

PROGRAMA
DE GESTIÓN DE
CALIDAD DEL AIRE
Y DE ACCIÓN ANTE EL
CAMBIO CLIMÁTICO
ESTADO DE PUEBLA
2021-2030

**VULNERABILIDAD DEL SECTOR HÍDRICO ANTE EL
CAMBIO CLIMÁTICO**

Programa
PEACC



MEDIO AMBIENTE
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



INECC
INSTITUTO NACIONAL
DE ECOLOGÍA Y
CAMBIO CLIMÁTICO

CAVMe
COMISIÓN AMBIENTAL
DE LA MEGALÓPOLIS



**Gobierno
de Puebla**

Proyecto Financiado por el Fideicomiso 1490
para Apoyar los Programas, Proyectos
y Acciones Ambientales de la Megalópolis

PROGRAMA DE GESTIÓN DE CALIDAD DEL AIRE Y DE ACCIÓN ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO 2021-2030 DEL ESTADO DE PUEBLA

"Proyecto Financiado por el Fideicomiso 1490
para Apoyar los Programas, Proyectos
y Acciones Ambientales de la Megalópolis"

Este documento fue desarrollado por:
AMBIENS Consultoría, Sustentabilidad y Gestión Climática SA de CV para la
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE, DESARROLLO SUSTENTABLE Y
ORDENAMIENTO TERRITORIAL DEL GOBIERNO DEL ESTADO DE PUEBLA
Bajo el proyecto con número de contrato
GESAL-140-027/2022



Secretaría de
Medio Ambiente,
Desarrollo Sustentable y
Ordenamiento Territorial
Gobierno de Puebla

Autores del documento:

Mtra. María Luisa Cuevas Fernández

Biol. Saúl Castañeda Contreras

Con la colaboración de:

Ing. Víctor Javier Gutiérrez Avedoy

Mat. Jorge Martínez Castillejos

Este documento se elaboró para la Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial del Gobierno del Estado de Puebla con recursos del Proyecto Financiado por el Fideicomiso 1490 “Para Apoyar los Programas, Proyectos y Acciones Ambientales de la Megalópolis”.

Citar el documento como: Vulnerabilidad del Sector Hídrico ante el Cambio Climático, 2023. Programa de Gestión de Calidad del Aire y de Acción ante el Cambio Climático, 2021-2030. SMADSOT – CAME – SEMARNAT.

La reproducción total o parcial de este documento podrá efectuarse mediante autorización expresa de la fuente y dándole el crédito correspondiente.

© 2023

PROGRAMA
DE GESTIÓN DE **CALIDAD DEL AIRE**
Y DE ACCIÓN ANTE EL **CAMBIO CLIMÁTICO**
ESTADO DE PUEBLA
2021-2030

**VULNERABILIDAD DEL SECTOR HÍDRICO ANTE EL
CAMBIO CLIMÁTICO**

CONTENIDO

Introducción	6
Métodos	16
Sensibilidad	18
Criterio 2. Dependencia de agua subterránea	25
Criterio 3. Disponibilidad media anual negativa	25
Criterio 4. Crecimiento poblacional	25
Exposición	26
Capacidad adaptativa	27
Criterio 5. Porcentaje de agua residual tratada	27
Vulnerabilidad	28
Resultados	31
Región Sierra Norte	34
Región Sierra Nororiental	35
Región Valle Serdán	35
Región Angelópolis	36
Región Valle de Atlixco	37
Región Mixteca	37
Región Sierra Negra	38
Recomendaciones	39
Referencias	40

Tablas

Tabla 1. Usos del agua en el estado de Puebla	10
Tabla 2. Infraestructura y capacidad institucional para la GIA en las regiones del estado de Puebla.....	11
Tabla 3. Acuíferos dentro de los límites político-administrativos del estado de Puebla.	12
Tabla 4. Variables consideradas para calcular la vulnerabilidad del sector hídrico.....	17
Tabla 5. Rangos de valores y pesos de las variables usadas para la identificación de zonas de recarga potenciales.....	22
Tabla 6. Porcentaje del área de los acuíferos con zonas de recarga potencial.	23
Tabla 7. Codificación de valores de % de agua residual tratada.	27

Figuras

Figura 1. Triángulo de textura del suelo calculada a partir de los datos de contenido de arena, arcilla y limo.....	19
Figura 2. Distribución de los valores de permeabilidad de las rocas del estado de Puebla.....	20
Figura 3. Combinaciones de las variables de crecimiento poblacional y exposición para el cálculo de la vulnerabilidad.	29
Figura 4. Resumen gráfico del proceso para calcular la vulnerabilidad.....	30
Figura 5. Mapas de vulnerabilidad del sector hídrico de acuerdo con ocho proyecciones de cambio climático; hc: horizonte temporal cercano (2021-2040), hl: horizonte temporal lejano (2081-2100).....	32

VULNERABILIDAD DEL SECTOR HÍDRICO ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

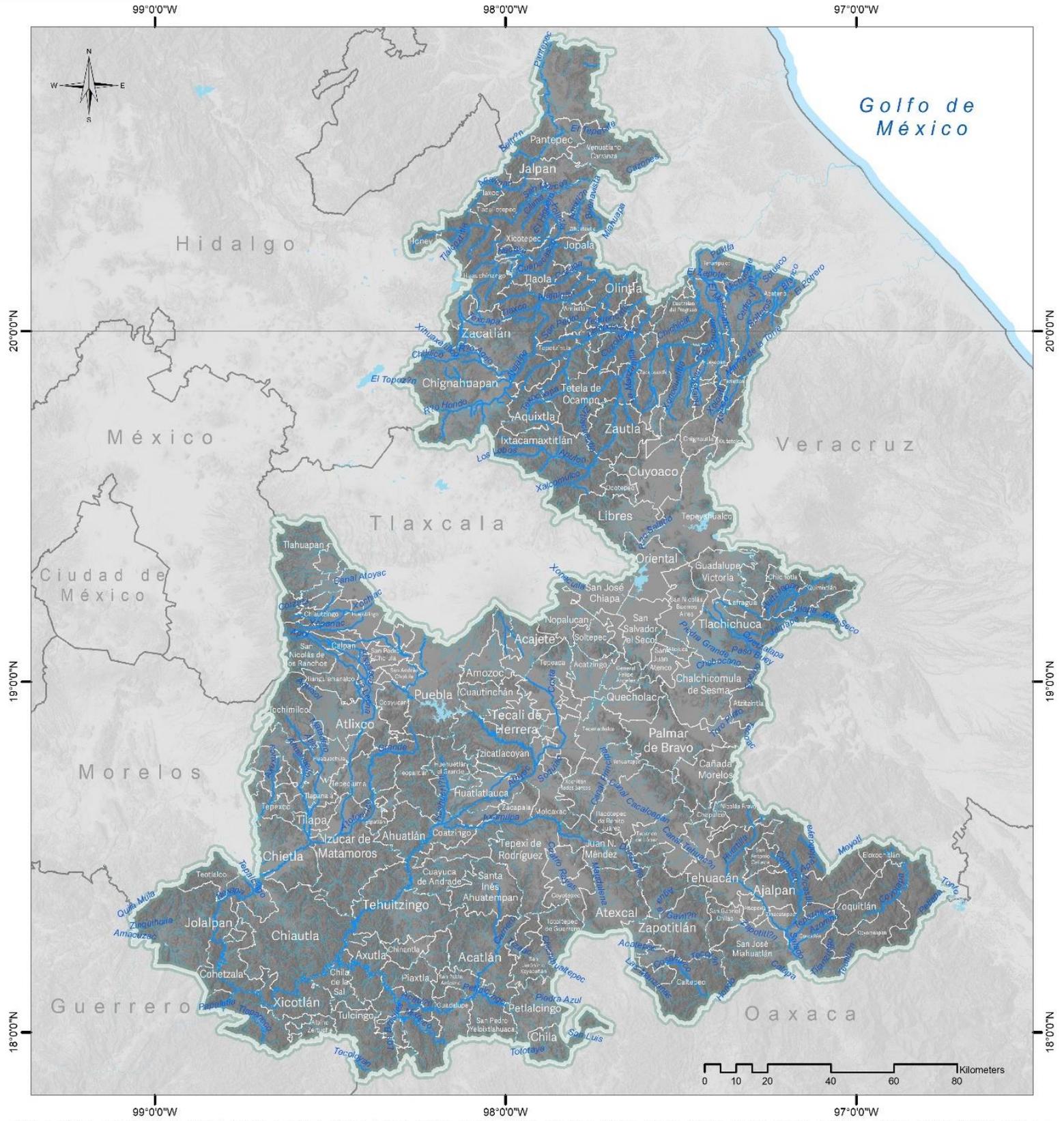
INTRODUCCIÓN

El estado de Puebla cuenta con importantes recursos hídricos que requieren ser gestionados con una visión integral y de paisaje, no solo por la diversidad que albergan, también por la importancia económica y social que tienen para el desarrollo de actividades productivas y culturales, y los posibles impactos directos que el cambio climático tiene sobre ellos (ONU-Agua, 2022).

En las regiones montañosas de la Sierra Norte y Sierra Nororiental del estado, existen varias corrientes de importancia como los ríos Pantepec (que se convierte en el río Tuxpan), Cazonces, San Marcos, Necaxa (que alimenta la presa del mismo nombre), Laxaxalpan, Tecuantepec y Apulco. Muchos de estos ríos dotan de agua a ciudades importantes como Chignahuapan, Zacatlán, Atzingo y Teziutlán. Estas corrientes, que se originan en las serranías del estado de Puebla, drenan hacia el estado de Veracruz para finalmente desembocar al Golfo de México, por lo que la salud e integridad de estos ríos y sus afluentes tiene impactos más allá de las fronteras estatales.

En la parte centro y sur, los ríos más importantes son: Atoyac, Nexapa y Salado. Al igual que las corrientes arriba mencionadas, estos tres ríos dotan de agua a las principales zonas urbanas, así como a zonas industriales y agropecuarias de la entidad (Mapa 006).

Además de las fuentes naturales de agua superficial, Puebla cuenta con 11 presas almacenadoras, 8 derivadoras y 40 bordos, que suman en conjunto una capacidad total de almacenamiento de 643 Mm³. La presa Manuel Ávila Camacho (Valsequillo) es la más importante de la entidad; su función principal es la irrigación de una superficie de 20,619 hectáreas, pertenecientes al distrito de riego Núm. 30 Valsequillo, el cual se extiende hacia el Valle de Tehuacán (CONAGUA, 2020; INEGI, 2000).



Simbología

- | | | | |
|---|---------------------------------|---|--------------|
|  | Cuerpos de agua |  | Rios |
|  | Límite del Estado de Puebla |  | ACUEDUCTO |
|  | Límite estatal |  | CANAL |
|  | Límite municipal |  | INTERMITENTE |
|  | Municipios del Estado de Puebla |  | PERENNE |



M006. Cuerpos de agua Superficiales

Fuente: Elaboración Propia con información del INEGI, Continuo de subcuencas del territorio Mexicano, basado en las cartas de la Red Hidrológica escala 1:50000

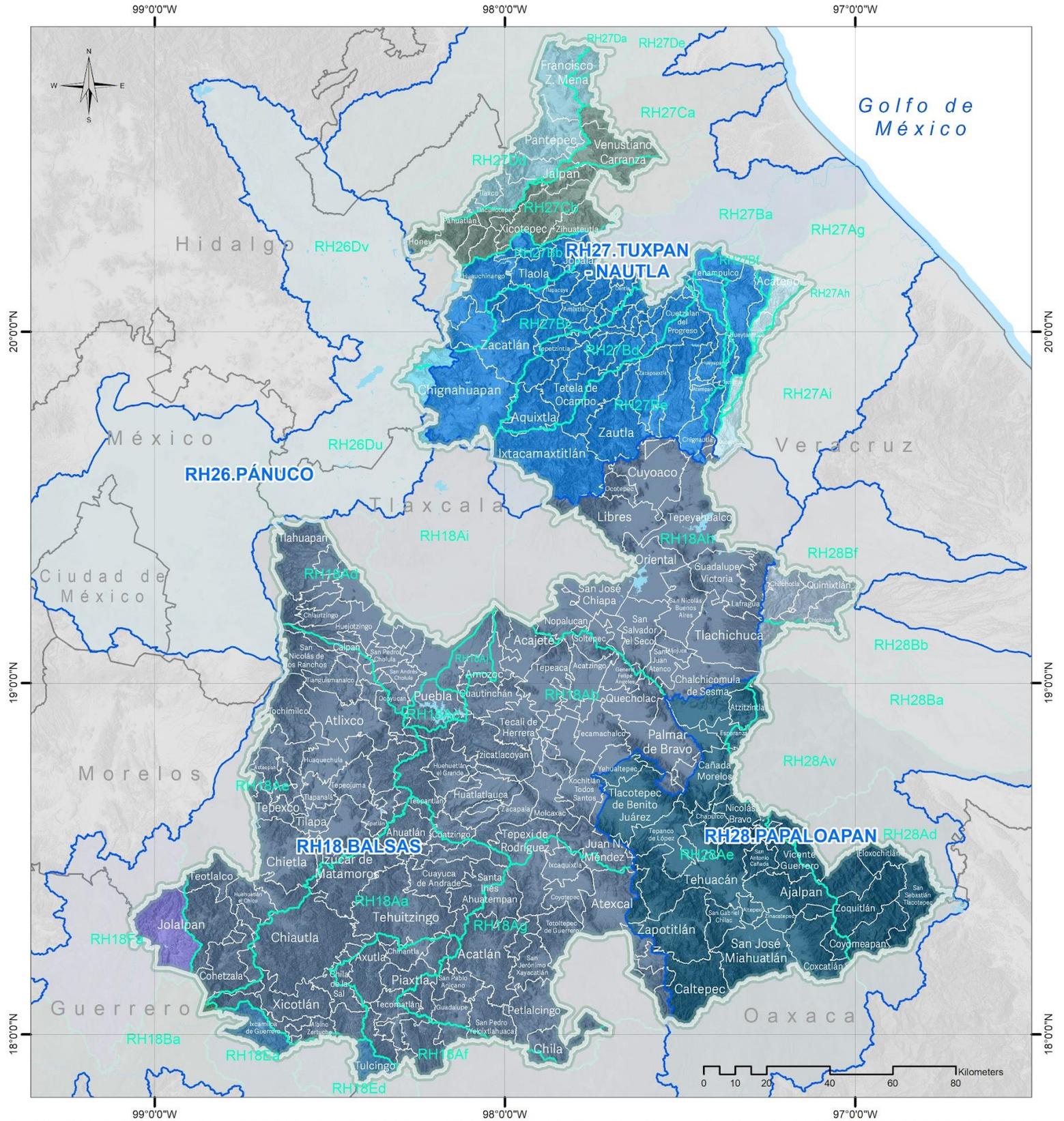
Coordinate System: MEXICO ITRF 2008 LCC
Projection: Lambert Conformal Conic 2SP
Datum: ITRF 2008

El diseño actual de la infraestructura hídrica (presas, bordos y obras de derivación), considera la tendencia y variabilidad climática histórica y asume que se mantendrá sin cambios, sin embargo, esta idea debe cambiar ante los hechos cada vez más evidentes de modificación en los patrones de precipitación y temperatura. Para el diseño, la planeación, operación y gestión de nueva infraestructura hidráulica es necesario analizar las posibles repercusiones del cambio climático considerando los escenarios climáticos futuros (ONU-Agua, 2019; Martínez et al., 2010).

Las aguas superficiales del estado de Puebla están distribuidas en tres regiones hidrológicas: RH18 Balsas, RH27 Norte de Veracruz (Tuxpan-Nautla) y RH28 Papaloapan (Mapa 005) (CONAGUA, 2021). La región hidrológica RH18 Balsas cubre el 59.12% de la superficie estatal. (SMADSOT, 2021). De acuerdo con datos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), para el año 2020 se registraron 11,669 hm³/año de agua renovable¹, que dividida entre los 6.58 millones de habitantes que reportó el último censo de población y vivienda, representa 1,772 m³/hab/año de agua renovable per cápita (CONAGUA, 2021a).

Para clasificar el grado de presión sobre los recursos hídricos, la CONAGUA define cinco categorías, que van de “sin estrés” (donde el agua extraída no rebasa el 10% del líquido renovable disponible) a “Muy alto” (cuando la extracción es mayor al 100% de la disponibilidad natural). El estado de Puebla tiene un grado de presión “alto” en la RH18 Balsas, lo que significa que la extracción es mayor al 40% de la disponibilidad natural, la capital del Estado, Heroica Puebla de Zaragoza, y su zona conurbada se localizan dentro de esta región. Las regiones Norte de Veracruz y Papaloapan están clasificadas sin estrés (CONAGUA, 2021b). En Puebla, la distribución de la precipitación media anual para el periodo 1985- 2020 fue de 1,365 mm, de acuerdo con la CONAGUA (2020), misma que se concentra en la zona norte de la entidad (SMADSOT, 2021). Tal cantidad de agua representa una ventaja para la entidad, pero también un reto en materia de protección civil y de salud, ya que los sistemas de alcantarillado han sido rebasados por el crecimiento de la población en los centros urbanos, y en temporada de lluvias estos resultan ser insuficientes para desalojar el agua que se concentra en las ciudades, transmitiendo enfermedades a través del agua; por otra parte, en las zonas rurales los eventos hidrometeorológicos extremos ocasionan inundaciones, deslaves y derrumbes, propiciando severos problemas a los habitantes (en sus personas y bienes), la infraestructura y la producción agropecuaria (Gobierno de Puebla, 2022, ONU-Agua, 2019).

¹ Cantidad de agua máxima que es factible explotar anualmente en una región (CONAGUA, 2021a)



Simbología

- Cuerpos de agua
- Límite del Estado de Puebla
- Región Hidrológica
- Límite estatal
- Subcuencas
- Límite municipal

Cuencas

Clave, Nombre

- A. R. ATOVAC
- A. R. NAUTLA Y OTROS
- A. R. PAPALOAPAN
- B. R. BALSAS - MEZCALA
- B. R. JAMAPA Y OTROS
- B. R. TEOCUILTLA
- C. R. CAZONES
- D. R. MOCTEZUMA
- D. R. TUXPAN
- E. R. TLAPANECO
- F. R. GRANDE DE AMACUZAC



M005. Regiones Hidrológicas

Fuente: Elaboración Propia con información del INEGI, Continuo de subcuencas del territorio Mexicano, basado en las cartas de la Red Hidrológica escala 1:50000

Coordinate System: MEXICO ITRF 2008 LCC
Projection: Lambert Conformal Conic 2SP
Datum: ITRF 2008

Esta condición diferencial de disponibilidad, acceso y calidad de los recursos hídricos a lo largo del Estado, aunado a las condiciones de rezago social y económico de la población, representa un reto para la Gestión Integral del Agua (GIA).

El agua se usa de diversas formas en todas las actividades humanas, para su mejor administración y manejo, la CONAGUA clasifica los usos en “consuntivos²” y “no consuntivos”. Dentro de los usos consuntivos se encuentran el uso agrícola, agroindustrial, doméstico, acuacultura, servicios, industrial, termoeléctricas, pecuario, público urbano, de usos múltiples, comercio, otros. Por otro lado, los rubros no consuntivos son hidroeléctricas y conservación ecológica. A nivel nacional, 60.6% del agua utilizada para uso consuntivo proviene de fuentes superficiales, como ríos, arroyos y lagos, mientras que el 39.4% restante corresponde a fuentes subterráneas (acuíferos) (CONAGUA, 2021).

El Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) (CONAGUA, 2022) muestra que en la entidad 84% del agua utilizada proviene de fuentes superficiales, mientras que 16% proviene de agua subterránea. En la tabla 1 se presenta el volumen concesionado por uso y origen del agua a nivel estatal.

TABLA 1. USOS DEL AGUA EN EL ESTADO DE PUEBLA

USO	VOLUMEN TOTAL CONCESIONADO (m ³ /año)	VOLUMEN CONCESIONADO AGUA SUBTERRÁNEA (m ³ /año)	VOLUMEN CONCESIONADO AGUA SUPERFICIAL (m ³ /año)
Acuacultura	88,602,613.56	77,570.00	88,525,043.56
Agrícola	1,279,894,799.80	605,610,799.54	674,284,000.26
Conservación ecológica	0.00	0.00	0.00
Diferentes usos	40,083,209.86	14,577,283.82	25,505,926.04
Doméstico	517,496.63	47,846.75	469,649.88
Generación de energía eléctrica	5,253,661,887.88	0.00	5,253,661,887.88
Industrial	432,130,268.91	60,454,649.50	371,675,619.41
Otros	0.00	0.00	0.00
Pecuario	6,326,804.52	5,831,734.48	495,070.04
Público urbano	803,908,052.87	601,712,166.80	202,195,886.07
Servicios	37,304,666.40	9,153,148.60	28,151,517.80
Total	7,942,429,800.43	1,297,465,199.49	6,644,964,600.94

Fuente: Elaboración propia con datos de la CONAGUA.

² El volumen de agua de una calidad determinada que se consume al llevar a cabo una actividad específica, el cual se determina como la diferencia del volumen de una calidad determinada que se extrae, menos el volumen de una calidad también determinada que se descarga, y que se señalan en el título respectivo (Ley de Aguas Nacionales, Art.3. DOF, 1992 Última reforma publicada 06-01-2020)

La planeación del Desarrollo Estratégico Regional del estado de Puebla se lleva a cabo en 7 regiones: Sierra Norte, Sierra Nororiental, Valle Serdán, Angelópolis, Valle de Atlixco, Mixteca y Sierra Negra. Estas regiones agrupan a los 217 municipios de la entidad a partir de sus características geográficas, históricas, culturales, económicas y políticas.

De acuerdo con el Programa Institucional de la Comisión Estatal de Agua y Saneamiento (CEASPUE, 2019), las siete regiones en las que se divide Puebla cuentan con la siguiente infraestructura y capacidad institucional (Tabla 2).

TABLA 2. INFRAESTRUCTURA Y CAPACIDAD INSTITUCIONAL PARA LA GIA EN LAS REGIONES DEL ESTADO DE PUEBLA.

REGIÓN	ORGANISMOS OPERADORES	PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR)	PTAR OPERANDO	% DE PTAR OPERANDO
Sierra Norte	4	110	41	37
Sierra Nororiental	3	56	24	43
Valle Serdán	7	87	38	44
Angelópolis	6	42	18	43
Valle de Atlixco	2	24	11	46
Mixteca	2	35	16	46
Sierra Negra	1	26	15	58
Total	25	380	163	43

Fuente: Elaboración propia con datos de la CEASPUE.

El agua de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) puede ser utilizada como fuente de agua de riego y llenado de lagos, una vez que ha sido tratada. La falta de plantas y colectores pluviales y sanitarios que aseguren un correcto saneamiento de las aguas residuales e industriales antes de su disposición final, aunado a la deforestación (y la consecuente erosión) y el uso de fertilizantes y pesticidas sin un buen manejo, provocan importantes problemas de salud, contaminación (atmosférica y ambiental), y pérdida de biodiversidad, reduciendo así la disponibilidad de aprovechamiento y disfrute de los recursos hídricos (CONAGUA, 2020a; Soto y Herrera, 2019).

El caso más emblemático de la problemática arriba descrita es el del río Atoyac, el cual presenta niveles de contaminación tan altos que se ha convertido en un problema de salud pública y ambiental a nivel interestatal (Gobierno de Puebla, 2022; CONAGUA, 2020a). El río y sus afluentes se encuentran contaminados, principalmente por materia orgánica, sólidos suspendidos, nutrientes, detergentes, tóxicos orgánicos, bacterias y color, además de encontrar rastros de otros contaminantes como cloroformo, cloruro de metilo, cadmio, cromo,

mercurio, plomo, cianuros, sulfatos, aluminio, cobre, fierro, grasas y aceites, sólidos disueltos, sulfuros y zinc (CONAGUA, 2020a).

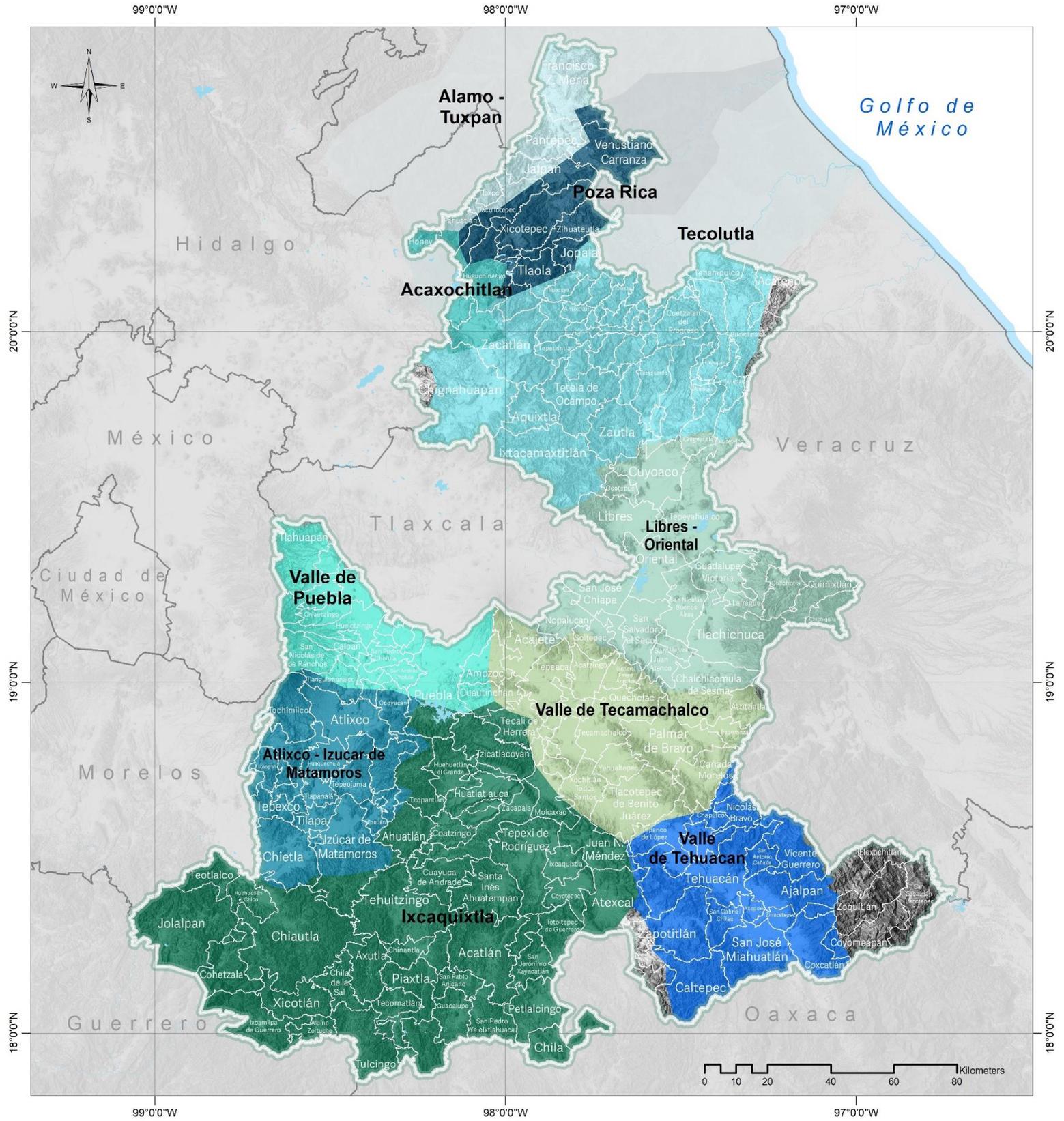
El desbordamiento del río Atoyac, y sus afluentes, producto de eventos hidrometeorológicos extremos conlleva no solo un problema de protección civil, también de salud y remediación por contaminación con sustancias tóxicas.

Además de las corrientes superficiales, el estado de Puebla tiene circunscritos territorialmente seis acuíferos, cinco pertenecientes a la región Balsas y uno a la región del Golfo Centro (Mapa 007). Adicionalmente, existen otros acuíferos que tienen parte de su superficie dentro de los límites político-administrativos del estado de Puebla, o son intersectados espacialmente en pequeños segmentos, sin embargo, están asignados a otra circunscripción territorial (DOF 17/09/2020). A continuación, se enlistan los principales acuíferos dentro del estado de Puebla y su disponibilidad media anual (Tabla 3).

TABLA 3. ACUÍFEROS DENTRO DE LOS LÍMITES POLÍTICO-ADMINISTRATIVOS DEL ESTADO DE PUEBLA.

ACUÍFERO	REGIÓN HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVA	DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL (hm ³)	DISPONIBILIDAD	CIRCUNSCRIPCIÓN TERRITORIAL
Atlixco - Izúcar de Matamoros	Balsas	37.8794	Con disponibilidad	Puebla
Huajuapán de León	Balsas	1.9687	Con disponibilidad	Oaxaca
Ixcaquixtla	Balsas	38.4180	Con disponibilidad	Puebla
Libres - Oriental	Balsas	2.0035	Con disponibilidad	Puebla
Valle de Puebla	Balsas	20.6677	Con disponibilidad	Puebla
Valle de Tecamachalco	Balsas	-63.2311	Sin disponibilidad	Puebla
Acaxochitlán	Golfo Centro	1.1428	Con disponibilidad	Hidalgo
Álamo - Tuxpan	Golfo Centro	47.0474	Con disponibilidad	Veracruz
Martínez de La Torre - Nautla	Golfo Centro	41.2447	Con disponibilidad	Veracruz
Poza Rica	Golfo Centro	7.3274	Con disponibilidad	Veracruz
Tecolutla	Golfo Centro	28.6455	Con disponibilidad	Veracruz
Tuxtepec	Golfo Centro	5.4195	Con disponibilidad	Oaxaca
Valle de Tehuacán	Golfo Centro	28.1988	Con disponibilidad	Puebla
Tecocomulco	Valle de México	24.3263	Con disponibilidad	Hidalgo

Fuente: Elaboración propia con datos de la CONAGUA.



Simbología

- Límite municipal
- Cuerpos de agua
- Límite del Estado de Puebla
- Límite estatal

Hidrología Subterránea

- Acaxochitlan
- Alamo - Tuxpan
- Atlixco - Izúcar de Matamoros
- Ixcaquixtla
- Libres - Oriental
- Poza Rica
- Tecolutla
- Valle de Puebla
- Valle de Tecamachalco
- Valle de Tehuacan



M007. Hidrología Subterránea

Fuente: Elaboración Propia con información de Disponibilidad de Acuíferos 2020, Sistema Nacional de Información del Agua (SINA), CONAGUA. Escala 1:250,000.

Sistema de Coordenadas: MEXICO ITRF 2008 LCC
Proyección: Lambert Conformal Conic 2SP
Datum: ITRF 2008

Como se puede observar en la Tabla 3, el acuífero Valle de Tecamachalco, en la región Balsas, tiene una disponibilidad media anual negativa (déficit) de -63.23115 hm³, lo que hace que esté catalogado como “Sin disponibilidad”. En esta zona se encuentran contenidos, de manera total o parcial, 29 municipios: Acatzingo, Amozoc, Cañada Morelos, Cuapixtla de Madero, Cuautinchán, Chapulco, Esperanza, General Felipe Ángeles, Huitziltepec, Mixtla, Molcaxac, Nicolás Bravo, Palmar de Bravo, Quecholac, Los Reyes de Juárez, San Salvador Huixolatlá, Santiago Miahuatlán, Santo Tomás Hueyotlipán Tecali de Herrera, Tecamachalco, Tepanco de López, Tepatlaxco de Hidalgo, Tepeaca, Tepeyehualco de Cuautémoc, Tlacotepec de Benito Juárez, Tlanepantla, Tochtepec, Xochitlán Todos Santos y Yehualtepec (CONAGUA 2020b).

De la extracción total del acuífero Valle de Tecamachalco, un 90% se destina a la actividad agrícola (CONAGUA 2020b). En general, el agua subterránea es un recurso hídrico confiable para la agricultura, en términos de calidad y cantidad, ya que puede complementar el suministro de agua superficial cuando hay una temporada seca (ONU-Agua, 2019).

Especialmente, en los meses secos o durante eventos de sequía, el agua subterránea juega un rol muy importante para el medio ambiente, ya que mantiene el flujo y nivel de agua en ríos, lagos y humedales, a estos ecosistemas dependientes del agua subterránea se le llama (GDEs, por sus siglas en inglés). Los GDEs juegan un papel fundamental a la hora de proteger los acuíferos de la contaminación, pues garantizan la separación física y favorecen procesos biofísicos como la filtración, la biodegradación y la adsorción de contaminantes, facilitando y protegiendo la recarga natural (ONU-Agua, 2019; 2022).

El cambio climático afecta negativamente a los ecosistemas de agua dulce, debido a que altera los flujos fluviales y la calidad del agua, el origen de los riesgos se encuentra en el aumento de las temperaturas; el aumento de las cargas de sedimentos, nutrientes y contaminantes debido a las fuertes lluvias, y la mayor concentración de contaminantes durante las sequías (ONU-Agua, 2019).

Los acuíferos se recargan naturalmente con agua de lluvia, agua proveniente de nieve derretida o de agua que se infiltra desde el fondo de lagos, ríos, y otros cuerpos de agua superficial. También existen técnicas para gestionar la recarga artificial de acuíferos a través de la inyección de agua tratada. Sin embargo, los acuíferos no responden a la misma velocidad que lo hacen las corrientes o cuerpos de agua superficiales ante los impactos directos del cambio climático, por lo que pueden ser menos vulnerables que las aguas superficiales (IPCC, 2022).

Los modelos de predicción y cuantificación de la respuesta de los sistemas hídricos subterráneos ante el impacto del cambio climático enfrentan serias incertidumbres debido a que no existen datos globales consistentes sobre suelos y recursos hídricos subterráneos (IPCC, 2022). No obstante, ante un escenario de disminución en la disponibilidad de agua superficial se ha observado un aumento en la demanda de agua subterránea, lo que puede alterar la capacidad de almacenamiento y la velocidad de recarga de los acuíferos (IPCC, 2022; ONU-Agua, 2022; ONU-Agua, 2019; Martínez *et al.*, 2010). A escala global, entre 10 y 23% de las cuencas están al límite de su caudal ambiental debido a la sobreexplotación de los acuíferos (IPCC, 2022).

Otro efecto observado del cambio climático que influye negativamente en la recarga de las aguas subterráneas es la intensificación de las precipitaciones en áreas con instalaciones de saneamiento inadecuadas, las cuales al ser inundadas y no poder gestionar correctamente el exceso de agua, propicia el arrastre de patógenos microbianos y sustancias químicas a la capa freática, a través de los suelos poco profundos (ONU-Agua, 2022). En Puebla la CONAGUA tiene identificados varios puntos de alta contaminación a lo largo de la RH18 Balsas que ponen en riesgo la calidad del agua del acuífero del Valle de Puebla (CONAGUA, 2021c).

A nivel mundial, casi el 50% de la población urbana se abastece de aguas subterráneas, el uso de pozos de agua privados para el autoabastecimiento ha proliferado en los últimos años en zonas urbanas como estrategia de adaptación, cuando el suministro de agua es irregular o cuando la canalización no es buena, sin embargo, también ha proliferado en zonas periurbanas y de asentamientos irregulares como estrategia para reducir la factura del agua y evitar pagar tarifas más altas por el consumo (ONU-Agua, 2022).

El manejo sustentable de los acuíferos puede considerarse una estrategia de adaptación para hacer frente a condiciones de estrés hídrico, pero también puede considerarse una medida de mitigación, ya que pueden captar y retener carbono y reducir la acumulación de CO₂ en la atmósfera (ONU-Agua, 2022; ONU-Agua, 2019).

Es necesario monitorear con más frecuencia los acuíferos altamente vulnerables que prestan servicios a la población y al medioambiente para poder establecer estrategias y medidas de adaptación que fortalezcan la gestión del agua subterránea, la gobernanza local y la seguridad hídrica. A continuación, se presenta el método adoptado para analizar la vulnerabilidad de los acuíferos del estado de Puebla.

MÉTODOS

La vulnerabilidad al cambio climático es un concepto complejo que involucra diferentes factores. En la Ley General de Cambio Climático se define como el “nivel a que un sistema es susceptible, o no es capaz de soportar los efectos adversos del Cambio Climático, incluida la variabilidad climática y los fenómenos extremos.”³

La evaluación de la vulnerabilidad es un proceso esencial para comprender y abordar los riesgos asociados con el cambio climático, garantizar la adaptación y aumentar la resiliencia de las comunidades y ecosistemas. Existen diferentes marcos conceptuales y aproximaciones para evaluar la vulnerabilidad de diferentes sectores ante este fenómeno, cada una de las cuales enfatiza diferentes aspectos. Ya sea bajo una perspectiva biofísica, socioeconómica, o bajo un enfoque integrado, cada una sustentada en diferentes metodologías particulares para su análisis (Bruno Soares *et al.*, 2012), las evaluaciones en general consideran tres atributos de los sistemas analizados: la exposición, como componente externo, representada por el cambio en el clima, la sensibilidad, y la capacidad adaptativa del sistema, como componentes internos de este (Foden *et al.*, 2013; 2019; Thornton *et al.*, 2014; Gumel, 2022).

Para el sector hídrico se usó la aproximación que la define como una función del carácter, la magnitud, la tasa de cambio y variación climática a los que está expuesto un sistema, la sensibilidad y la capacidad de adaptación que presenta el sistema (Parry *et al.*, 2007). De acuerdo con el marco teórico establecido por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, 2007), la vulnerabilidad se calculó considerando tres componentes: a) exposición, b) sensibilidad y c) capacidad adaptativa mediante la fórmula:

Vulnerabilidad = (Exposición + Sensibilidad) - Capacidad adaptativa

La exposición se define como la magnitud, carácter y velocidad de las variaciones climáticas que afectan un sistema; la sensibilidad es el grado en que el sistema es afectado por la variabilidad climática y el cambio climático debido a las características que lo definen, y la capacidad adaptativa como aquellos recursos, capital humano e instrumentos que representan una mayor posibilidad de adaptación (INECC y SEMARNAT, 2019 en: CONANP y PNUD, 2021). Esta aproximación ha sido usada en diferentes instrumentos en la

³ Ley General de Cambio Climático, Art.3 fr. XLII (DOF, 2012 última reforma 11-05-2022)

materia, como el Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático (ANVCC) y la Estrategia Estatal de Cambio Climático 2021-2030 de Puebla.

Una característica importante de las evaluaciones de vulnerabilidad realizadas para el presenta Programa es la representación espacialmente explícita. El conocer la distribución espacial de los criterios y resultados de los análisis, así como su representación en mapas, resulta de suma importancia. Esto permite identificar regiones donde el sistema, o alguno de sus elementos, son particularmente vulnerables, apoya a la formulación de políticas públicas, y permite priorizar y eficientizar los esfuerzos de adaptación (Preston *et al.*, 2011).

Para calcular la vulnerabilidad del sector hídrico del estado se consideraron ocho criterios para construir los tres elementos que la conforman. En la Tabla 4 se indican los componentes, los criterios, así como la contribución de los valores de estas para el cálculo de la vulnerabilidad, p.ej. -:+ indica que, a menor valor de la variable, mayor es el aporte.

TABLA 4. VARIABLES CONSIDERADAS PARA CALCULAR LA VULNERABILIDAD DEL SECTOR HÍDRICO.

COMPONENTE	CRITERIO	CONTRIBUCIÓN
Sensibilidad	% de superficie de los acuíferos identificada como zona de recarga potencial.	-:+
	Dependencia de los municipios del agua subterránea.	+:+
Exposición	Disponibilidad media anual negativa de los acuíferos.	-:+
	Crecimiento poblacional por SSP.	+:+
	Δ precipitación (\downarrow) de acuerdo con 8 proyecciones de CC.	+:+
Capacidad adaptativa	Δ temperatura máxima (\uparrow) de acuerdo con 8 proyecciones de CC.	+:+
	% de agua tratada de los municipios.	+:+
	No. de plantas de tratamiento en operación.	+:+

Fuente: Elaboración propia.

Los Elementos Clave del Territorio (ECT) son elementos bióticos y abióticos considerados relevantes por su presencia y representatividad en el territorio, por la relevancia de los servicios ecosistémicos que proveen a la sociedad, las amenazas actuales a las que están expuestos y su estado de conservación, así como por los impactos que potencialmente tendrá el cambio climático sobre ellos (CONANP y PNUD, 2021). Como ECT del sector hídrico se seleccionaron los acuíferos intersectados por el polígono que delimita al estado de Puebla.

SENSIBILIDAD

La sensibilidad se calculó considerando cuatro criterios; éstos han sido usados directamente, o consideradas de forma indirecta, mediante otras sucedáneas, para la evaluación de la vulnerabilidad de los recursos hídricos (Immerzeel *et al.*, 2020; Schilling *et al.*, 2020) y del agua subterránea ante el cambio climático (Aslam *et al.*, 2018).

Criterio 1. Zonas de recarga potencial

El cambio climático representa una amenaza para la recarga de agua subterránea (Lall *et al.*, 2020). Esta variable ha sido considerada como un indicador para calcular la vulnerabilidad de este recurso ante el cambio climático (Nestor, 2020), ya que, aunque calculada mediante aproximaciones diferentes, da cuenta de su disponibilidad. La recarga de agua ocurre cuando esta alcanza el nivel del agua subterránea y se infiltra en el acuífero. Los factores que determinan este proceso incluyen a la precipitación, las características de las corrientes superficiales, la fractura de las rocas, la porosidad del suelo, la pendiente, la tasa de evaporación, el tipo de roca y la cobertura del terreno, entre otros (Kaewdum y Chotpantararat, 2021).

Se identificaron las zonas de recarga potencial de los acuíferos del Estado mediante la superposición lineal ponderada de siete variables temáticas: 1) textura del suelo, 2) permeabilidad de las rocas, 3) pendiente, 4) densidad de drenaje, 5) precipitación, 6) índice de humedad topográfica y 7) cobertura vegetal. El método, así como las variables seleccionadas, son ampliamente usados para la identificación de zonas potenciales (Magesh *et al.*, 2012; Senanayake *et al.*, 2016; Putranto y Aryanto, 2018; Kahsay *et al.*, 2019; Senthilkumar *et al.*, 2019; Singh *et al.*, 2019; Abijith *et al.*, 2020; Hernández-Juárez *et al.*, 2020; Kaewdum y Chotpantararat, 2021; Martínez *et al.*, 2021; Mengistu *et al.*, 2022; Patil y Lokesh, 2022) y tasas de recarga (Moeck *et al.*, 2020).

Variable 1.1 Textura del suelo

El suelo, sus componentes y su profundidad tienen un papel significativo en la recarga del agua subterránea (Patil y Lokesh, 2022). Se calculó la textura del suelo a partir de tres capas en formato raster de los valores del contenido de: a) arena, b) arcilla y c) limo, a una resolución espacial de 250 m, obtenidas del conjunto de datos SoilGrids 2.0 (Poggi *et al.*, 2021). Las capas fueron procesadas

y se calculó la clase de textura mediante el paquete de R soil textura (Moeys, 2018), usando el sistema de clasificación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 2017). Las clases de textura obtenidas (Figura 1) se reclasificaron a valores numéricos ordinales que, en orden ascendente, reflejan la contribución correspondiente para la recarga, de acuerdo con la clasificación propuesta por Mengistu et al. (2022).

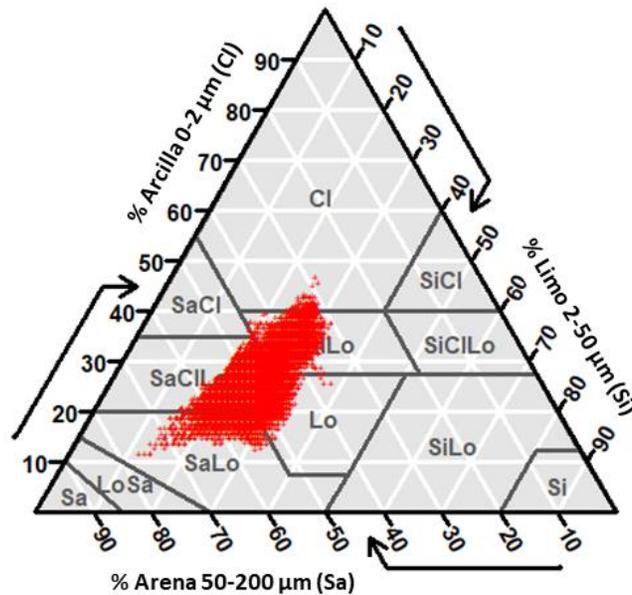


FIGURA 1. TRIÁNGULO DE TEXTURA DEL SUELO CALCULADA A PARTIR DE LOS DATOS DE CONTENIDO DE ARENA, ARCILLA Y LIMO.

Fuente: Elaboración propia con base en Mengistu et al. (2022).

Variable 1.2. Permeabilidad de las rocas

El coeficiente de permeabilidad está asociado con la facilidad con la que un líquido se mueve a través de una capa de material permeable (Putranto y Aryanto, 2018). Esta variable se construyó a partir de los mapas globales de hidrogeología, permeabilidad y porosidad (GLHYMPS) (Gleeson et al., 2014). Los valores continuos de permeabilidad ($\log(k) \cdot 100$) obtenidos (Figura 2) se clasificaron en cinco clases con el método de cuantiles, de tal manera que éstas reflejan, en orden ascendente, la contribución de la permeabilidad para la recarga.

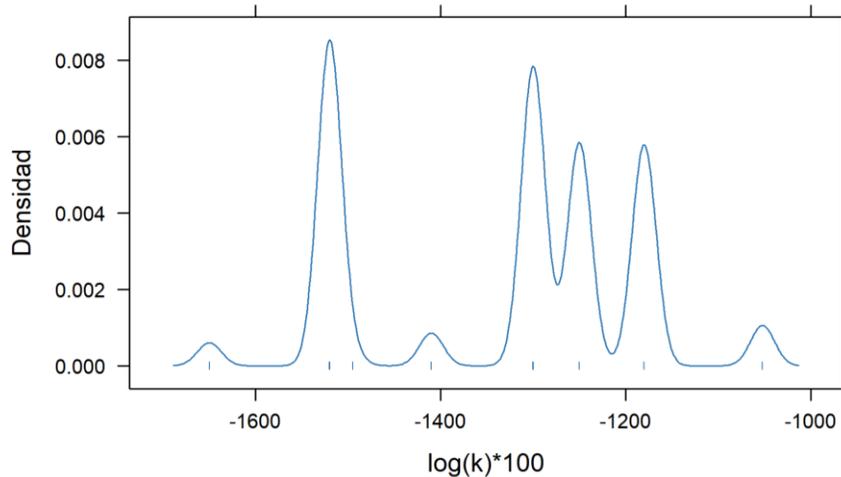


FIGURA 2. DISTRIBUCIÓN DE LOS VALORES DE PERMEABILIDAD DE LAS ROCAS DEL ESTADO DE PUEBLA.

Fuente: Elaboración propia.

Variable 1.3. Pendiente

La pendiente juega un papel importante en la identificación de zonas de recarga de agua subterránea; la velocidad de escorrentía es mayor mientras mayor es la pendiente, disminuyendo la recarga (Patil y Lokesh, 2022). Esta variable se construyó a partir del Continuo de Elevaciones Mexicano, con una resolución espacial de 30 m. Los valores continuos fueron clasificados en cinco clases, de acuerdo con los rangos establecidos por Singh et al. (2019).

Variable 1.4. Densidad de drenaje superficial

La densidad de drenaje es una medida de la longitud total del segmento de flujo de las corrientes superficiales de todos los órdenes por unidad de área (Magesh et al., 2012). Un área con alta densidad de drenaje implica alta percolación (Singh et al., 2019). Esta variable se calculó a partir del Red hidrográfica escala 1:50000 edición 2.0 del INEGI. Se calculó la longitud total de las corrientes superficiales intersectadas por celdas de 1 km² y se dividió el valor obtenido entre el área de la celda correspondiente. Los valores de densidad obtenidos se clasificaron en cinco clases, de acuerdo con los rangos establecidos por Singh et al. (2019).

Variable 1.5. Precipitación

La variabilidad climática juega un papel fundamental en la recarga de los acuíferos: las sequías persistentes y los períodos húmedos tienen un efecto directo en el balance hídrico de los acuíferos poco profundos (Lall et al., 2020), donde en general, una mayor precipitación anual es conducente a una mayor recarga (Moeck et al., 2020). Los valores de precipitación del Estado se obtuvieron del conjunto de datos climáticos WorldClim 2.1 (Fick y Hijmans, 2017) a una resolución de 30 segundos de arco (~1 km). Éstos fueron clasificados en cinco clases, con el método de cuantiles, de tal manera que éstas reflejan, en orden ascendente, la contribución de la precipitación para la recarga.

Variable 1.6. Índice de humedad topográfica

El índice de humedad topográfica es una medida relativa, no absoluta, del estado de humedad de un área determinada (Buchanan et al., 2014). Esta variable se construyó a partir del Continuo de Elevaciones Mexicano, con una resolución espacial de 30 m, así como las capas de dirección, acumulación de flujo y la pendiente, derivadas de éste. Los valores continuos obtenidos se clasificaron en cinco clases con el método de cuantiles.

Variable 1.7. Cobertura vegetal

Las áreas con vegetación y en las que se realizan actividades agrícolas son consideradas como lugares efectivos para la recarga de agua subterránea (Patil y Lokesh, 2022). Esta variable se construyó con la capa de cobertura del suelo para el año 2018, de la misión Sentinel 2, obtenida del sistema MAD-Mex (Gebhardt et al., 2014), a una resolución espacial de 10 m. Se asignaron valores numéricos ordinales a las clases de cobertura del suelo, de acuerdo con la clasificación propuesta por Singh et al. (2019).

Las capas temáticas se sometieron a un análisis de sobreposición lineal ponderada, en el que a cada capa se le asigna un peso, el cual representa la contribución de los valores correspondientes al potencial de recarga. Los pesos de las capas se asignaron de acuerdo con los establecidos por Mengistu et al. (2022) (Tabla 5).

TABLA 5. RANGOS DE VALORES Y PESOS DE LAS VARIABLES USADAS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA POTENCIALES.

Variable	Rango/valor	Peso
Textura del suelo	Cl ClLo SaClLo Lo SaLo	8.8
Permeabilidad de las rocas	-1650, -1520 -1520, -1300 -1300, -1250 -1250, -1180 -1180, -1052	20.2
Pendiente	< 4.9 4.9, 10 10, 15 15, 25 >25	5.4
Densidad de drenaje superficial	<0.5 0.5, 1 1, 1.5 1.5, 2 >2	7.2
Precipitación	<563 563, 708 708, 829 829, 1149 >1149	14.5
Índice de humedad topográfica	-10.1, -6.02 -6.02, -5.17 -5.17, -4.20 -4.20, -2.65 -2.65, 37.17	7.3
Cobertura vegetal	Urbano construido Bosques Pastizales Suelo desnudo Agrícola y cuerpos de agua	15.3

Fuente: Elaboración propia.

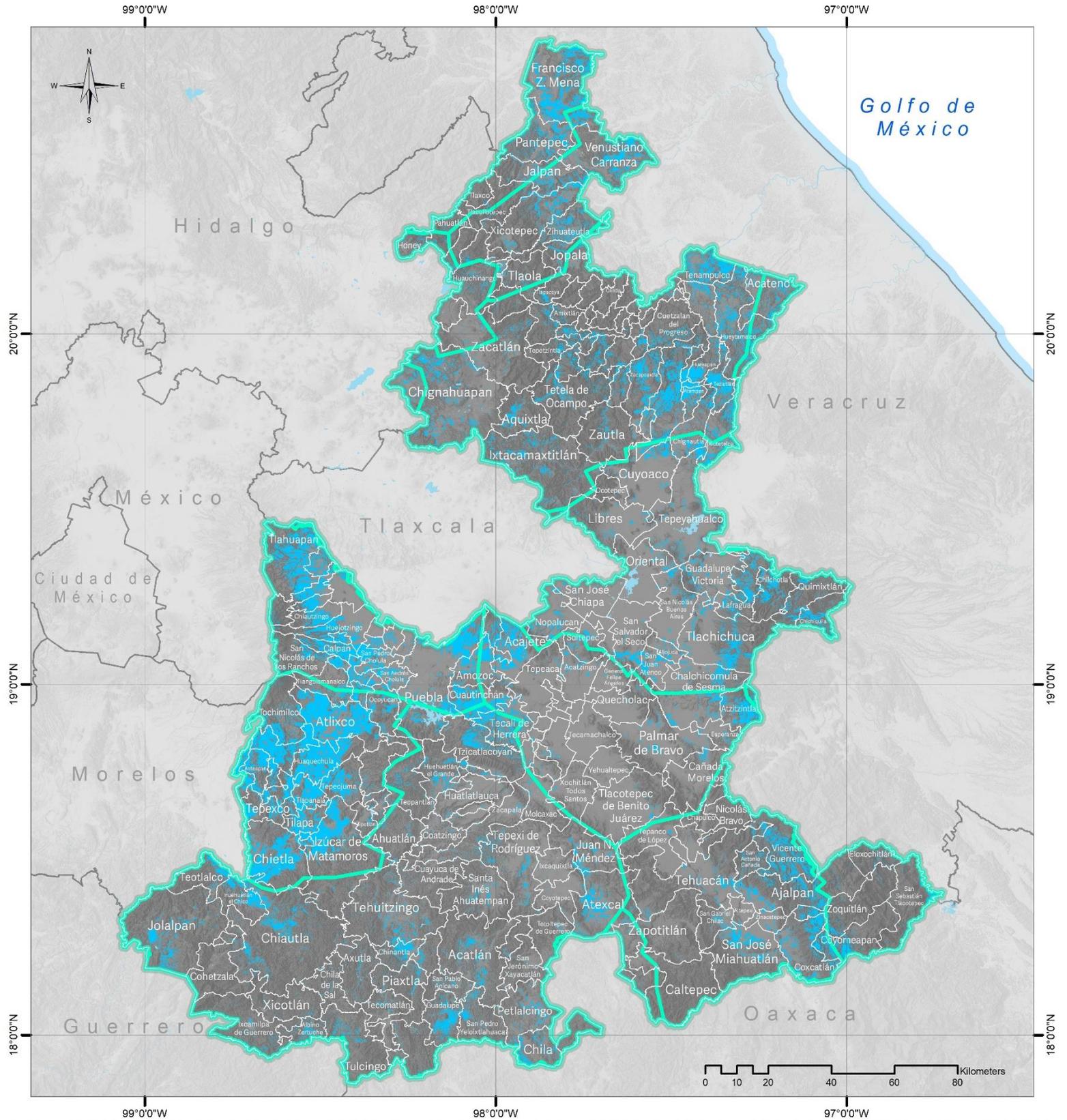
Los valores continuos obtenidos se reclasificaron en cinco clases con el método de ruptura natural de Jenkins, y se seleccionaron las celdas con valor 5. Estas celdas corresponden a las zonas de recarga potencial identificadas (Mapa 189).

Finalmente, se calculó el porcentaje del área de los acuíferos con zonas de recarga potencial. Aproximadamente 4,092.49 km² de zonas de recarga potencial se identificaron en el estado (Tabla 6).

TABLA 6. PORCENTAJE DEL ÁREA DE LOS ACUÍFEROS CON ZONAS DE RECARGA POTENCIAL.

ACUÍFERO	SUPERFICIE [km²]	SUPERFICIE ZRP [km²]	% ZRP
Acaxochitlan	475.26	16.26	3.42
Álamo-Tuxpan	897.80	157.80	17.58
Alto Atoyac	21.69	4.73	21.81
Apan	0.63	0.00	0.10
Atlixco-Izúcar de Matamoros	2666.00	962.21	36.09
Chalco-Amecameca	1.97	0.00	0.08
Costera de Veracruz	2.03	0.20	10.00
Cotaxtla	1.24	0.17	13.90
Cuatla-Yautepec	2.02	0.03	1.40
Cuicatlán	6.38	0.42	6.57
Emiliano Zapata	0.78	0.00	0.11
Huajuapán de León	239.53	3.97	1.66
Huamantla	3.36	0.10	2.98
Huitzucó	3.48	0.01	0.29
Ixcaquixtla	9576.88	619.25	6.47
Libres-oriental	3986.98	361.57	9.07
Mariscala	3.79	0.19	5.11
Martínez de la Torre-Nautla	189.96	31.95	16.82
Orizaba-Córdoba	14.72	3.95	26.81
Perote-Zalayeta	7.97	0.29	3.59
Poza rica	1419.92	176.03	12.40
Soltepec	7.61	1.84	24.18
Tecocomulco	96.55	10.40	10.77
Tecolutla	5233.83	627.28	11.99
Tepalcingo-Axochiapan	4.89	1.06	21.76
Texcoco	0.01	0.00	0.00
Tlapa-Huamuxtitlán	3.33	0.16	4.77
Tuxtepec	918.15	47.92	5.22
Valle de Puebla	2023.69	566.25	27.98
Valle de Tecamachalco	3337.06	231.55	6.94
Valle de Tehuacán	3161.80	266.88	8.44
Valle de Tulancingo	0.36	0.00	0.42

Fuente: Elaboración propia.



Simbología

- Límite municipal
- Cuerpos de agua
- Límite del Estado de Puebla
- Límite estatal
- Acuíferos
- Zona de recarga Potencial (ZRP)



M189. Zona de Recarga Potencial

Fuente: Elaboración Propia
Mapa Base: Marco Geoestadístico diciembre 2021, Estado de Puebla, INEGI.

Coordinate System: MEXICO ITRF 2008 LCC
Projection: Lambert Conformal Conic 2SP
Datum: ITRF 2008

CRITERIO 2. DEPENDENCIA DE AGUA SUBTERRÁNEA

Variable 2.1 Porcentaje volumen total extraído

La importancia o dependencia, directa o indirecta, del recurso hídrico para un determinado sector puede ser considerado como un indicador de su sensibilidad (Döll, 2009; Seeboonruang, 2016; Schilling et al., 2020). Esta variable se construyó con datos del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA). Se calculó el porcentaje del volumen total extraído, que representa el volumen de extracción de agua subterránea para los municipios del Estado.

CRITERIO 3. DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL NEGATIVA

La escasez y disponibilidad de agua (Döll, 2009; Schilling et al., 2020) son indicadores usados para determinar la sensibilidad y vulnerabilidad del recurso hídrico. Esta variable se construyó con los datos de disponibilidad media anual negativa de agua del subsuelo, extraídos de la capa de Límites de los Acuíferos de la República Mexicana 2021 de la CONAGUA. Mientras mayor es el valor absoluto de disponibilidad negativa de los acuíferos, mayor es su aporte a la sensibilidad, asignando un valor de 0 a los acuíferos con disponibilidad >0.

CRITERIO 4. CRECIMIENTO POBLACIONAL

Además del cambio climático, el crecimiento poblacional, ya sea que se considere como parte del componente de exposición o de sensibilidad, es un fenómeno que contribuirá al aumento de la vulnerabilidad de los recursos hídricos (Immerzeel et al., 2020), aumentando directamente los riesgos de sequía debido al aumento de la demanda de agua (Ahmadalipour et al., 2019).

Esta variable se construyó con información del conjunto de datos de cuadrículas reducidas de la proyección de la población global basadas en las trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP, por sus siglas en inglés), revisión 01 (Gao, 2020), que consta de datos sobre la población global para el año base 2000, y las proyecciones a intervalos de diez años para el periodo 2010-2100 a una resolución espacial de 1 km, consistente tanto cuantitativa como cualitativamente con los SSP. Se consideraron cuatro proyecciones conformadas por los SSP 2 y 5, y los horizontes temporales cercano (2040) y lejano (2100).

Considerando que una de las variables está representada por cuatro versiones diferentes, i.e. dos SSP y dos horizontes temporales, se tienen dos tipos de indicadores para el cálculo de la sensibilidad: a) estáticos y b) dinámicos; este último, conformado por las cuatro proyecciones de crecimiento poblacional. Para calcular la sensibilidad, se combinaron las variables estáticas con cada una de las cuatro proyecciones mencionadas para obtener un número igual de mapas de sensibilidad.

EXPOSICIÓN

El clima es el principal factor que determina la variabilidad espaciotemporal en la recarga (Amanambu et al., 2020). Se prevé que los cambios inducidos por el clima tendrán efectos importantes en los acuíferos, la calidad y la cantidad del agua subterránea (Al Atawneh et al., 2021). El cambio en la precipitación y la temperatura de acuerdo con diferentes proyecciones de cambio climático son elementos usados para evaluar la vulnerabilidad de los recursos hídricos (Immerzeel et al., 2020; Schilling et al., 2020) y del agua subterránea (Döll, 2009; Aslam et al., 2018; Amanambu et al., 2020).

Para construir los criterios de este componente de la vulnerabilidad se seleccionaron ocho proyecciones de cambio climático. Se seleccionaron dos SSP: a) SSP 5-8.5 y b) SSP 2-4.5. Esta selección comprende un escenario de altas emisiones y uno de estabilización media, respectivamente. Estos escenarios cubren el rango de posibles trayectorias (Lutz et al., 2016) y son de los más utilizados por la comunidad climática (Joyce y Coulson, 2020; San José et al., 2016).

Los horizontes temporales (HT) seleccionados son: a) el horizonte temporal cercano de 2021-2040 y b) el horizonte lejano 2061-2080. Para la toma de decisiones es necesario responder a problemáticas inmediatas o bien planificar el futuro a corto plazo, que pueden ser días, meses o algunos años. Una gestión a corto plazo es relevante, sobre todo en aquellos países en desarrollo, como México, por lo que es necesario generar capacidades adaptativas ante impactos en el contexto de cambio climático. Sin embargo, hay situaciones que necesitan una visión a largo plazo, por ejemplo, proyectos de infraestructura, como embalses de riego, desarrollos costeros y defensas contra inundaciones, entre otras (Nissan et al., 2019).

Los modelos globales de circulación general seleccionados son: a) el HADGEM3-GC31-LL y b) el MPI-ESM1-2-HR, ya que brindan un abanico de resultados en la región de Puebla.

La exposición de los ECT se construyó calculando los valores de: a) disminución de la precipitación anual y b) aumento en la temperatura máxima anual promedio, de acuerdo con ocho proyecciones de cambio climático seleccionadas, con relación a los observados durante el periodo de referencia (1970-2000), a partir del conjunto de datos climáticos WorldClim 2.1 (Fick y Hijmans, 2017) a una resolución de 30 segundos de arco (~1 km).

CAPACIDAD ADAPTATIVA

La capacidad adaptativa se calculó considerando dos criterios asociados con la calidad del agua subterránea, los cuales representan capacidades humanas e institucionales susceptibles de ser intervenidas, mediante medidas de adaptación, para aumentar los valores de este componente y reducir la vulnerabilidad.

CRITERIO 5. PORCENTAJE DE AGUA RESIDUAL TRATADA

La calidad del agua subterránea es un indicador considerado para determinar la sensibilidad del recurso a diferentes amenazas (Aslam et al., 2018). Una mala gestión y manejo de los residuos ocasiona contaminación del suelo, aire y agua (Singh y Tiwari, 2019); las descargas de aguas residuales no tratadas son una fuente de contaminación del agua subterránea y ponen en peligro a la vida acuática y humana (Bijekar et al., 2022).

Esta variable se construyó con los datos del Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México 2021 del INEGI, de los cuales, se extrajeron los datos de porcentaje de agua residual que recibió tratamiento, para cada municipio. La codificación de los valores se modificó de manera tal que reflejaran la contribución correspondiente al cálculo de la capacidad adaptativa (Tabla 7).

TABLA 7. CODIFICACIÓN DE VALORES DE % DE AGUA RESIDUAL TRATADA.

VALOR ORIGINAL	DESCRIPCIÓN	VALOR FINAL
0	No aplica/Sin respuesta	0
1	100%	5
2	Entre el 75% y 99%	4
3	Entre el 60% y 74%	3
4	Entre el 40% y 59%	2
5	Menos de 40%	1

Fuente: Elaboración propia.

Criterio 6. Plantas de tratamiento en operación

La relación entre la infraestructura para el tratamiento de aguas residuales y el cambio climático es de doble vía. Los eventos climáticos extremos asociados a la precipitación ocasionan el mal funcionamiento de las plantas de tratamiento, lo que conduce a la contaminación, afectaciones ambientales y a la infraestructura; por otro lado, el proceso de tratamiento por su parte contribuye a las emisiones de GEI de forma directa, indirecta interna y externa (Singh y Tiwari, 2019), si no se implementan tecnologías que permitan su manejo y recuperación. Ya que las descargas de aguas residuales no tratadas

son una fuente de contaminación del agua subterránea (Bijekar et al., 2022), y que la calidad de ésta está asociada con la vulnerabilidad, se consideró el número de plantas de tratamiento en operación como un indicador de capacidad adaptativa.

Esta variable se construyó con los datos del Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México 2021 del INEGI, de los cuales se extrajo el número de plantas de tratamiento en operación para cada municipio.

VULNERABILIDAD

Dado que las variables de los diferentes componentes están representadas por diferentes tipos de elementos y resoluciones espaciales, se realizó un proceso de homogeneización para calcular la vulnerabilidad de forma espacialmente explícita. Se transformaron las variables a formato raster y en los casos necesarios, se remuestrearon para ajustarlas a una resolución espacial común de 30 m. Para hacerlas inter comparables, se normalizaron mediante la fórmula:

$$xn = \frac{x}{\max(x)}$$

y los valores obtenidos se invirtieron para aquellas cuya contribución al componente respectivo es negativa, i.e. el valor del componente aumenta mientras menor es el valor de la variable. Los tres componentes de la vulnerabilidad se construyeron mediante la agregación aditiva de los criterios que los conforman, sumando los valores normalizados de los criterios individuales para obtener un valor general (Birkmann et al., 2022).

La vulnerabilidad ante al cambio climático de los acuíferos se calculó mediante la formula:

$$\text{Vulnerabilidad} = (\text{Exposición} + \text{Sensibilidad}) - \text{Capacidad adaptativa}$$

Esta aproximación no considera cambios proyectados en la capacidad adaptativa a futuro, las cuales mantienen los valores actuales. Dado que se obtuvieron cuatro versiones diferentes de sensibilidad y ocho de exposición, los mapas de vulnerabilidad se construyeron combinando estos dos componentes de acuerdo con las trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP) y horizontes temporales respectivos (Figura 3). Los valores continuos obtenidos se clasificaron en tres clases mediante el método de k-medias para obtener tres clases de vulnerabilidad: 1=Baja, 2=Media y 3=Alta. En la Figura 4 se presenta un resumen gráfico del proceso para calcular la vulnerabilidad del sector.



FIGURA 3. COMBINACIONES DE LAS VARIABLES DE CRECIMIENTO POBLACIONAL Y EXPOSICIÓN PARA EL CÁLCULO DE LA VULNERABILIDAD.

Fuente: Elaboración propia.

Dado que se consideraron ocho proyecciones de cambio climático, se obtuvo un número igual de mapas de vulnerabilidad. Las proyecciones de cambio climático no son pronósticos, y cada una de ellas representa un escenario igualmente plausible y válido que el resto, con diferentes niveles de incertidumbre asociada. Esto imposibilita el uso directo de una sola proyección como insumo para los análisis o la toma de decisiones (Hallegatte, 2009). Por otro lado, el uso de múltiples proyecciones complica la interpretación y visualización de los datos e impide la obtención de resultados taxativos. Existen diferentes métodos para agregar múltiples proyecciones de cambio climático, así como los análisis derivados, como los ensambles multi-escenario, en los que se promedian diferentes modelos de circulación por escenario de emisiones (Russell et al., 2015; Fitzpatrick y Dunn, 2019).

Para facilitar la interpretación y visualización de los resultados, se construyó un mapa de vulnerabilidad alta consenso, en el cual se presentan las áreas en las que todas las proyecciones coinciden en que la vulnerabilidad será alta (Figura 8). Todos los análisis se realizaron en el lenguaje y ambiente de programación estadístico R (R Core Team, 2022).

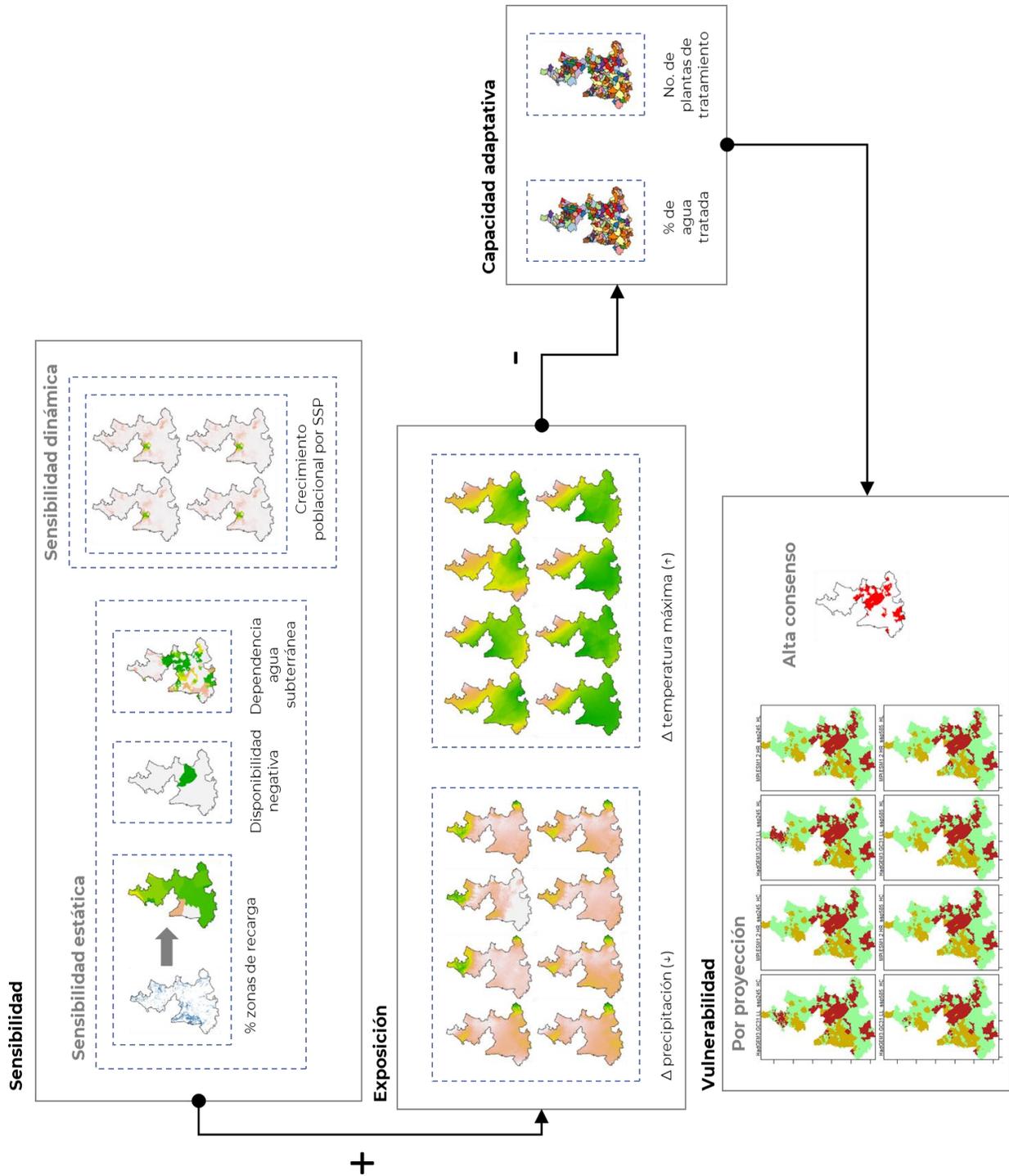


FIGURA 4. RESUMEN GRÁFICO DEL PROCESO PARA CALCULAR LA VULNERABILIDAD.

Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS

La proporción de las clases de vulnerabilidad obtenidas para el territorio estatal son extremadamente similares, variando ligeramente en su distribución espacial entre proyecciones (Figura 5). La proyección bajo la cual se proyecta mayor proporción de vulnerabilidad alta es HadGEM3 GC31-LL SSP245 2081-2100.

El análisis de la vulnerabilidad de los acuíferos en el estado de Puebla arroja que en 113 de los 217 municipios que conforman el estado de Puebla hay alto consenso de vulnerabilidad de los acuíferos (Mapa 190). En esos municipios se localizan ciudades como Tehuacán (248,716 hab.), Amozoc (77,106 hab.), Tecamachalco (28,679 hab.), Acajete (20,923 hab.) y Ciudad de Libres (15,536 hab.), las cuales dependen del agua subterránea para el suministro de agua público-urbano, y a nivel municipal para las actividades económicas como la agricultura y la ganadería.

El Distrito de Riego 030 (Valsequillo) también se localiza sobre el área de mayor consenso de alta vulnerabilidad ante el cambio climático. De hecho, este Distrito, con 32,937.19 hectáreas y 17,905 usuarios se localiza sobre el acuífero de Tecamachalco el cual ya está catalogado “Sin disponibilidad” (CONAGUA, 2020b). Si bien datos de CONAGUA indican que el Distrito de Riego 030 se abastece principalmente de agua superficial⁴, ya presenta serios problemas de abastecimiento, por insuficiencia en la cantidad de agua, y de contaminación por falta de un correcto saneamiento de las aguas de la presa Manuel Ávila Camacho (Valsequillo), su principal fuente de abastecimiento (Bonilla et al., 2015).

⁴ <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=distritosriego&ver=mapa>

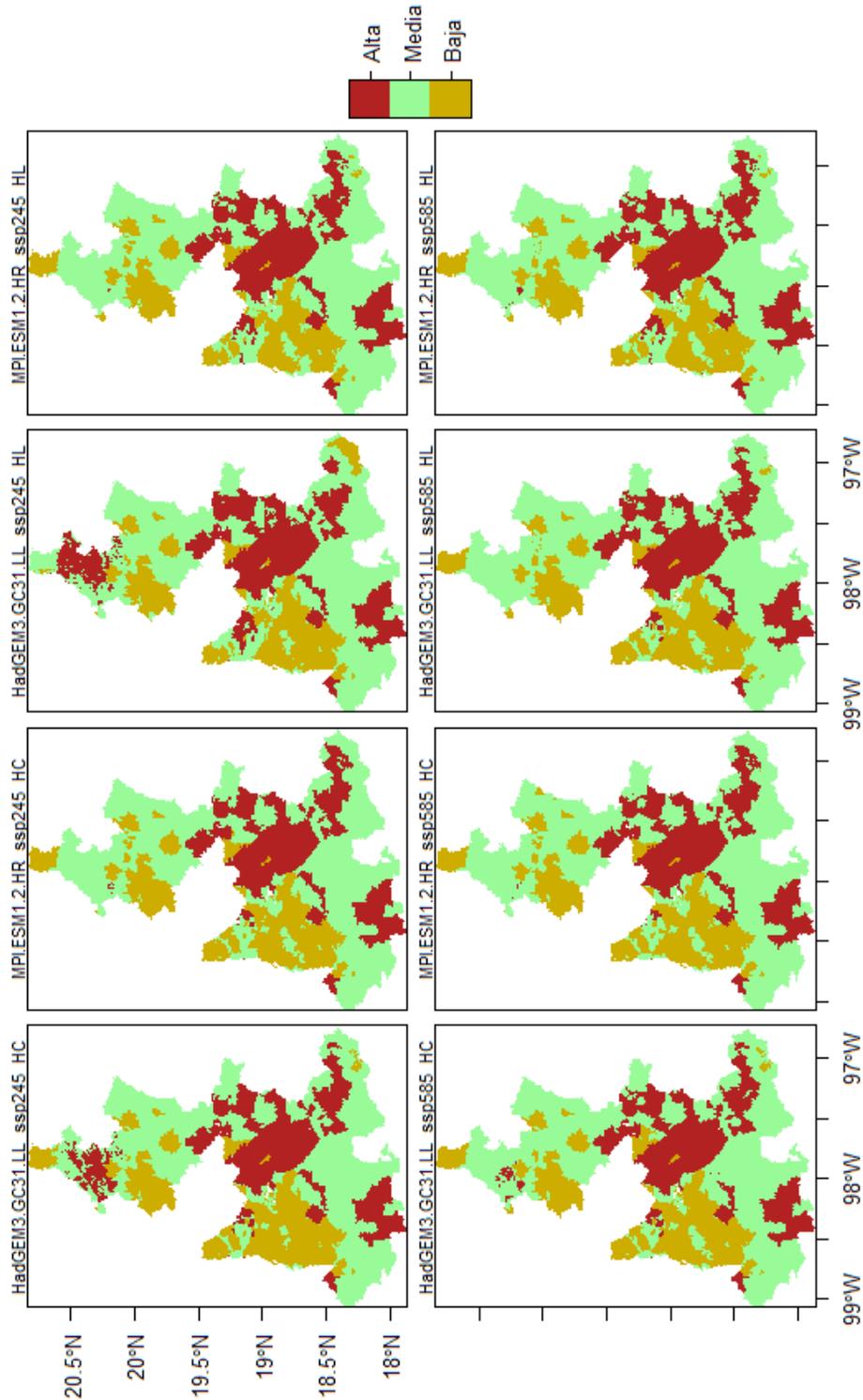
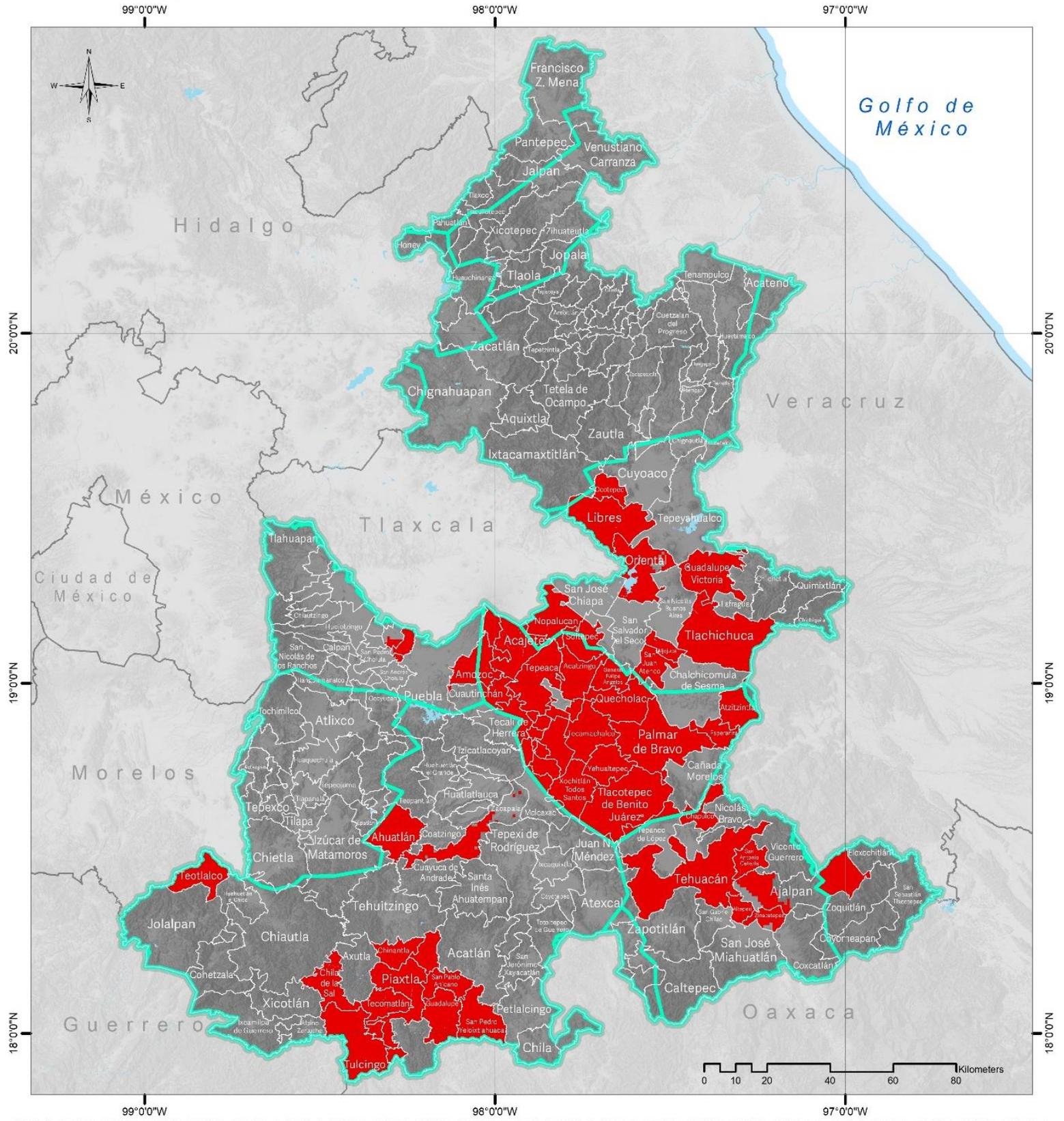


FIGURA 5. MAPAS DE VULNERABILIDAD DEL SECTOR HÍDRICO DE ACUERDO CON OCHO PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO; HC: HORIZONTE TEMPORAL CERCANO (2021-2040), HL: HORIZONTE TEMPORAL LEJANO (2081-2100).

Fuente: Elaboración propia.



Simbología

- Límite municipal
- Cuerpos de agua
- Límite del Estado de Puebla
- Límite estatal
- Acuíferos
- Vulnerabilidad Alta Consenso



M190. Vulnerabilidad Alta Consenso

Fuente: Elaboración Propia
Mapa Base: Marco Geoestadístico diciembre 2021, Estado de Puebla, INEGI.

Coordinate System: MEXICO ITRF 2008 LCC
Projection: Lambert Conformal Conic 2SP
Datum: ITRF 2008

Ante condiciones cambiantes del clima y una mala gestión del agua de la presa en materia de saneamiento, la proyección es que los niveles de contaminación se eleven, los volúmenes de agua de la presa disminuyan, y, por lo tanto, aumente la extracción de agua subterránea. Como medida de adaptación es recomendable mejorar los sistemas de riego y sembrar variedades más resistentes a condiciones cambiantes del clima.

Por otro lado, como resultado del análisis realizado se pueden identificar zonas dentro del acuífero Valle de Puebla, que abastece a la Ciudad de Puebla (Heroica Puebla de Zaragoza) y su zona conurbada, sitios con alto consenso de vulnerabilidad ante el cambio climático, si tomamos en cuenta que las corrientes superficiales de las que se abastecen estos centros urbanos e industriales ya presenta serios problemas de contaminación y que cada vez se extrae más agua subterránea para abastecer la creciente demanda de agua en esta región, la situación de este acuífero se podría agravar en un futuro cercano. Las medidas de adaptación que se proponen a nivel urbano son el establecimiento de sistemas captadores de agua de lluvia, sistemas separativos de drenaje, plantas de tratamiento de aguas residuales para edificios y conjuntos habitacionales, oasis urbanos e infraestructura verde que permita la captación e infiltración natural del agua.

REGIÓN SIERRA NORTE

La región Sierra Norte es la que más variación presenta entre escenarios, con el modelo HadGEM, trayectoria SSP2 RCP 4.5 a corto y largo plazo, la superficie clasificada como de “alta vulnerabilidad” incrementa de manera importante. Para el primer caso representa 17.5% de la región, mientras que para el segundo caso aumenta hasta 22%. En el resto de las proyecciones la superficie con “alta vulnerabilidad” representa menos del 1%.

Hay una alta coincidencia en las proyecciones en que los acuíferos de la región Sierra Norte tiene una vulnerabilidad media, siendo la zona con menos vulnerabilidad la porción occidental que incluye a los municipios de Chignahuapan, Zacatlán y Tepetzintla, municipios con una alta cobertura de bosques y una importante tradición de manejo forestal.

Como se ha mencionado anteriormente en esta región montañosa nacen importantes ríos que fluyen hacia la vertiente del Golfo de México, sin embargo, las propias condiciones del terreno y la dispersión de las localidades dificulta que se cumpla con la cobertura deseada de drenaje y alcantarillado. Evitar la

contaminación de los cuerpos de agua superficiales, mantener un correcto manejo de fosas sépticas, instalar sistemas de captación de agua de lluvia, mantener la cobertura vegetal, rehabilitar y mantener en buen funcionamiento las plantas de tratamiento y continuar con sistemas de alerta temprana ante la presencia de eventos meteorológicos extremos que puedan causar daños en la infraestructura y la población, son algunas medidas de adaptación al cambio climático que se pueden implementar en esta región.

REGIÓN SIERRA NORORIENTAL

Todas las proyecciones de cambio climático analizadas muestran que más del 70% de la superficie de esta región tiene una vulnerabilidad media. Incluso seis de las ocho proyecciones no muestran superficie con “alta vulnerabilidad”. Esto hace de la región Sierra Nororiental la menos vulnerable respecto a las siete regiones estudiadas.

Mantener la cobertura vegetal, instalar sistemas de captación de agua de lluvia en hogares, impulsar las plantas de tratamiento en conjuntos habitacionales, continuar con sistemas de alerta temprana ante la presencia de eventos meteorológicos extremos que puedan causar daños en la infraestructura y la población, así como mantener en buen funcionamiento las plantas de tratamiento son las medidas recomendadas para esta región.

REGIÓN VALLE SERDÁN

Contrario a la región Sierra Nororiental, la región Valle Serdán es la que presenta mayor consenso respecto a la superficie considerada como de “alta vulnerabilidad”. Las ocho proyecciones muestran que por lo menos 50% del territorio tiene una condición de alta vulnerabilidad de sus acuíferos. Esta situación se debe, entre otras cosas, a que el acuífero Valle de Tecamachalco ya se encuentra sobreexplotado y con una condición de nula disponibilidad.

A pesar de que el acuífero Libres-oriente presenta valores positivos de disponibilidad, las proyecciones muestran zonas dentro de la misma región con alta vulnerabilidad, éstas coinciden con los municipios de Libres, Ocotepéc, Oriental, Tlachichuca, Guadalupe Victoria, San Juan Atenco y Aljojuca.

Esta región es la que cuenta con más organismos operadores de agua, una medida de adaptación sugerida es seguir fortaleciendo la gestión del agua a partir de la incorporación de comités y observatorios ciudadanos, mantener un

monitoreo constante de la calidad del agua en las zonas agrícolas y pecuarias, limitar y revisar las concesiones de aprovechamiento de agua subterránea, instalar más y mejores medidores de consumo de agua, proteger las áreas de recarga del acuífero para que mantengan sus condiciones ambientales, instalar sistemas de captación de agua de lluvia en hogares y mejorar la eficiencia de riego en las zonas agrícolas.

REGIÓN ANGELÓPOLIS

Para la región Angelópolis, donde se encuentra asentada la mayor población del Estado, todas las proyecciones muestran que la zona con “alta vulnerabilidad” se localiza en la porción oriental, en los municipios de Nopalucan, Acajete, Tepeaca, Tepatlaxco de Hidalgo, Amozoc, Mixtla, Santo Tomás Hueyotlipan, Tlanepantla, Tepeyahualco de Cuauhtémoc y Tochtepec.

Si se observan los dos modelos en las trayectorias SSP2 RCP4.5 a corto plazo, las proyecciones muestran un aumento de la superficie clasificada como “alta vulnerabilidad”. Este aumento se presenta en la porción central de la región, en los municipios de Huejotzingo y sus alrededores.

El escenario que muestra la menor superficie de “alta vulnerabilidad” es el MPI SSP5 RCP 8.5 (2021-2040). Por el contrario, el escenario HadGEM SSP2 RCP4.5 2081-2100 es el que mayor superficie con “alta vulnerabilidad” presenta para la región.

Los municipios que presentan una baja vulnerabilidad en todas las proyecciones son: San Felipe Teotlalcingo y Ocoyucan.

Como medidas de adaptación para esta región, donde la presión hacia el recurso hídrico va en aumento, está el continuar con el monitoreo de la calidad del agua superficial, aumentar la supervisión de las descargas industriales y municipales para que se cumpla con los límites de calidad del agua establecidos por la ley, establecer sistemas de captación de agua de lluvia, drenajes separativos y plantas de tratamiento en edificios y complejos habitacionales, establecer campañas permanentes de cuidado del recurso hídrico, favorecer la reforestación riparia y el establecimiento de oasis urbanos e infraestructura verde.

REGIÓN VALLE DE ATLIXCO

La región Valle de Atlixco tiene en las ocho proyecciones realizadas más del 75% de su superficie clasificada con “baja vulnerabilidad”, la zona con alto consenso de “alta vulnerabilidad” se localiza al sureste de la región, en la frontera con la región Mixteca, coincidiendo con los límites político-administrativos de Ahuatlán, un municipio cuya dependencia al agua subterránea es superior a la de los municipios aledaños.

En la porción noroeste de esta región, en las faldas de la Sierra Nevada, hay una zona de agricultura de riego anual y semipermanente, coincidiendo con una importante zona de recarga, según el modelo elaborado para este estudio. Cuidar la calidad del agua en esta zona es de vital importancia, ya que los fertilizantes y pesticidas utilizados en la agricultura son arrastrados, por el riego y las lluvias, hacia los cuerpos de agua o bien pueden infiltrarse al acuífero. La contaminación de un acuífero suele ser una situación irreversible, de ahí la importancia del cuidado de las zonas de recarga y los ecosistemas dependientes del agua subterránea.

REGIÓN MIXTECA

En la región Mixteca, las proyecciones muestran que 70% de la superficie está clasificada con “vulnerabilidad media”, sin embargo, también hay coincidencia en que aproximadamente 22% tiene “alta vulnerabilidad”, especialmente en la parte sur, colindante con el estado de Oaxaca. Esto se debe, en parte, por la fuerte dependencia a las fuentes de agua subterránea de los municipios de San Pedro Yeloixtlahuaca, Guadalupe, Tulcingo, Tecamatlán y Piaxtla.

Otra porción de la región clasificada como de “alta vulnerabilidad” se localiza al noreste de la región, en colindancia con las regiones de Angelópolis y Sierra Negra, y coincidiendo con el acuífero Valle de Tecamachalco, el cual ya presenta déficit. El municipio de Zacapala también tiene alto consenso de vulnerabilidad, según las proyecciones de cambio climático.

En México, la gestión del agua a nivel municipal se realiza a través de los organismos operadores, es importante que estos organismos cuenten con las capacidades técnicas y financieras para enfrentar los retos de la gestión hídrica, especialmente en una zona con problemas de sequía recurrente que obliga a recurrir al agua subterránea para poder satisfacer la demanda de agua de los distintos sectores.

REGIÓN SIERRA NEGRA

La región Sierra Negra, al igual que la región Mixteca, Valle Serdán y Angelópolis tiene una importante zona clasificada como “alta vulnerabilidad” debido al déficit que presenta ya el acuífero Valle de Tecamachalco. De acuerdo con las proyecciones de cambio climático realizadas, alrededor del 40% de la superficie puede ser considerada de “alta vulnerabilidad”. Esto incluye a los municipios de Tehuacán, principal zona urbana de la región y segunda más grande del Estado, San Antonio Cañada, Altepexi, Yehualtepec, Tlacotepec de Benito Juárez y algunas zonas de los municipios de Ajalpan, Zinacatepec.

Esta región sólo cuenta con un organismo operador del agua, encargado de la gestión del agua en Tehuacán. Como en la región Mixteca, la gestión del agua subterránea en zonas con alta vulnerabilidad a la sequía y el estrés hídrico es un reto, ya que se debe monitorear constantemente el nivel freático de los pozos a fin de no abatirlos a tal grado que se empiecen a extraer elementos dañinos para la salud. Es necesario que estos organismos operadores cuenten con el financiamiento y capacitación técnica adecuada para poder hacer frente a la demanda de agua actual y futura.

Como medidas de adaptación al cambio climático se recomienda mantener la cobertura vegetal en las zonas de recarga del acuífero, en las zonas urbanas establecer infraestructura verde con especies nativas o resistentes a altas temperaturas. Es necesario continuar con las campañas de educación y sensibilización para el cuidado del agua. En las zonas agrícolas, establecer sistemas de riego más eficientes. En zonas rurales y con infraestructura deficiente, impulsar la captación de agua de lluvia.

RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos, a continuación, se enlistan algunas recomendaciones para el diseño e implementación de medidas adaptación al cambio climático, dirigidas a disminuir la vulnerabilidad del sector hídrico del estado de Puebla:

- Implementar campañas de reforestación y restauración en las cabeceras de las cuencas, así como Soluciones basadas en la Naturaleza para aumentar la disponibilidad del agua, la retención de la humedad del suelo y la recarga de las aguas subterráneas.
- Conservar y recuperar las zonas de recarga natural de los acuíferos, manantiales, humedales y zonas riparias.
- Fortalecer a los organismos operadores de agua a partir de la capacitación técnica y el financiamiento.
- Mejorar los sistemas de medición del consumo de agua para gestionar la demanda y el sistema de cobro.
- Invertir en tecnologías que permitan la captación y el ahorro de agua en los sectores agrícola, industrial y doméstico.
- Disminuir la extracción de agua subterránea para uso agrícola, utilizando recursos hídricos no convencionales como aguas residuales tratadas.
- Aprovechar el biogás que se genera durante el proceso de tratamiento de aguas residuales para contribuir a un tratamiento neutro en carbono.
- Implementar un programa de gestión conjunta de las aguas superficiales y subterráneas para potenciar la resiliencia a las sequías y hacer frente a la escasez de agua sin sobreexplotar los acuíferos.
- Diseñar una planificación urbana integrada que considere la gestión de riesgos de crecidas y sequías y sistemas de alerta temprana.
- Fortalecer los sistemas de monitoreo de las descargas de aguas industriales, agrícolas y domésticas.
- Impulsar la instalación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales a nivel municipal y doméstico.
- Realizar campañas de sensibilización y cuidado del agua, así como de la importancia del pago por los servicios de agua, alcantarillado y saneamiento que brindan los sistemas operadores.
- Impulsar la creación de comités u observatorios ciudadanos del agua.
- Impulsar mejores prácticas agrícolas y ambientales.

REFERENCIAS

- Abijith, D., Saravanan, S., Singh, L., Jennifer, J. J., Saranya, T., y Parthasarathy, K. S. S. (2020). GIS-based multi-criteria analysis for identification of potential groundwater recharge zones-a case study from Ponnaniyar watershed, Tamil Nadu, India. *HydroResearch*, 3, 1-14.
- Ahmadalipour, A., Moradkhani, H., Castelletti, A., y Magliocca, N. (2019). Future drought risk in Africa: Integrating vulnerability, climate change, and population growth. *Science of the Total Environment*, 662, 672-686.
- Al Atawneh, D., Cartwright, N., y Bertone, E. (2021). Climate change and its impact on the projected values of groundwater recharge: A review. *Journal of Hydrology*, 601, 126602.
- Amanambu, A. C., Obarein, O. A., Mossa, J., Li, L., Ayeni, S. S., Balogun, O., ... y Ochege, F. U. (2020). Groundwater system and climate change: Present status and future considerations. *Journal of Hydrology*, 589, 125163.
- Aslam, R. A., Shrestha, S., y Pandey, V. P. (2018). Groundwater vulnerability to climate change: A review of the assessment methodology. *Science of the Total Environment*, 612, 853-875.
- Bijekar, S., Padariya, H. D., Yadav, V. K., Gacem, A., Hasan, M. A., Awwad, N. S., ... y Jeon, B. H. (2022). The state of the art and emerging trends in the wastewater treatment in developing nations. *Water*, 14(16), 2537.
- Birkmann, J., Jamshed, A., McMillan, J. M., Feldmeyer, D., Totin, E., Solecki, W., ... y Alegría, A. (2022). Understanding human vulnerability to climate change: A global perspective on index validation for adaptation planning. *Science of The Total Environment*, 803, 150065.
- Bonilla, M.N., Ayala, A., González, S., Santamaría, J.D. y Silva, S.E., (2015). Calidad fisicoquímica del agua del distrito de riego 030 "Valsequillo" para riego agrícola. *Revista Iberoamericana de Producción Académica y Gestión Educativa*. Vol. 2 Núm. 4 (2015): Julio - Diciembre 2015.
- Bruno Soares, M., S. Gagnon, A., y. Doherty, R. (2012). Conceptual elements of climate change vulnerability assessments: a review. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 4(1), 6-35.

Buchanan, B. P., Fleming, M., Schneider, R. L., Richards, B. K., Archibald, J., Qiu, Z., y Walter, M. T. (2014). Evaluating topographic wetness indices across central New York agricultural landscapes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(8), 3279-3299.

Comisión Estatal de Agua y Saneamiento del Estado de Puebla (CEASPUE). (2019). Programas Institucionales. Comisión Estatal de Agua y Saneamiento del Estado de Puebla. Gobierno del Estado de Puebla-Comisión Estatal de Agua y Saneamiento. Puebla, México. 65 pp.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2020). Superficies físicas regadas y volúmenes distribuidos. Año agrícola 2019-2020. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Comisión Nacional el Agua. Recuperado de: <https://www.gob.mx/conagua/documentos/estadisticas-agricolas-de-los-districtos-de-riego>.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2020a). Diagnóstico de la calidad del agua del río Atoyac y sus afluentes, 2012-2020. Informe final. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Comisión Nacional el Agua. CDMX, México. 42pp. Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/671046/2_Diagnostico_de_la_Calidad_del_Agua_del_Rio_Atoyac_y_sus_Afluentes.pdf.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2020b). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Tecamachalco (2101), estado de Puebla. Comisión Nacional del Agua. 15 pp.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2021). Datos vectoriales de la delimitación de las regiones hidrológicas en escala 1:250 000. Comisión Nacional del Agua. Recuperado de: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=regionesHidrologicas&ver=mapa>.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2021a). Estadísticas del Agua 2021. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Comisión Nacional del Agua. CDMX, México. pág. 18.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2021b). Grado de presión sobre el recurso hídrico por Región hidrológico-administrativa. Comisión Nacional del

Agua. Recuperado de:

<http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=gradoPresion&ver=reporte>.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2021c). Calidad del agua en México, Año 2021. Comisión Nacional del Agua. Recuperado de: <https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua>.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2022). Base de datos del Registro Público de Derechos del Agua (REPDA). Comisión Nacional del Agua. Recuperada de: <https://app.conagua.gob.mx/ConsultaRepda.aspx>.

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2011). La Biodiversidad en Puebla: Estudio de Estado. México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Gobierno del Estado de Puebla, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. 440 pp.

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD México). (2020). Resumen Ejecutivo del Programa de Adaptación al Cambio Climático de la Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán.

Diario Oficial de la Federación (DOF 17/09/2020). ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican. Diario Oficial de la Federación. Recuperado de: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5600593&fecha=17/09/2020&print=true

Diario Oficial de la Federación (DOF 01/12/1992). Ley de Aguas Nacionales. Artículo 3ro. Última Reforma DOF 06-01-2020.

Döll, P. (2009). Vulnerability to the impact of climate change on renewable groundwater resources: a global-scale assessment. Environmental Research Letters, 4(3), 035006.

Fick, S. E., y Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. International journal of climatology, 37(12), 4302-4315.

Fitzpatrick, M. C., y Dunn, R. R. (2019). Contemporary climatic analogs for 540 North American urban areas in the late 21st century. *Nature communications*, 10(1), 1-7.

Foden, W. B., Butchart, S. H., Stuart, S. N., Vié, J. C., Akçakaya, H. R., Angulo, A., ... y Mace, G. M. (2013). Identifying the world's most climate change vulnerable species: a systematic trait-based assessment of all birds, amphibians and corals. *PloS one*, 8(6), e65427.

Foden, W. B., Young, B. E., Akçakaya, H. R., Garcia, R. A., Hoffmann, A. A., Stein, B. A., ... y Huntley, B. (2019). Climate change vulnerability assessment of species. *Wiley interdisciplinary reviews: climate change*, 10(1), e551.

Gao, J. (2020). Global 1-km Downscaled Population Base Year and Projection Grids Based on the Shared Socioeconomic Pathways, Revision 01. Palisades, New York: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC).

Gebhardt, S., Wehrmann, T., Ruiz, M. A. M., Maeda, P., Bishop, J., Schramm, M., ... y Schmidt, M. (2014). MAD-MEX: Automatic wall-to-wall land cover monitoring for the Mexican REDD-MRV program using all Landsat data. *Remote Sensing*, 6(5), 3923-3943.

Gleeson, T., Moosdorf, N., Hartmann, J., y Van Beek, L. P. H. (2014). A glimpse beneath earth's surface: Global Hydrogeology MaPS (GLHYMPS) of permeability and porosity. *Geophysical Research Letters*, 41(11), 3891-3898.

Gobierno de Puebla (2022). Programa Institucional Comisión Estatal de Agua y Saneamiento del Estado de Puebla. Gobierno del Estado de Puebla-Comisión Estatal de Agua y Saneamiento. Puebla, México. 66 pp.

Gumel, D. Y. (2022). Assessing climate change vulnerability: A conceptual and theoretical review. *Journal of Sustainability and Environmental Management*, 1(1), 22-31.

Hallegatte, S. (2009). Strategies to adapt to an uncertain climate change. *Global Environmental Change*, 19(2), 240-247.

Hernández-Juárez, R. A., Martínez Rivera, L. M., Peñuela-Arévalo, L. A., y Rivera-Reyes, S. (2020). Identificación de zonas potenciales de recarga y descarga de

agua subterránea en la cuenca del río Ayuquila-Armería mediante el uso de SIG y el análisis multicriterio. Investigaciones geográficas, (101).

Immerzeel, W. W., Lutz, A. F., Andrade, M., Bahl, A., Biemans, H., Bolch, T., ... y Baillie, J. E. M. (2020). Importance and vulnerability of the world's water towers. *Nature*, 577(7790), 364-369.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2000). Síntesis geográfica del estado de Puebla. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México. Pp. 57-64.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). Continuo de subcuencas del territorio Mexicano, basado en las cartas de la Red Hidrológica, escala 1:50,000. Edición 2.0. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

IPCC. (2007). *Climate Change (2007): Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976pp.

IPCC, (2022). *Climate Change (2022): Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lössche, V. Möller, A. Okem, B. Rama (Eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.

Joyce, L. A., y Coulson, D. P. (2020). *Climate scenarios and projections: A technical document supporting the USDA Forest Service 2020 RPA Assessment*.

Kaewdum, N., y Chotpantararat, S. (2021). Mapping Potential Zones for Groundwater Recharge Using a GIS Technique in the Lower Khwae Hanuman Sub-Basin Area, Prachin Buri Province, Thailand. *Frontiers in Earth Science*, 814 pp.

Kahsay, G. H., Gebreyohannes, T., Gebremedhin, M. A., Gebrekirstos, A., Birhane, E., Gebrewahid, H., y Welegebriel, L. (2019). Spatial groundwater recharge

estimation in Raya basin, Northern Ethiopia: an approach using GIS based water balance model. *Sustainable Water Resources Management*, 5(2), 961-975.

Lall, U., Josset, L., y Russo, T. (2020). A snapshot of the world's groundwater challenges. *Annual review of environment and resources*, 45, 171-194.

Lutz, A. F., ter Maat, H. W., Biemans, H., Shrestha, A. B., Wester, P., y Immerzeel, W. W. (2016). Selecting representative climate models for climate change impact studies: an advanced envelope-based selection approach. *International Journal of Climatology*, 36(12), 3988-4005.

Magesh, N. S., Chandrasekar, N., y Soundranayagam, J. P. (2012). Delineation of groundwater potential zones in Theni district, Tamil Nadu, using remote sensing, GIS and MIF techniques. *Geoscience frontiers*, 3(2), 189-196.

Martínez, E. B., Mora, M. F. G., y Paredes-Tavares, J. (2021). Determinación de sitios potenciales de recarga artificial de agua subterránea en cinco acuíferos de la Zona Metropolitana del Valle de México. *Cuadernos Geográficos*, 60(3), 73-94.

Martínez, P., Patiño, C., Montero, M.J., Pérez, J.L. Ojeda, W., Mundo, M. y Hernández, L. (2010). 19. Efectos del cambio climático en los recursos hídricos. En: Jiménez, B., Torregrosa, M.L. y Aboites, L. (2010). *El agua en México: cauces y encauces*. Academia Mexicana de Ciencias-Comisión Nacional del Agua. CDMX, México. págs. 529-562.

Mengistu, T. D., Chang, S. W., Kim, I. H., Kim, M. G., y Chung, I. M. (2022). Determination of Potential Aquifer Recharge Zones Using Geospatial Techniques for Proxy Data of Gilgel Gibe Catchment, Ethiopia. *Water*, 14(9), 1362.

Moeck, C., Grech-Cumbo, N., Podgorski, J., Bretzler, A., Gurdak, J. J., Berg, M., y Schirmer, M. (2020). A global-scale dataset of direct natural groundwater recharge rates: A review of variables, processes and relationships. *Science of the total environment*, 717, 137042.

Moeys, J. (2018). soil texture: Functions for Soil Texture Plot, Classification and Transformation. R package version 1.5.1.

Nissan, H., Goddard, L., de Perez, E. C., Furlow, J., Brethren, W., Thomson, M. C., y Mason, S. J. (2019). On the use and misuse of climate change projections in

international development. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 10(3), e579.

Nestor, M. M. (2020). Groundwater vulnerability in Europe under climate change. *Quaternary International*, 547, 185-196.

ONU-Agua (2013). What is Water Security? Infographic. UN-Water, Geneva, Switzerland. Recuperado de: www.unwater.org/publications/water-security-infographic.

ONU-Agua (2019). Informe de políticas de ONU-AGUA sobre el Cambio Climático y el Agua. Grupo de Expertos de ONU-Agua sobre el Agua y el Cambio Climático. Recuperado de: https://www.unwater.org/sites/default/files/app/uploads/2019/12/UN-Water_PolicyBrief_Water_Climate-Change_ES.pdf

ONU-Agua (2022). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2022. AGUAS SUBTERRÁNEAS Hacer visible el recurso invisible. Resumen ejecutivo. Grupo de Expertos de ONU-Agua sobre el Agua y el Cambio Climático- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). 12 pp.

Parry, M., Parry, M. L., Anziani, O., Palatino, J., Van der Linden, P., y Hanson, C. (Eds.). (2007). *Climate change 2007-impacts, adaptation and vulnerability: Working group II contribution to the fourth assessment report of the IPCC*. Cambridge University Press.

Patil, V. B., y Lokesh, K. N. (2022). Integrated Approach for Groundwater Recharge Assessment—A Review. En: Jha, R., Singh, V. P., Singh, V., Roy, L. B., y Hadiyah, R (Eds.). *Groundwater and Water Quality*. 93-103. Springer.

Poggi, L., De Sousa, L. M., Bathes, N. H., Heuvelink, G., Kempe, B., Ribeiro, E., y Rossiter, D. (2021). Soil Grids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty. *Soil*, 7(1), 217-240.

Preston, B. L., Yuen, E. J., y Westaway, R. M. (2011). Putting vulnerability to climate change on the map: a review of approaches, benefits, and risks. *Sustainability science*, 6, 177-202.

Putranto, T. T., y Aryan to, D. E. (2018). Spatial Analysis to Determine Groundwater Recharge Area in Porporino Regency, Central Java Province/Indonesia. In E3S Web of Conferences (Vol. 73, p. 03025). EDP Sciences.

R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

Russell, D. J., Winless, S., Colling ham, Y. C., Huntley, B., y Hamer, K. C. (2015). Predicting future European breeding distributions of British seabird species under climate change and unlimited/no dispersal scenarios. *Diversity*, 7(4), 342-359.

Schilling, J., Herwig, E., Tremblay, Y., y Schifrin, J. (2020). Climate change vulnerability, water resources and social implications in North Africa. *Regional Environmental Change*, 20(1), 1-12.

Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial (SMADSOT) (2021). Estrategia Estatal de Cambio Climático 2021-2030. Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial-Gobierno de Puebla. Puebla, México. 115 pp.

Senanayake, I. P., Dissanayake, D. M. D. O. K., Maradona, B. B., y Persevere, W. L. (2016). An approach to delineate groundwater recharge potential sites in Amarantite, Sri Lanka using GIS techniques. *Geoscience Frontiers*, 7(1), 115-124.

Senthilkumar, M., Gnana Sundar, D., y Arumugam, R. (2019). Identifying groundwater recharge zones using remote sensing & GIS techniques in Amaravati aquifer system, Tamil Nadu, South India. *Sustainable Environment Research*, 29(1), 1-9.

Sibomana, U. (2016). Impact assessment of climate change on groundwater and vulnerability to drought of areas in Eastern Thailand. *Environmental Earth Sciences*, 75(1), 1-13.

Singh, S. K., Eddies, M., Shankar, U., y Griffiths, G. A. (2019). Potential groundwater recharge zones within New Zealand. *Geoscience Frontiers*, 10(3), 1065-1072.

Singh, S., y Tiwari, S. (2019). Climate change, water and wastewater treatment: interrelationship and consequences. En: Singh, R. P., Kolok, A. S., y Bartlett-

Hunt, S. L. (Eds.). Water Conservation, Recycling and Reuse: Issues and Challenges (pp. 203-214). Springer, Singapur.

San José R., Pérez J.L., González R.M., Pecci J., Garzón A., y Palacios M. (2016). Impacts of the 4.5 and 8.5 RCP global climate scenarios on urban meteorology and air quality: Application to Madrid, Antwerp, Milan, Helsinki and London. Journal of Computational and Applied Mathematics. Volume 293. 192-207 pp. ISSN 0377-0427. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cam.2015.04.024>.

Soto, G. y Herrera, M. (2019). Cambio climático y agua en ciudades. Impactos en la Ciudad de México. Aspectos científicos y políticas públicas. Universidad Autónoma Metropolitana. CDMX, México. 161 pp.

Thornton, P. K., Erickson, P. J., Herrero, M., y Challaron, A. J. (2014). Climate variability and vulnerability to climate change: a review. Global change biology, 20(11), 3313-3328.

USDA (2017). Soil survey manual. Soil Conservation Service Volume Handbook 18. U.S.