniscas, gravas); (ii) antigüedad: publicaciones anteriores a la última década sin un aporte metodológico o conceptual significativo y (iii) fuentes no confiables: blogs, foros o artículos no revisados por pares sin respaldo científico o institucional.

Análisis y síntesis de la información: Una vez seleccionada la literatura, se procedió al análisis con la extracción y organización de los datos clave. La síntesis permitió comparar las experiencias internacionales e identificar casos de éxito y fracaso, así como las limitaciones y desafíos. El análisis se centró en evaluar las condiciones hidrogeológicas, la calidad del agua, y el marco regulatorio para determinar su aplicabilidad al acuífero de Yucatán, que es particularmente vulnerable a la contaminación debido a su alta permeabilidad.

3. Disposición de aguas tratadas por recarga artificial

La recarga artificial también conocida como la recarga gestionada [16], se efectúa mediante la aplicación de dos técnicas: la difusión superficial e inyección directa. La difusión superficial se ejecuta con la construcción de lagunas de infiltración, mientras que la inyección directa se realiza mediante el bombeo de aguas de reúso al subsuelo a través de pozos profundos, la representación visual de estas dos técnicas está ilustrada en la Fig. 1. Dado que la recarga artificial es una alternativa para una mejor disposición de aguas residuales tratadas, estas deben cumplir con al menos cuatro de los estándares más significantes en cuanto a calidad se refiere; estos son: microbiológicos, nutrientes, mineralógicos, metales pesados y sustancias orgánicas. Las aguas negras antes de su disposición, por lo general, reciben tratamientos en plantas municipales en donde, de manera preliminar, se realiza la remoción de objetos de gran tamaño (pretratamiento y tratamiento primario) seguido de la eliminación de contaminantes por procesos biológicos aerobios (tratamiento secundario) [17]; el nivel de tratamiento, en su mayoría depende de los requerimientos de la localidad.

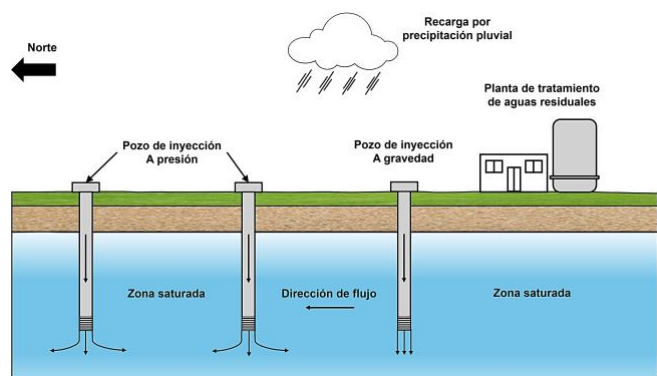


Figura 1. Inyección de aguas residuales tratadas por medio de pozos profundos.

Fuente: Autores.

Para un agua residual de origen municipal existe la opción de que, una vez tratada, pueda inyectarse de manera directa al acuífero por medio de pozos profundos; en Orange, California, Estados Unidos y en el sur de Australia se han desarrollado investigaciones, ejemplo de lo anterior [17,18]. En técnicas de recarga artificial, por lo general se establecen tratamientos adicionales o avanzados para brindar al agua tratada una calidad aún mejor, de manera que incluso esta supere los estándares de calidad para un agua potable (Fig. 2); estos procesos de tratamiento incluyen a la microfiltración, osmosis inversa y desinfección ultravioleta [17], ya que el fin último es el de almacenamiento en los acuíferos y su posterior recuperación. Como ejemplo, en la

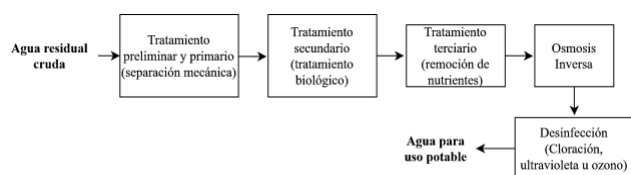


Figura 2. Tratamiento convencional de agua residual.

Fuente: Modificado de (Li et al. 2006).

Tabla 1.

Características hidroquímicas de un agua residual tratada por medios primarios y biológicos.

Variable	Concentración
pH	7.1
Alcalinidad (mg L ⁻¹)	77
BOD (mg L ⁻¹)	15
Sólidos suspendidos (mg L ⁻¹)	24
Sólidos disueltos totales (mg L ⁻¹)	827
Nitrógeno Kjeldahl total (mg L ⁻¹)	4
NO ₃ -N (mg L ⁻¹)	17
Nitrógeno total (mg L ⁻¹)	20
Fosfato-Fósforo (mg L ⁻¹)	7
Fósforo total (mg L ⁻¹)	8
Sodio (mg L ⁻¹)	175
Calcio (mg L ⁻¹)	30
Magnesio (mg L ⁻¹)	8.5
Demanda de cloruros (30 minutos)	10
Demanda de cloruros (24 horas)	16
Coliformes termotolerantes (CFU/100 ml)	640 - 240000

Fuente: Modificado de (Li et al. 2006).

Tabla 1 se presentan las características hidroquímicas, así como los constituyentes principales de un agua residual que ha sido tratada por procedimientos primarios y biológicos en una planta de tratamiento ubicada en la ciudad de Perth, Australia.

3.1 Método de inyección

La inyección de aguas residuales en pozos profundos es una práctica de uso común, no obstante, una desventaja de esta técnica es la posibilidad de contaminar las aguas subterráneas por transporte de contaminantes [19]; por ello, antes de su implementación, debe realizarse un estudio para detectar la presencia de pozos profundos en la zona con el objetivo de prevenir cualquier conexión cruzada y la contaminación de acuíferos superiores. Globalmente se pueden encontrar diversos estudios encaminados a evidenciar la contaminación debido a la recarga artificial por medio de la inyección de aguas residuales tratadas, así como sus posibles efectos en los cuerpos de agua subterráneos, estas investigaciones también tienen como finalidad regular las metodologías de uso en cuanto a la recarga artificial y dar posibles soluciones y recomendaciones a los problemas de contaminación [20].

El diseño del pozo de inyección debe considerar la cementación de una tubería de ademe superficial en todo el espesor del acuífero, de agua dulce, superior. Puede utilizarse un ademe intermedio. Se coloca un ademe largo en la parte superior de la zona de disposición, dentro del cual va el tubo de inyección, separado del primero por un fluido anular no corrosivo. El ademe también debe ser resistente a la corrosión. El fondo puede tener diferentes diseños. Se puede utilizar el fondo abierto en estratos de roca dura ya que tiene como ventaja exponer la máxima cantidad de área en el estrato para una mejor filtración de las aguas inyectadas; también permite la limpieza del pozo. En formaciones blandas o con cavidades, se debe utilizar un pozo revestido con ranuras o uno lleno de grava. El ademe ranurado tiene como ventaja el control y ubicación de los puntos de inyección y se cree que es menos probable que permita el fracturamiento vertical (Fig. 3).

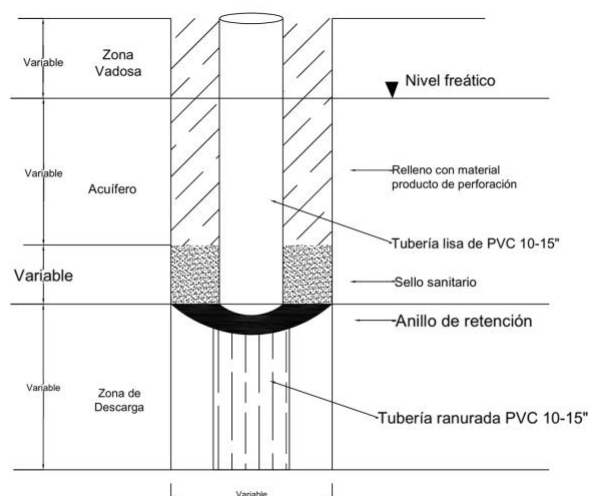


Figura 3. Ejemplo de diseño pozo de inyección.

Fuente: Autores.

Debe llevarse un control a detalle del pozo de inyección. Se deben monitorear y verificar continuamente la presión y el caudal de inyección para detectar variaciones inusuales. También se debe controlar la presión anular. Se sugiere considerar el uso de alarmas de advertencia de alta y baja presión. Es más deseable un caudal uniforme que uno variable e intermitente. Se recomienda que las presiones en la zona de inyección a profundidad se mantengan generalmente por debajo de 0.68 – 0.8 psi/ft (0.139 – 0.185 kg/cm²/m) y por debajo de 75 % de la presión de entrada crítica [21]. Se pueden agregar biocidas para evitar el crecimiento biológico en el estrato de inyección. Para evitar problemas operativos, también es deseable probar periódicamente el agua residual y el fluido anular para detectar cualquier cambio en su composición.

4. Estudios reportados en la literatura

En general, la recarga artificial tiene múltiples beneficios como la restauración de los niveles freáticos en acuíferos, prevención de intrusión salina en zonas costeras y un manejo óptimo de las reservas de agua subterránea [22]. Las aguas de inyección se bombean a través del tubo, que sirve como ademe al pozo, a una zona de disposición permeable, la cual debe estar confinada por dos estratos impermeables.

Maliva et al. [23] realizaron un estudio acerca de la probabilidad de riesgo de contaminación debida a la migración vertical de solutos provenientes de las aguas residuales inyectadas en pozos a profundidad en una zona ubicada en el sur de Florida, USA, las cuales consisten de efluentes industriales de bajo riesgo, de plantas desalinizadoras de osmosis inversa, de plantas de tratamiento municipales y lixiviados en vertederos. Parte de la preocupación se centró en la posible interacción de microorganismos patógenos, concentraciones elevadas de nutrientes o contaminantes emergentes provenientes de las aguas residuales inyectadas, con pozos de almacenamiento y recuperación ubicados a la proximidad. Debido a las particularidades de estas aguas residuales, por lo general, son más susceptibles a la flotabilidad y tienden a migrar de manera vertical por encima de aguas salinas; por ello, fue necesario implementar un modelo de transporte de solutos con el objetivo de simular el flujo vertical de las partículas contaminantes de acuerdo con distintos escenarios de confinamiento, encontrando así que la migración de los solutos ocurre de manera lenta y prolongada debido a los bajos valores de conductividad hidráulica de los estratos confinantes, lo cual se puede incrementar en algunas zonas por cuestiones de fracturamiento. Como resultado de la investigación, se determinó que el flujo vertical de los solutos continúa lentamente su curso, alcanzando tasas máximas de 80 m/año que es lo suficientemente tardío para lograr una inactivación adecuada de patógenos.

De manera similar, Masciopinto et al. [24] efectuaron un estudio con el objetivo de determinar el destino y transporte de los patógenos que son introducidos por la recarga artificial empleando pozos de inyección de agua tratada proveniente de una planta de tratamiento de aguas residuales en la zona

sur de Italia conocida como Salento, lugar ubicado en cercanía de la costa donde se utiliza la recarga artificial con la finalidad de prevenir la salinización acuífera por intrusión salina así como la disminución de los niveles freáticos por el exceso de bombeo para propósitos de suministro local. A pesar de que el agua para abastecimiento poblacional recibe cloración, existe la posibilidad de que ciertos patógenos no sean eliminados; por lo tanto, podrían ser los causantes de enfermedades como gastroenteritis, hepatitis A y poliomielitis. Para dicho estudio se efectuó un modelo matemático de transporte de coloides a través de fracturas paralelas tridimensionales de apertura variable, cuyo número y abertura se determinaron con pruebas de trazadores y bombeo en campo. Los resultados del estudio determinaron que cualquier pozo de suministro para agua potable debe situarse al menos a 8000 metros de distancia de la zona de inyección, esto debido a que representa una distancia segura en donde las concentraciones de los contaminantes son bajas; no obstante, ya que el acuífero de Salento es fracturado, se dan recomendaciones sobre tratamientos adicionales para los efluentes tratados.

Chrysikopoulos et al. [25] efectuaron una investigación aplicando un modelo experimental con el objetivo de determinar la capacidad de transporte o remoción de patógenos conocidos como biocoloides, que se encuentran suspendidos en aguas residuales y que circulan a través de estratos pertenecientes a acuíferos fracturados por medio de la inyección para la recarga artificial; elaboraron modelos a escala utilizando losas de piedra caliza fracturadas, asegurándose que las aberturas de las grietas no se encontraran limpias, simulando así las condiciones geológicas del sur de Italia, Salento, lugar en donde ocurre el fenómeno de “taponamiento” de grietas debido a las inyecciones de agua residual. Se elaboraron dos modelos en uno de los cuales se inyectó agua residual con tratamiento y en el otro sin tratamiento previo, para así generar un modelo matemático que describa el atascamiento debido a los bajos niveles de remoción de patógenos en las grietas. Los resultados demostraron que debido a los biocoloides presentes en la inyección de aguas residuales, se genera una obstrucción de las grietas en los estratos, lo que provoca una disminución de los valores de conductividad hidráulica, que como consecuencia da pie al taponamiento.

Otro tipo de estudio fue el efectuado por Greskowiak et al. [26], el cual tuvo como objetivo la elaboración de un modelo conceptual hidrogeoquímico capaz de adaptarse a un modelo de transporte reactivo multicomponente ya existente, el cual fue generado para el agua residual inyectada en pozos de almacenamiento y recuperación en la zona sur de Bolívar, Australia. El modelo conceptual fue basado en el del ciclo del carbono considerando reacciones geoquímicas de óxido reducción e intercambio iónico. Debido a que en el proceso de almacenamiento y recuperación de acuíferos con aguas residuales puede ocurrir afectación tanto de la calidad del agua inyectada, como de las propiedades fisicoquímicas del acuífero, el modelo fue de gran ayuda para la interpretación de los cambios hidrogeoquímicos en estas situaciones. Con base al modelo fue posible una simulación de la inyección en

un pozo de la zona, describiendo los procesos físicos y biogeoquímicos, representando así de manera satisfactoria los cambios hidrogeoquímicos a lo largo del periodo de almacenamiento de las aguas residuales inyectadas.

Con el objetivo de dar solución a problemas de intrusión salina en la zona costera conocida como la partida de Rambleta en Valencia, España, García [27] evaluó la opción de emplear la recarga artificial con inyección de aguas residuales tratadas para recuperar al acuífero que presenta problemas de salinización desde los años 70. Por ello, se investigó acerca del origen de la salinización y su distribución con cuerpos de agua dulce, así como los efectos hidrodinámicos e hidrogeoquímicos presentes en el acuífero por la acción de las inyecciones. Al ser las aguas residuales inyectadas de baja mineralización oxigenada y subsaturada en minerales carbonatados y sulfatados, se observaron diluciones de minerales, mezclas, intercambio catiónico y oxidación de materia orgánica, durante el proceso de la recarga. También, se comprobó una disminución de la salinidad del agua subterránea con la reducción de las concentraciones de los iones mayoritarios y un descenso de la conductividad eléctrica entre 5 y 10 veces. Para determinar la pluma de inyección se empleó una técnica de geofísica conocida como tomografía de resistividad eléctrica determinando las zonas geométricas de agua dulce y salina con las medidas de resistividad eléctrica del agua, en donde se estableció al agua de inyección como agua dulce para detectar su dirección y las zonas de mezclas entre el agua tratada y la salina.

4.1 Prácticas de inyección de aguas residuales en el contexto mexicano

Cruz-Ayala y Megdal [28] reportan una investigación sobre los proyectos de recarga artificial que se han realizado en México en los últimos cincuenta años. Mencionan que la disponibilidad del agua irá en declive en las regiones Norte, Noreste y Noroeste del país según las proyecciones del comportamiento de las precipitaciones por el cambio climático [29,30]. En la Península de Yucatán el agua subterránea es somera; sin embargo, se ha explotado el potencial del subsuelo para la inyección de aguas residuales tratadas. Se han encontrado estudios dedicados a analizar los efectos de la inyección de aguas residuales en pozos profundos; entre ellos se encuentra el realizado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) [31]. La Central Termoeléctrica II en Mérida, Yucatán, al encontrarse en funcionamiento, desecha sus aguas residuales tratadas por medio de pozos de inyección; estas aguas presentan como peculiaridad altas temperaturas que podrían provocar algún tipo de efecto al acuífero de la zona. La investigación consistió en la determinación de la dirección del flujo del agua inyectada por medio de la introducción de trazadores con fluoresceína del tipo Rhodamina WT y en la evaluación de las características hidrogeoquímicas del agua subterránea por métodos isotópicos. En los resultados se encontró que debido a las inyecciones se presenta una elevación del nivel freático de 4 a 6 centímetros, lo que ocasiona un flujo radial

en las zonas de recarga por las presiones, para después incorporarse al flujo regional de la zona, que va de sur a norte para descargar en el litoral costero. El incremento de la temperatura por las inyecciones, según los resultados, se debe a la difusión molecular y transmisión de calor.

Otro estudio similar fue el efectuado por González [32], el cual planteó la posibilidad de contaminación por inyección de aguas residuales provenientes de zonas turísticas y urbanas en Cancún, Quintana Roo, México, conduciendo a una aparentemente alteración en la calidad del agua del sistema lagunar Nichupté, lo cual podría presentar una situación de riesgo en cuanto a la contaminación de este cuerpo de agua superficial; por ello se emplearon trazadores fluorescentes para conocer la dirección de los solutos y determinar si los cuerpos de agua son afectados por la recarga artificial. Con base en los resultados de la hidrodinámica de las aguas inyectadas, se determinó que no existe la conexión entre el agua residual y el sistema lagunar Nichupté, siendo las descargas de los manantiales al mar de un 70% agua de mar y 30% agua dulce; de esta forma se estableció que los contaminantes encontrados de manera superficial y subsuperficial corresponden a las zonas en donde el agua residual se dispone por medio de fosas sépticas y plantas de tratamiento y son provenientes de zonas urbanas en condiciones de temporadas de lluvia.

Particularmente en el estado de Yucatán, Pérez [33] evaluó el impacto ambiental que genera una planta de empaques ubicada en el municipio de Umán; en la investigación se abarcó el tema de las aguas de residuales que genera dicha empresa, así como la migración de los contaminantes por el medio subterráneo. Si bien, para este estudio el enfoque fue más en la contaminación superficial, se ubicó al menos un pozo de inyección que formó parte del análisis de los contaminantes. Mediante un estudio hidrogeoquímico y la toma de muestras de agua ubicadas dentro de la zona de estudio de manera estratégica, se determinó la localización de las posibles zonas en donde se origina la contaminación de manera espacial; es decir, la interpretación de la pluma de contaminación. Para la investigación se emplearon los programas ArcGis para la clasificación de las aguas y la generación de diagramas con los valores hidroquímicos de las muestras y el software Surfer con el objetivo de hacer un análisis a profundidad de la contaminación elaborando isolíneas en 3D; utilizando los parámetros de temperatura, sólidos disueltos totales, demanda de oxígeno y conductividad eléctrica fue posible una interpretación visual de la contaminación a diferentes profundidades. Como resultado se obtuvo que la contaminación genera un gran impacto al acuífero, ya que la zona de descarga de aguas residuales se encuentra altamente contaminada; se determinó que la dirección de los contaminantes es aparentemente hacia el norte de la zona de inyección y por su peligrosidad se recomendó un tratamiento previo a la inyección de contaminantes o la suspensión de estas actividades para evitar una afectación a la población en general.

5. Discusión

En México, los estudios relacionados a la recarga artificial son amplios, ya sea de manera superficial como por inyecciones en pozos profundos; sin embargo, respecto al monitoreo y transporte de las aguas incorporadas al subsuelo, así como de las concentraciones de los contaminantes por el flujo subterráneo, no se ha encontrado gran diversidad de información. Más bien, en su mayoría, las investigaciones se centran en brindar recomendaciones aplicativas de la recarga artificial y los beneficios de acuerdo a una determinada zona del país [28]. Dicho lo anterior, las investigaciones relacionadas con el transporte de solutos exclusivamente por inyección de aguas residuales son aún más escasas y se tiene poca referencia de metodologías, soluciones y recomendaciones otorgadas por problemas de contaminación por el transporte de solutos debido a las inyecciones.

La península de Yucatán es una zona con un terreno de topografía plana, que cuenta con una geología a base de piedra caliza y dolomía; dicho esto, los minerales más abundantes son el carbonato de calcio, magnesio y la dolomita. La zona se ha denominado como cárstica ya que las disoluciones de la roca calcárea por la infiltración de la precipitación y las corrientes subterráneas han originado un sistema geológico de cavidades y oquedades, lo que ha dado pie a formaciones peculiares como los cenotes. En el estado de Yucatán, debido a la alta permeabilidad de las rocas, la infiltración de la precipitación es casi directa; por lo tanto, se tiene un flujo preferentemente subterráneo, el cual se dirige hacia la costa y descarga en el litoral costero. Así como se tiene un alto valor de la conductividad hidráulica se tiene un valor muy bajo de gradiente hidráulico, esto se interpreta con un flujo prolongado y casi estático del nivel freático [34].

Debido a las características de permeabilidad en el suelo yucateco, el acuífero resulta altamente vulnerable a la contaminación antropogénica; la deficiente disposición de las aguas residuales en el estado genera un foco de contaminación importante que compromete la calidad del agua subterránea por la facilidad de transporte de solutos en el subsuelo [35].

La contaminación del agua subterránea es una problemática que afecta toda la zona acuífera del estado de Yucatán, peligrando así los principales depósitos de suministro de agua dulce para la población y los ecosistemas naturales que dependen de este recurso, como lo son los cenotes. En el año 2013 el Diario Oficial del Gobierno del Estado de Yucatán emitió el decreto número 117 que designa al área natural denominada anillo de cenotes, como una reserva estatal justificando su importancia con base en distintos parámetros de suministro y calidad [36]. Uno de estos parámetros fue el del aprovechamiento del recurso hídrico poblacional; el anillo de cenotes subyace a la extensión territorial del estado conformado por 53 municipios, en los cuales se ubica la ciudad de Mérida y su zona metropolitana. Estos municipios se agrupan en subzonas de acuerdo con sus características del microrelieve presente y las condiciones de flujo ya sea recarga, tránsito y descarga, esto se señala en la Fig. 4 y la Tabla 2. El anillo de cenotes suministra agua para las subzonas y su uso tiene distintos fines, entre los cuales se encuentran los urbanos, industriales y de servicios,

representando así el 42% del volumen de agua que se aprovecha en el estado y el 19% en toda la península.

La calidad del agua es un factor determinante al momento de delimitar las zonas de extracción subterránea, el anillo de cenotes cuenta con aguas de tipo cálcico carbonatadas siendo esta apta para consumo humano, mientras que los tipos de agua con concentraciones de cloruros cercanas a la costa o con alto contenido de sulfatos que se ubican al occidente del anillo son las menos idóneas para extracción. La vulnerabilidad de la región donde se ubica el anillo de cenotes implica un grado alto de contaminación por las descargas de aguas residuales; según la CONAGUA, en el acuífero yucateco se descarga un total de 102.3 Mm³ anuales de aguas residuales sin tratamiento adecuado [37].

Con base en los antecedentes antes mencionados, se creó una reserva geohidrológica del anillo de cenotes con ayuda de especialistas de instituciones educativas y gubernamentales como la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY), el Centro de Investigación Científica de Yucatán

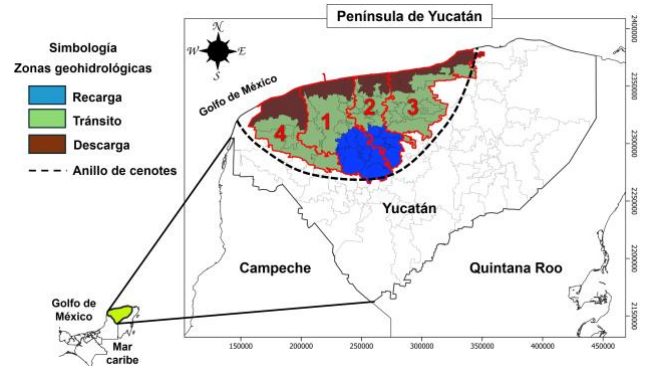


Figura 4. Acuífero de la planicie interior dividido en zonas de recarga, tránsito y descarga por municipios localizados en el cinturón de cenotes. Fuente: Modificado de CCPY, 2012.

Tabla 2.

Municipios conformados por subzonas de recarga, tránsito y descarga que subyacen al anillo de cenotes.

Subzonas	1	2	3	4
Recarga	Seyé	Tahmek		
	Acanceh	Hoctún		
	Timucuy	Xocchel		
	Homún	Hocabá		
	Cuzamá	Sanahcat		
	Tecoh	Huhí		
	Tekit			
Tránsito	Chicxulub pueblo	Motul	Dzilam	
	Mochochá	Telchac	González	
	Mérida	Pueblo	Temax	
	Ucú	Baca	Cansahcab	
	Conkal	Muxupip	Dzoncauich	Tetiz
	Tixpéhuil	Yaxkukul	Suma	Samahil
	Kanasín	Tixkokob	Tepakán	Kinchil
	Umán	Cacalchén	Teya	Chocholá
			Tekal	de Abalá
			Venegas	
Descarga	Ixil	Sinanché	Takantó	
	Progreso	Telchac	Bokobá	
		Puerto	Izamal	
		Dzemul	Dzilam	de
			Bravo	
			Dzidzantún	Hunucmá
			Yobaín	

Fuente: Adaptado de DOF, 2013.

(CICY), SEDUMA y CONAGUA para regular los volúmenes de agua de la zona, así como las características de calidad de esta; para ello, se involucraron a todos los municipios que se ubican en la zona del anillo de cenotes.

5.1 Análisis crítico y comparación con los casos de estudio en diferentes contextos geográficos

Los hallazgos de los estudios internacionales y nacionales analizados anteriormente tienen implicaciones críticas que actualizan la comprensión de las mejores prácticas y contrastan con la realidad de la inyección de aguas residuales en el acuífero cárstico de Yucatán en varios aspectos:

Nivel de tratamiento del agua: La práctica internacional exitosa de Recarga Gestionada de Acuíferos (MAR) establece un estándar de calidad muy alto para el agua inyectada. En lugares como California y Australia, el objetivo es que el agua tratada, mediante procesos avanzados como microfiltración y ósmosis inversa, supere los estándares de calidad de agua potable antes de ser inyectada, especialmente para almacenamiento y posterior recuperación [15,17]; en Yucatán, solo el 2.4% del total de las aguas residuales municipales descargadas al acuífero son tratadas a nivel secundario (limitado a la remoción de materia orgánica y patógenos). Esto crea un fuerte contraste con la filosofía internacional, exponiendo la vulnerabilidad del acuífero yucateco a una contaminación severa debido a la deficiente calidad del agua de descarga.

Mitigación de intrusión salina: Las experiencias en zonas costeras validan el uso de esta técnica como una herramienta de manejo hídrico. Estudios en España demostraron la efectividad de la inyección de aguas residuales tratadas para reducir significativamente la salinidad y recuperar el acuífero costero, disminuyendo la conductividad eléctrica de 5 a 10 veces [27]. El acuífero de Yucatán, que descarga en el litoral costero y enfrenta intrusión salina en la zona de descarga, podría beneficiarse de esta aplicación estratégica para crear una barrera de agua dulce.

Modelación y monitoreo a detalle: El enfoque internacional subraya la ingeniería precisa para la inyección. Casos en Florida y Australia se basaron en modelos de transporte de solutos y modelos hidrogeoquímicos para simular el flujo vertical de contaminantes y predecir los cambios en la calidad del agua, incluso en estratos de baja conductividad [23,26]. Aunque la NOM-014-CONAGUA-2003 recomienda el desarrollo de modelos de flujo numéricos en México, hay poca referencia de metodologías de monitoreo y transporte de contaminantes en el subsuelo yucateco. Esto es un riesgo, ya que el acuífero cárstico requiere modelos especializados para entender el flujo a través de fracturas y cavidades.

El contraste más significativo surge al comparar las experiencias en medios cársticos fracturados con el acuífero de Yucatán.

Vulnerabilidad extrema y distancias de seguridad: La investigación en Salento, Italia, determinó que, debido al

sistema fracturado, un pozo de suministro de agua potable debe estar situado al menos a 8,000 metros (8 km) de distancia de la zona de inyección para garantizar una concentración baja de patógenos [24]. Dada la alta permeabilidad de la roca caliza en Yucatán y la vulnerabilidad debida al sistema cárstico, la migración de contaminantes puede ser rápida y directa. Los hallazgos de Italia actualizan el riesgo en Yucatán, sugiriendo que las distancias de seguridad deben ser mucho mayores de lo que se podría considerar en acuíferos granulares.

Taponamiento y obstrucción biológica: En el mismo estudio de Italia se demostró que los biocoloides presentes en las aguas residuales tratadas pueden generar una obstrucción o taponamiento de las grietas en los estratos de piedra caliza, lo que disminuye la conductividad hidráulica [25]. Este fenómeno representa una limitación operativa importante para la práctica en Yucatán; si el agua inyectada no tiene una remoción total de sólidos suspendidos y materia biológica, el pozo de inyección podría volverse inoperable o, peor aún, causar un incremento de la presión que derive en fracturación vertical.

Riesgo de fracturación por presión: El acuífero de Yucatán, siendo la principal fuente de agua, hace que la inyección a presión sea especialmente peligrosa. El objetivo es evitar a toda costa la contaminación del acuífero superior. Las experiencias técnicas advierten que la inyección a presión debe limitarse para evitar la fracturación hidráulica vertical, que permitiría el ascenso de aguas residuales a estratos utilizables.

En resumen, los hallazgos internacionales actualizan la necesidad de un tratamiento avanzado y un monitoreo estricto en Yucatán. Sin embargo, el contraste se da en el nivel de vulnerabilidad; el acuífero cárstico de Yucatán es un caso extremo que requiere considerar las distancias de seguridad elevadas y los riesgos de taponamiento observados en otros sistemas cársticos del mundo.

5.2 Aplicabilidad de la inyección de aguas residuales tratadas al acuífero yucateco

Del total de las aguas municipales que son descargadas al acuífero en Yucatán solamente el 2.4% son tratadas a nivel secundario para su introducción al subsuelo. Para el Estado de Yucatán, existe cierta normatividad empleada como referencia para regular la calidad de las descargas de aguas residuales, la NOM-001-SEMARNAT-2021 es una de ellas que tiene como objetivo establecer límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales, definiendo como contaminantes los básicos (grasas, aceites, sólidos suspendidos, DBO5, nitrógeno total, fósforo total, temperatura y pH), patógenos y parasitarios (microorganismos, quistes y huevos de parásitos), también se incluyen los metales pesados y cianuros como el arsénico, cadmio, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo, zinc y cianuros [11]. Las descargas se definen como tal como la acción de infiltrar, depositar, verter o inyectar en un cuerpo de agua de la nación.

Por otro lado, está la NOM-014-CONAGUA-2003 de requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada, en donde se abarcan las generalidades que se deben cumplir de calidad, operación y monitoreo para incorporar agua residual tratada al acuífero mediante las técnicas de infiltración superficial y subsuperficial e inyección directa en pozos profundos [9]. En cuestión de calidad de agua se proporciona información de cumplimiento de acuerdo con cada tipo de descarga, esto se describe en la Tabla 3.

En el caso de que existan captaciones de agua para suministro doméstico a distancias menores de un kilómetro de la zona en donde se descargan aguas para fines de recarga artificial, se brindan recomendaciones para evitar afectaciones a la calidad del agua subterránea. Entre esas recomendaciones se encuentra la ejecución de proyectos piloto de manera que se observe la interacción del agua residual inyectada con el agua subterránea, también se pide que se realicen estudios hidrogeoquímicos que determinen las relaciones entre el agua inyectada y el medio geológico, así como del agua subterránea de origen, igualmente se espera que se obtenga el flujo y transporte de los solutos inyectados mediante el desarrollo de modelos de flujo numéricos.

La NOM-003-ECOL-1997 establece los límites máximos permisibles de contaminantes para aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios públicos [38]. Esta normativa tiene como fin proteger la salud de la población, así como al medio ambiente que tiene contacto con las aguas de reúso, asegurando que estas cuenten con la calidad adecuada evitando el brote de enfermedades y contaminación. En la Tabla 4 se señalan los límites permisibles para cada uno de los contaminantes considerados por la normativa.

La NOM-127-SSA1-2021 se utiliza para el establecimiento de los límites permisibles de calidad que debe poseer el agua suministrada por los organismos públicos y privados, la misma que es destinada para consumo humano [8]; esta normativa tiene como finalidad evitar la aparición de enfermedades por el contacto directo.

Tabla 3.
Aspectos de calidad a cumplir para aguas residuales tratadas a descargar de manera superficial, subsuperficial o de manera directa.

Tipo de contaminante	Tipos de Sistema de recarga	
	Superficial/Subsuperficial	Directo
Microorganismos patógenos	Remoción o inactivación de microorganismos enteros patógenos	Remoción o inactivación de microorganismos enteros patógenos
Contaminantes regulados por norma	Límites permisibles NOM-127-SSA1-2021	Límites permisibles NOM-127-SSA1-2021
Contaminantes no regulados por norma	DBO ≤ 30 mg/l, COT=16 mg/l	COT ≤ 1 mg/l

Fuente: Adaptado de la NOM-014-CONAGUA-2003.

Tabla 4.

Límites permisibles de contaminantes establecidos para aguas de reúso en servicios públicos.

Tipo de reúso	Promedio mensual				
	Coliformes fecales (NMP/100)	Huevos de helminto (h/l)	Grasas y aceites (mg/l)	DBO5 (mg/l)	SST (mg/l)
Servicios al público con contacto directo	240	1	15	20	20
Servicios al público con contacto indirecto o casual	1,000	5	15	30	30

Fuente: Adaptado de la NOM-003-ECOL-1997.

El agua debe cumplir con ciertas características de calidad establecidas en los límites permisibles, estas son las físicas, químicas, microbiológicas y radiactivas. No es aplicable para aguas residuales; sin embargo, se brinda un panorama de los elementos que son permitidos en el agua, así como las concentraciones de cada uno de ellos. En la Tabla 5 se señalan los valores de las especificaciones físicas y químicas que debe poseer un agua considerada de calidad para el consumo humano; así mismo, la normativa otorga límites permisibles para metales y metaloides, compuestos orgánicos sintéticos y otras características.

Se recomienda que la inyección de las aguas tratadas se realice por gravedad; por medio de la inyección a presión, se puede ocasionar un fracturamiento hidráulico a la roca lo cual debe evitarse debido a que la fractura generada puede ser vertical lo que permitiría que el agua de inyección suba y contamine al acuífero superior. En caso de inyección a presión, se recomienda que esta se limite entre 0.6 y 0.8 psi/ft (0.139 y 0.185 kg/cm²/m) [39].

Tabla 5.

Límites permisibles de características físicas y químicas para agua de consumo humano.

Parámetros	Límite permisible	Unidades
Turbiedad	4.0	UNT
Ph	6.5 a 8.5	Unidades de Ph
Color verdadero	15	UC
Cianuros totales	0.07	mg/l
Dureza total como CaCO ₃	500.0	mg/l
Floruros como F-a	1.5	mg/l
Nitrógeno amoniacal (N-NH ₃)	0.5	mg/l
Nitrógeno de nitratos (N-NO ₃ -)	11.0	mg/l
Nitrógeno de nitritos (N-NO ₂ -)	0.9	mg/l
Sólidos disueltos totales	1000.0	mg/l
Sulfatos (SO ₄)	400.0	mg/l
Sustancias activas al azul de metileno	0.5	mg/l

Fuente: Adaptado de la NOM-127-SSA1-2021.

Tabla 6.

Pros y contras de la inyección de aguas al subsuelo.

Pros	Contras
El agua tratada no se desecha en la superficie del terreno.	Hay un riesgo potencial de contaminar el acuífero por las fallas en la construcción del pozo o por la presencia de fallas geológicas y pozos en la zona.
En algunos casos es muy económico y no requiere el uso de mucha área de terreno.	Se desconocen los efectos de la inyección a largo plazo en la geología así como la migración del agua inyectada.
Se ha utilizado con éxito a nivel mundial.	Cualquier efecto adverso causado por la inyección puede ser difícil de corregir.
Resuelve problemas difíciles de tratamiento en superficie.	El método tiene una aplicación relativamente limitada en función del tipo y volumen de agua residual tratada.

Fuente: Autores.

La protección de los recursos naturales es primordial. La selección de algún método de disposición de residuos debe hacerse considerando el menor efecto al medio ambiente. Se requiere un análisis muy cuidadoso de las alternativas posibles. Un enfoque multidisciplinario considerando la geología del sistema, la ingeniería aplicada y la economía del procedimiento sería lo ideal. La inyección de aguas residuales tratadas no sigue esta filosofía; estas son fáciles de tratar en superficie y lo único que se requiere es su disposición final.

Algunos argumentos a favor y en contra de la inyección de aguas residuales tratadas por medio de pozos profundos, se presentan en la Tabla 6.

5.3 Implicaciones de la normativa mexicana a la inyección de aguas residuales tratadas

En la sección anterior se condensa la información normativa mexicana clave y los argumentos técnicos sobre la inyección de aguas residuales tratadas. Sus implicaciones son fundamentales para evaluar la aplicabilidad y el riesgo de esta práctica en el acuífero cárstico de Yucatán. Las Tablas 3, 4 y 5 establecen los estándares de calidad del agua en México y dictan las condiciones de seguridad para la inyección de aguas residuales.

La NOM-014-CONAGUA-2003 es la norma rectora para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada. Exige que, para los contaminantes regulados, el agua inyectada cumpla con los límites permisibles de la NOM-127-SSA1-2021. Esto implica que, para esos contaminantes, el agua para inyección directa debe tener una calidad comparable a la del agua destinada al consumo humano, reconociendo el alto riesgo de la práctica. El requisito más estricto para la inyección directa es el límite del COT (Carbono Orgánico Total) para contaminantes no regulados [8,9]. Este nivel de remoción es sumamente bajo y, aunque se puede obtener a partir de un tratamiento de nivel secundario, obliga a implementar tratamientos avanzados (terciarios) como ósmosis inversa o microfiltración, lo que contrasta fuertemente con la realidad de Yucatán, donde solo el 2.4% del agua se trata a nivel secundario.

Mientras que la NOM-003-ECOL-1997 establece límites para el reúso de agua residual tratada en servicios públicos, la NOM-127-SSA1-2021 define los límites para el agua de consumo humano (ver Tabla 5) representan el estándar de calidad del recurso hídrico que se busca proteger en Yucatán. Los parámetros como turbiedad y pH son valores de referencia que no deben ser degradados por el agua inyectada. Los límites de la NOM-003-ECOL-1997 (Tabla 4) para el reúso con contacto indirecto o casual son menos estrictos que los requeridos para la inyección directa (NOM-014-CONAGUA-2003) [9,38]. Esto subraya que la inyección en acuíferos, al ser un riesgo directo a la fuente de agua potable, es una operación que demanda una calidad superior a la de un simple reúso superficial.

5.4 Implicaciones prácticas y técnicas de la inyección de aguas residuales tratadas

La Tabla 6 resume la dicotomía de la inyección de aguas residuales. El principal atractivo ("Pros") es que es un método económico y logístico para la disposición. Sin embargo, el principal "Contra" es el alto riesgo de contaminación en acuíferos fracturados. En el acuífero cárstico de Yucatán, con su extrema vulnerabilidad, los "Contras" técnicos (contaminación y difícil corrección) superan significativamente los "Pros" económicos, haciendo que la inyección deba ser tratada como un último recurso con la máxima protección. La inyección requiere un sitio geológicamente apto y bien aislado. El riesgo de que una fractura vertical cause la contaminación de un estrato superior de agua dulce es la principal amenaza. Por ello, se recomienda la inyección por gravedad en lugar de a presión, o limitar la presión rigurosamente, para evitar el fracturamiento hidráulico.

La inyección no es un método de tratamiento, sino solo de disposición final. Esta filosofía es problemática, ya que el agua de inyección debe ser de muy alta calidad para evitar la obstrucción biológica (taponamiento de poros) y las reacciones geoquímicas adversas con el acuífero.

La aplicabilidad real de la inyección de aguas tratadas en Yucatán es sumamente compleja y está fuertemente condicionada y limitada por la geología cárstica, los inherentes riesgos de contaminación y el marco normativo actual. La geología cárstica de Yucatán es el factor más determinante. A diferencia de los acuíferos en medios granulares, el acuífero de Yucatán está compuesto de roca caliza altamente permeable, con un sistema de fracturas, grietas y cavidades que actúan como conductos directos al acuífero. Esta característica fundamental elimina la capacidad de la roca de actuar como un filtro natural de contaminantes, una propiedad clave de los acuíferos granulares. La inyección en un medio cárstico conlleva un riesgo significativo de transporte rápido de patógenos y contaminantes a través de fracturas, sin la atenuación esperada. Esto significa que una falla en el tratamiento del agua o en la operación del pozo podría resultar en una contaminación a gran escala y de rápida propagación del acuífero, la principal fuente de agua para la región. Los

riesgos de taponamiento biológico y fracturamiento hidráulico también son amenazas directas que pueden comprometer la integridad del sistema. La lógica de la inyección en Yucatán no puede ser la de "almacenamiento y recuperación", ya que el flujo de agua es tan rápido que el agua inyectada se mezcla y se mueve rápidamente hacia la costa o hacia otros pozos. Por lo tanto, la inyección debe ser evaluada solo como un método para disponer el agua de forma segura.

6. Conclusiones

La inyección de aguas residuales al acuífero utilizando pozos profundos, no es un método de tratamiento, es una técnica para el almacenamiento o la disposición final del líquido previamente tratado. Se trata de un almacenamiento a largo plazo o de disposición final en áreas geológicamente aptas para la inyección. Antes de utilizarse, éste método de inyección, se debe determinar que se tendrá el menor efecto adverso al medio ambiente y que no existan extracciones para abastecimiento de agua potable en las cercanías del punto de inyección.

Es importante considerar la reacción del agua inyectada con el agua de acuífero; la mezcla puede causar problemas como la disolución de la formación geológica, precipitando minerales o generando gases, así como la obstrucción o taponeo de poros debido al crecimiento y desarrollo de materia biológica; para evitar estas dos últimas situaciones, deben eliminarse los sólidos suspendidos.

Los estratos más adecuados para la inyección son arena, arenisca o caliza. El estrato de eliminación debe estar cubierto por una capa de roca impermeable, como pizarra o arcilla, y debe estar aislado de cualquier agua utilizable o recurso natural.

El diseño final de los pozos de inyección debe considerar el fondo abierto, con empaque de grava y ademe ranurado. En su construcción es importante contar con un revestimiento, tubería y cementación adecuados. El pozo debe ser monitoreado cuidadosamente en cuanto a presión, flujo y otros parámetros. Las presiones de la zona de inyección generalmente deben limitarse a 0.8 psi/pie (0.185 kg/cm²/m) de profundidad y al 75 por ciento de la presión de entrada crítica.

Se debe evitar la fracturación hidráulica por la inyección del líquido porque es difícil saber si las fracturas se desplazarán horizontal o verticalmente. Las fracturas verticales podrían permitir que las aguas residuales pasen a estratos superiores y contaminen los recursos naturales.

A partir del análisis de las experiencias internacionales y del marco normativo mexicano, se destaca que la inyección en pozos profundos es una técnica viable en acuíferos con confinamiento geológico, donde los estratos de baja permeabilidad actúan como barrera natural contra la contaminación vertical. Casos de éxito han demostrado la efectividad de la técnica para mitigar la intrusión salina. Sin embargo, el análisis de experiencias revela que en sistemas cársticos, el riesgo de rápido transporte de patógenos es extremadamente alto, requiriendo grandes distancias de

seguridad entre el pozo de inyección y los de suministro. Estos hallazgos demuestran que la geología cárstica no permite una atenuación natural de contaminantes, lo que hace la inyección una práctica de alto riesgo si no se aplican medidas rigurosas.

La inyección de aguas tratadas en Yucatán solo es viable si se cumplen condiciones críticas que la normativa mexicana exige y que la geología cárstica hace imperativas. El agua debe someterse a tratamientos avanzados para cumplir o superar los estándares de la NOM-127-SSA1-2021 (calidad de agua potable), algo que la mayoría de los sistemas de tratamiento de aguas residuales actuales en la región no logran. Inyectar agua con tratamiento secundario es sumamente peligroso e inaceptable. Los pozos de inyección deben construirse de manera que aislen completamente los estratos superiores de agua dulce de la zona de disposición, evitando el fracturamiento hidráulico que podría llevar a una contaminación irreversible. Se deben realizar estudios geofísicos detallados para identificar áreas donde la inyección no ponga en riesgo los principales puntos de extracción de agua potable o ecosistemas sensibles.

Para avanzar de forma segura, se recomienda: (i) Desarrollar modelos numéricos de flujo en medios cársticos para simular el transporte de contaminantes y predecir el impacto a largo plazo de la inyección. Esto es crucial para determinar distancias de seguridad efectivas. (ii) Implementar proyectos piloto a pequeña escala con monitoreo riguroso y en tiempo real de la calidad del agua inyectada y la del acuífero, para evaluar el comportamiento de los contaminantes y el riesgo de taponamiento. (iii) Evaluar los costos reales de la aplicación de tratamientos avanzados y compararlos con los potenciales daños ambientales y a la salud pública que una inyección fallida podría causar. Este análisis permitiría determinar si la inyección es una solución verdaderamente sostenible. (iv) Reforzar la aplicación de la normativa existente y capacitar a las agencias locales para un monitoreo estricto de la operación de inyección, lo que es esencial para proteger el acuífero de Yucatán.

Agradecimientos

A la Junta de Agua Potable y Alcantarillado de Yucatán (JAPAY), al personal de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán (FIUADY) y a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), México, por las facilidades y el apoyo brindado a J. A. Suverbiel-González a través de la beca 4009768 para estudios de maestría y a M. H. Cortazar-Cepeda con una beca de Estancias Posdoctorales por México durante la realización de este trabajo.

Referencias

- [1] Iloms, E., Ololade, O.O., Ogola, H.J.O., Selvarajan, R. Investigating Industrial Effluent Impact on Municipal Wastewater Treatment Plant in Vaal, South Africa. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17, art. 1096. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph17031096>

- [2] Manasa, R.L., Mehta, A. Wastewater: Sources of Pollutants and Its Remediation. En: Gothandam, K., Ranjan, S., Dasgupta, N., Lichtfouse, E. (eds). *Environmental Biotechnology Vol. 2. Environmental Chemistry for a Sustainable World*, vol 45. Springer, Cham. 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-38196-7_9
- [3] Morin-Crini, N., Lichtfouse, E., Liu, G., Balaran, V., Lado Ribeiro A.R., Lu, Z., Stock, F., Carmona, E., Ribau Texeira, M., Picos-Corrales, L.A., Moreno-Piñán, J.C., Giraldo, L., Li, C., Pandey, A., Hocquet, D., Torri, G., Crini, G. Worldwide cases of water pollution by emerging contaminants: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 20, 2311–2338. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01447-4>
- [4] Quddoos, A., Muhmood, K., Naz, I. Aslam R.W., Usman S.Y. Geospatial insights into groundwater contamination from urban and industrial effluents in Faisalabad. *Discover Water*, 4, 50. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43832-024-00110-z>
- [5] Fida, M., Li, P., Wang, Y., Alam S.M.K., Nsabimana, A. Water Contamination and Human Health Risks in Pakistan: A Review. *Expo Health* 15, 619–639. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12403-022-00512-1>
- [6] Khan, R., Saxena, A., Shukla, S., Sekar, S., Senapathi, V., Wu, J. Environmental contamination by heavy metals and associated human health risk assessment: a case study of surface water in Gomti River Basin, India. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 56105–56116. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14592-0>
- [7] Nawaz, R., Nasim, I., Irfan, A., Islam, A., Naeem, A., Ghani, N., Irshad, M.A., Latif, M., Nisa, B.U., Ullah, R. Water Quality Index and Human Health Risk Assessment of Drinking Water in Selected Urban Areas of a Mega City. *Toxics*, 11(7), 577. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxics11070577>
- [8] Diario Oficial de la Federación (DOF). Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. 2022.
- [9] Diario Oficial de la Federación (DOF). Norma Oficial Mexicana NOM-014-CONAGUA-2003, Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada. 2009.
- [10] Diario Oficial de la Federación (DOF). Norma Oficial Mexicana NOM-015-CONAGUA-2007, Infiltración artificial de agua a los acuíferos.- Características y especificaciones de las obras y del agua. 2009.
- [11] Diario Oficial de la Federación (DOF). NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. 2022.
- [12] Stefanakis, A., Zouzias, D., Marsellos, A. Groundwater Pollution: Human and Natural Sources and Risks. En: *Environmental Science and Engineering volume 4: Water Pollution and Wastewater Treatment*, Singhal, J.C., Sharma, U.C., Gurjar, B.R., Gov, J.N. (Eds), 82-102. STUDIUM PRESS, India. 2015.
- [13] Armanuos, A.M., Al-Ansari, N., Yaseen, Z.M. Underground Barrier Wall Evaluation for Controlling Saltwater Intrusion in Sloping Unconfined Coastal Aquifers. *Water*, 12, 2403. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12092403>
- [14] Johnson, Ted. Battling Seawater Intrusion in the Central & West Coast Basins (Technical Bulletin, Volume 13). Water Replenishment District of Southern California. 2007. Available at: <https://www.wrd.org/files/692a88b0a/TB13+-+Battling+Seawater+Intrusion+in+the+Central+%26+West+Coast+Basins.pdf>
- [15] Kiparsky, M., Miller, K., Blomquist, W., Holtzappple, A., Milman, A. Groundwater Recharge to Address Seawater Intrusion and Supply in an Urban Coastal Aquifer: Orange County Water District, Orange County, California. *Case Studies in the Environment*, 5 (1): 1223118. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1525/cse.2021.1223118>
- [16] Singh, K., Kumar, R., Pandit, B. A. Groundwater Conservation and Management by Artificial Recharge of Aquifer. En: *Advances in Water Management Under Climate Change*, Kumar, M., Kumar, R., Singh, V.P., (Eds). 319-339. CRC Press. Taylor and Francis Group. 2023.
- [17] Li Q., Harris B., Aydogan C., Ang M., Tade M. Feasibility of recharging reclaimed wastewater to the coastal aquifers of Perth, western Australia. *Process Safety and Environmental Protection*, 84(4), 237-246. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1205/psep.05202>
- [18] Bloetscher, F., Meeroff, D.E., Conboy, K., Sham, C.H., Fergen, R., Gallant, R., Hart, J., Shibata, T., Tuccillo, M.E., Englehardt, J.D. Assessing relative risks of municipal wastewater disposal options for Southeast Florida. *Risk Analysis*, 44, 2148 - 2168. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1111/risa.14301>
- [19] Chen C. Solutions Approximating Solute Transport in a Leaky Aquifer Receiving Wastewater Injection. *Water Resources Research*, AGU, 25(1), 61-72. 1989. DOI: <https://doi.org/10.1029/WR025i001p00061>
- [20] Hassan W.H., Ghazi Z.N. Assessing artificial recharge on groundwater quality using wells recharge. *Civil Engineering Journal*. Vol. 9, No. 9, 2233-2248. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.28991/CEJ-2023-09-09-010>
- [21] Walker, W. R., Stewart, R.C: Deep Well Disposal of Waste. *Journal of Sanitary Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineering*, 94, SA5, 945. 1968.
- [22] Asano T., Cotruvo J. Groundwater recharge with reclaimed municipal wastewater: health and regulatory considerations. *Water Research*, IWA, 38(8), 1941-1951. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.01.023>
- [23] Maliva R., Guo W., Missimer T. 2007. Vertical migration of municipal wastewater in deep injection well systems, South Florida, USA. *Hydrogeology Journal*, 15, 1387-1396. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10040-007-0183-z>
- [24] Masciopinto, C., La Mantia, R., Chrysikopoulos, C.V. Fate and transport of pathogens in a fractured aquifer in the Salento area, Italy, *Water Resources Research*, 44, W01404, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1029/2006WR005643>
- [25] Chrysikopoulos V., Masciopinto C., La Mantia R., Manariotis D. Removal of Biocolloids Suspended in Reclaimed Wastewater by Injection into a Fractured Aquifer Model. *Environmental Science and Technology*, ACS, 44(3), 971-977. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1021/es902754n>
- [26] Greskowiak, J., Prommer, H., Vanderzalm, J., Pavelic, P., Dillon, P. Modeling of carbon cycling and biogeochemical changes during injection and recovery of reclaimed water at Bolivar, South Australia, *Water Resources Research*, 41, W10418, 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/2005WR004095>
- [27] Garcia O. Evaluación multiparamétrica de un esquema MAR (Managed Aquifer Recharge) en un acuífero costero salinizado (Plana de Castellón, España). Castellón de la Plana, España. Tesis de Doctorado en Ciencias. Universitat Jaume I. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.6035/14104.2018.456307>
- [28] Cruz-Ayala, M.B., Megdal, S.B. 2020. An Overview of Managed Aquifer Recharge in Mexico and Its Legal Framework. *Water*, 12, 474. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12020474>
- [29] Arreguín, F.I., Chávez, R., Rosengaus, M. 2007. Impacto del cambio climático sobre los acuíferos mexicanos. En: *Proceedings del VI Congreso Nacional de Aguas Subterráneas*, Asociación Geohidrológica Mexicana, A. C., Mexico, 17–19 Octubre 2007.
- [30] Arreguín, F.I., López, P.M., Marengo, M.H. Mexico's water challenges for the 21st century. En: *Water Resources in Mexico. Scarcity, Degradation, Stress, Conflicts, Management, and Policy*, 1st ed., Oswald Spring, U., Ed., Hexagon Series on Human and Environmental Security and Peace, UNAM, CONACYT. Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Germany, 2011, Volume 7, pp. 21–38. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-05432-7>
- [31] CFE (Comisión Federal de Electricidad). Efectos de la inyección de agua residual al acuífero en la planta termoelectrica Mérida, Yucatán. Lesser y Asociados, México, Querétaro. 1991.
- [32] González Hita, L. Dinámica de los contaminantes infiltrados en el acuífero kárstico de Cancún, Quintana Roo. 1st Joint World Congress on Groundwater. Fortaleza, Brasil. IMTA, Repositorio Institucional. 2000. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12013/1925>
- [33] Pérez González, K. Impacto de las fuentes contaminantes en el acuífero kárstico del municipio de Umán, Yucatán. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Geológica. Instituto Tecnológico de Boca del Río. 2019. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20847.25765>
- [34] González-Herrera, R., Sánchez-y-Pinto, I., Gamboa-Vargas, J. Groundwater-flow modeling in the Yucatan karstic aquifer, Mexico.

- Hydrogeology Journal, 10, 539-552. 2002. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10040-002-0216-6>
- [35] González Herrera, R. A., Albornoz Euán, B. S.I., Sánchez y Pinto, I. A., Osorio Rodríguez, J.H. El acuífero yucateco. Análisis del riesgo de contaminación con apoyo de un sistema de información geográfica. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 34(4), 667-683. 2018. DOI: <https://doi.org/10.20937/rica.2018.34.04.09>
- [36] Diario Oficial del Gobierno del Estado de Yucatán. Decreto Número 117. Yucatán, México. 2013.
- [37] Llanes-Salazar R., Rejón-Márquez K. Agua amenazada. Informe sobre la grave contaminación del anillo de cenotes en la Península de Yucatán (México). Fundación para el Debido Proceso. 2022. Recuperado el 18 de diciembre de 2024 de: https://dplf.org/wp-content/uploads/2024/07/agua_amenazada_-_informe_contaminacion_anillo_de_cenotes_yucatan_mexico.pdf
- [38] Diario Oficial de la Federación (DOF). (1998). Norma Oficial Mexicana NOM-ECOL-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público.
- [39] New York Department of Health. "Conference Minutes". Deep Well Injection Conference. Albany, N.Y. 1968.
- [40] CCPY (Consejo de Cuenca de la Península de Yucatán). 2012. Comité Técnico de Aguas Subterráneas para la Zona Metropolitana de Mérida (COTASMEY). Recuperado de: <https://acervo.yucatan.gob.mx/contenidos/COTASMEY.pdf>

R.A. González-Herrera, recibió su título en Ingeniería Civil por la Universidad de Yucatán, México, en 1984, la maestría en Ciencias de la Tierra (Aguas Subterráneas) por la Universidad de Waterloo, Canadá, en 1992 y el doctorado en Ciencias de la Tierra (Aguas Subterráneas) por la Universidad Nacional Autónoma de México en 2005. Actualmente, es Profesor Investigador Titular y Coordinador Académico de Hidráulica e Hidrología en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, México. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores, México, Nivel 1. Sus intereses de investigación incluyen: hidrodinámica de las zonas costeras, factores controladores de la intrusión salina, evaluación de recursos de agua subterránea, modelación del flujo del agua subterránea y solutos en acuíferos heterogéneos, contaminación y rehabilitación de acuíferos y la aplicación de la ciencia a problemas prácticos de contaminación.

ORCID: 0000-0002-6890-3308

J.A. Suverbiel-González, recibió su título en Ingeniería Civil en 2023 y la de maestría en Ingeniería Ambiental en 2025, ambos por la Universidad Autónoma de Yucatán, México. Actualmente se encuentra colaborando en distintos proyectos de divulgación científica en las áreas de Ingeniería Ambiental, Hidráulica e Hidrología en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán. Sus intereses de investigación incluyen: caracterización e hidrodinámica de acuíferos, modelación de flujo subterráneo y de contaminantes en medios kársticos y granulares, aspectos de calidad de agua, gestión de recursos hídricos y aplicación de métodos geofísicos para la caracterización geológica y del subsuelo.

ORCID: 0009-0004-1154-3171

A. Canul-Chuil, recibió su título en Química Industrial en la Universidad Autónoma de Yucatán en el 2000 y la Maestría en Ingeniería en 2005, por la Universidad Nacional Autónoma de México. Trabajó en el Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY) durante el periodo 2000-2002 en la Unidad de Materiales, y en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) del 2005 al 2007 en el departamento de Calidad del Agua. Desde 2007 forma parte de la Junta de Agua Potable y Alcantarillado de Yucatán (JAPAY). Actualmente es Coordinador del Departamento de Operación y Control de Aguas Residuales.

ORCID: 0009-0001-6135-0405

M.H. Cortazar-Cepeda, recibió su título en Ingeniería Civil en 2009, y el grado de Maestro en Ingeniería Ambiental en 2013, ambos por parte de la Universidad Autónoma de Yucatán, México, y el título de Doctor en Ingeniería Civil por la Universidad de Florida, Estados Unidos. Ha trabajado y colaborado en el diseño de varios sistemas de tratamiento de agua residual en el Estado de Yucatán, y actualmente labora como posdoctorante en la Universidad Autónoma de Yucatán, brindando apoyo a la academia y cuerpo académico de Hidráulica e Hidrología. Sus intereses de investigación recaen en: tratamiento de aguas residuales, contaminación de las aguas subterráneas y manejo sustentable de recursos hídricos.

ORCID: 0009-0008-5920-1700