



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD  
POLÍTICA, GOBERNANZA E INSTITUCIONES

EL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA POLÍTICA BINACIONAL PARA LA  
GESTIÓN SOSTENIBLE DE LOS ACUÍFEROS TRANSFRONTERIZOS COMPARTIDOS  
ENTRE MÉXICO Y LOS ESTADOS UNIDOS: EL CASO DEL ACUÍFERO VALLE DE  
JUÁREZ-BOLSÓN DEL HUECO

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRO(A) EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD

PRESENTA:  
REMINGTON ANNE RUYLE

DR. JOSÉ CLEMENTE RUEDA ABAD (TUTOR PRINCIPAL)  
Programa de Investigación en Cambio Climático  
DRA. ESMERALDA CERVANTES RENDÓN (MIEMBRO DE COMITÉ TUTOR)  
El Colegio de Chihuahua, Programa de Estudios de Medio Ambiente, Energía y Sociedad  
DR. FRANCISCO ESTRADA PORRÚA (MIEMBRO DE COMITÉ TUTOR)  
Programa de Investigación en Cambio Climático  
DRA. ALMA CONCEPCIÓN CHÁVEZ MEJÍA (REVISORA)  
Instituto de Ingeniería  
DR. ISRAEL FELIPE SOLORIO SANDOVAL (REVISOR)  
Facultad de Ciencias Políticas y Sociales

CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO, JULIO 2023



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

## Agradecimientos

Me gustaría agradecer a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y al Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad por la oportunidad de cruzar mis estudios del posgrado en una institución académica de alto nivel. En, me gustaría dar mis gracias al coordinador de nuestro programa, Dr. Alonso Aguilar Ibarra, por estar siempre disponible para responder a mis preguntas y ayudarme siempre que ha sido posible.

Al programa Fulbright-García Robles y la Comisión México Estados Unidos para el Intercambio Educativo y Cultural (COMEXUS) por la beca que me permitió estudiar en México y aprender sobre este país hermoso más allá del salón.

Me gustaría agradecer también a mi tutor y miembros del comité tutor, Clemente, Esmeralda, y Francisco. Gracias por su paciencia, sus recomendaciones, y por traer sus perspectivas únicas al desarrollo de esta tesis. Su amabilidad y sensatez me han mantenido con los pies en la tierra durante todo este proceso. Gracias también a todos los profesores que me enseñaron durante estos años quienes me guiaron y ayudaron mi formación académica.

No tengo palabras suficientes para decir mis gracias a mis compañeras, compañeros y compañeros del posgrado por toda la amistad y el apoyo que me han ofrecido en los últimos años.

Finalmente, me gustaría agradecer a mi familia, en particular a mis padres, quienes han estado por mi lado desde el principio. Gracias por apoyar mi decisión de cursar estudios de posgrado en el extranjero, por atender siempre mis llamadas y por no perder nunca la fe en mí.

## Resumen

Las aguas transfronterizas son recursos cruciales que sustentan los asentamientos humanos y los ecosistemas de todo el mundo. Mientras que los ríos y lagos transfronterizos han sido objeto de debate científico, legal y público durante siglos, la discusión sobre la importancia de los acuíferos subterráneos compartidos entre dos o más países está aún en fase incipiente. En la región fronteriza entre México y Estados Unidos, se han identificado más de 30 acuíferos como transfronterizos. Estos acuíferos apoyan a ciudades, agricultura, turismo e industria, y para muchas comunidades son la única fuente de agua. Los cambios y las crecientes incertidumbres en la seguridad del agua provocados por el cambio climático suponen graves amenazas para el uso sostenible de estos sistemas acuíferos transfronterizos. Para complicar aún más la situación, México y Estados Unidos no cuentan actualmente con una política binacional para la gestión de las aguas subterráneas.

La tesis aborda el impacto del cambio climático en la gestión de acuíferos compartidos entre México y los Estados Unidos y hace un análisis de las acciones políticas para fortalecer la política binacional para el manejo de acuíferos transfronterizos ante las presiones climáticas. Se tomó el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco como caso de estudio debido a la importancia estratégica de este acuífero para los dos países. A través de una revisión sistemática, se identificaron los factores que aumentan y obstaculizan la cooperación internacional en tema de gestión de acuíferos transfronterizos. Se utilizaron modelos climáticos del CMIP6 y un análisis geoespacial para proyectar cambios en variables climáticas que impactan el acuífero Valle de Juárez. Se elaboró un modelo de sistemas dinámicos (SD por sus siglas en inglés) para proporcionar una metodología para la incorporación de variables climáticas en la gestión del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco. Al final, las metodologías se conectan bajo de la teoría de la gobernanza policéntrica funcional para mostrar la utilidad de los resultados para los tomadores de decisiones.

## Abstract

Transboundary waters are crucial resources that support human settlements and ecosystems around the world. While transboundary rivers and lakes have been the subject of scientific, legal, and public debate for centuries, the discussion on the importance of groundwater aquifers shared between two or more countries is still in a nascent stage. In the U.S.-Mexico border region, more than 30 aquifers have been identified as transboundary. These aquifers support cities, agriculture, tourism, and industry, and for many communities they are the only source of water. Changes and increasing uncertainties in water security caused by climate change pose serious threats to the sustainable use of these transboundary aquifer systems. To further complicate the situation, Mexico and the United States do not currently have a binational policy for groundwater management.

This thesis addresses the impact of climate change on the management of aquifers shared between Mexico and the United States and analyzes policy actions to strengthen binational policy for the management of transboundary aquifers in the face of climate pressures. The Valle de Juarez-Hueco Bolson aquifer was chosen as the case study because of the strategic importance of this aquifer for both countries. Through a systematic review, factors that enhance and hinder international cooperation in transboundary aquifer management were identified. CMIP6 climate models and a geospatial analysis were then used to determine changes in climatic variables that impact the aquifer. A system dynamics (SD) model was developed to provide a methodology for incorporating climate variables into the management of the Valle de Juarez-Hueco Bolson aquifer. To conclude, the methodologies are connected under the theory of functional polycentric governance to show the usefulness of the results for decision makers.

# Contenido

<b>1. Introducción.....</b>	<b>13</b>
1.1 Acuíferos transfronterizos.....	14
1.2 Acuíferos transfronterizos compartidos entre México y los Estados Unidos .....	16
1.3 Agua subterránea y el cambio climático.....	18
1.4 La cooperación- ¿un futuro para los acuíferos transfronterizos? .....	21
1.5 El área de estudio.....	22
1.6 Pregunta y objetivos de la investigación.....	25
1.7 Resumen de la estructura .....	27
2.1 Métodos .....	34
2.1.1 Acuerdos formales.....	36
2.1.2 Documentos auxiliares de instituciones gubernamentales.....	37
2.1.3 Publicaciones académicas.....	37
2.1.4 Discusiones informales de expertos en el tema .....	40
2.1.5 Actas de la conferencia internacional de ISARM.....	42
2.1.6 Número de publicaciones por acuífero.....	44
2.2 Identificación de impulsores de la cooperación.....	45
2.2.1 Resultados por tipo de publicación.....	45
2.2.2 Resultados por área temática .....	49
2.2.2.1 Conocimiento, ciencia e información .....	51
2.2.2.2 Estructura administrativa .....	54
2.2.2.3 Comunicación .....	62
2.2.2.4 Participación de actores.....	62
2.3 Identificación de los retos principales para la cooperación transfronteriza.....	64
2.3.1 Resultados por tipo de publicación.....	64
2.3.2 Resultados por área temática .....	68
2.3.2.1 Conocimiento, ciencia e información .....	70
2.3.2.2 Estructura administrativa .....	72
2.3.2.3 Política.....	74
2.3.2.4 Sociedad y ambiente.....	77
<b>3. El acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Huevo .....</b>	<b>81</b>
3.1 Características hidrogeológicas .....	81
3.2 El marco jurídico para el manejo del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Huevo.....	88
3.2.1 El marco jurídico internacional.....	88
3.2.2 El marco jurídico para el manejo de aguas subterráneas en México.....	94
3.2.3 El marco jurídico para el manejo de aguas subterráneas en los EUA.....	99
3.2.4 El marco jurídico binacional.....	103
3.3 El contexto socioeconómico.....	107
3.3.1 Información básica .....	107
3.3.2 En las ciudades .....	108

3.3.3 En el campo .....	110
<b>4. El cambio climático y el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco.....</b>	<b>112</b>
4.1 <i>La vista general de los cambios relacionados con el cambio climático en la zona fronteriza.....</i>	<i>112</i>
4.2 <i>Cómo el cambio climático impactará los acuíferos.....</i>	<i>118</i>
4.3 <i>La modelación de cambios en temperatura y precipitación en la zona del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco.....</i>	<i>121</i>
4.3.1 Resultados .....	123
4.3.1.1 Temperatura.....	125
4.3.1.2 Precipitación.....	131
<b>5. Un modelo de sistema dinámico (SD) para el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco .....</b>	<b>135</b>
5.1 <i>Un modelo para el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco.....</i>	<i>135</i>
5.1.1 Articulación del problema y definición del límite .....	136
5.1.2 El diagrama de suministro y flujo .....	139
5.1.2.1 La estructura matemática del modelo .....	141
5.1.3 La reproducción de comportamiento pasado.....	149
5.1.4 La simulación bajo diferentes escenarios de cambio climáticos.....	150
5.1.5 La utilidad del modelo como una herramienta política.....	156
<b>6. A manera de conclusiones.....</b>	<b>159</b>
6.1 <i>Capacidad adaptativa: lo que revelan los estudios de caso sobre la cooperación.....</i>	<i>160</i>
6.2 <i>Ajuste institucional: cooperación entre escalas.....</i>	<i>167</i>
<b>Referencias .....</b>	<b>173</b>
<b>Apéndice.....</b>	<b>196</b>

## Lista de figuras

<b>Figura 1</b> El mapa oficial de la UNESCO (2015) que muestran la distribución geográfica de los acuíferos mundiales que se han reconocido como transfronterizos. ....	15
<b>Figura 2</b> El mapa actualizado de la UNESCO (2021) que muestran la distribución geográfica de los acuíferos mundiales que se han reconocido como transfronterizos. ....	15
<b>Figura 3</b> Los acuíferos de la zona fronteriza identificados como transfronterizos (Sanchez y Eckstein, 2017). ....	17
<b>Figura 4</b> Ubicación geográfica del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco. Se encuentra en la extrema norte de Chihuahua, la extrema oeste de Texas y la extrema sur de Nuevo México. La parte norte del acuífero está bajo las ciudades de El Paso (EUA) y Ciudad Juárez El mapa de arriba proporciona la ubicación del acuífero en relación con los estados de la zona fronteriza y el mapa de abajo muestra el acuífero y las características físicas de la tierra (Elaboración propia). ....	23
<b>Figura 5</b> La ubicación de los seis acuíferos con políticas formales para el manejo (Elaboración propia).....	34
<b>Figura 6</b> El flujograma para la selección de artículos académicos. Al final, 27 artículos fueron incluidos (Elaboración propia). ....	40
<b>Figura 7</b> El flujograma para la selección de contribuciones informales por expertos. Al final, 5 entradas fueron incluidas (Elaboración propia). ....	42
<b>Figura 8</b> El flujograma para la selección de procedimientos de la primera conferencia de ISARM. Al final, 17 procedimientos fueron incluidos (Elaboración propia).....	43
<b>Figura 9</b> El flujograma para la selección de resúmenes de la segunda conferencia de ISARM. Al final, 27 resúmenes fueron incluidos (Elaboración propia).....	44
<b>Figura 10</b> Número de publicaciones revisadas por acuífero (Elaboración propia).....	45
<b>Figura 11</b> Elementos de la cooperación transfronteriza y la frecuencia con la que se mencionan en las publicaciones revisadas (Elaboración propia). ....	47
<b>Figura 12</b> Las palabras asociadas con la cooperación y la frecuencia de estas palabras en los resúmenes revisados (Elaboración propia). ....	48
<b>Figura 13</b> Resultados del análisis por área temática, documentos gubernamentales. El color azul corresponde con conocimiento, ciencia e información, verde con estructura administrativa, naranja con comunicación y morado con la participación de actores (Elaboración propia).....	50
<b>Figura 14</b> Resultados del análisis por área temática, publicaciones académicas. El color verde corresponde con conocimiento, ciencia e información, naranja con estructura administrativa, azul con comunicación y morado con la participación de actores. Motivaciones en gris son mencionadas en las publicaciones académicas pero no son mencionadas en los documentos gubernamentales y los resúmenes (Elaboración propia). ....	51
<b>Figura 15</b> Resultados del análisis por área temática, resúmenes. El color verde corresponde con conocimiento, ciencia e información, naranja con estructura administrativa, azul con comunicación y morado con la participación de actores. Palabras/conceptos claves en gris son mencionadas en los resúmenes pero no son mencionadas en los documentos gubernamentales y las publicaciones académicas (Elaboración propia). ....	51
<b>Figura 16</b> Retos para la cooperación transfronteriza y la frecuencia con la que se mencionan en las publicaciones revisadas (Elaboración propia).....	66
<b>Figura 17</b> Las palabras asociadas con los retos para cooperación y la frecuencia de estas palabras en los resúmenes revisados (Elaboración propia). ....	67
<b>Figura 18</b> Resultados del análisis por área temática, documentos gubernamentales. El color verde corresponde con conocimiento, ciencia e información, naranja con estructura administrativa, azul con comunicación y morado con ambiente y sociedad (Elaboración propia).....	68
<b>Figura 19</b> Resultados del análisis por área temática, publicaciones académicas. El color verde corresponde con conocimiento, ciencia e información, naranja con estructura administrativa, azul con comunicación y morado con ambiente y sociedad (Elaboración propia). ....	69

<i>Figura 20 Resultados del análisis por área temática, resúmenes. El color verde corresponde con conocimiento, ciencia e información, naranja con estructura administrativa, azul con comunicación y morado con ambiente y sociedad (Elaboración propia).</i> .....	70
<b>Figura 21</b> <i>La geología regional del acuífero Valle de Juárez. La clave muestra los diferentes yacimientos y formaciones presentes (CONAGUA, 2020).</i> .....	82
<b>Figura 22</b> <i>La relación entre el bombeo total y la calidad del agua subterránea. Es posible ver que la concentración de contaminantes importantes ha aumentado con el aumento del bombeo (Sheng, 2013; Sheng y Devere, 2005).</i> ....	83
<b>Figura 23</b> <i>Diagrama de los flujos de recarga y descarga en los diferentes niveles hidráulicos del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco (gráfica de Sheng, 2013 modificado de Hibbs et al., 1997).</i> .....	84
<b>Figura 24</b> <i>El nivel freático simulado por Heywood y Yager (2003) para los años 1903-1996. El bombeo comenzó a aumentar a mediados del siglo XX, con grandes incrementos a partir de la década de los ochenta (Heywood y Yager, 2003).</i> .....	85
<b>Figura 25</b> <i>La evolución del nivel freático en el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco simulado por Heywood y Yager (2003). De la izquierda hacia la derecha, de arriba hacia abajo, los mapas topográficos muestran el nivel freático en 1902 (el estado estacionario), 1958, 1973 y 1980. La creciente concentración de líneas alrededor de Ciudad Juárez y El Paso demuestra visualmente los conos de depresión creados por el extenso bombeo (Heywood y Yager, 2003).</i> .....	86
<b>Figura 26</b> <i>Modelo creado por Hewood y Yager (2003) del descenso del nivel de agua en el Valle de Juárez-Bolsón del Hueco en 1973 (imagen de arriba) y 1996 (imagen de abajo). La extensiva descanso en Ciudad Juárez (hasta 60 m de descenso) refleja las implicaciones del bombeo (Heywood y Yager, 2003).</i> .....	87
<b>Figura 27</b> <i>México y los EUA han cooperado de manera formal sobre el tema del agua desde el establecimiento de la frontera en 1840. La línea de tiempo muestra los eventos de cooperación formal más importantes para el tema de las aguas subterráneas (Elaboración propia).</i> .....	104
<b>Figura 28</b> <i>La climatología histórica (1970-2000) de la precipitación acumulada anual. Datos de WorldClim (2020a). (Elaboración propia).</i> .....	113
<b>Figura 29</b> <i>La climatología histórica (1970-2000) de la temperatura máxima promedio anual. Datos de WorldClim (2020a) (Elaboración propia).</i> .....	113
<b>Figura 30</b> <i>La climatología histórica (1970-2000) de la temperatura mínima promedio anual. Datos de WorldClim (2020a). (Elaboración propia).</i> .....	114
<b>Figura 31</b> <i>Diagrama conceptual que muestra las posibles relaciones entre el cambio climático y la recarga de acuíferos propuesto por Earman y Dettinger (2011).</i> .....	119
<b>Figura 32</b> <i>Diagrama conceptual que ilustra las relaciones principales entre el cambio climático y diferentes aspectos del ciclo hídrico (Earman y Dettinger, 2011).</i> .....	120
<b>Figura 33</b> <i>Extensión geográfica del área usada en la extracción de los datos climáticos (Elaboración propia).</i> ...	124
<b>Figura 34</b> <i>Resultados de la modelación de impactos. (A) Cambios absolutos en temperatura máxima. (B) Cambios absolutos en temperatura media. (C) Cambios absolutos en temperatura mínima. (D) Anomalías en precipitación (Elaboración propia).</i> .....	125
<b>Figura 35</b> <i>Cambios en la temperatura máxima en la zona del acuífero a lo largo del siglo XXI (Elaboración propia).</i> .....	126
<b>Figura 36</b> <i>Cambios en la temperatura media en la zona del acuífero a lo largo del siglo XXI (Elaboración propia).</i> .....	126
<b>Figura 37</b> <i>Cambios en la temperatura mínima en la zona del acuífero a lo largo del siglo XXI (Elaboración propia).</i> .....	127
<b>Figura 38</b> <i>Temperatura máxima promedio anual para la zona donde se ubica el acuífero. Los modelos de izquierda hacia derecha, arriba hacia abajo son: CanESM5, CNRM-ESM2-1, GISS-E2-1-H, MIROC-ES2L. Las columnas de cada modelo representan los escenarios; desde izquierda hacia derecha son SSP1-RCP2.6, SSP2-RCP4.5, SSP3-RCP7.0, SSP5-RCP8.5. Las líneas de cada modelo representan los horizontes de tiempo. Desde arriba hacia abajo son 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100 (Elaboración propia).</i> .....	128

<b>Figura 39</b> Temperatura media promedio anual para la zona donde se ubica el acuífero. Los modelos de izquierda hacia derecha, arriba hacia abajo son: CanESM5, CNRM-ESM2-1, GISS-E2-1-H, MIROC-ES2L. Las columnas de cada modelo representan los escenarios; desde izquierda hacia derecha son SSP1-RCP2.6, SSP2-RCP4.5, SSP3-RCP7.0, SSP5-RCP8.5. Las líneas de cada modelo representan los horizontes de tiempo. Desde arriba hacia abajo son 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100 (Elaboración propia).	129
<b>Figura 40</b> Temperatura mínima promedio anual para la zona donde se ubica el acuífero. Los modelos de izquierda hacia derecha, arriba hacia abajo son: CanESM5, CNRM-ESM2-1, GISS-E2-1-H, MIROC-ES2L. Las columnas de cada modelo representan los escenarios; desde izquierda hacia derecha son SSP1-RCP2.6, SSP2-RCP4.5, SSP3-RCP7.0, SSP5-RCP8.5. Las líneas de cada modelo representan los horizontes de tiempo. Desde arriba hacia abajo son 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100 (Elaboración propia).	130
<b>Figura 41</b> Anomalías en precipitación (comparado con el clima histórico 1970-2000) en la zona del acuífero a lo largo del siglo XXI (Elaboración propia).	132
<b>Figura 42</b> La precipitación acumulada anual por los cuatro modelos. Los modelos de izquierda hacia derecha, arriba hacia abajo son: CanESM5, CNRM-ESM2-1, GISS-E2-1-H, MIROC-ES2L. Las columnas de cada modelo representan los escenarios; desde izquierda hacia derecha son SSP1-RCP2.6, SSP2-RCP4.5, SSP3-RCP7.0, SSP5-RCP8.5. Las líneas de cada modelo representan los horizontes de tiempo. Desde arriba hacia abajo son 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100 (Elaboración propia).	133
<b>Figura 43</b> El ciclo de implementación para el método de SD. Las flechas en negrita representan el ciclo general de desarrollo cuando las otras flechas demuestran el proceso no lineal para la reacción del modelo (Imagen es de elaboración propia con información adaptada de Martínez-Moyano y Richardson, 2013).	136
<b>Figura 44</b> El diagrama causal para el modelo dinámico. Los símbolos (+) y (-) indican la polaridad de la relación casual. Las barras verticales indican que hay una demora temporal presente en la relación casual (Elaboración propia).	138
<b>Figura 45</b> El diagrama de suministro y flujo para el aprovechamiento del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco (Elaboración propia).	140
<b>Figura 46</b> El uso histórico del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco para 1989-2019 comparado con el uso simulado según el modelo.	150
<b>Figura 47</b> Cambios porcentuales en el crecimiento de la población nacional para México según los diferentes SSPs. Los cambios a nivel federal fueron usados para aproximar los cambios locales en la región fronteriza (Elaboración propia con datos de International Institute for Applied Systems Analysis, 2018).	151
<b>Figura 48</b> Cambios porcentuales en el crecimiento de la población nacional para los EUA según los diferentes SSPs. Los cambios a nivel federal fueron usados para aproximar los cambios locales en la región fronteriza (Elaboración propia con datos de International Institute for Applied Systems Analysis, 2018).	152
<b>Figura 49</b> El diagrama de suministro y flujo para el uso del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco con las adiciones de las variables de precipitación acumulada anual, cambios en temperatura media y crecimiento poblacional (Elaboración propia).	152
<b>Figura 50</b> El uso del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco en metros cúbicos al año para 2021-2100 bajo los diferentes escenarios climáticos (Elaboración propia).	153
<b>Figura 51</b> Las disminuciones en el volumen de agua dentro del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco bajo diferentes escenarios de cambio climático (Elaboración propia).	154
<b>Figura 52</b> Las cuatro escalas socio-ecológicas en las cuales el régimen de gobernanza policéntrica para el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco experimentan desajustes (Elaboración propia con información adaptada de Cash et al., 2006).	168

## Lista de tablas

<b>Tabla 1</b> Variaciones reconocidas en los nombres de los acuíferos de interés (Elaboración propia).....	39
<b>Tabla 2</b> Elementos de la cooperación transfronteriza y la frecuencia con la que se mencionan en el texto del acuerdo o un estudio gubernamental (Elaboración propia).....	46
<b>Tabla 3</b> Las organizaciones internacionales que participaron en la formulación de acuerdos entre países y cómo se los aportaron (Elaboración propia).....	61
<b>Tabla 4</b> Retos para la cooperación transfronteriza y la frecuencia con la que se mencionan en el texto del acuerdo o un estudio gubernamental (Elaboración propia).....	65
<b>Tabla 5</b> Volumen total de recarga desde las fuentes principales (CONAGUA, 2020).....	83
<b>Tabla 6</b> Información básica sobre la demográfica de los municipios que cubren el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco (INEGI, 2010; United States Census Bureau, 2020a; United States Census Bureau, 2020b; SEDESOL, 2013a; SEDESOL, 2013b; SEDESOL, 2013c).....	108
<b>Tabla 7</b> Los impactos esperados del cambio climático para la zona fronteriza (Garfín et al., 2018; GNEB, 2016; Wilder et al. 2013).....	116
<b>Tabla 8</b> Fuentes de información y los años con datos disponibles (Elaboración propia).....	141
<b>Tabla 9</b> Consumo de agua por persona por año en Ciudad Juárez (Elaboración propia con información de IMIP, 2010).....	147
<b>Tabla 10</b> Consumo de agua por persona por año en El Paso (Elaboración propia con información de Albright et al., 2016).....	147
<b>Tabla 11</b> Preguntas y respuestas que abordan la utilidad del modelo SD creado para simular el uso del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco (Elaboración propia con preguntas originales de Sterman, 2000).....	157

## Lista de acrónimos

**CILA/IBWC**- Comisión Internacional de Límites y Aguas/ International Boundary and Water Comission

**CMIP**- Coupled Model Intercomparison Project

**CONAGUA**- Comisión Nacional del Agua

**CPEUM**- Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos

**DOF**- Diario Oficial de la Federación

**EPWU**- El Paso Water Utility

**EUA**- Estados Unidos Americanos (United States of America)

**GEF**- Global Environment Facility

**GNEB**- Good Neighbor Environmental Board

**IAEA**- International Atomic Energy Agency

**ILC**- International Law Comission

**IMTA**- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

**INECC**- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

**INEGI**- Instituto Nacional de Estadística y Geografía

**IPCC**- Intergovernmental Panel on Climate Change

**ISARM**- International Shared Aquifer Resources Management initiative

**ITTAS**- Iullemeden-Taoudeni/Tanezrouft Aquifer System

**IWLP**- International Water Law Project

**JMAS**- Junta Municipal de Agua y Saneamiento de la Ciudad Juárez

**LGEEPA**- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente

**MERCOSUR**- Mercado Común del Sur

**NOAA**- National Oceanic and Atmospheric Administration

**NSAS**- Nubian Sandstone Aquifer System

**OEA**- Organización de Estados Americanos

**ONU**- Organización de Naciones Unidas

**OSS**- Observatoire du Sahara et du Sahel

**PNUD**- Programa Naciones Unidas de Desarrollo

**QGIS**- Quantum Geographic Information System

**REPDA**- Registro Público de Derechos al Agua

**RCP**- Radiative Concentration Pathway

**SAG**- Sistema del Acuífero Guaraní

**SASS**- Système Aquifère du Sahara Septentrional (Sistema Acuífero del Sahara Septentrional)

**SEDESOL**- Secretaría de Desarrollo Social

**SEMARNAT**- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

**SD**- Modelación de sistemas dinámicos

**SSP**- Shared Socioeconomic Pathway

**TAAP**- Transboundary Aquifer Assessment Program

**TWDB**- Texas Water Development Board

**UNESCO-** United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization  
**UNESO-IHP-** United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization  
Intergovernmental Hydrological Programme  
**USEPA-** United States Environmental Protection Agency  
**USGS-** United States Geologic Survey  
**USCGRP-** United States Global Change Research Program  
**WCRP-** World Climate Research Programme

# 1. Introducción

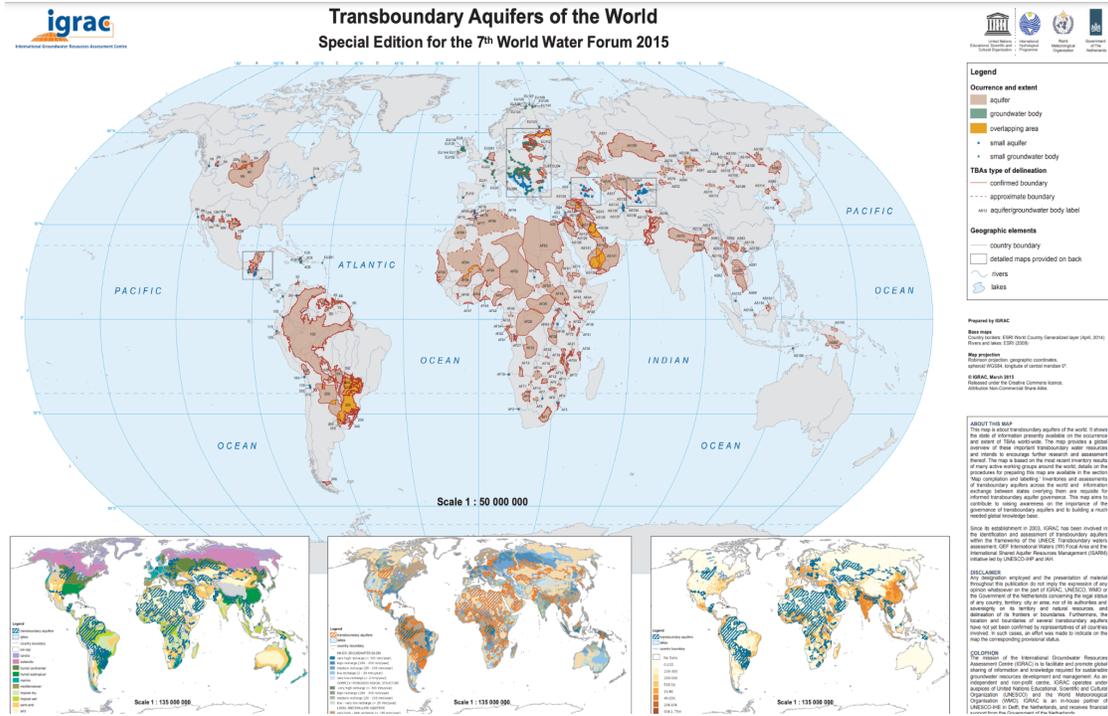
El agua subterránea es el recurso natural más extraído en todo el mundo (Conti et al., 2016). Hoy en día, una mitad de la población usa el agua subterránea como fuente principal de agua potable (Conti et al., 2016). Más aún, el agua subterránea proporciona un 40% del agua usada en la agricultura de regadío y una tercera parte del agua usada por la industria (International Groundwater Resources Assessment Centre, 2018). La situación física y sociopolítica en que se encuentran estos recursos plantea un gran reto para la gestión sostenible. A menudo se refiere a las aguas subterráneas como recursos “invisibles” (Burchi y Mechlem, 2005). La invisibilidad física es una característica inherente de recursos del subsuelo. No es posible ver el agua subterránea de la misma manera que es posible con aguas superficiales; se requieren tecnologías y modelos especiales. Como anotaron Penny et al. (2021), es difícil monitorear el agua subterránea, y las regulaciones que gobiernan su uso son difíciles de hacer cumplir. La invisibilidad física explica el segundo tipo de invisibilidad: la invisibilidad política. Las aguas subterráneas son a menudo víctimas de la mentalidad “ojos que no ven, corazón que no siente”. Zekster y Everett (2004) destacaron que hay más complejidad relacionada con la gestión de aguas subterráneas y que esta complejidad traslada a la manera en que se toman, o no se toman, decisiones políticas. Aunque el agua subterránea es un recurso importante para los usos humanos y ecológicos, cuenta con pocas estructuras de manejo y gobernanza porque es más difícil entender el agua subterránea (Burchi y Mechlem, 2005). La falta de atención política ha permitido la explotación de estos recursos sin regulación.

La explotación de aguas subterráneas trae consecuencias importantes para sistemas socioecológicos. La tasa de explotación sobrepasa a la tasa de recarga para muchos acuíferos, lo que amenaza a las fuentes de agua y la disponibilidad de agua en toda la cuenca (Bierkens y Wada, 2019; de Graaf et al., 2019; Penny et al., 2021). Zekster y Everett (2004) anotaron que la sobreexplotación de acuíferos puede resultar en una disminución en la descarga natural de acuíferos a cuerpos superficiales, el hundimiento de la tierra y la opresión de vegetación debido a cambios en la disponibilidad de agua. Además, una disminución en el nivel freático puede resultar en el secado de manantiales, una disminución de la función y biodiversidad de ecosistemas y un incremento en la actividad sísmica (Zekster y Everett, 2004).

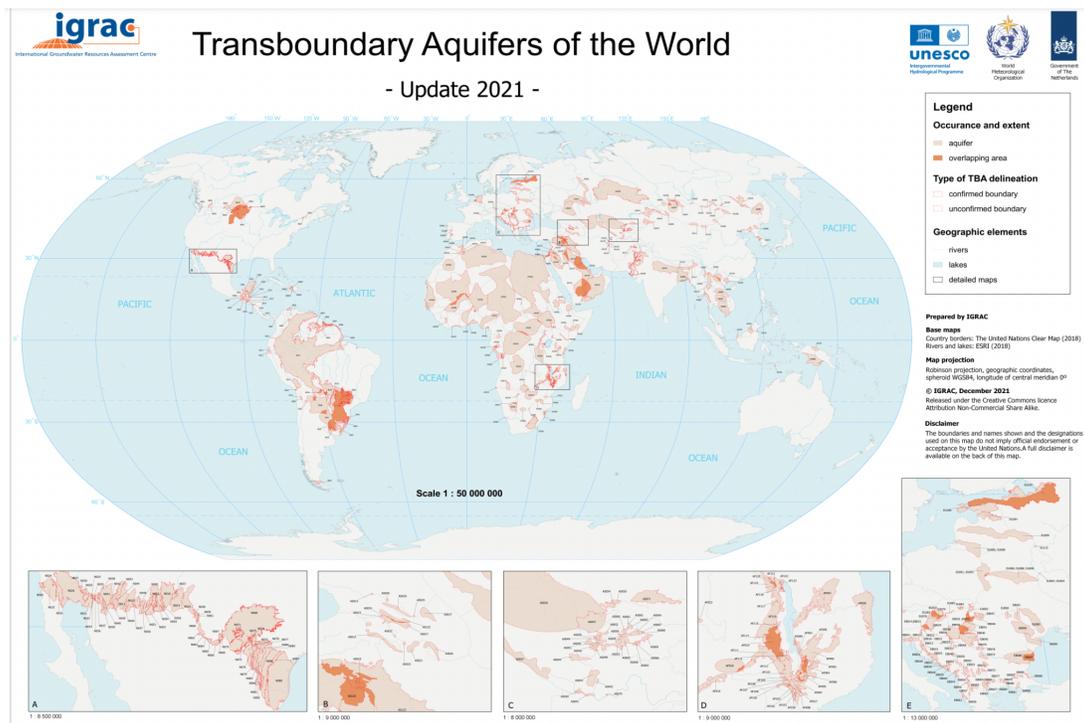
## 1.1 Acuíferos transfronterizos

Regiones ambientales—definidas por su geografía, clima y ecosistemas—a menudo abarcan fronteras entre países u otras jurisdicciones políticas en las cuales pueden existir diferentes estructuras de gobernanza y manejo (Sanchez et al., 2021). Por ende, la gestión de recursos hídricos se vuelve más complicada con el tema de los acuíferos compartidos entre países. Estos acuíferos *transfronterizos* son integrales para el desarrollo humano dado que un 40% de la población mundial vive en una cuenca transfronteriza, y los acuíferos transfronterizos proporcionan cantidades importantes de agua a más de 150 países (Penny et al., 2021).

Mientras que el agua subterránea es un recurso importante para todos los países, la gobernanza de aguas subterráneas está, por lo general, ausente en la política internacional (Burchi y Mechlem, 2005). A partir de 2015, 592 acuíferos transfronterizos han sido identificados, pero de estos, solo seis cuentan con un acuerdo internacional (Burchi, 2018). De los tratados que gobiernan aguas superficiales compartidas, solo un 14% incluye una cláusula que refiere a aguas subterráneas (Giordano et al., 2013; Penny et al., 2021). La Figura 1 de la UNESCO proporciona el mapa de 2015 con los 592 acuíferos transfronterizos reconocidos oficialmente (UNESCO, 2015) y, la Figura 2, el mapa actualizado de 2021 con nuevos acuíferos transfronterizos que están en el proceso de reconocimiento formal (UNESCO, 2021). Información sobre “nuevos” acuíferos transfronterizos surge continuamente; los cambios entre el mapa de 2015 y lo de 2021 muestran que hay cada vez más países y más poblaciones que reconocen su uso y dependencia en estos recursos.



**Figura 1** El mapa oficial de la UNESCO (2015) que muestran la distribución geográfica de los acuíferos mundiales que se han reconocido como transfronterizos.



**Figura 2** El mapa actualizado de la UNESCO (2021) que muestran la distribución geográfica de los acuíferos mundiales que se han reconocido como transfronterizos.

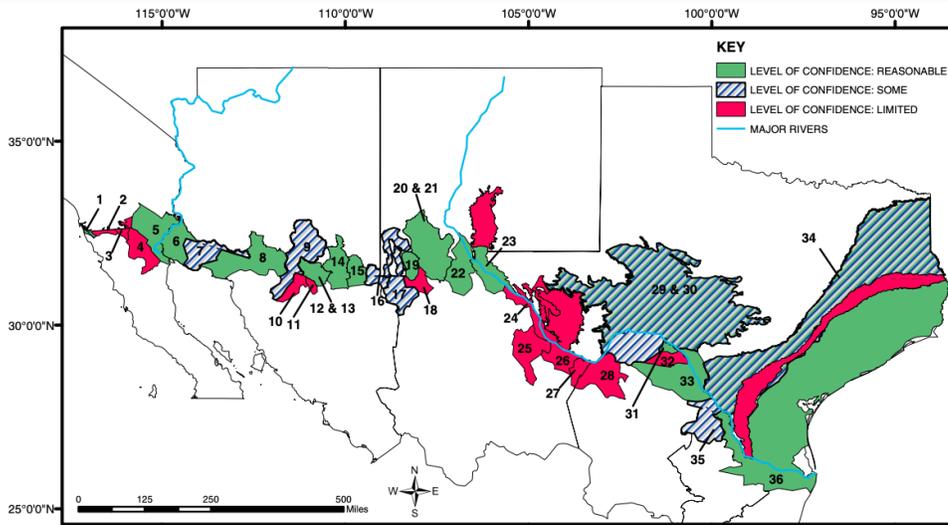
Según el Programa Mundial de Evaluación del Agua de la Organización de las Naciones Unidas (ONU):

[La cooperación internacional] es fundamental para mejorar y difundir la información sobre las aguas subterráneas, para desarrollar y promover enfoques y herramientas para su correcta gestión, y para aumentar el compromiso mundial para actuar en cuestiones prioritarias...y el desarrollo sostenible (Van der Gun, 2012, p2).

La falta de coordinación internacional para la gestión de acuíferos transfronterizos es el resultado de enfoques deficientes en la materia de gestión multinacional de aguas (Albrecht et al., 2018). El poco número de acuerdos formales es debido a la falta de marcos políticos, capacidad técnica-institucional inadecuada, estructuras de poder nacionales que se oponen a la regulación, marcos legales y la burocracia (Penny et al., 2021). A pesar de todos los retos políticos e institucionales, los acuíferos transfronterizos han ido ganando lentamente reconocimiento a nivel internacional. La evolución de la política internacional sigue poniendo de relieve la importancia de proteger estos recursos críticos.

## 1.2 Acuíferos transfronterizos compartidos entre México y los Estados Unidos

En el caso de México y los Estados Unidos (EUA), ambos países dependen en gran medida de los recursos de agua subterránea. Los dos se encuentran entre los 10 países del mundo que más extraen el agua subterránea (los Estados Unidos en el tercer lugar y México en el séptimo lugar) (Van der Gun, 2012). En la zona fronteriza entre México y EUA, se han identificado 36 acuíferos transfronterizos (Sanchez y Eckstein, 2017). La Figura 3 presenta un mapa elaborado por Sanchez y Eckstein (2017) de los acuíferos transfronterizos ya identificados.



**Figura 3** Los acuíferos de la zona fronteriza identificados como transfronterizos (Sanchez y Eckstein, 2017).

Aunque los dos países comparten un número alto de acuíferos, no hay un acuerdo binacional para su uso y gestión. Hay dos tratados en vigencia para las aguas superficiales (el Convenio entre los Estados Unidos y México sobre la distribución equitativa de las aguas del Río Bravo de 1906 y el Tratado de Aguas 1944), pero no abordan el tema del agua subterránea. Estos tratados “tampoco reconocen los vínculos físicos entre las aguas superficiales y las subterráneas en las cuencas y acuíferos transfronterizos” (Sanchez et al., 2021, p. 1018). En todos los años de gestión mutua de los recursos hídricos, hay solo una instancia, en 1972, cuando los países decidieron limitar el volumen de agua que se podía extraer del acuífero Yuma. Este caso sigue siendo el único en que los dos países implementaron un proceso de gobernanza formal para regular el uso de agua subterránea (International Boundary and Water Commission United States and Mexico, 1973; Sanchez y Eckstein, 2017). En los últimos años, la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA)/International Boundary and Water Commission (IBWC)—la autoridad binacional creada para ofrecer soluciones a los problemas que surgen durante la aplicación de los tratados entre Estados Unidos y México en materia de demarcación de fronteras, propiedad nacional de las aguas, saneamiento, calidad del agua y control de inundaciones en la región fronteriza—ha ampliado poco a poco su jurisdicción sobre las aguas subterráneas. Aunque estas acciones parecen estar funcionando, la legalidad del derecho de la CILA/IBWC a gestionar las aguas subterráneas es objeto de debate dada la falta de referencia a las aguas subterráneas en los tratados que perfilan los objetivos de la CILA/IBWC y le dan su carácter legal (Eckstein, comunicación personal, 2021).

Existe una gran heterogeneidad de información sobre los acuíferos compartidos; hay algunos (específicamente los acuíferos Valle de Juárez-Bolsón del Hueco, Conejos Medanos-Mesilla Bolsón, Valle de Santa Cruz y San Pedro) que cuentan con mucha más información que otros. Sanchez et al. (2021) anotaron que hay una falta significativa en la cooperación binacional para la generación de apoyo técnico. En 2006, la Ley Estados Unidos-México para la Evaluación de Acuíferos Transfronterizos identificó acuíferos prioritarios para el estudio académico (United States-Mexico Transboundary Aquifer Assessment Act Public Law 109-448, 2006). Los acuíferos prioritarios recibieron una inversión en recursos académicos y gubernamental, pero estos recursos no se extendieron a los demás acuíferos que no se identificaron como prioritarios. Por lo tanto, es necesario diseñar un enfoque de gestión regional e internacional más amplio para garantizar que se tengan en cuenta todos los acuíferos y sus diferencias locales.

### 1.3 Agua subterránea y el cambio climático

El agua es un pilar de la vida a lo largo de la frontera. A diferencia de otras cuestiones transfronterizas como la migración y la seguridad, la gestión del agua ha unido a los dos países, unificando a las comunidades bajo el objetivo de diplomacia a través de gestión conjunta (Nick, 2021; Wilder et al., 2020). Sin embargo, el cambio climático supone una grave amenaza para este tenue sentido de la cooperación transfronteriza, tanto desde el punto de vista físico como la perspectiva política. La región fronteriza se caracteriza por tener ecosistemas entre semiáridos y áridos que son muy vulnerables al aumento de las temperaturas y a la variabilidad en precipitaciones (Scholes, 2020). Estas regiones son también las más propensas a sobreexplotar las fuentes de agua subterránea porque a menudo ya sufren un estrés hídrico que produce una disminución de la recarga de las aguas subterráneas (Kundzewicz y Döll, 2009). Los dos países también tienen un marco político e institucional débil para los impactos binacionales del cambio climático. Como anotaron Sanchez et al. (2021, p. 1018)

la variabilidad climática y el cambio climático, así como las expectativas de crecimiento de la población, no se tuvieron en cuenta cuando se elaboraron los Tratados del Agua. Además, los volúmenes totales de agua en las cuencas fluviales gestionadas en virtud de estos tratados se cuantificaron según los valores hídricos medidos registrados a principios del siglo XX, cuando la región era menos árida.

Varios cambios demográficos también complican la gestión sostenible de aguas. Según la CILA/IBWC, “los recursos hídricos, tanto subterráneos como superficiales, se han visto y se ven gravemente amenazados por la rápida industrialización de las regiones fronterizas, unida a la creciente explosión demográfica” (International Boundary and Water Commission, n.d. a). El cambio climático ha limitado la cantidad de aguas superficiales disponibles, y ambas cuencas compartidas (la cuenca Río Colorado y la cuenca Río Bravo) ya están sobre-asignadas (Carter et al., 2017; Maddocks y Reig, 2014). Hoy en día el Río Colorado y el Río Bravo son, respectivamente, el decimocuarto y decimosexto río con más estrés hídrico en todo el mundo (Maddocks y Reig, 2014).

Aunque el tema del cambio climático está presente en las agendas nacionales de ambos países, los marcos institucionales se enfrentan con retos grandes para la implementación a nivel nacional y, en este momento, no tienen la robustez suficiente para ser aplicado al nivel binacional. En los EUA, el Programa Estados Unidos para la Investigación del Cambio Global y la Ley de Investigación del Cambio Global (establecidas en 1989 y 1990 respectivamente) han apoyado la investigación multisectorial de los impactos del cambio climático. Aunque los reportes anuales han incluido cambios específicos para la zona fronteriza, e incluso mencionan la importancia estratégica de las aguas subterráneas, la importancia de la gobernanza binacional para la adaptación social y protección de estos recursos todavía está ausente.

Puede resultar tentador sugerir que México, al ser país con una ley marco en materia de cambio climático, está mejor posicionado en comparación con Estados Unidos a la hora de permitir una gobernanza transfronteriza integrada del clima y agua. Sin embargo, es de vital importancia señalar las dificultades a las que se ha enfrentado México con la aplicación de la Ley General de Cambio Climático y sus análogos estatales. La falta de lineamientos claros, mandatos y coordinación entre sectores en todos los niveles de gobierno, así como financiamiento, implementación y compromiso político insuficiente, ha estancado la implementación efectiva de las políticas de cambio climático (Averchenkova y Guzmán Luna, 2018). La naturaleza transfronteriza de los acuíferos y los límites constitucionales de la cooperación formal regional requerirán la incorporación de todas las formas de gobierno para garantizar una gestión sostenida, responsable y a largo plazo. Por lo tanto, es imperativo reconocer la importancia de cooperar en la intersección entre la gestión de los acuíferos transfronterizos y la política de cambio climático.

Los impactos climáticos específicos, que constituyen una base necesaria para la política climática, pueden estudiarse utilizando modelos avanzados. La modelización del clima se basa en simulaciones por ordenador que imitan los procesos y las interacciones entre las partes del sistema climático de la Tierra. El Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP por sus siglas en inglés), que comenzó en 1995, es el primer conjunto de experimentos comunes que consistió en comparar la respuesta del modelo del clima de la Tierra a las acciones humanas o "forzamiento antropogénico" (WCRP, 2022). Desde entonces, el CMIP se ha utilizado para comprender la variabilidad natural del clima y su predictibilidad en escalas temporales que van de decenales a centenarias, y predecir la respuesta del sistema climático a los cambios.

En 2015, se aprobaron 23 modelos para formar el CMIP6, la iteración más actualizada del proceso CMIP (WCRP, 2018). El CMIP y su infraestructura de datos asociada se han convertido en herramientas esenciales para las evaluaciones climáticas tanto internacionales como nacionales (WCRP, 2022). Los modelos CMIP6 son fundamentales para el estudio de los acuíferos transfronterizos porque, al ser modelos globales, no están limitados por fronteras políticas. Los modelos climáticos del INECC en México y de la NOAA en Estados Unidos tienden a cortar los resultados en la frontera, lo que dificulta el uso de modelos nacionales para evaluar el impacto transfronterizo. Por esta razón, los modelos CMIP6 proporcionan un recurso atractivo y de alta calidad para modelar los cambios esperados en la variable climática para las regiones acuíferas transfronterizas.

Los modelos CMIP6 pueden proporcionar información clave sobre el cambio de variables físicas como la temperatura y las precipitaciones, pero los usuarios de los acuíferos necesitarán una comprensión más sólida de las relaciones que forman el sistema socioecológico para lograr un uso sostenible. Por esta razón, los modelos deben ser expandidos para incluir los impactos físicos del cambio climático y sus relaciones con decisiones políticas y sociales en cuanto al uso de agua subterránea transfronteriza. La modelación de sistemas dinámicos (SD por sus siglas en inglés) proporciona una opción para crear un modelo así. SD es una herramienta metodológica para la evaluación de cómo las "políticas, decisiones, estructura y demora" interactúan para crear el funcionamiento de un sistema (Forrester, 1961, p. viii). La herramienta fue desarrollada por Forrester (1961) para el estudio de "las características de información-retroalimentación de la actividad industrial para mostrar cómo la estructura organizativa, la amplificación (en la política) y los plazos (en las decisiones y acciones) interactúan para influir

en el éxito de una empresa” (p. 13). SD utiliza el mapeo computacional y las simulaciones matemáticas para crear mundos virtuales que son derivados del comportamiento de las variables en el sistema real (Ungvarsky, 2020). La evaluación de los resultados de las simulaciones permite que los tomadores de decisiones puedan identificar los impactos de la implementación de ciertas políticas. Balali y Viaggi (2015) describen SD como una metodología basada en la política que evalúa los efectos de los cambios políticos en un sistema. El uso de SD dentro del proceso del diseño de políticas ayuda en evitar la resistencia política, la cual es descrita por Sterman (2000) como las políticas que son “retrasadas, diluidas o derrotadas por reacciones imprevistas de otras personas o de la naturaleza” (p. 3). La modelización SD ya se ha aplicado en distintos contextos, incluido el estudio del cambio climático. Su enfoque único del funcionamiento de los sistemas ofrece la oportunidad de comprender mejor cómo afectará el cambio climático al uso de los acuíferos binacionales a lo largo del siglo XXI.

#### 1.4 La cooperación- ¿un futuro para los acuíferos transfronterizos?

Dada la situación actual de los acuíferos transfronterizos y los retos a los que se enfrentan, es aún más importante desarrollar mecanismos de cooperación entre México y Estados Unidos. En contraste con otros países, la situación política en la frontera presenta un gran reto para la cooperación sobre el manejo de recursos naturales. México y los EUA comparten la frontera más desigual en todo el mundo en términos de poder, desarrollo económico, y condición social (Velasco Ortiz y Contreras, 2014). A pesar de las tensiones políticas, la diplomacia del agua es un área, hasta cierto punto, donde la relación binacional ha florecido (Freeman, 2019). Dicho esto, la relación diplomática puede cambiar fácilmente, como fue evidente durante las protestas de 2020 en Chihuahua en torno a las entregas de agua ordenadas por los tratados de agua (Mackinnon, 2020). Ante la escalada de tensiones, la cooperación en el uso de los recursos hídricos subterráneos ofrece a las partes interesadas de ambos países una oportunidad única para aumentar la adaptación local al cambio climático y reforzar la relación binacional. Por lo tanto, la gestión sostenible de estos recursos debe ser un tema prioritario en toda la región.

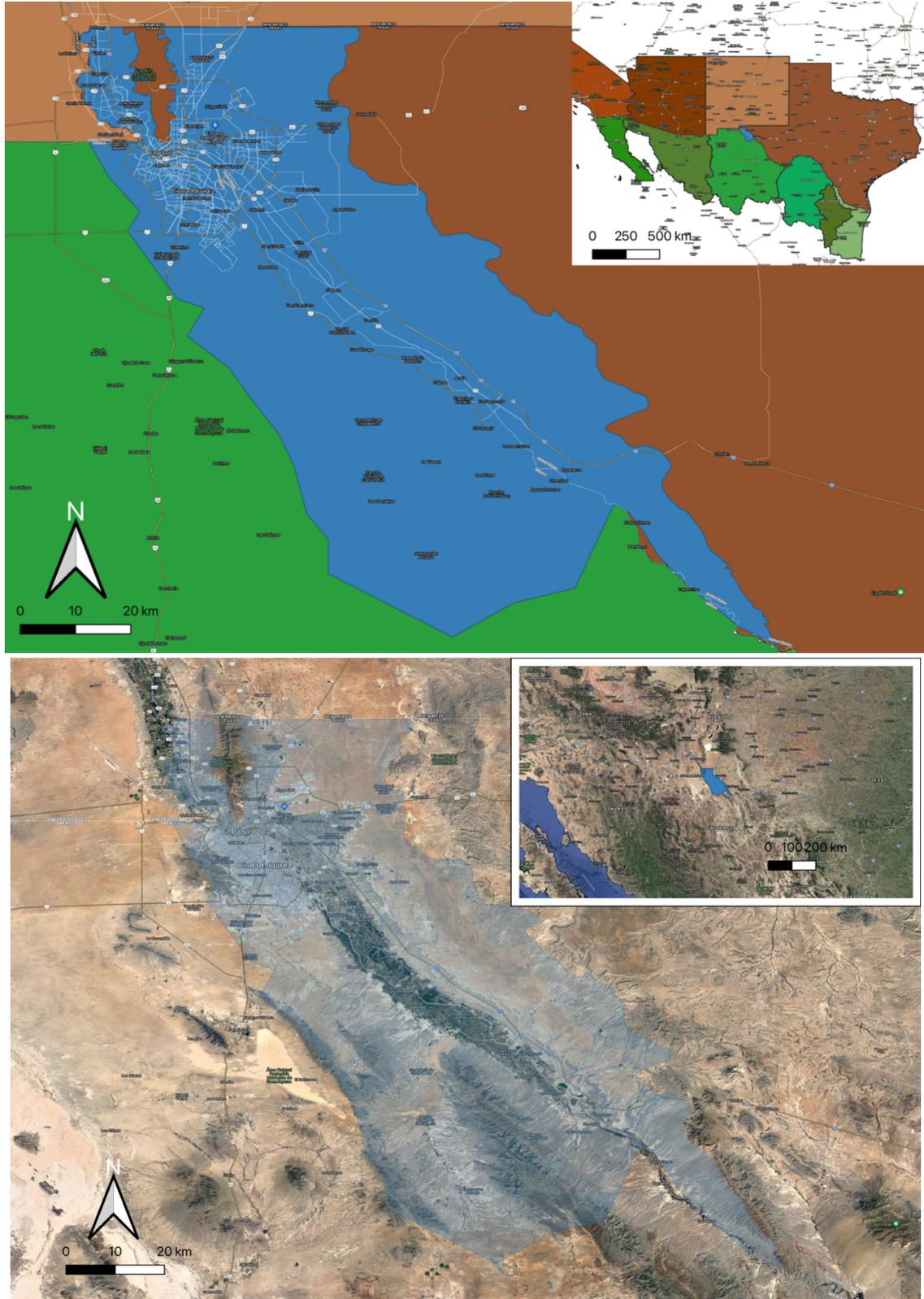
A medida que la importancia y la visibilidad de las aguas subterráneas han aumentado (debido a la mayor presión del crecimiento demográfico y el cambio climático), los mecanismos informales de gobernanza, predominantemente a nivel local, han llenado los vacíos creados por los tratados de agua. Aunque los estudios sobre la gestión de los acuíferos transfronterizos suelen

destacar la importancia de los acuerdos formales, la región fronteriza entre Estados Unidos y México es un caso destacado de la eficacia de la iniciativa local a corto plazo. Lo que queda por ver es la sostenibilidad a largo plazo de las colaboraciones informales, en particular cuando las presiones que conlleva el cambio climático aumentan la contención en torno a los recursos compartidos.

Para garantizar un futuro para los acuíferos transfronterizos, es necesario abordar la problemática desde el encuadramiento de la sostenibilidad. La gestión responsable de los acuíferos transfronterizos refleja la definición de sostenibilidad codificada en el Informe Brundtland. Alcanzar un rendimiento sostenible del acuífero y proteger su calidad requiere que "las necesidades del presente [sean satisfechas] sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades" (Brundtland, 1987, p. 16). La gestión y gobernanza de los acuíferos transfronterizos se relaciona a la sostenibilidad en otras maneras también. Como anotó Spangenberg (2011) "las ciencias de la sostenibilidad... vincula el conocimiento (ciencia) y la acción (política) en cuestiones científicas y tecnológicas complejas" (p. 276). Si en la frase anterior se cambiara "ciencias de la sostenibilidad" por "gobernanza de los acuíferos transfronterizos", se llegaría a una definición concisa, precisa, e igualmente válida para describir estos recursos importantes. La afirmación demuestra la centralidad de sostenibilidad en la gestión de acuíferos transfronterizos. Más aún, los acuíferos transfronterizos integra "procesos clave en toda la gama de escalas, desde la local hasta la global" y representa un "sistema complejo autoorganizado" que requiere "procedimientos participativos en los que intervengan científicos, partes interesadas, defensores, ciudadanos activos y usuarios del conocimiento", características que sólo pueden abordarse mediante la sostenibilidad (Kates et al., 2001, p. 641).

## 1.5 El área de estudio

Dado que cada acuífero tiene un panorama de uso diferente, el presente estudio se enfocará en el caso de uno de los acuíferos más estudiados en la región: el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco. Este acuífero es compartido entre los estados de Chihuahua (MX), Texas (EUA) y Nuevo México (EUA) y proporciona cantidades importantes de agua a las ciudades de Ciudad Juárez (MX) y El Paso (EUA) y a las áreas agrícolas alrededor de estas ciudades. La Figura 4 muestra la ubicación del acuífero.



**Figura 4** Ubicación geográfica del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Huevo. Se encuentra en la extrema norte de Chihuahua, la extrema oeste de Texas y la extrema sur de Nuevo México. La parte norte del acuífero está bajo las ciudades de El Paso (EUA) y Ciudad Juárez El mapa de arriba proporciona la ubicación del acuífero en relación con los estados de la zona fronteriza y el mapa de abajo muestra el acuífero y las características físicas de la tierra (Elaboración propia).

El acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco abarca un área total de 6,500 kilómetros cuadrados con unos 3,386 kilómetros cuadrados en Chihuahua (Comisión Nacional de Agua, 2020; Ging et al., 2020). Los municipios que recubren el acuífero incluyen Praxedis G. Guerrero, Juárez y Guadalupe en México y El Paso y Hudspeth en Texas (CONAGUA, 2020). Mientras que hay una porción del acuífero en el estado de Nuevo México, este estado no ha desarrollado el acuífero al mismo grado. El acuífero sustenta 2.2 millones de personas (Talchabhadel et al., 2021). Aunque el acuífero suministra una cantidad importante de agua para fines agrícolas, sobre todo en los años de sequía (Sheng y Devere, 2005), su uso siempre ha estado impulsado por la demanda urbana.

El bombeo excesivo del acuífero ha sido una preocupación por varios años. A partir de la década de 1960, la rápida reducción en el nivel freático del acuífero impulsó un aumento de los estudios científicos, incluido el primer estudio, *Saline water resources in Hueco Bolson using a two-dimensional electric-analog model for 1903-1963* (Recursos hídricos salinos en el Hueco Bolsón utilizando un modelo eléctrico-analógico bidimensional) (CONAGUA, 2020). La sobreexplotación ha cambiado la hidrología del acuífero. Sheng et al. (2001, p.68) señala que antes de que el acuífero fuera fuertemente bombeado, el agua del acuífero descargaba naturalmente en el Río Grande. Después de que el bombeo hiciera descender los niveles de agua, el Río Grande comenzó a perder agua en el acuífero, tanto que una parte del río a través de El Paso-Ciudad Juárez se ha revestido de hormigón para minimizar las fugas. El interés político en el acuífero ha evolucionado con el tiempo. En 1952, el gobierno mexicano estableció una veda de tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas subterráneas en parte del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco (DOF, 2015). Esta veda se actualizó en 2013 y 2015 para suspender el libre alumbramiento en las porciones no vedadas del acuífero (DOF, 2015). El incremento drástico de extracciones en la década de los ochenta impulsó la creación de un memorándum de entendimiento entre las ciudades de El Paso y Ciudad Juárez en 1999. El memorándum reconoció que “el incremento en la utilización [del acuífero] y el explosivo crecimiento poblacional requieren de una mayor consulta, coordinación y cooperación en la implementación y manejo de los proyectos de agua y aguas residuales” (JMAS y PDB, 1999, p.1). El memorándum también estableció un mecanismo para el intercambio de información técnico-científico. A pesar de más de veinte años de existencia, el sistema de intercambio de

datos sigue siendo interno para las autoridades municipales y el acceso público a los datos actualizados es increíblemente limitado.

En 2006, el gobierno de los Estados Unidos promulgó la Ley Estados Unidos-México para la Evaluación de Acuíferos Transfronterizos (United States-Mexico Transboundary Aquifer Assessment Act, 2006) que estableció el Programa para la Evaluación de Acuíferos Transfronterizos (TAAP). Se identificó cuatro acuíferos de alta prioridad de investigación, incluyendo el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco. Aunque el TAAP celebró logros, especialmente con relación a los estudios de los acuíferos Santa Cruz y San Pedro, sólo recibió una quincuagésima parte del presupuesto asignado, lo que limitó en gran medida los resultados potenciales de los proyectos (Carter et al., 2017).

Hoy en día, el acuífero proporciona un 94.2% del agua municipal para Ciudad Juárez, un 68% de agua municipal para la Ciudad de El Paso, un 2.2% del agua para el uso agrícola en México, un 35% del agua para el uso agrícola en los EUA, y un 83% del agua para la fábrica en los EUA (CONAGUA, 2020; TWDB, 2020a; 2020b; 2020c)

## 1.6 Pregunta y objetivos de la investigación

El presente trabajo pretende responder a la pregunta de cómo se puede incorporar el cambio climático en la formulación de intervenciones políticas binacionales para el manejo sostenible del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco. Para responder, es de interés identificar (a) los elementos cruciales para fomentar la cooperación política formal en torno a los acuíferos transfronterizos, (b) los cambios esperados a corto, medio y largo plazo debido al cambio climático a nivel local, y (c) un método para relacionar las variables políticas con la modelización física del cambio climático para desarrollar herramientas de decisión para la creación de políticas.

Por ende, esta tesis pone en práctica tres metodologías distintas pero interconectadas. En primer lugar, se utiliza una revisión sistemática de la literatura publicada sobre ejemplos de otras partes del mundo donde los países han implementado mecanismos formales para gestionar los acuíferos transfronterizos para identificar cuáles factores juegan un papel en la formación de políticas transnacionales. A partir de los resultados de la revisión bibliográfica, se presentarán acciones para apoyar la cooperación política como opciones relevantes que los tomadores de

decisiones pueden considerar al diseñar futuras intervenciones en la zona fronteriza entre México y los Estados Unidos.

La revisión se enfoca en una serie de opciones políticas informadas por los estudios de casos de otras partes del mundo, pero es de especial interés de esta tesis situar el cambio climático en el centro de la atención de los responsables de la toma de decisiones. Por ello, la segunda parte de la metodología se centra específicamente en los impactos del cambio climático en la región fronteriza. En esta sección, se realiza un repaso narrativo de los impactos del cambio climático y la modelización de cambios específicos en variables climáticas clave para proporcionar a los responsables de la toma de decisiones tanto resultados empíricos de los cambios proyectados como una discusión sobre la utilidad de estos resultados para la acción política. El objetivo de la modelación es determinar los cambios en variables claves para sistemas hídricos—temperatura máxima, media, mínima y precipitación—para el área donde se ubica el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco. La modelización de los impactos específicos se realiza utilizando cuatro modelos del conjunto CMIP6 y evalúa los cambios en cuatro escenarios de emisiones distintos para el transcurso del siglo XXI.

La tercera y última sección utiliza la metodología de modelado de sistemas dinámicos (SD por sus siglas en inglés) para conectar las acciones políticas y los distintos impactos debidos al cambio climático para demostrar cómo evolucionará el uso del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco a lo largo del tiempo. La modelación SD es una metodología para determinar cómo acciones políticas interactúan con una estructura física (en este caso, el acuífero transfronterizo) para crear el funcionamiento de un sistema. El objetivo inicial de la modelación SD fue tomar las acciones políticas identificadas en la revisión bibliográfica, los impactos del cambio climático determinados por los modelos CMIP6, y las características del Valle de Juárez-Bolsón del Hueco y relacionarlas para determinar cómo lograr el aprovechamiento sustentable del acuífero. Se hizo evidente que este objetivo no sería alcanzable con los recursos disponibles, pero el ejercicio no fue un fracaso. Aunque el objetivo no se alcanzó, el ejercicio de construir un sistema para describir el uso del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco y los impactos que ciertas decisiones tienen sobre el acuífero se presenta como una opción potencial para que los tomadores de decisiones políticas lo utilicen al considerar el diseño de políticas.

El capítulo final pone en práctica un ejercicio teórico para demostrar la utilidad de los resultados hallados en los capítulos anteriores. Adoptando la definición de "gobernanza

policéntrica funcional" definida por Carlisle y Gruby (2017), el capítulo final discute lo que los resultados de la tesis revelan sobre las opciones para fortalecer la capacidad adaptativa, el ajuste institucional y la funcionalidad del régimen de gobernanza del acuífero binacional. Se hace hincapié en cómo las tres metodologías contribuyen al conocimiento en torno a las condiciones propicias para la gobernanza policéntrica funcional. Este análisis reviste especial importancia porque se ha comprobado que los regímenes de gobernanza policéntrica funcional están bien situados para responder al cambio climático. De este modo, los resultados de la tesis pueden utilizarse para comprender cómo pueden diseñarse las futuras intervenciones políticas binacionales relacionadas con la gobernanza de los acuíferos transfronterizos, con el fin de preparar el régimen de gestión para responder a los impactos del cambio climático y lograr la sostenibilidad a largo plazo.

## 1.7 Resumen de la estructura

Para responder a la pregunta de investigación y alcanzar los objetivos específicos, la tesis empieza con la exposición del tema a nivel global y va hasta un análisis basado en las características locales específicas para el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco. El segundo capítulo explora los elementos cruciales para gestionar la cooperación formal utilizando una revisión sistemática de la literatura sobre los seis acuíferos transfronterizos del mundo con acuerdos formales que gobiernan su uso. Para entender las opciones políticas para la gestión de acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco y los demás acuíferos que comparten México y los EUA, se pueden examinar ejemplos de otras partes del mundo donde los países han implementado mecanismos formales para gestionar los acuíferos transfronterizos. Para determinar cuáles factores juegan un papel en la formación de políticas transnacionales, se implementó una revisión sistemática de literatura relacionada con la gestión de los seis acuíferos mundiales con acuerdos formales para su manejo.

Una revisión sistemática de la literatura es una herramienta útil, ya que uno de los principales objetivos de una revisión sistemática es agregar información crítica para la toma de decisiones (University of Kansas, s.f.). Al identificar aspectos comunes relacionados con la cooperación en distintos contextos, la revisión sistemática permite extrapolar factores que pueden informar a las autoridades responsables de la toma de decisiones en cualquier contexto transfronterizo, incluida la gestión del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco. Por lo tanto,

la revisión sistemática proporciona una metodología adecuada para comprender cómo las estructuras de normas formales para la gobernanza de acuíferos transfronterizos pueden fomentar la utilización sostenible.

El estudio de los mecanismos formales de gobernanza para los acuíferos transfronterizos es todavía relativamente nuevo en la literatura. Conti (2014) fue la primera autora a proporcionar una lista de ocho factores que facilitan la cooperación, basada en experiencias actuales. Su revista siguió un formato narrativo inspirado por casos famosos; entonces, para basarse en los trabajos existentes, una revisión sistemática utiliza un enfoque cuantitativo para corroborar las conclusiones de Conti (2014) y completarlas evaluando también los retos comunes que obstaculizan la cooperación. La revisión presentada en esta tesis se distingue de trabajos anteriores por enfoque solo en los acuíferos que ya tienen acuerdos formales para su uso. Además, como se mencionó anteriormente, la revisión identifica los retos comunes presentes en estos casos para mostrar los obstáculos más comunes que se enfrentan los procesos de cooperación.

En el caso de México y los Estados Unidos, una documentación de cuáles elementos conducen a una gestión exitosa y qué obstáculos principales existen facilitaría, en gran medida, los esfuerzos de cooperación y gobernanza (Giner, 2021, comunicación personal). El análisis de los casos de cooperación formal en materia de acuíferos transfronterizos también aumenta la visibilidad del tema y se espera que inspire nuevas investigaciones. La revisión sistemática será la primera de su tipo que analice los elementos de éxito y los desafíos existentes para la gobernanza formal de los acuíferos transfronterizos. Cabe mencionar que según Phillips y Barker (2021), una revisión sistemática requiere más de un autor para asegurar el rigor del proceso de revisión; por lo tanto, sería más correcto nombrar este proceso como una revisión con procesos sistemáticos. A largo plazo, se espera que la revisión sirva como herramienta para los tomadores de decisiones a nivel binacional. Por lo tanto, las políticas formales que se van a revisar solo incluirán ejemplos de políticas entre países soberanos y no se abordarán ejemplos de acuerdos estatales o locales.

A través de la revisión, se surgen áreas temáticas que se pueden utilizar para identificar como se alcanzan los esfuerzos cooperativos en relación con el manejo de acuíferos transfronterizos. La revisión pone de relieve que muchos de los elementos clave que refuerzan la acción cooperativa también pueden convertirse en obstáculos fundamentales. Por ejemplo, información

adecuada y una estructura administrativa apropiada son esenciales para la gobernanza cooperativa, y la falta de estos elementos en varios casos sigue siendo un reto para los responsables de la toma de decisiones. Las áreas temáticas proporcionan información importante sobre las opciones para aumentar la capacidad de adaptativa de los sistemas acuíferos transfronterizos. La revisión también destacó el cambio climático como un obstáculo clave para la gestión de los acuíferos transfronterizos.

El reto del cambio climático, aunado a la importancia de contar con datos e información confiable, indica que la modelación en los capítulos 4 y 5 sirve para abordar huecos importantes en el conocimiento sobre los vínculos entre el cambio climático y el uso de acuífero transfronterizos. Para contextualizar los modelos presentados en los capítulos 4 y 5, el capítulo 3 aborda las características físicas, políticas y sociales importantes al manejo del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco para ilustrar el contexto del caso de estudio. El capítulo resume el contexto en el que se encuentra el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco a través de la presentación de la información relevante sobre las características físicas y la hidrología del acuífero, los marcos políticos que se aplican a la gestión del acuífero y las características socioeconómicas que impactan en su uso.

Teniendo en cuenta la información presentada en el tercer capítulo, el cuarto examina en profundidad el impacto del cambio climático en la región fronteriza y sus acuíferos. Información relacionada con cambios posibles en variables climáticas es una herramienta crítica para la toma de decisiones. Los modelos climáticos locales "animan a los responsables de la toma de decisiones a enfocar el cambio climático de forma más matizada" (Heaphy, 2015, p. 53). Para contribuir a la base de conocimientos que es crucial para el proceso de toma de decisiones, se utiliza modelos de CMIP6 para modelar los cambios en temperatura y precipitación a lo largo del siglo XXI para el área sobre el Acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco. Cuartos modelos del conjunto CMIP6—CanESM5, CNRM-ESM2-1, GISS-E2-1-H, y MIROC-ES2L—por cuartos escenarios de emisiones fueron usados para evaluar cambios a través del siglo XXI. En todos los modelos, puede haber aumentos entre 2.6°C y 6.8°C en la temperatura máxima, entre 2.5°C y 6.5°C en la temperatura media y entre 2.2°C y 6.2°C en la temperatura mínima para el fin del siglo. Además, los aumentos en temperatura son más pronunciados durante el pleno verano (junio, julio, agosto). Los modelos confirman la continuación del alto grado de variabilidad en

precipitación para la zona. Los resultados de la modelación son consistentes con observaciones de la literatura sobre cambios en el clima para la zona fronteriza.

Los modelos de CMIP6 también muestran que los posibles cambios en el clima pueden tener impactos distintos en la zona urbana y las zonas rurales del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco. Por lo tanto, el quinto capítulo se enfoca en la creación de un modelo de sistema dinámico (SD) para modelar el uso del acuífero a largo plazo tomando en cuenta los cambios en variables climáticas y los factores sociales que impulsan los patrones del uso de agua subterránea. La metodología SD se ha usado para modelar sistemas hidráulicos y los impactos del cambio climático para sistemas socioambientales. Ejemplos incluyen el uso de SD para investigar el suministro regional de agua (Naderi et al., 2021), la gestión de recursos hídricos (Abdi-Dehkordi et al., 2021; Gohari et al., 2017; Phan et al., 2021), la gobernanza del agua subterránea (Bates et al., 2019; Barati et al., 2019; Turner et al., 2016), los impactos socioeconómicos de la infraestructura hídrica (Shao et al., 2020), y la gestión de sequías (Lee et al., 2012; Gies et al., 2014; Feng et al., 2008). En los años recientes, el SD ha surgido como un método popular en los estudios sobre los impactos del cambio climático. Ejemplos incluyen el uso de SD para evaluar la capacidad adaptativa de los servicios ecosistémicos de los arrecifes de coral ante el cambio climático (Hafezi et al., 2021), la adaptación al cambio climático en ambientes con información limitada (Carnohan et al., 2021), la factibilidad de la bioenergía (Cavicchi, 2019; Groundstroem y Juhola, 2021), la resiliencia comunitaria a los riesgos climáticos (Lam et al., 2018; Ross y Chang, 2021), las restricciones del cambio climático para el crecimiento económico (Ansell y Cayzer, 2018), los impactos del cambio climático en áreas urbanas (Mallick et al., 2016; Liu et al., 2020), el impacto del cambio climático en la gestión de acuíferos (Balali y Viaggi, 2015; Teimoori et al., 2018) y los impactos del cambio climático para la cantidad y calidad de aguas superficiales (Duran-Encalada et al., 2017; Ganji y Nasser, 2021).

De estas investigaciones mencionadas anteriormente, Duran-Encalada et al. (2017) y Shao et al. (2020) son las únicas que utilizaron el modelo de SD en un contexto transfronterizo. Talchabhadel et al. (2021) recomiendan el uso de SD como un punto de partida para la gestión del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco. Ellos mencionan que un modelo dinámico del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco “puede actuar como un modelo mental que permite a las partes interesadas de México y de los Estados Unidos ponerse de acuerdo sobre una

representación común, lo que crea nuevas perspectivas y unifica los conocimientos de las diferentes partes interesadas” (Talchabhadel et al., 2021, p. 13). Además, se anotan que

[un] modelo colaborativo del sistema acuífero puede simular los efectos previstos del cambio de uso del suelo, el cambio climático y las actividades humanas sobre la oferta y la demanda regional de agua y comprender sus relaciones dinámicas. Además, el modelo del sistema ayudará a proporcionar ideas y oportunidades alternativas para la asignación del agua del acuífero, el apoyo político y la planificación estratégica participativa para mitigar los impactos futuros. Los responsables políticos y de la toma de decisiones pueden utilizar el análisis basado en escenarios para obtener un conjunto de soluciones óptimas y compensaciones entre acuíferos transfronterizos. Los beneficios del modelo de sistema incluyen la gestión del acuífero binacional, la explotación de aguas subterráneas no contaminadas, el control de las fluctuaciones de las aguas subterráneas, el uso conjunto de las aguas subterráneas, y la garantía del agua futura (Talchabhadel et al., 2021, p. 13).

El SD es un proceso iterativo que se fortalece con la participación de grupos relevantes, generadores de conocimiento y tomadores de decisiones. El objetivo de la presente tesis no es proporcionar un modelo perfecto para el uso del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco, sino demostrar cómo los datos climáticos podrían incorporarse al desarrollo de escenarios de uso y fortificar el proceso de adaptación. Por lo tanto, el modelo aquí propuesto puede ser visto como una primera aproximación que requerirá nuevas iteraciones para describir mejor la dinámica del sistema. La elaboración del modelo se vio muy limitada por las restricciones relacionadas con el COVID-19, el tiempo y el acceso a los recursos financieros. Se espera que el quinto capítulo proporcione suficiente información para que aquellos que no son expertos en el área de la modelización del SD o que participan en la investigación académica relativa a la modelización del SD puedan iniciar el proceso de utilización de esta valiosa herramienta para la toma de decisiones robustas.

El capítulo presenta el modelo SD para el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco empezando con la articulación de la hipótesis dinámica. Luego, se presenta la estructura de suministro y flujo con la información necesaria para fundamentar sus relaciones matemáticas. Se discuten los resultados del modelo comparando su función con el uso pasado del acuífero y mostrando como el uso evoluciona tomando en cuenta los cambios en el clima identificada en el

cuarto capítulo. Por último, se discute los límites del modelo y las oportunidades para mejorar su función. La meta del capítulo es sintetizar los resultados de cambios en el clima según un conjunto de modelos y usar estos resultados para (i) estimar de manera preliminar la relación entre cambios en las variables climáticas y el agua subterráneas de acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco y (ii) mostrar como la combinación de la modelación climática y metodologías de la política pública puede ser una herramienta para tomadores de decisiones.

Los resultados del modelo SD indican que el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco podría agotarse en 2059. Sheng et al. (2001) estimaron que el agua dulce podría desaparecer en 2025, pero esfuerzos para utilizar agua desalada y aguas residuales recicladas han extendió la vida del recurso. Estos esfuerzos han dado como resultado la estabilización de los descensos del nivel de las aguas subterráneas hasta ahora, pero el impacto total del cambio climático todavía tiene que llegar a la zona, poniendo los niveles de agua en riesgo de nuevo (Schlanger, 2018). Para llegar a una aproximación más robusta, las futuras interacciones del modelo deberán considerar el porcentaje de agua dulce (y no sólo el agua recuperable), el costo de bombeo de agua más profunda, la tasa de salinización, el costo de desalinización, el costo de reciclaje de aguas residuales y el impacto del volumen perdido. Además, es de alta importancia investigar cómo la variabilidad en precipitaciones impactará a las tasas de recarga natural. La incorporación de estas variables con los posibles cambios en las variables climáticas aumentaría en gran medida la aplicabilidad de este modelo al proceso de toma de decisiones.

Para comprender mejor la utilidad de la revisión sistemática y la modelación cuantitativa de los modelos CMIP6 y SD, se unificarán los resultados bajo la teoría de la gobernanza policéntrica funcional. Al fundamentar los resultados en este marco teórico se demostrará aún más la utilidad de los resultados para los responsables de la toma de decisiones. En el sexto capítulo, se presenta los sistemas acuíferos transfronterizos como regímenes de la gobernanza policéntrica. Ostrom et al. (1961) y Ostrom (1991) caracterizó un sistema político policéntrico como aquel compuesto por varias unidades autónomas formalmente independientes entre sí que deciden actuar teniendo en cuenta a las demás mediante procesos de cooperación, competencia, conflicto y resolución de conflictos. Carlisle y Gruby (2017) extendieron la definición de la gobernanza policéntrica para ilustrar los factores que contribuyen a una gobernanza policéntrica funcional. Una gobernanza policéntrica funcional se caracteriza por una alta nivel de capacidad adaptativa y un buen ajuste institucional. Entonces, para llegar a una gobernanza policéntrica

más funcional, Carlisle y Gruby (2017) identificaron condiciones habilitadoras para la capacidad adaptativa y el ajuste institucional. Bajo su marco analítico, se examina el alineamiento entre los resultados de la tesis y las condiciones habilitadoras que contribuyen al manejo del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco.

La capacidad adaptativa—que es la habilidad de un sistema para ajustar y responder a perturbaciones (da Silveria y Richards, 2013)—es crucial para reducir las vulnerabilidades climáticas y fomentar un desarrollo sostenible (IPCC, 2007). Una condición habilitadora para una mayor capacidad adaptativa es el establecimiento de reglas y normas de aplicación general que estructuran las acciones y el comportamiento dentro de un sistema. La revisión sistemática realizada en el capítulo 2 examinó las estructuras normativas generales de los acuíferos transfronterizos. Los resultados de la revisión pueden interpretarse como elementos centrales de las estructuras de normas generales que han guiado con éxito la gestión cooperativa de acuíferos. Por lo tanto, la incorporación de los elementos identificados en la revisión sistemática podría contribuir a aumentar la capacidad de adaptación del sistema del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco ante posibles cambios en el clima.

El marco de Carlisle y Gruby (2017) destaca que instituciones con un buen ajuste institucional pueden ser más robustas y eficaces en la gestión sostenible de un recurso. La naturaleza de los acuíferos transfronterizos ha resultado en desajustes en varias escalas importantes para instituciones que juegan un papel en el régimen del manejo. La modelación en el quinto y sexto capítulo proporcionan resultados importantes para disminuir la prominencia de los desajustes relacionados al conocimiento local sobre el impacto del cambio climático y el uso del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco. Aunque no es posible resolver el reto de los desajustes institucionales, se discute en más detalle opciones para llegar a un mayor ajuste institucional. Se puede considerar que los resultados de la tesis contribuyen a la comprensión de las condiciones habilitadoras para producir una mayor capacidad adaptativa y ajuste institucional. Deben dedicarse más acciones y estudios a comprender las opciones para desbloquear todas las ventajas de un régimen de gobernanza policéntrica. Se espera que el análisis aportado por la tesis contribuya al creciente corpus de trabajo sobre acuíferos transfronterizos y los retos y oportunidades específicos de gobernanza que contribuyen a su gestión sostenible.

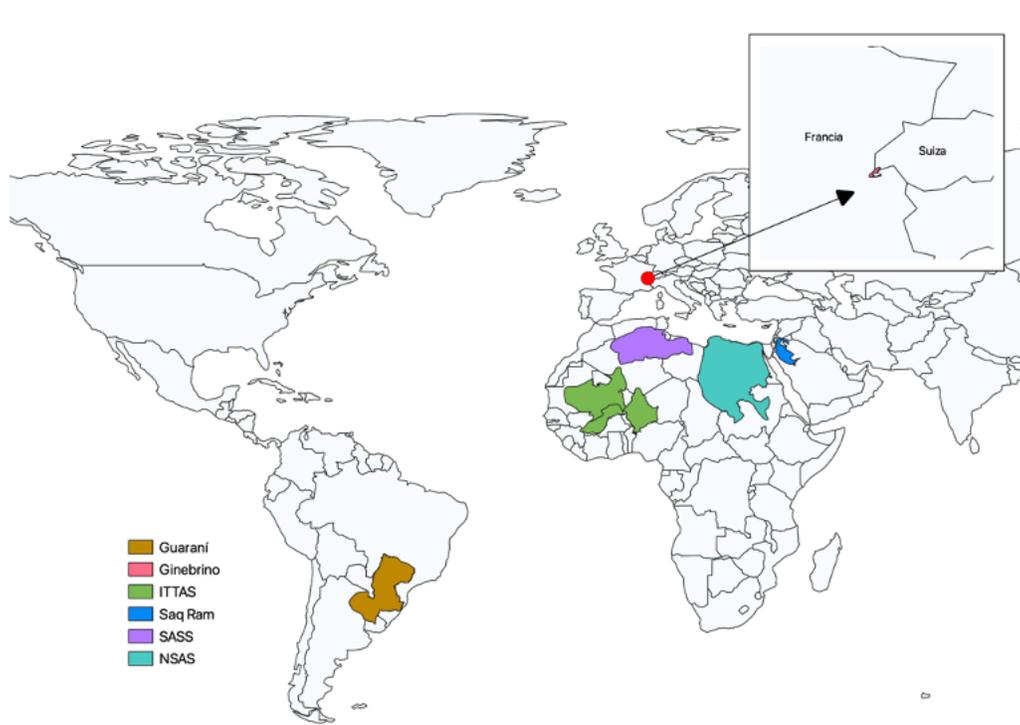
## 2. Las características de la cooperación transfronteriza

### 2.1 Métodos

Los casos que se revisarán son los seis acuíferos mundiales identificados por Burchi (2018):

1. El acuífero Ginebrino (Genevese Aquifer): Suiza, Francia
2. El sistema acuífero de arenisca Nubia (Nubian Sandstone Aquifer System, NSAS): Egipto, Sudán, Chad y Libia
3. Sistema Acuífero del Sahara Septentrional (North-Western Sahara Aquifer System, SASS): Argelia, Túnez, Libia
4. El sistema de acuíferos de Iullemeden-Taoudeni/Tanezrouft (Iullemeden-Taoudeni-Tanezrouft Aquifer System, ITTAS): Malí, Níger, Nigeria, Benín, Burkina Faso, Mauritania y Argelia
5. El sistema del acuífero Saq Ram (Saq Ram Aquifer System): Arabia Saudita y Jordania
6. El sistema del acuífero Guaraní (Guaraní Aquifer): Argentina, Brasil, Paraguay, Uruguay

Se muestra la ubicación geográfica de cada uno de los acuíferos de interés en la Figura 5.



**Figura 5** La ubicación de los seis acuíferos con políticas formales para el manejo (Elaboración propia).

Este capítulo empieza con la presentación de la metodología incluyendo qué tipo de publicaciones se han examinado y de qué fuentes se han extraído. A continuación, se presentan los resultados de la revisión. Los resultados se agrupan en primer lugar por tipo de publicación,

ya que no siempre fue posible realizar comparaciones entre distintos tipos de publicación. Se continua con la presentación de resultados por área temática.

Esta revisión pretende revisar cuatro tipos de documentos: documentos formales de instituciones gubernamentales (tratados, acuerdos, memorándums y estudios ejecutados por instituciones gubernamentales), publicaciones académicas, discusiones informales de expertos en el tema y actas de la conferencia internacional de ISARM.

Para el análisis de cada tipo de publicación desde acuerdos, estudios gubernamentales, artículos académicos, procedimientos de conferencia, entrada de blog y resúmenes de conferencias, se revisaron y registraron cada una de las siguientes partes:

- Acuífero abordado
- Autores
- Año de publicación
- Lugar de publicación (jornada, procedimiento, etc.)
- Resumen del contenido
- Factores que contribuyen a la cooperación
- Retos para la cooperación

Esta información se sistematizó en una hoja de Excel para facilitar el análisis. El método para determinar los factores de cooperación o retos para la cooperación a partir del texto del documento dependía del tipo de documento examinado. Los tratados y acuerdos formales utilizan un lenguaje políticamente neutro, por lo que el propio texto no menciona específicamente la cooperación. Sin embargo, durante la revisión se asumió que las herramientas y principios mencionados fueron incluidos por los países firmantes porque mejorarían la situación de la gestión cooperativa. Por lo tanto, todas las herramientas y principios mencionados se tomaron como factores que inducen a la cooperación. Algunos tratados o acuerdos sí incluían antecedentes o un contexto histórico que enmarcaba la necesidad de un acuerdo. En estos casos, a menudo se mencionaban explícitamente retos anteriores para demostrar la necesidad de un acuerdo formal. Por lo tanto, los desafíos se extrajeron directamente de las menciones del texto. Los documentos gubernamentales auxiliares, como los estudios realizados por organismos u organizaciones gubernamentales, eran más explícitos en su discusión, y esos textos se analizaron del mismo modo que las publicaciones académicas, las entradas de blog y las actas de conferencias.

Se revisaron los documentos gubernamentales auxiliares, las publicaciones académicas, las entradas de blog y las actas de las conferencias se determinaron los factores relevantes por su

presentación en el texto. En muchos casos, las palabras relacionadas con el objetivo de la revisión—"cooperación", "gestión conjunta", y "reto"—aparecían explícitamente en el texto, identificando inmediatamente el concepto que fue uno de los que había que incluir en el análisis. En otros casos, el encuadre temático señaló el concepto. Un encuadre positivo, con palabras como "éxito", "atractivo", "facilitación", "sostenible" (por nombrar algunas), se consideró una indicación de que el factor en cuestión induce a la cooperación. Por el contrario, el encuadre temático negativo, que utiliza palabras como "conflicto", "fracaso", "impedimento" y "restricción", se considera una indicación de que el factor en cuestión es un reto para los esfuerzos de cooperación. Estas palabras desencadenantes identificaron secciones del texto, que iban desde partes de frases hasta varios párrafos, que se utilizaron para identificar los factores analizados. Para ilustrarlo, se considera el siguiente ejemplo de Tinker (2016). El texto destaca que "la creación de una comisión conjunta... se recomienda incluso sin la ratificación del acuerdo por los... estados, y se vería como parte de un esfuerzo de buena fe para cooperar". (261). En este ejemplo, las palabras desencadenantes positivas "se recomienda" y "buena fe" indican que "la creación de una comisión conjunta" es un factor que induce la cooperación.

La revisión de los resúmenes siguió un proceso similar. Dado que la longitud de los resúmenes limita la cantidad de análisis detallado disponible, se utilizaron palabras desencadenantes positivas y negativas para identificar otras palabras o ideas sueltas. Por poner sólo un ejemplo, la palabra desencadenante negativa "insostenible" fue seguida inmediatamente por "explotación del recurso", "contaminación" y "variabilidad climática". En este caso, el contexto negativo asociado a "insostenible" indicaba que la explotación, la contaminación y la variabilidad climática derivada del cambio climático son retos a los que se enfrenta la gestión de los acuíferos transfronterizos. La revisión de los resúmenes difiere de la de los documentos mencionados en el párrafo anterior, ya que las palabras desencadenantes sólo pueden identificar palabras sueltas y conceptos, y no discusiones o análisis más amplios.

### 2.1.1 Acuerdos formales

Dado que estos acuíferos tienen acuerdos formales, el primer paso de revisión es de los documentos políticos firmados por los países. Estos documentos varían en sus niveles de formalidad (de tratados a memorandos de entendimiento), pero todos son reconocidos por las

entidades federativas a las cuales corresponden el manejo de agua o las relaciones exteriores. Los acuerdos que se revisaron fueron:

1. *El convenio sobre la protección, utilización, recarga y vigilancia del acuífero franco-suizo de Ginebra*
2. *Acuerdo para el establecimiento de la Junta de Autoridad, términos de referencia para el seguimiento e intercambio de información sobre las aguas subterráneas del sistema acuífero de arenisca nubio y el programa de acción estratégica regional para el sistema acuífero de arenisca nubio*
3. *El mecanismo de consulta permanente para el sistema acuífero del Sahara Noroccidental*
4. *El memorando de entendimiento para el establecimiento de un mecanismo de consulta para la gestión integrada de los recursos hídricos del sistema acuífero Iullemeden, Taoudeni/Tanezrouft*
5. *Acuerdo entre el gobierno del Reino Hachemita de Jordania y el gobierno del Reino de Arabia Saudita para la gestión y utilización de las aguas subterráneas en la capa Al-Saq/Al-Disi*
6. *Acuerdo sobre el acuífero Guaraní*

### 2.1.2 Documentos auxiliares de instituciones gubernamentales

Al margen de los acuerdos formales, los gobiernos también han elaborado programas y estudios en colaboración con los principales organismos internacionales. Los acuerdos formales constituyen sólo una parte de los esfuerzos de colaboración formal más amplios para gestionar los acuíferos transfronterizos. Dado que estos documentos contienen muchos más detalles que los propios acuerdos, también se revisarán los siguientes estudios y/o programas conjuntos reconocidos a nivel nacional:

1. *Programa de acción estratégica regional para el sistema acuífero de arenisca de Nubia* (estados participativos, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Asociación Internacional de la Energía Atómica y Fondo Mundial para el Medio Ambiente)
2. *Resultados del Proyecto SASS fases I y III* (Observatorio del Sahara y el Sahel)
3. *Volúmenes I-V sobre el Sistema acuífero de Iullemeden* (estados participativos y el Observatorio del Sahara y el Sahel)
4. *Acuífero Guaraní Programa de Acción Estratégica* (estados participativos, Fondo Mundial para el Medio Ambiente, Organización de Estados Americanos)

### 2.1.3 Publicaciones académicas

Después de revisar los acuerdos y los programas internacionales, es de interés examinar publicaciones que discuten la eficacia de estos esfuerzos formales. Los criterios de selección para las publicaciones secundarias fueron:

- Artículos publicados en revistas. No fuera necesario que las revistas estén revisadas por pares, pero todas vinieron de fuentes académicas fiables
- Escrito en inglés o español
- Los artículos necesitaban hacer un análisis de los acuerdos formales y/u otras políticas importantes a la gestión del recurso
- Uno o más de los seis acuíferos necesitaban ser el enfoque principal del análisis (i.e. publicaciones que solo mencionan uno de estos acuíferos, pero se centran en otros temas no serán incluidos)

De las publicaciones que son recuperables, se revisaron los resúmenes para comprobar su relevancia. La relevancia se determinó por menciones a las palabras claves. Los artículos que superaron la revisión del resumen pasaron a una revisión del texto completo para determinar si cumplieron con todos los criterios de selección.

Se utilizó Web of Science (WoS), Scopus<sup>1</sup>, y el buscador de la Biblioteca Digital de la UNAM que utiliza EBSCOHost (todas las áreas) para buscar por las publicaciones. La búsqueda siguió el siguiente formato:

1. Una búsqueda con el nombre del acuífero más las siguientes palabras claves: acuerdo (agreement), política (policy) y cooperación (cooperation). Por ende, a frase booleana es: “Acuifer name” AND (“agreement” OR “policy” OR “cooperation”). En el caso del acuífero Guaraní, hay una cantidad importante de publicaciones en español debido a su situación geográfica. Por lo tanto, la búsqueda para el acuífero Guaraní también incluirá la frase: “Acuífero Guaraní” Y (“acuerdo” O “política” O “cooperación”).
2. Es importante anotar que algunos de los acuíferos tienen variaciones en su nombre. La siguiente tabla muestra los acuíferos y las varias maneras de referir al acuífero:

<b>Nombre del acuífero en español</b>	<b>Nombre del acuífero en inglés</b>	<b>Otras variaciones</b>	<b>Apuntes importantes sobre las variaciones</b>
El acuífero Ginebrino	Genevese Aquifer	Ninguna	Ninguna
El sistema acuífero de arenisca nubio	Nubian Sandstone Aquifer	Ninguna	Ninguna
El Sistema del Acuífero del Sahara Noroccidental	North Western Sahara Aquifer	Ninguna	Ninguna
El sistema de acuíferos de Iullemeden-	Iullemeden Taoudeni Tanezrouft Aquifer System	Iullemeden Aquifer, Iullemeden	En los documentos más antiguos, el acuífero se refería como el acuífero

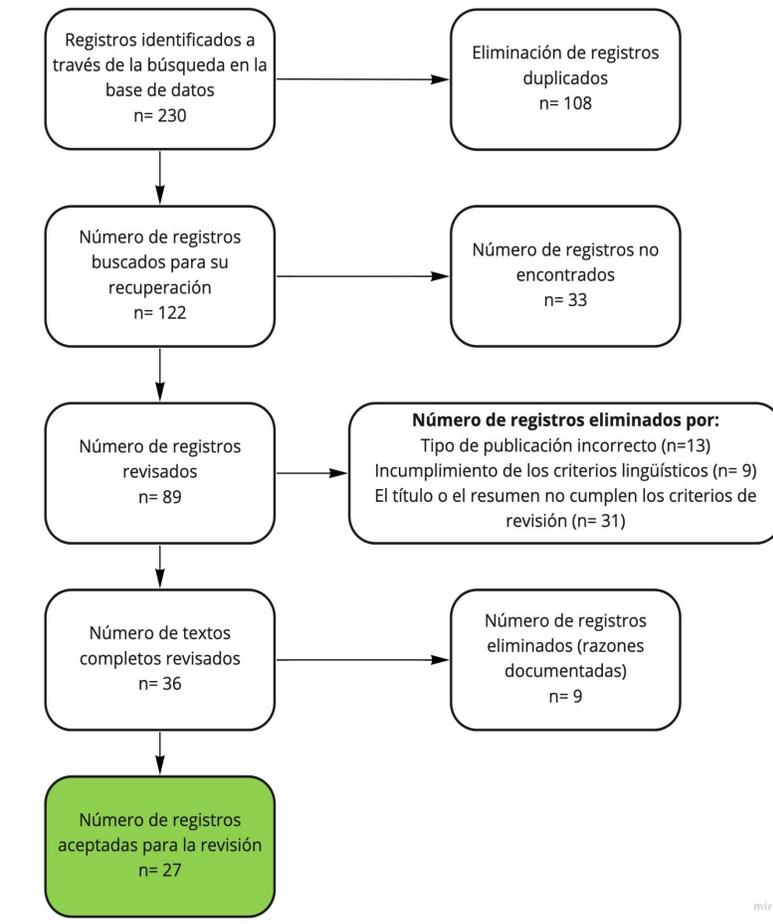
<sup>1</sup> Con la opción título del artículo, resumen, palabras clave

Taoudeni/Tanezrouft		Aquifer System	Iullemeden. A medida que se realizaron más estudios y se hizo más evidente la naturaleza transfronteriza, el nombre cambió a "Sistema Acuífero Iullemeden". Más recientemente, el acuífero Iullemeden se ha vinculado hidrológicamente a los acuíferos Taoudeni y Tanezrouft, formando así el sistema acuífero Iullemeden-Taoudeni Tanezrouft
El sistema del acuífero Saq Ram	Saq Ram Aquifer System	Al Sag Aquifer, Al Saq Aquifer, Al Disi Aquifer	El sistema del acuífero Saq Ram es un sistema hídrico con una parte transfronteriza compartido entre Jordania y Arabia Saudí. En el lado jordano, el acuífero se conoce como "Al Disi". En el lado saudí, el acuífero se conoce como "Al Sag", que en algunos casos se escribe "Al Saq". El Saq Ram refiere al todo el sistema, la parte transfronteriza y las partes que extienden más al interior de ambos países.
Acuífero Guaraní	Guarani Aquifer	Ninguna	Ninguna

**Tabla 1** Variaciones reconocidas en los nombres de los acuíferos de interés (Elaboración propia).

3. A continuación, se revisaron los resúmenes de los resultados de la búsqueda para ver si fuera necesario ajustar a los criterios de selección. Los textos completos se revisaron sólo para los artículos con resúmenes que se ajustaron a los criterios de selección.

La Figura 6 muestra el proceso de selección de los artículos académicos:



**Figura 6** El flujograma para la selección de artículos académicos. Al final, 27 artículos fueron incluidos (Elaboración propia).

#### 2.1.4 Discusiones informales de expertos en el tema

El tema de la política para el manejo de acuíferos transfronterizos es relativamente nuevo en la literatura. Para revisar información, especialmente sobre los acuíferos con poca presencia en las publicaciones académicas, también se revisaron las entradas del blog del Proyecto de Derecho Internacional del Agua (IWLP). El IWLP es "el principal recurso en Internet sobre cuestiones de derecho y política internacional del agua"<sup>2</sup>. Además, está creado y dirigido por uno de los principales editores sobre política de acuíferos transfronterizos. Por lo tanto, los blogs aportan contribuciones claves y necesarias para responder a la pregunta de investigación. El uso de otros recursos, como los proporcionados por el IWLP, es esencial para analizar sistemas de acuíferos transfronterizos poco estudiados. Las entradas de los blogs se seleccionaron buscando

<sup>2</sup> <https://www.internationalwaterlaw.org/>

los nombres en inglés de cada uno de los seis acuíferos en el buscador para el Blog del Proyecto de Derecho Internacional del Agua. Para mantener el rigor en comparación con los artículos de revistas, sólo se incluyeron los posts que fueron entradas de blog escritas por autores con experiencia previa en la publicación de revistas. De estos posts, se revisaron los títulos para comprobar su relevancia utilizando los mismos criterios de selección que se aplicaron a los artículos de revistas.

Para hacer la búsqueda, el nombre de cada uno de los seis acuíferos fue ingresado en el buscador interno del Blog. Se recopilaron todos los resultados y se eliminaron las entradas duplicadas. A continuación, se revisó cada título; se excluyeron los títulos que trataban temas no relacionados con la gestión de las aguas subterráneas de los acuíferos de interés. También se revisaron los puestos para asegurarse de que cumplían el requisito de autoría. Se comprobó la autoría de los puestos con títulos poco claros y, a continuación, se revisaron los textos completos junto con los puestos que habían superado las comprobaciones de título y autoría. Los textos completos debían cumplir los mismos requisitos de relevancia que las publicaciones académicas. Para su inclusión, el post necesitaba hacer un análisis de los acuerdos formales y/u otras políticas importantes a la gestión del recurso y uno o más de los seis acuíferos necesitaba ser el enfoque principal del análisis. La Figura 7 muestra el proceso de revisión y selección de los posts.

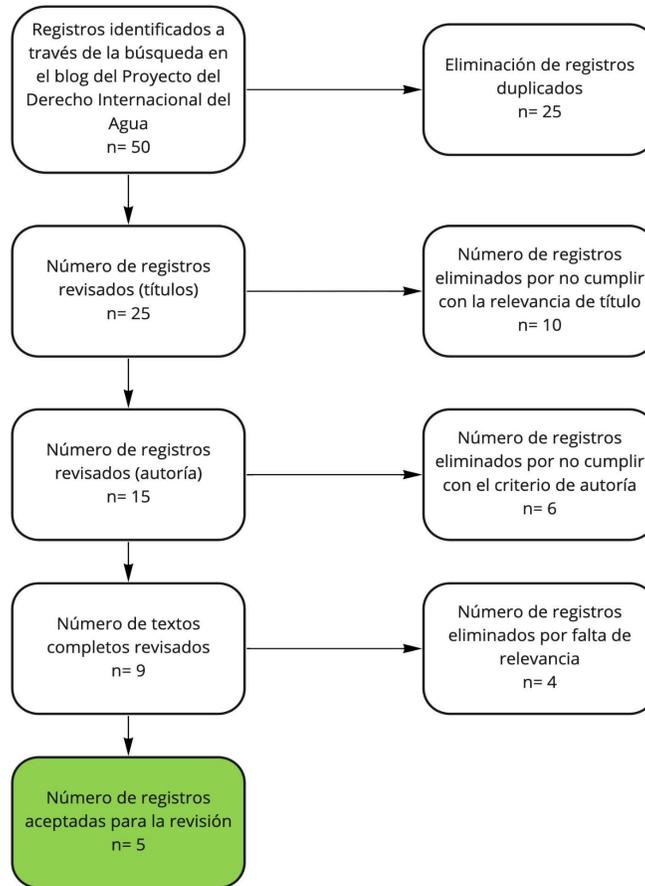
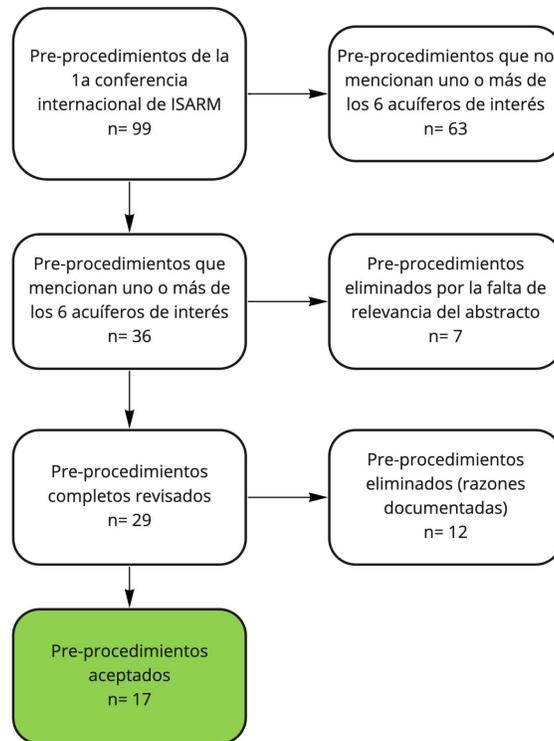


Figura 7 El flujograma para la selección de contribuciones informales por expertos. Al final, 5 entradas fueron incluidas (Elaboración propia).

### 2.1.5 Actas de la conferencia internacional de ISARM

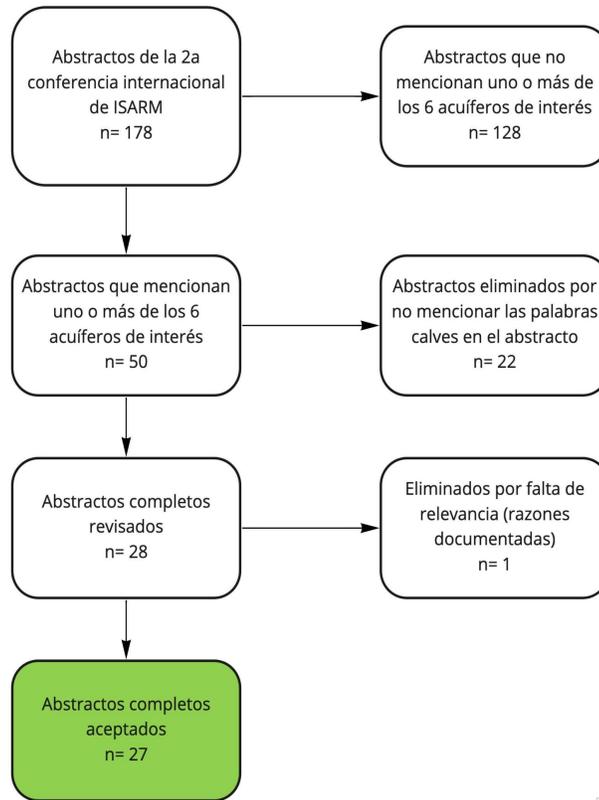
ISARM ha albergado dos conferencias internacionales con el objetivo de resaltar los esfuerzos de la comunidad internacional relacionados con el tema del agua subterránea. Dado que ISARM es la organización más importante para el tema de los acuíferos transfronterizos, las actas de las conferencias proporcionan información importante para responder a la pregunta de investigación. Se han publicado los pre-procedimientos para la primera conferencia en 2010 y los resúmenes de la segunda conferencia que se llevó a cabo en 2021. Para hacer la revisión de los pre-procedimientos, se buscaron los nombres de los seis acuíferos con la herramienta de búsqueda para encontrar todos los escritos que refieren a estos cuerpos de agua. Después, se revisaron los resúmenes de los pre-procedimientos para las palabras claves. Luego, se revisaron los textos completos solo para los pre-procedimientos que mencionan uno o más de los seis acuíferos y que tienen uno o más de las palabras claves en su resumen. La Figura 8 muestra el

proceso de selección para los pre-procedimientos. Al final, 17 pre-procedimientos fueron aceptados.



**Figura 8** El flujograma para la selección de procedimientos de la primera conferencia de ISARM. Al final, 17 procedimientos fueron incluidos (Elaboración propia).

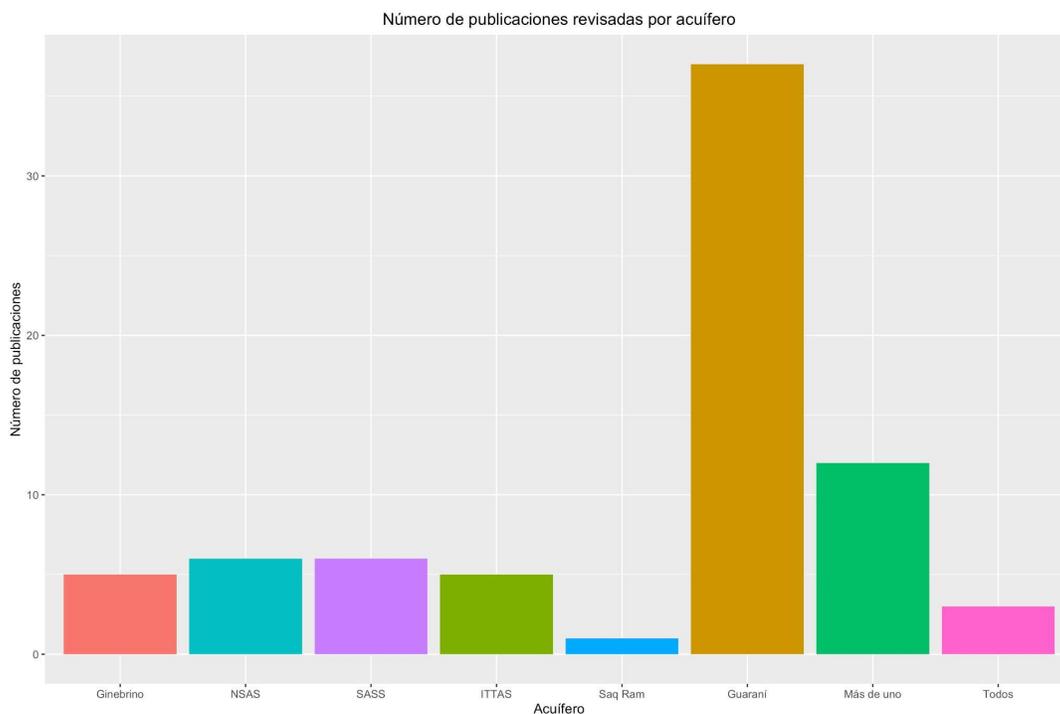
El proceso de revisión fue distinto para los resúmenes de la segunda conferencia dado que escritos más largos (como los de la primera conferencia) no están disponibles. Por eso, el proceso de revisión buscaba encontrar (1) cuántos resúmenes hacía referencia a uno o más de los seis acuíferos, (2) cuántos de los resúmenes que cumplen con el primer criterio también incluía una o más de las palabras claves y (3) que es el tema principal que abordaba el resumen. La Figura 9 muestra el proceso de selección para los resúmenes. Al final, 27 resúmenes cumplieron con los requisitos y fueron aceptados.



**Figura 9** El flujograma para la selección de resúmenes de la segunda conferencia de ISARM. Al final, 27 resúmenes fueron incluidos (Elaboración propia).

### 2.1.6 Número de publicaciones por acuífero

La Figura 10 muestra el número de publicaciones incluidas en la revisión por acuífero.



**Figura 10** Número de publicaciones revisadas por acuífero (Elaboración propia).

El acuífero Guaraní tiene el número más alto de publicaciones. Por consecuencia, la experiencia relacionada con el acuífero Guaraní tenía mayor influencia en la determinación de los elementos que influyen a la cooperación. Además, el número de publicaciones por acuífero muestra que hay mucho para aprender sobre estos casos. Aunque estos acuíferos tienen reconocimiento debido a sus acuerdos formales, los retos relacionados con el estudio de estos recursos existen todavía.

## 2.2 Identificación de impulsores de la cooperación

### 2.2.1 Resultados por tipo de publicación

El primer paso en la identificación de elementos de la cooperación consistió en una revisión de los seis acuerdos y documentos de estudios gubernamentales elaborados para apoyar la creación de un acuerdo o para fortalecer un acuerdo existente. La tabla 2 muestra las características en común entre los seis acuerdos y sus estudios correspondientes. Para ser una característica común, se necesitaba estar presente en el acuerdo o su estudio correspondiente para dos o más acuíferos. La tabla 2 es una síntesis de las características y una gráfica más detallada que muestra el proceso de identificar estas características se puede encontrar en el apéndice A1.

<b>Características en común</b>
Establecimiento de comités y/o comisiones
Importancia de la información técnica-científica como: bases de datos, redes de monitoreo, SIGs, mapas, modelo matemáticos y escenarios de uso
El intercambio de información
La comunicación y divulgación de información
La inclusión de marcos jurídicos internacionales y regionales
La participación de organizaciones internacionales y otros actores importantes
Documentación de los riesgos transfronterizos
Implementación de proyectos locales y la inclusión de comunidades locales
Necesidad de fortalecer las capacidades institucionales
Importancia de la resolución de conflictos
La protección del medio ambiente y de comunidades vulnerables
Incorporación de varios principios de la ley internacional y otros principios para la gestión de recursos naturales

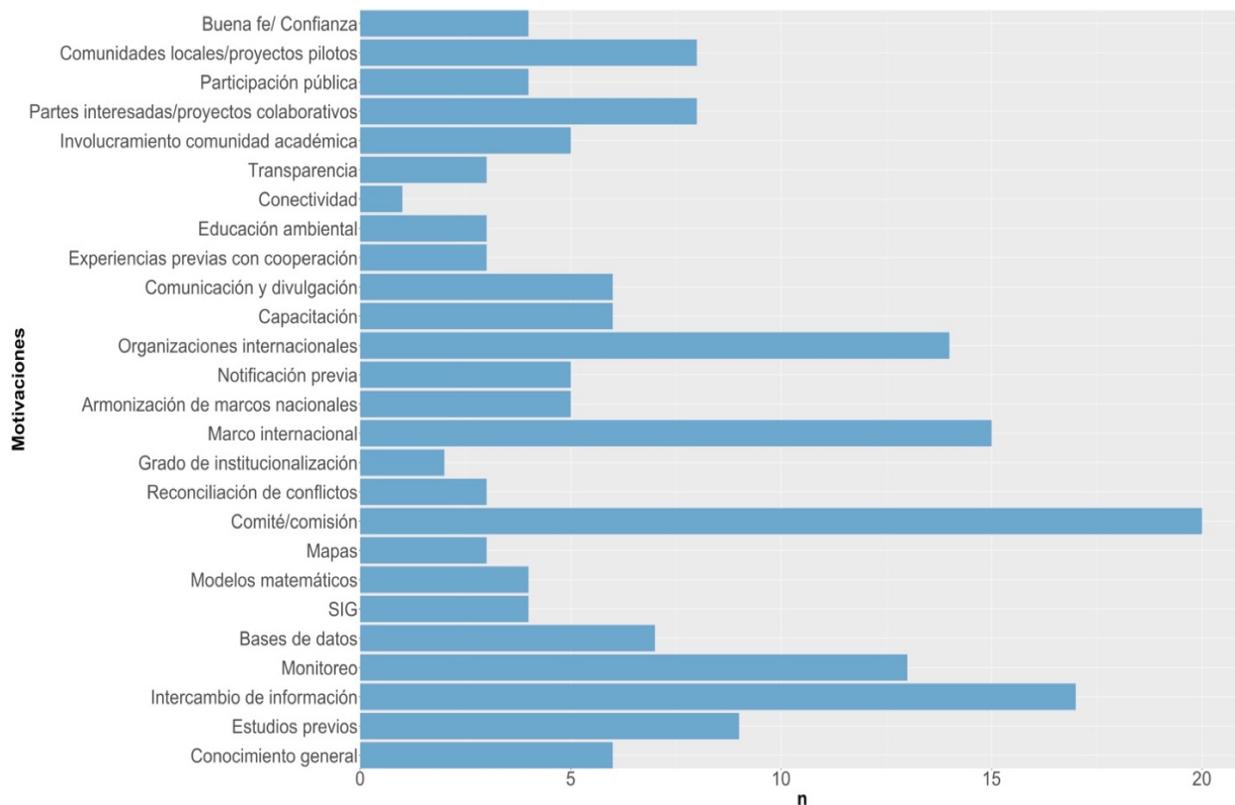
**Tabla 2** Elementos de la cooperación transfronteriza y la frecuencia con la que se mencionan en el texto del acuerdo o un estudio gubernamental (Elaboración propia).

Es importante anotar que la elaboración de estudios transfronterizos y gubernamentales también es una característica en común dado que cuatro de los seis acuíferos fueron abordados en estudios auxiliares. El acuífero Ginebrino y el acuífero Saq Ram son las dos instancias donde los gobiernos no cooperaron a través de estudios formales. Esto es interesante dado que los acuerdos para estos dos acuíferos son en gran medida de naturaleza técnica y no abordan cuestiones políticas más amplias como en los casos de los otros cuatro acuerdos.

Después de los acuerdos formales y los estudios gubernamentales, los artículos académicos, las entradas de blog del IWLP y los procedimientos de la primera conferencia de ISARM fueron revisados. Estas publicaciones se analizaron conjuntamente, ya que todas son de

carácter académico. Los resúmenes de la segunda conferencia del ISARM se analizaron por separado por las razones que se explican en la siguiente subsección.

La Figura 11 muestra los resultados de la revisión de las publicaciones académicas



**Figura 11** Elementos de la cooperación transfronteriza y la frecuencia con la que se mencionan en las publicaciones revisadas (Elaboración propia).

El gráfico de barras circulares muestra la frecuencia de los temas citados como importantes para la cooperación transfronteriza. La característica más mencionada ( $n=20$ ) fue la creación de un comité o comisión especializada para supervisar la aplicación del acuerdo sobre el acuífero. La característica con el menor número de menciones ( $n=1$ ) fue la conectividad, que describe el grado en que el acuífero se considera un recurso compartido.

Los procedimientos completos de la segunda conferencia de ISARM no fueron disponibles como para la primera conferencia. El tamaño de los resúmenes no es suficiente para identificar temas (como en el caso de las otras publicaciones académicas). Por lo tanto, los resúmenes fueron revisados por palabras claves que se mencionaron como conceptos importantes para la cooperación transfronteriza. La Figura 12 muestra las palabras asociadas con la cooperación y la frecuencia de estas palabras en los resúmenes revisados. En algunos casos, los

resúmenes tenían una redacción diferente del mismo concepto. Estas palabras se agruparon y se describieron de forma general. Por ejemplo, las referencias a la Convención de las Naciones Unidas sobre los cursos de agua, el proyecto de artículos de las Naciones Unidas sobre los acuíferos transfronterizos u otro marco jurídico internacional o regional importante se agruparon generalmente en la categoría "marco internacional". La utilidad de agrupar conceptos relacionados de esta manera se expone en la siguiente sección que explica las áreas temáticas que describen las características comunes para la cooperación.

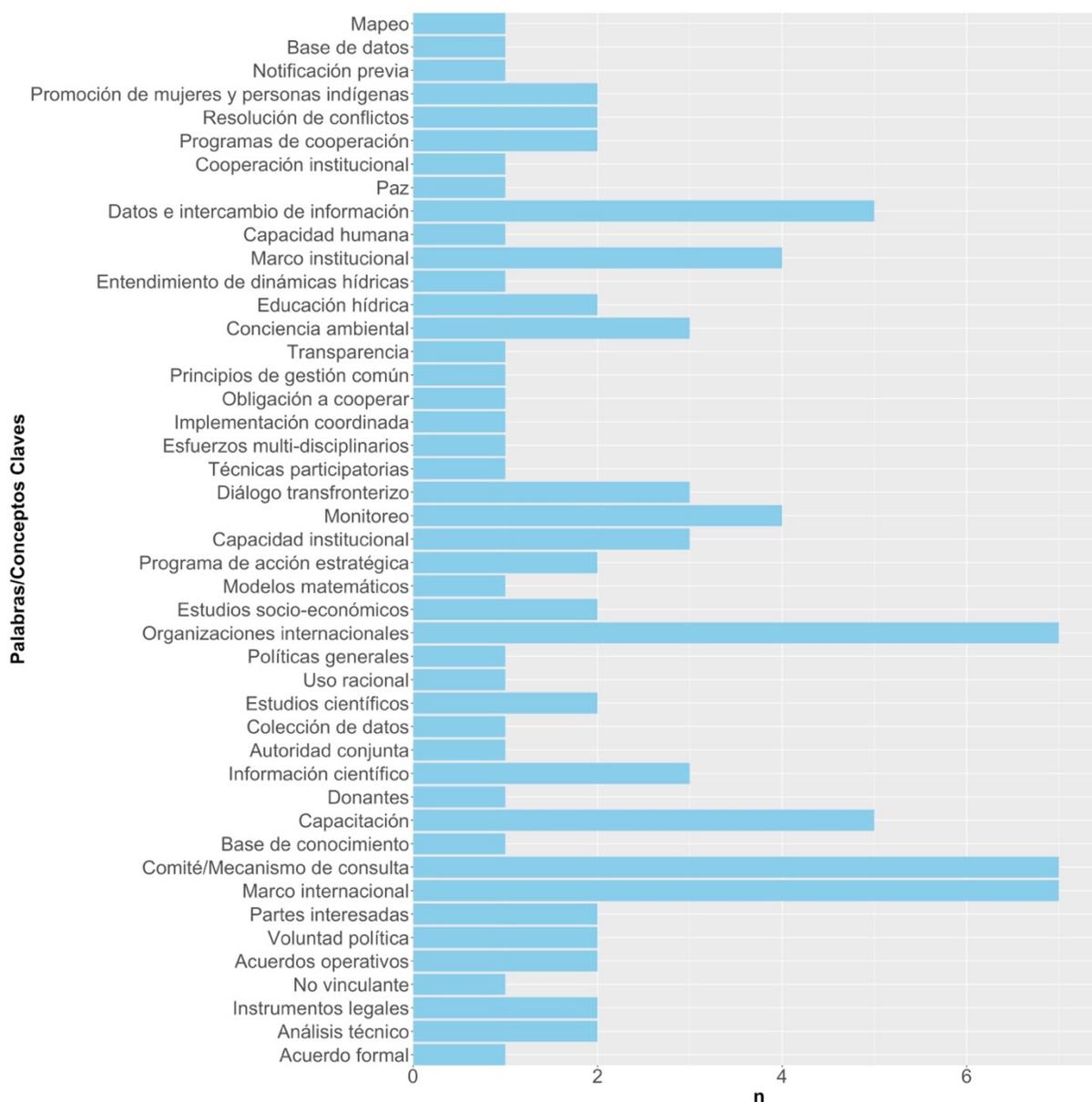


Figura 12 Las palabras asociadas con la cooperación y la frecuencia de estas palabras en los resúmenes revisados (Elaboración propia).

Las palabras claves/conceptos claves más comunes fueron “organizaciones internacionales”, “comité/mecanismo de consulta” y “marco internacional” (n=7). Varias palabras fueron mencionadas solo una vez. El número de palabras y conceptos claves relacionados con la cooperación transfronteriza muestra la diversidad de opciones para la cooperación. Es importante recordar que cada caso es distinto y mientras que conceptos generales aplican a la mayoría de los casos, hay elementos únicos de la cooperación que depende de las características físicas y políticas del acuífero.

## 2.2.2 Resultados por área temática

Para comprender mejor los elementos que contribuyen a la cooperación transfronteriza, las características comunes a los tres tipos de fuentes se agruparon en áreas temáticas. Las áreas temáticas son:

1. Conocimiento, ciencia e información
2. Estructura administrativa
3. Comunicación
4. Participación de actores

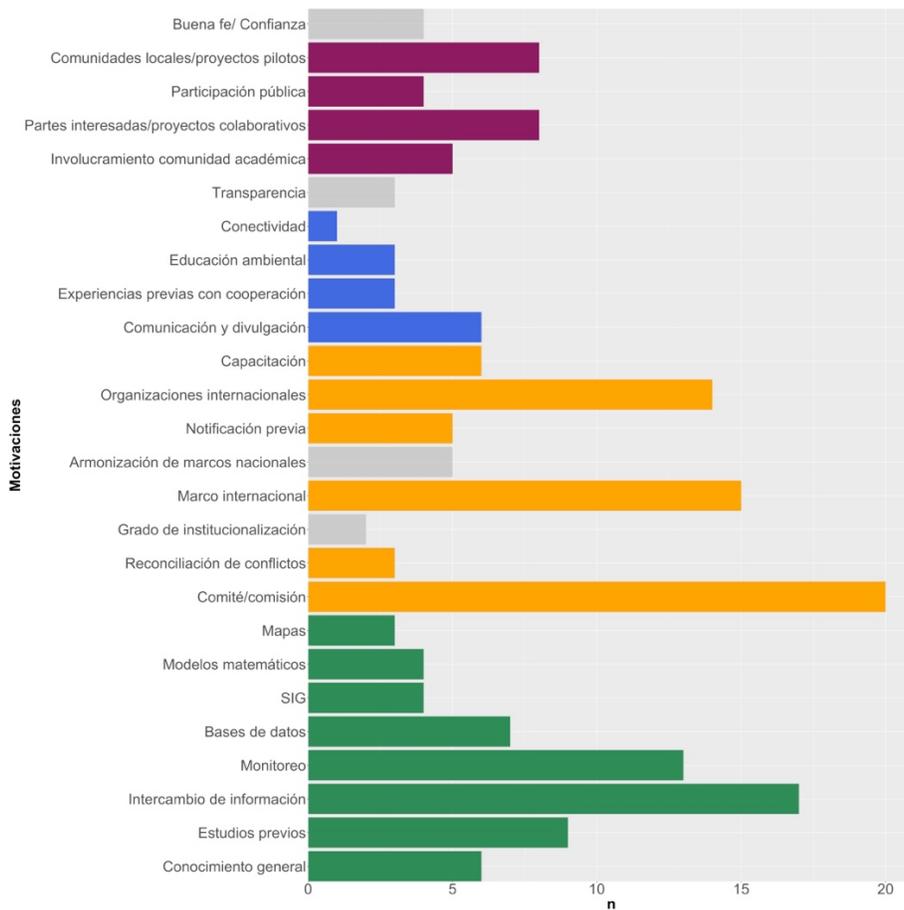
La designación de áreas temáticas ayudó a identificar las características comunes que comparten los tipos de fuentes<sup>3</sup>. Las Figuras 13-15 muestran los resultados del análisis por área temática. Las características resaltadas son las que comparten los tres tipos de fuentes. El color representa el área temática en la que se ha situado cada característica.

---

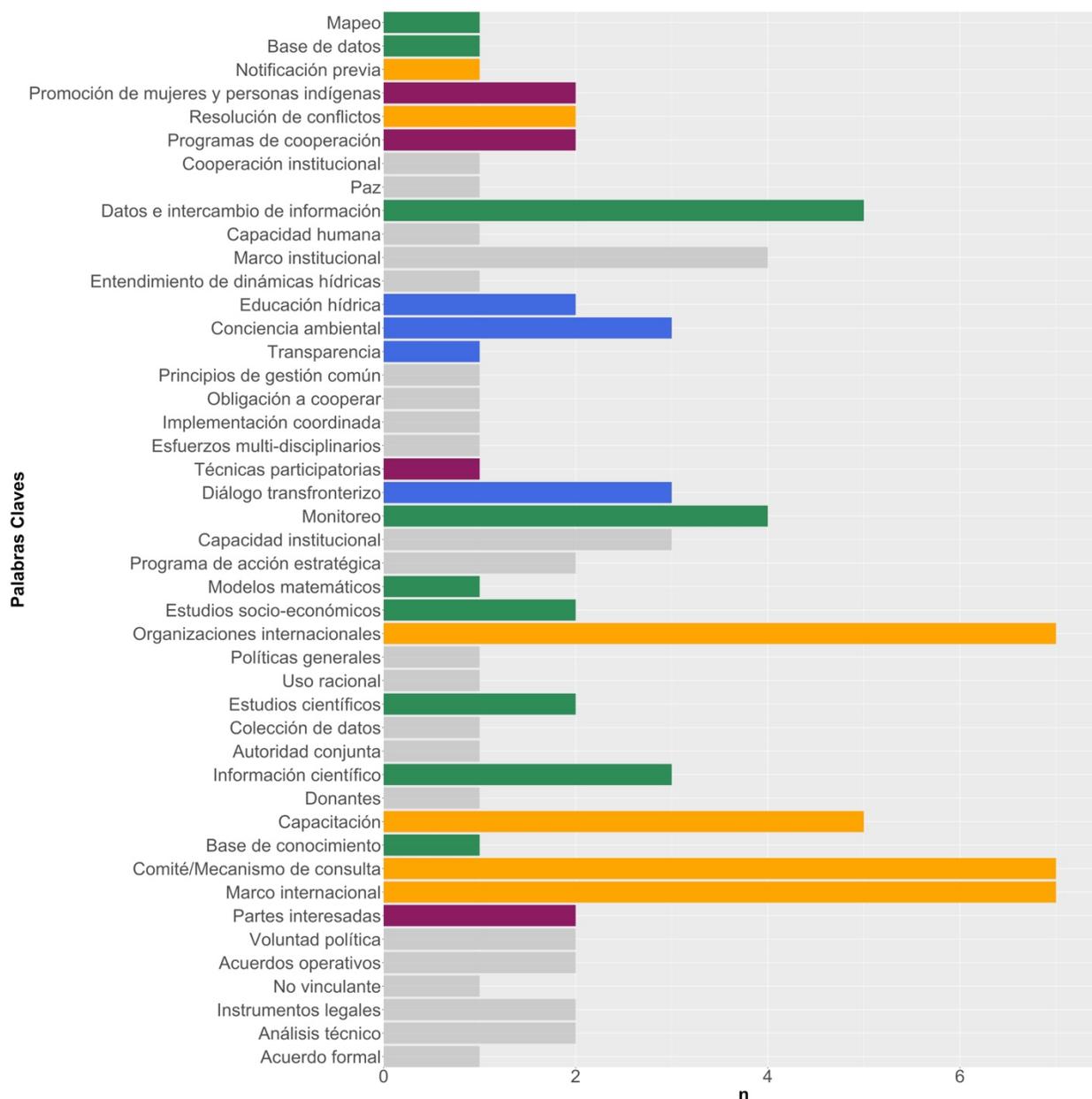
<sup>3</sup> Las características comunes no siempre comparten la misma redacción del concepto. En el Apéndice A2 se detalla la agrupación de las características que son similares.

Área temática	Elemento
Conocimiento, ciencia e información	Base de datos
	Redes de monitoreo
	SIG
	Mapas
	Modelos matemáticos
Estructura administrativa	Escenarios de uso
	Comités y/o comisiones
	Marco jurídico internacional/regional
	Organizaciones internacionales
	Capacidad institucional
Comunicación	Resolución de conflictos
	Gestión de recursos
Participación de actores	Comunicación y divulgación de información
	Documentación de riesgos transfronterizos
	Proyectos locales
	Protección del ambiente y comunidades vulnerables

**Figura 13** Resultados del análisis por área temática, documentos gubernamentales. El color azul corresponde con conocimiento, ciencia e información, verde con estructura administrativa, naranja con comunicación y morado con la participación de actores (Elaboración propia).



**Figura 14** Resultados del análisis por área temática, publicaciones académicas. El color verde corresponde con conocimiento, ciencia e información, naranja con estructura administrativa, azul con comunicación y morado con la participación de actores. Motivaciones en gris son mencionadas en las publicaciones académicas pero no son mencionadas en los documentos gubernamentales y los resúmenes (Elaboración propia).



**Figura 15** Resultados del análisis por área temática, resúmenes. El color verde corresponde con conocimiento, ciencia e información, naranja con estructura administrativa, azul con comunicación y morado con la participación de actores. Palabras/conceptos claves en gris son mencionadas en los resúmenes pero no son mencionadas en los documentos gubernamentales y las publicaciones académicas (Elaboración propia).

### 2.2.2.1 Conocimiento, ciencia e información

Como anotó Patiero (2016) “el mínimo común denominador de todos los acuerdos ad hoc es el establecimiento de algún tipo de obligación o mecanismo para el intercambio de datos e

información, o su generación” (p. 856). El conocimiento e información científica es integral para la cooperación y gestión sostenible de acuíferos transfronterizos. De los instrumentos científicos, los más comunes son sistemas para el intercambio de información, redes de monitoreo, bases de datos comunes, sistemas de información geográfica, modelos matemáticos y mapas geoespaciales. El intercambio de datos es un principio de buena práctica de la ley internacional (Eckstein, 2010). El intercambio de datos facilita la cooperación y fomenta la institucionalización de esfuerzos conjuntos (Schmeir, 2010). De los Cobos (2018) determinó que la acumulación de información confiable sobre las propiedades geológicas e hidrogeológicas a través de un sistema extenso de monitoreo y evaluación ha apoyado los esfuerzos para proteger acuíferos transfronterizos.

El almacenamiento de información científica es a menudo el primer acercamiento con la cooperación transfronteriza. En el caso de NSAS, Quadri (2019) apunta que el desarrollo de “normas de procedimiento relativas al intercambio de datos/información y a la vigilancia del acuífero” siguieron la colaboración en el proceso evolutivo demostrando un interés cada vez mayor en la gestión conjunta (p. 363-364). Villar (2016) argumentó que los estudios científicos impulsados por la comunidad académica construyeron la base de cooperación transfronteriza en el caso del acuífero Guaraní. Se explicó que

los científicos de las universidades e institutos nacionales representaron una fuerza destacada en el proceso de cooperación..., ya que realizaron los primeros estudios sobre el acuífero, descubrieron su carácter transfronterizo y crearon la denominación Acuífero Guaraní, que tenía un mayor atractivo social que los tradicionales nombres de formaciones geológicas (Villar, 2016, p. 13).

Los mandatos de todos los comités, comisiones o mecanismos de consulta incluyen la responsabilidad de estudiar, monitorear y/o intercambiar información técnica-científica relacionada con el acuífero. Los estudios gubernamentales también juegan un papel importante para la creación de información y conocimiento. Patiero (2016), citando a Mechlem (2011), explicó que

la mayoría de los acuerdos existentes sobre acuíferos transfronterizos fueron precedidos por proyectos financiados externamente que tenían un gran componente de generación de conocimientos y estudio del recurso compartido y que tenían como objetivo la recopilación e intercambio de datos e información.... Esta fase también parece un

requisito previo esencial para establecer una base para la cooperación posterior y para crear confianza antes de avanzar hacia un acuerdo más formal (p. 860).

El acuerdo acuífero Guaraní (2010) en su texto propio destaca la importancia de establecer programas de cooperación transfronteriza “con el propósito de ampliar el conocimiento técnico y científico, ... promover el intercambio de informaciones y sobre prácticas de gestión, así como desarrollar proyectos comunes”. Como explica Cassuto (2011), “la información científica precisa y detallada [es] urgente y crítica” (p. 667); por lo tanto, codificarla en el texto de un acuerdo formal es un paso importante para fortalecer la relación transfronteriza.

Es importante señalar que las características que fomentan la cooperación también pueden enmarcarse como desafíos (que la característica facilite la cooperación mientras que la falta sea un obstáculo importante). La falta de información (n=13), la incertidumbre (n=3), metodologías no estandarizadas (n=1), los problemas con el acceso a la información (n=2), la falta de entendimiento de los temas científicos o técnicos (n=5), la falta de capacidad técnica (n=5) y la complejidad (n=8) fueron retos comunes para la cooperación transfronteriza. Sindico y Hawkins (2015) ofrecen un replanteamiento útil de estos retos cuando señalan que la incertidumbre científica debería animar a los países a “dejar de lado sus diferencias y considerar prácticas de gestión conjuntas destinadas a aumentar su nivel de comprensión del acuífero mediante estudios conjuntos e intercambios de información”.

Entre los tipos de publicación, las categorías relacionadas con el conocimiento, la ciencia y la información fueron las que más se compartieron. De los instrumentos descritos en los acuerdos y estudios gubernamentales, sólo la creación de escenarios de uso no se compartió con los otros tipos de publicaciones. Todos los temas relacionados con el conocimiento, la ciencia y la información descritos en las publicaciones académicas se mencionaron también en los otros tipos de publicaciones. De los resúmenes, sólo el “entendimiento de dinámicas hídricas” y el “análisis técnico” no fueron mencionados explícitamente en las otras publicaciones. Dicho esto, estos conceptos podrían estar relacionados con características comunes como los modelos matemáticos o los sistemas de información geográfica. En el caso de los escenarios de uso, los siguientes capítulos de esta tesis van a analizar los impactos del cambio climático para proponer una serie de posibles escenarios de uso. Por lo tanto, la metodología utilizada en este trabajo podría ser replicada para otros casos para ayudar en el fortalecimiento de la comprensión científica de los acuíferos transfronterizos.

#### 2.2.2.2 Estructura administrativa

Penney et al. (2021) hallaron que "la confianza transfronteriza está formada no sólo por las creencias inherentes que tiene un país con respecto a otro, sino también por la capacidad institucional, las interacciones históricas, las iniciativas bilaterales en curso, las prioridades estratégicas y las narrativas culturales" (p. 2). La siguiente sección aborda la importancia de la estructura administrativa para el fortalecimiento de las capacidades institucionales y los esfuerzos de cooperación multilateral, centrándose en la importancia de un órgano de gobierno, las prácticas de buena fe y el apoyo organizativo.

La característica que se citó con más frecuencia como fundamental para la cooperación transfronteriza fue la creación de un comité, comisión o mecanismo de consulta para la gestión del acuífero. Los acuerdos fundacionales de los seis acuíferos mencionan estos órganos administrativos, así como su estructura y responsabilidades. Incluso en los casos en los que no existen acuerdos formales, Tinker (2016) reconoce que "la creación de una comisión conjunta... se recomienda... y se vería como parte de un esfuerzo de buena fe para cooperar" (p. 261).

Villar y Costa-Ribeiro (2011) destacan que "la comisión es un componente clave en el proceso de cooperación cuyo éxito depende de cómo se estructurará y cómo será apoyada por los estados miembros" (p. 655). La estructura y la responsabilidad de cada uno de los seis órganos organizativos varía en función del contexto y del objetivo del acuerdo. Los comités encargados de los acuíferos Ginebrino y Saq Ram son en gran medida de carácter técnico, responsables del seguimiento y el intercambio de información relevante para la gestión del acuífero. Los acuerdos para estos dos acuíferos no pretenden alcanzar objetivos políticos más amplios, y las limitadas capacidades de los comités reflejan esta limitación. En cambio, los mecanismos de consulta para el SASS y el ITTAS incorporan a los ministerios nacionales pertinentes, a técnicos y a una institución de investigación independiente (que en estos casos es la OSS). El aumento de la implicación institucional es necesario para alcanzar los objetivos más amplios de desarrollo sostenible que se plantean en los acuerdos y estudios gubernamentales para estos sistemas de acuíferos.

En todos los casos, estos organismos fueron creados específicamente para gestionar exclusivamente el acuífero (lo que significa que los mandatos de las organizaciones transnacionales de aguas superficiales, medioambientales, agrícolas o de otro tipo existentes no se ampliaron para asumir la responsabilidad adicional de gestionar el acuífero). Por ejemplo,

Villar y Costa-Ribeiro (2011) señalan que el MERCOSUR permite la cooperación transfronteriza en cuestiones medioambientales, pero Argentina, Brasil, Uruguay y Paraguay decidieron no utilizar el marco del MERCOSUR (o la comisión transfronteriza del Río de la Plata) para el acuífero Guaraní. En su lugar, la creación de una nueva comisión específica para el acuífero permitió a los países resolver su disputa sobre la soberanía nacional y avanzar en el proceso de cooperación (Villar y Costa-Ribeiro, 2011). Esto es importante para el caso del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco ya que la CILA/IBWC ya existe. Las responsabilidades actuales de la CILA/IBWC (definidas por los tratados de agua) no incluyen la gestión de las aguas subterráneas. Por lo tanto, es importante que, en el futuro, los gestores del agua en el contexto México-Estados Unidos consideren la creación de un comité o comisión de socios que pueda ayudar en la gestión de los acuíferos transfronterizos.

La creación de estos organismos no está exenta de desafíos. Como menciona Schmeir (2010), "las organizaciones que gestionan las aguas subterráneas compartidas deben... tener suficiente poder frente a sus miembros" (p. 485). Estas organizaciones deben recibir la cantidad adecuada de recursos humanos y financieros para poder ejecutar sus funciones. Los organismos también deben contar con autoridad legal. De los Cobos (2018) reconoce las limitaciones impuestas a la comisión rectora ginebrina por la falta de autoridad vinculante que le otorga el acuerdo. La Autoridad Conjunta para el NSAS también carece de carácter jurídico y ha tenido dificultades para continuar la cooperación formal (Maxwell, 2010; Quadri, 2019). Aunque un acuerdo puede establecer un órgano de gobierno, la falta de compromiso continuado puede paralizar su formación; este es el caso de la comisión para el acuífero Guaraní, que aún no se ha establecido a pesar de que ha pasado más de una década desde la creación del acuerdo y han transcurrido casi cinco años desde la ratificación del acuerdo por parte de los cuatro países (Villar, 2020).

Los mecanismos de notificación previa y de resolución de conflictos son esenciales para el funcionamiento del proceso institucional. La Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho de los Usos de los Cursos de Agua Internacionales para Fines Distintos de la Navegación, que aborda la gobernanza de los ríos transfronterizos y otras masas superficiales, incluye la notificación previa como un pilar del derecho internacional del agua. Eckstein (2010) señala que la obligación de notificación previa fue diseñada para "evaluar las posibles consecuencias y buscar un entendimiento o compromiso" (p. 4). Aunque la notificación previa es

una buena práctica de cooperación, debe ir acompañada de otras prácticas. Como explica Tinker (2016), "la cooperación se consigue con la debida diligencia, observando las normas de procedimiento de acceso a la información, notificación y consulta, y buscando una solución de buena fe a cualquier problema que pueda surgir entre los Estados" (p. 259).

Junto con la notificación previa, la reconciliación de conflictos es un principio de la ley internacional que es importante para proteger la esencia de cooperación. La convención sobre el derecho de los usos de los cursos de agua internacionales de la Organización de Naciones Unidas reconoce la necesidad de mecanismos para la resolución de conflictos y que estos mecanismos deben tomar en cuenta los principios de uso equitativo y racional y el principio precautorio (Rieu-Clarke et al., 2012). De los seis acuerdos para la gestión de los acuíferos transfronterizos, tres incluyen procesos institucionales para la resolución de conflictos y uno tiene la capacidad institucional para la resolución de conflictos, pero no cuenta con una provisión delineada al respecto.

El acuífero Ginebrino, el ITTAS y el SAG tienen artículos dentro de sus acuerdos para la resolución de disputas. El trigésimo sexto artículo del memorando de entendimiento para el ITTAS pide que todos los conflictos entre los países se resuelvan de forma pacífica a través de los procesos del mecanismo de consulta (Memorandum of Understanding, 2014). Las disputas más graves deben ser resueltas por el consejo de ministros con la ayuda del comité permanente de científicos y técnicos (Memorandum of Understanding, 2014). En casos extremos, se puede recurrir, para la medicación, a la Comisión de Conciliación de la Unión Africana y después a la Corte Internacional de Justicia para el arbitraje (Memorandum of Understanding, 2014). Tinker (2016) destaca que en el caso del acuífero Guaraní "las disputas sobre las decisiones relativas al 'uso múltiple, sostenible y equitativo' del agua pueden evitarse o resolverse, ya que se reconoce la soberanía territorial sobre el agua del acuífero" (p. 256). El mecanismo para la resolución de disputas en el Acuerdo Acuífero Guaraní es vago. Las negociaciones originales, que comenzaron a principios de la década de 2000, dieron como resultado un proyecto de acuerdo que tenía una cláusula detallada de resolución de conflictos; como señala Sindico (2010), la inclusión de una resolución de conflictos detallada paralizó la práctica cooperativa. Cuando los países decidieron posteriormente (en 2009 y 2010) retomar el tema del acuerdo, optaron por dejar la resolución de conflictos intencionadamente vaga, en parte para evitar los conflictos anteriores relacionados con esta sección (Sindico, 2010).

La inclusión de prácticas de buena fe, como la notificación previa y las cláusulas de resolución de conflictos, demuestra la importancia fundamental de contar con marcos internacionales sólidos para el desarrollo de iniciativas de cooperación a nivel transnacional. Los avances en los marcos jurídicos internacionales son bastante nuevos; de los Cobos (2018) describe cómo la evolución del marco europeo se reflejó en la actualización de 2008 del acuerdo sobre el acuífero Ginebrino, señalando en particular cómo algunos instrumentos jurídicos establecidos por la comunidad europea en general facilitaron una mayor cooperación regional entre Francia y Suiza. Como anota Villa (2016), el marco internacional puede funcionar como ayudante en el proceso de formar tratados/acuerdos específicos. Sindico y Hawkins (2015) mencionan que el marco internacional funciona para establecer normas para países que quieren cooperar. Quadri (2015) expresó una perspectiva similar cuando anotó que el progreso en el marco internacional puede funcionar como puntos de referencia al momento de elaborar tratados.

El avance más notable en el marco internacional fue la creación del Proyecto de Artículos de la ONU sobre Acuíferos Transfronterizos (Resolución 63/124). Este proyecto de artículos ha influido en el proceso de elaboración de políticas, en particular para el acuífero Guaraní. Villar y Costa-Riberio (2011) comentan que “el objetivo principal de [la Resolución 63/124] es alentar a los Estados a incluir los acuíferos transfronterizos en sus agendas y a establecer acuerdos bilaterales y regionales sobre el tema” (p. 653). Por ende “[la] resolución ha contribuido, en términos de incentivos políticos y técnicos, a la firma del Acuerdo sobre el Acuífero Guaraní” (Villar y Costa-Riberio, 2011, p. 653). Las menciones a la Resolución 63/124 aparecen tanto en el acuerdo sobre el acuífero Guaraní como en el Memorando de Entendimiento para el ITTAS, que son dos de los tres acuerdos formales que han surgido desde la elaboración del proyecto de artículos en 2008.

Si bien un marco internacional puede facilitar la cooperación mediante el establecimiento de directrices y mejores prácticas, es importante tener en cuenta que el marco internacional todavía se encuentra en una "fase incipiente" (Eckstein, 2010). Romero-Lécrivain (2019, p. 80) explica que existe

esencialmente [una] insuficiente protección jurídica internacional, que limita los intentos de acuerdos, aunque no parece impedirlos. El Derecho Internacional de los acuíferos transfronterizos se encuentra todavía en una etapa emergente, con instrumentos no vinculantes y bastante parciales, que se limitan a fomentar conductas. Ha quedado en

evidencia la necesidad de darle un final formal al Proyecto de Artículos de 2008, aun con las limitaciones señaladas. Si bien parece que formalizar un acuerdo vinculante sea relevante para garantizar la cooperación, y a menudo se presenta como la meta última, cabe recordar que los acuerdos no representan tal meta final de un proceso de cooperación. El incumplimiento puede a su vez derivar en malas relaciones internacionales entre los Estados y en potencial conflicto.

La aplicación de un acuerdo transfronterizo requiere un gran apoyo operativo. Dado que el apoyo nacional suele estar limitado por barreras políticas o financieras, las organizaciones internacionales relacionadas con la gestión del agua, el medio ambiente y el desarrollo social proporcionan un refuerzo institucional crucial. Las organizaciones internacionales ayudan al proceso de cooperación de varias maneras, a saber, mediante la financiación, la prestación de apoyo técnico o institucional y el establecimiento de espacios de cooperación multilateral. Como explica Villar (2016), "las organizaciones internacionales o los fondos del Sistema de las Naciones Unidas han sido los principales responsables [sic] de promover el conocimiento y la concienciación sobre la necesidad de proteger las aguas subterráneas y la cooperación" (p. 7).

La prestación de asistencia financiera y técnica es la principal vía por la que las organizaciones internacionales contribuyen al proceso de cooperación. Quadri (2015, 2019) señala cómo los fondos del GEF, PNUD, IAEA y la UNESCO-IHP apoyaron la ejecución del Programa de Acción Regional para la gestión integrada del NSAS. Las organizaciones apoyaron "el desarrollo de una estrategia regional... destinada a la explotación del acuífero a largo plazo, y a la satisfacción de las necesidades de agua de los cuatro países del acuífero" (Quadri, 2015). En el caso del acuífero Guaraní, Hirtata et al. (2020) describen el "rol protagónico e impulso" de los organismos internacionales especialmente en la creación de "condiciones financieras y estructurales" para la preparación y ejecución del Proyecto Acuífero Guaraní (p. 387). Burchi (2018) destaca el liderazgo de ISARM, la iniciativa apoyada por la UNESCO-IHP, en el esfuerzo por aumentar el conocimiento científico en torno a los acuíferos transfronterizos. Los esfuerzos del "ejercicio de generación de conocimiento y mapeo" de ISARM demostraron "el camino a seguir en cuanto a la base legal de la cooperación" (Burchi, 2018, p. 18). En la tabla 3 se enumeran las organizaciones internacionales que participaron en proyectos relacionados con los acuíferos de interés, así como el tipo de apoyo que ofrecieron. Es importante señalar que el Acuífero Ginebrino no aparece en la tabla ya que la cooperación entre

los usuarios locales logró establecer un esquema de uso sin necesidad de la participación de la comunidad internacional.

Acuífero	Organización	Aportaciones
NSAS	GEF	Apoyo técnico para estudios (informes), diseño de proyectos, financiamiento
	PNUD	Agencia para la implementación del proyecto de GEF, financiamiento
	UNESCO	Financiamiento
	Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA)	Apoyo técnico para estudios, financiamiento
SASS	GEF	Apoyo técnico para el Proyecto SASS (informes), financiamiento para las tres etapas del Proyecto SASS (SASS I, SASS II, SASS III)
	OSS	Apoyo técnico y científico, miembro del mecanismo de consulta
	UNECE	Apoyo técnico para los estudios sobre las soluciones nexos
	Asociación Mundial del Agua	Apoyo técnico para los estudios sobre las soluciones nexos
	UNEP	Implementación del Proyecto SASS, financiamiento, Agencia para la implementación del proyecto de GEF
	FAO	Financiamiento para SASS I y SASS II
	Fondo Internacional para el Desarrollo Agrario	Financiamiento para SASS I y SASS II
	Fonds Français pour l'Environnement Mondial (FFEM)	Financiamiento para SASS II y SASS III
	SDC Switzerland	Financiamiento para SASS I, SASS II

ITTAS	GEF	Apoyo técnico para estudios (informes), diseño de proyectos, financiamiento
	OSS	Coordinadores del proyecto para la gestión conjunta e integrada de los recursos hídricos del acuífero Iullemeden -Taoudeni/ Tanezrouft y el río Níger (GICRESAIT), apoyo técnico con estudios
	UNDP	Agencia para la implementación del proyecto de GEF, financiamiento
	FAO	Apoyo técnico para identificar y abordar los riesgos asociados con el uso del ITTAS, financiamiento
	UNEP	Agencia para la implementación del proyecto de GEF, apoyo técnico para identificar y abordar los riesgos asociados con el uso del ITTAS, financiamiento
	UNESCO	Apoyo técnico para identificar y abordar los riesgos asociados con el uso del ITTAS, financiamiento
	FFEM	Financiamiento para el GICRESAIT
	Banque Africaine de Développement	Financiamiento para el GICRESAIT
	Facilité Africaine de l'Eau	Financiamiento para el GICRESAIT
Saq Ram	UN-ESCWA	Apoyo científico para el estudio del sistema de acuíferos Saq Ram
	Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales de Alemania	Financiamiento para el estudio del sistema de acuíferos Saq Ram
Guaraní	Organización de Estados Americanos	Agencia para la ejecución del Proyecto Acuífero Guaraní, apoyo científico, apoyo institucional
	GEF	Financiamiento, apoyo técnico (informes)

	Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales de Alemania	Financiamiento para el Proyecto Acuífero Guaraní
	Banco Mundial	Agencia para la implementación del Proyecto Acuífero Guaraní
	IAEA	Cooperación técnica, financiamiento para el Proyecto Acuífero Guaraní
	Programa de Asociación para el Agua del Banco de los Países Bajos	Cooperación técnica, financiamiento para el Proyecto Acuífero Guaraní
	Centro Regional para la Gestión de Aguas Subterráneas América Latina y el Caribe (CeReGAS)	Centro de investigación establecido para mejorar la cooperación internacional y apoyar los estudios sobre acuíferos en América Latina y el Caribe

**Tabla 3** Las organizaciones internacionales que participaron en la formulación de acuerdos entre países y cómo se los aportaron (Elaboración propia).

Más allá de ofrecer apoyo financiero y técnico, la participación de las organizaciones internacionales y regionales es crucial para la creación de espacios de cooperación multilateral. Las experiencias positivas previas de cooperación institucional a nivel transnacional abren oportunidades para la gestión de las aguas transfronterizas. Como explica Green (2010), la cooperación previa en materia de agua y medio ambiente a través de la OEA, el MERCOSUR y la Comisión de la Cuenca del Plata demostró a los países que comparten el Acuífero Guaraní que la cooperación institucional es posible y deseable. Las experiencias positivas a través de estas organizaciones estatales y no estatales facilitaron el proceso de una mayor integración institucional en el marco del Acuerdo del Acuífero Guaraní. Por lo tanto, las organizaciones regionales, internacionales, estatales y no estatales proporcionan capacidad para el desarrollo institucional de la gobernanza de las aguas subterráneas transfronterizas. Hirata et al. (2020) descubrieron que "la creación de capacidades y el fortalecimiento institucional probados por las instituciones [internacionales y regionales] dieron lugar a una amplia armonización de los conceptos centrales de las aguas subterráneas que condujo a una mayor voluntad de cooperación" (p. 389).

### 2.2.2.3 Comunicación

Un elemento central de la cooperación es la comunicación efectiva y eficaz entre los países. La comunicación puede darse en varios niveles, desde el transnacional hasta el local. Como destacan Hirata et al. (2020, p. 392)

los problemas que rodean a las aguas subterráneas suelen ser locales, y la comunicación debe centrarse también en el ámbito local. Sin embargo, se necesita una estrategia de comunicación más amplia para llegar a las instituciones centrales, que son las responsables de la gestión regional o nacional de los acuíferos. Los medios de comunicación tradicionales tienen un papel fundamental y hay que establecer un plan que implique las diferentes escalas de comunicación.

Margat et al. (2010) menciona la importancia de los diálogos constructivos y comunes entre las partes interesadas como método eficaz para promover la cooperación. La comunicación puede adoptar diversas formas; por ejemplo, podría afirmarse que el intercambio de datos es una forma de comunicación transnacional. Una estrategia de comunicación común es la unión de la difusión de información con la educación ambiental. Hirata et al. (2020) explican que el Fondo Ciudadano Guaraní, una estrategia de participación de la sociedad civil, logró difundir información sobre el proyecto del Acuífero Guaraní a 7,6 millones de personas mediante programas de televisión, folletos, programas de radio y otras estrategias de comunicación.

Lindsey-Herrera y Taks (2012) hallaron que la comunicación entre partes interesadas funciona para "promover, apoyar y profundizar la participación pública y fomentar la educación ambiental y del agua, la comunicación social, y la difusión de conocimientos" (p. 345). El Proyecto Guaraní imaginó la comunicación con cuatro instrumentos: una estrategia de comunicación regional, una estrategia de la comunicación con pueblos indígenas, una estrategia de comunicación con la sociedad civil a través del fondo Ciudadanía y una estrategia de comunicación con la comunidad académica a través del Fondo de Universidades (Lindsey-Herrera y Taks, 2012).

### 2.2.2.4 Participación de actores

La necesidad de facilitar la participación de los actores está íntimamente ligada a las estrategias de comunicación. La participación de los principales actores no gubernamentales (como la comunidad académica y las comunidades locales) en la elaboración de políticas de

gestión es de suma importancia para garantizar que los acuerdos formales recojan con precisión las necesidades de quienes dependen del acuífero.

Villar (2016) destacó la importancia de la participación de la comunidad académica en el inicio del proceso de cooperación entre los países que comparten el Acuífero Guaraní. Afirma que "los científicos de las universidades e institutos nacionales representaron una fuerza líder en el proceso de cooperación [del sistema Acuífero Guaraní]... la comunidad epistémica fue responsable de establecer las bases para clasificar este acuífero como un recurso natural compartido y articuló los primeros esfuerzos para promover este descubrimiento" (p. 13). Por lo tanto, se puede decir que "la acción conjunta para promover la gobernanza de las aguas subterráneas va más allá de los actores internacionales clásicos, comprendiendo por ejemplo a las organizaciones no gubernamentales y a la comunidad epistémica" (Villar, 2016, p. 3).

La comunidad académica es sólo una de las partes interesadas importantes que deben participar. Como mencionan Margat et al. (2010), "es necesaria una fuerte concertación entre todas las partes de todos los lados de las fronteras para definir estrategias a corto, medio y largo plazo". En general, debe haber una "búsqueda de participación y consenso social" durante la elaboración de proyectos y acuerdos a gran escala (Giraut et al., 2010). Como señala Hussein (2018, p. 58)

el agua se consume principalmente a nivel local, especialmente a nivel comunitario y municipal a través de marcos descentralizados. De ahí que la cooperación entre... países sea especialmente activa a través de estos municipios locales, y menos por parte de los estados centrales.

También se reconoce que debe hacerse hincapié en la inclusión de los pueblos indígenas, las mujeres y otras comunidades vulnerables (Giraut et al., 2010; OSS, 2014). Cassuto (2011) subraya cómo la incorporación de los conocimientos y la cosmovisión indígenas es necesaria para disminuir el protagonismo de las asimetrías de poder inherentes al espacio transnacional. La participación de las comunidades vulnerables debe estar estrechamente vinculada a las estrategias de comunicación; Lindsey-Herrera y Taks (2012) llaman la atención sobre cómo no todos los materiales de comunicación relacionados con el acuífero Guaraní se publicaron en lenguas indígenas. La falta de comunicación inclusiva limitó la participación de las partes interesadas y, por tanto, el proceso de cooperación en su conjunto.

Una estrategia comúnmente empleada para aumentar la participación de las partes interesadas locales fue la implementación de proyectos piloto y otros proyectos cooperativos. Se implementaron proyectos piloto para el SASS y el Acuífero Guaraní. El proyecto piloto del SASS logró comprender el papel de las prácticas agrícolas tradicionales en la preservación de los recursos hídricos subterráneos y los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas (OSS, 2014a). Los proyectos piloto del Guaraní reunieron a los municipios transfronterizos para aplicar la gobernanza del acuífero a escala local (OEA, 2009). Batista de Silva y Hussein (2019) destacan que los comités locales incluidos en los proyectos piloto lograron una cooperación transfronteriza exitosa. Los proyectos piloto han logrado un éxito contextual porque el "apoyo de las comunidades locales y las partes interesadas a las formas locales de cooperación se debe en gran medida a que la gobernanza de las aguas subterráneas es una alta prioridad a nivel local" (Hussein, 2018, p. 59). Por lo tanto, la participación de las comunidades locales es fundamental para la sostenibilidad y el compromiso a largo plazo que prometen los acuerdos formales.

## 2.3 Identificación de los retos principales para la cooperación transfronteriza

La discusión sobre las características que incrementan la cooperación entre países en el contexto transnacional se enriquece enormemente si se acompaña de una discusión sobre los principales retos relacionados con la gestión de los acuíferos transfronterizos. La comprensión de los desafíos generales desde el principio ayudaría a los responsables de la toma de decisiones en el contexto México-Estados Unidos, permitiendo la consideración temprana de posibles obstáculos y barreras a la cooperación. Para identificar los retos comunes, se empleó el mismo proceso analítico utilizado para la identificación de los impulsores comunes.

### 2.3.1 Resultados por tipo de publicación

La tabla 4 muestra los retos en común entre los seis acuerdos y sus estudios correspondientes. Para ser un reto común, se necesita estar presente en el acuerdo o su estudio correspondiente para dos o más acuíferos.

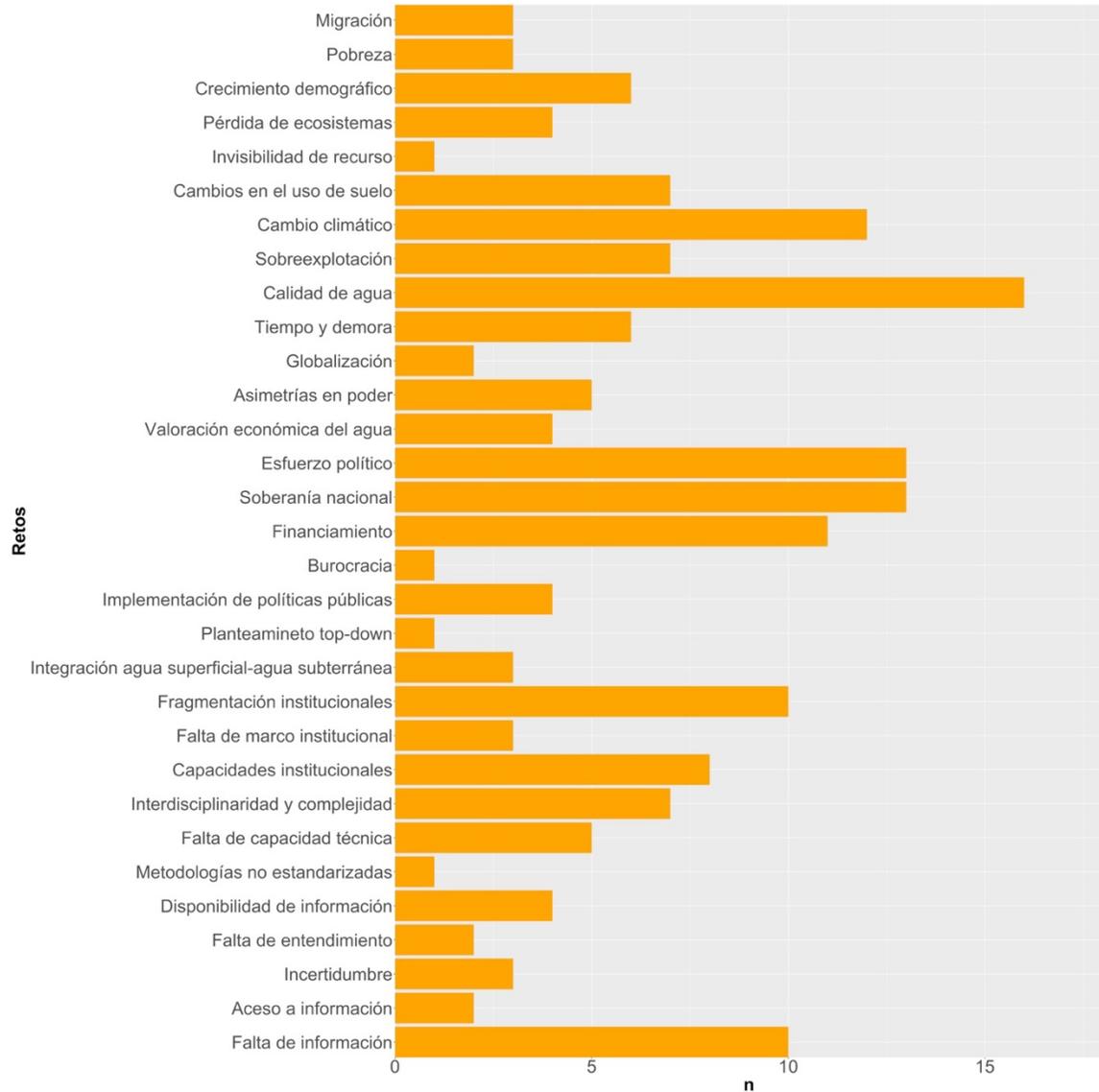
<b>Retos en común</b>
Información insuficiente

Pérdida de ecosistemas
Calidad de agua
Cambio climático
Crecimiento demográfico
Pobreza
Estructuras insuficientes para la gobernanza nacional
Integración de gestión con prioridades socioeconómicos
Competición entre sectores
Migración
Inestabilidad política/falta de priorización de aguas subterráneas
Sobreexplotación
Valoración económica del agua
Costo de inversiones en la infraestructura
Falta de educación
Implementación de políticas públicas
Marcos regulatorios débiles
Falta de recursos (humanos, financieros)
Falta de participación pública
Integración de gestión con los derechos humanos

**Tabla 4** Retos para la cooperación transfronteriza y la frecuencia con la que se mencionan en el texto del acuerdo o un estudio gubernamental (Elaboración propia).

Aunque no se mencionan en el texto de los acuerdos, los documentos gubernamentales de apoyo suelen mencionar los desafíos. Estos desafíos dilucidan los obstáculos a la aplicación del proyecto y pueden ayudar a explicar el fracaso de la política.

De igual modo, durante la revisión de las publicaciones académicas, se anotaron retos que se mencionaron en los textos. La Figura 16 muestra los retos identificados durante la revisión de las publicaciones académicas.

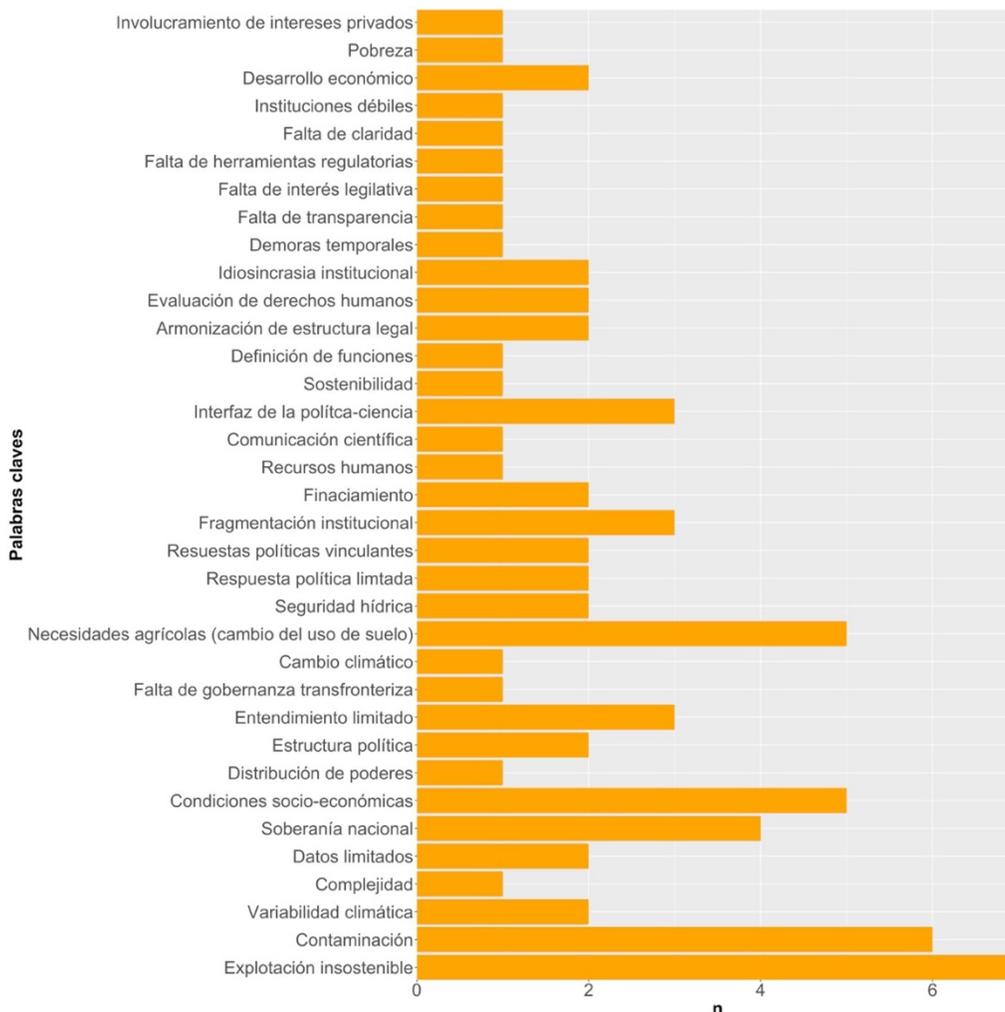


**Figura 16** Retos para la cooperación transfronteriza y la frecuencia con la que se mencionan en las publicaciones revisadas (Elaboración propia).

El gráfico de barras circulares muestra la frecuencia de los temas citados como obstáculos a la cooperación transfronteriza. El obstáculo más mencionado ( $n=16$ ) fue la contaminación de las aguas subterráneas y el mantenimiento de la calidad del agua (calidad de agua). Otros obstáculos que se mencionaron con alta frecuencia son la soberanía nacional ( $n=13$ ), la falta de interés política ( $n=13$ ) y el cambio climático ( $n=12$ ). Los obstáculos con menor número de menciones ( $n=1$ ) fueron el uso de metodologías no estandarizadas, el uso de planteamientos *top-down*, la burocracia y la invisibilidad de los recursos.

La Figura 17 muestra las palabras asociadas con los retos para la cooperación y la frecuencia de estas palabras en los resúmenes revisados. Como en el caso de las características

de la cooperación, algunos resúmenes tenían una redacción diferente del mismo concepto. Estas palabras se agruparon y se describieron de forma general, y se puede encontrar la tabla con las agrupaciones en el apéndice.



**Figura 17** Las palabras asociadas con los retos para cooperación y la frecuencia de estas palabras en los resúmenes revisados (Elaboración propia).

La palabra/concepto más mencionado fue explotación insostenible (n=7). Varias palabras fueron mencionadas solo una vez. Había más conceptos identificados que se relacionaban con retos a la cooperación en comparación con impulsores de la cooperación. Por ende, con los retos también es importante tener en mente la singularidad de cada acuífero y que no todos los retos aparecen en todos (o la mayoría) de los casos. O como explican Penney et al. (2021), "los impedimentos a la cooperación para cualquier acuífero transfronterizo concreto dependen de una serie de características sociales y físicas que son específicas de la región del acuífero" (p. 2).

### 2.3.2 Resultados por área temática

Para comprender mejor los retos relacionados con la cooperación transfronteriza, los retos comunes entre los tres tipos de fuentes se agruparon en áreas temáticas. Las áreas temáticas son:

1. Conocimiento, ciencia e información
2. Estructura administrativa
3. Política
4. Sociedad y ambiente

Las dos primeras áreas temáticas se aplicaron también al análisis de las características de la cooperación. Muchos de los retos que aparecen en estas dos categorías son antagonistas de los impulsores que aparecen en el apartado anterior. Esto indica que el estatus de estos elementos (ya sea como impulsores o retos) depende del contexto. Por ejemplo, el concepto "información" puede ser una característica de la cooperación cuando hay información adecuada y/o esfuerzos para aumentar la disponibilidad de información. Por otro lado, la "información" también puede ser un reto cuando hay una falta de información suficiente o la información necesaria es de difícil acceso.

Las Figuras 18-20 muestran los resultados del análisis por áreas temáticas. Los retos resaltados son los que comparten los tres tipos de fuentes. El color representa el área temática en la que se ha situado cada reto.

Área temática	Elemento
Conocimiento, ciencia e información	Información insuficiente
Estructura administrativa	Implementación de políticas públicas
	Falta de recursos (humanos, financieros)
	Costo de inversiones en la infraestructura
	Estructuras insuficientes para la gobernanza nacional
	Marcos regulatorios débiles
Política	Integración de gestión con prioridades socio-económicas
	Inestabilidad política/falta de priorización de aguas subterráneas
	Valoración económica del agua
	Integración de gestión con los derechos humanos
Ambiente y sociedad	Pérdida de ecosistemas
	Calidad de agua
	Cambio climático
	Crecimiento demográfico
	Pobreza
	Competición entre sectores
	Migración
	Sobreexplotación

Figura 18 Resultados del análisis por área temática, documentos gubernamentales. El color verde corresponde con conocimiento, ciencia e información, naranja con estructura administrativa, azul con comunicación y morado con ambiente y sociedad (Elaboración propia).

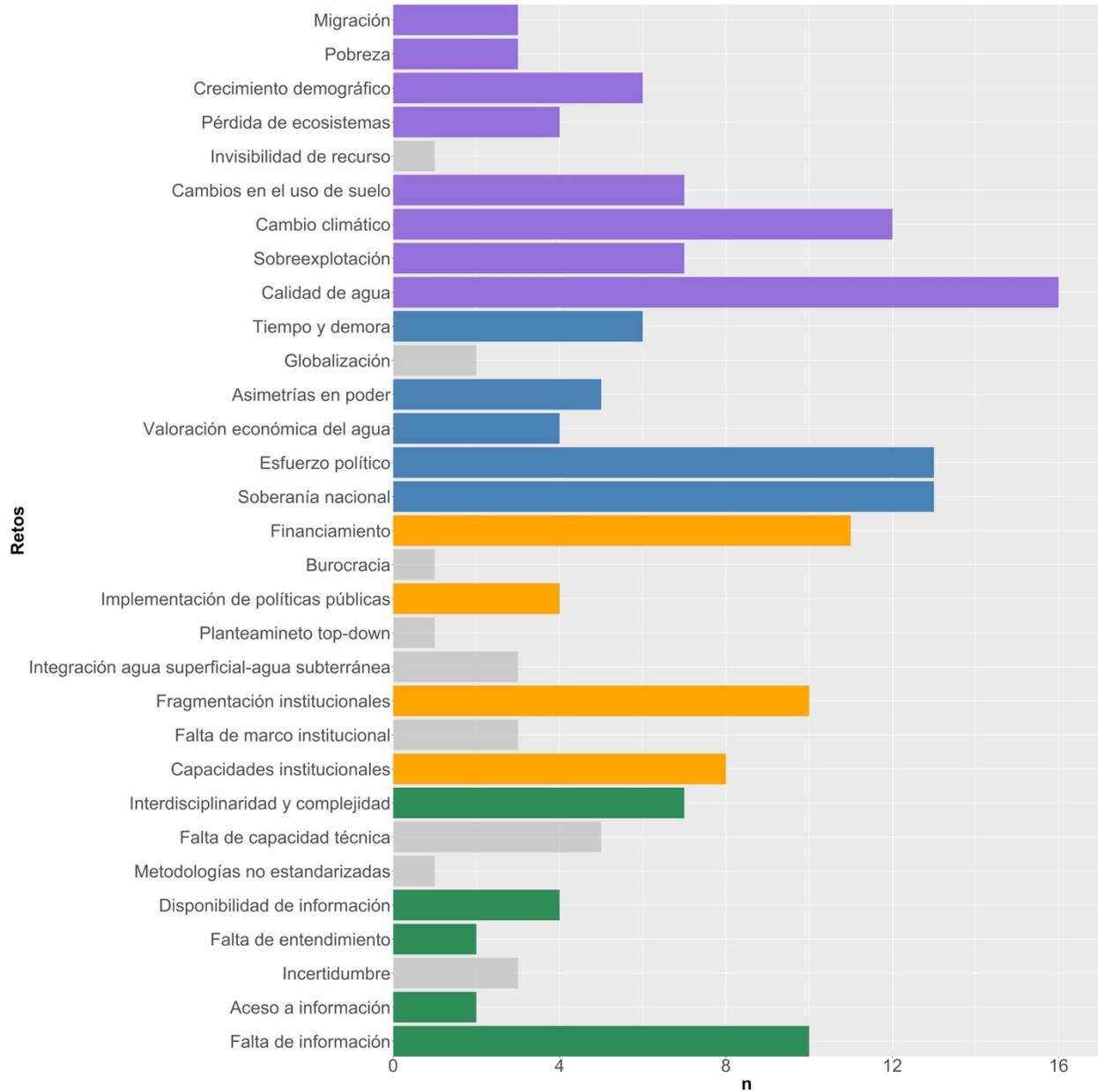


Figura 19 Resultados del análisis por área temática, publicaciones académicas. El color verde corresponde con conocimiento, ciencia e información, naranja con estructura administrativa, azul con comunicación y morado con ambiente y sociedad (Elaboración propia).

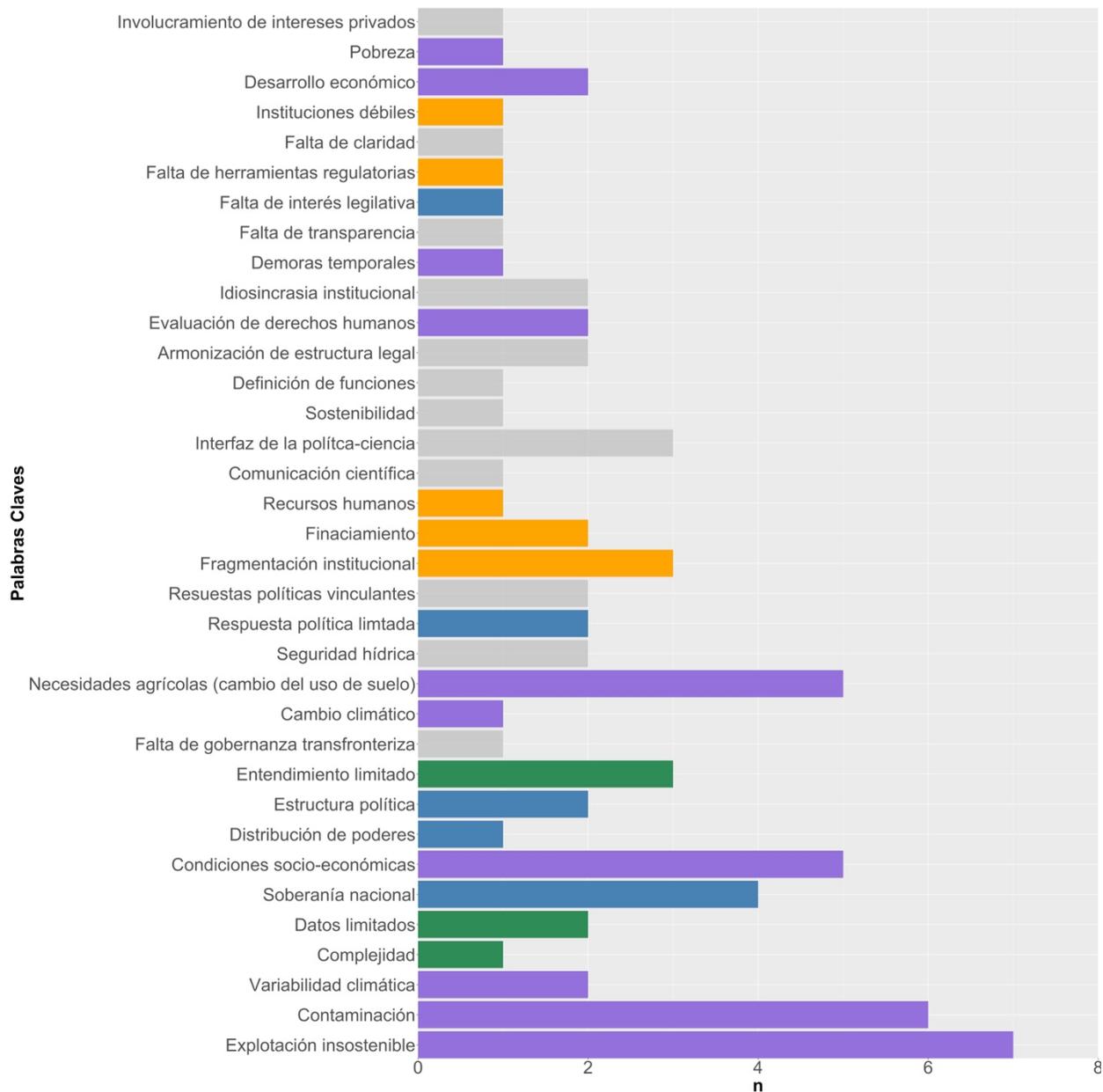


Figura 20 Resultados del análisis por área temática, resúmenes. El color verde corresponde con conocimiento, ciencia e información, naranja con estructura administrativa, azul con comunicación y morado con ambiente y sociedad (Elaboración propia).

### 2.3.2.1 Conocimiento, ciencia e información

Dado que la disponibilidad de información científica precisa y fiable es crucial para la cooperación, las lagunas de información crucial son un obstáculo considerable para las relaciones transnacionales. Walschot (2020) explica que “la información sobre la composición, el grado de contaminación, el nivel de recarga y otros aspectos, es a menudo incompleta o incluso errónea y, por lo tanto, no conduce al desarrollo de una herramienta legal válida para la

gestión transfronteriza” (p. 23). La disponibilidad de información en el contexto transnacional se complica cuando "las instituciones están muy descentralizadas o son informales, y sin canales de recogida, análisis y difusión de información sobre la gestión local" (King et al., 2010, p. 254).

Eckstein y Pramond (2012) anotan que, en África, los recursos de agua subterránea

la falta de información, de capacidad técnica, de financiación adecuada y de cooperación impide a muchas naciones africanas superar los retos hídricos a los que se enfrentan. En consecuencia, es crucial que toda África -desde el nivel nacional hasta la comunidad más local- desarrolle programas que amplíen la exploración de los recursos hídricos, impulsen la generación y el intercambio de datos y fomenten las iniciativas transfronterizas de cooperación y gestión sostenible. También es fundamental que las Naciones Unidas, así como el mundo desarrollado, ofrezcan su ayuda para este valioso esfuerzo.

Incluso en los acuíferos que tienen una gran representación en la literatura (como el Acuífero Guaraní) sigue siendo necesario un mayor conocimiento científico. Como explica Luciux (2015), en el caso del acuífero Guaraní “existe una falta de conocimiento sobre las aguas subterráneas, su potencial, su uso y sus vulnerabilidades, por parte de la población en general, de los medios, de los parlamentarios y de los diversos niveles de gobierno” (p. 48). Lindsey-Herrera y Taks (2012) junto con Mendez Zacarías y Zimmermann (2013) mencionan que la falta de repositorios centrales para los datos que pertenecían al acuífero Guaraní y el desmantelamiento de la página web con información sobre estudios pertinentes han limitado la gestión del acuífero.

King et al. (2010) también apuntaron que hay información pertinente a la gestión del NSAS en bases de datos privadas de empresas y otras entidades. Ellos recomendaron que la entrega de datos de estos repositorios sea obligatoria para mejorar la disponibilidad de información. Por supuesto, la falta de acceso a la información no es el único obstáculo; otra cuestión es la validez del proceso de generación de conocimiento. Cassuto (2010) subraya que los estudios científicos deberían hacer hincapié en las cosmovisiones y prácticas indígenas, mientras que Lindsey-Herrera y Taks (2012) sostienen que a veces no parece muy abierto a opiniones basadas en otras estructuras de conocimiento" (p. 351). Por lo tanto, hay una necesidad para valorar otras formas de saber. Aunque los obstáculos relacionados con el conocimiento, ciencia e información son grandes, es importante tener en mente que el abordaje de este obstáculo es un buen punto de partida para la cooperación. Como explica Villar (2016), "la falta

de datos puede ser un obstáculo para construir acuerdos comunes, pero también puede ser una fuerza para estimular la cooperación entre los Estados" (p. 6).

### 2.3.2.2 Estructura administrativa

Una estructura institucional bien organizada facilita en gran medida el proceso de cooperación, pero aún queda mucho trabajo por hacer para lograr un buen diseño institucional. En cuanto a los obstáculos para la cooperación transfronteriza, la fragmentación institucional, la capacidad institucional y la falta de recursos financieros disponibles son algunos de los mayores retos.

La fragmentación institucional es aparentemente inherente al contexto de las aguas subterráneas transfronterizas. Como explican Giraut et al. (2010), "la existencia de múltiples instituciones con competencia para interferir en los recursos hídricos -a nivel nacional, federal, regional, provincial y municipal- da lugar a una fragmentación y superposición de la gestión de los recursos". Houedanou (2021, p. 159) expresa un sentimiento similar al afirmar que

el marco jurídico aplicable a los recursos hídricos transfronterizos sigue siendo sectorial, fragmentado y poco sistemático y no es específico para los acuíferos, lo que socava la gestión sostenible, equitativa y razonable de las aguas transfronterizas. Además, la existencia de una serie de instituciones de varios niveles que participan en su gestión crea un solapamiento innecesario e ineficiente de responsabilidades.

El panorama institucional se vuelve particularmente desarticulado cuando los estados tienen estructuras diferentes; por ejemplo, la gestión del Acuífero Guaraní se ve dificultada por el hecho de que Argentina tiene una estructura federal en la que las provincias tienen la autoridad sobre las aguas subterráneas, Brasil tiene una estructura pseudocentralizada en la que las provincias aún conservan un alto grado de autoridad sobre las aguas subterráneas, y Uruguay y Paraguay tienen estructuras altamente centralizadas (Caubet, 2010; Giraut et al., 2010; Kirchheim et al., 2021). De los Cobos (2018) destaca un desafío similar relacionado con la gestión del Acuífero Ginebrino. En el caso del Acuífero Ginebrino, las aguas subterráneas se consideran un bien público en Suiza pero un bien privado en Francia, lo que produce un alto nivel de fragmentación institucional en el lado francés de la frontera, donde múltiples entidades reclaman y ejercen derechos sobre las aguas subterráneas (de los Cobos, 2018). Por lo tanto, es de suma importancia reconocer que "los regímenes jurídicos vigentes de cada país pueden no ser fácilmente

susceptibles de acuerdos internacionales" para la gestión de acuíferos transfronterizos (Sugg et al., 2015, p. 392).

La fragmentación institucional no solo se aplica a los gobiernos. Sindico y Hawkins (2015) sostienen que la falta de coordinación entre los organismos de ejecución a nivel gubernamental y los donantes a nivel internacional ha dado lugar a la fragmentación en la ejecución de los proyectos de desarrollo. Dopavogui (2021, p. 170) extiende los obstáculos aún más, argumentando que

la superposición de las responsabilidades de los distintos servicios técnicos del Estado ha dado lugar a la falta total de seguimiento administrativo y técnico de las empresas industriales y mineras, de las consultorías locales y extranjeras para capitalizar los datos de campo y aumentar el conocimiento sobre los recursos de aguas subterráneas disponibles.

Resolver la fragmentación institucional no es un objetivo realista para los esfuerzos de cooperación transfronteriza. En su lugar, los procesos de cooperación deben investigar el panorama institucional e innovar para tratar de trabajar con la mayor eficacia posible dentro de los límites de las limitaciones existentes.

En línea con la fragmentación institucional está la cuestión de la capacidad institucional. Romero-Lécrivain (2019) articula que factores como las recesiones económicas, la corrupción, la inestabilidad política, la deuda extrema y los programas de austeridad debilitan la capacidad institucional y hacen más difícil la gestión de los acuíferos transfronterizos. Hirata et al. (2020) reconocieron que gran parte de la discontinuidad en la aplicación del Proyecto y Acuerdo del Acuífero Guaraní estaba relacionada con diversos factores institucionales, entre ellos "la debilidad de las capacidades institucionales" (p. 391). Ksia-Amb (2010) sugirió que "el uso beneficioso [de los acuíferos transfronterizos] a menudo se ve limitado por la escasa capacidad social e institucional y los deficientes marcos jurídicos y políticos". El estudio de la OEA de 2009 sobre el acuífero Guaraní cita la falta de capacidad de las instituciones para aplicar los instrumentos políticos como un factor que contribuye a la falta de éxito de los proyectos. El informe de la OEA (2009) afirma que "el despliegue efectivo de los instrumentos de gestión [por parte de las instituciones] requiere la asignación de recursos financieros, humanos y logísticos adecuados que, generalmente, son escasos o no están disponibles" (p. 19).

Como se menciona en el informe de la OEA (2009), la disponibilidad de recursos financieros es uno de los factores que más contribuyen a la falta de capacidad institucional. La cooperación esporádica relacionada con el NSAS es en parte atribuible a la ausencia de sostenibilidad financiera debido a la incapacidad de movilizar fondos de los países que comparten el acuífero (Ksia-Amb, 2010). Múltiples autores, como Hirata et al. (2020) y Hussein (2018), reconocieron el vínculo entre la débil capacidad institucional y la falta de recursos financieros. Sindico (2021) hace hincapié en este vínculo, explicando que "las instituciones por sí solas no proporcionarán una gobernanza eficaz. Las instituciones deben estar bien dotadas de recursos, tanto financieros como humanos" (p. 210). La falta de financiación adecuada está íntimamente relacionada con otros retos también, en particular la falta de interés político que se analizará en la siguiente sección.

### 2.3.2.3 Política

La primera categoría que difiere de las que también se aplican a las características de la cooperación es la que describe los retos políticos a los que se enfrentan los acuíferos transfronterizos. Los retos políticos que se analizarán más a fondo aquí incluyen la cuestión pendiente de la soberanía nacional, la falta de voluntad/interés político y los retrasos inherentes al proceso político.

El concepto de soberanía estatal y de quién tiene derecho a utilizar qué cantidad de un recurso compartido es fundamental para los obstáculos relacionados con la gestión de las aguas subterráneas transfronterizas. Ganoulis et al. (2021) lo exponen de forma sencilla, afirmando que "las razones históricas y geopolíticas de la soberanía nacional y las consideraciones socioeconómicas son los principales obstáculos para concluir acuerdos operativos interestatales [sobre acuíferos transfronterizos]" (p. 31). Maxwell (2011) sugiere que "la soberanía sobre los acuíferos compartidos es una cuestión más polémica que la soberanía sobre los cursos de agua superficiales compartidos" (p. 396). Sugg et al. (2015) profundizan en esta idea y afirman que "las cuestiones relativas a la soberanía, los derechos de propiedad y la titularidad -ya de por sí espinosas en el caso de las aguas superficiales- se complican aún más por [la] "invisibilidad" de los recursos y sus límites" (p. 378). Eckstein (2010) señala las raíces históricas del concepto de soberanía estatal y explica que

una noción conceptual intrínsecamente ligada a la característica transfronteriza de estos acuíferos tiene que ver con la percepción por parte de algunas naciones de que tienen una

soberanía incondicional sobre la parte de un acuífero que se encuentra dentro de su jurisdicción. Esta creencia, que se remonta a la desacreditada Doctrina Harmon, sugiere que los Estados son libres de explotar los recursos dentro de su jurisdicción sin tener en cuenta los efectos extraterritoriales de dicha acción... la sugerencia de que los recursos hídricos pueden estar sujetos a la soberanía de un Estado es contraria al enfoque de la comunidad de intereses que rige las aguas superficiales transfronterizas. Además, la idea contraviene los principios básicos del derecho internacional del agua, incluidos los de la utilización equitativa y razonable y la ausencia de daño significativo, que claramente propugnan una concepción más limitada de los derechos soberanos sobre las aguas transfronterizas.

Sugg et al. (2015) afirman que "incluso cuando la constitución de una nación considera que las aguas subterráneas son un bien público y no una propiedad real, en un sentido jurídico, los países podrían no aplicar ese principio general de propiedad a nivel internacional", aunque es imposible tener la propiedad exclusiva sobre un recurso compartido (p. 392).

Aunque la cuestión de la soberanía de los Estados está en el centro de todo acuerdo sobre acuíferos transfronterizos, el obstáculo de la superación de la soberanía es especialmente visible en el caso del acuífero Guaraní. Según Walschot (2020, p. 31)

el derecho de soberanía que acompaña a cualquier recurso natural es inalienable para los gobiernos de América Latina. Estos últimos, a diferencia de los europeos, aún no están listos para renunciar a su soberanía a favor de una ganancia común y esto es notable en el Acuerdo del Acuífero Guaraní en particular. La gestión integrada y genuina solo puede garantizarse si los Estados acuerdan renunciar a una pequeña parte de su soberanía.

Hussein (2018) comenta que el Congreso paraguayo rechazó la ratificación del Acuerdo del Acuífero Guaraní por temor a que limitara su soberanía nacional. Declarar la soberanía como sobresaliente "desalienta la cooperación y fomenta la acción unilateral en lugar de las iniciativas conjuntas" (Patiero, 2016, p. 858). Maxwell (2011) también anotó que conflictos relacionados con la soberanía territorial entre los países que comparten el NSAS han impactado la capacidad cooperativa en el área de agua. La importancia de la soberanía en América Latina descrita por Walschot (2020) y Sindico y Hawkins (2015) ciertamente afecta a las relaciones sobre el Valle de Juárez-Bolsón del Hueco, especialmente teniendo en cuenta la naturaleza altamente política de la frontera entre México y Estados Unidos. Sugg et al. (2015) describen la cuestión de las

fronteras politizadas explicando que "cuando los usuarios están en lados opuestos de una frontera internacional... las preocupaciones de soberanía y seguridad pueden obstaculizar la coordinación" (p. 382).

El interés y la voluntad política desempeñan un papel fundamental a la hora de dejar de lado los intereses nacionales y optar por la cooperación. La dimensión internacional que acompaña a los acuíferos transfronterizos somete estos recursos a la "voluntad política de los gobiernos nacionales" (Ganoulis et al., 2021, p. 31). Existe una generalización de la "incapacidad y el desinterés de los actores políticos en formular políticas" (Walter, 2012, p. 369). Patiero (2016) habla del peor escenario para la cooperación, en el que los Estados "son completamente indiferentes a las consecuencias transfronterizas de su explotación nacional" (p. 857). Los acuíferos transfronterizos son recursos locales que se sitúan en un contexto multinacional; Hussein (2018) alude al posicionamiento de los acuíferos transfronterizos como prioridades nacionales a pesar de tener consecuencias en gran medida locales como factor que contribuye a la falta de interés político a nivel nacional. La falta de interés político en los acuíferos transfronterizos tiene impactos en cascada, por ejemplo, dificultando la obtención de recursos financieros precisos. La conexión entre el interés político y el apoyo financiero institucional puede verse claramente en el caso del TAAP, que sólo recibió una mínima parte del presupuesto total asignado. Los estudios gubernamentales sobre el ITTAS sostienen que no es sólo el interés político en los acuíferos lo que es necesario para la cooperación; dado que la gestión del agua es un tema complejo "ningún nivel de cooperación internacional podrá compensar la inacción de los gobiernos que no conceden prioridad al desarrollo humano, al respeto de los derechos humanos, a la lucha contra las desigualdades o a la eliminación de la corrupción" (OSS, 2011a, p.75). La dimensión política de la gestión de los acuíferos transfronterizos puede resultar agotadora para las partes interesadas locales. Hassenforder et al. (2010) descubrieron que "la mayoría de las partes interesadas que participan en proyectos [de acuíferos transfronterizos] se sienten limitadas por el gran peso de la política".

El proceso político inherente a la gestión de los recursos también sufre retrasos en el tiempo y en las políticas. Como argumenta sucintamente Maxwell (2011), "por muy bienintencionado y científicamente sólido que pueda parecer inicialmente el uso de un [acuífero transfronterizo], hay un retraso significativo antes de que se pueda comprender plenamente el impacto de ese uso" (p. 408). Giraut et al. (2010) señalan que a menudo es imposible alcanzar

todos los objetivos declarados de los esfuerzos de cooperación en el tiempo designado para el proyecto. Una vez más, el impacto de los retrasos es evidente en el caso del acuífero Guaraní. La brecha de casi ocho años entre la formación del Acuerdo del Acuífero Guaraní y su ratificación "plantea la cuestión de cuándo y si este proceso de cooperación llegará a buen puerto" (Villar, 2020). El proceso de formación de políticas, que requiere mucho tiempo, no puede ni debe evitarse; sin embargo, con la creciente urgencia de tomar decisiones políticas teniendo en cuenta los efectos del cambio climático, es crucial tener una comprensión de los cuellos de botella inherentes a los procesos de cooperación que pueden retrasar los esfuerzos transnacionales.

#### 2.3.2.4 Sociedad y ambiente

Los acuíferos transfronterizos, como todos los recursos naturales, se ven afectados por factores tanto naturales como sociales. Los retos socioambientales más señalados a los que se enfrentan los acuíferos transfronterizos son los cambios en la calidad y cantidad de las aguas subterráneas, el cambio climático y los cambios demográficos. Hassenforder et al. (2010) afirman que "las disputas por los recursos comunes compartidos se originan por dos causas principales: la calidad o la cantidad". Abdo et al. (2021) sostienen que la explotación continuada de los acuíferos transfronterizos sin un conocimiento suficiente de los impactos transfronterizos "representa una amenaza potencial para un recurso precioso que, si no se controla, podría conducir a un uso irracional del agua, al deterioro de la calidad del agua con el potencial de dañar la biodiversidad, a los procesos de degradación de la tierra o incluso a un conflicto transfronterizo" (p. 99). En varios casos, los autores atribuyeron los cambios en la calidad y cantidad de las aguas subterráneas a las actividades humanas, en particular al cambio de uso de la tierra inducido por el hombre y al crecimiento de la población (Derouane et al., 2021; Khayat y Cherfane, 2021; OSS, 2003; OSS, 2011a; OSS, 2014a; OSS, 2014b; Romero-Lécrivain, 2019; Wallin et al., 2005; Walschot, 2020).

Junto con el crecimiento de la población, la pobreza, la migración y otros desafíos socioeconómicos tienen impactos significativos en la gestión de los acuíferos transfronterizos. La evaluación del riesgo transfronterizo del ITTAS identificó la pobreza y los modelos de desarrollo que contribuyeron a exacerbar la desigualdad de la riqueza como principales causas de los conflictos transfronterizos locales (OSS, 2011a). Los proyectos relacionados con el NSAS constataron igualmente que la pobreza es la principal amenaza para la gestión de los acuíferos. Existe un vínculo crucial entre una mejor gobernanza cooperativa y la reducción de la pobreza;

de hecho, "la buena gobernanza es esencial para la gestión de nuestros recursos de agua dulce, que son cada vez más limitados. Además, es indispensable para la reducción de la pobreza" (OSS, 2011a, p. 82). Los patrones locales y regionales de migración son factores sociales que también tienen interesantes impactos en la gestión de los acuíferos transfronterizos. Romero-Lécrivain (2019) señaló la presión adicional ejercida sobre los recursos del SASS por el aumento de la migración a la región del SASS desde otras partes de África y Oriente Medio. El OSS (2014a) y el OSS (2011a) plantearon su preocupación por la migración del campo a la ciudad relacionada con una amplia variedad de factores, incluido el empeoramiento de la calidad de las aguas subterráneas. La migración del campo a la ciudad "conduce al asentamiento en zonas suburbanas y a la adopción de un modo de vida urbano" y puede tener impactos en cascada en el régimen de uso de los recursos hídricos subterráneos (OSS, 2011a, p. 22).

Junto con el crecimiento de la población, la pobreza, la migración y otros desafíos socioeconómicos tienen un impacto significativo en la gestión de los acuíferos transfronterizos. La evaluación de riesgos transfronterizos del ITTAS identificó la pobreza y los modelos de desarrollo que contribuyeron a exacerbar la desigualdad de la riqueza como principales causas de los conflictos transfronterizos locales (OSS, 2011a). Los proyectos relacionados con el NSAS constataron igualmente que la pobreza es la principal amenaza para la gestión de los acuíferos. Existe un vínculo crucial entre una mejor gobernanza cooperativa y la reducción de la pobreza; de hecho, "la buena gobernanza es esencial para la gestión de nuestros recursos de agua dulce, que son cada vez más limitados. Además, es indispensable para la reducción de la pobreza" (OSS, 2011a, p. 82). Los patrones locales y regionales de migración son factores sociales que también tienen interesantes impactos en la gestión de los acuíferos transfronterizos. Romero-Lécrivain (2019) señaló la presión adicional ejercida sobre los recursos del SASS por el aumento de la migración a la región del SASS desde otras partes de África y Oriente Medio. El OSS (2014b) y el OSS (2011a) plantearon su preocupación por la migración del campo a la ciudad relacionada con una amplia variedad de factores, incluido el empeoramiento de la calidad de las aguas subterráneas. La migración del campo a la ciudad "conduce al asentamiento en zonas suburbanas y a la adopción de un modo de vida urbano" y puede tener impactos en cascada en el régimen de uso de los recursos hídricos subterráneos (OSS, 2011a, p. 22). Dada la importancia y la prevalencia de la migración en la región fronteriza entre México y EUA, se necesita más

investigación para entender cómo la migración internacional<sup>4</sup> y la migración rural a urbana<sup>5</sup> impactan en el uso de los recursos hídricos subterráneos compartidos.

La frecuencia con la que se mencionó el cambio climático como un obstáculo importante para la cooperación transfronteriza es de vital importancia para esta tesis. Hubo un acuerdo generalizado en que el cambio climático y la variabilidad atribuible al cambio climático suponen un reto importante para la planificación integrada a largo plazo. Como explica Quadri (2021), "la importancia estratégica de las aguas subterráneas va en aumento debido a una serie de factores, especialmente la explotación insostenible del recurso, la contaminación y la variabilidad del clima" (p. 24). Comprender las amenazas que el cambio climático supone para la gestión de los acuíferos transfronterizos no es sencillo. Cassuto y Sampaio (2011) explican que "el cambio climático presenta múltiples desafíos basados en incógnitas desconocidas" (p. 668). Distintas fuentes citan diferentes efectos en cascada debidos al cambio climático, entre los que se incluyen cambios en los "patrones tradicionales de recolección de agua superficial y pluvial" (Walschot, 2020, p. 22), "la incertidumbre sobre la naturaleza y la calidad de los acuíferos" (Patiero, 2016, p. 861), la migración inducida por los cambios en el nivel freático (Maxwell, 2011), la economía detrás del uso de los acuíferos (Cassuto y Sampaio, 2011) y la distribución multiescalar de las implicaciones políticas (Cassuto y Sampaio, 2011).

La inclusión del cambio climático y del cambio medioambiental en el texto de los acuerdos formales es fundamental para la gestión sostenible de los acuíferos. Lins Brzezinski (2021) explica que "la ausencia de mención del cambio climático y de los impactos que sufrirán los acuíferos -y el ciclo hidrológico en su conjunto-" limita enormemente la eficacia de los acuerdos y tratados (p. 227). Tanto Walschot (2020) como Cassuto y Sampaio (2011) señalaron que el Acuerdo del Acuífero Guaraní, por su falta de consideración del cambio climático, no era sostenible a largo plazo. Cassuto y Sampaio (2011) afirman que el Acuerdo "está igualmente mal equipado para los desafíos del cambio climático. No contiene ninguna referencia al cambio climático ni a la legislación internacional vigente en la materia. Dada la inevitable repercusión del cambio climático en la disponibilidad y la calidad del agua... esa ausencia parece miope" (p.

---

<sup>4</sup> Meierotto (2012) descubrió que "como resultado de los impactos combinados de los cambios en las políticas de inmigración y el aumento de la Seguridad Nacional, la región fronteriza entre México y Estados Unidos se ha degradado cada vez más en las áreas ambientalmente protegidas" (p. 11).

<sup>5</sup> Montano Armendáriz (2019) discutió el aumento en la migración de áreas rurales en el Valle de Juárez a la Ciudad de Juárez. Esta emigración lleva, sin duda, impactos importantes para el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco.

666). Esta observación pone de relieve la importancia crucial de incorporar los conocimientos y la planificación relacionados con el cambio climático al inicio de la cooperación transfronteriza. Existe una necesidad permanente de integrar los impactos de los fenómenos globales en la planificación local de las aguas subterráneas; si bien "ninguna estrategia local puede abordar la complejidad del dilema" que plantea el cambio climático, "las estrategias locales que no tienen en cuenta los desafíos y las estrategias globales están condenadas al fracaso" (Cassuto y Sampaio, 2011, p. 668). El uso de los impactos del cambio climático para informar entre políticas binacionales es, en definitiva, el objetivo de esta tesis. Las fuentes revisadas confirman, pues, las potenciales contribuciones de esta tesis y enfatizan la necesidad de seguir explorando los temas aquí tratados.

A pesar de la inmensidad del reto que supone el cambio climático, también hay pruebas sustanciales de que una mejor gestión cooperativa de los acuíferos transfronterizos podría facilitar el proceso de adaptación al cambio climático. Como indican Sindico et al. (2018, p. 57) la buena gobernanza de los recursos hídricos subterráneos se convierte, por tanto, en una estrategia para adaptarse al cambio climático y promover la resiliencia en muchos países. En este contexto, las aguas subterráneas tienen un papel que desempeñar también en las medidas que todos los Estados deben adoptar para aplicar y cumplir el Acuerdo de París. De hecho, la Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) que todos los Estados están obligados a preparar y presentar según el Acuerdo de París debe incluir también una sección sobre la adaptación. Con el... potencial apalancamiento de la cooperación [en materia de acuíferos transfronterizos]... se reforzará la adaptación al cambio climático.

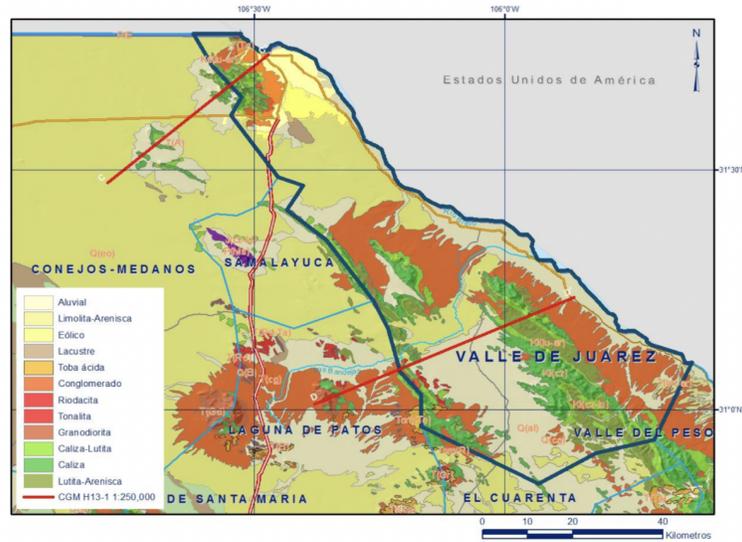
### 3. El acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco

La revisión sistemática analizó seis estudios de casos de todo el mundo. Estos casos ayudan a ilustrar los factores que son comunes a los acuíferos transfronterizos y, en los capítulos siguientes, lo general se convierte en específico a medida que el enfoque del análisis se desplaza al acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco. Este capítulo resume el contexto en el que se encuentra el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco a través de la presentación de la información relevante sobre las características físicas y la hidrología del acuífero, los marcos políticos que se aplican a la gestión del acuífero y las características socioeconómicas que impactan en su uso.

#### 3.1 Características hidrogeológicas

El área donde se ubica el acuífero tiene un clima muy seco (desértico) con un verano cálido y una precipitación promedio anual de 265.3 mm a lo largo del registro histórico 1957-2020 (CONAGUA, 2020). El Río Bravo está vinculado hidráulicamente al acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco (Ging et al., 2020). La filtración de agua desde el Río Bravo hasta el acuífero cambió en 1968 cuando se construyó el Canal Americano que tiene un revestimiento de hormigón justamente para disminuir el intercambio del agua de superficie con el embalse subterráneo (Heywood y Yager, 2003). La tasa acelerada de descenso del nivel freático después de la construcción del Canal Americano indica que las aguas del Río Bravo son una fuente importante de recarga para el acuífero (Heywood y Yager, 2003).

La geología regional se caracteriza como principalmente de origen sedimentario, en menor proporción volcánico (del tiempo mesozoico hasta el tiempo cenozoico). La Figura 21 muestra los patrones de la geología regional por el lado mexicano.

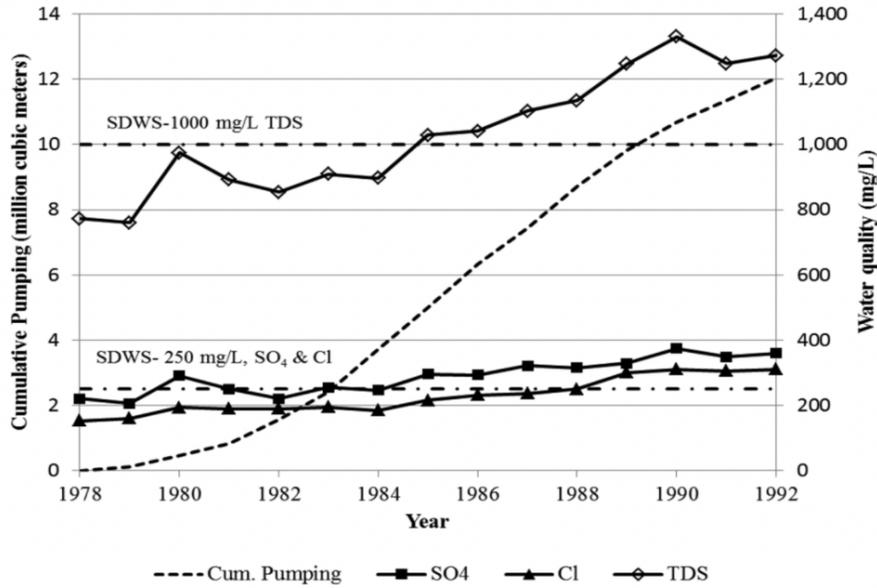


**Figura 21** La geología regional del acuífero Valle de Juárez. La clave muestra los diferentes yacimientos y formaciones presentes (CONAGUA, 2020).

Las aguas dentro del acuífero tienen edades entre 12,100 y 25,000 años (Heywood y Yager, 2003). El acuífero tiene una transmisividad que varían entre 72 y 1448 m<sup>2</sup>/día y la conductividad hidráulica oscila entre 0.1 y 28.5 m/día (CONAGUA, 2020). La salinidad varía dentro del acuífero. Según el reporte técnico de la CONAGUA (2020, p. 26),

en forma general, se puede observar que las concentraciones sólidas totales disueltas (STD) varían de 400 a 800 ppm para la mayor parte del acuífero. En el resto del acuífero las concentraciones varían de 1200 a valores mayores de 3000 ppm, por efecto de la salinidad natural de los depósitos de bolsón y del incremento originado por los excedentes del riego agrícola en la mayor parte de la segunda y tercera unidad del distrito de riego.

Muestreos realizados por Ging et al. (2020) hallaron que el agua subterránea más cercana al Río Bravo tiene una concentración más alta de los sólidos disueltos totales y una concentración más alta de varios oligoelementos, como el arsénico y el uranio, así como determinados compuestos orgánicos. Este resultado indica que la calidad del agua subterránea en el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Huevo es más probable que se vea afectada por las actividades del uso de suelo alrededor del Río Bravo (Ging et al., 2020). Sheng y Devere (2005) y Sheng (2013) anotaron el vínculo entre el bombeo y cambios en las concentraciones de sólidos disueltos. Sus resultados, que se muestran en la Figura 22, subraya la necesidad de considerar como el bombeo impacta la sostenibilidad del recurso a través de cambios en la calidad de aguas subterráneas.



**Figura 22** La relación entre el bombeo total y la calidad del agua subterránea. Es posible ver que la concentración de contaminantes importantes ha aumentado con el aumento del bombeo (Sheng, 2013; Sheng y Devere, 2005).

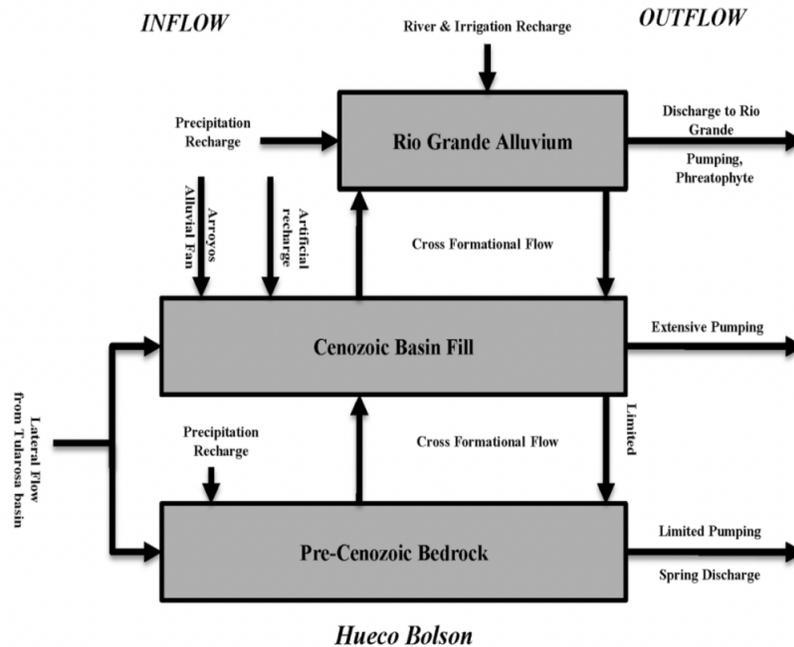
Las vías de recarga para el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco incluye la recarga natural, la recarga por flujo subterráneo, la infiltración de los excedentes de riego agrícola y la infiltración de las fugas en el sistema de agua potable y alcantarillado (CONAGUA, 2020). La tabla 5 resume los totales de recarga desde estas fuentes.

Fuente	Recarga total (m <sup>3</sup> /año)
Recarga natural	3.3 x 10 <sup>6</sup>
Recarga por flujo subterráneo	36.5 x 10 <sup>6</sup>
Recarga por infiltración agrícola	64.4 x 10 <sup>6</sup>
Recarga por infiltración sistema de agua potable y alcantarillado	21.7 x 10 <sup>6</sup>
<b>TOTAL</b>	<b>125.9 x 10<sup>6</sup></b>

**Tabla 5** Volumen total de recarga desde las fuentes principales (CONAGUA, 2020).

De la tabla, es posible ver que la fuente de recarga más importante es la infiltración por los excedentes de riego. Se estima que entre un 20 y 40% de agua aplicada a cultivos infiltra al acuífero (Bear, 1979; CONAGUA, 2020). Además, se estima que las fugas de red de agua potable de Ciudad Juárez son del orden de un 17%, lo que contribuye a la recarga por infiltración del sistema urbano (CONAGUA, 2020). La Figura 23 proporciona un esquema para describir la

complejidad de las entradas y salidas entre los niveles del acuífero y entre el ámbito subterráneo y superficial.



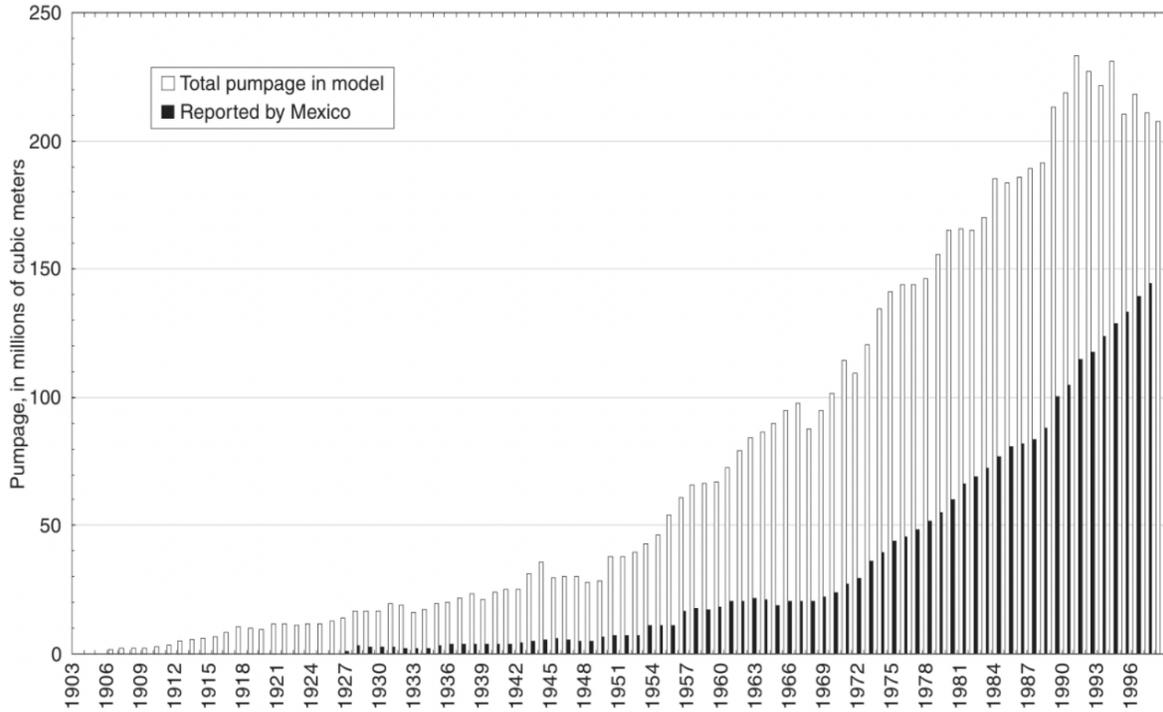
**Figura 23** Diagrama de los flujos de recarga y descarga en los diferentes niveles hidráulicos del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco (gráfica de Sheng, 2013 modificado de Hibbs et al., 1997).

Un entendimiento de la función del acuífero es integral para su gestión. La CONAGUA maneja una red de monitoreo piezométrica que se conforma por 100 pozos en el Valle de Juárez, y la Junta para el Desarrollo de Agua de Texas también maneja sistemas de monitoreo (CONAGUA, 2020). Según el último censo de pozos administrado por la CONAGUA, hay 640 pozos para el aprovechamiento de agua del acuífero Valle de Juárez; de estos, 330 se encuentran activos con 198 (60%) para el abastecimiento de Ciudad Juárez, 114 (34.5%) para el uso agrícola y 18 (3.3%) “para uso doméstico-abrevadero” (CONAGUA, 2020, p.26).

El bombeo en las zonas urbanas, particularmente en Ciudad Juárez, ha causado una disminución importante en el nivel piezométrico. Como explica la CONAGUA (2020, p. 23): en la porción norte del acuífero, donde se localiza la zona urbana de Ciudad Juárez, la intensiva extracción que se realiza desde hace varias décadas ha provocado el descenso progresivo de los niveles del agua subterránea debido a la concentración de pozos municipales. Esto ha ocasionado un extenso cono de abatimiento que no sólo ha

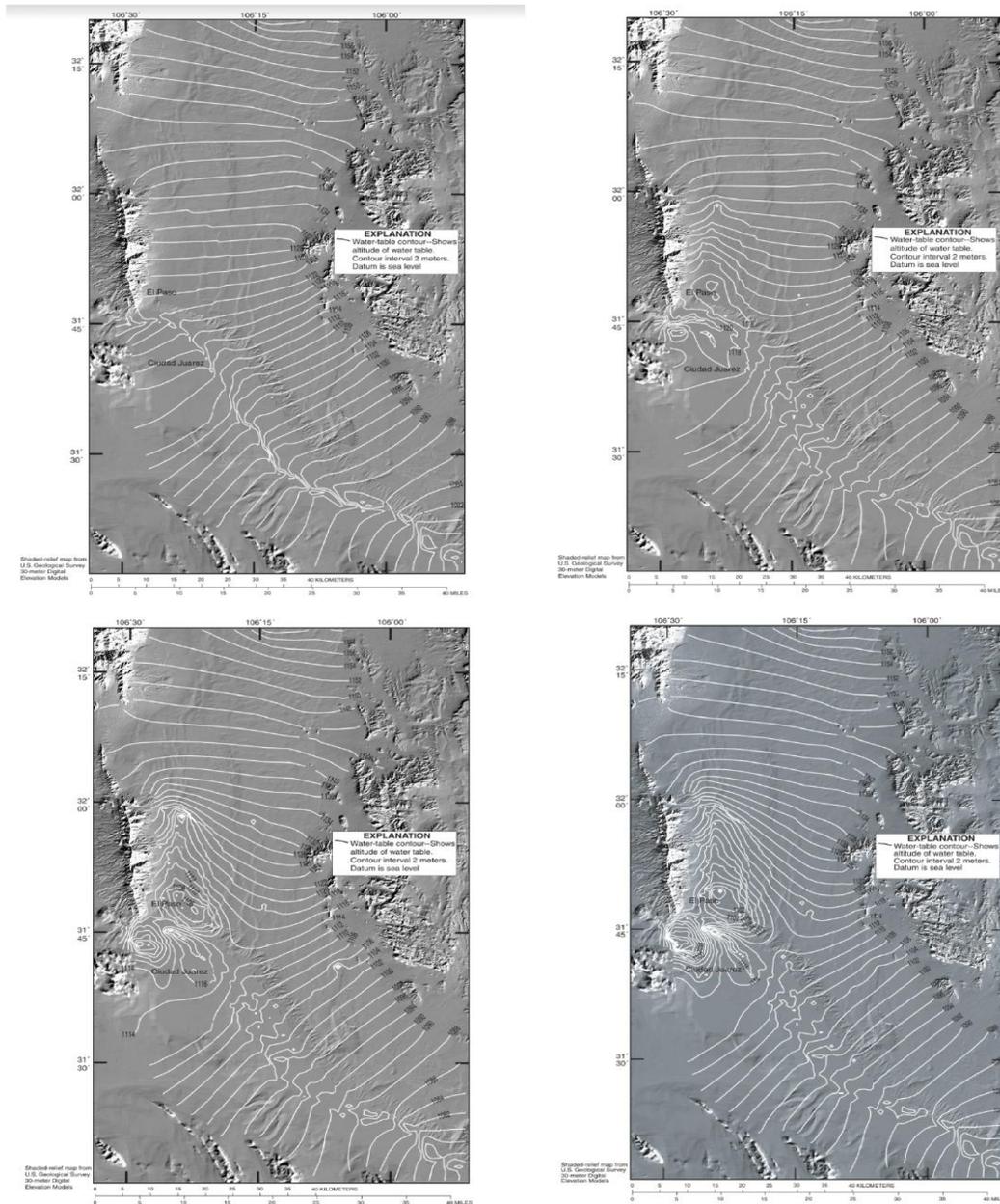
interceptado el flujo subterráneo que en condiciones naturales se dirigirá hacia el río bravo, sino que ahora induce desde [el río].

La Figura 24 presenta las tasas de bombeo histórico modeladas por Heywood y Yager (2003).



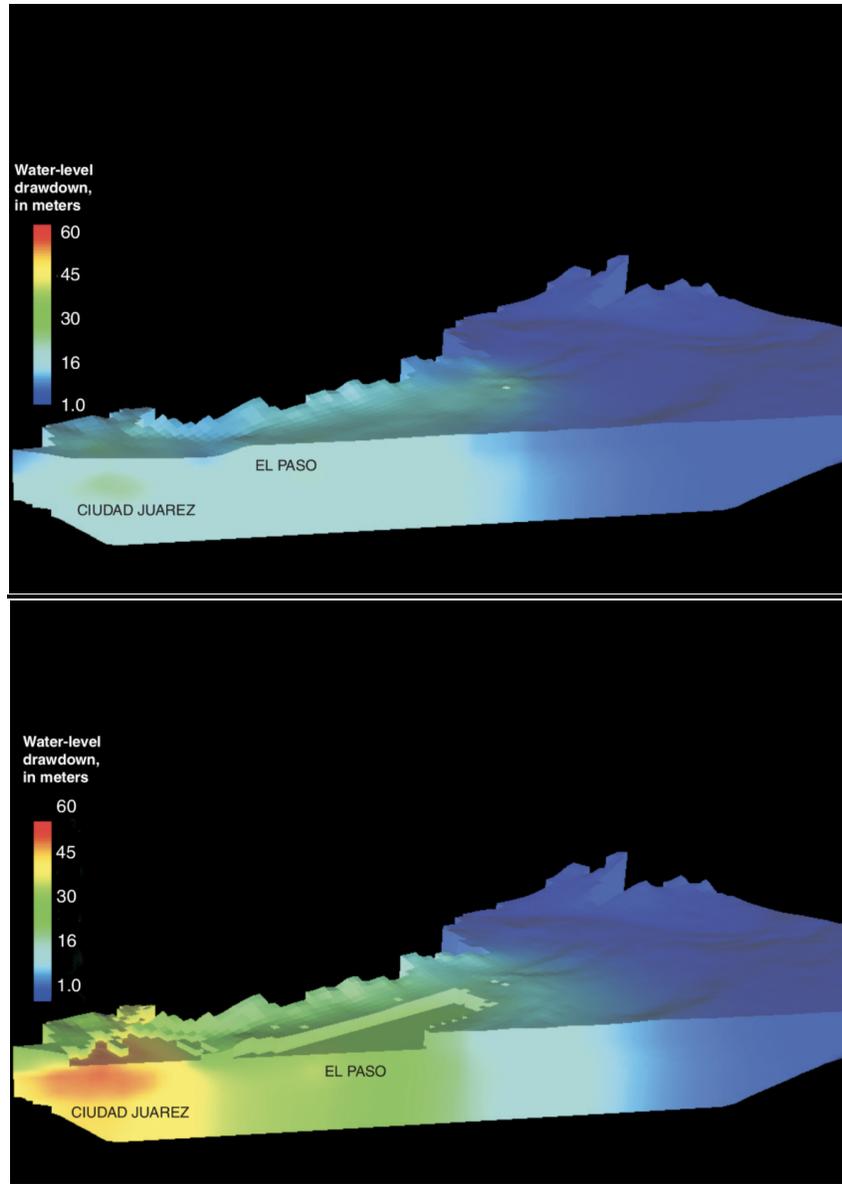
**Figura 24** El nivel freático simulado por Heywood y Yager (2003) para los años 1903-1996. El bombeo comenzó aumentar a mediados del siglo XX, con grandes incrementos a partir de la década de los ochenta (Heywood y Yager, 2003).

La evolución del nivel freático muestra como el bombeo puede alterar la topografía hidrológica del acuífero. La Figura 25, del estudio de Heywood y Yager (2003), muestra como el bombeo en las áreas urbanas de Ciudad Juárez y El Paso producía conos de depresión y flujos subterráneos alterados.



**Figura 25** La evolución del nivel freático en el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Huevo simulado por Heywood y Yager (2003). De la izquierda hacia la derecha, de arriba hacia abajo, los mapas topográficos muestran el nivel freático en 1902 (el estado estacionario), 1958, 1973 y 1980. La creciente concentración de líneas alrededor de Ciudad Juárez y El Paso demuestra visualmente los conos de depresión creados por el extenso bombeo (Heywood y Yager, 2003).

Los mapas de la Figura 26 ofrecen una vista aérea de los cambios en el nivel de la capa freática, y la Figura 18 muestra la misma información, pero desde una perspectiva longitudinal transversal.



**Figura 26** Modelo creado por Hewood y Yager (2003) del descenso del nivel de agua en el Valle de Juárez-Bolsón del Hueco en 1973 (imagen de arriba) y 1996 (imagen de abajo). La extensiva descenso en Ciudad Juárez (hasta 60 m de descenso) refleja las implicaciones del bombeo (Heywood y Yager, 2003).

Aunque los modelos de Heywood y Yager (2003) tienen algunos años<sup>6</sup>, según el estudio más reciente de CONAGUA (2020), “la extracción de agua subterránea sigue siendo de magnitud mayor que el volumen renovable del acuífero” (p.24). Las salidas de aguas ocurren principalmente por el bombeo. En la parte mexicana, la CONAGUA estima que las salidas por bombeo se suman a  $1.718 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{año}$  (CONAGUA, 2020, p.32). De este volumen, un 94.2% se destina a usos urbanos en Ciudad Juárez, un 2.2% se destina para el uso agrícola y un 2.9% se

<sup>6</sup> El modelo de Heywood y Yager (2003) sigue siendo el modelo del flujo más implementado en los EUA.

destina para el uso abrevadero (CONAGUA, 2020). El volumen total de extracciones para todos los usos se suma a  $2.026 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{año}$  (CONAGUA, 2020). Con este nivel de extracciones, hay un déficit de  $7.673 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{año}$  que indica que no hay agua para nuevas concesiones y que las extracciones superan la tasa de renovación del acuífero (CONAGUA, 2020, p.32). La CONAGUA también anota que la explotación intensiva del acuífero ha resultado en una variación negativa en el almacenamiento; como consecuencia, se puede observar una disminución de  $45.9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$  en el almacenamiento total del acuífero (CONAGUA, 2020).

El acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco se ha reconocido como un valioso bien natural por muchos años. Hay una larga historia de estudios técnicos que se han realizado en México y los EUA para documentar las propiedades físicas del acuífero; el estudio más antiguo fue elaborado en 1976 y estudios más vigentes siguen siendo de interés e importancia científica. Una tabla con los estudios más importantes, la institución responsable para su ejecución, el año de ejecución, y aportaciones importantes se puede encontrar en el apéndice sección A3.

## 3.2 El marco jurídico para el manejo del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco

Es común que los acuíferos transfronterizos existan bajo múltiples regímenes jurídicos. Conti y Gupta (2014) se refiere a este concepto como pluralismo legal. La aplicación de más de un marco jurídico a solo un recurso puede resultar en “incongruencias en las normas jurídicas y principios aplicados” (Conti y Gupta, 2014, p. 39). Por eso, es importante examinar los marcos jurídicos que aplican al acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco en el nivel internacional, nacional, subnacional y binacional.

### 3.2.1 El marco jurídico internacional

La siguiente subsección sobre el marco jurídico internacional detalla las convenciones, acuerdos y normas más importantes para el manejo de acuíferos transfronterizos. En la década de sesenta, el tema de la gestión de aguas transfronterizas empezó a desarrollarse con la creación de las Reglas de Helsinki (1966). Las Reglas de Helsinki son un “conjunto de principios jurídicos para la utilización de los ríos internacionales” formados por la Asociación de Derecho Internacional para el reparto de las cuencas internacionales (International Law Association, 1966; Vick, 2008, p.154). Se declara que los estados de la cuenca “deben tener en cuenta las

necesidades económicas y sociales de [los otros estados] de la cuenca para el uso de las aguas” (ILA, 1966)). Las Reglas de Helsinki establecieron el principio de uso razonable y equitativo que ha sido importante para la formación de otros principios jurídicos para el manejo conjunto de recursos compartidos. Las Reglas reconocen que el uso razonable y equitativo de aguas internacionales está influido por varios factores, por ejemplo: la dependencia de un estado de las aguas, “[su] población, las condiciones geográficas, climáticas y meteorológicas, la existencia de fuentes alternativas de suministro de alimentos, la utilización ineficiente y la situación financiera de los respectivos estados de la cuenca” (ILA, 1966). Aunque las Reglas de Helsinki no abordan el tema de aguas subterráneas, sus principios jurídicos incluyeron la construcción de principios similares para el uso de acuíferos transfronterizos.

Unos años después, la Declaración de Estocolmo (1972) añadió la necesidad de “unos principios comunes” para “preservar y mejorar” el medio ambiente en todos los países del mundo a la discusión sobre el manejo de recursos compartidos (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 1972, p. 1). Entre los principios comunes está el Principio 21 que declara que “los Estados tienen el derecho soberano de explotar sus propios recursos en aplicación de su propia política ambiental y la obligación de... no perjudique al medio ambiente de otros Estados o zonas situadas fuera de toda jurisdicción nacional” (PNUMA, 1972, p.3). En 1977, la Organización de Naciones Unidas (ONU) elaboró el Plan de Plan de Acción de Mar del Plata que reconoció la aplicación del Principio 21 de la Declaración de Estocolmo a los recursos hídricos (The United Nations, 1977).

La revisión sistemática puso de relieve el reto central que supone la soberanía estatal para la gestión de un acuífero transfronterizo. El Principio 21 trata de equilibrar lo que podría decirse que es un concepto paradójico cuando se aplica a acuíferos transfronterizos con grandes cantidades de interacción hidrológica. En casos como el del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco, es un reto adherirse al Principio 21 dado que el bombeo a un lado de la frontera ha demostrado en modelos hidrológicos que afecta al seguimiento del agua en todo el acuífero. Sin embargo, sigue siendo importante reconocer el esfuerzo realizado como parte de la Declaración para preservar la soberanía estatal en el caso de los recursos compartidos, aunque el principio no sea efectivo en la práctica.

La atención internacional pasó a empezar a incluir las aguas subterráneas en la consideración de recursos compartidos con la creación de las Normas de Seúl sobre aguas

subterráneas internacionales en 1986. Las Normas de Seúl son un conjunto de principios jurídicos formados por la Asociación de Derecho Internacional, y se componen de cuatro artículos que abordan los temas de la interdependencia hidráulica, la protección de las aguas subterráneas y la gestión conjunta de las aguas subterráneas y superficiales (ILA, 1986). La tercera sección del segundo artículo combina elementos de las Reglas de Helsinki y la Declaración de Estocolmo en las limitaciones de los derechos de los estados a aguas subterráneas internacionales. Esta sección declara que

los Estados de la cuenca, en el ejercicio de sus derechos y en el cumplimiento de sus deberes en virtud del derecho internacional, tendrán en cuenta cualquier interdependencia de las aguas subterráneas y de otras aguas, incluidas las interconexiones entre acuíferos, y cualquier lixiviación en los acuíferos causada por las actividades y las zonas bajo su jurisdicción (ILA, 1986).

En el tercer artículo que aborda la protección de los acuíferos internacionales, las Normas declaran que los estados deben prevenir la contaminación y los efectos a largo plazo de la contaminación, consultar e intercambian información y datos relevantes con el propósito de proteger la estructura geológica del acuífero y la calidad ambiental del acuífero y cooperar para coleccionar y difundir información (ILA, 1986). Finalmente, el cuarto artículo anima la gestión integrada incluido una visión conjunta de las aguas superficiales y subterráneas internacionales. Las Normas de Seúl son importantes para ser uno de los primeros reconocimientos de la importancia de establecer un marco jurídico internacional para el manejo de aguas subterráneas internacionales.

Los esfuerzos continuaban con el Proyecto de acuerdo de Bellagio que tuvo la meta de “lograr una utilización conjunta y óptima de las aguas disponibles, facilitada por procedimientos para evitar o resolver las diferencias sobre las aguas subterráneas compartidas frente a las presiones cada vez mayores sobre este recurso inestimable” (Hayton y Utton, 1989, p.3). Los principios desarrollados en este acuerdo fueron elaborados primero por un grupo de investigadores interesados en los acuíferos transfronterizos compartidos entre México y los Estados Unidos. En 1987, estos investigadores presentaron sus experiencias en Bellagio, Italia y un grupo más grande extendió los principios para aplicarlos a la situación más general de los acuíferos transfronterizos en situaciones de peligro en todas las regiones del mundo. En 1988, se presentaron los principios al Sexto Congreso de la Asociación Internacional de los Recursos

Hídricos. Los principios se enfocan principalmente en la formación de una Comisión que se encarga de la realización de las responsabilidades enumeradas en el acuerdo. El acuerdo también aborda medidas de control para la contaminación de acuíferos, el establecimiento de una base de datos común, la creación de planes de manejo, la planeación especial para sequías y otras emergencias y la resolución de conflictos (Hayton y Utton, 1989). Este Proyecto destaca la importancia de la cooperación en la comunidad académica para la creación de un marco jurídico para el manejo de este tipo de recurso.

En 1992, el concepto de sostenibilidad entró a la discusión sobre recursos compartidos. La Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente (1992) fue la conferencia más importante sobre el tema del agua dulce desde la conferencia en Mar de Plata en 1977. La Declaración de Dublín, que introduce los principios elaborados en la conferencia, declara que la escasez y el uso abusivo del agua dulce plantea una creciente y seria amenaza para el desarrollo sostenible y la protección del medio ambiente. La salud y el bienestar humanos, la seguridad alimentaria, el desarrollo industrial y los ecosistemas de que dependen se hallan todos en peligro, a no ser que la gestión de los recursos hídricos y el manejo de los suelos se efectúen en el presente decenio y aún más adelante de forma más eficaz que hasta ahora (Las Naciones Unidas, 1992, p.3).

En la cuarta sección del informe de la conferencia, se reconoce la necesidad de proteger las aguas subterráneas de la sobreexplotación y la contaminación. Las aguas subterráneas se mencionan varias veces a lo largo de la conferencia y a menudo se reconocen como parte integrante de los sistemas de aguas superficiales (The United Nations, 1992a).

En la Conferencia de la ONU sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo “Cumbre de la Tierra de Río” (1992) se planteó la Agenda 21, una visión socioambiental donde el bienestar humano está intrínsecamente vinculado en el bienestar ambiental. En la vigésima segunda sección del decimotercero capítulo, el informe destaca que “los gobiernos al nivel apropiado... deberían: promover un enfoque multidisciplinario e intersectorial en la formación y difusión de conocimientos a la población local sobre una amplia gama de cuestiones, como... el tratamiento de las líneas de drenaje y la recarga de las aguas subterráneas...” (The United Nations, 1992b). Más adelante en la trigésima séptima sección del decimotavo capítulo, se reconoce que las aguas subterráneas son esenciales para la gestión de los recursos hídricos (The United Nations, 1992b). Aunque la Agenda 21 no abordó el tema de los acuíferos transfronterizos, cualquier

mención a las aguas subterráneas es importante para construir un cuerpo general de principios que apoyen su gestión a nivel internacional.

Los esfuerzos internacionales anteriores relacionados con los acuíferos se habían centrado exclusivamente en los que están conectados hidrológicamente con las aguas superficiales. En 1997, la Comisión de Derecho Internacional de la ONU creó la Resolución sobre las aguas subterráneas transfronterizas confinadas. Esta resolución reconocía la necesidad de seguir esforzándose normas relativas a las aguas subterráneas transfronterizas confinadas. Se recomendaba que los Estados se guiaran por los principios contenidos en la Convención de las Naciones Unidas sobre los cursos de agua (The United Nations, n.d.). Este mismo año, se convocó la Convención sobre el derecho de los usos de los cursos de agua internacionales para fines distintos de la navegación. Dado que la mayoría de los acuerdos multinacionales para el uso de cuencas se había enfocado en el uso de aguas para la navegación, esta convención amplió las definiciones del uso de agua con el propósito de animar la formación de acuerdos entre países que se conceptualiza el uso del agua más allá de la navegación. El artículo 2(a) reconoce que las aguas subterráneas son fuentes que contribuyen a los sistemas de aguas superficiales; por lo tanto, todos los acuíferos subterráneos que contribuyen a los sistemas de aguas superficiales están sujetos a las normas adoptadas para la gestión de las aguas internacionales no navegables (de Cossío Klüver, 2019). Sin embargo, la convención no tomó en cuenta los acuíferos confinados; por lo tanto, los acuíferos que no contribuyen a sistemas de aguas superficiales se excluyen en esta convención. Aunque esta Convención alcanzó una inclusión importante de acuíferos hidráulicamente conectados a cuerpos superficiales de agua, no desarrolló “un régimen jurídico que tenga en cuenta [las] características particulares [del agua subterránea] y no resultaría aplicable a la totalidad de los acuíferos transfronterizos” (Pateiro y Sindico, 2019, p.118).

Desde la Convención sobre el derecho a los usos de los cursos de agua internacionales para fines distintos de la navegación, el tema de los acuíferos transfronterizos sólo se ha abordado en unos pocos esfuerzos jurídicos internacionales. En 2000, La Haya publicó una declaración sobre la seguridad de agua en el siglo XXI que elaboró la base para el establecimiento del programa para la gestión de recursos acuíferos compartidos internacionalmente (ISARM por sus siglas en inglés) implementado por la UNESCO y el Programa Hidrológico Intergubernamental (Burchi, 2018; The Hague, 2000). ISARM ha hecho

importantes contribuciones a la identificación de acuíferos transfronterizos en todo el mundo. ISARM también ha apoyado el estudio de acuíferos transfronterizos y la divulgación de información pertinente al manejo de estos recursos especiales.

El esfuerzo más detallado hasta la fecha para incorporar los acuíferos transfronterizos en el marco jurídico internacional es el Proyecto de artículos sobre el derecho de los acuíferos transfronterizos de la ONU de 2008. La Comisión para el Derecho Internacional de la ONU (ILC) elaboró 19 artículos para el uso de acuíferos transfronterizos para la revisión de la Asamblea General de la ONU (McCaffrey, 2009). Los artículos estaban originalmente destinados a acompañar la Convención sobre el derecho de los usos de los cursos de agua internacionales para fines distintos de la navegación (McCaffrey, 2009). Sin embargo, estos artículos se excluyeron y se presentaron posteriormente. La estructura general de estos artículos es:

- Artículo 1- *Alcance*
- Artículo 2- *Términos de uso*
- Artículo 3- *Soberanía de los estados*
- Artículo 4- *El uso razonable y equitativo*
- Artículo 5- *Los factores relevantes al uso razonable y equitativo*
- Artículo 6- *Obligación a no causar daño significativo*
- Artículo 7- *Obligación general a cooperar*
- Artículo 8- *Regular el intercambio de datos e información*
- Artículo 9- *Acuerdos bilaterales y regionales*
- Artículo 10- *Protección y preservación de ecosistemas*
- Artículo 11- *Zonas de recarga y descarga*
- Artículo 12- *Prevención, reducción y control de la contaminación*
- Artículo 13- *Monitoreo*
- Artículo 14- *Gestión*
- Artículo 15- *Actividades planeadas*
- Artículo 16- *Cooperación técnico con estados en vías de desarrollo*
- Artículo 17- *Situaciones de emergencia*
- Artículo 18- *Protección en tiempos de conflicto armado*
- Artículo 19- *Datos e información vital a la defensa o seguridad nacional* (International Law Commission, 2008)

En 2011, la ILC revisó los comentarios y observaciones que los estados de la Asamblea General recomendaron para los artículos finales (Pateiro y Sindico, 2019). México rechazó la propuesta para una convención, exponiendo que hubiera sido prematuro; Los EUA favorecieron la fomentación de acuerdos binacionales según el contexto específico en vez de una convención

general (Pateiro y Sindico, 2019). Desde 2011, los artículos se han incluido en varias resoluciones de la Asamblea General, pero la posición jurídica de los artículos todavía no ha cambiado. Como anotan Pateiro y Sindico (2019, p. 130),

aunque todavía tímida, ya puede apreciarse cierta aplicación práctica [de los artículos], que puede verse favorecida, sobre todo, por el hecho de que este ámbito, relativamente reciente del ordenamiento jurídico internacional, se está desarrollando a través de acuerdos bilaterales y multilaterales sobre acuíferos específicos.

Mientras que la cooperación internacional “es fundamental para mejorar y difundir la información sobre las aguas subterráneas, para desarrollar y promover enfoques y herramientas para su correcta gestión” (Van der Gun, 2012), el papel y poder del marco jurídico sigue siendo poco claro y no se ha probado. Como destacan Petrossian et al. (2017), no hay instrumentos legales reconocidos por la comunidad internacional para abordar conflictos relacionados al bombeo, disponibilidad o calidad de aguas en acuíferos transfronterizos.

### 3.2.2 El marco jurídico para el manejo de aguas subterráneas en México

Hay varias secciones de la CPEUM que se relacionan con la gobernanza de las aguas subterráneas. Primero, el artículo 4 establece el “derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible” (Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, 1917). Aunque este artículo relaciona al agua en todas sus formas, es particularmente importante para el agua subterránea; en comparación con las aguas superficiales, las aguas subterráneas son, a menudo, de mejor calidad, están mejor protegidas de la contaminación, no son tan susceptibles a las fluctuaciones estacionales y están más uniformemente ubicadas (Zektser y Everett, 2004).

Siguiendo el orden escrito está el artículo 26 que establece el Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica (SNIEG) (Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, 1917). De importancia para los acuíferos transfronterizos está la información demografía, economía, geografía y medio ambiente. Se ha notado que el acceso libre a información social, económica y ambiental es integral para el manejo exitoso de acuíferos transfronterizos. Como se hallaron en el capítulo anterior, sistemas de información geográfico y el intercambio de datos son dos elementos importantes para la gobernanza compartida de los

acuíferos transfronterizos. Entonces, el SNIEG jugaría un papel importante para el manejo binacional del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco.

La capacidad del Ejecutivo Federal bajo el artículo 27 a establecer zonas de veda ha sido un instrumento importante para la protección de los acuíferos transfronterizos. En 1952, se estableció una veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de una gran parte del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco (Diario Oficial de la Federación, 2015). En 2013, se suspendió el libre alumbramiento de las porciones no vedadas y el estado de Chihuahua prohibió la perforación de pozos y otras infraestructuras para la extracción del agua (Diario Oficial de la Federación, 2015).

Una de las previsiones más importantes es el artículo 73, que da el poder de expedir leyes que establezcan la protección, preservación y restauración del equilibrio ecológico al gobierno federal, las entidades federativas y a los municipios. La gran mayoría de la investigación sobre el uso de aguas subterráneas se ha enfocado en el aprovechamiento del recurso o los detalles técnicos. Existe una falta de entendimiento sobre la importancia de las aguas subterráneas para el equilibrio ecológico. La frontera es una zona donde la política ha complicado la preservación y restauración ambiental. Además, los acuerdos internacionales compartidos entre México y los EUA. sobre el uso de cuencas internacionales no aborda el tema de uso ecológico (Carter et al., 2017). Por eso, es necesario destacar la aplicación del artículo 73 de la CPEUM en la gobernanza de los acuíferos transfronterizos especialmente si quisiéramos fomentar el uso y aprovechamiento sostenible.

Finalmente, de interés particular para los acuíferos transfronterizos es el artículo 117 sección I que exige que “los estados no pueden en ningún caso celebrar alianza, tratado o coalición con otro Estado ni con las Potencias extranjeras” (Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, 1917). Este artículo consolida la soberanía del estado federal; la revisión sistemática destacó que la soberanía nacional obstaculiza los procesos locales de la cooperación binacional. Según De los Cobos (2018), los cuarenta años de co-manejo del acuífero Ginebrino se puede atribuir a la capacidad de abordar el “problema relacionado con los recursos hídricos internacionales a nivel local, en lugar de a nivel de Estados soberanos”. Cabe mencionar que la Constitución de los Estados Unidos también prohíbe la cooperación entre estados y entre estados y las potencias extranjeras sin la aprobación del Congreso federal<sup>7</sup>.

---

<sup>7</sup> Véase a *U.S. Constitution Article 1, Section 10, Clause 3*

Las tres leyes federales y generales de importancia son la Ley de Aguas Nacionales, la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección Ambiental (LGEEPA) y la Ley General de Cambio Climático. La Ley de Aguas Nacionales, por su tema, es la ley federal más importante para la gestión de los acuíferos transfronterizos. El artículo 2 especifica que “las disposiciones de esta Ley son aplicables a todas las aguas nacionales, sean superficiales o del subsuelo” (Ley de Aguas Nacionales, 1992). Este artículo establece el agua subterránea como parte integral de la conceptualización de las aguas. El artículo 1 sección XLIV se establece el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) que “proporciona información y seguridad jurídica a los usuarios de aguas nacionales y bienes inherentes a través de la inscripción de los títulos de concesión, asignación y permisos de descarga, así como las modificaciones que se efectúen en las características de los mismos” (Ley de Aguas Nacionales, 1992). Mientras que el REPGA proporciona un récord de las extracciones del agua subterránea, autores como Sanchez et al. (2021) han notado que los registros federales a menudo no reportan todas las extracciones de agua.

La primera sección del artículo 7 declara de utilidad pública “la gestión integrada de los recursos hídricos, superficiales y del subsuelo, a partir de las cuencas hidrológicas en el territorio nacional, como prioridad y asunto de seguridad nacional” (Ley de Aguas Nacionales, 1992). La conceptualización de los acuíferos como partes de un sistema hidráulico más grande ha sido un obstáculo para la gestión integrad (Eckstein, 2021, comunicación personal). En el caso del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco, los vínculos entre el acuífero y el Río Bravo exigen una gestión integrada. La sobreexplotación del acuífero en los años recientes ha resultado un cambio de la dirección de recarga (Heywood y Yager, 2003). Esta situación ha traído problemas porque la recarga del acuífero en esta manera ha resultado en menos agua disponible en un río que ya está sobre asignada (Carter et al., 2017). En la cuarta sección del artículo 7, se permite el restablecimiento del equilibrio hidrológico a través de varios mecanismos incluyendo la recarga artificial (Ley de Aguas Nacionales, 1992). La recarga artificial ha sido implementada para la protección de los acuíferos transfronterizos (es el principal mecanismo del acuerdo para el manejo del acuífero Ginebrino) y se ha recomendado el uso de la recarga artificial como manera de disminuir la vulnerabilidad hídrica de la región que es muy importante considerando que se estiman impactos graves debido al cambio climático (de los Cobos, 2015; Sandoval-Solis et al., 2011; Wilder et al., 2013).

En el artículo 13 bis 1 de la Ley de Aguas Nacionales, se establecieron los Consejos de Cuenca. El Consejo de Cuenca Río Bravo es una organización y parte interesada en la gestión de acuíferos transfronterizos en toda la cuenca. Se ha promulgado eventos sobre la gestión sostenible y tiene en su página web enlaces a publicaciones sobre el manejo de acuíferos transfronterizos. El Consejo de Cuenca Río Bravo es una institución importante no solo por su poder jurídico sino también por su capacidad para divulgar información.

Se ha anotado que la Ley de Aguas Nacionales descentraliza el poder del gobierno federal en sus capacidades de gestionar aguas nacionales. Por ejemplo, Schur (2017) menciona que el financiamiento para el mantenimiento y desarrollo de sistemas para el manejo de agua se ha reducido desde hace la promulgación de la Ley de Aguas Nacionales que "estipulaba que los servicios públicos locales fueran financieramente autónomos" (p. 38). Por lo tanto, nuevos retos que relacionan al vínculo entre financiamiento y poder regulatorio han surgido para municipalidades al lado mexicano de la frontera.

A continuación, hay dos artículos de la LGEEPA que tratan el tema de las aguas subterráneas. En la quinta sección del artículo 1, se menciona que es la disposición de la ley "el aprovechamiento sustentable... [del] agua" (Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, 1988). En la tercera sección del artículo 88, que se relaciona al aprovechamiento sustentable del agua y los ecosistemas acuáticos, se considera el mantenimiento de la capacidad de recarga de los acuíferos como criterio para la sostenibilidad (Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, 1988). Como se mencionó antes, la recarga artificial es una opción para fomentar la sostenibilidad de acuíferos. La ciudad de El Paso ya ha implementado un esquema de recarga artificial del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco utilizando aguas residuales tratadas (Schlanger, 2018). El uso de plantas de recarga artificial es una estrategia importante para prolongar la vida de los acuíferos en climas áridos natural e insular los acuíferos de los efectos del cambio climático (Sheng et al., 2001; Wilder et al., 2013).

Para concluir con el tema de las leyes federales y generales, se examinó la Ley General de Cambio Climático. El artículo 30 establece que la administración pública federal centralizada y paraestatal implementarán acción para "elaborar los diagnósticos de daños en los ecosistemas hídricos" (sección X), "promover el aprovechamiento sustentable de las fuentes superficiales y subterráneas de agua" (sección XI) y "fomentar la recarga de acuíferos" (sección XII) (Ley General de Cambio Climático, 2012). En las partes (c) y (i) de la tercera sección del artículo 34,

se destaca que la protección, conservación y restauración de hábitats acuáticos y la transición hasta la agricultura sustentable son importantes para proteger los acuíferos y reducir las emisiones (Ley General de Cambio Climático, 2012). Finalmente, en el artículo 82, se ofrece importancia prioritaria a los proyectos “que contribuyan simultáneamente a la mitigación y adaptación al cambio climático, incrementando el capital natural, con acciones orientadas, entre otras, ... recargar los mantos acuíferos” (Ley General de Cambio Climático, 2012). La reiteración de la importancia de la recarga de los acuíferos tiene el potencial de aumentar la conciencia general sobre la importancia del manejo, cuidado, preservación, y restauración de los acuíferos transfronterizos.

En términos generales, los análogos estatales de las leyes federales abordan el tema del agua subterránea de una manera similar. Cabe mencionar que la Ley de Cambio Climático del Estado de Chihuahua pone un énfasis específico en el uso y monitoreo de las aguas subterráneas del estado. El artículo 40 sección II declara, de manera prioritaria, la adaptación a través de la consideración de

... las necesidades de gestión en materia de agua, desarrollando un diagnóstico de aguas subterráneas y ordenamiento de acuíferos; fortaleciendo los sistemas de alerta temprana, la capacidad para almacenar agua eficientemente en situaciones regulares y en situaciones extremas; los instrumentos de pago por servicios hidrológicos, la recuperación de la carga de acuíferos, la realización de obras de conservación de suelo y agua para la retención de avenidas, el saneamiento integral y programas de distribución que garanticen reservorios y fuentes secundarias de agua para consumo humano, la prevención y acciones emergentes ante períodos de sequía (Ley de Cambio Climático del Estado de Chihuahua, 2013).

La visión más amplia del papel de las aguas subterráneas es importante para el estado de Chihuahua que es el estado con el mayor número de acuíferos (61) así como el mayor número de acuíferos sobreexplotados (29) (Comisión Nacional de Agua Subdirección General Técnico, 2020). La inclusión de un sistema de alerta temprana y la preparación para períodos de sequía podría funcionar como una fundación crítica para la cooperación binacional; Suiza y Francia han desarrollado un sistema de alerta para informar la toma de decisiones sobre el uso del acuífero Ginebrino durante periodos de sequía después de dificultades en su manejo durante la sequía de 2010-2011 (de los Cobos, 2015). Aunque la adaptación y preparación para los impactos del

cambio climático pudieran impulsar la cooperación binacional, se necesitaría una fundación jurídica y normativa más específica para fortalecer la posición de los acuíferos transfronterizos.

### 3.2.3 El marco jurídico para el manejo de aguas subterráneas en los EUA

En contraste con México, el marco jurídico para el manejo de aguas en los EUA es descentralizado. Existen múltiples diferentes marcos (doctrinas) para el manejo de agua que conforman con las particularidades históricas y físicas de diferentes partes del país<sup>8</sup>. El gobierno federal, a través de algunas leyes federales, se encarga principalmente con asuntos de la calidad de agua y la preservación de ecosistemas (Petrossian et al., 2017). Como parte de la primera generación de derecho público medioambiental en Estados Unidos, se promulgaron La Ley de Seguridad de Agua Potable (1974) y la Ley Federal de Aguas Limpias (1977). La Ley de Seguridad de Agua Potable es la ley principal para la regulación de agua para el consumo de agua en los EUA. Bajo el reglamento de esa ley, la Agencia de Protección Ambiental define estándares para la calidad del agua y monitorea las autoridades responsables para la distribución de agua potable en el país (Safe Drinking Water Act, 1974). La ley también estableció programas para el monitoreo de la calidad del agua en acuíferos (Petrossian et al., 2017). La Ley Federal de Aguas Limpias “establece la estructura básica para la regulación de contaminantes en las aguas de Estados Unidos y la regulación de las normas de calidad de las aguas superficiales” (United States Environmental Protection Agency, 2020). Aunque la ley se enfoca en las fuentes de contaminación para aguas superficiales, hay varias referencias al monitoreo y prevención de contaminación de las aguas subterráneas<sup>9</sup> (Federal Water Pollution Control Act, 2002).

Los esfuerzos del Congreso federal por crear legislación sobre cuestiones medioambientales han disminuido drásticamente desde mediados del siglo XX. Las agencias reguladoras federales, como la Agencia de Protección del Medio Ambiente (USEPA), han utilizado su autoridad para crear un marco jurídico para el manejo de aguas subterráneas. En 2006, la USEPA implementó la Regla para el uso de aguas subterráneas (*Ground Water Rule*) para proteger sistemas que utilizan agua subterránea como agua potable para destinos de consumo humano. Su meta es “reducir el riesgo de enfermedades causadas por la contaminación microbiana en los sistemas públicos de aguas subterráneas” (USEPA, 2008).

---

<sup>8</sup> Véase a la apéndice sección A.4 para una explicación más detallada de las doctrinas de manejo.

<sup>9</sup> Véase a las secciones §102(a), 104(a)(5), 106(e)(1), 202(b)(2), 208(a)(2)(I), 208(a)(2)(K), 304(a)(2)(A), 304(f)(2)(E), 319(h)(5)(D), 319(i)

Sin duda, la ley más importante que forma el marco jurídico para el manejo de acuíferos transfronterizos en la zona fronteriza es La Ley Estados Unidos-México para la Evaluación de Acuíferos Transfronterizos (*U.S.-Mexico Transboundary Aquifer Assessment Act*) promulgada en 2006. La ley identificó cuatro acuíferos de alta prioridad de investigación: Bolsón del Hueco (Nuevo México, Texas, Chihuahua), Bolsón de Mesilla (Nuevo México, Texas, Chihuahua), San Pedro (Arizona, Sonora) y Santa Cruz (Arizona, Sonora). Esta ley estableció el Programa para la Evaluación de Acuíferos Transfronterizos (TAAP por sus siglas en inglés) con el propósito de “proporcionar un marco en el que los dos países estudien conjuntamente los acuíferos compartidos para mejorar [la] comprensión de estos recursos críticos de agua subterránea” (United States Geological Survey, n.d). Los fondos del programa vienen de ambos países, pero el gobierno estadounidense no dio el financiamiento comprometido al TAAP. En los diez años de vigencia, el programa recibió un 5% del presupuesto otorgado.

Bajo el TAAP, se han elaborado dos investigaciones geológicas, cuatro investigaciones hidrogeológicas, tres estudios sobre la calidad del agua, y cuatro estudios sobre la participación de las partes interesadas (United States Geological Survey, n.d). Los estudios se han enfocado en los aspectos más técnicos. La ley tuvo la meta de evaluar los acuíferos transfronterizos de alta prioridad y no gestionar estrategias para su manejo y administración (Wilder et al., 2020). Entonces, todavía hay mucha oportunidad para elaborar una política binacional. A pesar de la implementación limitada debido a la falta de apoyo financiero, muchos expertos refieren al TAAP como un ejemplo de los beneficios que se trae la cooperación y los avances que se pueden lograr con la colaboración entre países (Humberson, 2021, comunicación personal).

La ubicación geográfica del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco se sitúa las aguas bajo la jurisdicción de dos estados: Texas y Nuevo México. En contraste con los estados en México, los estados en los EUA pueden tener marcos distintos para el manejo de recursos. En Texas, el marco jurídico es definido por la doctrina de soberanía territorial absoluta mientras que, en Nuevo México, la doctrina de apropiación previa aplica a las aguas subterráneas; con dos conceptualizaciones tan diferentes del recurso, existen no solo la complejidad de la dimensión internacional sino también la dimensión interestatal.

En el estado de Texas, las aguas subterráneas “pertenecen a la persona que puede capturarlas. [El agua subterránea] es nominalmente propiedad del propietario del terreno que se encuentra sobre el acuífero, pero está sujeta a la norma de captura y uso por parte de los

propietarios colindantes” (Kaiser, 2002, p.11). En Texas, la norma de captura es una “ley basada en los jueces” lo que significa que su desarrollo ha ocurrido en los cortes en vez del congreso del estado (Kaiser, 2002, p. 32). El caso del Tribunal Supremo de Texas *Houston & Texas Railroad Co. vs. East* estableció la norma de captura como la base legal para el aprovechamiento de aguas subterráneas en 1904 (Petrossian et al., 2017). Bajo esta doctrina, un propietario puede bombear cualquier cantidad de agua subterránea que desee, incluso si su bombeo excesivo afecta a los pozos vecinos que pertenecen a otras personas.

Desde entonces, la norma permanece prácticamente sin modificaciones, aunque las acciones posteriores de la Legislatura del Estado de Texas han hecho avanzar la política de conservación de las aguas subterráneas. En 1949, se promulgó la Ley de Distritos de Aguas Subterráneas de Texas que permite el establecimiento de distritos para conservar el agua subterránea (Petrossian et al., 2017). Un distrito es una unidad local de gobierno autorizada para gestionar y proteger las aguas subterráneas (Texas A&M University, 2014). Estas unidades tienen el poder para “conservar, preservar, proteger, recargar y evitar el desperdicio de las aguas subterráneas, así como prevenir el hundimiento del terreno” (Petrossian et al., 2017, p. 38). Los distritos están autorizados a adoptar normas y diversos enfoques de gestión que incluyen opciones distintas de la regla de la captura (Petrossian et al., 2017). Por ejemplo, los distritos pueden imponer normas sobre el espaciado de los pozos, el tamaño de las secciones de pozos y la degradación de la calidad del agua, entre otras (Petrossian et al., 2017).

Hay 98 distritos de conservación en el estado de Texas, pero el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco no cuenta con uno (Petrossian et al., 2017; Texas Water Development Board, n.d.). El estado también está dividido en áreas para la gestión de aguas subterráneas y áreas de planificación regional del agua. Se establecieron las áreas para la gestión de aguas subterráneas para facilitar la planeación conjunta entre los distritos de conservación y el gobierno estatal (Petrossian et al., 2017). Los grupos de planificación regional utilizan la información proporcionada por la Junta de Desarrollo del Agua de Texas y reúnen a las partes interesadas para crear planes para las aguas superficiales y subterráneas (Petrossian et al., 2017). El acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco pertenece al área de gestión de aguas subterráneas cinco y al área de planificación regional del agua E (Petrossian et al., 2017). El grupo de planificación de la *región E* incluye representantes de Nuevo México y de México, así como miembros de las secciones estadounidense y mexicana de la CILA (Petrossian et al., 2017). A pesar de los

avances que se han hecho hacia la gestión integrada mediante el establecimiento de distritos de conservación, la falta de un distrito de conservación para el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco significa que la regla de la captura sigue prevaleciendo para el uso de sus aguas subterráneas. Esto complicó la gestión integrada del agua del acuífero y del Río Bravo dado que la norma de captura

[perpetúa] el mito (abandonado hace tiempo por los hidrólogos, pero no por los legisladores o los jueces) de que las aguas subterráneas están separadas de las aguas superficiales no relacionadas. Este "mito de la separación" ha sido un gran obstáculo para el desarrollo de un cuerpo legal de aguas integrado y conjunto para Texas (Kaiser, 2002, p. 31).

La doctrina de apropiación previa se aplica en el estado de Nuevo México para las aguas superficiales y subterráneas (DuMars, 1982). Aunque la doctrina de apropiación previa aplica al aprovechamiento de las aguas subterráneas, el agua, cuando no se está apropiado, es propiedad del estado. Como explica DuMars (1982),

dado que toda el agua de Nuevo México que corre por los cauces naturales y el subsuelo pertenece de hecho al Estado como fiduciario del pueblo, ningún individuo es dueño del agua. Sin embargo, se puede adquirir un derecho de propiedad real para desviar el agua de acuerdo con los procedimientos de la ley estatal, hasta la cantidad que se pueda destinar a un uso beneficioso (pp. 1046-1047).

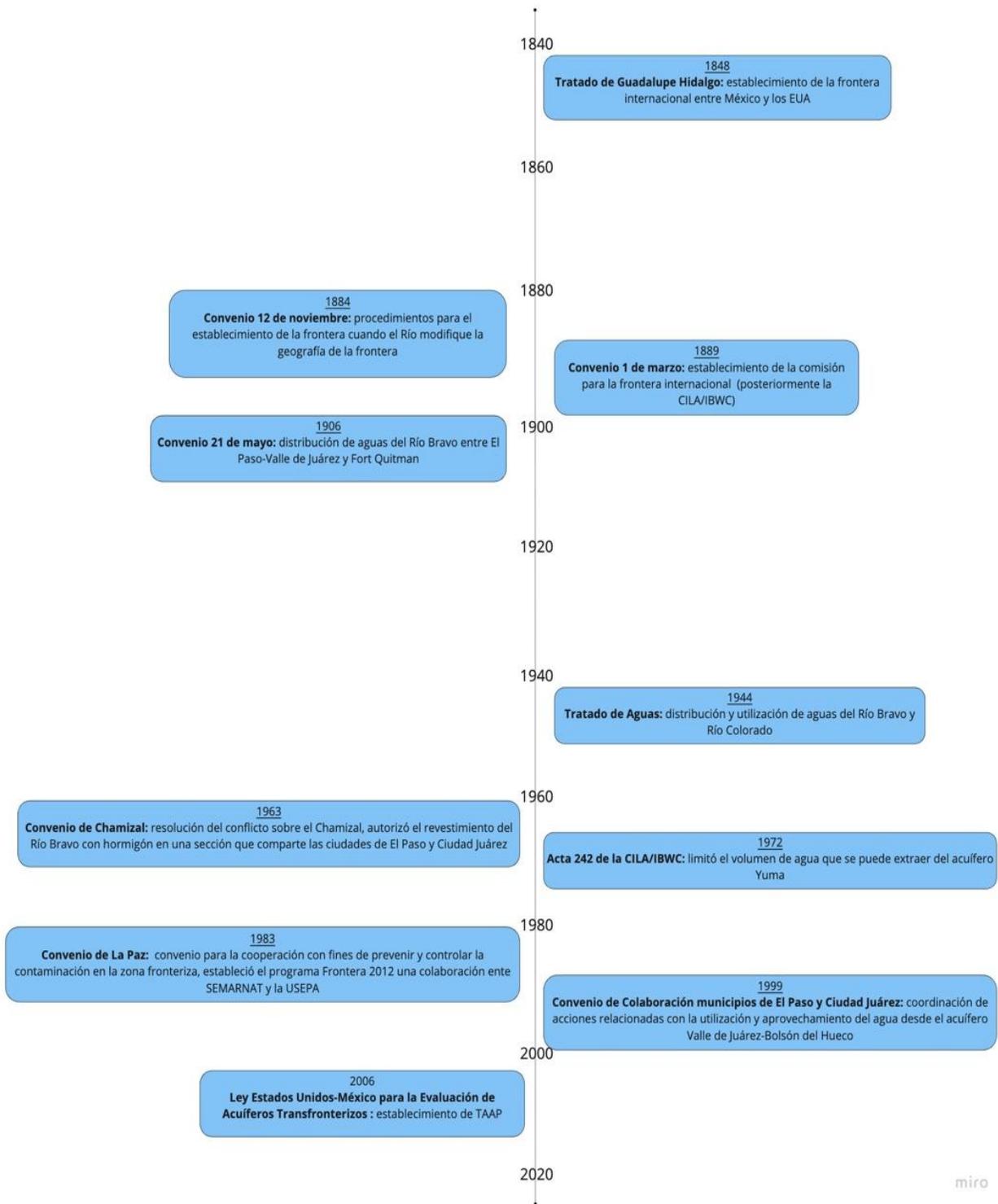
Esta conceptualización legal del agua pone el uso y aprovechamiento del agua subterránea bajo la doctrina de apropiación previa mientras que las responsabilidades de gestión, manejo y planeación corresponden al estado en su capacidad de fiduciario del pueblo. Además, toda el agua no apropiada pertenece al Estado, y el Estado mantiene la autoridad de conceder derechos para el uso de agua (Petrossian et al., 2017). Las leyes estatales de Nuevo México se encargan al Ingeniero del Estado con las responsabilidades de “apropiación, transferencia y distribución de aguas” (DuMars, 1982).

La oficina del Ingeniero del Estado empezaba a delinear caudales subterráneos en la década de los treinta (Petrossian et al., 2017). En 2004, el Estado estableció un marco para la gestión de aguas en tiempos de sequía (Petrossian et al., 2017). El capítulo 72 de los Estatutos del Estado de Nuevo México otorga al Ingeniero del Estado la autoridad para establecer cuencas hidrográficas subterráneas (Bushnell, 2012). Para facilitar su gestión, la oficina del Ingeniero del

Estado mantiene 17 modelos para el flujo de caudales subterráneos. Una vez establecida una cuenca subterránea, la autoridad reguladora la asume el Ingeniero del Estado (Petrossian et al., 2017). A través de varias actualizaciones del Código de Aguas del Estado de Nuevo México, la oficina del Ingeniero del Estado tiene autoridad sobre la construcción de pozos, los permisos de uso del agua, las limitaciones de producción, los requisitos de medición, la transferencia de agua fuera de Nuevo México, el cambio de ubicación de un pozo a un pozo permitido, y otros aspectos de la propiedad de los pozos (Petrossian et al., 2017). El estado se divide en 16 distritos de planeación regional (New Mexico Office of the State Engineer, 2013). Como exige la ley, el primer plan hidrológico se elaboró en 2003; el manual de planificación estatal del agua también facilita la gestión regional de las aguas subterráneas (Petrossian et al., 2017).

### 3.2.4 El marco jurídico binacional

México y los EUA gobiernan las aguas compartidas con un marco binacional establecido por tratados y convenios. La Figura 27 proporciona una línea de tiempo de las intervenciones binacionales más importantes para el tema de agua subterránea.



**Figura 27** México y los EUA han cooperado de manera formal sobre el tema del agua desde el establecimiento de la frontera en 1840. La línea de tiempo muestra los eventos de cooperación formal más importantes para el tema de las aguas subterráneas (Elaboración propia).

A pesar del número de instancias de la cooperación binacional para el manejo de aguas, el agua subterránea no se menciona en ninguno de los dos tratados. Por lo tanto, los acuerdos

binacionales no abordan los acuíferos transfronterizos (Carter et al., 2017). Uno de los puntos más importantes para el Tratado de Aguas es la expansión de los poderes de la CILA/IBWC (Helfgott, 2021). Crucial para la función del mecanismo binacional de la CILA/IBWC es el proceso de actas; las actas son legislación para la ejecución o interpretación del tratado y la reconciliación de desacuerdos (Carter et al., 2017). Aunque la CILA/IBWC es un cuerpo binacional, las delegaciones están separadas en divisiones (Helfgott, 2021). Cada país tiene su propio comisado, ingeniero, consejo legal y secretaría de asuntos foráneos (Helfgott, 2021). En el Tratado de Aguas de 1944, se estableció una jerarquía de uso de las aguas compartidas. Los usos en orden establecido son: (1) usos domésticos y municipales; (2) agricultura y ganadería; (3) energía eléctrica; (4) otros usos industriales; (5) navegación; (6) pesca y caza; y (7) cualquier otro uso beneficioso determinado por la CILA (Carter et al., 2017).

Una crítica del tratado es la falta de consideración del agua, superficial tanto como subterránea, como fuente importante para los usos y necesidades ecológicas (Carter et al., 2017). En toda la larga historia de cooperación, el proceso de actas sólo se ha usado una vez para abordar el tema de agua subterránea. En 1972, se implementó el acta 242 para limitar el volumen de agua que se podía extraer del acuífero Yuma (International Boundary and Water Commission United States and Mexico, 1973; Sanchez y Eckstein, 2017). Con tanta infrecuencia, se ha cuestionado si la función de la CILA/IBWC a través del proceso de las actas es suficiente para gobernar los acuíferos transfronterizos.

El Convenio entre los Estados Unidos Mexicanos y los Estados Unidos de América sobre cooperación para la protección y mejoramiento del medio ambiente de la zona fronteriza (Acuerdo de la Paz) también define un espacio importante para la gestión de aguas compartidas. Los objetivos del convenio incluyen el establecimiento de

las bases para la cooperación entre las Partes en la protección, mejoramiento y conservación del medio ambiente y los problemas que lo afectan, así como acordar las medidas necesarias para prevenir y controlar la contaminación en la zona fronteriza, y proveer el marco para el desarrollo de un sistema de notificación para situaciones de emergencia (Gobierno de México y Gobierno de los Estados Unidos, 1983, art 1).

El convenio identificó la coordinación de programas nacionales, intercambios científicos y educacionales, medición ambiental y evaluación de impacto ambiental como formas de cooperación posible. Los programas de coordinación principal del convenio—Frontera 2012,

Frontera 2020 y Frontera 2025—no han abordado explícitamente las aguas subterráneas, pero el énfasis en la importancia de proteger los cuerpos de agua de la contaminación ambiental es importante para la gestión integrada. Es de esperar que el sentimiento positivo de colaboración que se ha desarrollado durante los programas de la Convención facilite la futura colaboración en torno a las aguas subterráneas, así como los factores transversales que influyen en el uso de estos recursos.

A partir de finales de la década de 1990, la cooperación en torno al intercambio de datos entre El Paso y Ciudad Juárez comenzó a cobrar impulso. En 1997, el CILA/IBWC facilitó el intercambio de datos de aguas subterráneas y el desarrollo de una publicación bilingüe relacionada con la creación de un modelo matemático para el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco (Merino y Rascón Mendoza, 2009). De alta importancia para la gestión específica para el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco es el convenio de colaboración entre la Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Ciudad Juárez y el Consejo de Servicios Públicos de la Ciudad de El Paso elaborado en 1999. El convenio era una respuesta al “incremento en la utilización de estos recursos y el explosivo crecimiento poblacional” (artículo 5). Se enfatizó el intercambio de información sobre la ubicación de pozos, uso histórico, apoyo técnico, datos de crecimiento demográfico, datos de desarrollo económico, modelos matemáticos, esfuerzos para la reutilización de agua y lecciones aprendidas. También se expresó interés en aumentar la comunicación, cooperación e instrumentación de proyectos transfronterizos. Para hacer operativo el convenio, se estableció un comité ejecutivo. Había una expresión de interés en la elaboración de programas conjuntos relacionados con un plan de abastecimiento, rehabilitación de infraestructura y la promoción de uso eficiente de agua.

A pesar de falta de financiación, las intervenciones más recientes del TAAP han logrado un éxito limitado. Tapia-Villaseñor y Megdal (2021, p. 3) sostienen que el TAAP también puede considerarse una iniciativa de adaptación al clima y al agua para la frontera occidental entre México y Estados Unidos, una iniciativa regional transfronteriza que tiene el potencial de crear capacidad de adaptación, una actividad que puede apoyar los procesos de toma de decisiones relacionados con la gestión de las aguas subterráneas en cada país, y un precedente para una asociación binacional que puede promover e implementar una nueva evaluación binacional de acuíferos.

En 2009, la CILA/IBWC creó un marco de cooperación para guiar la implementación del estudio binacional TAAP sobre el Acuífero de San Pedro, que se publicó y es la "primera evaluación de acuíferos binacional, totalmente bilingüe... sujeta a una revisión por pares en ambos lados de la frontera" (Megdal, 2017, p. 1). Un estudio binacional sobre el Acuífero de Santa Cruz pronto siguió el ejemplo. Otros logros del TAAP incluyen el desarrollo del Modelo Hidrológico del Valle de Mesilla, el establecimiento de proyectos de investigación en múltiples estados fronterizos, la elaboración de varias publicaciones académicas y el quórum de más de 50 reuniones binacionales (Tapia Villaseñor y Megdal, 2021). Con los avances en el estudio de los Acuíferos de San Pedro y Santa Cruz, esfuerzos similares para el Valle de Juárez-Bolsón del Hueco están notablemente ausentes. Aunque el TAAP resultó en avances cruciales en el tema de aguas subterráneas transfronterizas, es indudable que el programa no fue capaz de cumplir con todo su impacto o potencial.

### 3.3 El contexto socioeconómico

Para desarrollar una visión más completa del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco, es crucial entender el panorama socioeconómico de su uso. El contexto sobre los factores sociales es importante, ya que "la gestión del agua no es simplemente un campo técnico que puede abordarse mediante la provisión de infraestructura y la experiencia científica, sino un campo político que implica valores humanos, comportamiento y organización" (Linton y Budds, 2014, p. 170).

#### 3.3.1 Información básica

La tabla 7 proporciona algunos datos importantes para aterrizar el contexto social de la región donde se encuentra el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco.

	Juárez	Guadalupe	Praxedis G. Guerrero	El Paso	Hudspeth
Población total	1,332,131 (2010)	6,458 (2010)	4,799 (2010)	839,238 (2020)	4,886 (2020)
Tipo de Urbanización	Urbano	No urbano	No urbano	Urbano	Rural

Porcentaje de la población que vive en pobreza	37.68%	51.58%	41.68%	18.8%	28%
Porcentaje de viviendas sin agua entubada	1.99%	2.84%	2.01%	-	-
Porcentaje de viviendas sin drenaje	1.04%	16.19%	15.83%	-	-

**Tabla 6** Información básica sobre la demográfica de los municipios que cubren el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco (INEGI, 2010; United States Census Bureau, 2020a; United States Census Bureau, 2020b; SEDESOL, 2013a; SEDESOL, 2013b; SEDESOL, 2013c).

La población de la región se centra en las ciudades gemelas de Ciudad Juárez y El Paso. Estas ciudades tienen menores índices de pobreza y menos hogares sin acceso adecuado a los servicios de agua en comparación con las zonas rurales de la región.

### 3.3.2 En las ciudades

El consumo urbano de agua es el principal uso del agua del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco. El crecimiento demográfico urbano se considera sistemáticamente como uno de los mayores retos para la gestión del acuífero transfronterizo México-Estados Unidos. La población ha crecido rápidamente en la región en comparación con el crecimiento a nivel nacional, con un aumento del 12% entre 2000 y 2010 en el lado estadounidense y del 18% en el mismo período de tiempo en el lado mexicano de la frontera (Pan American Health Organization, 2012). Son las aguas subterráneas de los acuíferos transfronterizos las que soportan estas tasas de crecimiento (Soto Ontiveros, 2019). La expansión de las zonas urbanas puede provocar la contaminación de los recursos hídricos subterráneos y la alteración del régimen hidrogeológico local (Kazemi, 2011).

Salas-Plata Mendoza (2006) anotó que en Ciudad Juárez, “la falta de planeación de los centros urbanos y el abuso de los recursos naturales, han traído como consecuencia la disminución de la calidad de vida de los asentamientos humanos y la degradación de los ecosistemas, que de no atenderse, pudieran crear situaciones críticas con el paso del tiempo” (p. 6). Mientras que el acceso a agua potable y los servicios de sanitización han aumentado, la calidad del agua es una preocupación alta para la región (Pan American Health Organization, 2012). También es importante considerar las desigualdades interurbanas. Fuentes y Cervera

(2006) encontraron que los patrones de segregación espacial causados por los mercados de suelo en Ciudad Juárez se caracterizaban por "dramáticas desigualdades sociales, particularmente en referencia al acceso al suelo urbano y a los servicios". El acceso al suelo urbano ha mostrado a los residentes de bajos ingresos induciendo la migración desde el núcleo urbano a zonas de bajo valor con una infraestructura pública deficiente (Fuentes y Cervera, 2006). La creciente dependencia urbana se caracteriza por un "proceso socioespacial de urbanización [que] contribuye a la formación y al patrón de la desigualdad medioambiental" (Grineski y Collins, 2010, p. 1309). Es necesario realizar más estudios para comprender mejor la intersección entre las cuestiones de justicia social y la explotación de las aguas subterráneas.

Se han examinado las preocupaciones relacionadas con las desigualdades ambientales en las dos zonas urbanas. Grineski et al. (2012) introdujeron el concepto de "injusticias transnacionales" entre las ciudades de El Paso y Ciudad Juárez argumentando que los factores sociales y económicos crean problemas de justicia ambiental que modifican los impactos espaciales del cambio climático. Como explican los autores

a escala transnacional, es probable que Juárez se enfrente a una mayor exposición y a una creciente marginalidad social, en comparación con El Paso. Es una ciudad más densamente asentada, lo que da forma a la isla de calor urbana y al riesgo de inundación, que El Paso... Muchas personas con capacidad para abandonar la ciudad (por ejemplo, profesionales o empresarios) han emigrado, dejando atrás a una población cada vez más marginal desde el punto de vista social que se enfrentará a una aguda brecha climática en cuanto a su capacidad para hacer frente a las condiciones del cambio climático. En El Paso, las personas de clase social más baja se enfrentan a mayores riesgos en cuanto a los peligros, y los niños también se enfrentan a una exposición significativa y desproporcionada al pico de ozono. En Juárez, los hogares encabezados por mujeres estaban significativamente más expuestos al riesgo de inundación y al pico de ozono (Grineski et al., 2012, pp. 33-34).

Otros estudios similares (véase Blackman et al., 2004; Grineski y Collins, 2008; Grineski et al., 2010; Grineski et al., 2015) se han centrado en los riesgos y la exposición a contaminantes ambientales peligrosos. La continuación de este trabajo debería examinar cómo los contaminantes peligrosos afectan a la calidad de las aguas subterráneas y la distribución de los riesgos relacionados con las aguas subterráneas contaminadas.

### 3.3.3 En el campo

Las ciudades pueden ser los principales usuarios del agua del acuífero del Valle de Juárez-Bolsón del Hueco, pero a medida que cambia la disponibilidad de agua superficial, los usuarios rurales y agrícolas dependen cada vez más de los recursos de agua subterránea. Hargrove et al. (2020) señalaron el aumento del uso de las aguas subterráneas para la agricultura de regadío a medida que los cultivos de uso intensivo de agua—en particular las pacanas—se vuelven más rentables. Los productores agrícolas dependen en mayor medida de las aguas superficiales, pero las condiciones de sequía les obligan a menudo a complementar su riego con aguas subterráneas o aguas residuales tratadas. Montano Armendáriz (2019) halló que desde la década de 1990, cuando comenzó el cambio al uso de aguas residuales tratadas de Ciudad Juárez para la agricultura de riego en el Valle de Juárez, la zona ha perdido una cantidad increíble de productividad del suelo. El uso de aguas residuales para el riego también ha aumentado los casos de contaminación de acuíferos poco profundos, así como los resultados adversos para la salud humana (Montano Armendáriz, 2019).

El crecimiento de las ciudades también ha aumentado las tensiones entre los usuarios urbanos y rurales. Los usuarios agrícolas han expresado constantemente su preocupación por la creciente sed de las ciudades; los productores vieron constantemente la urbanización como una amenaza para la seguridad del agua (Hargrove y Heyman, 2020). Cuestiones relacionadas con la productividad de los suelos, la salud ambiental y la violencia social en el Valle de Juárez han llevado a muchos residentes de las comunidades agrícolas a emigrar a las ciudades donde hay un mejor acceso a la infraestructura pública y a las oportunidades (Montano Armendáriz, 2019). Las tensiones entre usuarios rurales y urbanos están impulsadas principalmente por la urbanización; la conversión de tierras agrícolas en tierras urbanas y la compra de derechos agrícolas para alimentar la demanda de agua se percibe "bajo una luz negativa debido a la pérdida de la agricultura como forma de vida, independientemente de las implicaciones para el uso del agua" (Hargrove et al., 2020). Los usuarios agrícolas "a menudo se encuentran en competencia con los proveedores urbanos" y los sentimientos se ven exacerbados por las diferencias de poder (las ciudades pueden permitirse bombas de agua subterránea y opciones de desalinización más caras) (Hargrove et al., 2020). Los factores combinados de urbanización e intensificación de las prácticas agrícolas aceleran el agotamiento de las aguas subterráneas (Hargrove et al., 2020).

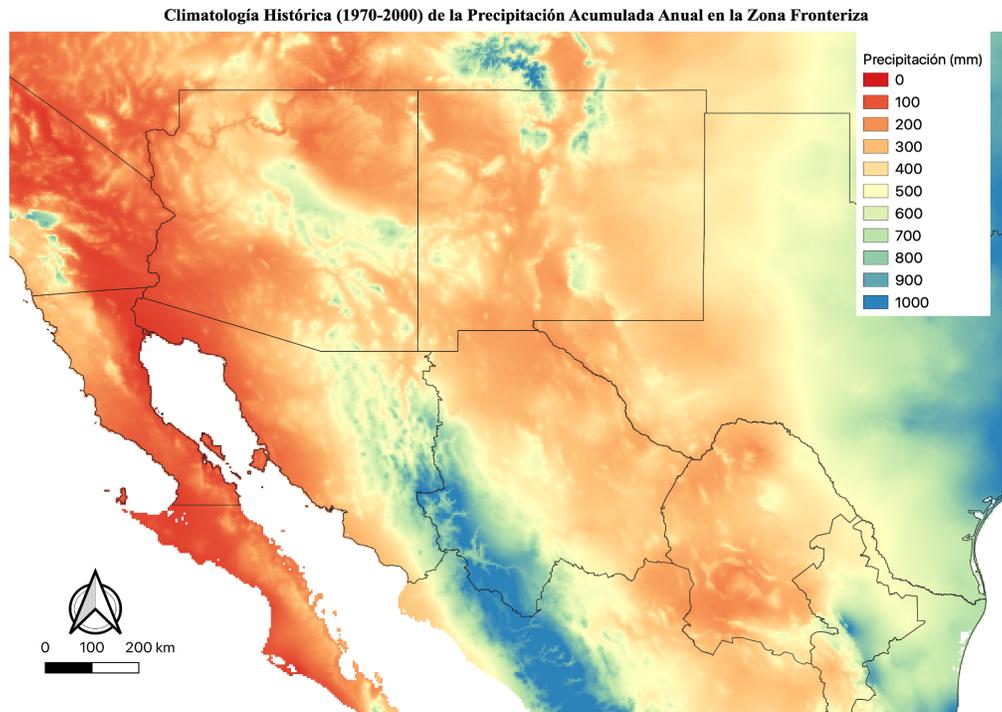
Otra preocupación en las zonas rurales es el acceso al agua en las *colonias* y asentamientos humanos informales. En las ciudades fronterizas, más del 98% de los hogares tienen acceso a servicios de agua potable y aguas residuales municipales, pero cientos de miles de personas en asentamientos informales carecen de servicios básicos (Pan American Health Organization, 2012). En 2010, la Organización Panamericana de la Salud estimó que "en los seis condados fronterizos más poblados de Texas con *colonias*, había 519 colonias que albergaban aproximadamente a 126,000 residentes que carecían de algunos servicios básicos y otras 400 *colonias* con aproximadamente 50,000 residentes que carecían de todos los servicios básicos" (Pan American Health Organization, 2012, p. 702). Los residentes de las *colonias* tienden a ser de bajos ingresos y "la inseguridad hídrica en las colonias surge frecuentemente de los procesos binacionales de sobreexplotación de las aguas subterráneas de los acuíferos transfronterizos, que no se gestionan en virtud de tratados internacionales" (Schur, 2017, p. 31). Además, se ha señalado que "la exposición desigual de los hogares a la contaminación del agua está impulsada por las asimetrías de los recursos financieros y el capital social" (Schur, 2017, p. 31). El concepto de justicia ambiental está en gran medida ausente en la literatura en torno al uso de acuíferos transfronterizos. Debería hacerse más hincapié en comprender cómo las desigualdades sociales afectan a la sostenibilidad y la gobernanza de las aguas subterráneas. En particular, las autoridades de México y Estados Unidos deberían invertir en programas que integren la gestión de las aguas subterráneas con los objetivos de desarrollo sostenible.

## 4. El cambio climático y el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco

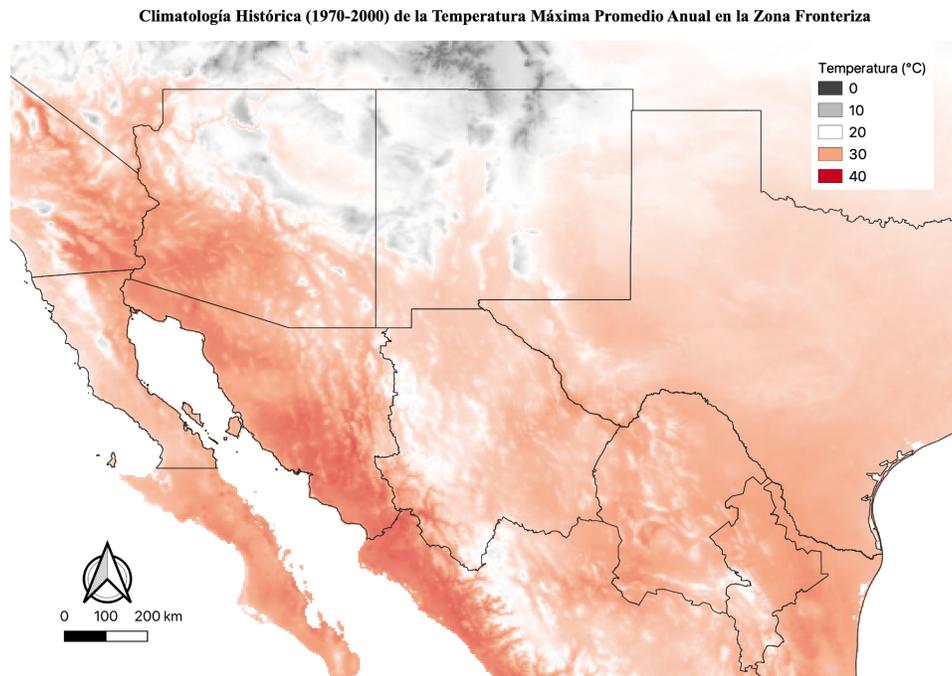
Como se mencionó en la presentación de la estructura para la tesis, este cuarto capítulo se dedicó a la modelación de cambio climáticos que se puede integrar al proceso de toma de decisiones para acuíferos compartidos a través de la examinación de cambios en variables climáticas que influyen en el uso de aguas subterráneas. La meta de este capítulo es sintetizar los resultados de cambios en el clima según un conjunto de modelos y usar estos resultados para (i) estimar de manera preliminar la relación entre cambios en las variables climáticas y el agua subterráneas de acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco y (ii) mostrar como la combinación de la modelación climática y metodologías de la política pública puede ser una herramienta para tomadores de decisiones.

### 4.1 La vista general de los cambios relacionados con el cambio climático en la zona fronteriza

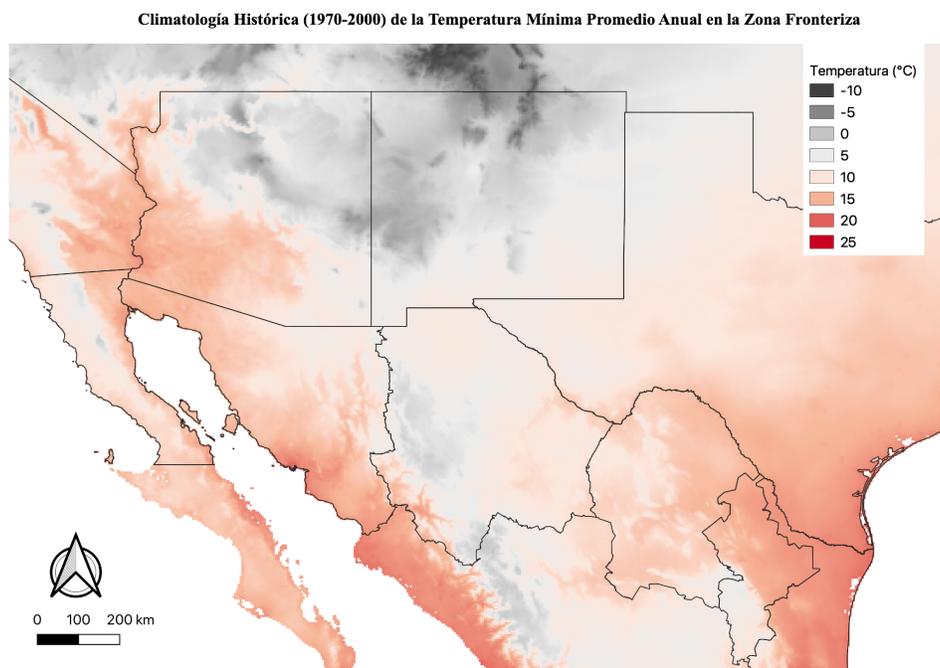
La zona fronteriza es una región ecológicamente y climatológicamente diversa. Las Figuras 28-30 muestran la climatología histórica para la zona fronteriza. La diversidad en la climatología de la región significa que los impactos de los cambios en el clima serán desiguales y distintos.



**Figura 28** La climatología histórica (1970-2000) de la precipitación acumulada anual. Datos de WorldClim (2020a). (Elaboración propia).



**Figura 29** La climatología histórica (1970-2000) de la temperatura máxima promedio anual. Datos de WorldClim (2020a). (Elaboración propia).



**Figura 30** La climatología histórica (1970-2000) de la temperatura mínima promedio anual. Datos de WorldClim (2020a). (Elaboración propia).

En esta región, hay dos cuencas importantes—la del Río Colorado y la del Río Grande/Bravo—estuarios, montañas, humedales, zonas marinas, y tres desiertos significativos (Wilder et al., 2013). Existen más de 6,500 especies de plantas y animales cuyos territorios naturales abarcan los dos lados de la frontera (Eriksson y Taylor, n.d.; USEPA, 2011). La parte oeste de la frontera (que viene desde Paso del Norte a Tijuana) está sujeto a variabilidad alta interanual y multi decenal de las precipitaciones (Wilder et al., 2013).

Como parte de la serie técnica de la Evaluación Nacional del Clima del 2013, la Alianza Climática del Suroeste de los Estados Unidos publicó sus hallazgos sobre los impactos del cambio climático en esta región; se incluyó los impactos para la zona fronteriza compartida entre México y los Estados Unidos (Wilder et al., 2013). Se destacaron que en esta región:

1. El cambio climático resultará en impactos desiguales debido a la distribución desigual del desarrollo económico y la diversidad cultural e institucional;
2. El cambio climático amenaza a los ecosistemas de humedales sensibles;
3. Los cambios proyectados pondrán presión adicional en fuentes hídricas ya estresadas;
4. Los impactos en cascada del estrés hídrico impactarán a la calidad de agua y el uso de agua para la energía;
5. Asimetrías en la colección de información crea retos para la cooperación y colaboración;
- y
6. Asimetrías y la fragmentación institucional crea complejidad y complica la colaboración.

Cabe señalar que la escasez de datos y la falta de métodos para compartir datos dificultan la validación de modelos climáticos en escalas más finas (Wilder et al., 2013). Además, científicos de los Estados Unidos y de México han utilizado diferentes conjuntos de modelos del IPCC, diferentes métodos de *downscaling*, diferentes períodos de tiempo para proyecciones futuras y diferentes períodos de tiempo para la calculación histórica de la climatología (Wilder et al., 2013).

En la siguiente tabla se resumen los cambios previstos en la región climática comunicados en la 3ª y 4ª Evaluación Nacional del Clima (USGCRP 2018; USGCRP, 2013):

Variable climática	Cambios esperados
Temperatura	<p>Aumento en temperaturas con 2°C hasta 6°C de calentamiento para áreas en el interior</p> <p>La magnitud de cambio en la temperatura es la mayor en la temporada del verano con un calentamiento de 3°C hasta 4°C</p> <p>Las zonas cercanas a la frontera podrían tener hasta 45 días más al año con temperaturas máximas de 32 °C o más</p> <p>Un aumento en las temperaturas nocturnas</p> <p>Un aumento de las temperaturas primaverales que provoca una disminución de los caudales de los ríos y arroyos alimentados por el manto de nieve</p>
Precipitación	<p>Una continuación del alto grado de variabilidad de las precipitaciones anuales</p> <p>Una disminución de la precipitación en la temporada de la primavera</p> <p>Un aumento en la dificultad de crear modelos de la precipitación futura debido a altos niveles de variabilidad</p> <p>En el peor de casos, se estima una disminución del 20% en la precipitación anual</p> <p>Un aumento en los impactos de inundaciones severas</p>
Sequía	<p>La previsión de temperaturas más cálidas aumenta la probabilidad de megasequías decenales o multidecadales</p> <p>Disminuciones en los caudales del Río Bravo y Río Colorado en tiempos de sequía extrema</p>

	Pérdidas de la biodiversidad
--	------------------------------

**Tabla 7** Los impactos esperados del cambio climático para la zona fronteriza (Garfin et al., 2018; GNEB, 2016; Wilder et al. 2013).

Mientras que el cambio climático traerá impactos significativos para los asentamientos humanos, los ecosistemas también van a experimentar consecuencias. El aumento de la sequía probablemente tendrá efectos negativos sobre los servicios específicos y ecosistémicos, como la biodiversidad y las pérdidas de productividad (Kloesel et al., 2018). Ecosistemas regionales ya están estresados debido a la sobre apropiación de recursos hídricos; conflictos futuros relacionados con la apropiación de agua podría resultar en aún menos agua para las funciones ecosistémicas (GNEB, 2016).

Es sumamente importante comprender la vulnerabilidad climática en la zona fronteriza debido a los diversos retos relacionados con las complejidades físicas e institucionales de la región. La zona fronteriza sufre de la exposición doble definida por O'Brien y Leichenko (2000) como la exposición a la globalización económica y el cambio climático. El crecimiento demográfico rápido y el desarrollo económico desigual impulsados por la integración económica entre los EUA y México son dos de los principales motores de la vulnerabilidad climática (Wilder et al., 2013; Wilder et al. 2010). La región tiene una importancia estratégica para las economías mexicana y estadounidense. Los estreses climáticos que provocan cambios económicos tienen el potencial de producir alteraciones internacionales dado el nivel de integración que tiene esta región en los mercados globales (Wilder et al., 2013). Otros factores que contribuyen a la vulnerabilidad incluyen las presiones de migración, la seguridad en la frontera, tasas altas de pobreza, el envejecimiento de la infraestructura, problemas significativos de la salud ambiental y problemas significativos de la justicia ambiental (Hargrove et al., 2013). Vásquez-León et al. (2003) hallaron que en municipios de Arizona y Sonora, clase socioeconómica y origen étnico influían en la capacidad de respuesta de los productores agrícolas ante fenómenos climáticos extremos.

La vulnerabilidad del sector hídrico es de preocupación alta. Ciudades en ambos lados de la frontera tienen infraestructura hídrica vieja e insuficiente para abordar amenazas climáticas como las sequías, olas de calor, incendios e inundaciones (GNEB, 2016; Wilder et al., 2013). La falta de inversión en la modernización de la infraestructura urbana e hídrica en el lado estadounidense está relacionada en parte con las tasas altas de pobreza región (un 30% de la

población en municipios fronterizos vive bajo de la línea de pobreza nacional) (GNEB, 2016). Mientras que hay inversión alta en la infraestructura para la seguridad, la infraestructura crítica que apoya las comunidades fronterizas no se da alta prioridad. Un número alto de ciudadanos en ambos lados no cuentan con acceso seguro a agua potable o con servicios adecuados para la disposición de aguas residuales (Wilder et al., 2013).

El costo de los proyectos de infraestructuras a gran escala y de las actualizaciones hace que la adaptación al clima sea prohibitiva para ciertas comunidades. La 4ª Evaluación Nacional (2018) del Programa Estados Unidos para la Investigación del Cambio Global (USGCRP) menciona cómo las plantas de desalinización han ayudado a El Paso a utilizar las aguas subterráneas salobres del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco para satisfacer la demanda en los años de sequía. Sin embargo, el reporte reconoce que la desalinización es un proceso intensivo desde el punto de vista financiero, lo que plantea dudas sobre la viabilidad de esta opción para las comunidades más pequeñas que dependen del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco.

Los impactos de la variabilidad climática para la calidad del agua son poco estudiados (Wilder et al., 2013). Un análisis del sector hídrico indica

[un] aumento de la exposición al riesgo para la agricultura, las economías locales y los ecosistemas, lo que podría tener graves repercusiones, como la reducción de las reservas naturales de agua, el aumento de la competencia entre las ciudades y la agricultura, y los posibles efectos negativos para los usuarios de la red, incluidas las colonias informales y las zonas ribereñas de gran valor que carecen de una fuente de agua específica. La infraestructura de agua-energía, especialmente durante los picos de demanda en verano y durante los periodos de sequía prolongados, será sensible al cambio climático. Las culturas agrícolas y ganaderas tradicionales pueden estar cada vez más expuestas a los impactos del cambio climático, lo que se traduce en reducciones de su producción. Por último, pueden producirse cambios fundamentales en los ecosistemas, como la reducción de la humedad del suelo y el aumento de las plagas y las enfermedades (Wilder et al., 2013, p. 369).

Una importante contribución a la caracterización de la vulnerabilidad climática en la región fronteriza son las evaluaciones realizadas por Hurd y Coonrod (2007, 2008) que encontraron las

siguientes vulnerabilidades específicas que se aplican a los usuarios del agua en la cuenca del Río Grande:

- Una reducción del caudal a largo plazo;
- Un aumento en los precios de agua (la demanda excede el suministro debido a la combinación de cambio climático y el crecimiento demográfico);
- Un desplazamiento del agua para la agricultura a agua para usos urbanos;
- Impactos económicos significativos relacionados a una reducción en la producción agrícola;
- Una reducción del caudal que amenaza hábitat crítico para especies endémicas y especies en peligro de extinción;
- Un aumento en las inundaciones extremas;
- Impactos negativos en la calidad de agua;
- Un aumento en la salinidad de aguas subterráneas;
- Un aumento en las tasas de evapotranspiración debido a un incremento en la demanda de agua para el riego; y
- La falta de integración de datos entre los organismos públicos en los dos lados de la frontera política.

El último punto se refiere a una importante vulnerabilidad exclusiva de la región fronteriza que está relacionada con la vulnerabilidad institucional inherente a la confluencia de múltiples y distintas estructuras institucionales. Como anotaron Wilder et al. (2013), la estructura descentralizada en los EUA y la estructura centralizada en México “complican la cooperación binacional y la planificación del agua en la frontera” (p. 359).

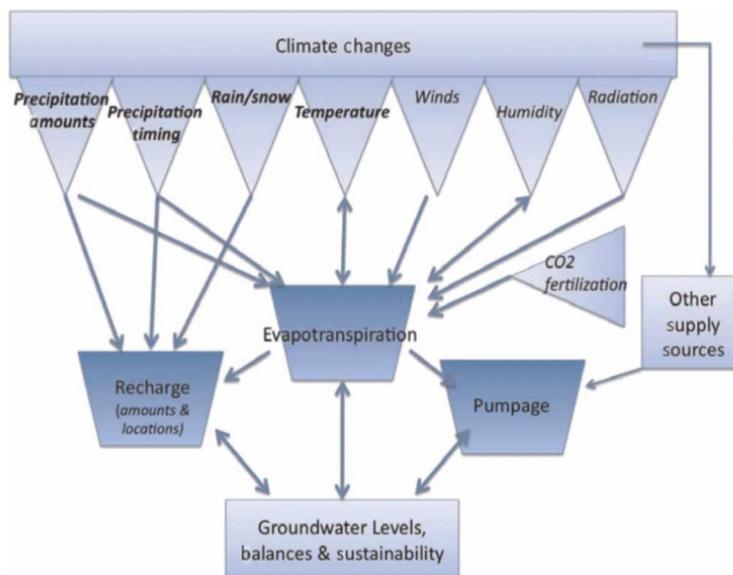
## 4.2 Cómo el cambio climático impactará los acuíferos

Como destacó Döll (2009), las aguas subterráneas son “un recurso importante para el abastecimiento de agua a los seres humanos, y es probable que sea aún más importante en las futuras condiciones climáticas” (p. 1). El agua subterránea tiene el potencial de aumentar la resiliencia ante el cambio y la variabilidad climática (Taylor et al., 2012). Además, es un recurso de alta importancia especialmente para la seguridad hídrica de comunidades rurales y de bajos ingresos (Taylor et al., 2012). El USGCRP destacó que en la frontera entre México y los EUA la importancia de las aguas subterráneas como recurso aumentará en un clima cambiante a medida que la intensificación de los extremos hidrológicos de las precipitaciones, la humedad del suelo y las aguas superficiales y las aguas superficiales, y a medida que los

suministros de superficiales, y a medida que los suministros de agua sobreasignadas (p. 1001).

Los impactos del cambio climático, especialmente los impactos y vulnerabilidades en el sector hídrico, afectarán la gestión y uso de agua en el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco. Aunque es reconocido que las extremas de precipitación y temperatura aumentarán con la intensificación del uso de sistemas hidráulicos, todavía es difícil caracterizar las interacciones entre el clima y el agua subterránea dado que sus mecanismos de interacción son poco estudiados (Earman y Dettinger, 2011; Taylor et al., 2012). Cambios en el clima impactan a las aguas subterráneas directamente a través de modificaciones en los patrones de recarga e indirectamente a través de cambios en otras áreas (por ejemplo, el uso de suelo) que resultan en modificaciones en los patrones del uso de agua (Taylor et al., 2012). Kumar (2012) halló que la disminución en la calidad de aguas subterráneas debido a cambios en los patrones de precipitación y uso de suelos. La calidad de agua subterránea ya es un obstáculo grande para la gestión de estos recursos (que fue uno de los resultados principales encontrados en el capítulo 1).

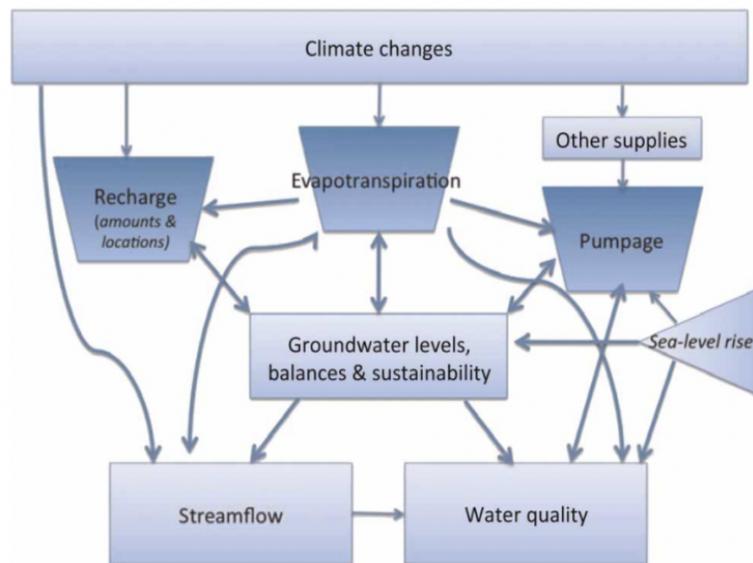
La Figura 31, que viene del estudio de Earman y Dettinger (2011), muestra la multitud de interacciones posibles entre cambios en el clima y el agua subterránea.



**Figura 31** Diagrama conceptual que muestra las posibles relaciones entre el cambio climático y la recarga de acuíferos propuesto por Earman y Dettinger (2011).

El cambio climático también podría afectar el agua subterránea a través de cambios en aguas superficiales. Debido a la relación no lineal entre el agua subterránea y el agua superficial,

los cambios en las aguas superficiales no se corresponden necesariamente con los cambios en las aguas subterráneas, o pueden provocar retrasos u otros cambios inesperados (Earman y Dettinger, 2011; Sheng, 2013). Taylor et al. (2012) anotaron que la combinación de un aumento en la extracción de aguas subterráneas y una reducción en aguas superficiales debido a la sequía puede producir efectos secundarios (como el hundimiento) que limitan el uso de agua subterránea como estrategia de adaptación climática. Los impactos no lineales en la relación entre aguas subterráneas y superficiales se atribuyen al complejo papel de las aguas subterráneas en el ciclo hidrológico (Earman y Dettinger, 2011). La Figura 32 muestra un diagrama conceptual que ilustra algunas de las formas en que los cambios en el ciclo hidrológico provocados por el cambio climático podrían afectar a la sostenibilidad de las aguas subterráneas.



**Figura 32** Diagrama conceptual que ilustra las relaciones principales entre el cambio climático y diferentes aspectos del ciclo hídrico (Earman y Dettinger, 2011).

En el caso del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco, Sheng (2013) identificó que el cambio climático impactará el acuífero de una manera directa—a través de cambios en tasas de recarga producidos por cambios en la precipitación—y de una manera indirecta—a través de cambios para el Río Bravo y otros cuerpos de agua superficial que tendrán impactos en cascada para el acuífero. Además, las repercusiones del cambio climático para el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco se producen en un complejo panorama institucional. Como describe Sheng (2013, p. 5)

la disponibilidad de agua no es una simple función de la cantidad y la calidad del agua en una cuenca hidrográfica o un sistema acuífero, sino que está limitada por las estructuras físicas, las leyes, los reglamentos y los factores socioeconómicos que controlan su demanda y uso.

El impacto de los cambios en precipitación, particularmente un aumento en el número y duración de sequías e inundaciones severas es difícil cuantificar para acuíferos en zonas áridas como el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco dado que

los niveles freáticos profundos en las cuencas aluviales áridas corresponden a zonas no saturadas de gran espesor que producen desfases de hasta mil años entre los cambios de las condiciones hidrológicas en la superficie del terreno y los subsiguientes cambios en la recarga de las aguas subterráneas subyacentes (Sheng, 2013, p. 18)

Aunque los cambios en la precipitación podrían resultar en impactos directos retrasados para el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco, variaciones en los patrones de precipitación podrían impactar el Río Bravo en una manera que disminuiría la recarga inducida el acuífero y aumentaría el bombeo (Sheng, 2013). Las sequías graves amenazan el suministro de agua al disminuir directamente su disponibilidad; aunque el aumento de las precipitaciones extremas y de las inundaciones puede parecer beneficioso en una cuenca con estrés hídrico, un aumento de las precipitaciones puede tener efectos igualmente perjudiciales para las aguas subterráneas (especialmente para la calidad general del agua), ya que las ciudades fronterizas tienen una infraestructura de aguas pluviales y residuales notoriamente deficiente (GNEB, 2016; USEPA, 2011; SEMARNAT, 2021).

### 4.3 La modelación de cambios en temperatura y precipitación en la zona del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco

La complejidad de los impactos para la zona fronteriza y sus acuíferos debido al cambio climático es un obstáculo gigantesco para la gestión de aguas subterráneas. Información confiable y específica sobre cambios en variables climáticas es integral para fomentar el uso sostenible del acuífero. La generación de conocimiento científico también contribuye al fortalecimiento de la relación transfronteriza (como fue anotado en el primer capítulo). Por ende, la siguiente sección evalúa impactos específicos para la zona donde está el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco utilizando los modelos más recientes de CMIP6.

Para evaluar los cambios posibles en la precipitación, temperatura máxima, temperatura media y la temperatura mínima en la zona del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco, datos del CMIP6 modelos CanESM5, CNRM-ESM2-1, GISS-E2-1-H, MIROC-ES2L fueron usados. Estos modelos son cuatro de los cuarenta que componen el CMIP6. Analizar los resultados de más de un modelo es crucial para comprender el abanico de futuros climáticos posibles. Las tendencias de los modelos sugieren que los modelos del CMIP6 tienen una mayor sensibilidad climática. La sensibilidad climática de equilibrio describe "el calentamiento esperado a largo plazo después de duplicar las concentraciones atmosféricas de CO<sub>2</sub>" y "es uno de los indicadores más importantes de la gravedad de los impactos del calentamiento futuro" (Hausfather, 2019). Hausfather (2019) señaló que a

tener un rango diverso de valores de [sensibilidad] en el CMIP6 no es necesariamente algo malo, ya que indica que los modeladores no están tomando decisiones para que sus resultados sean similares a los de otros grupos de modelización...Sin embargo, el hecho de que varios de los modelos disponibles hasta ahora tengan un[a sensibilidad] muy alto significa que el calentamiento futuro puede ser peor de lo que pensábamos, o que varios modelos climáticos destacados pueden estar equivocándose en cuanto a la sensibilidad climática, una cuestión que muchos científicos del clima se están centrando en resolver.

Los cuatro modelos elegidos para el presente proyecto tienen un rango de sensibilidades climáticas de equilibrio y, por tanto, proporcionan cuatro futuros climáticos distintos. Es importante que los responsables de la toma de decisiones tengan acceso a los resultados de varios modelos distintos, ya que en cambio climático la incertidumbre epistémica domina.

Se descargaron los datos para los cuatro modelos de WorldClim<sup>10</sup>, un repositorio de acceso abierto. Hay cuatro escenarios disponibles (SSP1-RCP2.6, SSP2-RCP4.5, SSP3-RCP7.0, SSP5-RCP8.5) por cuatro horizontes de tiempo (2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100). Los SSPs<sup>11</sup> son escenarios que constan "de un conjunto de líneas de base, que proporciona una descripción de la evolución futura en ausencia de nuevas políticas climáticas más allá de las actuales, así como de escenarios de mitigación que exploran las implicaciones de las políticas de mitigación del cambio climático" (Riahi et al., 2017, p. 155). Los RCPs<sup>12</sup> son escenarios

---

<sup>10</sup> <https://www.worldclim.org/data/index.html>

<sup>11</sup> *Shared Socio-economic Pathways*

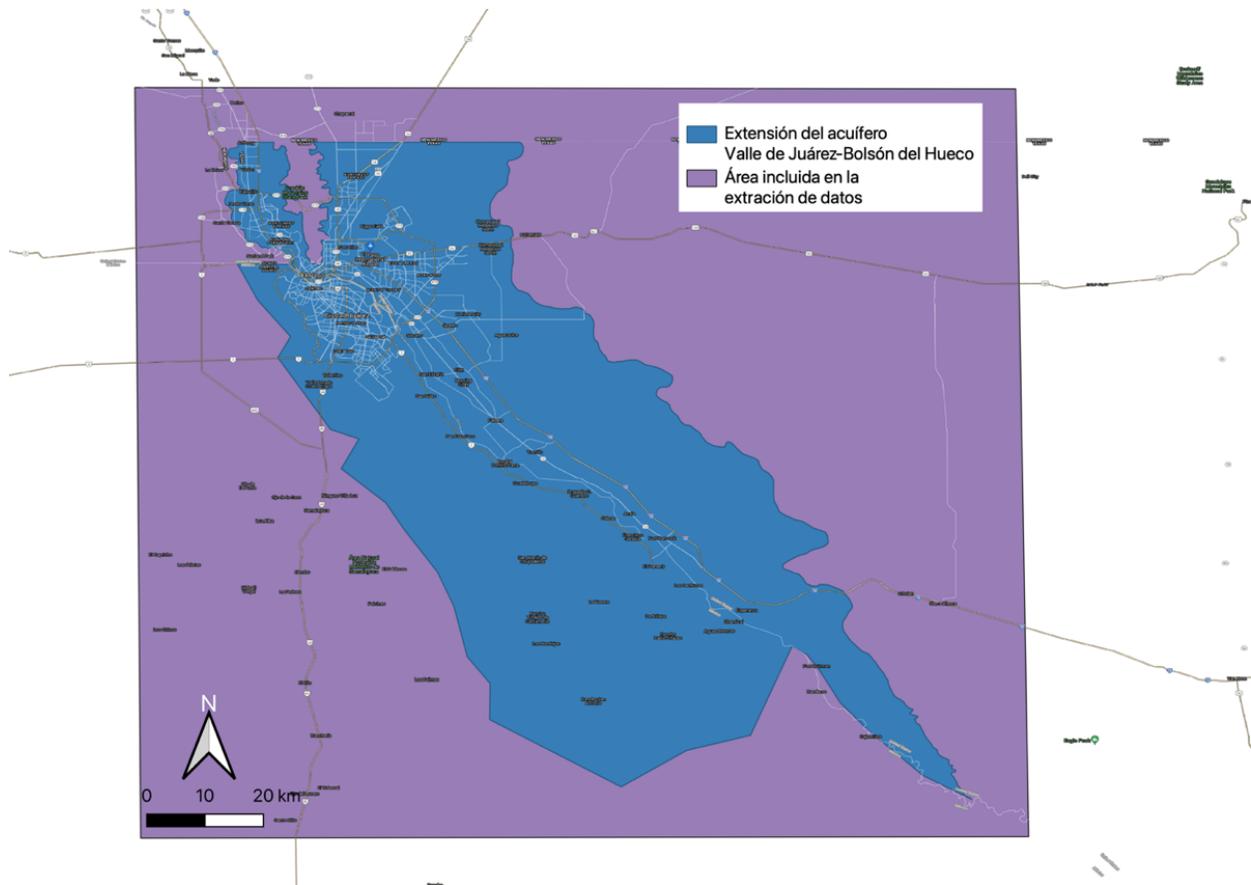
<sup>12</sup> *Representative Concentration Pathways*

“utilizados para realizar proyecciones basadas en estos factores, describen cuatro trayectorias diferentes en el siglo XXI de emisiones de [gases de efecto invernadero] y concentraciones atmosféricas, emisiones de contaminantes atmosféricos y uso del suelo” (IPCC, 2014, p. 8). Por lo tanto, los datos descargados de WorldClim describen escenarios futuros que toman en cuenta cambios físicos (RCPs) y socioeconómicos (SSPs).

Para determinar los impactos posibles del cambio climático para la zona donde está el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco, se buscó modelar la evolución de la temperatura máxima, media y mínima y la precipitación a lo largo del siglo XXI. Se siguió la metodología desarrollada por Nava Assad (2020) para extraer información, utilizando QGIS, de los modelos y crear líneas de tiempo y mapas que muestran los cambios en las variables de interés. Se utilizó un archivo GeoTIFF del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco disponible en el repositorio ISARM como base para extraer los datos de los modelos. Por lo tanto, los resultados se dirigen específicamente a la zona en la que se encuentra el acuífero y no toman en cuenta los impactos en cascada, como los cambios en la cuenca más amplia del Río Bravo, que tienen el potencial de afectar al patrón de uso de los acuíferos.

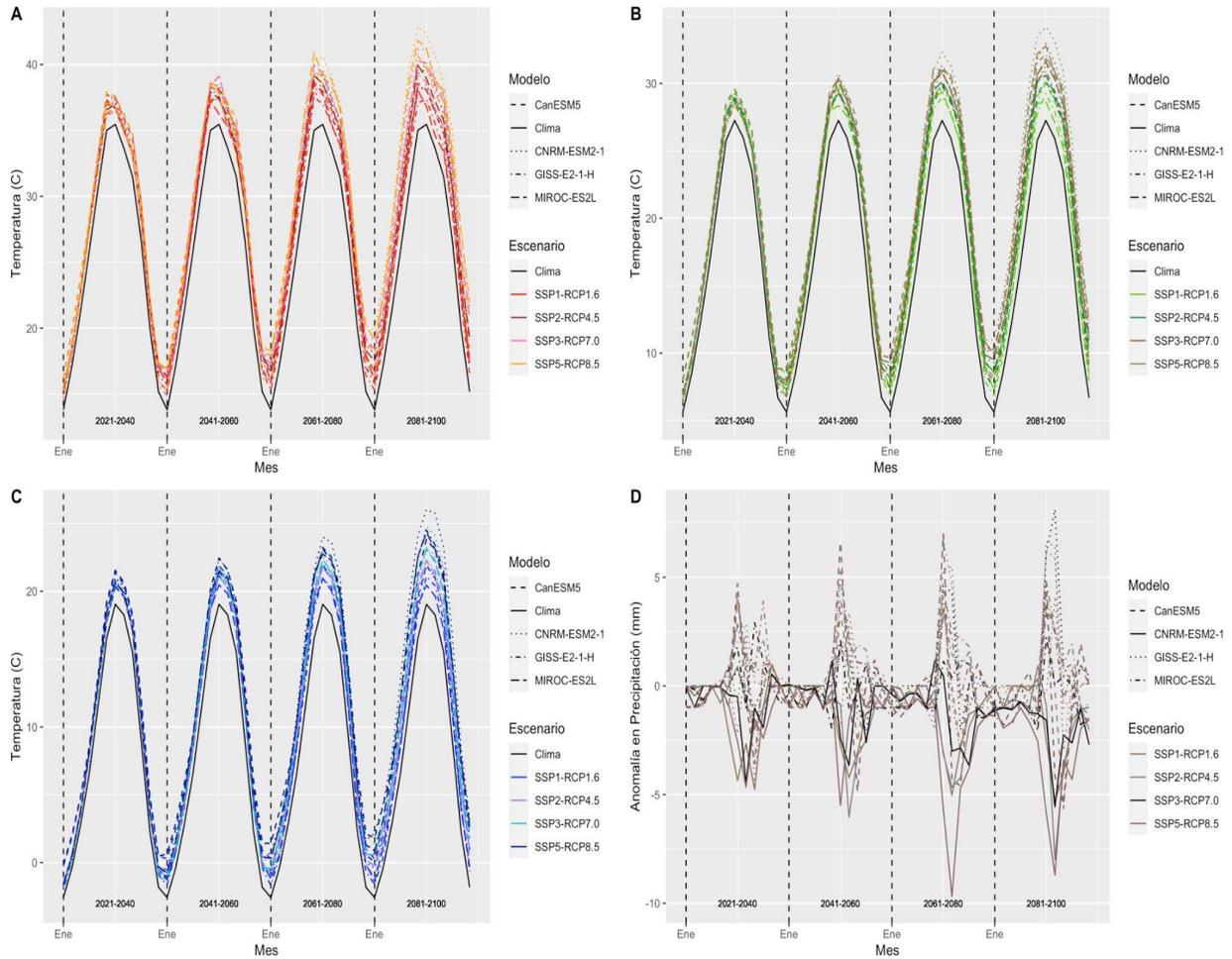
#### 4.3.1 Resultados

Para determinar los cambios locales en los variables de interés, fue necesario definir un área para la extracción de los datos. La Figura 33 muestra la extensión de la zona para la extracción de datos en comparación con la ubicación del acuífero.



**Figura 33** Extensión geográfica del área usada en la extracción de los datos climáticos (Elaboración propia).

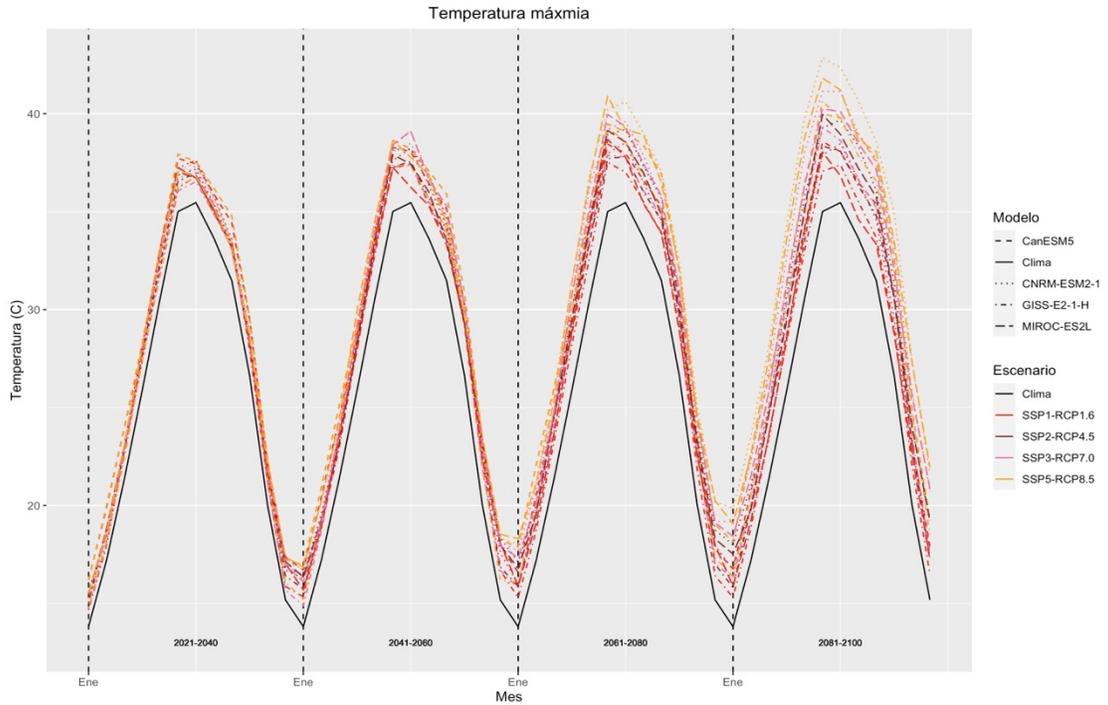
La Figura 34 muestra los resultados de la modelación de (A) cambios absolutos en la temperatura máxima, (B) cambios absolutos en la temperatura media, (C) cambios absolutos en la temperatura mínima y (D) anomalías en la precipitación.



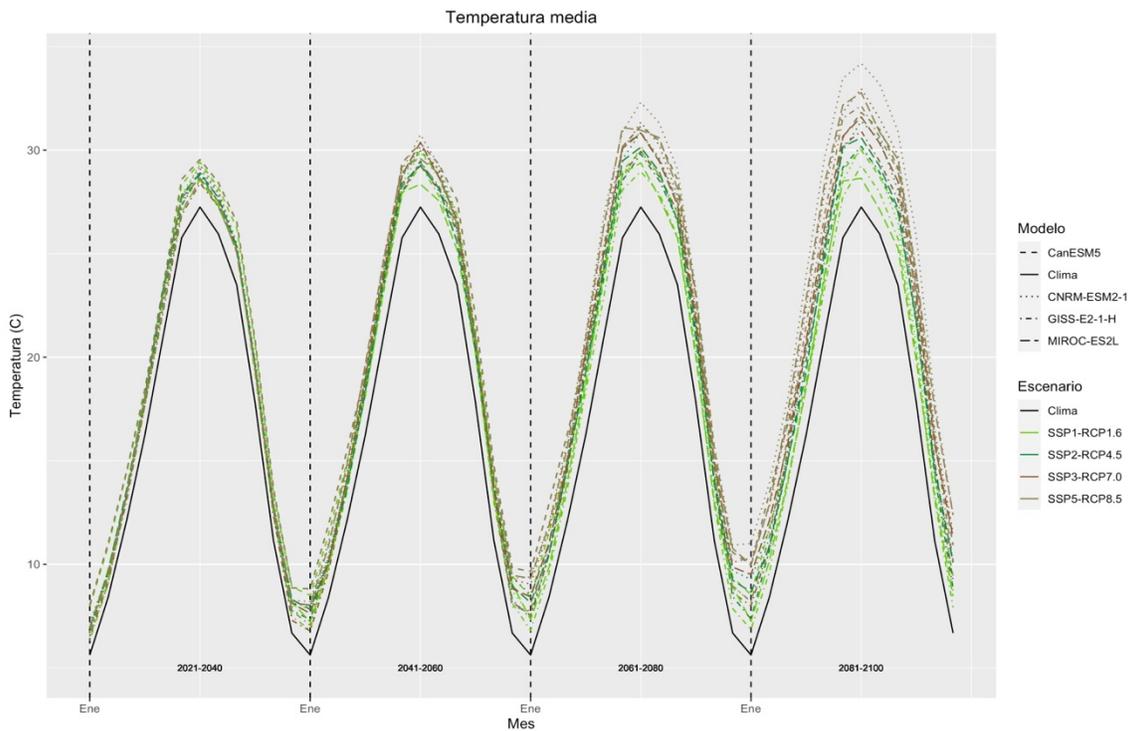
**Figura 34** Resultados de la modelación de impactos. (A) Cambios absolutos en temperatura máxima. (B) Cambios absolutos en temperatura media. (C) Cambios absolutos en temperatura mínima. (D) Anomalías en precipitación (Elaboración propia).

#### 4.3.1.1 Temperatura

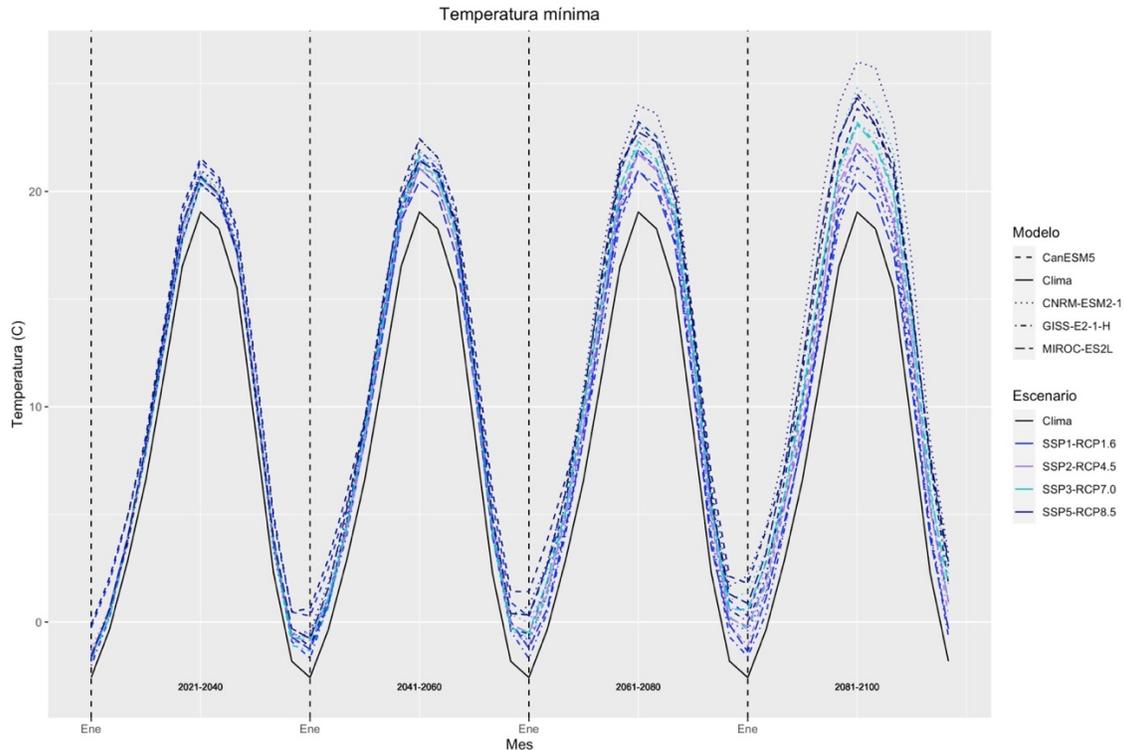
Las Figuras 35-37 muestran los cambios en temperatura. Las gráficas están incluidas de nuevo de manera individual para mostrar con más detalle las diferencias entre modelos y escenarios.



**Figura 35** Cambios en la temperatura máxima en la zona del acuífero a lo largo del siglo XXI (Elaboración propia).



**Figura 36** Cambios en la temperatura media en la zona del acuífero a lo largo del siglo XXI (Elaboración propia).

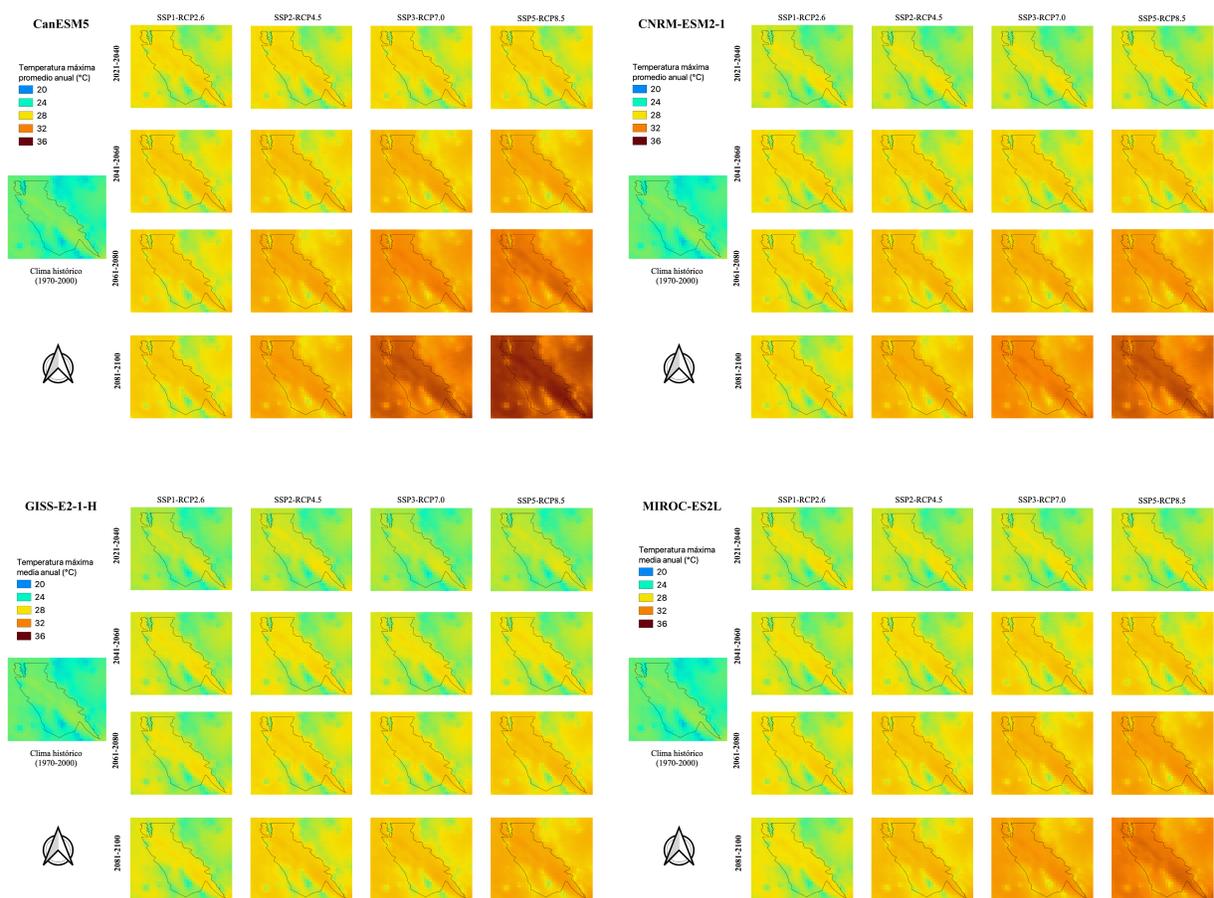


**Figura 37** Cambios en la temperatura mínima en la zona del acuífero a lo largo del siglo XXI (Elaboración propia).

Aunque el calentamiento es más extremo en el modelo CanESM5, todos los modelos muestran un aumento alarmante en la temperatura máxima, media y mínima. En todos los modelos, puede haber aumentos entre 2.6°C y 6.8°C en la temperatura máxima, entre 2.5°C y 6.5°C en la temperatura media y entre 2.2°C y 6.2°C en la temperatura mínima para el fin del siglo. Las Figuras 30-32 muestran la distribución espacial de la temperatura máxima promedio anual, media promedio anual y mínima promedio anual en la región situada por encima del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Huevo.

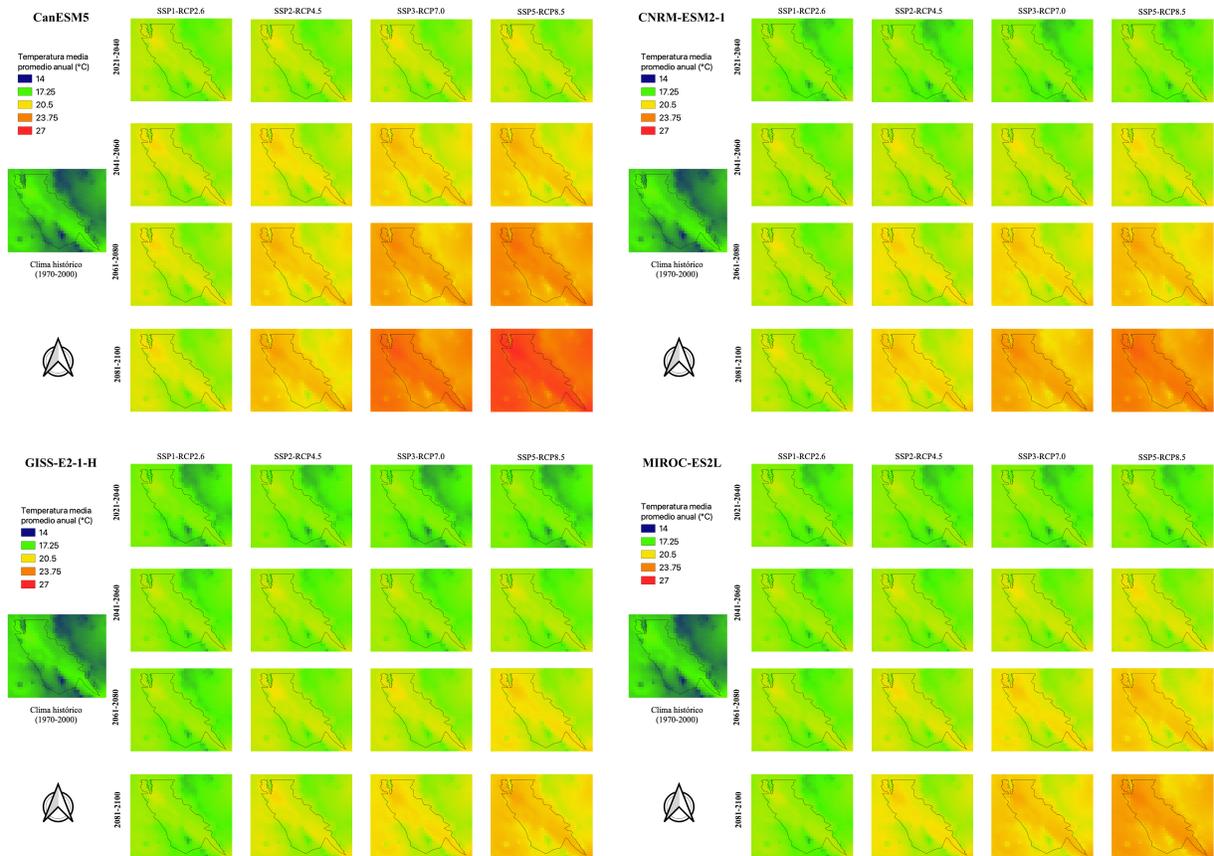
Es importante anotar que, en ciertas partes de la zona, los aumentos en temperatura son arriba del promedio en toda la zona de análisis. De los mapas del clima histórico, se desprende que la zona de Ciudad Juárez-El Paso y sus alrededores, así como la zona de las riberas del Río Bravo son, en promedio, más calurosas que otras zonas (como la sección sur del acuífero). Estas áreas tienen una mayor concentración de asentamientos humanos y también son las más cercanas a la frontera internacional. Los mapas generados a partir de la modelación climática también indican que la magnitud del aumento de la temperatura será mayor en estas zonas. Por ejemplo, mientras que el aumento de la temperatura media promedio anual para toda la región es como máximo de 6.5°C, las zonas más cálidas podrían experimentar aumentos de casi 10°C en la

temperatura media<sup>13</sup>. Estas variaciones espaciales de los cambios en temperatura sugieren que un análisis más detallado, que combine los resultados espaciales de la modelación climática con los mapas de uso del suelo, podría ilustrar los vínculos entre el cambio climático y la vulnerabilidad a cambios generados por decisiones humanas. Las múltiples formas en que los cambios de temperatura repercuten en el uso y la disponibilidad del agua ponen de manifiesto la importancia de un análisis granular, especialmente cuando se trata de desarrollar estrategias a largo plazo para el uso del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco.

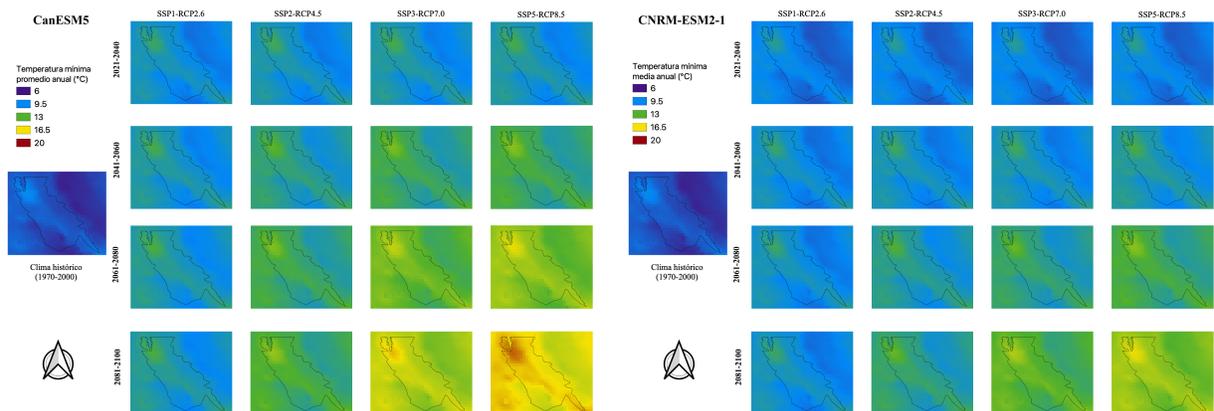


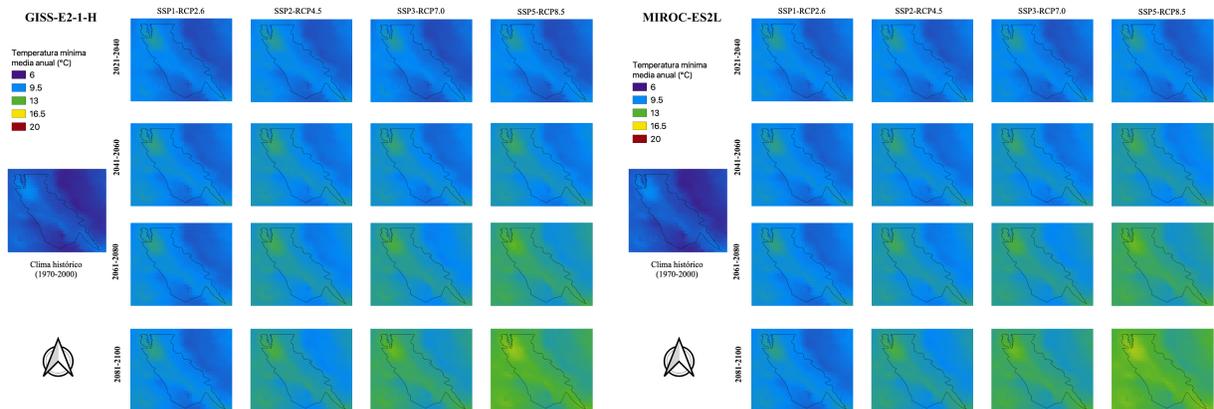
**Figura 38** Temperatura máxima promedio anual para la zona donde se ubica el acuífero. Los modelos de izquierda a derecha, arriba hacia abajo son: CanESM5, CNRM-ESM2-1, GISS-E2-1-H, MIROC-ES2L. Las columnas de cada modelo representan los escenarios; desde izquierda hacia derecha son SSP1-RCP2.6, SSP2-RCP4.5, SSP3-RCP7.0, SSP5-RCP8.5. Las líneas de cada modelo representan los horizontes de tiempo. Desde arriba hacia abajo son 2011-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100 (Elaboración propia).

<sup>13</sup>Los dos valores de la temperatura media anual proceden del SSP5-RCP8.5 para 2081-2100 según las estimaciones del CanESM5, el modelo con los mayores aumentos de temperatura previstos.



**Figura 39** Temperatura media promedio anual para la zona donde se ubica el acuífero. Los modelos de izquierda hacia derecha, arriba hacia abajo son: CanESM5, CNRM-ESM2-1, GISS-E2-1-H, MIROC-ES2L. Las columnas de cada modelo representan los escenarios; desde izquierda hacia derecha son SSP1-RCP2.6, SSP2-RCP4.5, SSP3-RCP7.0, SSP5-RCP8.5. Las líneas de cada modelo representan los horizontes de tiempo. Desde arriba hacia abajo son 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100 (Elaboración propia).





**Figura 40** Temperatura mínima promedio anual para la zona donde se ubica el acuífero. Los modelos de izquierda hacia derecha, arriba hacia abajo son: CanESM5, CNRM-ESM2-1, GISS-E2-1-H, MIROC-ES2L. Las columnas de cada modelo representan los escenarios; desde izquierda hacia derecha son SSP1-RCP2.6, SSP2-RCP4.5, SSP3-RCP7.0, SSP5-RCP8.5. Las líneas de cada modelo representan los horizontes de tiempo. Desde arriba hacia abajo son 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100 (Elaboración propia).

Las diferencias en la modelación de cada modelo son más pronunciadas con el tiempo porque son dependientes del tiempo y los escenarios de emisiones. Es importante tener en cuenta que los modelos diverjan, lo que subraya la importancia de comparar conjuntos de modelos y no basarse en los resultados de modelos individuales. En el último reporte del IPCC (2021), se determinó que la temperatura media global puede aumentar por  $5.7^{\circ}\text{C}$  en 2100 en comparación con niveles preindustriales para el escenario de altas emisiones. La cuarta Evaluación Nacional del Clima del USGCRP (2018) determinó que la región que contiene la parte occidental de la frontera entre México y los EUA podría experimentar un aumento de  $4.8^{\circ}\text{C}$  para 2100 bajo los escenarios RCP8.5. Aunque no es posible comparar empíricamente los cambios a escala mundial o incluso regional con los modelados para el Valle de Juárez-Bolsón del Hueco, la magnitud absoluta de estos cambios proyectados puede arrojar luz sobre la gravedad del calentamiento previsto por los modelos presentados anteriormente. En la zona del Valle de Juárez-Bolsón del Hueco, la temperatura media anual podría aumentar  $6.5^{\circ}\text{C}$  según el SSP5-RCP8.5 de presente a 2100.

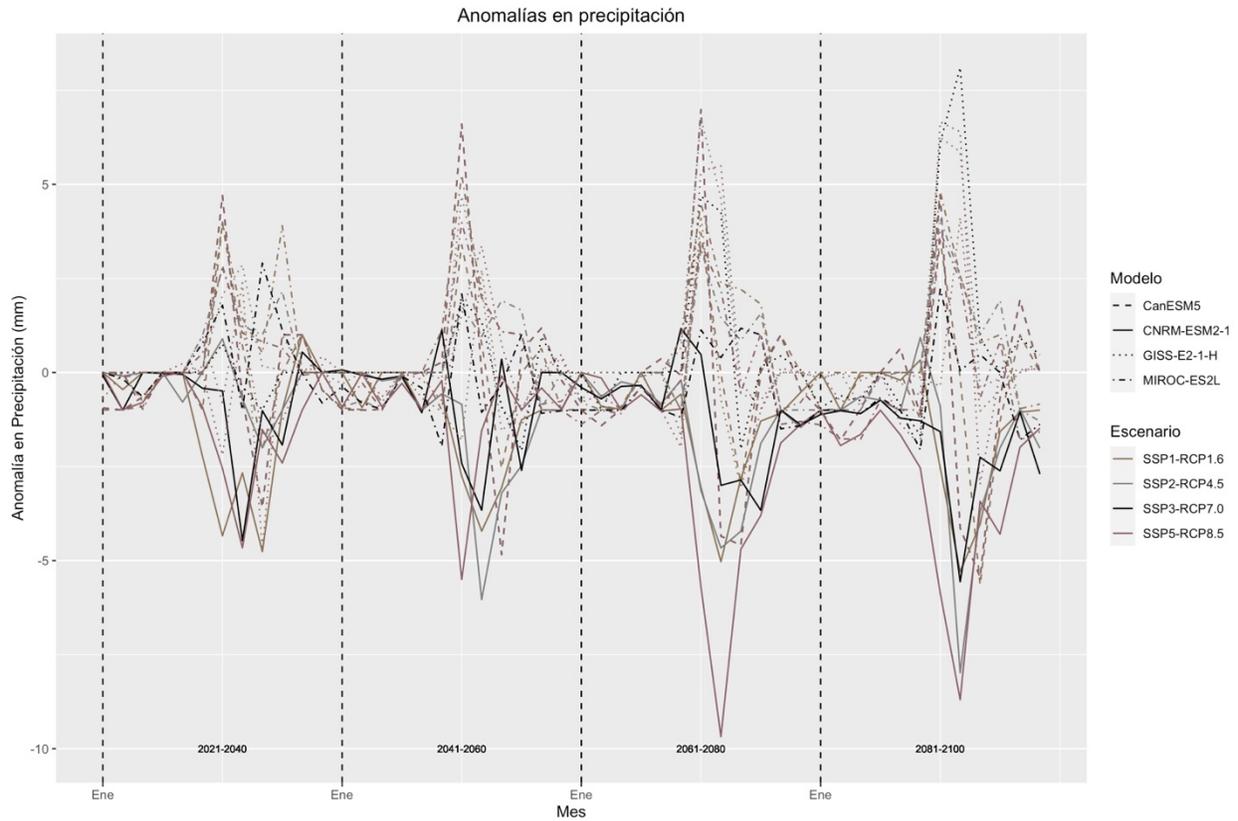
Los aumentos en temperatura son más pronunciados durante el pleno verano (junio, julio, agosto) que es históricamente la época más calurosa para la zona. Según el escenario de bajas emisiones con medidas de mitigación y adaptación (SSP1-RCP2.6), aumentos en temperatura durante el pleno verano podría atenuarse a solo  $2^{\circ}\text{C}$  en calentamiento en comparación con el promedio histórico. En el escenario de emisiones elevadas (SSP5-RCP8.5), las temperaturas durante el pleno verano podrían aumentar hasta  $7^{\circ}\text{C}$ . Los resultados son coherentes con la

literatura publicada que ha advertido sobre el aumento de las temperaturas, especialmente durante los meses de verano (GNEB, 2016). Un aumento de este tamaño resultará, sin duda, en consecuencias importantes para los sectores del agua y energía.

Para el caso del acuífero Valle de Juárez-Bolsón, es de alta importancia tomar en cuenta como el cambio climático impactará ciudades de la zona fronteriza. Estudios hechos en Mexicali hallaron el vínculo entre aumentos extremos en la temperatura mínima y cambios en el uso del suelo, particularmente los cambios relacionados con la urbanización (Casillas-Higuera et al., 2013). Dimkic (2020) halló que en Norteamérica en general, un aumento de 1°C en la temperatura promedio anual en ciudades produce un aumento del 3-5% en el consumo de agua. Dado que las ciudades de Ciudad Juárez y El Paso son los grandes usuarios del agua subterránea, es integral considerar como los aumentos en la temperatura producirá un incremento en la extracción del agua del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco. Además, la gestión de agua subterránea beneficiaría de más investigaciones sobre las conexiones entre temperatura, el uso municipal, la urbanización y el crecimiento demográfico específicamente en la zona fronteriza.

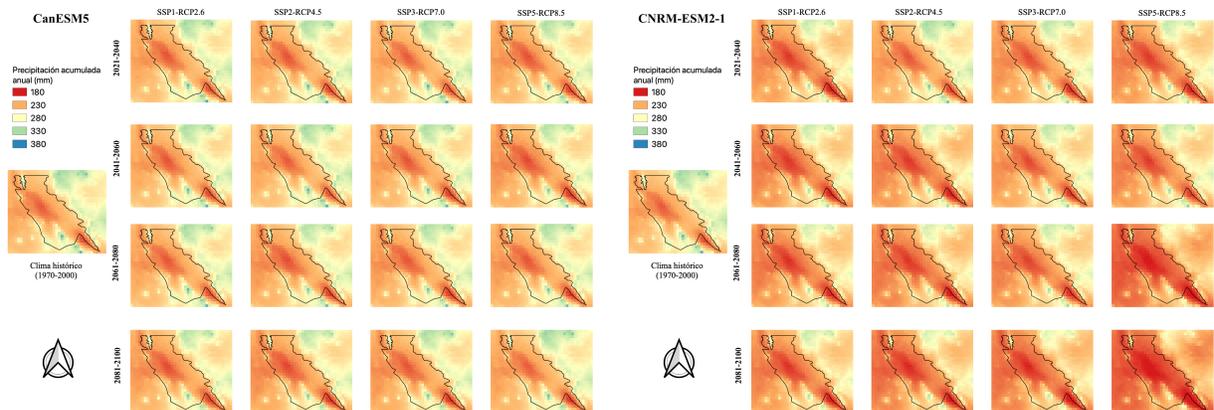
#### 4.3.1.2 Precipitación

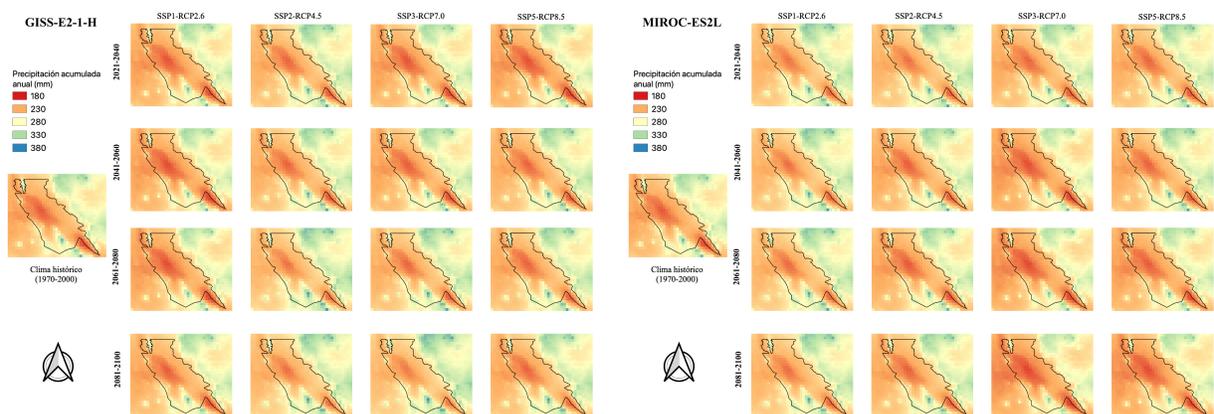
La Figura 41 muestra las anomalías en precipitación (i.e. desviaciones de las precipitaciones anuales con respecto al clima histórico 1970-2000). La gráfica está incluida de nuevo de manera individual para mostrar con más detalle las diferencias entre modelos y escenarios.



**Figura 41** Anomalías en precipitación (comparado con el clima histórico 1970-2000) en la zona del acuífero a lo largo del siglo XXI (Elaboración propia).

La Figura 42 muestra diferencias entre modelos en la distribución espacial de precipitación acumulada anual a lo largo del siglo.





**Figura 42** La precipitación acumulada anual por los cuatro modelos. Los modelos de izquierda hacia derecha, arriba hacia abajo son: CanESM5, CNRM-ESM2-1, GISS-E2-1-H, MIROC-ES2L. Las columnas de cada modelo representan los escenarios; desde izquierda hacia derecha son SSP1-RCP2.6, SSP2-RCP4.5, SSP3-RCP7.0, SSP5-RCP8.5. Las líneas de cada modelo representan los horizontes de tiempo. Desde arriba hacia abajo son 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100 (Elaboración propia).

Los mapas muestran precipitación acumulada anual y, por lo tanto, no capturan la variación interanual en precipitaciones. El modelo CNRM-ESM2-1 modela una disminución notable en la precipitación acumulada anual bajo el escenario SSP5-RCP8.5 en comparación con el mismo escenario según los otros modelos. Pero en general, los cambios en las precipitaciones son más difíciles de resumir, dado el alto nivel de variabilidad entre los modelos. Todos los modelos proyectan cambios en el momento y la cantidad de las precipitaciones, pero los detalles de estos cambios dependen completamente del modelo que se analice. El GISS-E2-1-H no varía mucho en su predicción del calendario de precipitaciones estacionales durante el próximo siglo, pero sí proyecta que las precipitaciones extremas (inundaciones y sequías) serán más intensas con el tiempo. El CNRM-ESM2-1 proyecta una variabilidad en el tiempo y la cantidad de las precipitaciones, pero lo más notable es que proyecta una disminución drástica de las precipitaciones en todos los escenarios para la última mitad del siglo XXI.

Las diferencias en la forma en que los modelos proyectan los cambios en las precipitaciones confirman observaciones sobre la región fronteriza entre Estados Unidos y México publicadas anteriormente. Las publicaciones archivadas del IPCC señalan que históricamente ha habido poco acuerdo entre las diferentes predicciones sobre los cambios en las precipitaciones. Aunque los modelos climáticos han progresado sustancialmente a lo largo de los años, es importante tener en cuenta cómo la variabilidad entre modelos afecta a la capacidad de tomar decisiones de adaptación a largo plazo. Como se ha mencionado anteriormente en este capítulo, la gran variabilidad de las precipitaciones presente en el clima histórico indica que

seguirá siendo un reto crear modelos que predigan con precisión los cambios en las precipitaciones (Wilder et al., 2013).

Información relacionada con cambios posibles en variables climáticas es una herramienta crítica para la toma de decisiones. Los modelos climáticos locales "animan a los responsables de la toma de decisiones a enfocar el cambio climático de forma más matizada" (Heaphy, 2015, p. 53). Weaver et al. (2012) destacaron que la incorporación de modelos climáticos en la toma de decisiones facilita en la generación de escenarios de desarrollo, proporciona reflexiones sobre el comportamiento complejo de sistemas y apoya el pensamiento crítico. Es crucial continuar el proceso de entender cómo la información generada en la modelación de cambios climáticos contribuye a la gestión de recursos hídricos en la zona fronteriza. Deben tomarse más medidas para hacer operativas las conclusiones aquí descritas, a fin de que sean útiles para futuros esfuerzos de cooperación binacional.

## 5. Un modelo de sistema dinámico (SD) para el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco

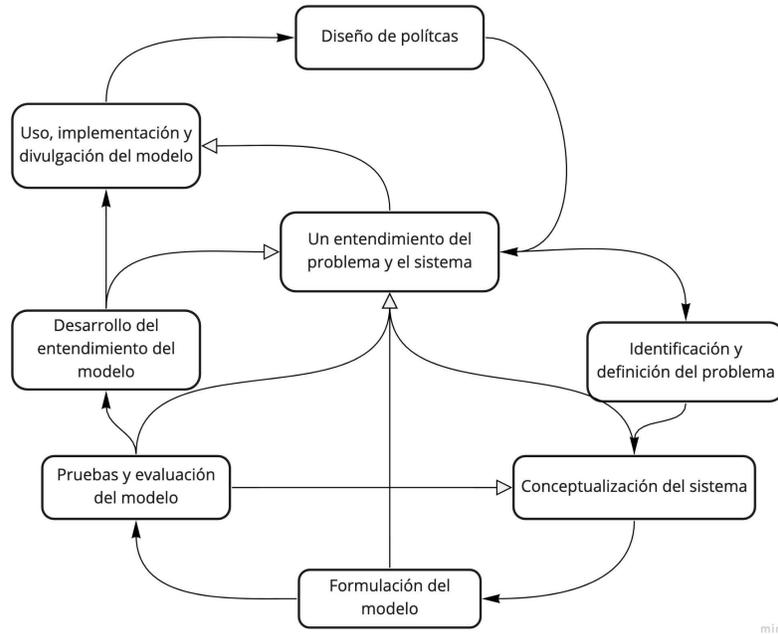
Tomando en cuenta el contexto físico y sociopolítico del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco, este capítulo se enfoca en la creación de un modelo de sistema dinámico (SD) para modelar el uso del acuífero a largo plazo. Las siguientes secciones de este capítulo presenta el modelo SD para el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco empezando con la articulación de la hipótesis dinámica. Luego, se presenta la estructura de suministro y flujo con la información necesaria para fundamentar sus relaciones matemáticas. Se discuten los resultados del modelo comparando su función con el uso pasado del acuífero y mostrando como el uso evoluciona tomando en cuenta los cambios en el clima identificada en el cuarto capítulo. Por último, se discute los límites del modelo y las oportunidades para mejorar su función.

### 5.1 Un modelo para el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco

El proceso de crear e implementar un modelo usando SD está compuesto por las siguientes cinco etapas generales (Sterman, 2000):

1. La articulación del problema y la definición del límite;
2. La creación de la hipótesis dinámica;
3. La formulación del modelo;
4. La prueba del modelo;
5. El diseño e implementación de políticas.

Las etapas no necesitan ser desarrolladas en una manera lineal; por ejemplo, una prueba del modelo puede revelar que hubiera otras relaciones entre variables lo que resultaría en la reconceptualización del modelo (Sterman, 2000). La Figura 43 muestra el ciclo de la implementación de SD.



**Figura 43** El ciclo de implementación para el método de SD. Las flechas en negrita representan el ciclo general de desarrollo cuando las otras flechas demuestran el proceso no lineal para la reacción del modelo (Imagen es de elaboración propia con información adaptada de Martínez-Moyano y Richardson, 2013).

### 5.1.1 Articulación del problema y definición del límite

El agua del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco abastece varios sectores incluyendo el sector municipal, agrario, industrial, turístico y ecológico. El uso urbano y el uso rural de agua subterránea son influidos por diferentes factores los cuales complican la definición del sistema. En este caso específico, la mayoría del agua subterránea se extrae para fines urbanos. Las municipalidades de las ciudades gemelas Ciudad Juárez y El Paso son los consumidores más prominentes e importantes. Un 90% del agua que se extrae del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco es para fines urbanos (TWDB, s.f.). Por ende, una conceptualización del panorama de uso en estas ciudades son críticos para gestionar el acuífero.

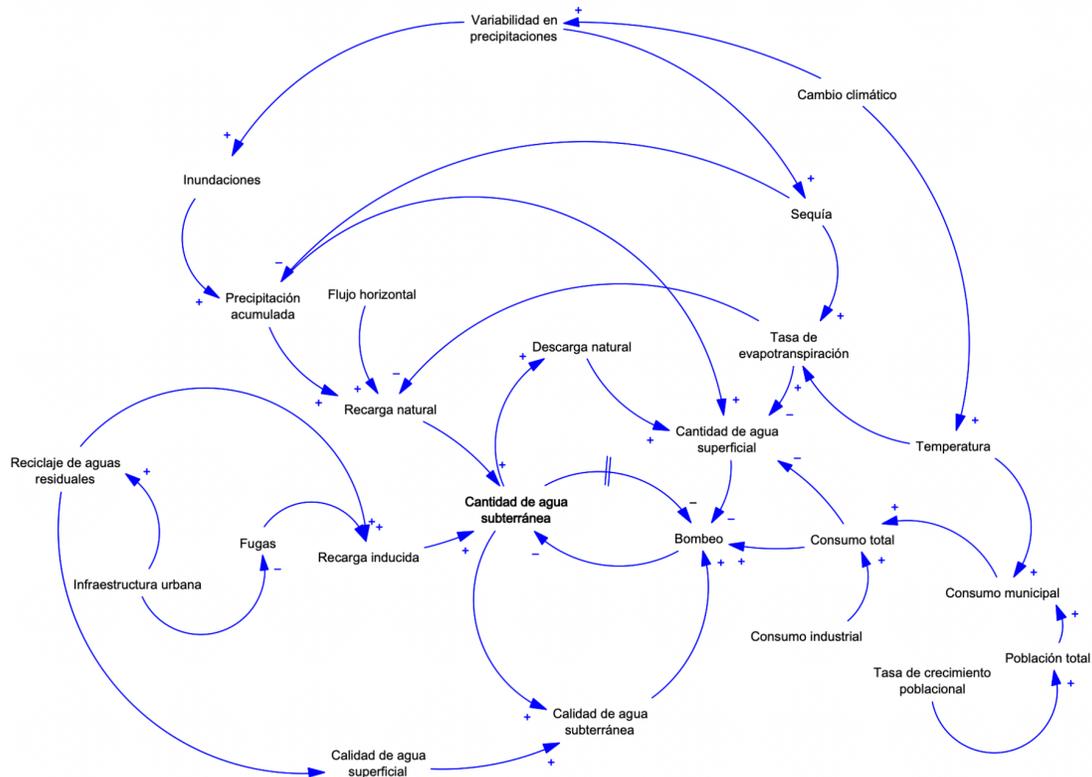
Otros autores han destacado la importancia entre cambios urbanos, cambio climático y el uso de agua subterránea. Scott et al. (2012) utilizaron modelos de circulación global y proyecciones de cambios demográficos para modelar cambios en el uso del acuífero Santa Cruz, compartidos entre México y los EUA. Sus hallazgos indicaron que “la disponibilidad de las aguas subterráneas en la región fronteriza entre Estados Unidos y México se ve agravada por el crecimiento de la demanda impulsado por el aumento de la población y la variabilidad de la recarga inducida por el clima” (p. 168). Dado que la mayoría de la población de la región fronteriza reside en ciudades (Wilder et al., 2013), los modelos que conectan el cambio climático

y el uso urbano tienen una amplia aplicabilidad para la gestión de varios acuíferos transfronterizos compartidos entre México y los EUA.

La meta final del modelo es la identificación de posibles intervenciones de la política para el mejoramiento de la cantidad y calidad del agua subterránea en el corto (presente-2040), mediano (2041-2060), mediano-largo (2061-2080) y largo (2081-2100) plazos. La calidad y cantidad de agua subterránea son dos variables fundamentales que determinan la viabilidad del agua subterránea como fuente de agua para los usos urbanos. La calidad de agua es sumamente importante para la sostenibilidad del recurso, pero la falta de investigaciones que vinculan cambios en variables climáticas con cambios en la calidad de agua subterránea hace difícil incorporar esta variable en el modelo SD. Por lo tanto, solo se va a considerar cambios en la cantidad de agua subterránea.

Para determinar las variables dentro del sistema del uso del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco, se revisaron publicaciones gubernamentales, la literatura académica y las bases de datos de libre acceso (esta información está proporcionada en el Capítulo 2). Un repaso de esta información permitió la articulación de la estructura básica que determina el uso del acuífero. Hay variables endógenas y exógenas en el modelo. Los límites del modelo están fijados por las variables exógenas (Sterman, 2000). Las variables exógenas están determinadas por factores económicos o físicos que existen fuera del alcance de este modelo.

Se articula la hipótesis dinámica a través de la creación de un diagrama de circuito causal que está fundamentada por las relaciones entre las variables del modelo (Sterman, 2000). Los diagramas de circuito causal representan la estructura de retroalimentación dentro del sistema con el propósito de mostrar, visualmente, las causas de la dinámica (Bala et al., 2017; Sterman, 2000). La Figura 44 muestra el diagrama causal.



**Figura 44** El diagrama causal para el modelo dinámico. Los símbolos (+) y (-) indican la polaridad de la relación causal. Las barras verticales indican que hay una demora temporal presente en la relación causal (Elaboración propia).

Las flechas representan las relaciones causales entre las variables, tal como se determinó al revisar la información disponible sobre el acuífero. Cada relación causal tiene una polaridad; una relación positiva indica que las variables comparten una relación directa mientras que una relación negativa indica que las variables tienen una relación indirecta. La polaridad de cada relación se determinó de forma similar mediante la revisión de la información publicada disponible. Las variables exógenas son las que no tienen flechas de entrada cuando las variables endógenas tienen flechas de entrada. Cabe mencionar que algunos de las variables exógenas pueden tener vínculos de retroalimentación con variables endógenas (por ejemplo, el flujo horizontal puede ser impactado por cambios en el nivel freático producidos por el bombeo, véase a Haywood y Yager, 2003), pero se supone que la magnitud de esta retroalimentación sea pequeña (Sterman, 2000).

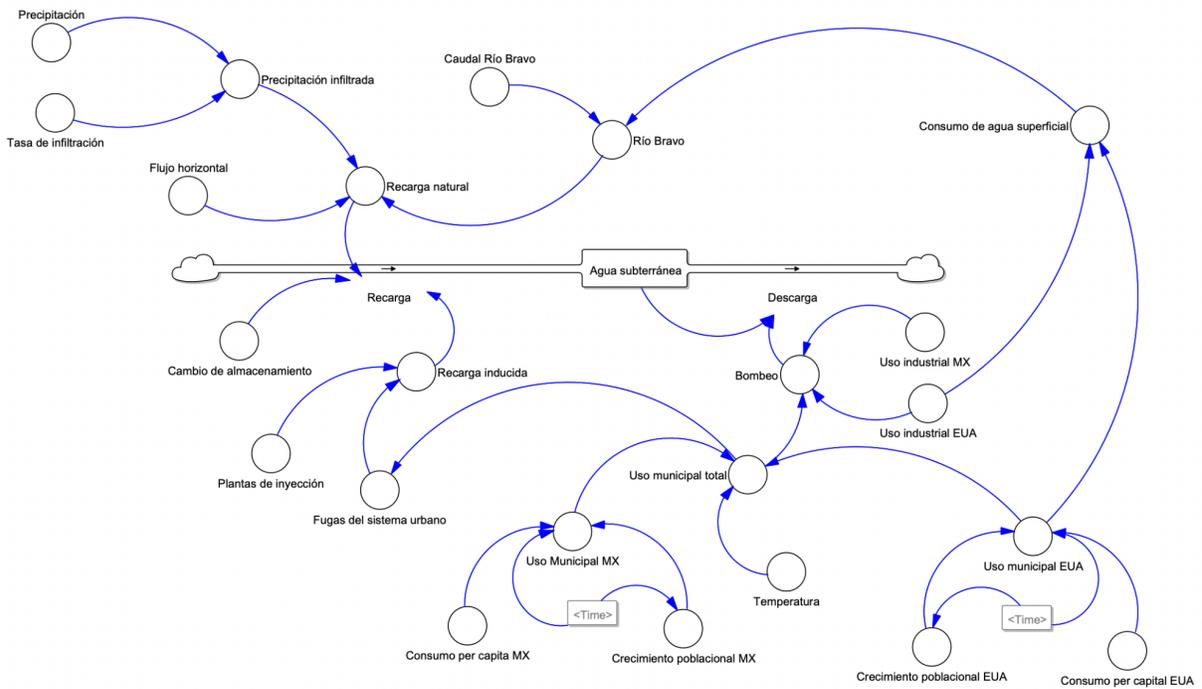
Las variables exógenas pueden ser incorporadas como variables endógenas si la simulación del modelo indica que cambios en la variable son determinados por la retroalimentación dentro del sistema (Sterman, 2000). El gráfico de los límites del modelo proporciona información importante sobre las limitaciones y advertencias del modelo (Sterman,

2000). Por ejemplo, un aumento en las inundaciones severas en la zona fronteriza es un impacto esperado del cambio climático, pero la relación entre las inundaciones severas y la cantidad y calidad de agua es poco estudiada (Earman y Dettinger, 2011). Por lo tanto, la exclusión de los eventos de inundación extrema hace que el modelo sea insuficiente para determinar plenamente cómo las alteraciones en los patrones de precipitación debido al cambio climático afectan a la sostenibilidad de las aguas subterráneas.

### 5.1.2 El diagrama de suministro y flujo

Para empezar con la creación del modelo matemático, es necesario elaborar el modelo que describe la acumulación y flujo de información dentro del sistema. El diagrama de suministro y flujo representa la estructura física del sistema (Bala et al., 2017). Los suministros representan el estado o condición del sistema y los flujos representan los cambios en el sistema que resultan de la toma de decisiones (Bala et al., 2017, Sterman, 2000). Los suministros y flujos pueden ser influidos por variables auxiliares. Las variables auxiliares pueden impactar directamente al suministro o lo influyen a través de impactos en la tasa de acumulación del suministro (Sterman, 2000). Las relaciones entre variables están sustentadas por ecuaciones matemáticas. En la siguiente sección, se explica la base para la elaboración de las relaciones matemáticas expresadas en el diagrama.

La replicación de comportamiento pasado es importante para validar la función del modelo. Mientras que la replicación del comportamiento del pasado sirve para aumentar la confianza en la función del modelo, modelos que no modelan bien el comportamiento pasado del sistema todavía pueden ser útiles (Sterman, 2000). La Figura 45 muestra el diagrama de suministro y flujo elaborado para describir el uso histórico del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco.



**Figura 45** El diagrama de suministro y flujo para el aprovechamiento del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco (Elaboración propia).

En una situación ideal, el uso de agua subterránea a lo largo de los siglos XX y XXI proporcionará un panorama completo de la historia del uso del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco. El modelo hidráulico de Heywood y Yager (2003), que es lo más usado, reconoce los principios del siglo XX como el estado de equilibrio natural del acuífero. Sin embargo, los datos que ellos utilizaron para mostrar el cambio en el uso del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco a lo largo del siglo XX no están disponibles al público. Los datos abiertos más antiguos disponibles en México o EUA son de 1984 y vienen de la base de datos sobre uso histórico de agua de la Junta de Desarrollo de Agua de Texas (TWDB por sus siglas en inglés). La Junta Municipal de Agua y Saneamiento (JMAS) de Ciudad Juárez no proporciona datos de libre acceso, pero se obtuvo un récord de extracciones anuales desde 1984 hasta 2019 del servicio a través de un contacto dentro de la organización.

El propósito de este modelo dinámico es visualizar cómo el cambio climático podría impactar el uso del acuífero. Dado que los cambios climáticos son considerados por tiempos de, al menos, 30 años, se determinó que el modo de referencia para el modelo incorpora datos de 1989-2019, el periodo de 30 años más recientes con la mayor representación en los datos

disponibles al público. La tabla 9 muestra las fuentes principales de datos y su cobertura temporal.

Fuente	Años con datos disponibles
TWDB, Resumen histórico de la encuesta sobre el uso del agua por condado (TWDB, 2020a; 2020b; 2020c)	1984-2019
Registro Público de Derechos al Agua (usos industriales)	1994-2021
JMAS	1984-2019

**Tabla 8** Fuentes de información y los años con datos disponibles (Elaboración propia).

Para aproximar el uso de agua industrial en México de los datos disponibles en la REDPA, se utilizó el primer año con datos disponibles para representar también los años anteriores que no tienen datos disponibles. Por ejemplo, el primer uso registrado en el REPDA es de 1997; por lo tanto, se supone que todos los años anteriores a 1997 se utilizó la misma cantidad de agua. Es importante recordar que los registros de datos no reflejan exactamente la situación actual. Sanchez et al. (2021, p. 1020) destacan que las extracciones de agua subterránea en la zona fronteriza

no se controlan ni se miden sistemáticamente para todos los usuarios y usos...los usuarios no siempre informan de su uso del agua...y, en muchos casos, extraen más agua subterránea que la cantidad permitida oficialmente. Por lo tanto, las estimaciones de la extracción de agua subterránea son inexactas y pueden estar sujetas a grandes sesgos y errores.

Aunque incluir toda la información disponible es crucial para reforzar la función del modelo, es necesario comprender las limitaciones de la información a la hora de tomar decisiones (Sterman, 2000).

#### 5.1.2.1 La estructura matemática del modelo

En la siguiente sección se presenta la estructura matemática del modelo y se describe el origen de la información utilizada para sustentar las relaciones causales.

El volumen total del acuífero es un punto de partida lógico dado que es la única variable de suministro presente. El volumen total de agua en el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco es:

$$V_{vdj} = V_o + \int_{t_o}^t (R_{tot}(t) + D_{tot}(t))dt$$

$V_o$  representa el volumen inicial del acuífero donde  $R_{tot}(t)$  es la tasa de recarga del acuífero y  $D_{tot}(t)$  es la tasa de descarga del acuífero. La cantidad de agua subterránea recuperable se estima en  $9251100000m^3$ . Sin embargo, hay desacuerdo sobre el volumen de agua recuperable, así como sobre la proporción de agua dulce y salina (Sheng et al., 2001). Por ende, opciones para extender la vida del acuífero incluye la salinización de aguas salinas.

Para empezar, es importante anotar las siguientes variables que se consideran constantes dentro del modelo. Todos los constantes son variables exógenas; al ser variable exógena no significa que la variable no es dinámica, sólo significa que, por el propósito del presente modelo, los factores que definen su dinámica existen fuera del alcance del modelo. Las variables que se consideran como constantes son la tasa de infiltración, el flujo horizontal, el cambio en almacenamiento, la inyección directa y el caudal del Río Bravo.

#### *Tasa de infiltración*

$$TI = 0.01$$

Se asume que un 1% de la precipitación total llega a infiltrar al acuífero. Según la CONAGUA (2020), debido a la tasa de evapotranspiración en la cuenca Río Bravo, ninguna de la precipitación que cae en la zona llega a infiltrar el acuífero. Sin embargo, según otros autores, como Heywood y Yager (2003), se calcula que la tasa de infiltración al acuífero por la precipitación puede llegar hasta un 20%. Como anota Sterman (2000), “a omitir estructuras o variables que se sabe que son importantes porque no se dispone de datos numéricos es, en realidad, menos científico y preciso que utilizar mejor para estimar sus valores” (p. 854). Debido a la falta de acuerdo sobre la tasa de infiltración para la precipitación, que es una variable importante para la recarga natural, se asume un valor de 1%. Este valor se puede modificar y actualizar en el caso que haya más certeza sobre su valor exacto.

#### *Flujo horizontal*

El valor para el flujo horizontal debido al gradiente natural proporciona la CONAGUA (2020) es:

$$FH = 36.5 * 10^6 m^3/año$$

### *Cambio en almacenamiento*

El valor para el cambio de almacenamiento debido a cambios en los niveles piezométricos se proporciona la CONAGUA (2020) es:

$$\Delta CA = 45.9 * 10^6 m^3/año$$

El cambio del almacenamiento es definido por la CONAGUA como una función del coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance, el área entre curvas de igual evolución del nivel estático y el valor medio de la variación piezométrica en el periodo. En CONAGUA (2020), se calculó el cambio del almacenamiento para la evolución en el nivel estático entre 1990-2008. Se determinó que el cambio era igual a  $-45.9 \text{ hm}^3/\text{año}$ . El cambio de almacenamiento es una función del cambio en el nivel piezométrica debido a la extracción del agua del acuífero, pero es difícil expresar el cambio en el nivel piezométrica como una función del bombeo debido a la heterogeneidad en la geomorfología y expresión espacial de la extracción de agua. Por lo tanto, el modelo asume que el cambio de almacenamiento promedio para los años 1990-2008 es una buena aproximación para el cambio en el futuro.

### *Inyección Directa*

Según EPWU (2018a), la municipalidad inyecta  $ID = 4.14 * 10^6 m^3/año$  de agua al acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco. La JMAS no reporta información sobre la inyección directa, por lo tanto, este valor sólo refleja las contribuciones reportadas en el municipio de El Paso, TX. Avances en la infraestructura permitirían aumentar la inyección directa, pero por ahora se considera que este valor es una tasa fija.

### *El caudal del Río Bravo*

$$Caudal = 560 * 10^6 m^3/año$$

Según Blythe y Schmidt (2018), en los años de 1985-2010, el caudal medio anual del Río Bravo en El Paso era  $18 m^3/s$ . Convirtiendo las unidades a  $m^3/año$ , se llega al valor expresado en la ecuación. El caudal en realidad no es constante; depende de un gran número de valores como escurrimiento, precipitación, temperatura, sólo para mencionar algunas. Pero, el impacto que las dinámicas del sistema superficial tienen para el acuífero de Valle de Juárez-Bolsón del Hueco son muy poco entendidos (Sanchez, 2022, comunicación personal). Por lo tanto, el modelo considera el caudal como una variable exógena, con dinámicas que están fuera del

alcance del modelo. Con el caudal definido, es posible describir el volumen del agua en el Río Bravo como la caudal resta el consumo de agua superficial:

$$Bravo(t) = Caudal - Consumo_{sup}(t)$$

En las siguientes secciones sobre la recarga y descarga, las variables exógenas expresadas como constantes se relacionarán con variables endógenas que caracterizan la función del uso de agua del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco. El porcentaje de agua superficial (del Río Bravo) usada por la industria y por fines municipales fue calculado utilizando las fuentes indicadas en la tabla 9. Estas fuentes reportan el volumen total de agua superficial y agua subterránea usada. Por lo tanto, es posible determinar el porcentaje promedio de agua que viene de estas dos fuentes naturales. De los datos de TWDB se calculó que un 29.5% y un 16% de agua usada por fines municipales e industriales respectivamente viene del Río Bravo. El consumo de agua superficial ( $Consumo_{sup}(t)$ ) impacta la disponibilidad de agua en el Río Bravo. Cabe mencionar que el modelo no considera la relación entre precipitación, escurrimiento y el caudal del río.

La recarga total se expresa como una función de la recarga natural, la recarga inducida y el cambio en almacenamiento.

$$R_{tot} = R_{natural}(t) + R_{inducida}(t) + \Delta CA$$

Dado que el cambio de almacenamiento está disminuyendo debido a la sobreexplotación del recurso, se puede escribir la ecuación de recarga con el valor de cambio proporcionado por la CONAGUA (2020):

$$R_{tot} = R_{natural}(t) + R_{inducida}(t) - 45.9 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$$

La recarga natural describe el proceso de recarga por rutas naturales. Es una función de las tres diferentes vías para la recarga de un acuífero no-confinado: el flujo horizontal, la infiltración de precipitación y el intercambio con aguas superficiales.

$$R_{natural}(t) = FH + Bravo(t) + TI * P(t)$$

La precipitación ( $P(t)$ ) multiplicada por la tasa de infiltración representa el volumen de precipitación que llega a infiltrar el acuífero. No es tan sencillo calcular cuánto agua del Río Bravo logra infiltrar el acuífero. En el modelo de aguas subterráneas desarrollado por Heywood y Yager (2003), se considera que el río Bravo contribuye a la recarga natural. Utilizando este modelo, la Utilidad de Agua de la Ciudad de El Paso (EPWU por sus siglas en inglés) determinó que el río estaba recargando el acuífero a una tasa de  $37 * 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$  (EPWU, 2004). La

afluencia inducida es una función del flujo superficial, el flujo de drenaje y la tasa de evapotranspiración (EPWU, 2004). Mientras que la CILA proporciona información sobre las tasas de evaporación para algunos años, los datos sobre el flujo de drenaje no están fácilmente disponibles. Por lo tanto, el porcentaje de agua superficial que contribuye a la recarga de las aguas subterráneas se calculó utilizando la tasa de flujo superficial promedio de Blythe y Schmidt (2018) y la tasa total de afluencia inducida (de EPWU, 2004). Por lo tanto, la recarga inducida por el río representa aproximadamente el 6.6% del flujo superficial total. La ecuación de la recarga natural se expresa así mediante la ecuación:

$$R_{natural} = 36.5 * 10^6 + 0.066Bravo(t) + 0.01P(t)$$

La recarga inducida se produce por intervenciones humanas en el sistema hidráulico. La CONAGUA (2020) identifica la infiltración por el sistema urbano como una fuente importante de recarga en el lado mexicano. EPWU (2018a) añade la inyección directa de agua que representa otra fuente de recarga inducida en el lado estadounidense. Por lo tanto, se puede expresar la recarga inducida a través de la siguiente ecuación:

$$R_{inducida}(t) = I_{Ur}(t) + ID$$

Dónde  $I_{Ur}(t)$  es la recarga inducida por fugas en el sistema urbano. La infiltración de agua desde fugas en el sistema urbano idealmente incluiría la cantidad de agua pérdida en los sistemas de Ciudad Juárez y El Paso. La CONAGUA (2020) estima que un 17% del agua municipal está pérdida por las fugas en la red de agua potable. De esta cantidad, un 80% llega a infiltrar al acuífero (CONAGUA, 2020). Por lo tanto, 13.6% del consumo municipal contribuye a la recarga inducida. Las fugas de la red de agua potable en El Paso también contribuyen a la recarga inducida, pero el EPWU no publica el porcentaje de agua pérdida. Por consiguiente, el modelo asume que las fugas de los sistemas urbanos en EUA son de un grado similar a las fugas de sistemas urbanos mexicanos y se considera que un 17% de toda el agua subterránea consumida por utilidades urbanas salen del sistema como fugas.

En el caso del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco, la descarga es una función simple del bombeo dado que su estatus de sobreexplotación no permite la descarga por rutas naturales (que sí existen por este acuífero bajo condiciones naturales). Las fuentes de consumo urbano incluyen el consumo industrial y el consumo municipal en ambos países. Los datos del consumo industrial en México vienen del Registro Público de Derechos al Agua (REPDA) y los

datos para el uso industrial EUA vienen de base de datos de la Junta de Desarrollo del Agua de Texas (TWDB).

Para el uso industrial, el modelo está utilizando datos históricos como insumos. En el caso del uso municipal, es posible aproximar el uso utilizando una simple ecuación de crecimiento poblacional y el consumo de agua per cápita reportada por las utilidades. El crecimiento demográfico se puede expresar como:

$$P(r, t) = P_i(1 + r)^{t/f}$$

$P_i = \text{población inicial}$   
 $r = \text{tasa de crecimiento}$   
 $f = \text{periodo de tiempo}$

Dado que la tasa de crecimiento poblacional no es constante en el periodo de interés (1984-2019), se calculó la tasa promedio utilizando la población en 1989 como  $P_i$ , la población en 2019 como  $P$ , y 30 años como  $t$ . Según la Biblioteca Estatal de Texas y Comisión de Archivos (Texas State Library and Archives Commission), la población estimada de los condados de El Paso y Hudspeth en el año 1990 era alrededor de 600,000 personas. El censo nacional reportó que la población de ambos condados en 2020 era alrededor de 870,000 personas (United States Census Bureau, 2020a; United States Census Bureau, 2020b). Según los censos del INEGI (1990, 2020), la población del municipio de Juárez era alrededor de 800,000 personas en 1990 y 1512450 personas en 2020. Se utilizaron estas poblaciones como aproximaciones de las poblaciones en 1989 y 2019 respectivamente. Por consiguiente, las ecuaciones para el crecimiento demográfico en Ciudad Juárez ( $P_{MX}$ ) y la ciudad de El Paso ( $P_{EUA}$ ) son:

$$P_{MX} = 800,000(1.0211)^t$$

$$P_{EUA} = 600,000(1.0124)^t$$

Es importante recordar que estas ecuaciones son aproximaciones de los patrones del cambio en el mundo real. Una variedad de factores influye en el crecimiento demográfico y su tasa de cambio no es constante con el tiempo. Del crecimiento poblacional, es posible estimar la cantidad de agua consumida para fines municipales utilizando el consumo per cápita de agua en los centros urbanos. El Instituto Municipal de Investigación y Planeación de Ciudad Juárez (IMIP, 2010), proporciona datos sobre el consumo de agua en metros cúbicos por persona al año, para todos los usos domésticos en el municipio excluyendo el uso industrial por los años 2000, 2005 y 2010. La tabla 10 muestra el consumo de agua por persona por año en Ciudad Juárez.

Año	Agua por persona por año ( $m^3$ )
2000	126.18
2005	114.95
2010	116.8

**Tabla 9** Consumo de agua por persona por año en Ciudad Juárez (Elaboración propia con información de IMIP, 2010).

Se asume que en los años antes de 2000 (1989-2000), se consumió un promedio similar del valor en 2000. De igual modo, se asume que el uso promedio de agua en los años después de 2010 (2010-2019) es el mismo que la cantidad consumida en 2010. El modelo sólo considera consumo anual, aunque el consumo de agua varía a lo largo del año, y entre años, en función con las necesidades de cada consumidor. También se trata de un valor medio y, por tanto, no refleja cuestiones como el acceso equitativo a los recursos de agua potable.

El consumo per cápita en El Paso se calculó de la misma manera. Según el Plan del agua de la región E de 2016, recomendaciones de conservación y reutilización del agua, el consumo municipal para la ciudad de El Paso entre 2006 y 2011 era:

Año	Agua por persona por año ( $m^3$ )
2001	237.2
2006	226.3
<b>2011</b>	<b>189</b>

**Tabla 10** Consumo de agua por persona por año en El Paso (Elaboración propia con información de Albright et al., 2016).

De igual modo, el consumo anual entre los años 1989-2001 se aproxima al mismo que el consumo anual reportado en 2001. Hay datos más vigentes sobre el consumo per cápita del agua en El Paso que vienen de noticieros. Según el periódico *El Paso Times*, el consumo per cápita por día desde 2016 ha sido  $178m^3$  por persona por año (Schladen, 2016). Por lo tanto, se aproxima el uso de agua 2016 a 2019 como  $178m^3$  por persona por año.

Según la CONAGUA (2020), un 94.2% del agua extraída del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Huevo en México viene al abastecimiento de Ciudad Juárez. En el lado estadounidense, el total de agua subterránea usada en el consumo público-urbano varía entre los años. El promedio para los años 1989-2019 en EUA, según los datos del TWDB, es un 68% (TWDB, 2020a; 2020b; 2020c). Sin embargo, la utilidad del El Paso reporta que un 38% del agua utilizada para fines municipales viene del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Huevo (EPWU, 2018b). La falta de acuerdo en los datos es uno de los desafíos más grandes para crear este tipo de modelo.

Como destacan Rasifaghihi et al. (2020), la capacidad de estimar el consumo de agua en ciudades es integral al desarrollo sostenible y uso equitativo de agua en sitios urbanos. El consumo de agua en las ciudades es determinado por una variedad de factores climáticos y socioeconómicos (Rasifaghihi et al., 2020); cómo discuten Hamidi et al. (2021, p. 1),

aunque la cantidad absoluta de consumo de agua depende principalmente de la población, del nivel tecnológico, de la cultura de consumo, del tipo de vida y de muchos otros parámetros humanos, es evidente que, dada la relativa estabilidad de los factores humanos, la aparición de patrones de consumo de agua depende en gran medida de las frecuencias mensuales y estacionales de las variables climáticas. Por lo tanto, se supone que el clima es el factor más importante en los cambios a medio plazo del consumo de agua.

Balling y Gober (2007) hallaron que, en el caso de Phoenix, AZ, EUA, la temperatura, precipitación, y condiciones de sequía tienen un impacto notable en el consumo de agua. Aunque la conexión entre aumentos en temperatura y el uso de agua en ciudades parece intuitivo, Kenney et al. (2008) subrayan que todavía hay mucha incertidumbre sobre la relación entre variables climáticas y el consumo de agua en muchos lugares. Parandvash y Chang (2016) evaluaron el impacto del cambio climático en la demanda de agua en Portland, OR, EUA; ellos disputaron que la demanda de agua per cápita varía mucho según el modelo climático que se utilice para predecir los cambios futuros. Sus resultados muestran la importancia de usar un conjunto de modelos climáticos, que ilustran un panorama de futuros posibles, en la toma de decisiones sobre el manejo del agua.

Dimkic (2020) sintetizó una variedad de estudios relacionando cambios en variables climáticas y el consumo de agua potable y halló que en Norteamérica, un aumento de 1°C en la

temperatura promedio anual en ciudades produce un aumento del 3-5% en el consumo de agua. Con esta relación, es posible expresar el consumo municipal de agua del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco como una función del consumo urbano y temperatura. Dado que no se sabe el porcentaje específico de aumento en consumo para el caso de Ciudad Juárez-El Paso, se utiliza la variable  $\alpha$  que puede ser entre un 3-5% como indicó Dimkic (2020). Por lo tanto, el uso municipal total  $U_M(T, t)$  de agua subterránea se puede expresar como:

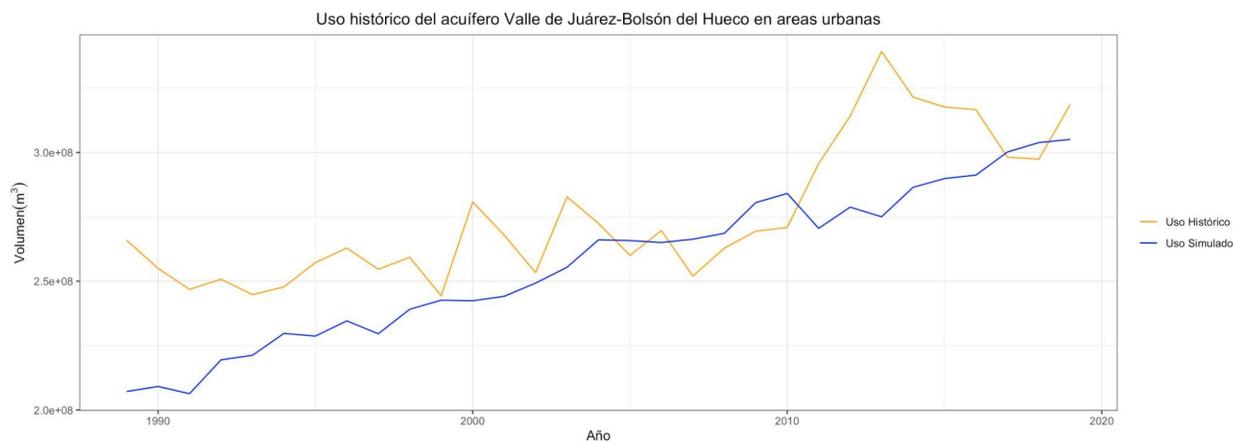
$$U_M(T, t) = [0.94U_{M_{Mx}}(t) + 0.68U_{M_{EUA}}(t)] + \alpha[0.94U_{M_{Mx}}(t) + 0.68U_{M_{EUA}}(t)](T - T_{med})$$

Es importante anotar que el consumo aumenta en las épocas del año más cálidas. Fiorillo et al. (2021) determinaron que en Nápoles, Italia, la demanda por agua aumentó entre un 9-10% en las semanas más calurosas. Dado que los aumentos en temperatura en la zona del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco son más pronunciadas en pleno verano, es probable que el consumo de agua durante esta época sea más alto. El presente modelo dinámico considera aumentos en el consumo promedio anual dado que la resolución de datos disponibles sobre el bombeo reporta en  $m^3/año$ . Las próximas versiones del modelo deben incluir cambios en el uso de agua subterránea por mes para modelar mejor el uso intraanual.

Además, es recomendable que estudios futuros utilicen la metodología propuesta por Praskievicz y Chang (2009) para determinar una relación entre el consumo urbano de agua y cambios en variables climáticas en la zona del Valle de Juárez-Bolsón del Hueco. Un entendimiento más robusto sobre cómo la precipitación, temperatura y la evapotranspiración influyen en el consumo de agua a través del año aumentará la capacidad de adaptarse a los cambios climáticos.

### 5.1.3 La reproducción de comportamiento pasado

Para probar la función del modelo dinámico, se simuló el uso histórico para los años 1989-2019. La Figura 46 muestra los resultados de la simulación comparados con el uso histórico.



**Figura 46** El uso histórico del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Huevo para 1989-2019 comparado con el uso simulado según el modelo.

Para evaluar la precisión de replicar el comportamiento pasado, se calculó el error estándar medio (EEM). El EEM del modelo es un 8.27% por los años 1989-2019. El modelo se realiza mejor por ciertos tiempos, por ejemplo 1989-2000, lo que sugiere que el crecimiento demográfico no es el único impulsor del consumo de agua subterránea. Aunque el modelo tiene un EES del 7.42%, todavía proporciona información útil. Primero, se indica que existen decisiones que pueden compensar la demanda de agua subterránea debida únicamente al crecimiento de la población y, segundo, que estas decisiones no están conceptualizadas en el presente modelo. Ejemplos de factores importantes para el consumo de agua urbana que no están incluidos en el modelo son tarifas y precio del agua y eficiencia de la infraestructura. Por lo tanto, modelos futuros pueden añadir elementos al presente modelo para simular mejores cambios en uso debido a otros factores sociopolíticos.

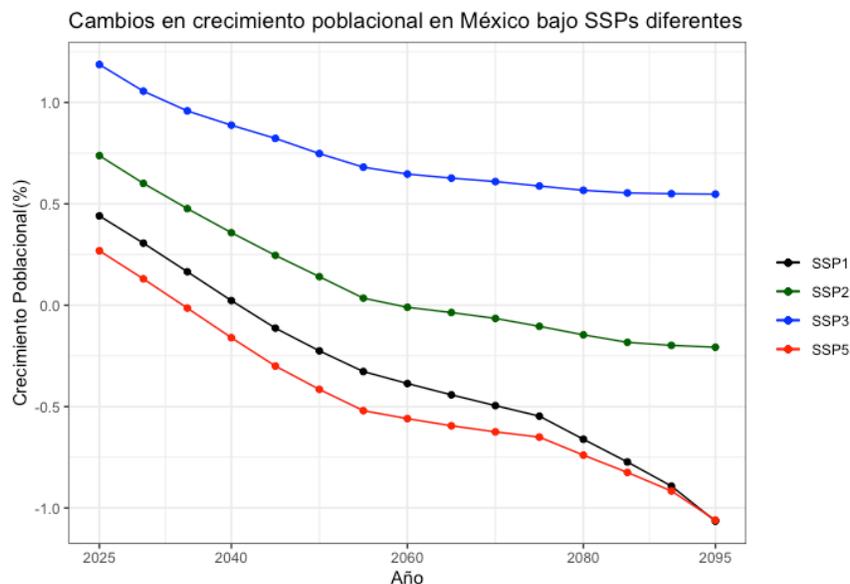
#### 5.1.4 La simulación bajo diferentes escenarios de cambio climáticos

Para evaluar el impacto del cambio climático en el consumo de agua subterránea del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Huevo, el modelo dinámico se modificó para incorporar cambios demográficos y cambios climáticos para el corto (2021-2040), medio (2041-2060), medio-largo (2061-2080) y largo (2080-2100) plazo.

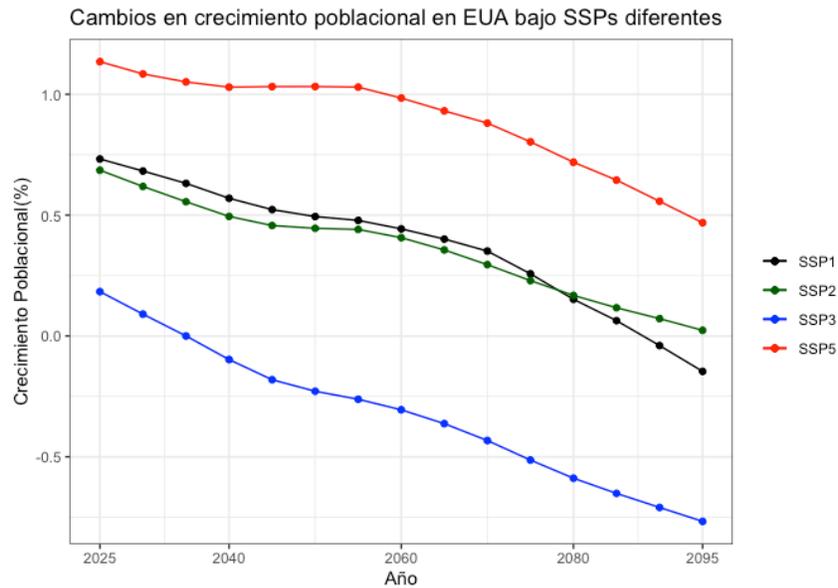
El primer paso en determinar el impacto del cambio climático para el consumo de agua subterránea era establecer los diferentes cambios en temperatura y precipitación para los horizontes de tiempo según los diferentes modelos. Del procesamiento de los modelos que se explicó en el capítulo 3, fue posible calcular la temperatura media anual y la precipitación acumulada anual. Se eligió temperatura media anual porque la ecuación por el uso municipal

total  $U_M(T, t)$  relaciona temperatura media anual con el consumo de agua urbano. El factor de temperatura en la ecuación  $(T - T_{med})$  es igual a la anomalía en temperatura por un año dado. La anomalía en temperatura media se calculó con el valor de temperatura media según el modelo climático y el valor de temperatura media según la climatología base (1970-2000). En el apéndice es posible encontrar tablas que resumen los valores para  $\Delta$ Temperatura media anual ( $^{\circ}\text{C}$ ) y la precipitación acumulada anual (mm) que fueron extraídos de los modelos.

En definitiva, los servicios urbanos siguen siendo los mayores consumidores de aguas subterráneas del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco, lo que indica que los futuros cambios demográficos serán muy importantes a la hora de considerar la evolución del uso de las aguas subterráneas a lo largo del siglo XXI. Por ende, es necesario incorporar los cambios en el crecimiento poblacional que se esperan bajo los diferentes SSPs. Cambios en la tasa de crecimiento poblacional a nivel federal bajo los diferentes SSPs son proporcionados por el Instituto Internacional de Análisis de Sistemas Aplicados. Las Figuras 47 y 48 muestran los cambios en la tasa de crecimiento poblacional en México y EUA a través del siglo XXI por los SSP1, SSP2, SSP3 y SSP5 (datos de International Institute for Applied Systems Analysis, 2018). Mientras que no todas las regiones del país crecen por la misma tasa, la tasa federal sirve como una buena aproximación. Los resultados del modelo mejorarían con información más detallada sobre el crecimiento demográfico específicamente en la zona fronteriza bajo los diferentes SSPs.

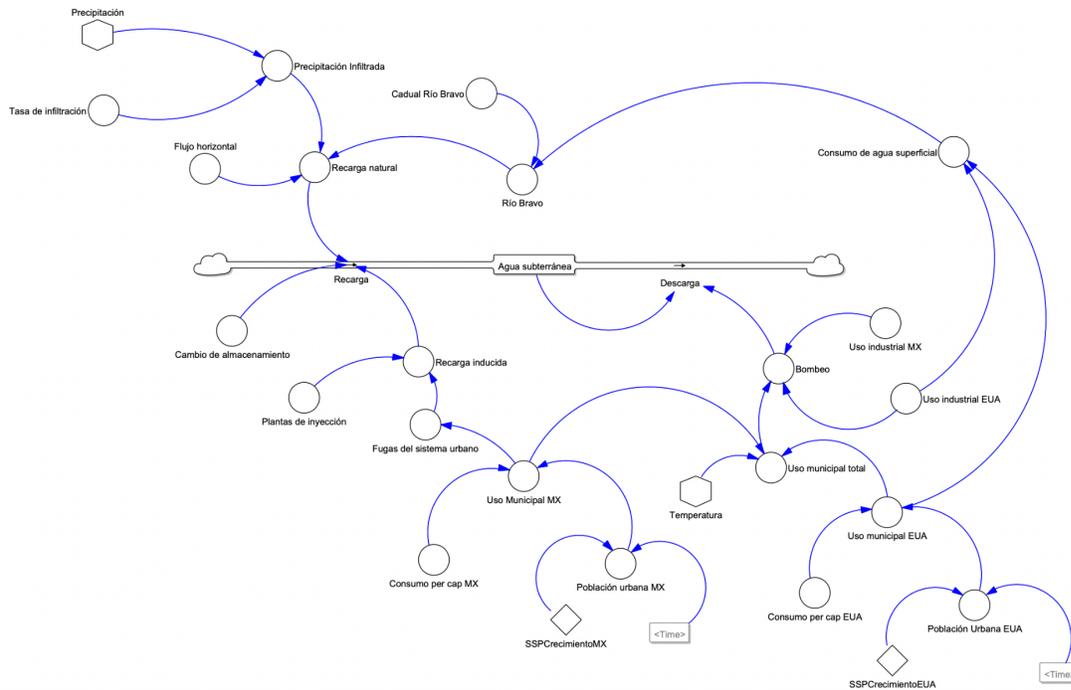


**Figura 47** Cambios porcentuales en el crecimiento de la población nacional para México según los diferentes SSPs. Los cambios a nivel federal fueron usados para aproximar los cambios locales en la región fronteriza (Elaboración propia con datos de International Institute for Applied Systems Analysis, 2018).



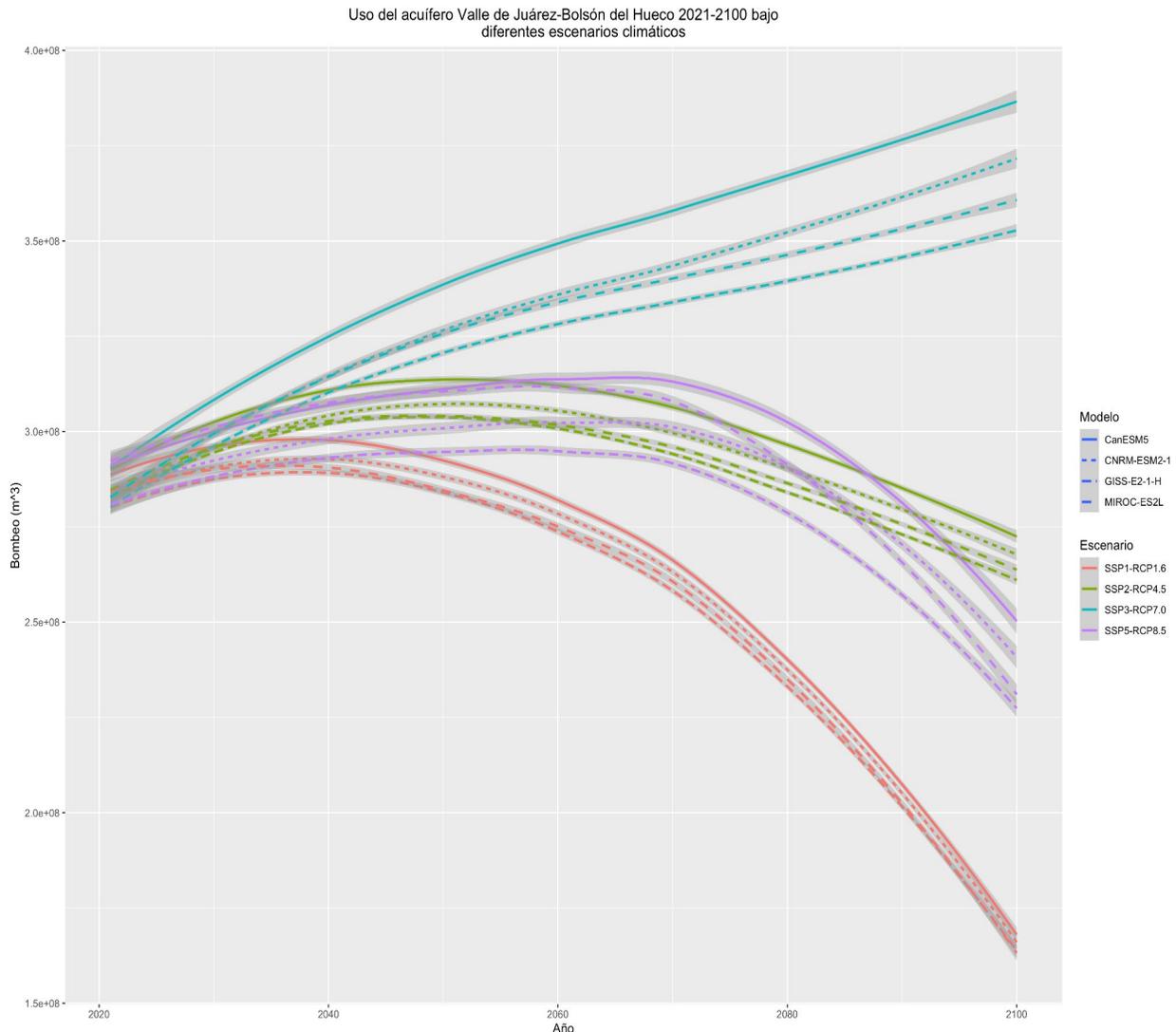
**Figura 48** Cambios porcentuales en el crecimiento de la población nacional para los EUA según los diferentes SSPs. Los cambios a nivel federal fueron usados para aproximar los cambios locales en la región fronteriza (Elaboración propia con datos de International Institute for Applied Systems Analysis, 2018).

Se modificaron el diagrama de suministro y flujo para reflejar la posible influencia del cambio climático. La Figura 49 muestra la estructura actualizada.



**Figura 49** El diagrama de suministro y flujo para el uso del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco con las adiciones de las variables de precipitación acumulada anual, cambios en temperatura media y crecimiento poblacional (Elaboración propia).

De interés para la sostenibilidad y conservación del recurso son cambios en la extracción de agua y cambios en el volumen total de agua disponible. La Figura 50 muestra cambios en el bombeo total del acuífero bajo los cambios en las variables climáticas modeladas.

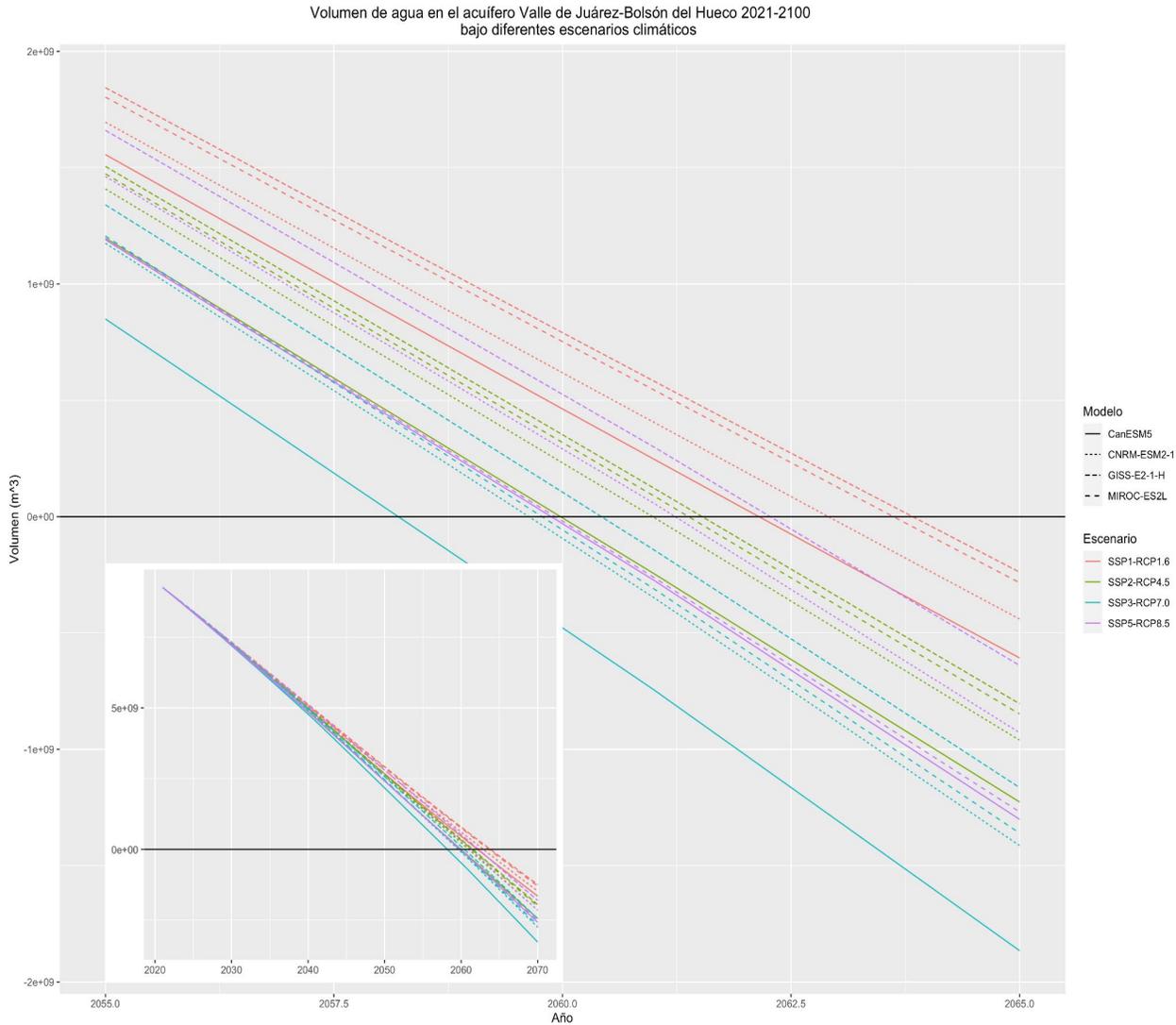


**Figura 50** El uso del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco en metros cúbicos al año para 2021-2100 bajo los diferentes escenarios climáticos (Elaboración propia).

Bajo SSP1-RCP2.6 (mitigación alta, adaptación alta) se observa una disminución del bombeo total a partir de 2040, en la SSP2-RCP4.5 (mitigación media, adaptación media) hacia 2050, y en la SSP5-RCP8.5 (mitigación baja, adaptación alta) hacia 2070. En el modelo SSP3-RCP7.0 (mitigación baja, adaptación baja), el bombeo aumentó continuamente a lo largo del siglo. En el modelo, el bombeo está impulsado principalmente por los cambios demográficos, lo que indica que las vías con menores tasas de crecimiento demográfico darán lugar a una

disminución más rápida de los totales de bombeo. Los resultados subrayan la necesidad de aplicar tanto políticas de mitigación como de adaptación. Centrarse exclusivamente en la disminución de obstáculos para la adaptación (SSP5-RCP8.5) da lugar a 20-30 años más de aumento de la extracción en comparación con los escenarios en los que también se aplican los esfuerzos de mitigación. Aunque la sostenibilidad de las aguas subterráneas se considera en gran medida una cuestión de adaptación (Taylor et al., 2012), no se puede exagerar la importancia de los esfuerzos de mitigación para la gestión binacional de las aguas subterráneas.

El cambio en el bombeo del acuífero junto con cambios inducidos en las tasas de recarga determinará la longevidad del recurso La Figura 51 muestra la disminución en el volumen total del acuífero según el modelo.



**Figura 51** Las disminuciones en el volumen de agua dentro del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Huevo bajo diferentes escenarios de cambio climático (Elaboración propia).

Los resultados de la modelación indican que el acuífero podría agotarse en 2059. Todos los escenarios prevén un volumen cero a mediados de siglo. El escenario SSP1-RCP2.6 produce una mayor longevidad del recurso. Los escenarios SSP3-RCP7.0 corresponden en general a un agotamiento más rápido del acuífero, lo que tiene sentido dado que en el modelo el crecimiento demográfico es el principal motor de la extracción de agua. Para evaluar la utilidad de los resultados el modelo, es importante reconocer que el modelo supone que:

- A. El volumen total del acuífero puede ser bombeado.
- B. Toda el agua del acuífero es agua dulce que puede consumirse directamente.
- C. El costo del bombeo no cambia con el tiempo.
- D. Las externalidades negativas (como cambios en almacenamiento) no cambian con el tiempo.
- E. Cambios en la recarga ocurren a la escala temporal de un año.

A principios de siglo, Sheng et al. (2001) estimaron que el agua dulce podría desaparecer en 2025. Esfuerzos para utilizar agua desalada y aguas residuales recicladas ya son utilizados en la zona. En la década de 1980, la ciudad de El Paso comenzó a poner en marcha esfuerzos de recarga artificial utilizando aguas residuales tratadas (Schlanger, 2018). Los esfuerzos han dado como resultado la estabilización de los descensos del nivel de las aguas subterráneas hasta ahora, pero el impacto total del cambio climático todavía tiene que llegar a la zona, poniendo los niveles de agua en riesgo de nuevo (Schlanger, 2018). En Ciudad Juárez, las aguas residuales urbanas se utilizan para regar las tierras de cultivo circundantes. Aunque el uso de aguas residuales urbanas en la agricultura de regadío disminuye la dependencia de los agricultores del agua del Río Bravo, la falta de tratamiento de las aguas residuales ha provocado graves problemas de salud humana y ambiental (Montano Armendáriz, 2019). Las futuras interacciones del modelo deberán considerar el porcentaje de agua dulce (y no sólo el agua recuperable), el costo de bombeo de agua más profunda, la tasa de salinización, el costo de desalinización, el costo de reciclaje de aguas residuales y el impacto del volumen perdido. Además, es de alta importancia investigar cómo la variabilidad en precipitaciones impactará a las tasas de recarga natural. La incorporación de estas variables con los posibles cambios en las variables climáticas aumentaría en gran medida la aplicabilidad de este modelo al proceso de toma de decisiones.

### 5.1.5 La utilidad del modelo como una herramienta política

Para utilizar el modelo en la toma de decisiones, es importante reconocer su propósito y sus limitaciones. La tabla 12 proporciona preguntas que Sterman (2000) identificó como cruciales en la evaluación de los modelos SD y las respuestas relevantes para el presente caso.

Pregunta	Respuesta
¿Cuál es la finalidad del modelo?	Determinar cómo cambios en temperatura media y precipitación acumulada anual impactarán el consumo del agua del acuífero
¿Qué variables y cuestiones importantes son exógenas, o están excluidas?	El modelo sólo considera el consumo de agua subterránea para fines públicos-urbanos. Las variables que determinan el consumo de agua para fines agrícolas no están incluidas.
¿Se excluyen variables importantes porque no hay datos numéricos para cuantificarlas?	Sí (por ejemplo: calidad de agua subterránea, uso de aguas saladas)
¿Cuál es el horizonte temporal relevante para el problema?	Presente al fin del siglo (2022-2100)
¿Incluye el modelo los factores que pueden cambiar significativamente a lo largo del horizonte temporal como elementos endógenos?	Hay varias variables exógenas que cambiarían a través del tiempo (como el uso industrial, el cambio en almacenamiento, la tasa de evapotranspiración y el caudal del Río Bravo). Aunque estas variables tienen elementos dinámicos, no existe la información para cuantificarlos.
¿Se han tenido en cuenta los retrasos, las limitaciones y los posibles cuellos de botella?	Existe un importante retraso temporal que relaciona el volumen total del acuífero con el bombeo total. En el pasado, el bombeo extensivo del acuífero dio lugar a grandes caídas de volumen, lo que a su vez aumentó la concienciación relacionada con el uso del acuífero e impulsó los esfuerzos para disminuir el bombeo total. Este retraso que relaciona la disminución del volumen con la disminución del bombeo es una relación causal derivada de los relatos históricos. El modelo no incorpora actualmente relaciones que se evidencien de esta manera. Como señalan Gleeson y Richter (2017) y Penny et al. (2021), las consecuencias del agotamiento

	de las aguas subterráneas se acumulan lentamente y, por tanto, son difíciles de evaluar.
¿Tiene en cuenta el modelo las limitaciones cognitivas, las realidades organizativas, los motivos no económicos y los factores políticos?	Actualmente, no. Sin embargo, ése es el objetivo final de un modelo de este tipo, y añadir factores políticos será discutido en el último capítulo.
¿Las decisiones simuladas se basan en la información que tienen realmente los responsables de la toma de decisiones?	Sí. La información usada en el modelo está disponible de manera libre y gratuita a todo el público. La información sobre los totales de bombeo se recibió de la JMAS a través de una solicitud informal. Las solicitudes de este tipo son una opción fácilmente disponible para los responsables de la toma de decisiones.
¿Son las recomendaciones políticas sensibles a las variaciones plausibles, incluidas las hipótesis sobre los parámetros, la agregación y el límite del modelo?	Sí. El modelo tiene el paso de tiempo de un año, pero cambios en precipitación y temperatura varían de manera importante diaria y mensualmente. Otras variables, como el consumo de agua per cápita, varían a través del año. Por lo tanto, el nivel de agregación impactará las recomendaciones de la política.
¿Qué tipos de datos se utilizaron para desarrollar y probar el modelo (por ejemplo, estadísticas agregadas recogidas por terceros, fuentes de datos primarios, datos cualitativos de observación y de campo, material de archivo, entrevistas)?	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Reportes técnicos de la CONAGUA: datos de observación en campo</li> <li>-Estadísticas del INEGI: estadísticas agregadas</li> <li>-Estadísticas del Censo EUA: estadísticas agregadas</li> <li>-Datos de TWDB: datos de observación en campo</li> <li>-Datos de JMAS: datos agregados de muestras de observación</li> <li>-Datos de IMIP: estadísticas agregadas</li> <li>-Datos IIASA: datos de modelos</li> <li>-Datos de CMP6: datos de modelos</li> </ul>

**Tabla 11** Preguntas y respuestas que abordan la utilidad del modelo SD creado para simular el uso del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco (Elaboración propia con preguntas originales de Serman, 2000).

Con tantas limitaciones y huecos en la información necesaria, vale la pena preguntar la utilidad del método de los sistemas dinámicos. Como anota Serman (2000, p. 854)

Los datos que se necesitan para construir y probar el modelo rara vez están disponibles sin un coste y un esfuerzo significativos. Los modeladores deben juzgar constantemente

si el tiempo y el coste de la recopilación de datos adicionales están justificados. En la primera fase de la modelización, a menudo vale la pena utilizar los datos de la experiencia y estimar los parámetros con criterio para poder poner en marcha el modelo inicial lo antes posible.

El modelo proporcionado en estas páginas es un modelo inicial que introduce el tema del impacto del cambio climático en el manejo de un acuífero transfronterizo. Otros autores han incorporado el cambio climático en sus modelos dinámicos, pero este modelo es único en la aplicación de los datos de los modelos CMIP6 al contexto de un acuífero transfronterizo. El modelo desarrollado aquí para el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco demuestra la posibilidad de incorporar datos de modelos climáticos globales en modelos regionales para el desarrollo de políticas. Todavía hay mucho trabajo que hacer para desarrollar el modelo, y se espera que la presentación del modelo inspire más investigaciones sobre el tema.

## 6. A manera de conclusiones

Los capítulos de esta tesis han presentado información, generada a través de tres metodologías, que es relevante para la creación de políticas binacionales para acuíferos transfronterizos. Para comprender mejor la utilidad de los resultados, se unificarán bajo la teoría de la gobernanza policéntrica funcional. Al fundamentar los resultados en este marco teórico se demostrará aún más su utilidad para los responsables de la toma de decisiones.

Los sistemas acuíferos transfronterizos presentan las características de un régimen de gobernanza policéntrica. Ostrom et al. (1961) y Ostrom (1991) caracterizó un sistema político policéntrico como aquel compuesto por varias unidades autónomas formalmente independientes entre sí que deciden actuar teniendo en cuenta a las demás mediante procesos de cooperación, competencia, conflicto y resolución de conflictos. En una síntesis de los aspectos centrales de la literatura sobre gobernanza policéntrica, Stephan et al. (2019) definieron ocho dimensiones<sup>14</sup> que caracterizan un régimen de gobernanza policéntrica que incorporan y amplían la definición original de Ostrom et al. Como señalan Stephan et al. (2019), "la gobernanza policéntrica sería cualquier forma de gobernanza que tenga una combinación de las [ocho] dimensiones, pero al menos incluiría las características primera y segunda" (p. 35). Todos los sistemas acuíferos transfronterizos muestran las tres primeras de las ocho dimensiones de la gobernanza policéntrica, a saber, la existencia de múltiples centros de decisión, independencia *de jure* o autonomía *de facto* en cada centro de decisión y superposición de jurisdicciones de los centros de decisión.

Dado que un recurso acuífero transfronterizo es compartido por más de un país, siempre habrá más de un centro autónomo con capacidad de decisión. En el caso de los acuíferos transfronterizos en la región fronteriza México-Estados Unidos, la multiplicidad de autoridades es asombrosa e incluye servicios públicos locales, instituciones académicas, autoridades municipales, legislaturas estatales, agencias estatales, legislaturas federales, agencias federales, organizaciones binacionales y organizaciones internacionales, todas las cuales ejercen un control

---

<sup>14</sup> Las ocho dimensiones son: (1) múltiples centros de decisión, (2) independencia *de jure* o autonomía *de facto* en cada centro de decisión, (3) jurisdicciones superpuestas, (4) múltiples procesos de ajuste mutuo entre centros de decisión, (5) bajos costes de entrada y salida, (6) un sistema general de reglas que puede consistir en leyes, normas y valores compartidos, (7) patrones de comportamiento, interacciones y resultados que surgen a través del centro de decisión, y (8) una combinación de medios emergentes e intencionales de coordinación efectiva a todos los niveles.

autónomo o semiautónomo sobre un mismo acuífero. Los recursos transfronterizos también son coherentes con la tercera dimensión. Las aguas subterráneas transfronterizas están sujetas a todas las jurisdicciones espaciales, desde el nivel local al mundial. Aunque puede afirmarse que todos los acuíferos transfronterizos presentan las tres primeras dimensiones, la presencia de las restantes debe evaluarse caso por caso. Por ejemplo, hay seis sistemas acuíferos transfronterizos con tratados o estatutos formales que confirmarían la presencia (aunque en diversos grados) de la sexta dimensión.

Mientras que los sistemas de recursos acuíferos transfronterizos se ajustan a los criterios de un régimen de gobernanza policéntrica según lo descrito por Ostrom et al. (1961), Ostrom (1991) y Stephan et al. (2019), Carlisle y Gruby (2017) proponen el concepto de "gobernanza policéntrica funcional" que captura esa capacidad del sistema para ejecutar las características de un régimen de gobernanza policéntrica cuando se enfrenta a cambios sociales y ambientales. La capacidad funcional es crucial cuando se examina el impacto del cambio climático en la creación de políticas binacionales. Un régimen funcional permite una mejor adaptación al cambio, proporciona un ajuste institucional adecuado para sistemas complejos y mitiga el riesgo de fracaso institucional. Al desarrollar un régimen de gobernanza policéntrico y funcional, la gestión de los acuíferos transfronterizos puede adaptarse mejor a los cambios provocados por el calentamiento del clima. Cada una de las ventajas de un régimen funcional puede desbloquearse a través de ciertas condiciones habilitadoras<sup>15</sup>. La revisión sistemática y la modelización presentadas en esta tesis ofrecen resultados directamente relacionados con las condiciones habilitadoras para una mayor capacidad de adaptación y un mayor ajuste institucional que podrían lograrse mediante una mayor cooperación binacional.

## 6.1 Capacidad adaptativa: lo que revelan los estudios de caso sobre la cooperación

La capacidad adaptativa es la "habilidad de un sistema para responder a perturbaciones experimentadas o previstas y ajustarse mediante procesos de experimentación y aprendizaje que se basan en la supervisión, el intercambio de información y la coproducción de conocimientos" (da Silveira y Richards, 2013, p. 320). Pahl-Wostl (2009) señala que "la capacidad de los

---

<sup>15</sup> Para consultar la lista completa de condiciones habilitadoras, véase la Tabla 1 en Carlisle y Gruby (2017).

sistemas de gobernanza para hacer frente a la incertidumbre y la sorpresa es un requisito esencial para su sostenibilidad en tiempos de creciente incertidumbre debido al cambio climático y global" (p. 355). La mejora de la capacidad adaptativa es una estrategia para reducir las vulnerabilidades y fomentar el desarrollo sostenible (IPCC, 2007). La capacidad adaptativa está vinculada a la afirmación de Ostrom et al. (1961) y Ostrom (1991) de que los centros de toma de decisiones interactúan a través de procesos de cooperación y competencia. La competencia y los conflictos pueden socavar la cooperación y obstaculizar la adaptación (Carlisle y Gruby, 2017).

Para lograr una mayor sostenibilidad, debe darse prioridad a reforzar las condiciones propicias para aumentar la capacidad adaptativa. La revisión sistemática abordó esta cuestión centrándose en la segunda condición propicia planteada por Carlisle y Gruby (2017): las reglas y normas de aplicación general estructuran las acciones y el comportamiento dentro de un sistema. Un sistema de reglas puede incluir mecanismos formales e informales como leyes, acuerdos institucionales, normas sociales y entendimientos compartidos (McGinnis, 2016). A través de una estructura de reglas, "se constituyen diferentes tipos de organizaciones y se definen y legitiman sus procesos de interacción" (McGinnis, 2016, p.4). Eckstein (2011) señala que "la práctica y la experiencia de los Estados en relación con la utilización de los acuíferos transfronterizos se están imponiendo poco a poco, y las naciones y los académicos están prestando más atención a la formulación de normas y reglamentos para la gestión de estos recursos críticos" (p. 574). Por lo tanto, los seis casos revisados en la revisión sistemática representan acuíferos transfronterizos con una estructura general de reglas y normas para el manejo del recurso.

La revisión de los seis acuíferos con estructuras de normas formales para la gestión multinacional identificó los factores que inducen a la cooperación, así como los retos pendientes para aumentar la capacidad adaptativa dentro de un régimen policéntrico de gobernanza de acuíferos transfronterizos. Los esfuerzos de cooperación refuerzan la capacidad adaptativa y fortalecen la habilidad de los responsables de la toma de decisiones para adaptarse a retos sociales y medioambientales centrales como el cambio climático. Las cuatro áreas temáticas de cooperación—conocimiento, ciencia e información, estructura administrativa, participación de los actores y comunicación—contribuyen a una mayor capacidad adaptativa y a una gobernanza policéntrica funcional.

El acceso equitativo a información contextualmente fiable permite a los centros autónomos tomar decisiones que tienen en cuenta a otros centros y disminuir los casos de conflicto que surgen por no comprender adecuadamente el sistema y su dinámica. Da Silveira y Richards (2013) sostienen que el intercambio sistemático de datos e información es una función crítica que desempeñan los regímenes de gobernanza policéntrica funcional. La presencia y utilidad de los intercambios de información es, por tanto, una medida directa de la capacidad adaptativa. A la inversa, la falta de conocimiento, ciencia e información adecuado puede afectar gravemente a la capacidad adaptativa de un sistema. Los estudios policéntricos han descrito la información y el aprendizaje como fundamentales para el éxito de un régimen de gobernanza policéntrico (Koontz, 2019).

Todos los estudios de caso examinados incluían el intercambio de información en su estructura de normas generales. El Convenio de cooperación entre Ciudad Juárez y El Paso constituye un ejemplo de éxito en el intercambio de información entre las autoridades responsables de la toma de decisiones. El convenio prevé el intercambio de información entre la JMAS y la EPWU en relación con la ubicación de pozos, uso histórico, apoyo técnico, crecimiento demográfico, desarrollo económico, modelos matemáticos, reutilización de aguas residuales y lecciones aprendidas. La disminución del estrés hídrico en los años posteriores a la adopción del convenio demuestra el éxito de éste en la creación de un entorno propicio para que los centros de decisión aumenten sus conocimientos y adapten su gestión del acuífero (Sánchez y Eckstein, 2020).

Los retos relacionados con la información, también identificados en la revisión sistemática, ponen de relieve que las estructuras de reglas generales sólo crean un régimen policéntrico funcional si la información y los intercambios de información son accesibles a todos los centros de toma de decisiones. Por lo tanto, la norma general de información fiable, precisa, oportuna y accesible debe sustentarse en intercambios de información sólidos y diversos para aumentar la capacidad adaptativa del régimen de gobernanza. Este reto sigue sin resolverse en el caso del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco. La información se almacena en varios lugares con diferentes niveles de accesibilidad pública, las metodologías para recopilar información son a menudo vagas, y hay limitados recursos humanos y financieros disponibles para apoyar el llenado de vacíos de conocimiento. Sánchez (2021, comunicación personal) mencionó además que el intercambio de información entre instituciones académicas de ambos

lados de la frontera es limitado, lo que promueve la competencia en lugar de la cooperación. Para aumentar la cooperación y la capacidad adaptativa de los responsables de la toma de decisiones en la gestión del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco, se recomienda mejorar los intercambios de información y los esfuerzos de conocimiento. Esto puede lograrse reforzando los mecanismos existentes y estableciendo una estructura de normas generales. El Portal de Acuíferos Transfronterizos, gestionado conjuntamente por la Universidad A&M de Texas y el IMTA, es un ejemplo de mecanismo existente que podría reforzarse estableciendo una estructura de normas generales que haga hincapié en la transparencia y la cooperación.

La gobernanza de los acuíferos transfronterizos existe en la interfaz de escalas institucionales y jurisdiccionales multinivel. La revisión sistemática puso de relieve la importancia de una estructura administrativa adecuada al contexto para satisfacer las necesidades de gestión de un acuífero transfronterizo. El principal resultado para desarrollar una mayor cooperación fue la creación de un órgano de gobierno específico del acuífero, que en los estudios de caso aparecía como un comité o una comisión. Un órgano de gobierno específico de un acuífero puede reunir diferentes centros de autoridad que existen a distintos niveles. Tomemos como ejemplo el mecanismo de cooperación para el SASS. Este mecanismo está compuesto por agencias departamentales nacionales y un centro regional apolítico de investigación científica. Un órgano de gobierno del acuífero es un ejemplo de mecanismo de coordinación emergente y, por lo tanto, coherente con el concepto de gobernanza policéntrica.

Las reglas y normas establecidas para crear e informar las acciones de los órganos de gobierno determinan el espacio cooperativo y la capacidad adaptativa del régimen de gobernanza del acuífero. Por ejemplo, la estructura normativa del comité de Saq Ram prohíbe su capacidad para establecer normas en torno a la cuestión políticamente controvertida de la extracción, pero ha permitido con éxito al comité tomar decisiones para disminuir la contaminación del acuífero. De este modo, el comité ha conseguido aumentar la capacidad adaptativa de la gestión de los acuíferos, ya que la calidad del agua, y no la sobreexplotación, se consideraba el mayor reto de los recursos.

La CILA/IBWC, como institución binacional existente para la gestión del agua, sería un candidato ideal para liderar la creación y coordinación de comités de acuíferos transfronterizos. En la actualidad, la CILA/IBWC tiene un mal ajuste institucional para abordar los retos relacionados con los acuíferos. Aunque las estructuras de las normas generales sugieren

claramente que los comités contribuyen a mejorar la capacidad de adaptación, las capacidades institucionales de estos comités deben ser adecuadas para la gestión de los acuíferos. En la siguiente sección, se revisará y debatirá con más detalle la cuestión del ajuste institucional y la forma en que el CILA/IBWC podría contribuir a una gobernanza policéntrica funcional.

La existencia de recursos humanos y financieros para apoyar el funcionamiento institucional también fue un elemento clave identificado en la revisión sistemática. Los recursos proporcionan a los centros de decisión en una configuración policéntrica la capacidad de colaborar (Koontz, 2019). Las fuentes múltiples para la provisión de recursos también son un factor crucial en los procesos de colaboración, ya que permiten asociaciones más sólidas y una diversidad de soluciones (Koontz, 2019). La Tabla 3 presentó la multiplicidad en número y función de las organizaciones internacionales que participaron en esfuerzos colaborativos exitosos para la gobernanza de acuíferos transfronterizos en los estudios de caso examinados. Una asignación de recursos sólida y sostenible debe ser una prioridad para los centros de toma de decisiones involucrados en la gobernanza de acuíferos transfronterizos. Para lograr una asignación de recursos sostenible, debe mantenerse la continuidad en el interés político. La continuidad también desempeña un papel clave en el refuerzo de la funcionalidad a través de un mayor ajuste institucional. Las conexiones entre el apoyo financiero y los desajustes escalares se explorarán en la siguiente sección.

Los resultados de la revisión sistemática sugieren que las estructuras de reglas formalizadas en la gobernanza de los acuíferos transfronterizos tienen un alto grado de interconectividad con otras condiciones habilitadoras necesarias para aumentar la capacidad adaptativa. Las áreas temáticas presentadas se relacionan con dos condiciones habilitadoras adicionales, a saber, los centros de toma de decisiones participan en vínculos entre escalas u otros mecanismos de deliberación y aprendizaje, y dentro de un sistema existe una variedad de mecanismos formales e informales para la resolución de conflictos. Este hallazgo es coherente con el marco teórico desarrollado por Carlisle y Gruby (2017), quienes sostienen que "hay una superposición sustancial entre los atributos y las condiciones propicias que apoyan"(p. 936) las ventajas de la gobernanza policéntrica funcional.

La comunicación eficaz es un elemento central para cultivar vínculos a escala cruzada. Como señalan Carlisle y Gruby (2017, p. 938)

si no hubiera intercambio de información entre los centros de toma de decisiones, cada uno tendría que aprender por su cuenta mediante procesos de ensayo y error sin la ventaja de saber qué políticas instituidas por otros pueden haber tenido éxito o haber fracasado. Un enfoque de este tipo podría socavar la capacidad del sistema de gobernanza para adaptarse al ritmo del cambio.

En la revisión sistemática, la comunicación como área temática se basa en el área temática del conocimiento, la ciencia y la información al destacar la necesidad de compartir la información con todos los responsables de la toma de decisiones pertinentes. La participación de los numerosos responsables de la toma de decisiones que ejercen autoridad sobre el Valle de Juárez-Bolsón del Hueco es el alma del régimen de gobernanza policéntrica. Las variaciones entre jurisdicciones dentro y entre México y los Estados Unidos "fuerzan procesos de toma de decisiones sobre el agua que implican consultas y resolución de problemas con todas las partes interesadas" (Felbab-Brown, 2020). La participación de una amplia variedad de actores que representan diferentes centros de toma de decisiones es crucial para mejorar la capacidad adaptativa (Carlisle y Gruby, 2017). Debe hacerse hincapié en el desarrollo de interacciones y cooperación entre actores que existen a diferentes escalas y entre actores que existen a la misma escala (Berkes, 2002; Carlisle y Gruby, 2017; Heikkila et al., 2011). El Portal de Aguas Transfronterizas, mencionado anteriormente en el debate sobre el intercambio de información, es un ejemplo de cooperación trans-escalar que reúne a una institución académica estatal y a una agencia gubernamental nacional para gestionar información pertinente para la gestión de acuíferos transfronterizos.

Además, la presencia (o ausencia) de mecanismos de resolución de conflictos (detallados en el área temática de estructura administrativa) conecta directamente con la condición habilitadora que establece una variedad de mecanismos formales e informales para la resolución de conflictos dentro de un sistema. La revisión sistemática reveló que los mecanismos integrados para la resolución de conflictos pueden variar en su forma, desde procesos altamente formalizados (como las vías de litigación) hasta declaraciones más informales (como las prácticas de buena fe). Para mejorar la capacidad adaptativa y lograr una gobernanza policéntrica funcional, los responsables de la toma de decisiones en la región fronteriza México-Estados Unidos tendrán que decidir si las actuales vías de resolución de conflictos hídricos creadas por los tratados de aguas deben ampliarse para resolver los conflictos relacionados con las aguas

subterráneas, o si es necesario prever nuevos mecanismos de resolución de conflictos. Las recientes sequías en la cuenca del Río Bravo sugieren que los tratados actuales pueden no ser capaces de resolver conflictos prolongados relacionados con fenómenos climáticos más extremos (Felbab-Brown, 2020). Por lo tanto, la información precisa y confiable relacionada con los impactos locales del cambio climático, tanto a escala del acuífero como regional, será de vital importancia al momento de desarrollar marcos de resolución de conflictos sostenibles a largo plazo.

El acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco, al carecer de un mecanismo de resolución de conflictos o de una estructura de reglas generalmente acordada, se encuentra en una encrucijada para la gobernanza policéntrica funcional. Aunque los estudios de caso analizados en la revisión sistemática tenían una estructura de reglas codificadas, un tratado formal para la gobernanza binacional del acuífero no es la única opción presente para el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco. Sánchez y Eckstein (2020) descubrieron que un acuerdo binacional formal sólo era deseado por el 30% de las partes interesadas entrevistadas en México y Texas. Sin embargo, el 69% de las partes interesadas coincidieron en que alguna forma de cooperación institucional era preferible a la situación actual (Sánchez y Eckstein, 2020). Esta cooperación institucional puede lograrse implementando los factores inductores de cooperación encontrados en la revisión sistemática.

Además, la identificación de los principales retos y obstáculos para los esfuerzos de cooperación pone de manifiesto los escollos comunes en la gobernanza policéntrica de los acuíferos transfronterizos y puede ayudar a orientar a los responsables de la toma de decisiones hacia un régimen más funcional. Por ejemplo, en los casos analizados, los responsables de la toma de decisiones se enfrentaron a menudo a problemas relacionados con la fragmentación institucional. A través del marco de la gobernanza policéntrica, la fragmentación institucional puede entenderse no como la existencia de múltiples centros de toma de decisiones en competencia, sino como un desajuste escalar entre las instituciones y los límites del acuífero. En el caso del acuífero ginebrino, las diferencias en los regímenes de derechos de propiedad de Francia y Suiza provocan un desajuste jurisdiccional cuando las autoridades tratan de ejercer el control sobre un acuífero transfronterizo. El conflicto surge, por tanto, de la falta de alineación escalar, no de la suma total de autoridades implicadas. Analizando los retos generales a los que se enfrenta la gestión de los acuíferos transfronterizos y los retos específicos del Valle de Juárez-

Bolsón del Hueco a través del marco teórico de la gobernanza policéntrica funcional, los retos pueden comprenderse mejor y reformularse en acciones para aumentar la capacidad adaptativa y el ajuste institucional.

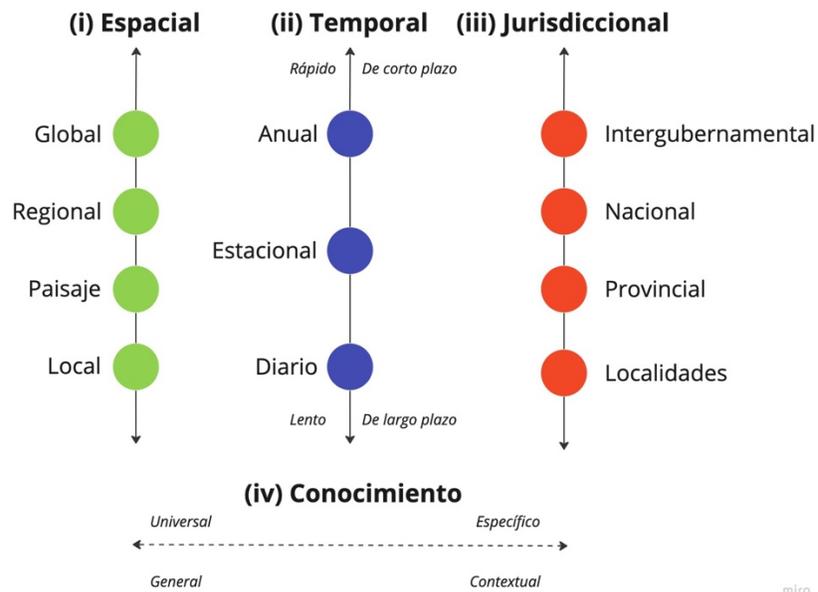
## 6.2 Ajuste institucional: cooperación entre escalas

La segunda gran ventaja de un régimen de gobernanza policéntrica funcional es la presencia de un buen ajuste institucional. El ajuste institucional se refiere a la "coincidencia o congruencia entre una institución y el problema o necesidad que debe abordar" (Carlisle y Gruby, 2017, p. 941). Las instituciones con un buen ajuste institucional "pueden ser más sólidas y eficaces a la hora de lograr el resultado deseado", como una gestión más sostenible de los recursos (Carlisle y Gruby, 2017, p. 941). Sin embargo, en el caso de la gobernanza de acuíferos transfronterizos, el ajuste institucional es difícil de lograr debido a los desajustes entre el alcance institucional y las características del acuífero. Cash et al. (2006) atribuyen la dificultad de la gobernanza policéntrica en el contexto de las aguas subterráneas a desajustes escalares en los que "la autoridad o jurisdicción de la institución de gestión no coincide con el problema". Ostrom et al. (1961) describió un ejemplo de un problema de gobernanza no contiguo y utilizó el ejemplo del smog para demostrar cómo los límites políticos de la ciudad de Pasadena, California, no abarcaban un área suficiente para controlar las variables sociales y meteorológicas que contribuyen a la contaminación atmosférica, lo que provocaba un desajuste escalar en el régimen de gobernanza de los contaminantes ambientales (Carlisle y Gruby, 2017).

Diversos autores han previsto diferentes escalas en las que pueden producirse desajustes no contiguos. Cleveland et al. (1996) afirma que la falta de conexiones, cuando los vínculos de toma de decisiones entre escalas son ineficaces, o las escalas incorrectas de información, cuando las decisiones se basan en información agregada a una escala equivocada, son fuentes que producen desajustes escalares. Cummings et al. (2006) afirman que los desajustes entre los sistemas sociales y ecológicos pueden ser espaciales, temporales o funcionales. Cash et al. (2006) plantean que los desajustes pueden ser temporales, espaciales, jurisdiccionales, institucionales, de gestión, de redes o basados en el conocimiento.

Esta tesis, utilizando el marco de Cash et al. (2006), argumenta que los acuíferos transfronterizos en la región fronteriza México-Estados Unidos experimentan desajustes en cuatro de las siete escalas socio-ecológicas posibles. Los desajustes clave para la gestión de las

aguas subterráneas están presentes en el espacio, el tiempo, la jurisdicción y la capacidad de conocimiento. La figura 52 (adaptada de Cash et al. (2006)) proporciona una representación visual de los niveles presentes en estas cuatro escalas de las que surgen los desajustes.



**Figura 52** Las cuatro escalas socio-ecológicas en las cuales el régimen de gobernanza policéntrica para el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco experimentan desajustes (Elaboración propia con información adaptada de Cash et al., 2006).

Los acuíferos son recursos intrínsecamente locales. Su composición depende de atributos específicos de la geología y la hidrología locales. Al traspasar las fronteras políticas, los acuíferos transfronterizos se desajustan en el espacio, ya que los límites físicos del acuífero ya no coinciden con los límites sociales para su gestión. Esto puede verse en los impactos del bombeo intensivo en Ciudad Juárez. La elevada tasa de extracción de aguas subterráneas en Ciudad Juárez en la década de 1990 alteró el gradiente local del acuífero que el agua seguía fuera de la zona situada bajo El Paso (Heywood y Yager, 2003). Este cambio de gradiente repercutió en las tasas y el coste de las extracciones en Texas, pero las autoridades municipales de El Paso no fueron capaces de abordar directamente el problema porque estaba motivado por las extracciones del otro lado de la frontera.

Los desajustes temporales se producen cuando el tiempo de respuesta social a los problemas ecológicos es demasiado lento o las decisiones de gestión carecen de coherencia y continuidad en el tiempo (Cumming et al., 2006). Zekster y Everett (2004) señalan que los cambios en los sistemas dependientes de los acuíferos pueden ser lentos y, por tanto, pasar

desapercibidos. Por lo tanto, las políticas de gestión pueden estar desajustadas en duración con las funciones clave de los acuíferos. El desajuste temporal experimentado por el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco en particular, y por los acuíferos transfronterizos en general, es coherente con las conclusiones de la revisión sistemática. La falta de voluntad política, de interés y de priorización de los acuíferos transfronterizos fue uno de los principales retos identificados en los casos revisados y afecta directamente a la continuidad de las decisiones a lo largo del tiempo. La Ley de Evaluación de Acuíferos Transfronterizos Estados Unidos-México es un ejemplo ilustrativo de desajuste de escalas. En este caso, la decisión de gestión careció de continuidad en el tiempo porque las actividades realizadas en el marco de la ley sólo recibieron una fracción del presupuesto total prometido. Los años en los que el presupuesto federal no asignó fondos a las actividades realizadas en virtud de la ley ponen de manifiesto la falta de interés político y de priorización de la investigación de los acuíferos transfronterizos en esos momentos. Debido a la falta de continuidad y consistencia en el financiamiento, no se terminaron análisis que habrían incrementado en gran medida el conocimiento disponible sobre las funciones clave y el panorama institucional del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco.

El acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco también experimenta desajustes jurisdiccionales. Estos desajustes escalares se producen cuando la autoridad administrativa de un centro de toma de decisiones no coincide con el acuífero. La CILA/IBWC, la principal institución binacional para el agua, experimenta desajustes jurisdiccionales con los acuíferos transfronterizos porque los tratados de agua compartidos entre México y los Estados Unidos que establecen el ámbito legal de la CILA/IBWC no mencionan las aguas subterráneas. Un comité o comisión de acuíferos, como recomienda la revisión sistemática, lograría un mejor ajuste institucional al alinear jurisdiccionalmente a las autoridades encargadas de la toma de decisiones con el sistema de acuíferos.

Para el Valle de Juárez-Bolsón del Hueco, existen dos opciones para desarrollar un mejor ajuste jurisdiccional: (i) ampliar el alcance jurisdiccional de la CILA/IBWC mediante la revisión de los tratados binacionales sobre el agua o (ii) adaptar y ampliar el modelo de la CILA/IBWC para crear una comisión binacional única para los acuíferos transfronterizos. La primera opción podría lograrse mediante la revisión de los tratados de aguas para incluir las aguas subterráneas transfronterizas o mediante una interpretación ampliada de la autoridad jurisdiccional de las aguas subterráneas lograda a través de litigios. En cuanto a la segunda opción, podría crearse una

institución binacional de estructura similar a la CILA/IBWC pero con un mandato en materia de aguas subterráneas. Esta opción sería similar a la estructura de la Comisión del Acuífero Guaraní. En ese caso, la comisión se estableció utilizando el marco de la actual comisión del Río de la Plata, cuya estructura es paralela a la de la CILA/IBWC (formada por representantes políticos y expertos en gestión del agua de cada Estado miembro, pero no por autoridades o ministerios nacionales). En cualquier caso, la comisión debería seguir el modelo utilizado para el SASS y el ITTAS, en cuya estructura se incorpora una institución de investigación neutral.

Por último, el régimen de gobernanza policéntrica para el acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco experimenta desajustes escalares de conocimiento. Los desajustes de conocimiento se producen cuando la escala de lo que se conoce no coincide con la escala a la que se toman las decisiones (Cash et al., 2006; Kates et al., 2001). Los desajustes de conocimientos desempeñan un papel fundamental a la hora de evaluar el impacto del cambio climático en la toma de decisiones políticas binacionales. Como suele ocurrir en el caso del cambio climático, los conocimientos científicos a gran escala tienen poca relevancia para los responsables locales de la toma de decisiones (Cash et al., 2006). La modelización climática realizada en el capítulo 4 supone una contribución clave a los esfuerzos por disminuir la prevalencia de los desajustes en el conocimiento a gran escala que afectan a la gobernanza del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco. De hecho, la modelización aborda exactamente la cuestión presentada por Cash et al. (2006) al tomar modelos globales del CMIP6 y utilizar el análisis geoespacial para determinar los impactos locales. Los resultados de la modelización climática proporcionan información clave sobre la magnitud y distribución de los cambios potenciales que podrían abordar los centros locales de toma de decisiones.

Por ejemplo, los mapas generados por el análisis que muestran la distribución espacial de los cambios de temperatura. Estos mapas ponen de relieve un punto clave para los responsables de la toma de decisiones: el calentamiento climático afecta a las zonas urbanas de forma diferente que a las rurales. En el caso de acuíferos como el del Valle Juárez-Bolsón del Hueco, que sustenta las zonas metropolitanas de Ciudad Juárez-El Paso, así como zonas agrícolas lucrativas, los impactos geográficos dispares pueden cambiar el carácter del propio acuífero, poniendo en entredicho su sostenibilidad a largo plazo. Los modelos indican que las temperaturas aumentarán en mayor valor absoluto en Ciudad Juárez-El Paso en comparación con las zonas agrícolas circundantes. Los estudios presentados en el capítulo 5 proporcionan pruebas

convincientes de la conexión entre el aumento de la temperatura urbana y el consumo municipal de agua. Dado que los municipios de Ciudad Juárez y El Paso son los mayores consumidores de agua del acuífero del Valle de Juárez-Bolsón del Hueco, las políticas de gestión del acuífero deberían diseñarse juntamente con los esfuerzos de adaptación urbana. En este caso, los mapas disminuyen el desajuste de conocimiento escalar al proporcionar evidencia para la incorporación de los centros de toma de decisiones responsables del desarrollo urbano en el régimen de gobernanza policéntrica para la gestión de acuíferos transfronterizos. Como señalan Matson et al. (2010), la comprensión de la ciencia que proporcionan los modelos cuantitativos "permite a los responsables de la toma de decisiones situar el cambio climático en el contexto de otros retos mayores" (p. 1).

Los resultados temporales y espaciales presentados en el capítulo 4 indican que, incluso con una intervención agresiva, la zona dependiente del acuífero del Valle de Juárez-Bolsón del Hueco será más cálida a finales de siglo. Para las escalas de tiempo de fin de siglo, el calentamiento en la región fronteriza tiene el potencial de ser mayor que los promedios globales, lo que sugiere que las políticas nacionales de mitigación y adaptación pueden no ser lo suficientemente ambiciosas para frenar los impactos locales. El conocimiento especializado de los impactos locales del cambio climático ayuda a modificar las pautas de participación y asignación de esfuerzos de los centros de toma de decisiones para que se relacionen mejor con los cambios en todo el sistema (Vantaggiato y Lubell, 2022). Por lo tanto, la elaboración de modelos contextualizados localmente es crucial para crear entornos propicios para el desarrollo de políticas binacionales sobre acuíferos que tengan en cuenta los impactos del cambio climático.

Del mismo modo, el modelo de SD presentado en el capítulo 5 contribuye al desarrollo de condiciones habilitadoras para un régimen de gobernanza policéntrica más funcional al proporcionar una metodología para comprender las conexiones entre el conocimiento escalar y los desajustes temporales escalares. Cash et al. (2006) reconocen que las estrategias para lograr un mayor ajuste institucional abordarán la compleja dinámica que surge de las interacciones dentro de las escalas y entre ellas. Los modelos SD son herramientas eficaces para los responsables de la toma de decisiones, ya que pueden describir la complejidad dinámica mediante visualizaciones y herramientas matemáticas. También son eficaces para evaluar la coherencia y la continuidad, ya que la metodología se diseñó específicamente para comprender cómo las decisiones políticas se ven afectadas por los cambios a lo largo del tiempo (Forrester,

1961). El ejercicio de modelización ayuda a generar una nueva comprensión de la función del sistema e ilumina las áreas en las que sigue habiendo desajuste de conocimientos escalares (véase el cuadro 11). En el caso del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco, abordar el desajuste de escalas a través de la modelación de políticas con base local puede ser el primer paso en el proceso de alinear el ajuste institucional y fomentar una gobernanza policéntrica más funcional. Sánchez y Eckstein (2020) descubrieron que la mayoría de las partes interesadas de la región fronteriza entre Estados Unidos y México eran partidarias de desarrollar y probar modelos locales y regionales antes de invertir en mecanismos de cooperación más formalizados.

Los regímenes de gobernanza policéntrica tienen una mayor capacidad para responder a los retos derivados y desencadenados por el cambio climático (Pahl-Wostl y Knieper, 2014). Por lo tanto, el marco teórico de la gobernanza policéntrica proporciona una forma útil de entender el impacto del cambio climático en la gestión binacional de los acuíferos compartidos entre México y Estados Unidos. Utilizando el concepto de gobernanza policéntrica funcional desarrollado por Carlisle y Gruby (2017), se puede considerar que los resultados de esta tesis contribuyen a la comprensión de las condiciones habilitadoras para producir una mayor capacidad adaptativa y ajuste institucional. Deben dedicarse más acciones y estudios a comprender las opciones para desbloquear todas las ventajas de un régimen de gobernanza policéntrica. Se espera que el análisis aportado por esta tesis contribuya al creciente corpus de trabajo sobre acuíferos transfronterizos y los retos y oportunidades específicos de gobernanza que contribuyen a su gestión sostenible.

# Referencias

- Abdo, G. Shigidi, A., & Salih, A. (Eds.). (2021). *Science Role in the Sustainable Management of Transboundary Groundwater Basins in the Sudan: Case of the Baggara Basin*. ISARM 2021 2nd International Conference. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380029>
- Abdi-Dehkordi, M., Bozorg-Haddad, O., Salavitabar, A., & Goharian, E. (2021). Developing a sustainability assessment framework for integrated management of water resources systems using distributed zoning and system dynamics approaches. *Environment, Development and Sustainability*, 23, 16246-16282. [https://www.researchgate.net/publication/350356092\\_Developing\\_a\\_sustainability\\_assessment\\_framework\\_for\\_integrated\\_management\\_of\\_water\\_resources\\_systems\\_using\\_distributed\\_zoning\\_and\\_system\\_dynamics\\_approaches](https://www.researchgate.net/publication/350356092_Developing_a_sustainability_assessment_framework_for_integrated_management_of_water_resources_systems_using_distributed_zoning_and_system_dynamics_approaches)
- Aggarwal, R. M., Guhathakurta, S., Grossman-Clarke, S., & Lathey, V. (2012). How do variations in Urban Heat Islands in space and time influence household water use? The case of Phoenix, Arizona. *Water Resources Research*, 48(6). <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2011WR010924>
- Agreement #1 Terms of Reference for the Monitoring and Exchange of Groundwater Information of the Nubian Sandstone Aquifer System. (2000). <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/int39094E.pdf>
- Agreement #2 Terms of Reference for Monitoring and Data Sharing. (2000). <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/int39095E.pdf>
- Albrecht, T.R., Varady, R.G., Zuniga-Teran, A.A., Gerlak, A.K., De Grenade, R.R., Lutz-Ley, A., Martín, F., Megdal, S.B., Meza, F., Ocampo Meglar, D., Pineda, N., Rojas, F., Taboada, R., & Willems, B. (2018). Unraveling transboundary water security in the arid Americas. *Water International*, 43(8), 1075-1113. <https://doi.org/10.1080/02508060.2018.1541583>
- Albright, J.S., Ashworth, P.G., & Herrera, J. (2016). *2016 Far West Texas Water Plan*. Far West Texas Water Planning Group. [http://www.twdb.texas.gov/waterplanning/rwp/plans/2016/E/Region\\_E\\_2016\\_RWP.pdf](http://www.twdb.texas.gov/waterplanning/rwp/plans/2016/E/Region_E_2016_RWP.pdf)
- Alley, W.M. (2013). *Five-Year Interim Report of the United States-Mexico Transboundary Aquifer Assessment Program: 2007-2012*. United States Geological Survey.
- Amore, L. (2011). The Guarani Aquifer: From Knowledge to Water Management. *International Journal of Water Resources Development*, 27(3), 463-476. <https://doi.org/10.1080/07900627.2011.593125>
- Amore, L., & Tröger, U. (Eds.). (2010). *Transboundary Guarani Aquifer System and Groundwater Management Mechanisms*. ISARM 2010 International Conference. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000211661>
- Ansell, T., & Cayzer, S. (2018). Limits to growth redux: a system dynamics model for assessing energy and climate change constraints to global growth. *Energy Policy*, 120, 514-525. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.05.053>
- Averchenkova, A., & Guzman Luna, S.L. (2018). *Mexico's General Law on Climate Change: Key achievements and challenges ahead*. The Centre for Climate Change Economics and Policy. [https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/wp-content/uploads/2018/11/Policy\\_report\\_Mexico%E2%80%99s-General-Law-on-Climate-Change-Key-achievements-and-challenges-ahead-29pp\\_AverchenkovaGuzman-1.pdf](https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/wp-content/uploads/2018/11/Policy_report_Mexico%E2%80%99s-General-Law-on-Climate-Change-Key-achievements-and-challenges-ahead-29pp_AverchenkovaGuzman-1.pdf)
- Baba Sy, M.O. (Eds.). (2010). *Tools for the Management of Large Transboundary Aquifers: OSS*

- Experience*. ISARM 2010 International Conference.  
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000211661>
- Baba Sy, M.O., Dodo, A.K., & Tossou, J. (Eds.). (2021). *Conjunctive management of water resources and governance of transboundary aquifers of Iullemeden-Taoudeni/Tanezrouft (ITTAS)*. ISARM 2021 2nd International Conference. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380029>
- Bala, B. K., Arshad, F. M., & Noh, K. M. (2017). *System Dynamics Modelling and Simulation*. Springer Texts in Business and Economics. <https://link-springer-com.pbidi.unam.mx:2443/book/10.1007/978-981-10-2045-2>
- Balali, H., & Viaggi, D. (2015). Applying a Systems Dynamics Approach for Modeling Groundwater Dynamics to Depletion under Different Economical and Climate Change Scenarios. *Water*, 7, 5258-5271. <https://www.mdpi.com/2073-4441/7/10/5258>
- Balling, R., & Gober, P. (2007). Climate Variability and Residential Water Use in the City of Phoenix, Arizona. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46(7), 1130-1137.  
[https://www.researchgate.net/publication/249603312\\_Climate\\_Variability\\_and\\_Residential\\_Water\\_Use\\_in\\_the\\_City\\_of\\_Phoenix\\_Arizona](https://www.researchgate.net/publication/249603312_Climate_Variability_and_Residential_Water_Use_in_the_City_of_Phoenix_Arizona)
- Barati, A. A., Azadi, H., & Scheffran, J. (2019). A system dynamics model of smart groundwater governance. *Agricultural Water Management*, 22, 502-518.  
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.047>
- Bates, G., Beruvides, M., & Fedler, C. B. (2019). System Dynamics Approach to Groundwater Storage Modeling for Basin-Scale Planning. *Water*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/w11091907>
- Batista da Silva, L. P., & Hussein, H. (2019). Production of scale in regional hydropolitics: An analysis of La Plata River Basin and the Guarani Aquifer System in South America. *Geoforum*, 99, 42-53.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2018.11.019>
- Bear, J. (1979). *Hydraulics of Groundwater*. McGraw-Hill International Book Company.
- Berkes, F. (2002). Cross-Scale Institutional Linkages: Perspectives from the Bottom Up. In E. Ostrom, T. Dietz, N. Dolšák, P.C. Stern, S. Stonich, & E. U. Weber. (Eds.), *The Drama of the Commons*, (pp. 293-321). National Academy Press.
- Berkes, F., Colding, J., & Folke, C. (2003). *Navigating social-ecological systems: building resilience for complexity and change*. Cambridge University Press.  
<http://dx.doi.org/10.1017/CBO9780511541957>
- Bierkens, M.F.P., & Wada, Y. (2019). Non-renewable groundwater use and groundwater depletion: a review. *Environmental Research Letters*, 14(6). <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab1a5f>
- Binder, C.R., Hinkel, J., Botes, P.W.G., & Pahl-Wostl, C. (2013). Comparison of Frameworks for Analyzing Social-ecological Systems. *Ecology and Society*, 18(4), 26.  
<http://dx.doi.org/10.5751/ES-05551-180426>
- Blackman, A., Batz, M.B., Evans, D.A. (2004). *Maquiladoras, Air Pollution, and Human health in Ciudad Juarez and El Paso*. Resources for the Future.  
<https://ageconsearch.umn.edu/record/10807>
- Blythe, T. L. & Schmidt, J. C. (2018). Estimating the Natural Flow Regime of Rivers With Long-Standing Development: The Northern Branch of the Rio Grande. *Water Resources Research*, 54(2), 1212-1236. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2017WR021919>
- Botello Mares, A., & Cervera Gómez, L. E. (2018). Dispersión urbana: impacto en la seguridad pública.

- Ciudades*, 118, 52-55.  
[https://www.researchgate.net/publication/317370802\\_Dispersion\\_Urbana\\_en\\_Ciudad\\_Juarez\\_y\\_s\\_u\\_impacto\\_en\\_la\\_Seguridad\\_Publica](https://www.researchgate.net/publication/317370802_Dispersion_Urbana_en_Ciudad_Juarez_y_s_u_impacto_en_la_Seguridad_Publica)
- Bouajila, R. (Eds.). (2021). International groundwater law and policy: case of the North Western Sahara Aquifer system project (Algeria, Tunisia and Libya). ISARM 2021 2nd International Conference. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380029>
- Brundtland, G.H. (1987) *Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development*. Geneva, UN-Dokument A/42/427.  
<https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>
- Budhathoki, P., Doser, D.I., Thapalia, A., Langford, R.P., & Avila, V.M. (2018). Geological and geophysical studies of the structure of and stratigraphy of the northwestern Hueco Bolson Aquifer, El Paso Texas. *Geosphere*, 14(2), 731-748.
- Burchi, S. (2018). Legal frameworks for the governance of international transboundary aquifers: Pre- and post-ISARM experience. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 20, 15-20.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.04.007>
- Burchi, S. y Mechlem, K. (2005). *Groundwater in international law Compilation of treaties and other legal instruments*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Bushnell, D. (2012). *Groundwater in New Mexico*. Utton Transboundary Resources Center.  
[https://digitalrepository.unm.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1004&context=utton\\_pubs](https://digitalrepository.unm.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1004&context=utton_pubs)
- Carlisle, K., & Gruby, R.L. (2017). Polycentric Systems of Governance: A Theoretical Model for the Commons. *Policy Studies Journal*, 47(4), 927-952.  
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/psj.12212>
- Carnohan, S. A., Clifford-Holmes, J. K., Retief, H., McKnight, U. S., & Pollard, S. (2021). Climate change adaptation in rural South Africa: Using stakeholder narratives to build system dynamics models in data-scarce environments. *Journal of Simulation*, 15(2), 5-22.  
<https://doi.org/10.1080/17477778.2020.1762516>
- Carter, N.T., Mulligan, S.P., & Seelke, C. R. (2017). *U.S.-Mexican Water Sharing: Background and Recent Developments*. Congressional Research Service. <https://fas.org/sgp/crs/row/R43312.pdf>
- Cash, D.W., Adger, W.N., Berkes, F., Garden, P., Lebel, L., Olsson, P., Pritchard, L., & Young, O. (2006). Scale and Cross-Scale Dynamics: Governance and Information in a Multilevel World. *Ecology & Society*, 11(2). <http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss2/art8/>
- Casillas-Higuera, A., García-Cueto, R., Leyva-Camacho, O., & Gonzalez-Navarro, F.F. (2013). Detección de la Isla Urbana de Calor mediante Modelado Dinámico en Mexicali, B.C., México. *Informacion Tecnologica*, 25(1), 139-150.  
[https://www.researchgate.net/publication/261401624\\_Deteccion\\_de\\_la\\_Isla\\_Urbana\\_de\\_Calor\\_m\\_ediante\\_Modelado\\_Dinamico\\_en\\_Mexicali\\_BC\\_Mexico](https://www.researchgate.net/publication/261401624_Deteccion_de_la_Isla_Urbana_de_Calor_m_ediante_Modelado_Dinamico_en_Mexicali_BC_Mexico)
- Cassuto, D.N. (2011). Keeping it Legal: Transboundary Management Challenges Facing Brazil and the Guarani. *Water International*, 36(5), 661-670. <http://digitalcommons.pace.edu/lawfaculty/792/>.
- Cassuto, D.N., & Sampai, R.S.R. (Eds.). (2010). Juggling Water: Transboundary Issues Facing the Guarani Aquifer. ISARM 2010 International Conference.  
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000211661>
- Caubet, C.G. (Eds.). (2010). *The Guarani Aquifer and its Systems: About Rules Profusion and Implementation Scarcity for Ground Waters*. ISARM 2010 International Conference.  
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000211661>

- Cavicchi, B. (2019). A “system dynamics perspective” of bioenergy governance and local, sustainable development. *Systems Research and Behavioral Science*, 37, 315-332.  
<https://doi.org/10.1002/sres.2631>
- City of El Paso. (2020). *Demographic Profile*.  
<https://www.elpasotexas.gov/economic-development/data-and-statistics/population/>
- Cleveland, C. Costanza, R., Eggertsson, T., Fortmann, L., Low, B., McKean, M., Ostrom, E., Wilson, J., & Young, O. (1996). A Framework for Modeling the Linkages Between Ecosystems and Human Systems. Beijer Discussion Paper, 76.  
[https://dlc.dlib.indiana.edu/dlc/bitstream/handle/10535/3626/a\\_framework\\_for\\_modeling\\_the\\_linkages\\_between\\_ecosystems\\_and\\_human\\_systems.pdf?sequence=1](https://dlc.dlib.indiana.edu/dlc/bitstream/handle/10535/3626/a_framework_for_modeling_the_linkages_between_ecosystems_and_human_systems.pdf?sequence=1)
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2020). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Juárez (0833) Estado de Chihuahua*. Subdirección General Técnica Gerencia de Aguas Subterráneas.  
[https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos\\_Acuiferos\\_18/chihuahua/DR\\_0833.pdf](https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/chihuahua/DR_0833.pdf)
- Comisión Nacional de Agua Subdirección General Técnica. (2015). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Conejos-Médanos (0823), Estado de Chihuahua*. CONAGUA. [https://transboundary.tamu.edu/media/1229/conagua\\_conejosmedanos.pdf](https://transboundary.tamu.edu/media/1229/conagua_conejosmedanos.pdf)
- Comisión Nacional de Agua Subdirección General Técnico. (2021). Acuíferos (nacional) [Sistema de Información Geográfica].  
<http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=acuiferos&ver=mapa&o=2&n=naciona>
- Community of the Annemassienne region, Community of the Genevois Rural Districts, Rural District of Viry & Republic and Canton of Geneva. (2008). *Convention relative à la protection, à l'utilisation, à la réalimentation et au suivi de la nappe souterraine franco-suisse du Genevois*.  
<https://www.internationalwaterlaw.org/documents/regionaldocs/franko-swiss-aquifer.html>
- Constitution of the United States. (1787). <https://www.archives.gov/founding-docs/constitution-transcript>
- Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. (1917).  
[http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/1\\_110321.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/1_110321.pdf)
- Conti, K. (2014). *Factors Enabling Transboundary Aquifer Cooperation*. IGRAC.  
<https://www.un-igrac.org/sites/default/files/resources/files/Factors%20Enabling%20Transboundary%20Aquifer%20Cooperation.pdf>
- Conti, K. I., & Gupta, J. (2014). Protected by pluralism? Grappling with multiple legal frameworks in groundwater governance. *Environmental Sustainability*, 11, 39-47. <https://www.un-igrac.org/resource/protected-pluralism-grappling-multiple-legal-frameworks-groundwater-governance>
- Conti, K.I., Velis, M., Anoniou, A., Nijsten, G.J. (2016). *Groundwater in the Context of the Sustainable Development Goals: Fundamental Policy Considerations*. GSDR 2016 Update. [https://www.un-igrac.org/sites/default/files/resources/files/1042871\\_Conti%20et%20al.\\_Groundwater%20in%20the%20Context%20of%20the%20Sustainable%20Development%20Goals-Fundamental%20Policy%20Considerations.pdf](https://www.un-igrac.org/sites/default/files/resources/files/1042871_Conti%20et%20al._Groundwater%20in%20the%20Context%20of%20the%20Sustainable%20Development%20Goals-Fundamental%20Policy%20Considerations.pdf)
- Contreras Cardosa, A., Salas Plata Mendoza, J.A., Velásquez Angulo, G., & Quevedo Urías, H. (2008). Determinación de la Isla de Calor Urbano en Ciudad Juárez Mediante Programa de Cómputo. *Culeyt*, 5(26). <https://revistas.uacj.mx/ojs/index.php/culeyt/article/view/393/373>
- Cooley, H., & Gleick, P.H. (2010). Climate-proofing transboundary water agreements. *Hydrological*

- Sciences Journal*, 56(4). <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.576651>
- Cumming, G.S., Cumming, D.H.M., & Redman, C.L. (2006). Scale Mismatches in Social-Ecological Systems: Causes, Consequences, and Solutions. *Ecology & Society*, 11(1).  
<https://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss1/art14/>
- Da Silveira, A.R., & Richards, K.S. (2013). The Link Between Polycentrism and Adaptive Capacity in River Basin Governance Systems: Insights from the River Rhine and the Zhujiang (Pearl River) Basin. *Annals of the Association of American Geographers*, 103(2), 319-329. <https://eds-p-ebshost-com.pbidi.unam.mx:2443/eds/pdfviewer/pdfviewer?vid=2&sid=33d1e9dd-f077-421c-8615-2ed1cc33e441%40redis>
- Davis, S.K. (2001). The politics of water scarcity in the Western states. *The Social Science Journal*, 38, 527-542.
- Davis, M.E., & Leggat, E.R. (1963). *Preliminary results of the investigation of the saline-water resources in the Hueco Bolson near El Paso, Texas*. United States Geological Survey.  
<https://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr6779>
- de Cossío Klüver, M. A. (2019). Un recurso natural invisible: los acuíferos transfronterizos. *Agenda Internacional*, 25(37), 137-157.
- de Graaf, I.E.M., Gleeson, T., van Beek, L.P.H., Sutanudjaja, E.H., & Bierkens, M.F.P. (2019). Environmental flow limits to global groundwater pumping. *Nature*, 574, 90-94.  
<https://www.nature.com/articles/s41586-019-1594-4>
- de los Cobos, G. (Eds.). (2010). *The Transboundary Aquifer of the Geneva Region (Switzerland and France)*. ISARM 2010 International Conference.  
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000211661>
- de los Cobos, G. (2015). A historical overview of Geneva's artificial recharge system and its crisis management plans for future usage. *Environmental Earth Science*, 73, 7825-7831.  
<https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-014-3575-0>
- de los Cobos, G. (2018). The Genevese transboundary aquifer (Switzerland-France: The secret of 40 years of successful management. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 20, 116-127.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214581817302665?via%3Dihub>
- Derouane, J., Larbes, A., Bouchama, F., & Triolet, N. (Eds.). (2021). *Towards a sustainable management of the groundwater resources of the north western Sahara aquifer system in the Adrar region*. ISARM 2021 2nd International Conference. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380029>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2015). *ACUERDO por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de aguas nacionales subterráneas del Acuífero Valle de Juárez, clave 0833, en el Estado de Chihuahua, Región Hidrológico-Administrativa Río Bravo*. Secretaría de Gobernación. [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5404481&fecha=19/08/2015](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5404481&fecha=19/08/2015)
- Dimkic, D. (2020). Temperature Impact on Drinking Water Consumption. *Environ. Sci. Proc.*, 2(1).  
<https://doi.org/10.3390/environsciproc2020002031>
- Dinar, S., Green, O.O., McNally, A., Blankespoor, B. & Kurukulasuriya, P. (2010). Climate Change and State Grievances: The Resiliency of International River Treaties to Increased Water Variability. *Insights*, 3(22). [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=1928190](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1928190)
- Djabri, L., Hani, A., Djouama, M.C., Bouhsina, S., Murdy, J., & Pulido-Bosch, A. (Eds.). (2010). *Transboundary Resources and Good Neighborhood: Case of Joint Management of Fossil Water Layer in the South*. ISARM 2010 International Conference.  
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000211661>

- Dodo, A., & Baba Sy, M.O. (Eds.). (2010). *Towards a Concerted Management of Hydrogeological Risks in the Iullemeden Aquifer System*. ISARM 2010 International Conference. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000211661>
- Dopavogui, J. (Eds.). (2021). *Law reinforcement and hydrogeological database development for groundwater and transboundary aquifers assessment: case of the Republic of Guinea*. ISARM 2021 2nd International Conference. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380029>
- DuMars, C.T. (1982). New Mexico Water Law: An Overview and Discussion of Current Issues. *Natural Resources Journal*, 22(4), 1045-1064. <https://digitalrepository.unm.edu/nrj/vol22/iss4/25>
- Duran-Encalada, J. A., Paucar-Caceres, A., Bandala, E. R., & Wright, G. H. (2017). The impact of global climate change on water quantity and quality: A system dynamics approach to the US-Mexican transborder region. *European Journal of Operational Research*, 256, 567-581. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2016.06.016>
- Earman, S., & Dettinger, M.D. (2011). Potential impacts of climate change on groundwater resources-A global review. *Journal of Water and Climate Change*, 2(4), 213-229. [https://www.researchgate.net/publication/236626868\\_Potential\\_impacts\\_of\\_climate\\_change\\_on\\_groundwater\\_resources\\_-\\_A\\_global\\_review](https://www.researchgate.net/publication/236626868_Potential_impacts_of_climate_change_on_groundwater_resources_-_A_global_review)
- Eckstein, G. (2007). *Arrangement on the Protection, Utilization, and Recharge of the Franko-Swiss Genevese Aquifer*. International Water Law Project. <https://www.internationalwaterlaw.org/documents/regionaldocs/franko-swiss-aquifer.html>
- Eckstein, G. (Eds.). (2010). *Managing Hidden Treasures across Frontiers: The International Law of Transboundary Aquifers*. ISARM 2010 International Conference. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000211661>
- Eckstein, G., & Pramod, K. (2012, 27 de mayo). *The Future of Africa's Water Security*. International Water Law Project Blog. <https://www.internationalwaterlaw.org/blog/2012/05/27/the-future-of-africas-water-security/>
- Eckstein, G. (2015, 31 de agosto). *The Newest Transboundary Aquifer Agreement: Jordan and Saudi Arabia Cooperate Over the Al Sag/Al Disi Aquifer*. International Water Law Project Blog. <https://www.internationalwaterlaw.org/blog/2015/08/31/the-newest-transboundary-aquifer-agreement-jordan-and-saudi-arabia-cooperate-over-the-al-sag-al-disi-aquifer/>
- Eckstein, G. (2021, 17 de diciembre). Comunicación Personal [Entrevista].
- El Paso Water Utility (EPWU). (2018a). *Aquifer Recharge*. [https://www.epwater.org/our\\_water/water\\_resources/aquifer\\_recharge](https://www.epwater.org/our_water/water_resources/aquifer_recharge)
- El Paso Water Utility (EPWU). (2018b). *Water Resources*. [https://www.epwater.org/our\\_water/water\\_resources](https://www.epwater.org/our_water/water_resources)
- Eriksson, L. & Taylor, M. (n.d.). *The Environmental Impacts of the Border Wall Between Texas and Mexico*. University of Texas School of Law.
- Federal Water Pollution Control Act, Public Law 107-303. (2002). <https://www.epa.gov/sites/default/files/2017-08/documents/federal-water-pollution-control-act-508full.pdf>
- Felbab-Brown, V. (26 Octubre, 2020). Not dried up: US-Mexico water cooperation. The Brookings Institute. <https://www.brookings.edu/blog/order-from-chaos/2020/10/26/not-dried-up-us-mexico-water-cooperation/>
- Feng, L. H., Zhang, X. C., & Luo, G. Y. (2008). Application of system dynamics in analyzing the

- carrying capacity of water resources in Yiwe City, China. *Mathematics and Computers in Simulation*, 79(1), 269-278. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2007.11.018>
- Fiorillo, D., Kapelan, Z., Xenochristou, M., De Paola, F., & Giugni, M. (2021). Assessing the Impact of Climate Change on Future Water Demand using Weather Data. *Water Resources Management*, 35, 1149-1462. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-021-02789-4>
- Forrester, J. W. (1961). *Industrial Dynamics*. Massachusetts Institute of Technology Press.
- Freeman, S. (2019, 28 de agosto). *The Role of Water in U.S.-Mexico Relations*. Pacific Council on International Policy. <https://www.pacificcouncil.org/newsroom/role-water-us-mexico-relations>
- Fuentes, C.M., & Cervera, L.E. (2006). Land Markets and its Effects on the Spatial Segregation: The Case of Ciudad Juarez, Mexico. *Estudios Fronterizos*, 7(13). [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-69612006000100003](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-69612006000100003)
- Galeano, J.P. (Eds.). (2021). *Strengthening on the guarani aquifer*. ISARM 2021 2nd International Conference. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380029>
- Ganji, F., & Nasser, M. (2021). System dynamics approaches to assess the impacts of climate change on surface water quality and quantity: case study of Karoun River, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 31327-31339. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12773-5>
- Ganoulis, J., Fried, J., & Skoulikaris, C. (Eds.). (2021). *The role of regional communities in transboundary groundwater cooperation*. ISARM 2021 2nd International Conference. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380029>
- Garfin, G.M., Breshears, D.D., Brooks, K.M., Brown, H.E., Elias, E.H., Gunasekara, A., Huntly, N., Mantua, N., & Margolis, H.G. (2018). Southwest. *Impacts, Risks, and Adaptation in the United States: Fourth National Climate Assessment*. U.S. Global Change Research Program. <https://nca2018.globalchange.gov/chapter/25/>
- General Assembly of the United Nations. (n.d.). *The law of transboundary aquifers (Agenda item 86)*. United Nations. [https://www.un.org/en/ga/sixth/71/transboundary\\_aquifers.shtml](https://www.un.org/en/ga/sixth/71/transboundary_aquifers.shtml)
- Gies, L., Agusdinata, D. B., & Merwade, V. (2014). Drought adaptation policy development and assessment in East Africa using hydrologic and system dynamics modeling. *Natural Hazards*, 74, 789-813. <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11069-014-1216-2>
- Ging, P.B., Humberson, D.G., & Ikard, S.J. (2020). *Geochemical Assessment of the Hueco Bolson, New Mexico and Texas, 2016-2017*. United States Geological Survey. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/sir20205056>
- Giner, M.E. (2021, 1 de diciembre). Comunicación Personal [Entrevista].
- Giordano, M., Drieschova, A., Duncan, J.A., Sayama, Y., De Stefano, L., & Wolf, A.T. (2013). A review of the evolution and state of transboundary freshwater treaties. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*, 14, 245-264. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10784-013-9211-8>
- Giraut, M.A., Laborant, C., Magnani, C., & Borello, L. (Eds.). (2010). Guarani Aquifer System Project: Strengths and Weaknesses of its Implementation. ISARM 2010 International Conference. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000211661>
- Gleeson, T., & Richter, B. (2017). How much groundwater can we pump and protect environmental flows through time? Presumptive standards for conjunctive management of aquifers and rivers. *River Res Applic.*, 2018(34), 83-92. [http://www.groundwaterscienceandsustainability.org/uploads/5/6/1/7/56172195/62.\\_gleeson\\_and\\_richter\\_2018\\_rra\\_presumptive\\_groundwater\\_environmental\\_standards.pdf](http://www.groundwaterscienceandsustainability.org/uploads/5/6/1/7/56172195/62._gleeson_and_richter_2018_rra_presumptive_groundwater_environmental_standards.pdf)

- Gohari, A., Mirchi, A., & Madani, K. (2017). System Dynamics Evaluation of Climate Change Adaptation Strategies for Water Resources Management in Central Iran. *Water Resources Management*, 31, 14130-1431. [https://link.springer-com.pbidi.unam.mx:2443/article/10.1007/s11269-017-1575-z](https://link.springer.com.pbidi.unam.mx:2443/article/10.1007/s11269-017-1575-z)
- Gomez-García Palao, R., Guerra, C., Velásquez, M., & Rucks, J. (Eds.). (2021). *Contribution of CAF, as a regional development bank, in the integrated management transboundary groundwater systems*. ISARM 2021 2nd International Conference. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380029>
- Gonzalez de Solar, N., & Rugoso, M. (Eds.). (2021). *Regulatory tools for TBA governance: a legal vision*. ISARM 2021 2nd International Conference. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380029>
- Government of the Hashemite Kingdom of Jordan & the Government of the Kingdom of Saudi Arabia. (2015). *Agreement between the Government of the Hashemite Kingdom of Jordan and the Government of the Kingdom of Saudi Arabia for the Management and Utilization of the Ground Waters in the Al-Sag/Al-Disi Layer*. [https://www.internationalwaterlaw.org/documents/regionaldocs/Disi\\_Aquifer\\_Agreement-English2015.pdf](https://www.internationalwaterlaw.org/documents/regionaldocs/Disi_Aquifer_Agreement-English2015.pdf)
- Green, B.A. (2010). The Guarani Aquifer & International Groundwater Law: Advancing Towards a Legal Framework for the Management of a Transboundary Aquifer. *Water Law Review*, 13(2), 361-387.
- Grineski, S.E., & Collins, T.W. (2008). Exploring patterns of environmental injustice in the Global South: Maquiladoras in Ciudad Juárez, Mexico. *Population and Environment*, 39(6), 246-270. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11111-008-0071-z>
- Grineski, S.E., & Collins, T.W. (2010). Environmental injustices in transnational context: Urbanization and industrial hazards in El Paso/Ciudad Juárez. *Environment and Planning*, 42(6), 1308-1327. [https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1068/a42392?casa\\_token=FjBAhpBcsVAAAAAA:k2Emv3BXV3oK8m7XgFKgrHjciWfyF8v3W2guHXb7Ko7pgKClxCJn4rlAIj-67P1PeYp0rsYFr5yY](https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1068/a42392?casa_token=FjBAhpBcsVAAAAAA:k2Emv3BXV3oK8m7XgFKgrHjciWfyF8v3W2guHXb7Ko7pgKClxCJn4rlAIj-67P1PeYp0rsYFr5yY)
- Grineski, S.E., Collins, T.W., Ford, P., Fitzgerald, R., Aldouri, R., Velázquez-Angulo, G., Romo Aguilar, M.L., & Lu, D. (2012). Climate change and environmental injustice in a bi-national context. *Applied Geography*, 33(1), 25-35. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.05.013>
- Grineski, S.E., Collins, T.W., McDonald, Y.J., Aldouri, R., Aboargob, F., Eldeb, A., Romo Aguilar, M.L., & Velázquez-Angulo, G. (2015). Double exposure and the climate gap: Changing demographics and extreme heat in Ciudad Juárez, Mexico. *Local Environment*, 20(2), 180-201. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13549839.2013.839644>
- Groundstroem, F., & Juhola, S. (2021). Using systems thinking and causal loop diagrams to identify cascading climate change impacts on bioenergy supply systems. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 26(29). <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11027-021-09967-0>
- Hafezi, M., Stewart, R. A., Sahin, O. Giffin, A. L., & Mackey, B. (2021). Evaluating coral reef ecosystem services outcomes from climate change adaptation strategies using integrative system dynamics. *Journal of Environmental Management*, 285. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112082>
- Hamidi, O., Abbasi, H., & Mirhashemi, H. (2021). Analysis of the Response of Urban Water Consumption to Climatic Variables: Case Study of Khorramabad City in Iran. *Advances in Meteorology*, 2021. <https://www.hindawi.com/journals/amete/2021/6615152/>

- Hargrove, W.L., Borrok, D.M., Heyman, J.M., Tweedie, C.W. & Ferregut, C. (2013). Water, climate, and social change in a fragile landscape. *Ecosphere*, 4(2).
- Hargrove, W.L., Sheng, Z., Granados, A., Heyman, J.M., & Mubako, S.T. (2020). Impacts of Urbanization and Intensification of Agriculture on Transboundary Aquifers: A Case Study. *Journal of the American Water Resources Association*, 57(1), 170-185.  
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/1752-1688.12889>
- Hassenforder, E., Noury, B., & Daniel, P. (Eds.). (2010). *Complex Projects Modeling as a Tool to Establish a Cooperation Framework within Transboundary Aquifers*. ISARM 2010 International Conference. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000211661>
- Hausfather, Z. (2019, 2 de diciembre). *CMIP6: the next generation of climate models explained*. CarbonBrief. <https://www.carbonbrief.org/cmip6-the-next-generation-of-climate-models-explained/>
- Hayton, R., & Utton, A.E. (1989). Transboundary Groundwaters: The Bellagio Draft Treaty. *International Transboundary Resources Center Natural Resources Journal*, 29, 668-722.  
[https://unece.org/fileadmin/DAM/env/water/meetings/legal\\_board/2010/annexes\\_groundwater\\_paper/Annex\\_III\\_Draft\\_Agreement\\_Concerning\\_Use\\_Transboundary\\_Groundwaters\\_ILA.pdf](https://unece.org/fileadmin/DAM/env/water/meetings/legal_board/2010/annexes_groundwater_paper/Annex_III_Draft_Agreement_Concerning_Use_Transboundary_Groundwaters_ILA.pdf)
- Heaphy, L.J. (2015). The role of climate models in adaptation decision-making: the case of the UK climate projections 2009. *European Journal of Philosophy of Science*, 5(2), 233-257.  
<https://philpapers.org/rec/HEATRO-6>
- Heikkila, T., Schlager, E., & Davis, M.W. (2011). The Role of Cross-Scale Institutional Linkages in Common Pool Resource Management: Assessing Interstate River Compacts. *Policy Studies Journal*, 39(1), 121-145. <https://eds-s-eb.scohost.com.pbidi.unam.mx:2443/eds/pdfviewer/pdfviewer?vid=2&sid=2c3a6f86-3859-495a-a4eb-2ad7017e7a61%40redis>
- Helfgott, A. (2021, 4 de enero). *Bilateral Water Management: Water Sharing between the US and Mexico along the Border*. Wilson Center. <https://www.wilsoncenter.org/article/bilateral-water-management-water-sharing-between-us-and-mexico-along-border>
- Hererra, F.L., & Taks, J. (2012). Antecedentes y posibilidades para la mayor participación social en la política de gestión del Acuífero Guaraní. *Boletín Geológico y Minero*, 123(3), 341-352.
- Heywood, C. E. & Yager, R. M. (2003). *Simulated Ground-Water Flow in the Hueco Bolson, and Alluvial-Basin Aquifer System near El Paso, Texas*. United States Geological Survey.  
<https://pubs.usgs.gov/wri/wri02-4108/pdf/wrir02-4108.pdf>
- Hibbs, B. J., Boghici, R. N., Hayes, M. E., Ashworth, J. B., Hanson, A. T., Samani, Z. A., Kennedy, J. F., & Creel, B. J. (1997). *Transboundary aquifers of the El Paso/Ciudad Juarez/Las Cruces Region*. Texas Water Development Board and New Mexico Water Resources Research Institute Report for the United States Environmental Protection Agency.
- Hirata, R., & Foster, S. (Eds.). (2021). *Act locally but communicate globally- Guarani aquifer system transboundary cooperation*. ISARM 2021 2nd International Conference.  
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380029>
- Hirata, R., Kirchheim, R.E., & Manganelli, A. (2020). Diplomatic Advances and Setbacks of the Guarani Aquifer System in South America. *Environmental Science and Policy*, 114, 384-393.  
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.07.020>
- Houedanou, S.E. (Eds.). (2021). International law of transboundary aquifers: prospects and opportunities

- for mutual cooperation of Western African aquifer systems. ISARM 2021 2nd International Conference. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380029>
- Humberson, D. (2021, 7 de diciembre). Comunicación Personal [Entrevista].
- Hurd, B. H., & Coonrod, J. (2007). *Climate Change and Its Implications for New Mexico's Water Resources and Economic Opportunities*. New Mexico State University Technical Report 45. <https://aces.nmsu.edu/pubs/research/economics/TR45/welcome.html>
- Hurd, B. H., & Coonrod, J. (2008). Climate Change Risks New Mexico's Waterways: Its Byways and Its Flyways. *Water Resources IMPACT*, 10(4), 5-9. <https://www.jstor.org/stable/wateresoimpa.10.4.0005>
- Hussein, H. (2018). The Guarani Aquifer System highly present but not high profile: A hydropolitical analysis of transboundary groundwater governance. *Environmental Sciences and Policy*, 83, 54-62. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.02.005>
- International Institute for Applied Systems Analysis. (2018). *SSP Database (Shared Socioeconomic Pathways)-Version 2.0* [Base de datos]. <https://tntcat.iiasa.ac.at/SspDb/dsd?Action=htmlpage&page=about>
- Instituto Municipal de Investigación y Planeación Ciudad Juárez (IMIP). (2010). *Indicadores Medio Ambiente*. <https://imip.org.mx/oujuarez/indicadores/indicador.php?&ind=i15&t=amb>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). *Censo de Población y Vivienda 2010*. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate Change 2021 The Physical Science Basis Summary for Policymakers*. IPCC AR6. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_SPM\\_final.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf)
- International Atomic Energy Association (IAEA), United National Development Project (UNDP), & the Global Environmental Facility (GEF). (2013). *Regional Strategic Action Programme for the Nubian Aquifer System*. <https://www.iaea.org/sites/default/files/sap180913.pdf>
- International Boundary and Water Commission. (n.d.). *Treaties Between the U.S. and Mexico*. International Boundary and Water Commission United States Section. [https://www.ibwc.gov/Treaties\\_Minutes/treaties.html](https://www.ibwc.gov/Treaties_Minutes/treaties.html)
- International Boundary and Water Commission United States and Mexico. (1973). *Minute No. 242 Permanent and Definitive Solution to the International Problem of the Salinity of the Colorado River*. <https://www.ibwc.gov/Files/Minutes/Min242.pdf>
- International Boundary and Water Commission United States and Mexico (IBWC). (2002). *Flow of the Rio Grande and Related Data*. [https://www.ibwc.gov/wad/Rio\\_Grande/2002.pdf](https://www.ibwc.gov/wad/Rio_Grande/2002.pdf)
- International Groundwater Resources Assessment Centre. (2018). *Groundwater Overview*. [https://www.un-igrac.org/sites/default/files/resources/files/Groundwater%20overview%20-%20Making%20the%20invisible%20visible\\_Print.pdf](https://www.un-igrac.org/sites/default/files/resources/files/Groundwater%20overview%20-%20Making%20the%20invisible%20visible_Print.pdf)
- International Law Association. (1966). *ILA Report on the Fifty-Second Conference, Helsinki, 1966*. [https://www.internationalwaterlaw.org/documents/intldocs/ILA/Helsinki\\_Rules-original\\_with\\_comments.pdf](https://www.internationalwaterlaw.org/documents/intldocs/ILA/Helsinki_Rules-original_with_comments.pdf)
- International Law Association. (1986). *The Seoul Rules on International Groundwaters*. International Law Association Sixty-Second Conference. <http://www.cawater-info.net/library/eng/l/seoul.pdf>
- International Law Commission (ILC). (2008). *Draft articles on the Law of Transboundary Aquifers, with commentaries*. [https://legal.un.org/ilc/texts/instruments/english/commentaries/8\\_5\\_2008.pdf](https://legal.un.org/ilc/texts/instruments/english/commentaries/8_5_2008.pdf)
- International Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Summary for Policymakers*.

- [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_SPM.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf)
- International Water Management Institute (IWMI). (2021). *Data sharing in transboundary waters: Current extent, future potential and practical recommendations*.  
[https://www.iwmi.cgiar.org/Publications/Water\\_Policy\\_Briefs/PDF/wpb43.pdf](https://www.iwmi.cgiar.org/Publications/Water_Policy_Briefs/PDF/wpb43.pdf)
- Jafroudi, M. (2018). Enhancing climate resilience of transboundary water allocation agreements: the impact of shortening the agreements' lifetime on cooperation stability. *Int Environ Agreements*, 18, 707-722. <https://doi.org/10.1007/s10784-018-9412-2>
- Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Juárez (JMAS) & El Paso Water Utilities Public Service Board (PSB). (1999). *Convenio de Colaboración/Memorandum of Understanding*.  
[https://www.internationalwaterlaw.org/documents/regionaldocs/Local-GW-Agreements/El\\_Paso-Juarez\\_MoU.pdf](https://www.internationalwaterlaw.org/documents/regionaldocs/Local-GW-Agreements/El_Paso-Juarez_MoU.pdf)
- Kaiser, R.A. (2002). *Handbook of Texas Water Law: Problems and Needs*. Texas Water Resources Institute. [https://texaswater.tamu.edu/resources/2002-037\\_waterlaw.pdf](https://texaswater.tamu.edu/resources/2002-037_waterlaw.pdf)
- Kates, R. W., Clark, W. C., Corell, R., Hall, J. M., Jaeger, C. C., Lowe, I., McCarthy, J. J., Schellnhuber, H. J., Bolin, B., Dickson, N. M., Faucheux, S., Gallopin, G. C., Grüber, A., Huntley, B., Jäger, J., Jodha, N. S., Kasperson, R. E., Mabogunje, A., Matson, P., ... Svedin, U. (2001). Sustainability Science. *Science*, 292(5517), 641-642.
- Kazemi, G.A. (2011). Impacts of urbanization on groundwater resources in Shahrood, Northeast Iran: Comparison with other Iranian and Asian cities. *Physics and Chemistry of the Earth*, 36(5-6), 150-159. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2010.04.015>
- Kenney, D.S., Goemans, C., Klein, R., Lowrey, J. and Reidy, K. (2008) Residential water consumption management: Lessons from Aurora, Colorado. *Journal of the American Water Resources Association* 44, 1, 192-207.
- Khayat, Z., & Cherfane, C.C. (Eds.). (2021). *Strengthening Cooperation on Transboundary Aquifers in the Arab Region*. ISARM 2021 2nd International Conference.  
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380029>
- King, C.M, Gad, M.I., Salem, B.B., & Ouessar, M. (Eds.). (2010). Management Challenges and Opportunities in the Endorheic Basins of the Northern Sahara Transboundary Aquifers. ISARM 2010 International Conference. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000211661>
- Kirchheim, R., Hirata, R., & Manganelli, A. (Eds.). (2021). *The bumpy road towards transboundary groundwater management: the case of the Guarani Aquifer system in South America*. ISARM 2021 2nd International Conference. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380029>
- Kloesel, K., Bartush, B., Banner, J., Brown, D., Lemery, J., Lin, X., Loeffler, C., McManus, G., Mullens, E., Nielsen-Gammon, J., Safter, M., Sorensen, C., Sperry, S., Wildcar, D., & Ziolkowska, J. (2018). Southern Great Plains. *Impacts, Risks, and Adaptation in the United States: Fourth National Climate Assessment, Volume II*. U.S. Global Change Research Program.  
<https://nca2018.globalchange.gov/chapter/23/>
- Koontz, T.M. (2019). Chapter 5: Cooperation in Polycentric Governance Systems. In A. Thiel, W.A. Blomquist, & D. Garrick (Eds.), *Governing Complexity*. Cambridge University Press.  
<https://dlc.dlib.indiana.edu/dlc/bitstream/handle/10535/10776/chapter%20Cooperation%20final%20for%20posting.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Information%20and%20learning%20have%20been,more%20effective%20and%20efficient%20policies.>
- Kracht, O., Barbecot, F., Chkir, N., Gourcy, L., Huneau, F., Trabelsi, R., Travi, Y., Zourai, K., Jarvis,

- N.V., & Araguas, L.J. (Eds.). (2021). Evaluating and developing regional capacities for isotope based assessment of transboundary water resources in Sahel Africa. ISARM 2021 2nd International Conference. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380029>
- Ksia-Amb, C. (Eds.). (2010). International Shared Aquifers for the Arab Region. ISARM 2010 International Conference. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000211661>
- Kundzewicz, Z.W., & Döll, P. (2009). Will groundwater ease freshwater stress under climate change? *Hydrological Sciences Journal*, 54(4), 665-675. <https://doi.org/10.1623/hysj.54.4.665>
- La República Argentina, la República Federativa del Brasil, la República del Paraguay, & la República Oriental del Uruguay. (2010). *Acuerdo sobre el Acuífero Guaraní*. [https://www.internationalwaterlaw.org/documents/regionaldocs/Guarani\\_Aquifer\\_Agreement-Spanish.pdf](https://www.internationalwaterlaw.org/documents/regionaldocs/Guarani_Aquifer_Agreement-Spanish.pdf)
- Lam, N. S. N., Qiang, Y., Li, K., Cai, H., Zou, L., & Mihunov, V. (2018). Extending Resilience Assessment to Dynamic System Modeling: Perspective on Human Dynamics and Climate Change Research. *Journal of Coastal Research*, 85(10085), 1401-1405. <https://doi.org/10.2112/SI85-281.1>
- Las Naciones Unidas (ONU). (1992). *Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente: El desarrollo en la perspectiva del Siglo XXI*. <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/30961/ICWESp.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Lee, S., Abdul-Talib, S., & Park, H. (2012). Lessons from water scarcity of the 2008-2009 Gwangdong reservoir: needs to address drought management with adaptiveness concept. *Aquatic Sciences*, 74, 213-227. <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00027-011-0213-8>
- Levin, S. A. (1998). Ecosystems and the Biosphere as Complex Adaptive Systems. *Ecosystems*, 1(5), 431-436. <https://doi.org/10.1007/s100219900037>
- Ley de Aguas Nacionales. (1992). [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16\\_060120.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16_060120.pdf)
- Ley de Cambio Climático del Estado de Chihuahua. (2013). <http://www.congresochihuahua2.gob.mx/biblioteca/leyes/archivosLeyes/1001.pdf>
- Ley General de Cambio Climático. (2012). [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC\\_061120.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC_061120.pdf)
- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. (1988). <https://www.conacyt.gob.mx/cibiogem/images/cibiogem/protocolo/LGEEPA.pdf>
- Lins Brzezinski, M.L.N. (Eds.). (2021). *Public Policies in Brazil and the Guaraní Aquifer*. ISARM 2021 2nd International Conference. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380029>
- Linton, J., & Budds, J. (2014). The hydrosocial cycle: Defining and mobilizing a relational-dialectical approach to water. *Geoforum*, 57, 170-180. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoforum.2013.10.008>
- Lipponen, A., deStrasser, L., Touzi, S., Andelkafi, B., Almulla, Y., Hamamouche, M.F., Saidani, A., Faloutsos, D., & Gomez, C.R. (Eds.). (2021). *Analysis of interlinkages between groundwater, land management, energy and ecosystem in the North Western Sahara Aquifer System*. ISARM 2021 2nd International Conference. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380029>
- Liu, X., Tian, Z., Sun, L., Liu, J., Wu, W., Xu, H., Sun, L., & Wang, C. (2020). Mitigating heat-related mortality risk in Shanghai, China: system dynamics modeling simulation. *Environmental Geochemistry and Health*, 42, 3171-3184. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00556-9>
- Lucuix, M.B. (2015). El proceso de integración de municipios de la Red Mercociudades El caso del Acuífero Guaraní. *Revista Aportes para la Integración Latinoamericana*, 33, 33-52.

- Mackinnon, A. (2020, 19 de octubre). *The Water War on the U.S.-Mexico Border Has Just Begun*. Foreign Policy. <https://foreignpolicy.com/2020/10/19/water-war-us-mexico-border-just-begun-chihuahua-boquilla-dam-farmers-drought/>
- Maddocks, A. y Reig, P. (2014, 20 de marzo). *World's 18 Most Water-Stressed Rivers*. World Resources Institute. <https://www.wri.org/blog/2014/03/world-s-18-most-water-stressed-rivers>
- Malagutti, V., Suhogusoff, A., Kirchheim, R., & Manganelli, A. (Eds.). (2021). *Transboundary or not transboundary: the case of the Guarani aquifer system in the Cuareim river basin between Brazil and Uruguay*. ISARM 2021 2nd International Conference. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380029>
- Mallik, R. B., Jacobs, J. M., Miller, B. J., Daniel, J. S., & Kirshen, P. (2018). Understanding the impact of climate change on pavements with CMIP5, system dynamics and simulation. *International Journal of Pavement Engineering*, 19(8), 697-705. <https://doi.org/10.1080/10298436.2016.1199880>
- Margat, J., de Gramont, H.M., & Pennequin, D. (Eds.). (2010). *Transboundary Aquifers with Non-renewable Resources Call for Very Specific Management Issues*. ISARM 2010 International Conference. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000211661>
- Martinez-Moyano, I. J., & Richardson, G. P. (2013). Best practices in system dynamics modeling. *System Dynamics Review*, 29(2), 102-123. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/sdr.1495>
- Matson, P.A., Dietz, T., Abdalati, W., Busalacchi, A.J., Caldiera, K., Corell, R.W., Defries, R.S., Fung, I.Y., Gaines, S., Hornberger, G.M., Lemos, M.C., Moser, S.C., Moss, R.H., Parson, E.A., Ravishankara, A.R., Schmitt, R.W., Turner, B.L., Washington, W.M., ... Whelan, D.A. (2010). *Advancing the Science of Climate Change*. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. <https://doi.org/10.17226/12782>
- Maxwell, N. (2010). The Nubian Sandstone Aquifer System: Thoughts on a Multilateral Treaty in Light of the 2008 UN Resolution on the Law of Transboundary Aquifers. *Texas International Law Journal*, 46(379), 379-409.
- McCaffrey, S.C. (1996). The Harmon Doctrine One Hundred Years Later: Buried, Not Praised. *Natural Resources Journal*, 36(549), 725-767. <https://scholarlycommons.pacific.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1329&context=facultyarticles>
- McCaffrey, S.C. (2009). The International Law Commission Adopts Draft Articles on Transboundary Aquifers. *The American Journal of International Law*, 103(2), 272-293. <https://www.jstor.org/stable/20535150>
- McGinnis, M.D. (2016). *Polycentric Governance in Theory and Practice: Dimensions of Aspiration and Practical Limitations*. University of Indiana Bloomington Polycentricity Workshop. <https://mcginnis.pages.iu.edu/polycentric%20governance%20theory%20and%20practice%20Feb%202016.pdf>
- Mechlem, K. (2011). Past, present and future of the international law of transboundary aquifers. *International Community Law Review*, 13(3), 209-222. <http://doi.org/10.1163/187197311X582278>
- Megdal, S.B. (2017). *Public Policy- The Cooperative Framework for the Transboundary Aquifer Assessment Program: A Model for Collaborative Transborder Studies*. University of Arizona Water Resources Research Center. <https://wrrc.arizona.edu/public-policy-cooperative-framework-TAAP>
- Mendez Zacarías, J.S., & Zimmermann, E. (2013). Potencialidad Hídrica de la Región Santafesina: El

- Acuífero Guaraní en el Territorio Provincial. *Cuadernos del CURIHAM*, 19, 35-49.
- Merino, J., & Rascón Mendoza, L.A. (2009). *Joint Report of the Principal Engineers Regarding the Joint Cooperative Process United States-Mexico or the Transboundary Aquifer Assessment Program*. IBWC. [https://www.ibwc.gov/Files/Minutes/Joint\\_Report\\_TAAP\\_081909.pdf](https://www.ibwc.gov/Files/Minutes/Joint_Report_TAAP_081909.pdf)
- Montano Armendáriz, G. (2019). *Historia Ambiental del Valle de Juárez*. [Tesis de doctorado, El Colegio de Chihuahua]. <http://www.colech.edu.mx/cont/tesis/g.montano.pdf>
- Mukuyu, P., & Lautze, J. (2021, 8 de diciembre). *Data exchange protocols in shared waters: Cart without a horse?* Springer Nature Sustainability Community. <https://sustainabilitycommunity.springernature.com/posts/data-exchange-protocols-in-shared-waters-cart-without-a-horse>
- Moreira Bahia, A.N., Clara, A., & Simões, A. (Eds.). (2021). *Latin America's perspectives on the governance of transboundary aquifers: the protection of indigenous peoples in the Guaraní Aquifer System*. ISARM 2021 2nd International Conference. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380029>
- Naderi, M. M., Mirchi, A., Massah Bavani, A. R., Goharian, E., & Madani, K. (2021). System dynamics simulation of regional water supply and demand using food-energy-water nexus approach: Application to Qazvin Plain, Iran. *Journal of Environmental Management*, 280. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111843>
- Nava Assad, Y. S. (2020). *Comparación de escenarios de cambio climático en la cuenca hidrográfica del Río La Antigua* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. TesisUNAM. <http://132.248.9.195/ptd2020/agosto/0802997/Index.html>
- Navarro, M.L., & Brzezinski, L. (Eds.). (2010). *Regulating Transboundary Groundwater: Big Challenges for Brazil*. ISARM 2010 International Conference. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000211661>
- New Mexico Office of the State Engineer. (2013). *Updated Regional Water Planning Handbook: Guidelines to Preparing Updates to New Mexico Regional Water Plans*. [https://www.ose.state.nm.us/Planning/RWP/Handbook/Revised%20RWP%20Handbook%20ISC\\_Dec\\_2013\\_Final.pdf](https://www.ose.state.nm.us/Planning/RWP/Handbook/Revised%20RWP%20Handbook%20ISC_Dec_2013_Final.pdf)
- Nick, S. (2021). *Navigating borders: Could water be a bridge between U.S. and Mexico?* Colorado State University College of Liberal Arts. <https://libarts.source.colostate.edu/navigating-borders-could-water-be-a-bridge-between-u-s-and-mexico/>
- O'Brien, K., & Leichenko, R.M. (2000). Double exposure: assessing the impacts of climate change within the context of economic globalization. *Global Environmental Change*, 10, 221-232.
- Observatoire du Sahara et du Sahel. (2003). *North-Western Sahara Aquifer System Joint Management of a Transborder Basin*.
- Observatoire du Sahara et du Sahel. (2008). *The North-Western Sahara Aquifer System Concerted Management of a Transboundary Water Basin*.
- Observatoire du Sahara et du Sahel. (2011a). *Common Database*.
- Observatoire du Sahara et du Sahel. (2011b). *Hydrogeological Model*. [https://aquaknow.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/3\\_En\\_Vol\\_III\\_modele.pdf](https://aquaknow.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/3_En_Vol_III_modele.pdf)
- Observatoire du Sahara et du Sahel. (2011c). *Monitoring & Evaluation of Transboundary Risks*. [http://www.oss-online.org/sites/default/files/publications/OSS-SAI\\_Vol\\_V\\_Monitoring\\_eval\\_En.pdf](http://www.oss-online.org/sites/default/files/publications/OSS-SAI_Vol_V_Monitoring_eval_En.pdf)
- Observatoire du Sahara et du Sahel. (2011d). *Participatory Management of Transboundary Risks*.

- [http://www.oss-online.org/sites/default/files/publications/OSS-SAI\\_Vol\\_IV\\_Gest\\_particiap\\_En.pdf](http://www.oss-online.org/sites/default/files/publications/OSS-SAI_Vol_IV_Gest_particiap_En.pdf)
- Observatoire du Sahara et du Sahel. (2011e). *Transboundary Diagnostic Analysis*.  
<http://www.oss-online.org/en/iullemeden-aquifer-system-transboundary-diagnostic-analysis-volume-i>
- Observatoire du Sahara et du Sahel. (2014a). *Agricultural Demonstration Pilots in the SASS Basin*.  
[http://www.oss-online.org/sites/default/files/publications/OSS-SASS-PDA\\_En.pdf](http://www.oss-online.org/sites/default/files/publications/OSS-SASS-PDA_En.pdf)
- Observatoire du Sahara et du Sahel. (2014b). *Socio-economic Aspects of Irrigation in the SASS Basin*.  
[http://www.oss-online.org/sites/default/files/publications/OSS-SASS\\_Socioeco\\_En.pdf](http://www.oss-online.org/sites/default/files/publications/OSS-SASS_Socioeco_En.pdf)
- Organization of American States. (2009). *Guarani Aquifer Strategic Action Program*.  
<http://www.oas.org/DSD/WaterResources/projects/Guarani/SAP-Guarani.pdf>
- Ostrom, V., Tiebout, C.M., & Warren, R. (1961). The Organization of Government In Metropolitan Areas *A Theoretical Inquiry*. *American Political Science Review*, 55(4), 831-842.  
<https://doi.org/10.2307/1952530>
- Ostrom, V. (1991). *The Meaning of American Federalism*. ISC Press.
- Pahl-Wostl, C. (2009). A conceptual framework for analysing adaptive capacity and multi-level learning processes in resource governance regimes. *Global Environmental Change*, 19(3), 354-365.  
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2009.06.001>
- Pahl-Wostl, C., & Knieper, C. (2014). The capacity of water governance to deal with the climate change adaptation challenge: Using fuzzy set Qualitative Comparative Analysis to distinguish between polycentric, fragmented and centralized regimes. *Global Environmental Change*, 29, 139-154.  
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.09.003>
- Pan American Health Organization. (2012). *United States-Mexico Border Area*.  
[https://www3.paho.org/salud-en-las-americanas-2012/index.php?option=com\\_docman&view=download&category\\_slug=hia-2012-country-chapters-22&alias=153-us-mexico-border-153&Itemid=231&lang=en](https://www3.paho.org/salud-en-las-americanas-2012/index.php?option=com_docman&view=download&category_slug=hia-2012-country-chapters-22&alias=153-us-mexico-border-153&Itemid=231&lang=en)
- Parandvash, G.H., & Chang, H. (2016). Analysis of long-term climate change on per capita water demand in urban versus suburban areas in the Portland metropolitan area, USA. *Journal of Hydrology*, 538, 574-586. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.04.035>
- Pateiro, L.M. (2016). Ad hoc legal mechanisms governing transboundary aquifers: current status and future prospects. *Water International*, 41(6), 851-865.  
<https://doi.org/10.1080/02508060.2016.1201964>
- Pateiro, L.M., & Sindico, F. (2019). El valor jurídico y práctico del proyecto de artículos de la CDI sobre el derecho de los acuíferos transfronterizos. *Anuario Colombiano de Derecho Internacional*, 13, 105-132. <https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/acdi/a.7610>
- Petrossian, R., George, P., Bradley, R.G., Backhouse, S., Boghici, R., & Olden, M.O. (2017). *Transborder Aquifers: A Summary of Aquifer Properties, Policies, and Planning Approaches for Texas, Surrounding States, and Mexico*. Texas Water Development Board.  
[http://www.twdb.texas.gov/groundwater/docs/GMR\\_reports/GMR17-01\\_TransborderAquifers.pdf](http://www.twdb.texas.gov/groundwater/docs/GMR_reports/GMR17-01_TransborderAquifers.pdf)
- Penny, G., Müller-Itten, M., De Los Cobos, G., Mullen, C., & Müller, M.F. (2021). Trust and incentives for transboundary groundwater cooperation. *Advances in Water Resources*, 155.  
<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2021.104019>
- Phan, T. C., Bertone, E., & Stewart, R. A. (2021). Critical review of system dynamics modeling

- applications for water resources planning and management. *Cleaner Environmental Systems*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2021.100031>
- Phillips, V., & Barker, E. (2021). Systematic reviews: Structure, form and content. *Journal of Perioperative Practice*, 31(9). <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1750458921994693>
- Praskievicz, S., & Chang, H. (2009). Identifying the Relationships Between Urban Water Consumption and Weather Variables in Seoul, Korea. *Physical Geography*, 30(4). <https://doi.org/10.2747/0272-3646.30.4.324>
- Puri, S. (Eds.). (2021). *The ILC Draft Articles- a governance scenario retrospective from 2060, based on alternative projections in six transboundary aquifer systems- the impact of the “Red Queen Effect”*. ISARM 2021 2nd International Conference. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380029>
- Puri, S., & Villholth, K.G. (Eds.). (2021). What is the ‘science’ that policy makers want in order to address governance of transboundary aquifers? ISARM 2021 2nd International Conference. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380029>
- Praskievicz, S. & Chang, H. (2009). Identifying the Relationships Between Urban Water Consumption and Weather Variables in Seoul, Korea. *Physical Geography*, 30(4), 324-337. [https://www.researchgate.net/publication/250172120\\_Identifying\\_the\\_Relationships\\_Between\\_Urban\\_Water\\_Consumption\\_and\\_Weather\\_Variables\\_in\\_Seoul\\_Korea](https://www.researchgate.net/publication/250172120_Identifying_the_Relationships_Between_Urban_Water_Consumption_and_Weather_Variables_in_Seoul_Korea)
- Preiser, R., Biggs, R., De Vos, A., & Folke, C. (2018). Social-ecological systems as complex adaptive systems: organizing principles for advancing research methods and approaches. *Ecology and Society*, 23(4). <https://www.ecologyandsociety.org/vol23/iss4/art46/>
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (1972). *Declaración de Estocolmo*. [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/29567/ELGP1StockD\\_SP.pdf?sequence=5&isAllowed=y](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/29567/ELGP1StockD_SP.pdf?sequence=5&isAllowed=y)
- Quadri, E. (2015). The Nubian Sandstone Aquifer System a case of cooperation in the making. *Journal of Water Law*, 25(6), 274-282.
- Quadri, E. (Eds.). (2017). *The Nubian Sandstone Aquifer System- A case of cooperation in the making*. International Water Resources Association XVI World Water Congress. [https://www.iwra.org/member/congress/resource/ABSID249\\_ABSID249\\_Paper\\_Quadri\\_Elena2.pdf](https://www.iwra.org/member/congress/resource/ABSID249_ABSID249_Paper_Quadri_Elena2.pdf)
- Quadri, E. (2019). The evolving framework for transboundary cooperation in the Nubian Sandstone Aquifer System. *Water International*, 44(3), 363-377. <https://doi.org/10.1080/02508060.2019.1593839>
- Quadri, E. (Eds.). (2021). *Transboundary groundwater in international law*. ISARM 2021 2nd International Conference. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380029>
- Rasifaghihi, N., Li, S.S., & Haghghat, F. (2020). Forecast of urban water consumption under the impact of climate change. *Sustainable Cities and Society*, 52. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101848>
- Riahi, K., van Vuuren, D.P., Kriegler, E., Edmonds, J., O’Neill, B.C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Crespo Cuaresma, J., Samir, K.C., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emerling, J., ..., Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153-168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- Rieu-Clarke, A., Moynihan, R. & Magsig, B.O. (2012). *UN Watercourses Convention User’s Guide*.

- Centre for Water Law, Policy and Science UNESCO.  
[https://www.iucn.org/sites/dev/files/un\\_watercourses\\_convention\\_-\\_users\\_guide.pdf](https://www.iucn.org/sites/dev/files/un_watercourses_convention_-_users_guide.pdf)
- Romero-Lécrivian, A. (2019). Perspectivas de cooperación y conflicto transfronterizo en torno al Sistema Acuífero del Sahara Septentrional (SASS). *Revista de Paz y Conflictos*, 12(1), 53-83.  
<https://doi.org/10.30827/revpaz.v12i1.8773>
- Ross, A. R., & Chang, H. (2021). Modeling the system dynamics of irrigators' resilience to climate change in a glacier-influenced watershed. *Hydrological Sciences Journal*, 66(12), 1743-1757.  
<https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1962883>
- Safe Drinking Water Act Title XIV of Public Health Service Act, Public Law 93-523. (1974).  
[https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-05/documents/safe\\_drinking\\_water\\_act\\_title\\_xiv\\_of\\_public\\_health\\_service\\_act.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-05/documents/safe_drinking_water_act_title_xiv_of_public_health_service_act.pdf)
- Salas-Plata Mendoza, J.A. (2006). Problemática del Agua y Crecimiento Urbano en Ciudad Juárez, Chihuahua. *CULCyt*, 3(14-15).  
[https://www.researchgate.net/publication/237674425\\_Problematica\\_del\\_Agua\\_y\\_Crecimiento\\_Urbano\\_en\\_Ciudad\\_Juarez\\_Chihuahua](https://www.researchgate.net/publication/237674425_Problematica_del_Agua_y_Crecimiento_Urbano_en_Ciudad_Juarez_Chihuahua)
- Salem, O. (Eds.). (2010). Challenges Facing the Management of Shared Aquifer. ISARM 2010 International Conference. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000211661>
- Salem, O., Huwaysh, A., & Megrbi, A.M. (Eds.). (2021). *A 30 Year Evaluation of JA-NSAS as Pioneer Regional Organization for the Management of Transboundary Aquifers*. ISARM 2021 2nd International Conference. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380029>
- Sanchez, R. & Eckstein G. (2017). Aquifers Shared Between Mexico and the United States: Management Perspectives and Their Transboundary Nature. *Groundwater*, 55(4), 495-505.  
[https://transboundary.tamu.edu/media/1368/sanchez\\_et\\_al-2017-groundwater.pdf](https://transboundary.tamu.edu/media/1368/sanchez_et_al-2017-groundwater.pdf)
- Sanchez, R. & Eckstein, G. (2020). Groundwater Management in the Borderlands of Mexico and Texas: The Beauty of the Unknown, the Negligence of the Present, and the Way Forward. *Water Resources Research*, 56(3). <https://doi.org/10.1029/2019WR026068>
- Sanchez, R., Brena-Naranjo, J.A., Rivera, A., Hanson, R., Hernandez-Espriu, A., Hogeboom, R., Milman, A., Benavides, J.A., Pedrozo-Acuna, A., Soriano-Monzalvo, J.C., Megdal, S.B., Eckstein, G., & Rodriguez, L. (2021). Binational Reflections on Pathways to Groundwater Security in the Mexico-United States Borderlands. *Water International*, 46.  
[https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=3985514](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3985514)
- Sanchez, R. (2022, 4 de febrero). Comunicación Personal [Entrevista].
- Schlader, M. (2016, 18 de mayo). *El Paso scores well, not best, on water report*. El Paso Times.  
<https://www.elpasotimes.com/story/news/2016/05/18/el-paso-scores-well-but-not-best-water-scorecard/84544892/>
- Schlanger, Z. (2018, 23 de agosto). *A major US city will start drinking its own sewage. Others need to follow*. Quartz. <https://qz.com/1353825/a-major-us-city-will-start-drinking-its-own-sewage-others-need-to-follow/>
- Scholes, R.J. (2020). The Future of Semi-Arid Regions: A Weak Fabric Unravels. *Climate*, 8(3).  
<https://doi.org/10.3390/cli8030043>
- Schmeir, S. (Eds.). (2010). Effective Governance of Transboundary Aquifers through Institutions-Lessons Learned from River Basin Organizations. ISARM 2010 International Conference.  
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000211661>
- Schur, E.L. (2017). Potable or Affordable? A Comparative Study of Household Water Security Within a

- Transboundary Aquifer Along the U.S.-Mexico Border. *Journal of Latin American Geography*, 16(3), 29-58. <https://www.jstor.org/stable/44861396>
- Scott, C.A., & Banister, J.M. (2008). The Dilemma of Water Management 'Regionalization' in Mexico under Centralized Resource Allocation. *International Journal of Water Resources Development*, 24(1), 61-74. <https://doi.org/10.1080/07900620701723083>
- Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL). (2013a). *Datos Generales Entidad Chihuahua Municipio Guadalupe Clave 08028*. Unidad de Microrregiones Cédulas de Información Municipal (SCIM). <http://www.microrregiones.gob.mx/zap/datGenerales.aspx?entra=nacion&ent=08&mun=028>
- Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL). (2013b). *Datos Generales Entidad Chihuahua Municipio Juárez Clave 08037*. Unidad de Microrregiones Cédulas de Información Municipal (SCIM). <http://www.microrregiones.gob.mx/zap/datGenerales.aspx?entra=nacion&ent=08&mun=037>
- Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL). (2013c). *Datos Generales Entidad Chihuahua Municipio Praxedis G. Guerrero Clave 08053*. Unidad de Microrregiones Cédulas de Información Municipal (SCIM). <http://www.microrregiones.gob.mx/zap/datGenerales.aspx?entra=nacion&ent=08&mun=053>
- Shao, Z., Wu, F., Li, F., Zhao, Y., & Xu, X. (2020). System Dynamics Model for Evaluating Socio-Economic Impacts of Different Water Diversion Quantity from Transboundary River Basins- A Case Study of Xinjiang. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(9091). <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33291432/>
- Sheng, Z. (2013). Impacts of groundwater pumping and climate variability on groundwater availability in the Rio Grande Basin. *Ecosphere*, 4(1), 1-25. <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1890/ES12-00270.1>
- Sheng, Z., Mace, R. E., & Fahy, M. P. (2001). The Hueco Bolson-An Aquifer at the crossroads. En R. E. Mace, W. F. Mullican III & E. S. Angle (Eds.), *Aquifers of West Texas*. Texas Water Development Board. [https://www.researchgate.net/publication/275831953\\_The\\_Hueco\\_Bolson-An\\_aquifer\\_at\\_the\\_crossroads](https://www.researchgate.net/publication/275831953_The_Hueco_Bolson-An_aquifer_at_the_crossroads)
- Sheng, Z., & Devere, J. (2005). Understanding and managing the stressed Mexico-USA transboundary Hueco Bolson aquifer in the El Paso del Norte region as a complex system. *Hydrogeology Journal*, 13(5), 813-825. [https://www.researchgate.net/publication/226381067\\_Understanding\\_and\\_managing\\_the\\_stressed\\_Mexico-USA\\_transboundary\\_Hueco\\_bolson\\_aquifer\\_in\\_the\\_El\\_Paso\\_del\\_Norte\\_region\\_as\\_a\\_complex\\_system](https://www.researchgate.net/publication/226381067_Understanding_and_managing_the_stressed_Mexico-USA_transboundary_Hueco_bolson_aquifer_in_the_El_Paso_del_Norte_region_as_a_complex_system)
- Sindico, F. (Eds.). (2010). *The Management of the GAS: What Role for the Emerging International Law of Transboundary Aquifers?* ISARM 2010 International Conference. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000211661>
- Sindico, F. (Eds.). (2021). *TBA agreement and arrangements: from paper tigers to effective implementation*. ISARM 2021 2nd International Conference. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380029>
- Sindico, F., & Hawkins, S. (2015). The Guarani Aquifer Agreement and Transboundary Aquifer Law in the SADC: Comparing Apples and Oranges? *Review of European Comparative & International Environmental Law*, 24(3). <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.02.005>
- Sindico, F., Hirata, R., & Manganelli, A. (2018). The Guarani Aquifer System: from a beacon of hope to

- a question mark in the governance of transboundary aquifers. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 20, 49-59. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.04.008>
- Somers, K. A., Bernhardt, E. S., McGlynn, B. L., & Urban, D. L. (2016). Downstream Dissipation of Storm Flow Heat Pulses: A Case Study and its Landscape-Level Implications. *Journal of the American Water Resources Association*, 52(2), 281-297. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1752-1688.12382>
- Soto Ontiveros, M.I.A. (2019). Disponibilidad de Agua Subterránea y su relación con el Desarrollo Urbano en Ciudad Juárez, Chihuahua: Un análisis retrospectivo y prospectivo durante el periodo 2008 al 2030. [Tesis de doctorado, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez]. <http://erecursos.uacj.mx/handle/20.500.11961/5981>
- Spangenberg, J.H. (2011). Sustainability science: a review, an analysis and some empirical lessons. *Environmental Conversation*, 38(3), 275-287.
- Spijkers, O. (Eds.). (2021). *Layers of regulation in transboundary aquifer governance: the case of the Guarani Aquifer*. ISARM 2021 2nd International Conference. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380029>
- State Council of the Republic and Canton of Geneva & Prefect of Haute-Savoie. (1977). *Convention relative à la protection, à l'utilisation, à la réalimentation et au suivi de la nappe souterraine franco-suisse du Genevois*. <https://www.internationalwaterlaw.org/documents/regionaldocs/2008Franko-Swiss-Aquifer-English.pdf>
- Stephan, R.M. (2013, 20 de octubre). *Adoption of Regional Strategic Action Plan on the Nubian Sandstone Aquifer*. International Water Law Project Blog. <https://www.internationalwaterlaw.org/blog/2013/10/20/adoption-of-regional-strategic-action-plan-on-the-nubian-sandstone-aquifer/>
- Stephan, M., Marshall, G., & McGinnis, M. (2019). An Introduction to Polycentricity and Governance. In A. Theil, W. Blomquist, & D. Garrick (Eds.), *Governing Complexity* (pp. 21-44). Cambridge University Press. <https://mcginnis.pages.iu.edu/Stephan%20Marshall%20McGinnis%20Intro%20to%20Polyc%20Gov.pdf>
- Sterman, J. D. (2000). *Business Dynamics Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. McGraw-Hill Higher Education.
- Sugg, Z.P. Varaday, R.G., Gerlak, A.K., & de Grenade, R. (2015). Transboundary groundwater governance in the Guarani Aquifer System: reflections from survey of global and regional experts. *Water International*, 40(3), 377-400. <https://doi.org/10.1080/02508060.2015.1052939>
- Talchabhadel, R., McMillan, H., Palmate, S. S., Sanchez, R., Sheng, Z., & Kumar, S. (2021). Current Status and Future Directions in Modeling a Transboundary Aquifer: A Case Study of Hueco Bolson. *Water*, 13(3178). <https://doi.org/10.3390/w13223178>
- Tapia-Villaseñor, E.M., & Megdal, S.B. (2021). The U.S.-Mexico Transboundary Aquifer Assessment Program as a Model for Transborder Groundwater Collaboration. *Water*, 13(4). <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/4/530>
- Taylor, R.G., Scanlon, B.R., Doell, P., Rodell, M. van Beek, R., Wada, Y., Longuevergne, L., Leblanc, M., Famiglietti, J.S., Edmunds, M., Konikow, L., Green, T.R., Chen, J., Taniguchi, M., Bierkens, M.F.P., Macdonald, A.M., Fan, Y., Maxwell, R., Yechieli, Y., ..., Treidel, H. (2012). Ground

- water and climate change. *Nature Climate Change*, 3(4), 322-329.  
[https://www.researchgate.net/publication/258807224\\_Ground\\_water\\_and\\_climate\\_change](https://www.researchgate.net/publication/258807224_Ground_water_and_climate_change)
- Teimoori, M., Mirdamadi, S. M., & Hosseini, S. J. F. (2018). Modeling of Climate Change Effects on Groundwater Resources: The Application of Dynamic Systems Approach. *International Journal of Agricultural Management on Development*.  
[http://ijamad.iaurasht.ac.ir/article\\_665021\\_17cdb475cc46543e739a6e21fc18ff5c.pdf](http://ijamad.iaurasht.ac.ir/article_665021_17cdb475cc46543e739a6e21fc18ff5c.pdf)
- Texas A&M University. (2014). *Groundwater conservation districts*. Texas Water.  
<https://texaswater.tamu.edu/groundwater/groundwater-conservation-districts.html>
- Texas State Library and Archives Commission. (n.d.). *Population Estimates of Texas Counties, 1990-99, Arranged in Descending Order*. <https://www.tsl.texas.gov/ref/abouttx/popenty4.html>
- Texas Water Conservation Scorecard. (2021). *El Paso Water Utility*. National Wildlife Federation.  
<http://www.texaswaterconservationscorecard.org/?id=6>
- Texas Water Development Board (TWDB). (n.d.). *Groundwater Conservation District Facts*.  
[https://www.twdb.texas.gov/groundwater/conservation\\_districts/facts.asp](https://www.twdb.texas.gov/groundwater/conservation_districts/facts.asp)
- Texas Water Development Board (TWDB). (2020a). *Historical Water Use Estimates by County 1974-1999*. [https://www3.twdb.texas.gov/apps/reports/WU/Pre2000\\_County](https://www3.twdb.texas.gov/apps/reports/WU/Pre2000_County)
- Texas Water Development Board (TWDB). (2020b). *Historical Water Use Estimates by County 2000-2014*. [https://www3.twdb.texas.gov/apps/reports/WU/SumFinal\\_CountyReport](https://www3.twdb.texas.gov/apps/reports/WU/SumFinal_CountyReport)
- Texas Water Development Board (TWDB). (2020c). *Historical Water Use Estimates by County 2015 and later (Includes Reuse)*.  
[https://www3.twdb.texas.gov/apps/reports/WU/SumFinal\\_CountyReportWithReuse](https://www3.twdb.texas.gov/apps/reports/WU/SumFinal_CountyReportWithReuse)
- Tinker, C. (2016). The Guarani Aquifer Accord. *The Law and Practice of International Courts and Tribunals*, 15, 249-263.
- Tinker, C.J. (Eds.). (2021). *Governance of the Guarani Aquifer: creating a commission*. ISARM 2021 2nd International Conference. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380029>
- Tront, J. (2015, 26 de agosto). *Transboundary Water Cooperation Helps Build Climate Resilience*. World Bank Blogs. <https://blogs.worldbank.org/water/transboundary-water-cooperation-helps-build-climate-resilience#:~:text=Transboundary%20cooperation%20allows%20countries%20to,and%20exploiting%20their%20water%20resources>.
- The Good Neighbor Environmental Board (GNEB). (2016). *Climate Change and Resilient Communities Along the U.S.-Mexico Border: The Role of the Federal Agencies*. United States Environmental Protection Agency. [https://19january2017snapshot.epa.gov/sites/production/files/2016-12/documents/17th\\_gneb\\_report\\_publication\\_120516\\_final\\_508.pdf](https://19january2017snapshot.epa.gov/sites/production/files/2016-12/documents/17th_gneb_report_publication_120516_final_508.pdf)
- The Hague. (2000). *Ministerial Declaration of The Hague on Water Security in the 21st Century*.  
[https://www.worldwatercouncil.org/fileadmin/world\\_water\\_council/documents/world\\_water\\_forum\\_2/The\\_Hague\\_Declaration.pdf](https://www.worldwatercouncil.org/fileadmin/world_water_council/documents/world_water_forum_2/The_Hague_Declaration.pdf)
- The United Nations. (1977). *Report of the United Nations Water Conference Mar del Plata*.  
<https://digitallibrary.un.org/record/724642?ln=en>
- The United Nations. (1992a). *International Conference on Water and the Environment: Development Issues for the 21st century*.  
<https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/30961/ICWE.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- The United Nations. (1992b). *United Nations Conference on Environment & Development Rio de*

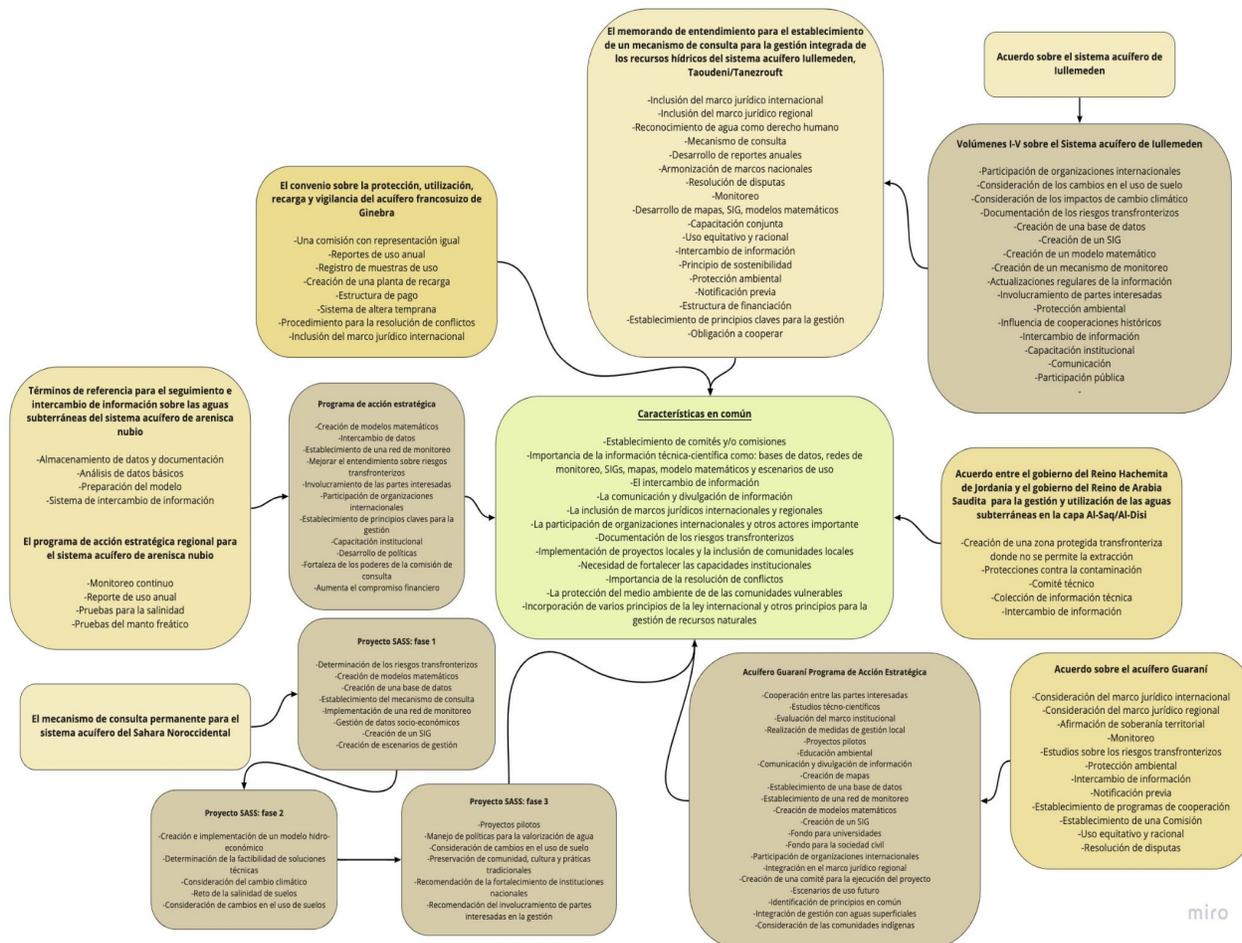
- Janeiro. <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/Agenda21.pdf>
- The United Nations. (n.d.). *Article 2 2.1.4 Groundwater*. UN Watercourses Convention. <https://www.unwatercoursesconvention.org/the-convention/part-i-scope/article-2-use-of-terms/2-1-4-groundwater/>
- UNESCO. (2015). *Transboundary Aquifers of the World Special Edition for the 7th World Water Forum 2015*. [https://www.un-igrac.org/sites/default/files/resources/files/TBAMap\\_2015.pdf](https://www.un-igrac.org/sites/default/files/resources/files/TBAMap_2015.pdf)
- UNESCO. (2021). *Transboundary Aquifers of the World Update 2021*. [https://www.un-igrac.org/sites/default/files/resources/files/2021TBAMap\\_UNESCO%20Version.pdf](https://www.un-igrac.org/sites/default/files/resources/files/2021TBAMap_UNESCO%20Version.pdf)
- Ungvarsky, J. (2020). System dynamics. De: J. Ungvarsky, *Salem Press Encyclopedia*.
- U.S. Global Change Research Program. (n.d.) *About USGCRP*. GlobalChange.gov. <https://www.globalchange.gov/about#:~:text=The%20U.S.%20Global%20Change%20Research,an%20their%20impacts%20on%20society.>
- United States Census Bureau. (2020a). *QuickFacts El Paso County, Texas*. <https://www.census.gov/quickfacts/elpasocountytexas>
- United States Census Bureau. (2020b). *QuickFacts Hudspeth County, Texas*. <https://www.census.gov/quickfacts/fact/table/hudspethcountytxas#>
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). (2008). *Ground Water Rule: A Quick Reference Guide*. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockkey=P100156H.txt>
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). (2011). State of the border region, indicators report, 2010. Washington D.C.: EPA, Border 2012: U.S.- Mexico Environmental Program.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). (2020, 9 de septiembre). *Summary of the Clean Water Act*. Laws & Regulations. <https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-clean-water-act>
- United States Environmental Protection Agency (USEPA) & Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2021). *Border 2025: United States-Mexico Environmental Program*. [https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-05/documents/final\\_us\\_mx\\_border\\_2025\\_final\\_may\\_6.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-05/documents/final_us_mx_border_2025_final_may_6.pdf)
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). (n.d.). *Heat Island Impacts*. <https://www.epa.gov/heatislands/heat-island-impacts>
- United States Geological Survey. (n.d.). *Transboundary Aquifer Assessment Program (TAAP)*. USGS. <https://webapps.usgs.gov/taap/studies.html>
- United States-Mexico Transboundary Aquifer Assessment Act, Public Law 109-448. (2006). <https://www.congress.gov/109/plaws/publ448/PLAW-109publ448.pdf>
- UN Water. (2021, Feb 15). *The United Nations global water conventions: Fostering sustainable development and peace*. United Nations. <https://www.unwater.org/the-united-nations-global-water-conventions-fostering-sustainable-development-and-peace/#:~:text=Eighty%20per%20cent%20of%20global,population%20live%20in%20these%20basins>
- University of Kansas. (s.f.). *The Role of Systematic Literature Reviews*. Research & Training Center on Independent Living. <https://rtcil.org/role-systematic-literature-reviews>
- Van der Gun, J. (2012). *Groundwater and Global Change: Trends, Opportunities and Challenges*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

- <https://www.un-igrac.org/sites/default/files/resources/files/Groundwater%20and%20Global%20Change%20-%20Trends%20Opportunities%20and%20Challenges.pdf>
- Vantaggiato, F.P., & Lubell, M. (2022). The benefits of specialized knowledge in polycentric governance. *Policy Studies Journal*, 50, 849-876. <https://onlinelibrary-wiley-com.pbidi.unam.mx:2443/doi/pdf/10.1111/psj.12464>
- Valenzuela Martinez, M. (2015). *Acuerdos Transfronterizos del Agua de México*. Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria (CEDRSSA).
- Vásquez-León, M., West, C.T., & Finan, T.J. (2003). A comparative assessment of climate vulnerability: agriculture and ranching on both sides of the US-Mexico border. *Global Environmental Change*, 13(3), 159-173. [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(03\)00034-7](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(03)00034-7)
- Velasco Ortiz, L. y Contreras, Ó. F. (2014). The Border as a Life Experience: Identities, Asymmetry and Border Crossing between Mexico and the United States. *Frontera Norte*, 26(3), 37-56.
- Vick, M. J. (2008). International Water Law and Sovereignty: A Discussion of the ILC Draft Articles on the Law of Transboundary Aquifers. *Global Business & Development Law Journal*, 21(1), 191-221. <https://scholarlycommons.pacific.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1221&context=globe>
- Villar, P.C. (2016). International cooperation on transboundary aquifers in South America and the Guarani Aquifer case. *Revista Brasileira de Política Internacional*, 59(1), 1-20. <http://dx.doi.org/10.1590/0034-7329201600107>
- Villar, P.C. (2018, 18 de junio). *Countdown to the Guarani Aquifer Agreement coming into force: will it be effective in promoting transboundary groundwater governance?* International Water Law Project Blog. <https://www.internationalwaterlaw.org/blog/2018/06/18/countdown-to-the-guarani-aquifer-agreement-coming-into-force-will-it-be-effective-in-promoting-transboundary-groundwater-governance/>
- Villar, P.C. (2020, 16 de noviembre). *The Agreement on the Guarani Aquifer enters into force: what changes now?* International Water Law Project Blog. <https://www.internationalwaterlaw.org/blog/2020/11/16/the-agreement-on-the-guarani-aquifer-enters-into-force-what-changes-now/>
- Villar, C.P. (Eds.). (2021). *The Agreement on the Guarani Aquifer: what to expect?* ISARM 2021 2nd International Conference. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380029>
- Villar, P.C., & Costa Ribeiro, W. (2011). The Agreement on the Guarani Aquifer: a new paradigm for transboundary groundwater management. *Water International*, 36(5), 646-660. <http://dx.doi.org/10.1080/02508060.2011.603671>
- Wallin, B., Gaye, C., Gourcy, L., & Aggarwal, P. (2005). Isotope Methods for Management of Shared Aquifers in Northern Africa. *Groundwater*, 43(5), 744-749. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00073.x>
- Walschot, M. (2020). Hidro-diplomacia y soberanía nacional en el acuífero guaraní: fracaso de un intento de gestión transfronteriza por intereses geopolíticos divergentes? *Agua y Territorio*, 15, 21-34. <https://orcid.org/0000-0003-4103-9932>
- Walter, M. (2012). Hacia una gestión compartida de las aguas subterráneas transfronteriza: la hidrogeología y el sistema acuífero Guaraní. *Boletín Geológico y Minero*, 123(3), 367-376. <http://ssrn.com/abstract=2258583>
- Weaver, C.P., Lempert, R.J., Brown, C., Hall, J.A., Revell, D., & Sarewitz, D. (2012). Improving the

- contribution of climate model information to decision making: the value and demands of robust decision frameworks. *WIREs Climate Change*, 4(1), 39-60.  
<https://wires.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/wcc.202>
- Wilder, M., Scott, C.A., Pineda Pablos, N., Varady, R.G., Garfin, G.M. & McEnvoy, J. (2010). Adapting Across Boundaries: Climate Change, Social Learning, and Resilience in the U.S.-Mexico Border Region. *Annals of the Association of American Geographers*, 100(4), 917-928.  
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00045608.2010.500235>
- Wilder, M., Garfin, G., Ganster, P., Eakin, H., Romero-Lankao, P., Lara-Valencia, F., Cortez-Lara, A., Mumme, S., Neri, C., & Muñoz-Arriola, F. (2013). Climate Change and U.S.- Mexico Border Communities. In G. Garfin, A. Jardine, R. Merideth, M. Black, & S. LeRoy (Eds.), *Assessment of Climate Change in the Southwest United States: A Report Prepared for the National Climate Assessment* (pp.340–384). Island Press.  
[https://www.swcarr.arizona.edu/sites/default/files/ACCSWUS\\_Ch16.pdf](https://www.swcarr.arizona.edu/sites/default/files/ACCSWUS_Ch16.pdf)
- Wilder, M.O., Varaday, R.G., Gerlak, A.K., Mumme, S.P., Flessa, K.W., Zuniga-Teran, A.A., Scott, C.A., Pineda Pablos, N., & Megdal, S.B. (2020). Hydrodiplomacy and adaptive governance at the U.S.-Mexico border: 75 years of tradition and innovation in transboundary water management. *Environmental Science & Policy*, 112, 189-202.  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7319942/>
- WorldClim. (2020a). *Future climate data* (2.1) [Base de datos]. WorldClim.  
<https://www.worldclim.org/data/cmip6/cmip6climate.html>
- WorldClim. (2020b). *Historical climate data* (2.1) [Base de datos]. WorldClim.  
<https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html>
- World Climate Research Programme (WCRP). (2018, 13 de marzo). *CMIP6-Endored MIPs*.  
<https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip6>
- World Climate Research Programme (WCRP). (2022, 14 de octubre). *WCRP Coupled Model Intercomparison Project (CMIP)*. <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip>
- Zektser, I. S. & Everett, L. G. (2004). *Groundwater Resources of the World and Their Use*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- 2nd Council of Ministers of GICRESAIT Project. (2014). *Memorandum of Understanding for the Establishment of a Consultation Mechanism for the Integrated Management of the Water Resources of the Iullemeden, Taoudeni/Tanezrouft Aquifer System*.  
<http://www.fao.org/faolex/results/details/fr/c/LEX-FAOC135180/>

# Apéndice

## A1. Nube de análisis usado para sintetizar los impulsores para la cooperación identificados en la revisión sistemática.



## A2. Síntesis de conceptos en la revisión sistemática

### MOTIVACIONES

Tema de las publicaciones académicas	Palabras/conceptos claves de los abstractos	Elementos de acuerdos y sus estudios gubernamentales
Conocimiento general	Base de conocimiento, información científica	
Estudios previos	Estudios científicos, estudios socio-económicos	
Comunicación y divulgación	Diálogo transfronterizo	

Partes interesadas/proyectos colaborativos	Técnicas participativas, programas de cooperación	
Educación ambiental	Conciencia ambiental, educación hídrica	
Participación pública	Promoción de mujeres y personas indígenas	Protección del ambiente y comunidades vulnerables
	Comunidades locales/proyectos pilotos	Proyectos locales

## RETOS

Temas de las publicaciones académicas	Palabras/conceptos claves de los abstractos
Falta de entendimiento	Entendimiento limitado
Cambio en el uso de suelo	Necesidades agrícolas
Cambio climático	Cambio climático, variabilidad climática
Disponibilidad de información, falta de información, acceso a información	Datos limitados
Esfuerzo político	Respuesta política limitada, falta de interés legislativa
Capacidad institucional	Instituciones débiles
Implementación de políticas públicas	Falta de herramientas regulatorias
Cambios demográficos, migración, valoración económico de agua	Condiciones socio-económicas

### A3. La lista de los estudios más importantes para la colección de información hidrogeológica del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Huevo (de CONAGUA, 2020):

Nombre del estudio	Organismo de ejecución	Año de ejecución	Aportaciones importantes

Digital model for simulated effects of ground-water pumping in the Hueco Bolson, El Paso Area, Texas, New Mexico, and Mexico	USGS	1976	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Se creó de un modelo numérico de dos capas del Bolsón del Hueco</li> <li>● Se describió del funcionamiento del sistema hidrológico en su estado estacionario</li> </ul>
Groundwater development in the El Paso region, Texas, with emphasis on the resources of the lower El Paso Valley	Texas Development of Water Resources	1980	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Se analizó la calidad de agua subterránea</li> </ul>
Diagnóstico de explotación del acuífero de la zona urbana de Ciudad Juárez, Chihuahua	Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Ciudad Juárez (JMAS)	1995	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Se realizó un análisis de la evolución de los niveles piezométricos</li> <li>● Se creó un modelo conceptual de la explotación</li> </ul>
Hydrochemical evolution of sodium-sulfate and sodium-chloride groundwater beneath the Northern Chihuahua Desert, Trans-Pecos, Texas, USA		1997	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Se hizo un análisis de la evolución de química del agua en la región del Desierto de Chihuahua</li> <li>● Se documentaron dos diferentes patrones de evolución química de las aguas subterráneas en zonas áridas</li> </ul>
Modelo matemático de simulación hidrodinámica del acuífero de la zona urbana de Ciudad Juárez	JMAS	1998	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Se creó un modelo para evaluar la situación actual y futuro del acuífero con el propósito de crear nuevas políticas</li> </ul>

Estudio de prospección geofísica en la zona de terrazas	JMAS	2000	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Se identificó una zona con condiciones favorables para el uso doméstico</li> </ul>
Estudio geohidrológico en la cuenca del Arroyo Las Bandejas	JMAS	2003	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Se realizó una evaluación del área para determinar su uso potencial como agua potable para Ciudad Juárez</li> </ul>
Simulated Ground-Water Flow in the Hueco Bolson, and Alluvial-Basin Aquifer System near El Paso, Texas	USGS	2003	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Se creó un modelo de flujo de aguas subterráneas en estado estacionario y transitorio</li> <li>● Se proporcionó información importante sobre la evolución temporal del bombeo</li> </ul>
Actualización geohidrológica del acuífero Valle de Juárez, Chihuahua	CONAGUA	2008	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Se actualizó el conocimiento de las condiciones del acuífero</li> </ul>
Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Juárez (0833) Estado de Chihuahua	CONAGUA	2015	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Se evaluó las condiciones actuales del acuífero en acuerdo con NOM-011-CONAGUA-2015</li> </ul>

Three-dimensional hydrogeologic framework model of the Rio Grande transboundary region of New Mexico and Texas, USA, and northern Chihuahua, Mexico: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2017-5060	USGS	2017	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Se creó un modelo en tres dimensiones para definir la geometría del acuífero</li> <li>● Se proporcionó características físicas para facilitar la incorporación de información en un modelo regional</li> </ul>
Geochemical Assessment of the Hueco Bolson, New Mexico and Texas, 2016-2017	USGS	2020	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Se analizó muestreos de agua subterráneas para analizar las propiedades físicas de los oligoelementos principales</li> </ul>
Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Juárez (0833) Estado de Chihuahua	CONAGUA	2020	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Se evaluó las condiciones actuales del acuífero de en acuerdo con NOM-011-CONAGUA-2015</li> </ul>

#### **A4. Las doctrinas más importantes para el manejo de recursos hídricos en los EUA**

*Soberanía territorial absoluta (Doctrina Harmon):* La doctrina de soberanía territorial absoluta, comúnmente conocido como la Doctrina Harmon, declara que “las normas, principios y precedentes del Derecho Internacional, no imponen obligación, ni responsabilidad” a un estado y que “la Jurisdicción de la Nación dentro de su propio territorio es necesariamente exclusiva y absoluta. No es susceptible de limitación alguna que no sea impuesta por el estado mismo”(Valenzuela Martinez, 2015, pp. 25-26). Esta doctrina se formuló durante el conflicto entre los EUA y México sobre la división original de las aguas del Río Bravo a finales del siglo XIX (McCaffrey, 1996). Aunque los gobiernos de los EUA y México negociaron un tratado que no se basó en la Doctrina Harmon, el concepto de soberanía territorial absoluta todavía existe para la apropiación de aguas subterráneas específicamente en el estado de Texas. Se refiere al

concepto de soberanía territorial absoluta en el caso de aguas subterráneas como la “norma de captura” (Petrossian et al., 2017).

*Integridad territorial absoluta* - La doctrina de integridad territorial absoluta se define como el opuesto de la Doctrina Harmon. Esta doctrina declara que “ningún estado soberano tiene derecho a privar a otro estado soberano de su territorio y recursos” (Petrossian et al., 2017, p. 22; Rieu-Clarke et al., 2012). Esta doctrina haría esencialmente imposible el reparto internacional del agua, por lo que no se utiliza en la práctica.

*Apropiación previa*- La doctrina de apropiación previa es una de las doctrinas más comunes en los marcos jurídicos para el agua en los estados del suroeste de los EUA. Esta doctrina mantiene que los primeros usuarios que dan un uso “beneficioso” al agua tienen derecho a desviarla y utilizarla (Davis, 2001). La doctrina de apropiación previa establece una jerarquía de derechos de uso donde los primeros en utilizar el agua tienen derechos superiores cuando los demás tienen derechos segundos (Davis, 2001). Muchas veces cuando el agua está sobre asignada, los usuarios con derechos segundos no reciben su asignación completa (Petrossian et al., 2017). Por ejemplo, en Texas, los usuarios con derechos segundos de agua del Río Bravo reciben aproximadamente el 70% de su asignación total en los años promedios (Carter et al., 2017). La doctrina de apropiación previa también incentiva el uso completo de recursos hídricos porque se penaliza el no uso de agua; La falta de desvío o de utilización del agua puede dar lugar a la pérdida de los derechos (Davis, 2001).

*Soberanía territorial limitada*- La doctrina de soberanía territorial limitada mantiene que “la soberanía del Estado está limitada por obligación de no utilizar los recursos de su territorio de forma que perjudique considerablemente a otros Estados” (Petrossian et al., 2017, p. 22; McCaffrey 2001). Esta doctrina es similar al concepto de “uso razonable” que es común en el marco jurídico internacional para el manejo de recursos hídricos compartidos (Petrossian et al., 2017). Por ejemplo, la doctrina de uso equitativo y razonable es un pilar de la Convención sobre el derecho de los usos de los cursos de agua internacionales para fines destinados de la navegación (Rieu-Clarke et al., 2012).

#### **A5. Tablas con los valores para la temperatura acumulada anual y la temperatura media anual para los modelos en los cuatro horizontes del tiempo**

$\Delta$ Temperatura media anual (°C)
---------------------------------------

Modelo	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100
GISS-E2-1-H				
SSP1-RCP2.6	1.22	1.83	1.80	1.88
SSP2-RCP4.5	1.22	2.19	2.64	3.01
SSP3-RCP7.0	1.18	1.99	2.82	3.64
SSP5-RCP8.5	1.27	2.23	3.50	4.62
CanESM5				
SSP1-RCP2.6	2.37	2.97	3.01	3.04
SSP2-RCP4.5	2.53	3.46	4.31	4.80
SSP3-RCP7.0	2.69	4.15	5.67	7.32
SSP5-RCP8.5	2.77	4.43	6.45	8.71
CNRM-ESM2-1				
SSP1-RCP2.6	1.63	2.40	2.55	2.56
SSP2-RCP4.5	1.61	2.65	3.40	4.01
SSP3-RCP7.0	1.58	2.70	3.97	5.59
SSP5-RCP8.5	1.80	3.05	4.78	6.91
MIROC-ES2L				
SSP1-RCP2.6	1.63	1.87	2.19	1.97
SSP2-RCP4.5	1.71	2.21	2.91	3.42
SSP3-RCP7.0	1.58	2.60	3.56	4.52
SSP5-RCP8.5	1.58	2.93	4.35	5.77

Precipitación acumulada anual (mm)				
Modelo	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100

GISS-E2-1-H				
SSP1-RCP2.6	236.78	234.63	235.33	240.44
SSP2-RCP4.5	243.72	242.37	249.12	248.20
SSP3-RCP7.0	237.74	239.72	245.06	250.13
SSP5-RCP8.5	235.20	242.07	242.82	243.95
CanESM5				
SSP1-RCP2.6	237.76	236.75	236.42	232.57
SSP2-RCP4.5	237.77	239.06	233.91	230.56
SSP3-RCP7.0	238.46	235.48	234.96	233.40
SSP5-RCP8.5	234.79	231.49	235.70	237.29
CNRM-ESM2-1				
SSP1-RCP2.6	223.97	222.63	221.17	222.06
SSP2-RCP4.5	234.75	221.95	219.76	217.39
SSP3-RCP7.0	229.49	229.89	225.36	216.22
SSP5-RCP8.5	223.49	225.57	207.56	202.90
MIROC-ES2L				
SSP1-RCP2.6	247.43	246.47	246.57	245.81
SSP2-RCP4.5	246.35	241.10	239.74	242.62
SSP3-RCP7.0	242.39	233.39	233.64	231.17
SSP5-RCP8.5	243.31	242.18	236.93	233.72