



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN GEOGRAFÍA

**AGUA TRANSFRONTERIZA EN LA FRONTERA MÉXICO-
GUATEMALA-BELICE: EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE FLUJO DE
AGUA SUBTERRÁNEA REGIONAL**

**ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN PUBLICADO QUE PARA OPTAR POR EL
GRADO DE MAESTRO EN GEOGRAFÍA**

PRESENTA

YUSSEF RICARDO ABUD RUSSELL

TUTOR

DR. JOSÉ JOEL CARRILLO RIVERA – Depto. Geografía física, Instituto de Geografía,
UNAM

JURADO

DR. GONZALO HATCH KURI – Escuela Nacional de Ciencias de la Tierra, UNAM

DR. LUIS CHÍAS BECERRIL – Instituto de Geografía, UNAM

DRA. MARÍA DEL CARMEN CARMONA LARA – Instituto de Investigaciones Jurídicas,
UNAM

DRA. ALEJANDRA PEÑA GARCÍA – Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Ciudad Universitaria, CD. MX., diciembre de 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ÍNDICE GENERAL

Resumen	1
Introducción	2
Contexto geográfico, aspectos geológicos y propiedades hidrogeológicas ..	5
Relevancia del karst en la Península de Yucatán	6
Consideraciones teóricas	7
Geografía política: fronteras, soberanía y espacio fronterizo	7
Sistemas Gravitacionales de Flujo de Agua Subterránea: oportunidades desde la Hidrogeología	12
Metodología.....	15
Resultados	18
Identificación de zonas de descarga y recarga de agua subterránea regional	18
Reinterpretación hidrogeoquímica	20
Caracterización de isotopos estables usando $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$	24
Sección geológica y definición de sistemas de flujo de agua subterránea .	27
Discusión.....	29
Conclusiones.....	32
Bibliografía	34

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1. Modelo de los Sistemas de Flujo de Agua Subterránea en una cuenca regional.....	16
Figura 2. Zonas de descarga y recarga de flujos regionales de agua subterránea en México, Guatemala y Belice	19
Figura 3. Características geológicas de las Formaciones en la Península de Yucatán	21
Figura 4. Concentraciones de STD para las muestras analizadas.....	22
Figura 5. Interpretación geoquímica de flujos a partir de análisis de muestras públicamente disponibles	22
Figura 6. Ubicación y representación de datos isotópicos de las muestras de agua	25
Figura 7. Composición isotópica de las muestras analizadas	26
Figura 8. Valores de $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ para las muestras analizadas.....	26
Figura 9. Modelo conceptual de flujos de aguas subterráneas en la Península de Yucatán	28

Resumen

Evidencia sobre la política de gestión de aguas subterráneas en la Península de Yucatán indica que México, Guatemala y Belice carecen de conceptos científicos comunes para el estudio de los flujos compartidos de agua subterránea. En consecuencia, los tratados internacionales actuales no integran un estudio sistémico ni la protección de las aguas subterráneas transfronterizas. En Europa, la UNECE (2000) ha establecido pautas metodológicas y directrices para la gestión de estos cursos de agua subterránea compartidos. Por lo tanto, el objetivo de este artículo es estudiar las implicaciones políticas y los desafíos ambientales en el marco de las políticas de gestión nacionales e internacionales actuales sobre elementos naturales compartidos, como lo es, el agua subterránea. Se trata de un enfoque crítico interdisciplinario de la conceptualización teórica de los límites y la naturaleza social del agua en el ámbito de la Geografía. Además, se aplica la metodología de los Sistemas Gravitacionales de Flujo de Agua Subterránea para desarrollar un modelo hidrogeológico conceptual que analiza los límites regionales de las aguas subterráneas, las condiciones de flujo y las preocupaciones ambientales. A partir del resultado cartográfico sobre distribución de zonas de recarga y descarga de flujos regionales, así como la sección hidrogeológica se concluye que la modelización conceptual de los Sistemas de Flujo puede proporcionar un marco común de conocimiento para lograr la gestión sobre este elemento natural compartido. Con el fin de que las autoridades fronterizas marquen el comportamiento resultante que ligue el binomio recarga-descarga a partir de identificar los sistemas de flujo que recargan o descargan en los países involucrados.

Palabras clave: Flujos de agua subterránea; Agua subterránea transfronteriza; Autoridad del agua, Gestión del agua; Fronteras

Introducción

Hace más de dos décadas, la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (UNECE, por sus siglas en inglés) publicó una guía para el monitoreo y la evaluación de las aguas subterráneas transfronterizas (UNECE, 2000). Este trabajo es útil para identificar los sistemas de flujo de aguas subterráneas bajo una metodología estrechamente vinculada a la propuesta del hidrogeólogo Tóth (1963, 2009). Esta guía indica cuáles son los métodos necesarios para estudiar las aguas subterráneas por separado de las aguas superficiales transfronterizas e intenta identificar posibles sistemas de flujo de aguas subterráneas superpuestos (sistemas multicapa) (UNECE, 2000).

Además, aborda la comprensión de las condiciones de movimiento de las aguas subterráneas a través del estudio de las variaciones espaciales y temporales de las características del flujo, reconociendo la interacción entre el agua y el marco geológico, así como las formas en que las aguas subterráneas se desplazan en fracturas o medios intergranulares (UNECE, 2000). De este modo, reconoce la necesidad de determinar las zonas de recarga y descarga para identificar las actividades humanas y ambientales que podrían afectar cuantitativa o cualitativamente los sistemas de flujo aguas subterráneas.

Hatch-Kuri (2017) y Hatch-Kuri y Carrillo-Rivera (2021) estudiaron la política de la gestión de las aguas subterráneas transfronterizas compartidas en Paso del Norte, ubicado en la frontera entre México y Estados Unidos. En ese trabajo se destacan las asimetrías institucionales y los conceptos científicos que deben emplearse para la evaluación de las aguas subterráneas compartidas. Ambos proponen el diseño y uso de conceptos y métodos científicos desde una matriz interdisciplinaria de la Geografía Política y la Hidrogeología, con el objetivo de generar una política de aguas subterráneas compartidas basada en algunos principios como la integridad territorial y la cooperación entre los Estados parte, como proponen conceptos del derecho como la soberanía interdependiente.

Hatch-Kuri *et al.* (2021) identificaron en el municipio de Calakmul la unidad acuífera administrativa como la base territorial a partir de la cual la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) aplica la metodología del «balance hídrico». Con el resultado de ese balance se define una «disponibilidad de agua» que, una vez analizado el método, se simplifica la complejidad del ciclo hidrológico y se soslayan elementos como el estudio de la calidad fisicoquímica del agua y las relaciones que posee con el ambiente.

La metodología del balance hídrico empleado por la CONAGUA, a efecto de administrar la política de derechos de agua para distintos concesionarios, prescinde de la determinación de las características del agua subterránea, tales como límites naturales, firmas químicas e isotópicas del agua, tiempo de residencia, jerarquía de flujos y su funcionamiento, así como las interacciones ambientales. El acuífero administrativo es un polígono bidimensional para la determinación de la cantidad de agua disponible entre usuarios. Dicha situación es contrastante con la propuesta de Tóth (2016), que considera el agua subterránea como un agente geológico, así como las implicaciones derivadas de esta interacción.

De acuerdo con el Gobierno de México (2023), el «Acuerdo Regional sobre el Acceso a la Información, a la Participación Pública y a la Justicia en Asuntos Ambientales», mejor conocido como «Acuerdo de Escazú», es un instrumento vinculante para México y otros 23 países que ratificaron este compromiso el 3 de marzo de 2018. Entre los objetivos más importantes de este acuerdo, destacan disposiciones específicas respecto a los «defensores» del ambiente, el cuidado del ambiente, la procuración de un ambiente sano y la protección de los derechos de los ciudadanos al acceso a la información ambiental, como ruta jurídica para la justicia y participación democrática en temas ambientales.

Es cada vez más crucial en México considerar estudios multidisciplinarios que consideren el cruce de áreas del conocimiento como la Geografía, la Hidrogeología y las ciencias ambientales y que aborden los desafíos que enfrenta la sociedad en su desarrollo económico y las políticas relacionadas, las cuales pueden tener un impacto en la cantidad y calidad de los elementos ambientales. El

agua subterránea es una línea fundamental de investigación para comprender la estrecha conexión entre los sistemas ambientales y las consecuencias que pueden resultar de la transformación social del entorno natural. Los elementos naturales compartidos en la frontera sur de México requieren fundamentarse en un marco científico sistémico¹ e integral para cumplir con la justicia ambiental, consagrada en el Acuerdo de Escazú (Naciones Unidas, 2018), con el objetivo de mantener un clima de paz y cooperación en este tema entre los países vecinos involucrados.

En consecuencia, los objetivos del presente trabajo consisten en aportar al estudio del agua subterránea compartida entre México, Guatemala y Belice, en el marco de la propuesta que elabora la UNECE (2000) y partiendo del supuesto de que existen «acuíferos transfronterizos» compartidos entre México, Guatemala y Belice (UNESCO, 2015; IGRAC, 2021). Para ello, se propone analizar la información vigente sobre estudios de agua, en el contexto de la legislación de tratados internacionales México-Guatemala y México-Belice. Además, se avanza en la elaboración de un modelo conceptual de funcionamiento del agua subterránea a efecto de determinar las condiciones de frontera (límites horizontal y vertical) de los sistemas de flujo regionales compartidos entre México, Guatemala y Belice, aplicando la teoría de Sistemas Gravitacionales de Flujo de Agua Subterránea (Tóth, 2009; Szocs *et al.*, 2013).

¹ En este trabajo, cuando se refiere al concepto de «sistémico» este deberá comprenderse dentro de la visión compartida que tienen la geografía crítica y los Sistemas de Flujo. Esto es, analizar, identificar, clasificar, analizar, modelar y estudiar los fenómenos desde la dialéctica-relacional (Harvey, 1996), toda vez que no existe la cosa en sí y esta depende de sus relaciones intrínsecas y con otros elementos del sistema en que ocurre. Dentro de una simetría argumentable, la Teoría de Sistemas Gravitacionales de Flujo de Agua Subterránea (Tóth, 2009) consta de un marco teórico y metodológico desde el cual se estudia el agua subterránea como un sistema compuesto por diferentes jerarquías y condiciones contrastantes de movimiento en interacción con otros sistemas ambientales en un referente geológico continuo pero heterogéneo. Esto es, se estudian propiedades intrínsecas del agua (edad, por ejemplo), además de sus características químicas, verbigracia la interacción con los horizontes estratigráficos del referente geológico.

Contexto geográfico, aspectos geológicos y propiedades hidrogeológicas

En la Península de Yucatán la temperatura media anual oscila entre 25.8 y 26.3°C. La precipitación media anual varía de 550 a 1500 mm durante la temporada de lluvias, de junio a noviembre. La evapotranspiración potencial media anual se sitúa entre 850 y 1600 mm (Bauer-Gottwein *et al.*, 2011), con la porción noroeste siendo más seca y el sureste concentrando mayor humedad.

La Península de Yucatán forma parte del Bloque de Yucatán, que es una microplaca continental que abarca más de 450,000 km² y cubre partes del norte de Guatemala y Belice. Es una plataforma evaporítica/carbonatada de calizas y dolomitas con un espesor de 6 kilómetros que comenzó a depositarse desde el Jurásico Tardío (163.5 millones de años) hasta el Holoceno. Se trata de una plataforma sumergida de estratos sedimentarios generalmente casi horizontales (Rosenfeld, 2002; Bauer-Gottwein *et al.*, 2011).

Prol-Ledesma *et al.* (2018) informa sobre concentraciones de flujo de calor en la Península de Yucatán sobre el cráter de Chicxulub y sus inmediaciones, con valores que oscilan desde 50 hasta 80 mW/m². Sin embargo, no existen datos sobre el gradiente geotérmico en la Península de Yucatán. Bauer-Gottwein *et al.* (2011) concluyen que la conductividad hidráulica efectiva en la Península de Yucatán varía en las direcciones X, Y y Z y depende en gran medida de las principales fracturas y conductos, oscilando desde 10⁻⁴ m/s a escala de 10 cm hasta 1 m/s a escala de 100 km. Sin embargo, las consideraciones de las propiedades del agua involucradas en este parámetro habría que actualizarlas con base en lo sugerido por Hubbert (1940).

Relevancia del karst en la Península de Yucatán

El Bloque de Yucatán se extiende sobre más de 450,000 km² en la Península de Yucatán en México, así como en el norte de Guatemala y Belice (Rosenfeld, 2002). La posición promedio del basamento se encuentra a aproximadamente 6 km de profundidad y está cubierta por una plataforma evaporítica/carbonatada estratificada horizontalmente, formada desde el Jurásico Tardío hasta el Cuaternario (Rosenfeld, 2002). Este sistema kárstico se encuentra entre las formas de relieve más extensas y distintivas del planeta.

Gondwe *et al.* (2010) argumentaron que, en la Península de Yucatán, aproximadamente el 98.5% del territorio es utilizado por Ecosistemas Dependientes del Agua Subterránea (EDAS). Ese estudio determinó que tanto los seres humanos como los ecosistemas dependen de fuentes de agua subterránea con el mismo valor. Perry *et al.* (2021) propusieron ideas sobre las dimensiones del karst de la Península de Yucatán como un «acuífero», aún se espera una conceptualización clara y común sobre sus límites, tanto horizontal como vertical.

Bauer-Gottwein *et al.* (2011) describieron los límites del «acuífero kárstico de la Península de Yucatán» al interpretar las principales fallas y la edad de las Formaciones. Un resultado crucial es el establecimiento del Arco de La Libertad en el norte de Guatemala como el límite sur del acuífero kárstico. Perry *et al.* (2021) estudiaron la Formación Icaiché en la parte centro-sur de la Península, proponiendo que la disolución de esta espesa formación de yeso está asociada con la subsidencia del terreno en forma de *poljes* (depresiones kársticas) y dolinas colapsadas (conocidos localmente como cenotes). Basándose en la química del agua de la Laguna de Bacalar y el río Hondo, estos autores proponen que el agua subterránea se desplaza a través de un «acuífero profundo», que enriquece el agua con sulfatos (SO₄²⁻), y descarga en la costa de Quintana Roo. Ese estudio sugiere que las dimensiones del acuífero profundo se extienden hasta Guatemala y Belice.

Además, la UNESCO (2015) afirmó haber identificado al menos dos «acuíferos transfronterizos» compartidos entre México, Guatemala y Belice. Sin embargo, la definición de estas unidades transfronterizas no hace referencia sobre las condiciones de frontera, verticales y horizontales, ni tampoco a las características de las Formaciones geológicas con las que se asocian estos «acuíferos transfronterizos». Estos mismos polígonos, y varios otros adicionales, fueron publicados por IGRAC (2021) como parte del reporte de los «acuíferos transfronterizos» del mundo.

La política nacional de agua de México, en cuanto a la unidad acuífera, guarda similitudes con la propuesta de la UNESCO (2015) para las unidades acuíferas transfronterizas, incluyendo el «acuífero kárstico» de la Península de Yucatán. La definición de la UNESCO (2015) de acuíferos transfronterizos también proyecta una visión de «flujo contenido» o «flujo interno», como si las condiciones de flujo estuvieran limitadas a los polígonos bidimensionales (acuíferos).

Consideraciones teóricas

Geografía política: fronteras, soberanía y espacio fronterizo

Minghi (2018) argumenta que existen pocos estudios científicos en Geografía Política que busquen examinar las implicaciones de los «recursos comunes» que comparten los Estados con límites político-administrativos en común. En el caso de las cuencas transfronterizas,² sostiene que las fronteras trazadas en los ríos controlan las relaciones de poder en torno al uso «aguas arriba» y «aguas abajo», desde una perspectiva de cuenca. Así como en el caso de la competencia por el uso de elementos naturales en los océanos, es de suma importancia contar con una definición más precisa del concepto de «soberanía» (Minghi, 2018).

² En la Ley de Aguas Nacionales no se define «cuenca transfronteriza». Sin embargo, se recupera el concepto de García-García y Kauffer-Michel (2011), quienes estudiaron el agua superficial transfronteriza compartida entre México y Guatemala. Para estos autores, la cuenca transfronteriza se puede conceptualizar como un territorio geográfico intrincado, cuya configuración se teje mediante una red hidrográfica que sirve como escenario de interacciones naturales y sociales de gran complejidad. Esta trama de relaciones se ve invariablemente entrecruzada por una demarcación política internacional, la cual, al establecer un límite soberano, fragmenta el espacio en cuestión en dos o incluso múltiples Estados soberanos.

Ese autor argumenta la «insuficiente información» sobre los elementos naturales transfronterizos como un tema central a considerar en el contexto de las implicaciones políticas respecto a la administración compartida entre estados vecinos.

El debate sobre la soberanía se profundiza en Ribeiro (2012), quien plantea el concepto de «soberanía interdependiente» con el fin de comprender cómo los Estados implementan las condiciones necesarias para el desarrollo de marcos de acción conjunta, orientados en esquemas de cooperación para resolver conflictos y tensiones que surgen en los espacios fronterizos. El concepto de espacio fronterizo se retoma del trabajo de Hatch-Kuri (2017, p. 29), como la «síntesis de la interacción de una sociedad [...] estrechamente ligada al intercambio y la interacción y circulación de dos o más naciones o pueblos. [la interacción] puede ser política, económica, social, cultural, y a medida que las relaciones sociales se van intensificando [en la frontera, efectivamente se llega a] la producción del espacio fronterizo» de manera cada vez más «tangibile y compleja».

Por lo tanto, en los espacios fronterizos existen ambientes sociales, políticos, económicos y culturales de interacción intensa o menor, de acuerdo con el contexto específico que se estudie, en donde también se comparten elementos de la naturaleza. En el contexto de la frontera entre México, Guatemala y Belice, se identificaron relaciones internacionales bilaterales, consagradas en Acuerdos Interinstitucionales de la CILA Sur México-Guatemala y CILA Sur México-Belice. Es de interés conocer qué implicaciones tiene para el manejo de elementos naturales compartidos la existencia de estos Acuerdos Interinstitucionales:

- “Acuerdo entre los Estados Unidos Mexicanos y la República de Guatemala sobre la Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente en la Zona Fronteriza” (Gobierno de México, 2022b), y
- “Acuerdo entre los Estados Unidos Mexicanos y Belice sobre la protección y mejora del medio ambiente y la conservación de los recursos naturales en la Zona Fronteriza” (Gobierno de México, 2022a).

El artículo 4° del Acuerdo entre los Gobiernos de México y Guatemala, así como el artículo 5° del Acuerdo entre los Gobiernos de México y Belice, instruyen a los firmantes a que las respectivas Comisiones de Límites y Aguas (CILA) realicen estudios de aspectos ambientales relacionados con la protección y mejora del ambiente en el espacio fronterizo. Esta instrucción identifica tres conceptos que resultan relevantes para brindar mayor certeza respecto a la acción específica que se llevará a cabo. Los conceptos son los siguientes:

- Estudios ambientales;
- Protección y mejora del ambiente, y
- Espacio fronterizo.

Por esa razón, es importante comprender el funcionamiento natural del agua subterránea, a efecto de tender puentes hacia la manera en que la disciplina científica de la hidrogeología moderna puede aportar al estudio del agua subterránea transfronteriza en la Península de Yucatán, como parte de los «estudios ambientales» que demandan los Acuerdos Interinstitucionales. Asimismo, y porque es un concepto de los acuerdos interinstitucionales revisados, es relevante conocer las discusiones académicas entorno al «espacio fronterizo» entre estos países.

Respecto al agua subterránea compartida entre países, la ONU emitió la resolución 68/118 «Acuíferos Transfronterizos», con una propuesta simétrica a la de la UNESCO (2015), esto es, unidades territoriales bidimensionales (acuíferos) que son atravesados por fronteras de uno o más países (de alcance transfronterizo). Esta resolución no es jurídicamente vinculante, sin embargo, ejerce presión internacional sobre los países a efecto de que avancen en la determinación de las características, cualidades y dimensiones del agua subterránea que comparten, así como las acciones necesarias para su protección.

El trabajo de Hatch-Kuri y Carrillo-Rivera (2023) estudió las relaciones bilaterales entre México y Estados Unidos en materia de gestión de agua subterránea compartida. En México, reconocen esos autores, no existe una definición de acuífero transfronterizo mientras que, en Estados Unidos, la definición

de acuífero transfronterizo ha sido influenciada por la resolución 63-124 «Acuíferos Transfronterizos» de la ONU (Hatch-Kuri y Carrillo-Rivera, 2023).

En Estados Unidos se han publicado trabajos científicos como los de Sánchez y Eckstein (2017), que ha sido la base científica a partir de la cual el Centro Internacional para la Evaluación de Recursos de Agua Subterránea (IGRAC, por sus siglas en inglés) hizo público en 2021 una capa de atributos geoespaciales. En ella, se reconocen más de 70 acuíferos transfronterizos en la frontera entre México y Estados Unidos (IGRAC, 2021). Hatch-Kuri y Carrillo-Rivera (2023) concluyen que existe una influencia relevante entre los instrumentos de política internacional y los productos científicos en la política de agua compartida del gobierno de Estados Unidos, al menos en su relación con México, máxime prevalece la visión del acuífero transfronterizo.

García-García y Kauffer-Michel (2011) estudiaron las cuencas compartidas entre México, Guatemala y Belice. En su estudio, los autores tomaron en consideración el papel que juega la CILA, mexicana y sus contrapartes, así como la sociedad civil en la planificación y ejecución de programas y proyectos en el espacio fronterizo. Concluyen que la CILA México-Guatemala y CILA México-Belice enfocan sus esfuerzos en «hacer notar físicamente la línea divisoria» y priorizan la «defensa del territorio de cada país en sus fronteras terrestres y fluviales» (García-García y Kauffer-Michel, 2011, p. 156).

Kauffer-Michel (2011) identifica conflictos en materia de agua entre México y Guatemala, cuando este último reclamó al primero, en 2009, una compensación por el uso de agua superficial, aprovechada en hidroeléctricas en el territorio mexicano, que originalmente inicia su escurrimiento en Guatemala. Kauffer-Michel (2011, p.163) advierte que la política exterior en materia de agua de ambos países está «enfocada hacia la soberanía nacional» y ante momentos de tensión política prevalece el resguardo de elementos naturales asumidos como parte de la soberanía de cada país.

Olvera-Alarcón *et al.* (2011) identifica factores de conflicto en la cooperación internacional por la cuenca del río Hondo, compartida entre México, Guatemala y Belice. Esos autores identifican en el ámbito institucional para estos países la poca claridad que existe en las competencias institucionales y cómo ejercerlas, el desconocimiento sobre acuerdos entre los países involucrados, así como la actual carencia de una ley de agua en Guatemala, respecto a las existentes en Belice y México. Un factor muy relevante del hallazgo del trabajo de Olvera-Alarcón *et al.* (2011, p.130), es la inexistencia en los tres países de un «marco jurídico que aborde la problemática de cuencas compartidas».

Kauffer-Michel (2010) estudia las relaciones internacionales entre México y Guatemala en materia de agua transfronteriza a partir del estudio de caso de la cuenca del río Candelaria. Los hallazgos de este trabajo advierten que este río, presente en el territorio de Guatemala, Belice y México, no es objeto de acuerdos de carácter «coercitivo» entre los tres países. Y además, Kauffer-Michel (2010) destaca que este río no es de interés para la política transfronteriza de agua en México, mientras que en Guatemala es prácticamente inexistente en términos de los escasos estudios realizados por parte de ese país. Todo lo anterior, se reproduce en un contexto transfronterizo, México-Guatemala-Belice, donde «prevalece la percepción de una abundancia de agua» (Kauffer-Michel, 2010, p. 207).

Sistemas Gravitacionales de Flujo de Agua Subterránea: oportunidades desde la Hidrogeología

Desde que se expuso en 1963 como un modelo analítico simple de la distribución del flujo de aguas subterráneas en una pequeña cuenca hidrográfica, la propuesta de Tóth (1963), la Teoría de los Sistemas Gravitacionales de Flujo de Aguas Subterráneas, se ha convertido en una teoría completa del flujo regional de aguas subterráneas (Tóth, 2009). Es una «teoría paraguas» compuesta por dos subteorías: 1. La hidráulica del flujo de aguas subterráneas a escala de cuenca, y 2. La Agencia Geológica para el Flujo de Aguas Subterráneas (Tóth, 2016). El tema de la «Subteoría 1» refiere al patrón espacial y la intensidad dinámica del flujo de aguas subterráneas en cuencas hidrológicas, definidas topográficamente.

Este flujo se organiza en sistemas de flujo transversales, impulsados por las diferencias de elevación en el nivel del agua subterránea, a través de un referente rocoso hidráulicamente continuo. Debido a la continuidad hidráulica del dominio de flujo, los sistemas de flujo se desarrollan de manera ubicua y simultánea en la porción porosa de la corteza superior de la Tierra. Por otro lado, la «Subteoría-2» aborda los procesos, productos y manifestaciones de la interacción entre el agua subterránea en movimiento y su ambiente en la superficie y por debajo de la superficie (Tóth, 2016). Como resultado de esta propuesta, surgió un paradigma hidrogeológico distinto de los existentes, que implicó una transición de la idea tradicional de «acuíferos confinados o artesianos» a la percepción contemporánea de «sistemas de flujo regionalmente no confinados y transversales».

La Teoría de Sistemas Gravitacionales de Flujo de Agua Subterránea de Tóth (1963) establece distintas jerarquías de flujo. Los locales se caracterizan por tener su zona de recarga en un punto topográficamente elevado y su punto de descarga en una depresión topográfica, que se encuentran geográficamente contiguos, lo que implica distancias y tiempos de recorrido relativamente cortos. En el caso de los sistemas intermedios, la característica principal radica en la posibilidad de encontrar uno o más puntos topográficamente elevados y deprimidos, aunque no

necesariamente su zona de recarga sea la más alta ni su zona de descarga la más baja.

Los flujos regionales, en cambio, se distinguen por tener su zona de recarga en la divisoria de aguas de la cuenca y su zona de descarga en la ubicación más baja. Los regionales anidan a los flujos de tipo local e intermedio. Todas estas clasificaciones están sujetas a las condiciones impuestas por los límites del área de estudio, particularmente el espesor de la formación geológica desde la superficie hasta el basamento, y la extensión geográfica de la cuenca hidrológica, no hidrográfica, como objeto de análisis (Tóth, 1963).

El estudio del ciclo del agua ha sido tradicionalmente fragmentado, donde el agua superficial y el agua subterránea se examinan como elementos separados, con metodologías que no analizan las implicaciones ambientales de la circulación del agua (Kachadourian-Marras *et al.*, 2020). Siguiendo a Hatch-Kuri y Carrillo-Rivera (2023) y a Kachadourian-Marras *et al.* (2020), por ejemplo, en un espacio fronterizo los cambios en el uso del suelo pueden afectar las condiciones ambientales de las zonas de recarga de sistemas de flujo regional de agua subterránea, lo que sugiere un cambio en las condiciones en sus zonas de descarga.

Por lo que, en el contexto de agua subterránea transfronteriza, compartida por dos o más países, es de vital importancia definir y establecer las condiciones hidrogeológicas del sistema, a efecto de determinar la responsabilidad que tienen los Estados en torno a la política ambiental de manejo del agua subterránea en las zonas de recarga y descarga. Así como un estricto control del ordenamiento territorial para evitar daños al futuro que, a la postre, limiten las relaciones internacionales en materia ambiental.

Por un lado, este debate requiere de los aportes científicos de la Hidrogeología, a efecto de realizar los estudios de gabinete y campo suficientes para determinar las condiciones en las que el agua subterránea circula, así como sus implicaciones ambientales.

Para la Geografía, específicamente la Geografía Política, este debate exige enfocarse en conocer la historia de organización política del espacio fronterizo, y de los tratados internacionales bajo los cuales se norma el agua transfronteriza. Dentro de ese análisis, es necesario identificar instituciones, de México e internacionales, involucrados con el propósito de contar con los elementos suficientes para resolver la tensión resultante de la aplicación de la política nacional en espacios fronterizos.

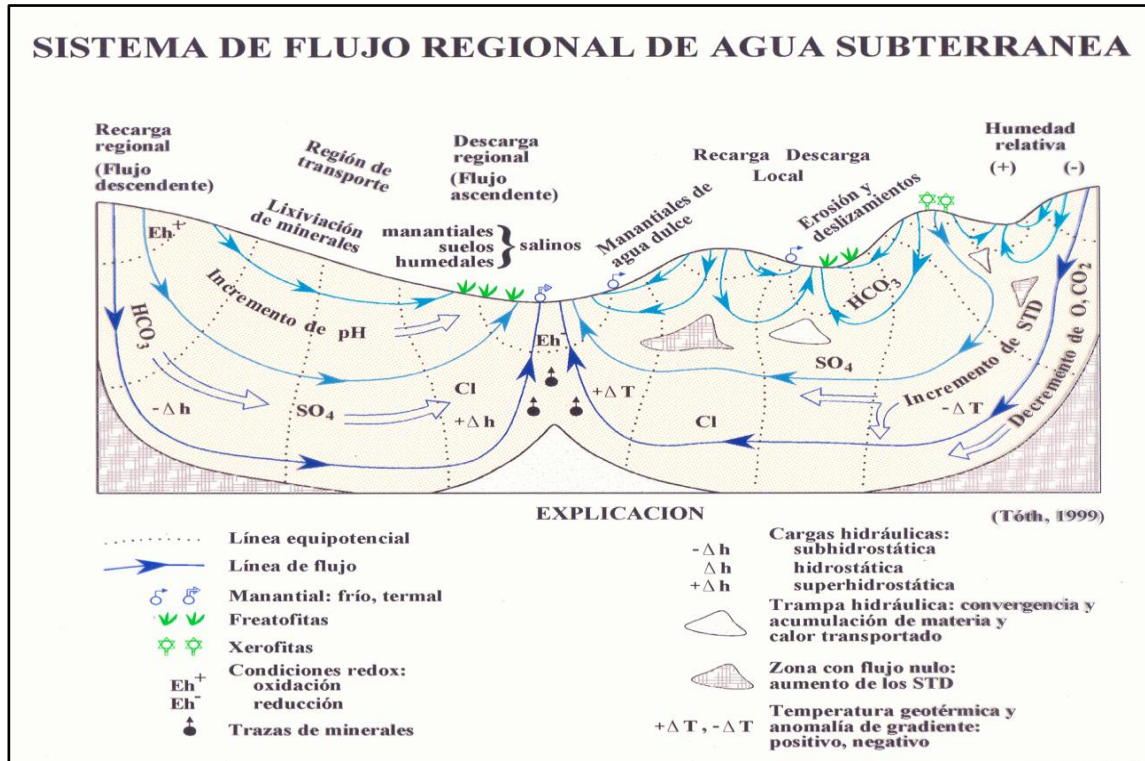
Por lo tanto, la conjunción interdisciplinaria de la Hidrogeología moderna (Tóth, 1963), así como las discusiones contemporáneas sobre los espacios fronterizos en contextos de aguas transfronterizas (Ribeiro, 2012; Hatch-Kuri, 2017), la CILA Sur ha firmado tratados en los que se establece la mejora del ambiente en el espacio fronterizo como una de las acciones a llevar a cabo. Sin embargo, no se encontró evidencia en documentos técnicos elaborados por esta autoridad respecto a la determinación de áreas del ambiente sujetas a protección y tampoco se proporcionaron indicadores, parámetros o indicadores basados en criterios científicos a partir de los cuales sea posible determinar la extensión y naturaleza de la protección ambiental.

Metodología

El estudio de caso de la Península de Yucatán tiene como objetivo determinar el marco hidrogeológico de los sistemas de flujo de aguas subterráneas y sus límites espaciales laterales y verticales situado en el espacio fronterizo de México, Guatemala y Belice. Así, se buscó elaborar un modelo conceptual, entendido en el contexto de los Sistemas de Flujo Gravitacionales de Agua Subterránea, como expresión de los componentes naturales del ambiente que controlan aspectos y condiciones hidrogeológicas que permiten la determinación específica de las jerarquías de flujo y las implicaciones de estos en su interacción ambiental. De acuerdo con Tóth (1970, p. 171), las condiciones físicas y químicas de las distintas jerarquías de flujo están controladas por uno o hasta la combinación de tres aspectos geográficos, topográficos, geológicos y del clima.

La información de esos aspectos ambientales se obtuvo del análisis comparado de las bases de datos públicamente accesibles para Guatemala y Belice, sobre elementos naturales identificables en superficie. Los resultados del manejo de esos datos geoespaciales serán analizados juntamente con la interpretación hidrogeoquímica de muestras de agua subterránea (Abud-Russell *et al.* 2021), validación isotópica de los flujos propuestos con base en la interpretación hidrogeoquímica; elaboración de una sección geológica con el propósito de conocer las posibles condiciones de interacción química del agua con los diferentes materiales de los horizontes estratigráficos, así como la determinación de la posición del basamento (ver).

Figura 1. Modelo de los Sistemas de Flujo de Agua Subterránea en una cuenca regional



Fuente. Traducido de Tóth (1999). Véase en la Figura 1 la distinción de tres jerarquías de flujo, con expresiones espaciales y temporales diferenciadas, así como manifestaciones superficiales específicas que permiten su identificación. Todo ello, en un contexto de interacciones e implicaciones ambientales complejas, en donde las condiciones de frontera significan la posición del basamento (límite vertical) y las zonas de recarga regional (límite horizontal).

Basados en Kachadourian-Marras *et al.* (2020), se recuperaron datos que explícitamente manifiesten zonas de descarga, tránsito y recarga de agua subterránea regional a partir de indicadores en superficie como: agua superficial perenne, nivel piezométrico, topofomas, tipo de suelo, vegetación y uso del suelo de Guatemala y Belice. Debido a la naturaleza de la metodología, que implica diversas variables cuantitativas y cualitativas que corresponden a elementos naturales y sociales, se interpreta que los polígonos resultantes están constituidos por áreas ambientales.³

³ Toda vez que la metodología aplicada de Kachadourian-Marras *et al.* (2020) genera polígonos espaciales, resultado de la correlación de cinco variables del entorno natural (agua superficial, -nivel del- agua subterránea, topofomas, tipo de suelo y vegetación), así como una variable "social" (uso de suelo, representados en un resultado cartográfico), se propone que los polígonos resultantes de zonas de descarga, descarga-tránsito, tránsito, tránsito-recarga y recarga cuentan con los datos y

Las fuentes de información utilizadas fueron las siguientes:

- Se utilizó la cobertura terrestre de MODIS de América del Sur del Estudio de Visualización Científica de la NASA. Esta información data de la década de 1990 y proporcionó información sobre vegetación y uso de la cobertura terrestre. Es una base de datos generada por satélite que proporcionó más de 3 mil entradas de información para Guatemala y Belice (NASA, 2022).
- La Base de Datos de Suelos y Terrenos (SOTERLAC) para América Latina y el Caribe, en su versión 2.0, proporcionó información sobre estructuras de relieve regional, suelo, vegetación y cuerpos de agua para ambos países. Esta información asequible públicamente y recopilada a lo largo de cuatro décadas de esfuerzo conjunto entre el ISRIC, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) proporcionó más de siete mil entradas de datos (ISRIC, 2022).
- Se recuperó el estudio de Hatch-Kuri y Carrillo-Rivera (2023), el de García-García y Kauffer-Michel (2011) y UNESCO (2015) para conocer los esquemas actuales de estudio científico y gestión del agua transfronteriza entre México, Guatemala y Belice. Esta información se contrastó con el análisis de las atribuciones de las autoridades mexicanas en materia de agua, y la política de evaluación científica y de derechos de agua vigente.

En la sección de *Discusión* se argumentan las posibles implicaciones que podrían tener estos resultados respecto al estado actual de la información disponible para la elaboración y discusión de las políticas nacionales e internacionales orientadas a la gestión compartida de las aguas subterráneas compartida entre México, Guatemala y Belice.

variables suficientes del entorno natural por lo que, en consecuencia, en su interior, existen áreas ambientales que son de interés proteger, conservar y estudiar a efecto de que prevalezcan las condiciones naturales de las componentes regionales de los sistemas de flujo de agua subterránea.

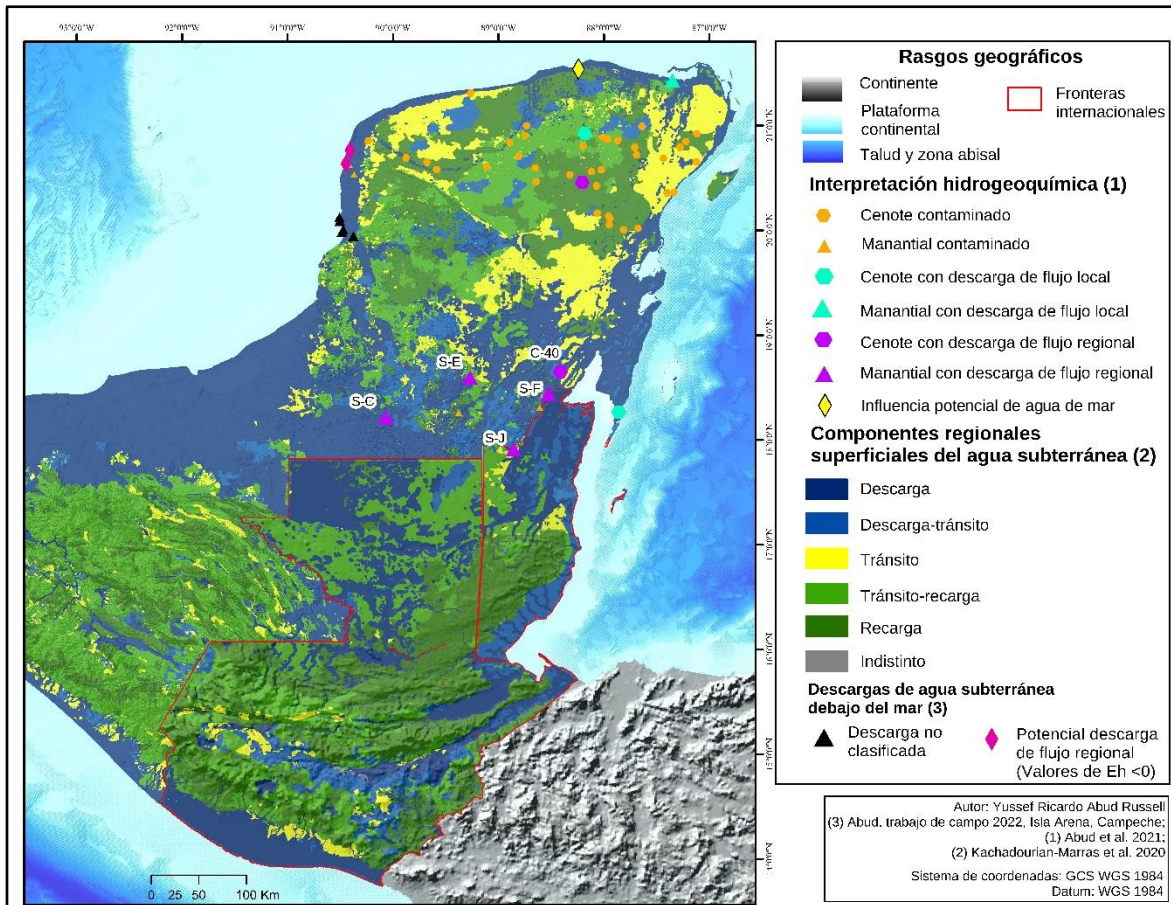
Resultados

Identificación de zonas de descarga y recarga de agua subterránea regional

Con el fin de conocer las posibles regiones ambientales de descarga o recarga de agua subterránea compartidas por estos países, se replicó la metodología desarrollada por Kachadourian-Marras *et al.* (2020) para Guatemala y Belice. El resultado (ver Figura 2) constituye un avance en la identificación de las zonas regionales de descarga y recarga de aguas subterráneas basadas en indicadores ambientales (agua superficial, topografía, tipo del suelo, vegetación y uso del suelo) en estos países. Estos resultados carecen de una variable, el nivel piezométrico, que no estaba públicamente disponible cuando se realizó esta investigación. Sin embargo, al considerar que el nivel base de los ríos y cuerpos de agua perenne es una forma de descarga de agua subterránea (USGS, 2022), las capas geoespaciales de cuerpos de agua perenne fueron de utilidad para determinar zonas de descarga.

La Figura 2 muestra la distribución y proporción de los polígonos ambientales cerca de la frontera entre México, Guatemala y Belice que podrían estar sujetos a políticas de mejora ambiental, ya que esta metodología se desarrolla con base en la interacción de diversas variables naturales. Notar que el estado de Chiapas, México y la costa sur de Guatemala comparten una extensa zona de descarga que, hacia el norte, siguiendo la línea fronteriza, se convierte en extensas zonas de recarga de agua subterránea, asociados con la Sierra Madre del Sur y Sierra Madre de Chiapas, que se comparten entre el territorio mexicano y guatemalteco.

Figura 2. Zonas de descarga y recarga de flujos regionales de agua subterránea en México, Guatemala y Belice



Fuente. Elaboración propia con base en Kachadourian-Marras *et al.* (2020); Abud-Russell *et al.* (2021) y trabajo de campo en la localidad de Isla Arena, Calkiní, Campeche, México, enero-febrero del 2022. Nota. Los triángulos de color negro refieren a evidencias halladas durante el trabajo de campo (2022) de agua subterránea descargando por debajo del mar, en ecosistemas de manglar y marismas.

También, en la porción del territorio mexicano que corresponde al este del estado de Tabasco y sur del estado de Campeche, México comparte extensas zonas de descarga con Guatemala. Hacia el límite entre los estados de Campeche y Quintana Roo, en Guatemala y Belice se identifican zonas regionales de recarga y tránsito-recarga, interrumpidos por el cauce del río Hondo, interpretado como una zona regional de descarga.

Reinterpretación hidrogeoquímica

Parte del análisis hidrogeoquímico implica conocer las características mineralógicas de los horizontes estratigráficos en la Península de Yucatán (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Esto permite apreciar las posibles rutas e interacciones que tuvo el agua subterránea con la roca al comparar su composición geoquímica con los minerales presentes en la roca.

Bajo este supuesto, se retomaron los resultados del análisis hidrogeoquímico realizado por Abud-Russell *et al.* (2021). Dicho resultado se analiza en el contexto de los hallazgos cartográficos de Kachadourian-Marras *et al.* (2020), asimismo de los resultados de parámetros físicoquímicos obtenidos en trabajo de campo en Isla Arena, Calkiní, Campeche, entre enero y febrero de 2022.

Así, se propone una definición de sistemas de flujo en la Península de Yucatán, tomando en consideración descargas de agua subterránea en el Área Natural de Celestún, cerca de la costa (Figura 2, rombos morados), que representan 2 manantiales ubicados por debajo del mar. El valor negativo de Eh (potencia de óxido-reducción) se tomó como un indicador que sugiere la descarga de flujos subterráneos de jerarquía regional o intermedia.

Adicionalmente, se proyectaron los manantiales (puntos de descarga) identificados con letras C, E, F y J, muestreados por CONAGUA en 2004, según la base de datos geospaciales del INEGI (2008), e interpretados como sitios de descarga de agua subterránea regional (Abud-Russell *et al.*, 2021). Estos fueron re-interpretados en el contexto del referente geológico regional de la Península de Yucatán (Figura 3).

Figura 3. Características geológicas de las Formaciones en la Península de Yucatán

Formación	Edad	Descripción física	Contenido de minerales
Carrillo Puerto	Plioceno-Mioceno	Caliza	Calcita (CaCO ₃)
Pisté-Chichen Itzá	Oligoceno-Eoceno	Caliza	Calcita (CaCO ₃) y piritita (FeS ₂)
Icaiché	Eoceno-Paleoceno	Arenisca, caliza y evaporitas	Calcita (CaCO ₃), cuarzo (SiO ₂), dolomita (CaMg(CO ₃) ₂), magnesita (MgCO ₃), y aragonita (CaCO ₃)
Albion	Cretácico Medio	Rocas evaporíticas	Yeso (CaSO ₄ ·2H ₂ O) and anhydrite (CaSO ₄)
Todos Santos	Triásico-Jurásico	Conglomerados; areniscas rojas (capas rojas)	Mg, Na+K y Fe dependiendo de los sedimentos siliciclásticos.
Basamento	Precámbrico medio-Paleozoico	Metasedimentario; rocas ígneas intrusivas	Sílice (SiO ₂), y plagioclasa

Fuente. Elaboración propia con base en López-Ramos (1973).

Los resultados de las muestras reportadas por Abud-Russell *et al.* (2021) (ver Figura 4) y proyectados en la sección estratigráfica (ver Figura 9) de agua subterránea indican una dominancia de calcio, lo que sugiere que el agua que se infiltra ha viajado a través de caliza. Los datos de temperatura del agua registran que las muestras C (30.2 °C), F (30 °C) y J (28.5 °C) tienen una diferencia de al menos 4.5 °C, y hasta 6.2 °C con la muestra de manantial más fría, E (24 °C). Los valores de STD para estas muestras se encuentran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** En el contexto de una región kárstica, se identificaron tres grupos: Grupo 1 (Gp1); Grupo 2 (Gp2) y Grupo 3 (Gp3). El Gp1 está asociado a una naturaleza epigenética y Gp2 puede estar relacionado con un karst de yeso hipogénico, mientras que Gp3 sugiere la disolución de halita en la costa norte de la Península de Yucatán (ver Figura 2).

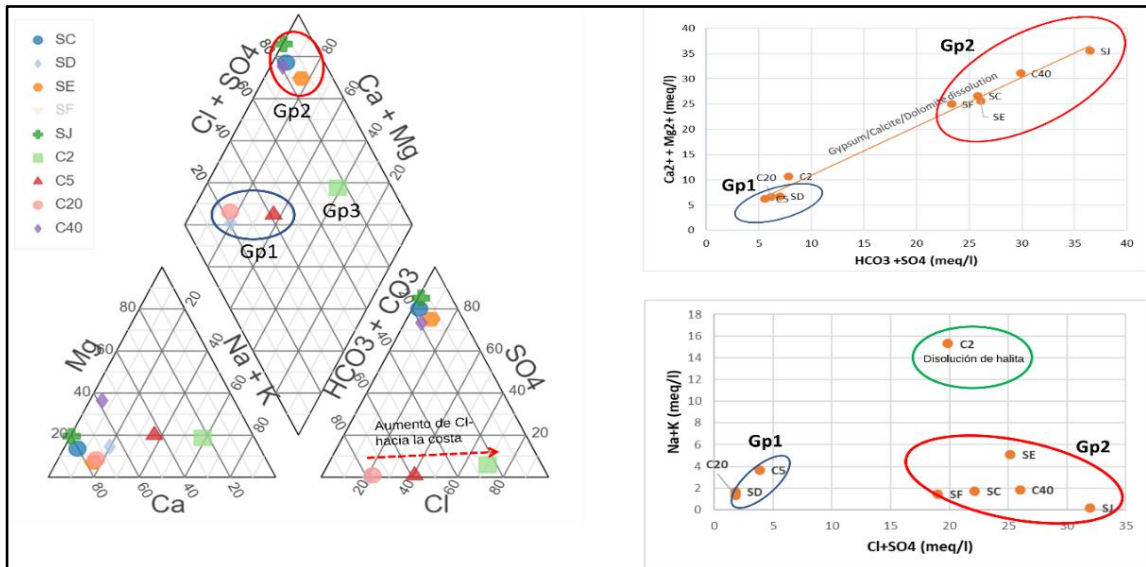
Figura 4. Concentraciones de STD para las muestras analizadas

Muestras no contaminadas ($\text{NO}_3^- \leq 10\text{mg/L}$)	STD (Na, Ca, Mg, Cl, SO_4 , HCO_3^- & K) (mg/L)	Temperatura ($^\circ\text{C}$)
Manantial C	1870.23	30.2
Manantial D	655.5	26.0
Manantial E	2032.01	24.0
Manantial F	1723.16	30.0
Manantial J	2495.42	28.5
Cenote 5	669.35	23.1
Cenote 2	1637.67	27.6
Cenote 20	2445.31	29.0
Cenote 40	1723.16	30.0

Fuente. Elaboración propia con base en Abud-Russell *et al.* (2021).

Otro criterio que podría limitar la profundidad de la circulación del agua a través de las rocas del Mesozoico es la presencia de estratos jurásicos de origen continental (Formación Todos Santos), constituidos por conglomerados y areniscas (capas rojas) que asignarían una composición diferente al agua subterránea, más rica en Mg o Na + K dependiendo de la fuente de los sedimentos siliciclásticos, y con una concentración más alta de Fe (ver Figura 3 y Figura 4).

Figura 5. Interpretación geoquímica de flujos a partir de análisis de muestras públicamente disponibles



Fuente. Abud-Russell *et al.* (2021).

En el Diagrama de Piper es posible advertir el proceso de tránsito del agua subterránea y la distinción de, al menos, dos jerarquías de flujo distintas. Las muestras C2 y C5 viajaron a través de diferentes referentes geológicos al resto, mientras que C20 representa el tipo de agua más joven. Las muestras en el Grupo 2 han circulado a través de los mismos medios geológicos durante el período más prolongado, como se evidencia en los gráficos de Cl-SO₄-HCO₃.

A partir del análisis comparado de la Figura 5 y la Figura 3, se sugiere que el agua muestreada ha fluido a través de rocas del Cenozoico. El carácter de sulfato de las muestras de Gp2 sugiere un recorrido más largo, ya que la Formación cretácica no ha alcanzado niveles tan profundos como las unidades paleozoicas; por lo tanto, implica que el agua ha fluido a través de rocas carbonatadas del Mesozoico, probablemente restringida por los niveles evaporíticos que se encuentran intercalados entre las rocas carbonatadas, como sugiere Perry *et al.* (2021).

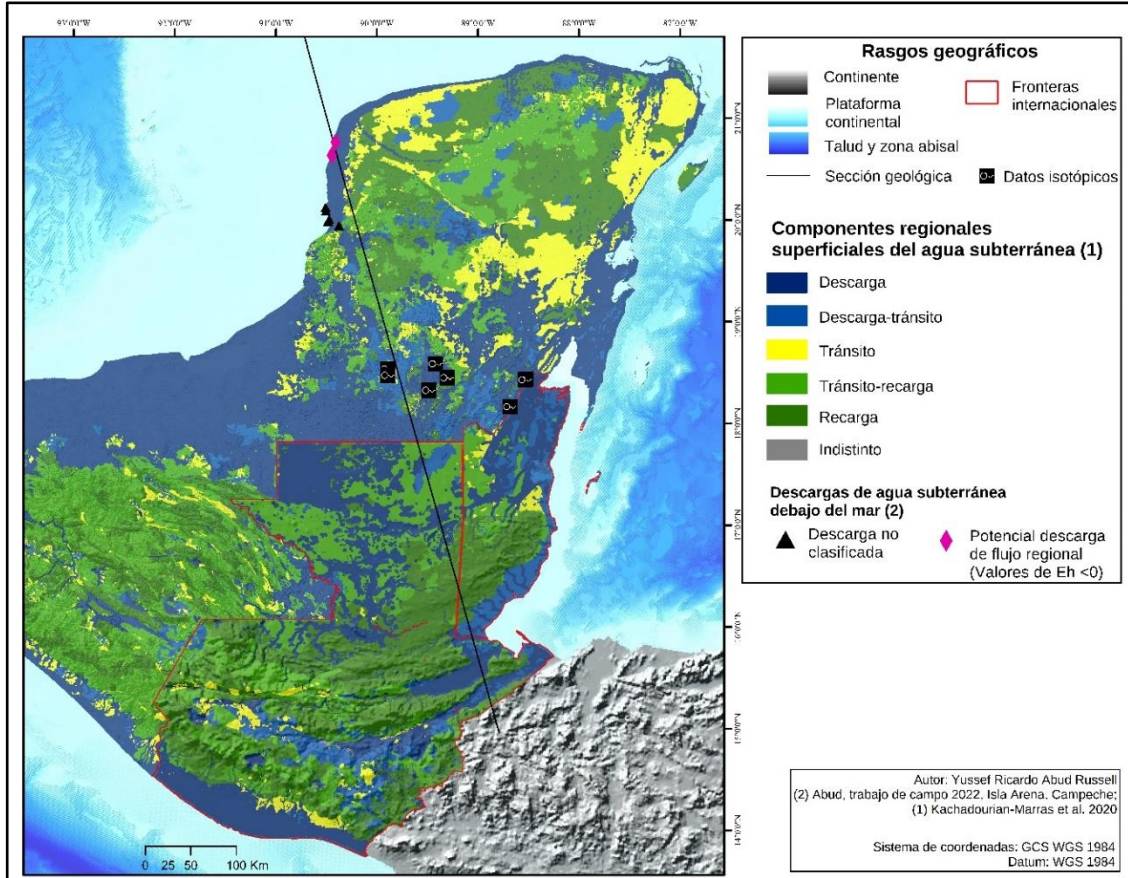
Se estima que el sistema de flujo de agua subterránea descarga en el Río Hondo (muestras J y F) y ha viajado a través de rocas carbonatadas del Cretácico, lo que sugiere su zona de recarga en las Montañas Mayas, en el Cinturón Plegado de Petén o en el Núcleo Centroamericano, al norte de las rocas ígneas y metamórficas del Precámbrico-Paleozoico. Estas rocas, debido a sus características de baja permeabilidad, se consideran el basamento del sistema hidrogeológico. Debido a la pendiente topográfica, es posible que el agua siga un camino de sureste a noroeste, con descarga en una amplia zona de la Plataforma de Yucatán, dependiendo de sistemas de fracturas o fallas que permitan el ascenso del agua a la superficie, como descargas puntuales (manantiales) por debajo del nivel del mar.

Caracterización de isotopos estables usando δ^2H y $\delta^{18}O$

Los isótopos más utilizados en hidrogeología son el deuterio ($2H = 1$ protón y 1 neutrón) y el ^{18}O (8 protones y 10 neutrones), que son los isótopos estables pesados de la molécula de agua. Debido a que el 2H y el ^{18}O no reaccionan con otros componentes disueltos en el agua, son excelentes trazadores del movimiento del agua, lo que ayuda a reconocer las fuentes de recarga de las aguas subterráneas (Dickinson *et al.*, 2006) y determinar su origen (meteórico, marino, magmático) (Fontes, 1986).

Los resultados isotópicos de Wagner (2009) para el sur de la Península de Yucatán contribuyeron al estudio de pozos, lagunas, ríos y manantiales. Se recopilaron muestras en Calakmul, Campeche, Othón P. Blanco, Quintana Roo; ambos municipios comparten fronteras con Guatemala y Belice. Estos datos se incluyeron debido a su proximidad espacial a los análisis hidrogeoquímicos de Abud-Russell *et al.* (2021, ver Figura 6), lo que permitió la validación isotópica de la interpretación de las jerarquías de flujo. Según el criterio de proximidad geográfica de las manifestaciones de aguas subterráneas, se compararon las muestras de los manantiales E, C, F, J (Abud-Russell *et al.*, 2021) con los datos isotópicos de Wagner (2009, ver Figura 7). Se incluyen las firmas isotópicas correspondientes a cuerpos de agua superficiales perennes como referencia (Figura 8).

Figura 6. Ubicación y representación de datos isotópicos de las muestras de agua



Fuente. Elaboración propia. La posición geográfica de los datos isotópicos recuperados de Wagner (2009), a pesar de no coincidir temporalmente con la re-interpretación hidrogeoquímica de los datos públicamente disponibles de CONAGUA, que datan del 2004, coinciden, al menos, en el sentido de que los sitios muestreados son manantiales ubicados en posiciones espaciales próximas.

La composición isotópica de las muestras estudiadas en Wagner (2009, ver Figura 7) varía entre -33,8 y -22‰ de $\delta^2\text{H}$ y entre -2,6 y -4,4‰ de $\delta^{18}\text{O}$. La distribución de los datos en la muestra un grupo identificado cercano a la Línea Meteorica Global, que corresponde a las muestras de manantiales (Palmar, Acapulquito, 20 de Noviembre y Rancho del Toro). Esto sugiere que el agua se recargó bajo un clima húmedo y en altitudes elevadas, alejadas de la costa. Estas características podrían estar asociadas a las condiciones geográficas de la Sierra Maya, que se extiende desde Belice y hacia el interior de Guatemala, la cual alcanza su mayor altitud de hasta 1,124 m.s.n.m. Otras muestras corresponden a aguas que han estado sujeta a evaporación antes de su muestreo.

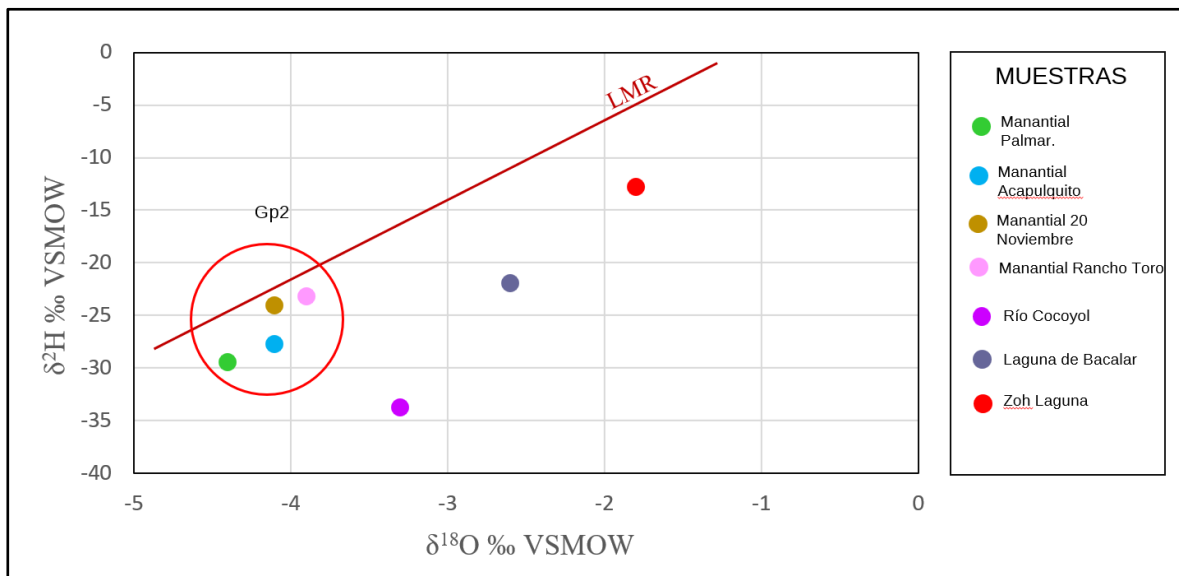
Figura 7. Composición isotópica de las muestras analizadas

Sitio de muestra	$\delta^2\text{H} \text{‰}$ VSMOW	$\delta^{18}\text{O} \text{‰}$ VSMOW
Manantial 20 de Noviembre	-21.1	-4.1
Manantial Palmar	-29.5	-4.4
Río Cocoyol	-33.8	-3.3
Manantial Rancho del Toro	-23.2	-3.9
Manantial Acapulquito	-27.8	-4.1
Laguna de Bacalar	-22	-2.6
Laguna Zoh Laguna	-12.8	-1.8

Fuente. Elaboración propia con base en Wagner (2009).

Con base en estos datos, se revisó la hidrogeoquímica de Abud-Russell *et al.* (2021) para anticipar las posibles condiciones de recarga de las aguas subterráneas y determinar si en este espacio fronterizo se encontraron evidencias que sugieren alcance transfronterizo de los sistemas de flujo de agua subterránea.

Figura 8. Valores de $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ para las muestras analizadas



Fuente. Elaborado por el autor con base en Wagner (2009, muestras) y la Línea Meteorica Regional (LMR) para la Península de Yucatán Cejudo, Acosta-González y Leal-Bautista (2021). Las muestras que corresponden con Zoh Laguna, Laguna de Bacalar y Río Cocoyol manifiestan influencia de evaporación.

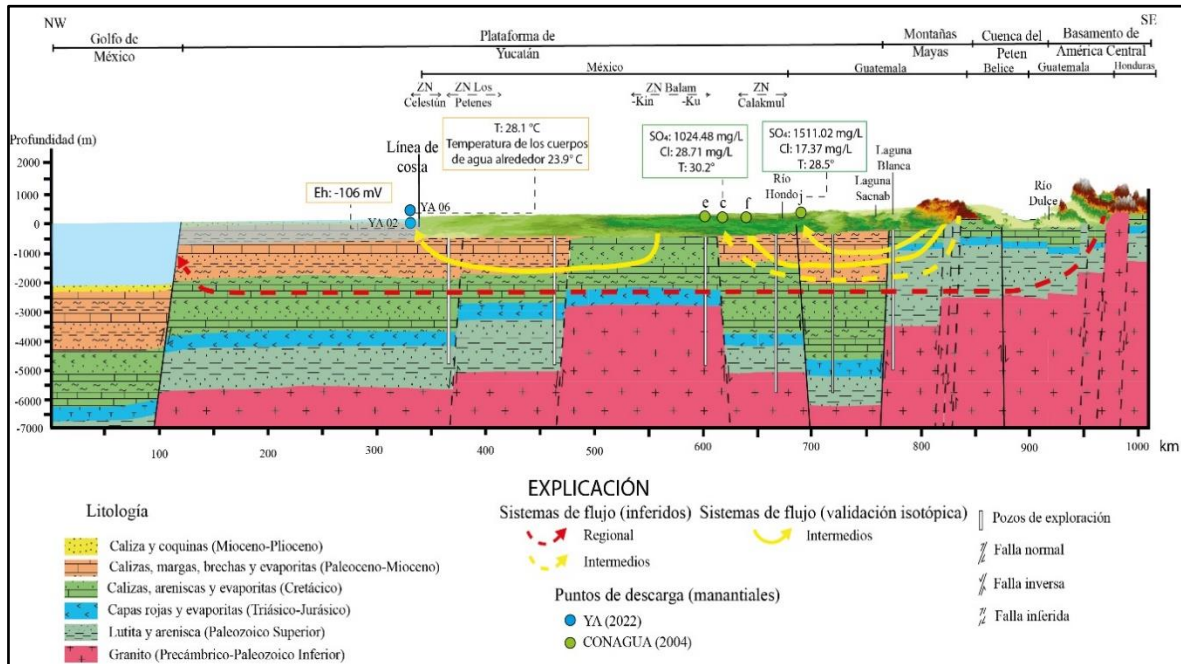
La muestra que, al analizar únicamente el Grupo 2 (Gp2) de Abud-Russell *et al.* (2021) en el contexto del análisis isotópico derivado de los datos de Wagner (2009), ese grupo sugiere evidencia de flujos locales (E) y flujos intermedios (J y F), siendo que esas muestras están ubicadas en el lecho del río Hondo. Dada su temperatura y composición hidrogeoquímica similar, se infiere que el manantial C corresponde con un flujo intermedio (). Los valores de temperatura de hasta 30.2 °C respaldan estos hallazgos sobre la profundidad relativa de viaje de los flujos intermedios en comparación con los flujos locales de menor temperatura (23.9 °C).

Sección geológica y definición de sistemas de flujo de agua subterránea

Con base en el análisis hidrogeoquímico e isotópico y del referente geológico, existe evidencia que sugiere flujos de agua subterránea recargando en Guatemala y/o Belice y descargando en México. La presencia de manantiales encontrados debajo del mar en la costa de Campeche evidencia que el agua subterránea descarga en litoral mexicano y está asociado con la presencia de ecosistemas de manglar y marismas. Además, por la disposición casi horizontal de la plataforma continental, es posible sugerir que el agua subterránea descarga varios kilómetros mar adentro.

Bajo el supuesto de que el flujo base de los ríos perennes es sostenido por la descarga de aguas subterráneas (USGS, 2022) y por la distribución espacial de las zonas de descarga (y recarga) de los sistemas de flujo de Kachadourian-Marras *et al.* (2020) en México, y las recreadas para Guatemala y Belice, los resultados sugieren zonas de descarga de flujos intermedios en el sur de la Península de Yucatán que podrían recargarse en la Sierra Maya.

Figura 9. Modelo conceptual de flujos de aguas subterráneas en la Península de Yucatán



Fuente. Elaboración propia con base en López-Ramos (1973), Abud-Russell *et al.* (2021) y trabajo de campo en Isla Arena, Calkiní, Campeche (2022).

En la Figura 9 es posible advertir que el basamento aflora en los límites entre Guatemala y Honduras, lo que podría implicar, bajo la perspectiva de flujos regionales, una dimensión mayor en el sentido transfronterizo del agua subterránea. En ese sentido, la posición del basamento respecto a la superficie varía en gran medida para toda el área estudiada. En la frontera entre México-Guatemala y Belice se tienen profundidades de hasta 5 km de la superficie al basamento; ya del lado mexicano, en la Península de Yucatán se advierte una posición del basamento más elevada respecto a la plataforma continental.

Es posible apreciar que las descargas interpretadas como flujos intermedios, en el límite entre México, Guatemala y Belice, está asociado con la Reserva de la Biosfera Calakmul, que se extiende hasta Balam Kú y el Área Natural de Flora y Fauna Balam Kin. En estas áreas protegidas por la legislación ambiental mexicana se encuentran importantes *aguadas*, o zonas inundadas, algunas de las cuales permanecen inundadas todo el año mientras que otras, se secan. Aquellas que

permanente anegadas de forma perenne, podrían estar asociadas con las descargas de agua subterránea de flujos intermedios.

La temperatura de las descargas de agua subterránea por debajo del mar se interpreta permite interpretar esos manantiales como posibles descargas puntuales de flujos intermedios, que recarga que porciones elevadas como, por ejemplo, la Sierrita de Ticul, una porción topográficamente elevada entre los estados de Campeche y Yucatán.

Discusión

Los Acuerdos Interinstitucionales actuales entre México, Guatemala y Belice carecen de definiciones científicas de sistemas naturales, incluidas las aguas subterráneas, así como de las acciones específicas requeridas para preservar el ambiente entre sus fronteras. Es de interés profundizar en el estudio desde la ciencia jurídica sobre las responsabilidades de las autoridades mexicanas en materia de agua transfronteriza, máxime que en los tres países se carece de un referente legal, sustentado en la ciencia, desde el cual se defina el funcionamiento y respuesta para enmarcar posibles futuras implicaciones ambientales relacionadas con el manejo nacional del agua subterránea.

Si consideramos que Kauffer-Michel (2011) identificó importantes asimetrías en los esquemas de gestión nacional del agua superficial entre México, Guatemala y Belice, esto implica una potencial fuente de conflicto entre estos países en términos de establecer agendas bilaterales o trilaterales en las que el agua, sea superficial o subterránea, se encuentre al centro de la agenda.

En el contexto del cumplimiento del Acuerdo de Escazú no puede imperar la visión soberana que García-García y Kauffer-Michel (2011) advierten a partir de estudiar a la CILA Sur en la relación México-Guatemala y México-Belice. Más aún, el estudio del ciclo del agua, sea superficial o subterránea, debe alejarse de suposiciones respecto a la presunta abundancia del agua en la frontera entre México, Guatemala y Belice (Kauffer-Michel, 2010). Por el contrario, debe

promoverse el estudio trilateral entre las partes involucradas a efecto de evitar conflictos relacionados con las aguas tranfronterizas.

Si la evaluación del agua superficial compartida entre estos países no figura como de importancia en los temas de las agendas bilaterales para la cooperación y ante las asimetrías en la legislación nacional en materia de agua, ¿cómo será posible determinar un marco de estudio homologado para el agua subterránea?

La publicación de la UNESCO (2015), Perry *et al.* (2021) y Bauer-Gottwein *et al.* (2011) y posteriormente, los “acuíferos tranfronterizos” de la IGRAC (2021) determinan, todos, el concepto del acuífero para estudiar diversos aspectos del agua subterránea, ¿podría el concepto de «acuífero tranfronterizo» dominar las relaciones de gestión compartida del agua subterránea tranfronteriza entre México, Guatemala y Belice?

Ante las indagaciones anteriores, la evidencia de campo del estudio de los Sistemas Gravitacionales de Flujo de Agua Subterránea sugiere que el agua subterránea puede estar recargando en Belice o Guatemala y descargando en México. Esto fue determinado con base en los criterios de interpretación hidrogeoquímica e isotópica para definir las dimensiones de flujos de agua subterránea en un perfil, así como sus posibles zonas de recarga y descarga tranfronteriza.

Sin embargo, estos resultados no son concluyentes y se requiere realizar más estudios como este para determinar la posible relación de recarga-descarga entre Chiapas y Guatemala o Belice. La definición de los flujos de agua subterránea y sus condiciones de límites verticales y horizontales (naturales), puede proporcionar evidencia científica no sólo sobre cómo la transformación del ambiente puede causar posibles impactos sociales y desafíos políticos en relación con los elementos de agua compartidos entre México, Guatemala y Belice; sino también sobre cómo abordar satisfactoriamente los impactos resultantes.

La metodología de Kachadourian-Marras *et al.* (2020) proporciona un nuevo marco de análisis para las dimensiones regionales de las aguas subterráneas tranfronterizas compartidas entre México, Guatemala y Belice. Constituye una

interpretación de las complejas interacciones del flujo de aguas subterráneas con otros elementos ambientales muestra la distribución espacial de la recarga y la descarga.

Bauer-Gottwein *et al.* (2011) y Perry *et al.* (2021) han realizado trabajos en la Península de Yucatán a partir del concepto «acuífero» y se sugieren las dimensiones transfronterizas del agua subterránea a partir del estudio de sus características químicas, así como sus recorridos a través del referente geológico regional. Esos trabajos de investigación, aunado a las publicaciones de la UNESCO (2015) e IGRAC (2021), configuran un horizonte de conocimiento para el agua subterránea transfronteriza compartida entre México, Guatemala y Belice. A partir de los resultados de este trabajo, no obstante, se abre un camino alternativo para el estudio de las potenciales zonas de recarga y descarga de agua subterránea regional de proporciones transfronterizas.

El modelo conceptual elaborado es un avance para determinar las dimensiones, condiciones y características de los sistemas de flujo regional de agua subterránea en la frontera sur de México. El resultado del modelo conceptual presenta importantes retos en términos del control en la calidad de los datos recuperados, toda vez que la re-interpretación hidrogeoquímica y las muestras de datos isotópicos no son propios. Por lo tanto, se desconoce la calidad del muestreo, si los aparatos con los que se midieron parámetros de campo estaban adecuadamente calibrados, las temporalidades no coinciden, no hubo continuidad en el proceso del muestreo (temporada de lluvias y temporada de estiaje) y se desconoce el laboratorio, así como la técnica analítica para determinar aniones, cationes y firma isotópica de las muestras utilizadas.

Empero, los resultados de este trabajo constituyen un avance en la elaboración de un modelo conceptual derivado de la aplicación de la Teoría de Sistemas Gravitacionales de Flujos de Agua Subterránea. Es una tarea pendiente continuar mejorando la calidad de los datos con los cuales se elaboró dicho modelo, de manera que sea posible calibrar un modelo numérico de flujo subterráneo acoplado a uno de evolución hidrogeoquímica. Esta tarea se enmarca en los

hallazgos de Szocs *et al.* (2013), quienes a través del análisis de isótopos estables contribuyeron a la determinación de los flujos de aguas subterráneas inmersos en un contexto transfronterizo, es decir, las componentes de recarga, tránsito y descarga entre diferentes jurisdicciones territoriales de los países involucrados.

Conclusiones

En México, existe información y datos limitados sobre el funcionamiento sistémico del flujo de agua subterránea en la Península de Yucatán. Se sabe debido a la aplicación de la teoría de los sistemas de flujo (Tóth, 1963; 2009; 2016) que su circulación se extiende entre las cuencas hidrológicas de estos países, fluyendo entre Belice, Guatemala y México. Siguiendo esa misma teoría y metodología, otros autores han determinado las condiciones en las que fluye agua subterránea transfronteriza entre Hungría y Eslovenia (Szocs *et al.*, 2013). Sin embargo, hasta la fecha, no existe un marco científico aprobado entre México, Guatemala y Belice para el estudio del funcionamiento de las aguas subterráneas que ligen la descarga con la correspondiente recarga y así establecer la naturaleza de los flujos y sus consecuentes comportamientos ambientales resultantes.

Los resultados de este estudio buscan contribuir a la definición de la extensión de los flujos regionales de aguas subterráneas y sus interacciones continentales en el mar. A pesar de que no fue posible realizar una interpretación hidrogeoquímica de las descargas de agua subterránea en el mar, esta investigación ofrece evidencia de su existencia y la necesidad de financiar este tipo de trabajos a efecto de estudiar las implicaciones ambientales y sociales de este tipo de manifestaciones del ciclo hidrológico.

Los resultados de este trabajo se enmarcan en los hallazgos de Hatch-Kuri (2018) y Hatch-Kuri y Carrillo-Rivera (2023), quienes concluyen que la falta de criterios científicos comunes sobre la evaluación de las aguas subterráneas impide la identificación de los flujos de aguas subterráneas a escala de cuencas y el estudio de su funcionamiento sistémico. Más aún, tienen como objetivo seguir las pautas metodológicas establecidas por la UNECE (2000) como alternativa a la propuesta

de «acuíferos transfronterizos», esgrimido conceptualmente y representado cartográficamente por la UNESCO (2015) e IGRAC (2021).

Por lo tanto, se busca fortalecer la integración de métodos de recopilación y almacenamiento de datos, análisis de la interacción entre las aguas subterráneas y las aguas superficiales. Asimismo, estudiar los efectos sobre la cantidad y calidad de las aguas subterráneas en el contexto de proteger su extracción intensiva y otros posibles impactos ambientales en el espacio fronterizo México, Guatemala y Belice.

Los resultados de este trabajo podrían fomentar una metodología científica compartida de estudios de aguas subterráneas para estos países y avanzar en acuerdos políticos internacionales sobre elementos naturales compartidos de agua. Debido a que esta metodología incluye el factor de usos de suelo, con base en este resultado cartográfico se puede sugerir que los cambios de uso del suelo debido a las políticas públicas nacionales pueden generar implicaciones ambientales adversas que afectan el buen funcionamiento de estos sistemas de flujo de aguas subterráneas.

Finalmente, basándose en el análisis de los datos resultantes, se torna básico buscar contribuir al conocimiento científico de las condiciones ambientales fronterizas, bajo el fundamento de la metodología de los Sistemas Gravitacionales de Flujo de Agua Subterránea. Este sistema de conocimiento científico de carácter interdisciplinario puede convertirse en la base necesaria que sea jurídicamente válida, desde la cual estos países construyan un esquema político común y sólido para la gestión de las aguas subterráneas. El objetivo será crear criterios y parámetros modernos, con los que se consideren las relaciones ambientales de los sistemas de flujo a través del estudio, protección, legislación y gestión compartida de las zonas de descarga y recarga del agua subterránea fluyendo entre México, Guatemala y Belice.

Bibliografía

- Abud-Russell, Y., Ouyse, S., & Carrillo-Rivera, J. J. (2021). International symposium on geofluids. *Identification of recharge and discharge zones in a gravity-driven regional groundwater flow. The case of the Yucatan Peninsula, Mexico*. Budapest, Hungría: International Association of Hydrogeologists.
- Bauer-Gottwein, P., Gondwe, B., Charvet, G., Marín, L., Rebolledo-Vieyra, M., & Merediz-Alonso, G. (2011). Review: the Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 507-524.
- Cejudo, E., Acosta-González, G., & Leal-Bautista, R. M. (2021). Regional meteoric water line of the Yucatan Peninsula, Mexico. *Geoscience Data Journal*, 125-130.
- Dickinson, J., Land, M., Faunt, C., Leake, S., Reichard, E., Fleming, J., & Pool, D. (2006). *Hydrologic framework refinement, ground-water flow and storage, water-chemistry analyses, and water-budget components of the Yuma area, Southwestern Arizona and Southeastern California*. Reston, Virginia: Scientific Investigation Report 2006-5135.
- Fontes, J. (1986). Environmental isotopes in groundwater hydrology. En P. Fritz, & J. Fontes, *Handbook of environmental isotope geochemistry* (págs. 75-140). Amsterdam: Elsevier.
- García-García, A., & Kauffer-Michel, E. F. (2011). Las cuencas compartidas entre México, Guatemala y Belice: un acercamiento a su delimitación y problemática general. *Frontera Norte*, 131-162.
- Gobierno de México. (3 de Mayo de 2022a). *Convenio entre los Estados Unidos Mexicanos y Belize sobre la protección y mejoramiento del ambiente y conservación de los recursos naturales en la frontera*. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/160430/31.-_CONVENIO_M_XICO-BELIZE_PROTECCI_N_Y_MEJORAMIENTO_DEL_AMBIENTE.pdf#:~:text=Los%20Estados%20Unidos%20Mexicanos%20y%20Belize%2C%20en%2

Oadelante, leyes%2C%20reglamentos%20y%20pol%C3%ADticas%20nacio
nale

Gobierno de México. (9 de Abril de 2022b). *Convenio entre los Estados Unidos Mexicanos y la República de Guatemala*. Obtenido de <https://www.gob.mx/profepa/documentos/convenio-entre-los-estados-unidos-mexicanos-y-la-republica-de-guatemala-sobre-la-proteccion-y-mejoramiento-del-ambiente-en-la-zona-fronteriza#:~:text=Las%20Partes%20acuerdan%20cooperar%20entre%20s%C3%ADen%20las,ley>

Gobierno de México. (16 de septiembre de 2023). *Acuerdo de Escazú*. Obtenido de <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/el-acuerdo-de-escazu#:~:text=El%20Acuerdo%20de%20Escaz%C3%BA%20es, personas%20al%20acceso%20a%20la>

Gondwe, B., Lerer, S., Stisen, S., Marín, L., Rebolledo-Vieyra, M., Merediz-Alonso, G., & Bauer-Gottwein, P. (2010). Hydrogeology of the south-eastern Yucatan Peninsula: New insights from water level measurements, geochemistry, geophysics and remote sensing. *Journal of Hydrology*, 1-17.

Harvey, D. (1996). *Justice, Nature and the Geography of Difference*. Oxford: Blackwell.

Hatch-Kuri, G. (2017). *Paso del Norte: la competencia por las aguas subterráneas transfronterizas*. Ciudad Juárez: El Colegio de Chihuahua; Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

Hatch-Kuri, G. (2018). A joint management of transboundary aquifers: from asymmetries to environmental protection. *Revista Frontera Norte*, 129-153.

Hatch-Kuri, G., & Carrillo-Rivera, J. J. (2021). Groundwater flow systems and their importance in the assessment of transboundary groundwater: the Mexico-U.S.A. case. En M. M. Alconada-Magliano (Ed.), *Intensified land and water use. A holistic perspective of local to regional integration* (págs. 141-161). Cham: Springer.

- Hatch-Kuri, G., & Carrillo-Rivera, J. J. (2023). Conceptos científicos y sus implicaciones políticas en la gestión de las aguas transfronterizas México-Estados Unidos. *Agua y Territorio*, 37-52.
- Hatch-Kuri, G., Sánchez-Angulo, J. C., Meza-Villegas, J. A., & Abud-Russell, Y. R. (2021). Water security and groundwater: the absence of scientific criteria in groundwater management through three case studies in Mexico. En M. M. Alconada-Magliano, *Intensified Land and Water Use. A holistic perspective of local to regional integration* (págs. 253-275). Cham: Springer.
- Hubbert, M. K. (1940). The Theory of Ground-Water Motion. *The Journal of Geology*, 785-944.
- IGRAC. (30 de mayo de 2021). *Transboundary Aquifers of the World*. Obtenido de <https://ggis.un-igrac.org/view/tba/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2008). *Continuo Nacional de Aguas Subterráneas Escala 1:250,000; Serie II*. Ciudad de México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- ISRIC. (24 de January de 2022). *Soil and Terrain Database (SOTER) for Latin America and the Caribbean (SOTERLAC), version 2.0*. Obtenido de <https://data.isric.org/geonetwork/srv/api/records/436bd4b0-7ffc-4272-be57-686b7d7eea7d>
- Kachadourian-Marras, A., Alconada-Magliano, M., Carrillo-Rivera, J. J., Mendoza, E., Herrerías-Azcue, F., & Silva, R. (2020). Characterization of surface evidence of groundwater flow systems in Mexico. *Water*, 1-19.
- Kauffer-Michel, E. F. (2010). Hidropolítica del Candelaria: del análisis de la cuenca al estudio de las interacciones entre el río y la sociedad ribereña. *Relaciones* 124, 187-226.
- Kauffer-Michel, E. F. (2011). Hidropolíticas en la frontera entre México, Guatemala y Belice: la necesaria redefinición de un concepto para analizar la complejidad de las relaciones entorno al agua en escenarios transfronterizos. *Aqua-LAC*, 157-166.

- Mingui, J. V. (2018). Los estudios de frontera en Geografía Política. *Revista de Estudios sobre Espacio y Poder*, 9(2).
- NASA. (13 de January de 2022). *Scientific Visualization Studio*. Obtenido de <https://svs.gsfc.nasa.gov/2281>
- Olvera-Alarcón, D. N., Kauffer-Michel, E. F., Inge Schmook, B., & Huicochea Gómez, L. (2011). Factores de conflicto en la cooperación por el agua en cuencas compartidas: caso Río Hondo (México-Guatemala-Belice). *Estudios Fronterizos*, 103-134.
- Prol-Ledesma, R.-M., Carrillo-de la Cruz, J.-L., Torres-Vera, M.-A., Membrillo-Abad, A.-S., & Espinoza Ojeda, O.-M. (2018). Heat flow map and geothermal resources in Mexico. *terra digitales*, 1-15.
- Ribeiro, W. (2012). Soberania: conceito e aplicação para a gestão da água. *XII Coloquio Internacional de Geocrítica*.
- Rosenfeld, J. H. (2002). El potencial económico del Bloque de Yucatán en México, Guatemala y Belice. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 30-37.
- Sánchez, R., & Eckstein, G. (2017). Aquifers shared between Mexico and the United States: management perspectives and their transboundary nature. *Groundwater*, 495-505.
- Szocs, T., Rman, N., Süveges, M., Palcsu, L., Tóth, G., & Lapanje, A. (2013). The application of isotope and chemical analyses in managing transboundary groundwater resources. *Applied Geochemistry*, 32, 95-107.
- Tóth, J. (1963). A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of Geophysical Research*, 4795-4812.
- Tóth, J. (1970). A conceptual model of the groundwater regime and the hydrogeologic environment. *Journal of Hydrology*, 164-176. doi:[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90186-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90186-1)
- Tóth, J. (1999). Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations. *Hydrogeology Journal*(7), 1-14.
- Tóth, J. (2009). *Gravitational Systems of Groundwater Flow: Theory, Evaluation, Utilization*. Cambridge: Cambridge University Press.

- Tóth, J. (2016). The evolutionary concepts and practical utilization of the Tóthian Theory of Regional Groundwater Flow. *International Journal of Earth & Environmental Sciences*, 1-11.
- UNECE. (2000). *Guidelines on Monitoring And Assessment of Transboundary Groundwater* (Primera ed.). Lelystad: UN/ECE.
- UNESCO. (2015). *Estrategia regional para la evaluación y gestión de los Sistemas Acuíferos Transfronterizos en las Américas*. Montevideo: UNESCO; PHI; DDS; OEA.
- United Nations. (2018). *Regional agreement on access to information, public participation and justice in environmental matter in Latin America and the Caribbean*. Santiago: CEPAL.
- USGS. (31 de octubre de 2022). *Glossary of hydrologic terms*. Obtenido de https://or.water.usgs.gov/projs_dir/willgw/glossary.html