



CAMBIO CLIMÁTICO, CAUDAL ECOLÓGICO Y SEGURIDAD HÍDRICA

ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD PARA SIETE CUENCAS DE MÉXICO

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha sido financiado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) mediante la Cooperación Técnica No Reembolsable

A continuación se enlistan todas las personas que participaron y colaboraron en el desarrollo de este reporte a quienes les expresamos nuestro agradecimiento:

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)

Víctor Alcocer Yamanaka,
Horacio Rubio Gutiérrez,
Ricardo Villón Bracamonte
Rafael Rosales González

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP)

Jaime González
Anayeli Cabrera Murrieta

Banco Interamericano de Desarrollo (BID)

Gmelina Ramírez
María Eugenia de la Peña
Rubén Pérez Peña

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC)

Margarita Caso
Daniel Iura

Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED)

Guadalupe Matías

Instituto de Biología de la UNAM (IB-UNAM)

Guadalupe de la Lanza

Autores

Eugenio Barrios, Ninel Escobar y Sergio Salinas

Foto de portada: Santiago Gibert / WWF

CONTENIDO

I	ANTECEDENTES	5
II	LA POLÍTICA NACIONAL DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO	6
III	OBJETIVOS Y ENFOQUE METODOLÓGICO	7
IV	RESULTADOS DEL ANÁLISIS	14
V	CONCLUSIONES	17
VI	REFERENCIAS	18



© Gustavo Ybarra / WWF

I. ANTECEDENTES

El cambio climático está alterando el ciclo del agua a nivel global. Sus impactos han mostrado ser complejos y difíciles de predecir: alteraciones en la calidad y cantidad de agua, cambios en la temporalidad e intensidad de las lluvias, así como en la frecuencia y severidad de eventos extremos como sequías y ciclones tropicales. La mejor evidencia disponible sugiere que el cambio climático continuará intensificándose y acelerándose por muchas décadas más, aunque la velocidad y dirección de los cambios son todavía inciertos (IPCC, 2014). Como humanidad enfrentamos el gran reto de mantener el calentamiento global por debajo de los 2°C, de preferencia 1.5°, al tiempo que incrementamos nuestra capacidad para adaptarnos a sus efectos adversos y fortalecemos la resiliencia climática, tal como lo plantea el Acuerdo de París firmado por 175 países.

México es un país altamente vulnerable al cambio climático por diversas razones. La primera tiene que ver con la exposición ante eventos extremos como ciclones tropicales y sequías. La concentración de la población en zonas costeras y en el centro-norte del país con escasez natural de agua son características que abonan a dicha exposición. De acuerdo con el último Censo Nacional de Población y Vivienda realizado en 2010, más de 22 millones de personas vivían en municipios costeros, lo que equivale al 20% de la población total de ese año. Esta cifra ha aumentado exponencialmente especialmente en algunos estados como Quintana Roo que crecieron 70% entre 2000 y 2015.

Otro factor importante es la alta sensibilidad de diversos sistemas humanos y naturales ante las distintas amenazas climáticas. Tal es el caso de los manglares y arrecifes de coral que son muy sensibles a los cambios de temperatura y acidez de los mares. Un tercer factor es la capacidad de adaptación de nuestra población, la cual está relacionada directamente con los niveles de pobreza y desarrollo en las distintas partes así como con las herramientas y habilidades con las que cuentan las comunidades para hacer frente a los eventos climáticos que los afecten.

Para darnos una idea de la magnitud de estos impactos, de acuerdo con cifras del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) los daños y pérdidas asociados a desastres naturales entre 2000 y 2016 ascendieron a 425 mil millones de pesos; 33 millones de afectados y 8 mil fallecimientos. Por otra parte, con el fin de identificar los municipios más vulnerables desde una perspectiva integral, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio climático desarrolló recientemente el Atlas de Vulnerabilidad al Cambio Climático en el cual se identifican 480 municipios clasificados como “muy vulnerables” ubicados en 13 estados del país que equivalen al 20% del total de municipios a nivel nacional.

El Programa Nacional de Reservas de Agua (PNRA) es una iniciativa conjunta de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la Comisión de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) y el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF). Este programa inició formalmente en 2012 y tiene como objetivo establecer un sistema nacional integrado de reservas de agua para el ambiente, el cual se plantea como una estrategia de adaptación preventiva al cambio climático así como una condición indispensable para la seguridad hídrica del país.

Las reservas de agua para el ambiente son un volumen protegido por decreto presidencial con significado ecológico, es decir, con base en evaluaciones de caudal ecológico en ríos y humedales. El caudal ecológico¹ es a su vez un instrumento de gestión que permite acordar un manejo integrado y sostenible de los recursos hídricos, que establece la calidad, cantidad y régimen del flujo de agua requerido para mantener los componentes, funciones, procesos y la resiliencia de los ecosistemas acuáticos que proporcionan bienes y servicios a la sociedad (Declaración de Brisbane, 2007).

La implementación de las reservas de agua asegura la permanencia de un volumen de agua en el ambiente que se convierte en un amortiguamiento significativo de la variabilidad climática natural e inducida por el hombre, particularmente de cara a cambios en la disponibilidad del agua a nivel regional o nacional inducidos por la combinación de distintas presiones como la deforestación, el aumento poblacional y el cambio climático. Adicionalmente, las reservas de agua aseguran la provisión de diversos servicios ecosistémicos como la regulación del

¹ En México, la NMX-AA-159-SCFI-2012 es el instrumento normativo vigente que establece los principios y procedimientos técnicos para las evaluaciones de caudal ecológico. El documento puede consultarse en: <http://reservasdeagua.com.mx/documentos-tecnicos/>

clima, la captura de carbono, el funcionamiento ecológico de la infraestructura natural clave para el control de inundaciones y la provisión de agua. Estos servicios contribuyen a la reducción de la vulnerabilidad e incrementan la resiliencia de las cuencas y sus poblaciones ante impactos negativos del cambio climático.

Por estas razones, el PNRA es considerado una estrategia de adaptación basada en ecosistemas². Su implementación durante la presente administración es parte de los compromisos establecidos en el Programa Especial de Cambio Climático 2014-2018 (Estrategia 2.6, línea de acción 2.6.1) y ha sido sometido al Programa de Trabajo de Nairobi de la Convención Marco de Naciones Unidas ante el Cambio Climático como un caso de estudio de adaptación basada en ecosistemas.

El presente reporte analiza y discute los principales resultados de un análisis de vulnerabilidad en la que se prueba una metodológica innovadora conocida en inglés como “Eco-Engineering Decision Scaling” la cual permite cuantificar la vulnerabilidad³ de un sistema bajo distintas alternativas de gestión del agua y condiciones climáticas, utilizando indicadores ecológicos e ingenieriles e involucrando a expertos y partes interesadas de manera activa (LeRoy et. al, 2015). Adicionalmente, a partir de los resultados de este análisis, se identificaron y discutieron algunas recomendaciones generales para la gestión adaptativa del PNRA en un contexto de cambio climático.

Este esfuerzo es el resultado del trabajo conjunto entre la Alianza WWF-Fundación Gonzalo Río Arronte, la Alianza Global para la Adaptación del Sector Hídrico (AGWA sus siglas en inglés) y el Centro Regional del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y el Caribe (CAZALAC) con el financiamiento del Banco Interamericano para el Desarrollo en el marco del Proyecto 638-MX087505-7507.

II. LA POLÍTICA NACIONAL DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

México fue el segundo país en tener una Ley General de Cambio Climático, la cual fue decretada en 2012 y en donde ya estableció como uno de sus objetivos “Reducir la vulnerabilidad de la población y los ecosistemas del país frente a los efectos adversos del cambio climático, así como crear y fortalecer las capacidades nacionales de respuesta al fenómeno” (DOF, 2012, Artículo 3). Para efectos de esta misma ley, se entiende por vulnerabilidad el “Nivel al 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. La vulnerabilidad está en función del carácter, magnitud y velocidad de la variación climática a la que se encuentra expuesto un sistema, su sensibilidad, y su capacidad de adaptación.” (DOF, 2012, Artículo 3, inciso XXXIV).

En la Estrategia Nacional de Cambio Climático 10-20-40 (ENCC), publicada en junio de 2013, ya se establecen tres ejes estratégicos en materia de adaptación cada uno con varias líneas de acción. El tercer eje plantea “Conservar y usar de forma sustentable los ecosistemas y mantener los servicios ambientales que provee” e incluye cuatro líneas de acción enfocadas en mejorar la gestión del agua para la reducción de la vulnerabilidad de los ecosistemas y garantizar la seguridad hídrica (A3.1, A3.2, A3.5, A3.7). De esta estrategia se derivan instrumentos de política más definidos en el Programa Especial de Cambio Climático 2014-2018 (PECC). Este programa tiene una estrategia en particular enfocada en la “Restauración y gestión integral de cuencas hidrológicas” en la cual su primera línea de acción apunta a “Establecer reservas de agua nacionales superficiales para la protección ecológica”.

Finalmente, en noviembre de 2016, el Gobierno de México presentó a la Convención Marco de Naciones Unidas su Contribución Nacionalmente Determinada (CND), la cual establece tres metas en materia de adaptación y 15 acciones derivadas de su ENCC. Una de estas metas se clasifica como “Adaptación basada en Ecosistemas” y plantea “Fortalecer acciones de protección y restauración de ecosistemas y alcanzar la tasa cero de deforestación”. Como una de las cinco acciones establecidas para esta meta se contempla “Garantizar la gestión integral del agua en sus diferentes usos (agrícola, ecológico, urbano, industrial y doméstico”, lo que coincide con el objetivo del PNRA

² Se entiende por Adaptación basada en Ecosistemas al uso de la biodiversidad y los servicios de los ecosistemas como parte de una estrategia general de adaptación para ayudar a las personas a adaptarse a los impactos adversos del cambio climático.

³ De acuerdo con el marco conceptual utilizado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, se entiende por vulnerabilidad a la propensión o predisposición de un sistema humano o natural a ser afectado negativamente. La vulnerabilidad comprende una variedad de conceptos y elementos que incluyen la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la falta de capacidad de respuesta y adaptación.

(SEMARNAT, 2015). El Gobierno Federal estableció el compromiso el desarrollo de un Plan Nacional de Adaptación que defina la ruta de acción para la implementación y cumplimiento de la CND en esta materia.

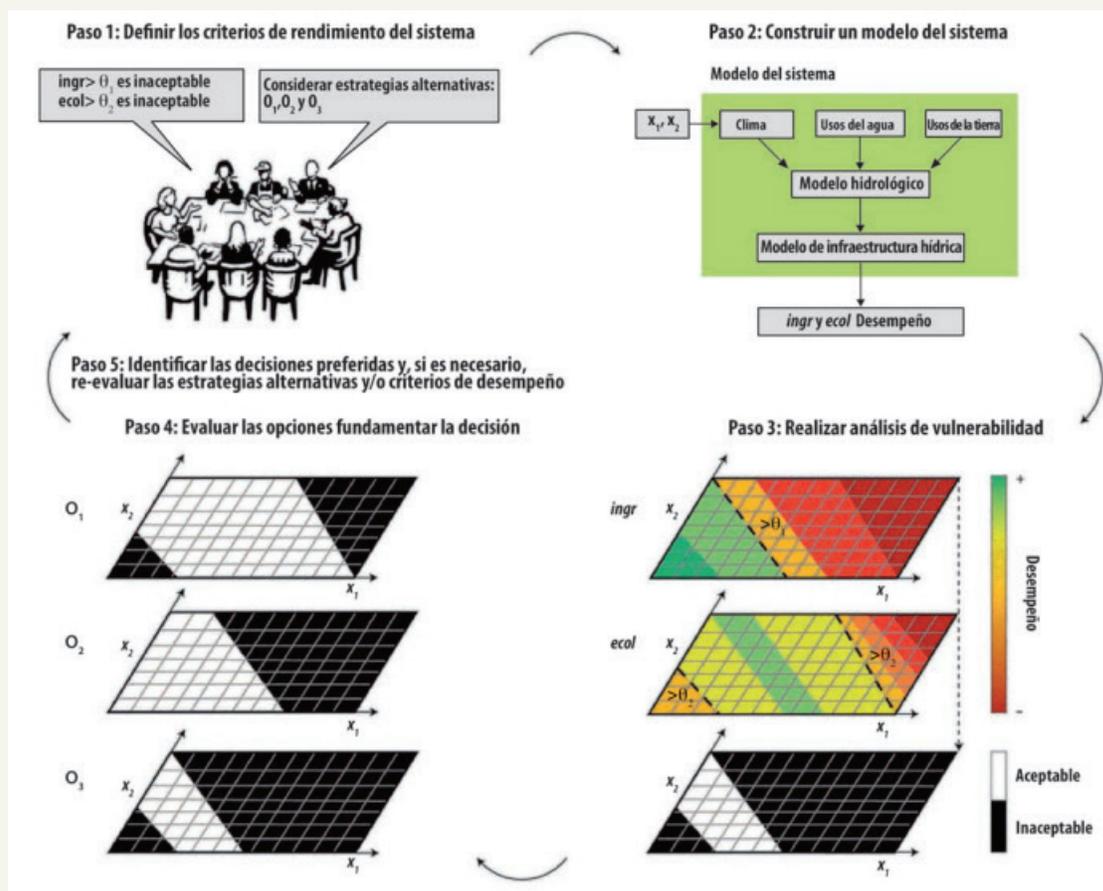
III. OBJETIVOS Y ENFOQUE METODOLÓGICO

El análisis de vulnerabilidad en el que se basa este reporte fue realizado de manera conjunta por WWF, la Alianza para la Adaptación Global del Sector Hídrico (AGWA) y el Centro del Agua para las Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y el Caribe (CAZALAC)⁴. El objetivo general del análisis es brindar evidencia sobre como la protección del caudal ecológico puede reducir la vulnerabilidad al cambio climático de la población y, en este sentido, considerar a las reservas de agua como una medida de adaptación basada en ecosistemas.

De esta forma, el análisis se enfocó en identificar y cuantificar los efectos del cambio climático en un conjunto seleccionado de indicadores de desempeño asociados al cumplimiento de las reservas de agua para la protección ecológica y la seguridad hídrica que éstas aportan.

La metodología que se utilizó se conoce como Segmentación de Decisiones Eco-Ingenieriles- SDEI (Eco-engineering Decision Scaling por sus siglas en inglés) el cual es un nuevo marco para la toma de decisiones en la gestión del agua que permite analizar explícitamente las disyuntivas entre distintos indicadores ecológicos e ingenieriles de un sistema bajo distintas condiciones de manejo y ante distintos posibles condiciones climáticos e hidrológicos. Fue presentada por primera vez en 2015 acompañada de una aplicación para el caso del río Iowa en Estados Unidos (LeRoy et. al. 2015). En esta publicación se demuestra el potencial de la metodología para informar la toma de decisiones de gestión del agua y el territorio en un contexto de incertidumbre climática. La metodología SDEI consta de cinco pasos, los cuales se describen visual a continuación.

Figura 1. Visión general del proceso de Segmentación de Decisiones Eco-Ingenieriles



Fuente: Tomado de Matthews et. al., 2015, Confiabilidad Climática: Superar la incertidumbre en la gestión sostenible del agua, AGWA.

⁴ El análisis de vulnerabilidad estará disponible en la página: http://www.wwf.org.mx/que_hacemos/programas/programa_agua/reservas_de_agua/

1. SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS DE ESTUDIO

Se seleccionaron un conjunto de cuencas representativas de distintas condiciones hidrológicas, climáticas y ecológicas del país. Para ello, se definieron cinco criterios:

- Zona hidrográfica a la que drenan las cuencas: Vertientes al Pacífico, Atlántico (Golfo de México) o en cuencas cerradas o Endorreicas.
- Tipo de corriente del cauce principal: perene, intermitente o efímera de la cuenca de acuerdo a las siguientes condiciones del Escurrimiento Medio Anual (EMA):
 - Si al menos el 10% del EMA es producido por la condición más seca (es decir, el percentil 0), la corriente es perene [$P_0 > 10\%$ EMA].
 - Si entre el 5% y 9% del EMA es producido por la condición más seca (es decir, el percentil 0), la corriente es intermitente [$5\% > P_0 > 9\%$ EMA]; y
 - Si menos de 5% del EMA es producido por la condición más seca (es decir, percentil 0), la corriente es efímera [$P_0 < 5\%$].
- Distribución geográfica balanceada Norte/Sur y al menos una cuenca de la Península de Baja California.
- Preferencia por las cuencas que se encuentran dentro del Programa Nacional de Reservas de Agua que actualmente contempla 356 cuencas del país.
- Preferencia por cuencas con presencia de Áreas Naturales Protegidas y/o humedales de importancia internacional (sitios RAMSAR).

A partir de estos criterios, se analizó la información hidrológica disponible para las 756 cuencas que existen en todo el país conforme al Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) y se identificaron un conjunto de 42 cuencas repartidas entre las tres zonas vertientes y con distintos tipos de corriente, con al menos una estación hidrométrica en la cuenca con al menos 20 años de registro en régimen natural y localizada a la salida de la misma.

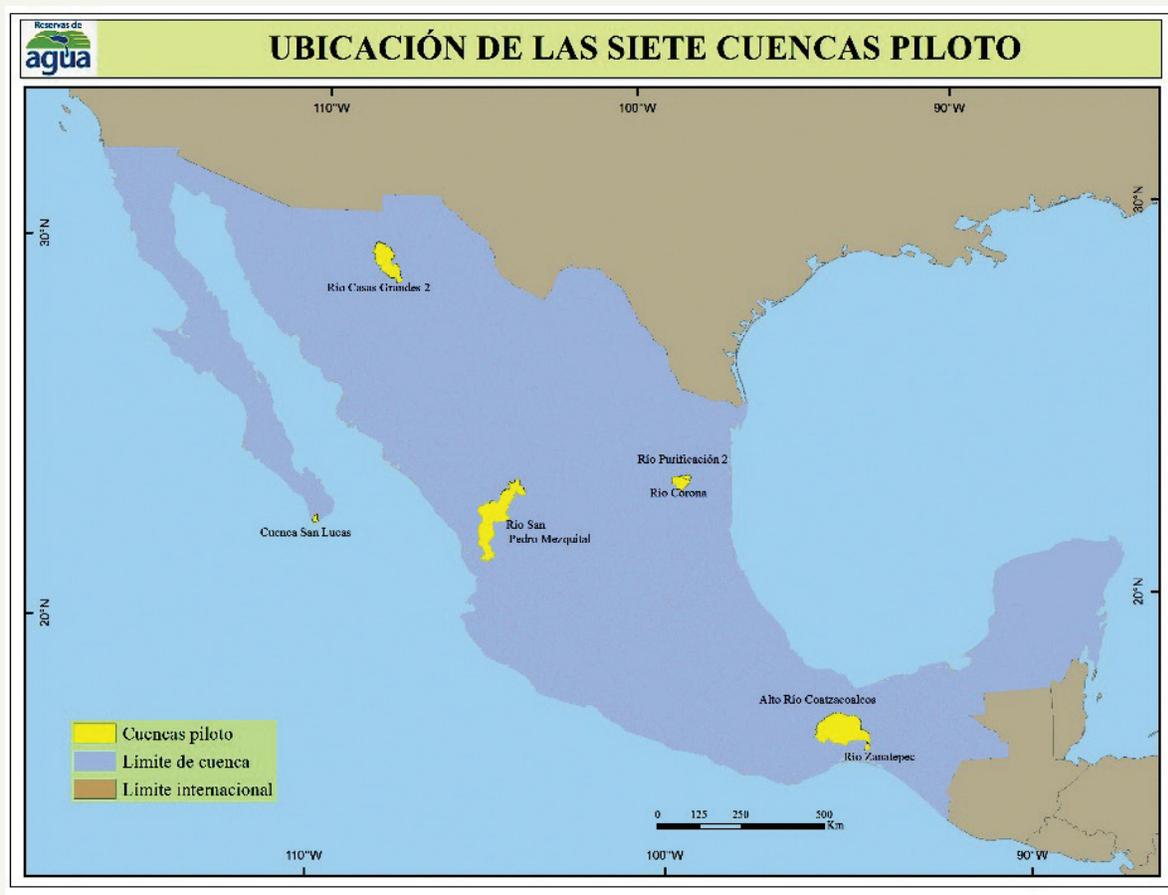
Como resultado, se identificaron siete cuencas piloto, las cuales son descritas en la Tabla 1 y Figura 1. La cuenca San Lucas fue incluida a pesar de no contar con información hidrométrica registrada por no contar con una estación dentro de su delimitación. La información para esta cuenca se obtuvo a partir de datos estimados por un modelo precipitación-escorrentía⁵ coordinado por WWF México. Por último, el volumen de reservas de agua para la protección ecológica fue obtenido a partir de los procedimientos de la Norma Mexicana de Caudal Ecológico (NMX-AA-159-SCFI-2012, Apéndice D, aplicación 2).

Tabla 1. Caracterización de las cuencas piloto seleccionadas

No	Nombre de la cuenca	Región hidrológica	Zona vertiente	Tipo de corriente	Norte / Sur	PNRA	ÁNP	Sitios Ramsar
1	Río San Pedro-Mezquitil	Presidio San Pedro	Pacífico	Perene	Norte	Si	Si	Si
2	San Lucas	Baja California Sureste	Pacífico	Efímera	Norte	Si	Si	Si
3	Río Zanatepec	Tehuantepec	Pacífico	Intermitente	Sur	No	No	No
4	Río Purificación 2	Fernando Soto La Marina	Atlántico	Intermitente	Norte	No	No	No
5	Río Corona	Fernando Soto La Marina	Atlántico	Efímera	Norte	No	No	No
6	Alto Río Coatzacoalcos	Coatzacoalcos	Atlántico	Perene	Sur	Si	No	No
7	Río Casas Grandes 2	Cuencas Cerradas del Norte	Endorreica	Efímera	Norte	Si	No	Si

⁵ "Environmental flows and water reserves for the ecological functionality of the Todos Santos-Los Barriles coastal corridor (South Baja California, Mexico)" coordinado por WWF-México y financiado por The David & Lucile Packard Foundation (Donación 2015-62739; Sonoran Institute México A.C., 2016).

Figura 1. Ubicación de las cuencas piloto seleccionadas



2. DESARROLLAR MODELOS HIDROLÓGICOS DE LAS CUENCAS DE ESTUDIO

El objetivo de este paso es reproducir el comportamiento hidrológico de cada cuenca para simular distintos escenarios de clima y demanda de agua. Para generar estos modelos se usó el software Water Evaluation and Planning (WEAP por sus siglas en inglés) desarrollado por el Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo (SEI por sus siglas en inglés). Esta herramienta es capaz de simular distintos procesos en una cuenca – tales como evotranspiración, escurrimiento e infiltración- como un modelo dinámico integrado de precipitación-escurrimiento incluyendo varios componentes del ciclo hidrológico. También es capaz de evaluar una amplia gama de medidas de gestión hídrica, tomando en cuenta usos múltiples, distintos niveles de eficiencias y prioridades en el uso del agua, entre otras consideraciones.

El proceso de modelación consiste en caracterizar el sistema en términos de sus fuentes de oferta de agua (por ejemplo ríos, arroyos, reservorios, plantas de desalinización); extracciones, transferencias y plantas de tratamiento; demandas de agua; generación de contaminantes y; requerimientos de los ecosistemas. La estructura de datos y el nivel de detalle pueden ser ajustados a las necesidades del análisis y la disponibilidad de información para cada cuenca en particular. Posteriormente, el modelo es calibrado y validado, usando series de tiempo de las descargas para evaluar los hidrogramas simulados. El periodo de tiempo considerado en los modelos de todas las cuencas fue 1980 como año inicial, mientras que 1981-2010 fue el periodo de referencia, considerando que este es el “estandar normal climatológico” recomendado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) para el objetivo específico de monitorear cambios climáticos de largo plazo. La idea es evaluar los resultados de diferentes escenarios de cambio climático en comparación con el comportamiento hidrológico durante el periodo de referencia.

Es importante señalar que, por razones de tiempo y capacidades de procesamiento, no se contemplaron cambios en la cobertura de uso de suelo, los cuáles podrían ser significativos en algunas cuencas. Este aspecto puede mejorar sin duda en extensiones futuras de este análisis. Las principales fuentes de información y resultados de la calibración para cada cuenca se muestran en las Tablas 2 y 3.

Tabla 2. Fuentes de información para la modelación hidrológica de las siete de cuencas de estudios

VARIABLES	FUENTES
Datos climáticos (temperatura y precipitación)	Base de Datos Climatológica Nacional CLICOM de CONAGUA
Los datos de humedad relativa	NOAA NCEP EMC NARR
Datos de velocidad de viento	Debido a la dificultad para medir la velocidad de viento y la falta de registros o de un conjunto de datos satelitales validados (como el NARR-A de NOAA NCEP EMC), esta variable se mantiene constante a 2m/s a una altitud de 2m sobre el nivel del suelo
Datos de uso de suelo	Cartografía de Uso de Suelo y Vegetación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Serie V
Infraestructura	Las series temporales de los volúmenes almacenados para algunos embalses se encuentran en línea publicadas por CONAGUA (ftp://ftp.conagua.gob.mx/Bandas/Bases_Datos_Presas/)
Demanda de Agua	Los datos de demanda de agua se obtuvieron del registro nacional de títulos de agua de caudales de agua superficiales (31/12/2016)
Red de ríos	Lehner, B., Grill G. (2013): Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world's large river systems. Hydrological Processes, 27(15): 2171–2186. Los datos están disponibles en: www.hydrosheds.org .

Tabla 3. Resultados de la calibración de modelos WEAP para las siete cuencas de estudio

CÓDIGO	NOMBRE DE ESTACIÓN	NOMBRE DE CORRIENTE	LATITUD	LONGITUD	% DE DATOS FALTANTES	R ²	NSE
SOTO LA MARINA							
25038	CORONA	RIO CORONA	-98.9519	23.9417	9.68	0.32	0.3
25040	MAGUEYES	RIO PILÓN	-99.5583	24.5694	0.00	0.34	0.25
25043	EL TOMASENO	RIO SAN ANTONIO	-99.4361	24.2514	0.00	0.37	0.23
25062	PADILLA II	RIO PURIFICACIÓN	-98.8917	24.0361	0.54	0.64	0.63
25091	EL BARRETAL II	RIO PURIFICACIÓN	-99.1342	24.1125	13.17	0.4	0.33
SAN LUCAS							
-	Simulada	Río San Lucas	-	-	0.85	0.84	
PRESIDIO SAN PEDRO							
11010	REFUGIO SALCIDO	RIO SANTIAGO BAYACORA	-104.5167	23.9833	9.68	0.43	0.41
11012	SAN PEDRO	RIO SAN PEDRO	-105.1500	21.9667	0.81	0.71	0.71
11027	EL SALTITO	RIO DURANGO	-104.3017	23.9767	22.58	0.47	-0.1
11040	VICENTE GUERRERO	RIO SÚCHIL	-103.9703	23.7467	11.02	0.52	0.5
COATZACOALCOS							
29005	LAS PERLAS	RIO COATZACOALCOS	-94.8667	17.4381	8.33	0.54	0.51
29006	JESUS CARRANZA II	RIO JALTEPEC	-95.0542	17.3917	4.84/16.13*	0.31	0.18
TEHUANTEPEC							
22018	OSTUTA	RIO OSTUTA	-94.4375	16.5000	0.00	0.65	0.59
22026	ZANATEPEC	RIO ZANATEPEC	-94.3667	16.4833	6.18	0.59	0.59
CASAS GRANDES							
34004	CASAS GRANDES	RIO CASAS GRANDES	30.375	-107.933	4.03	0.55	0.46

Los parámetros R^2 y NSE (Nash Sutcliffe Efficiency)⁶, son indicadores de la bondad de ajuste del modelo. Valores mayores a 0.5 para el primero, se consideró como un modelo “aceptable” y por encima de 0.75 como “bueno”. En el caso de NSE los umbrales son 0.2 y 0.4, respectivamente. Al analizar estos valores para las distintas cuencas se observan diferencias importantes. Por ejemplo, en el caso de Soto la Marina, solo dos de las estaciones analizadas tiene un valor de NSE aceptable, mientras que la cuenca de San Lucas, al ser una estación simulada con un modelo de precipitación-escorrentía tiene un ajuste muy bueno.

En el caso de San Pedro, varias estaciones no presentaron un buen ajuste, sin embargo, en general se puede decir que el modelo es aceptable ya que la estación 11012 “San Pedro”, localizada en el tramo final de la cuenca, tiene un desempeño aceptable. Lo mismo sucede con Coatzacoalcos en donde la mayoría de las estaciones no tienen un buen ajuste, pero si la estación 29005 ‘Las Perlas’ ubicada a la salida de la cuenca. Finalmente, para los casos de Tehuantepec y Casas Grandes, se considera que los modelos tuvieron un buen desempeño.

Entre las limitaciones más importantes que se identificaron para aplicar este paso en el contexto nacional se encuentra la falta de información detallada sobre los embalses; falta de precisión en la localización de los puntos de uso de agua; ausencia o lejanía de las estaciones climatológicas y deficiencias de las series de datos de las estaciones hidrométricas.

3. ESCENARIOS DE DECISIÓN

La construcción de escenarios tiene como objetivo definir situaciones alternativas a la actual que puedan servir para comparar los impactos potenciales de una variable sobre otra. En este análisis se buscan construir dos escenarios de línea base, representados por las condiciones de la cuenca bajo el régimen hidrológico natural, actual y futuro, y otros dos escenarios que representaran el comportamiento bajo los usos del agua actual en las condiciones climáticas actuales y las potenciales futuras. Las tablas 4 y 5 describen estos escenarios.

Tabla 4. Escenarios de decisión contemplando las variables de tiempo e intervención

	Régimen Natural	Régimen actual de usos del agua
Histórico (línea base)	Hidrología natural bajo las condiciones meteorológicas históricas observadas.	Hidrología con las condiciones actuales de usos del agua y suelo bajo las condiciones meteorológicas históricas observadas.
Futuro (cambio climático)	Hidrología natural bajo condiciones de cambio climático.	Hidrología bajo las condiciones actuales de usos del agua y suelos bajo condiciones de cambio climático.

Tabla 5. Subescenarios climáticos

Subescenarios	Descripción
Percentil 5 – 1980-2010	El 5% de los valores observados más secos en el periodo histórico.
Percentil 50 – 1980-2010	El 50% de los valores observados más secos observados en el periodo histórico.
Percentil 95 – 1980-2010	El 95% de los valores observados más secos en el periodo histórico.
Proyección 2030-2060 CC5% P5%	El 5% de las series generadas aleatoriamente más secas del 5% de la cola de los Modelos de Circulación Global (MCG) (que muestran la tendencia más grande en la reducción de la precipitación y el incremento de la temperatura.
Proyección 2030-2060 CC50% P5%	El 5% de las series generadas aleatoriamente de la tendencia promedio en la reducción de la precipitación e incremento de la temperatura de todos los MCG seleccionados.
Proyección 2030-2060 CC50% P50%	El 50% de las series generadas aleatoriamente más secas de la tendencia promedio en la reducción de precipitación y el incremento de temperatura de todos los MCG seleccionados.
Proyección 2030-2060 CC50% P95%	El 95% de las series generadas aleatoriamente más secas de la tendencia promedio en la reducción de precipitación y el incremento de temperatura de todos los MCG seleccionados.
Proyección 2030-2060 CC95% P95%	El 95% de las series generadas aleatoriamente del 5% de la cola de los MCG que muestra la tendencia más baja en la reducción de precipitación e incremento de la temperatura.

⁶ Este indicador es usado frecuentemente para evaluar el poder predictivo de los modelos hidrológicos.

La modelación climática se llevó a cabo a través del software SIMGEN con el que se analizaron 43 Modelos de Circulación Global (GCM, acrónimo en inglés de Global Circulation Models). Los GCM son parte de la Fase 4 del Proyecto de Modelo Climático Comparativo (CMIP5, acrónimo en inglés de Climate Model Intercomparison Project Phase 5). Se descargaron series temporales mensuales de precipitación y temperatura para la cuenca de interés, tanto para el periodo histórico (1980-2010) como para el periodo proyectado (2030-2060). A partir de este análisis, se deriva el cambio en precipitación para cada incremento de temperatura, creando una distribución de posibles cambios. Este es un paso de pre-procesamiento importante ya que indica para la cuenca de interés cuáles son los diferentes cambios en precipitación y temperatura que pueden esperarse, con base en GCM que representan adecuadamente las condiciones locales.

4. INDICADORES DE DESEMPEÑO

El objetivo de este paso es determinar las métricas o indicadores del análisis de vulnerabilidad. Dados los objetivos del estudio, se definieron indicadores para medir de manera directa o indirecta la vulnerabilidad o resiliencia de las cuencas, en términos hidrológicos, ante cambios en las condiciones climáticas. Un criterio importante a considerar en la selección de los indicadores fue la disponibilidad y calidad de la información, así como la viabilidad de poder generar esos indicadores para otras cuencas del país, adicionales a las siete que se estudiaron en este análisis. En una primera serie de discusiones, el equipo de AGWA, WWF y CAZALAC identificó tres posibles tipos de indicadores: caudales ecológicos, riesgo de sequías y riesgo de inundaciones⁷.

Después de revisar a fondo la información disponible para las cuencas de estudio y la viabilidad de estimar cada indicador, se optó por usar dos indicadores relacionados con los caudales ecológicos: el grado de incumplimiento del volumen de reserva de agua en cada cuenca calculado para los cuatro objetivos ambientales, a escala anual y para periodo de secas. La razones principales para optar por estos dos indicadores fueron: i) el caudal ecológico es reconocido por la literatura científica como una variable clave de la salud hidrológica de la cuenca así como un elemento clave para la adaptación al cambio climático (Matthews et. al., 2014, Acreman 2014, Acreman 2016), ii) gracias a la existencia de una norma mexicana para la estimación del caudal ecológico (NMX-AA-159-SCFI-2012), se cuenta con un marco metodológico claro para que cualquier organización interesada pueda estimar el caudal ecológico para sus cuatro objetivos ambientales de manera clara y objetiva, iii) existe la información suficiente para estimar el caudal ecológico usando las metodologías que ofrece la norma para todas las cuencas del país.

En la Tabla 6 se presenta el cálculo de los caudales ecológicos anuales estimados que se usaron para los cuatro objetivos ambientales que establece la norma: A, B, C y D. Estos objetivos representan el estado ecológico o de conservación que se desea alcanzar. Las letras corresponden a los estados “muy bueno”, “bueno”, “moderado” y “deficiente”, respectivamente. El objetivo “A” por ejemplo se espera que la propuesta de reserva conserve los componentes del flujo natural y sus atributos en gran proporción. En el caso opuesto, el objetivo “D” consiste en conservar o recuperar los componentes del caudal y sus atributos en una menor proporción, normalmente muy lejos de su estado natural.

Finalmente, es importante mencionar que al definir y calcular el caudal ecológico también para el periodo de secas, es posible evaluar la vulnerabilidad de las cuencas en los periodos de mayor estrés natural.

⁷ Se entiende como riesgo al potencial de consecuencias en que algo de valor está en peligro con un desenlace incierto, reconociendo la diversidad de valores. A menudo el riesgo se representa como la probabilidad de acaecimiento de sucesos o tendencias peligrosos multiplicada por los impactos en caso de que ocurran tales sucesos o tendencias.

Tabla 1. Caracterización de las cuencas piloto seleccionadas

MILLONES DE METROS CÚBICOS (Mm ³)	Volumen de caudal ecológico por objetivo ambiental ^a			
	A	B	C	D
SAN PEDRO MEZQUITAL				
Total	2,247	1,405	1,120	946
Porcentaje de escurrimiento promedio anual	83	52	41	35
ALTO RÍO COATZACOALCOS				
Total	10,262	8,009	6,652	5,527
Porcentaje de escurrimiento promedio anual	70	55	46	38
CASAS GRANDES 2				
Total	109	55	34	23
Porcentaje de escurrimiento promedio anual	36	19	11	7
CORONA				
Total	106	55	33	23
Porcentaje de escurrimiento promedio anual	42	22	13	9
PURIFICACIÓN 2				
Total	240	129	84	56
Porcentaje de escurrimiento promedio anual	45	24	16	10
SAN LUCAS				
Total	3	1	1	0.48
Porcentaje de escurrimiento promedio anual	61	30	16	10

5. REALIZAR “PRUEBAS DE ESTRÉS” AL DESEMPEÑO DEL SISTEMA

El objetivo de este paso es definir las respuestas de las cuencas a impulsores climáticos, esencialmente cambios en temperatura y precipitación, bajo los distintos escenarios. El proceso involucra la identificación del cambio proyectado de la disponibilidad y asignación del agua en la cuenca, lo que requiere correr primero el modelo de la cuenca en modo histórico en WEAP, identificando el rango de condiciones normales, incluyendo episodios de exceso y déficit y posteriormente, utilizar los escenarios climáticos proyectados en SIMGEN para correr nuevamente el modelo WEAP en modo futuro.

De esta manera, se crean “superficies de respuesta” que son gráficas que muestran los umbrales de cumplimiento de los indicadores de desempeño seleccionados.

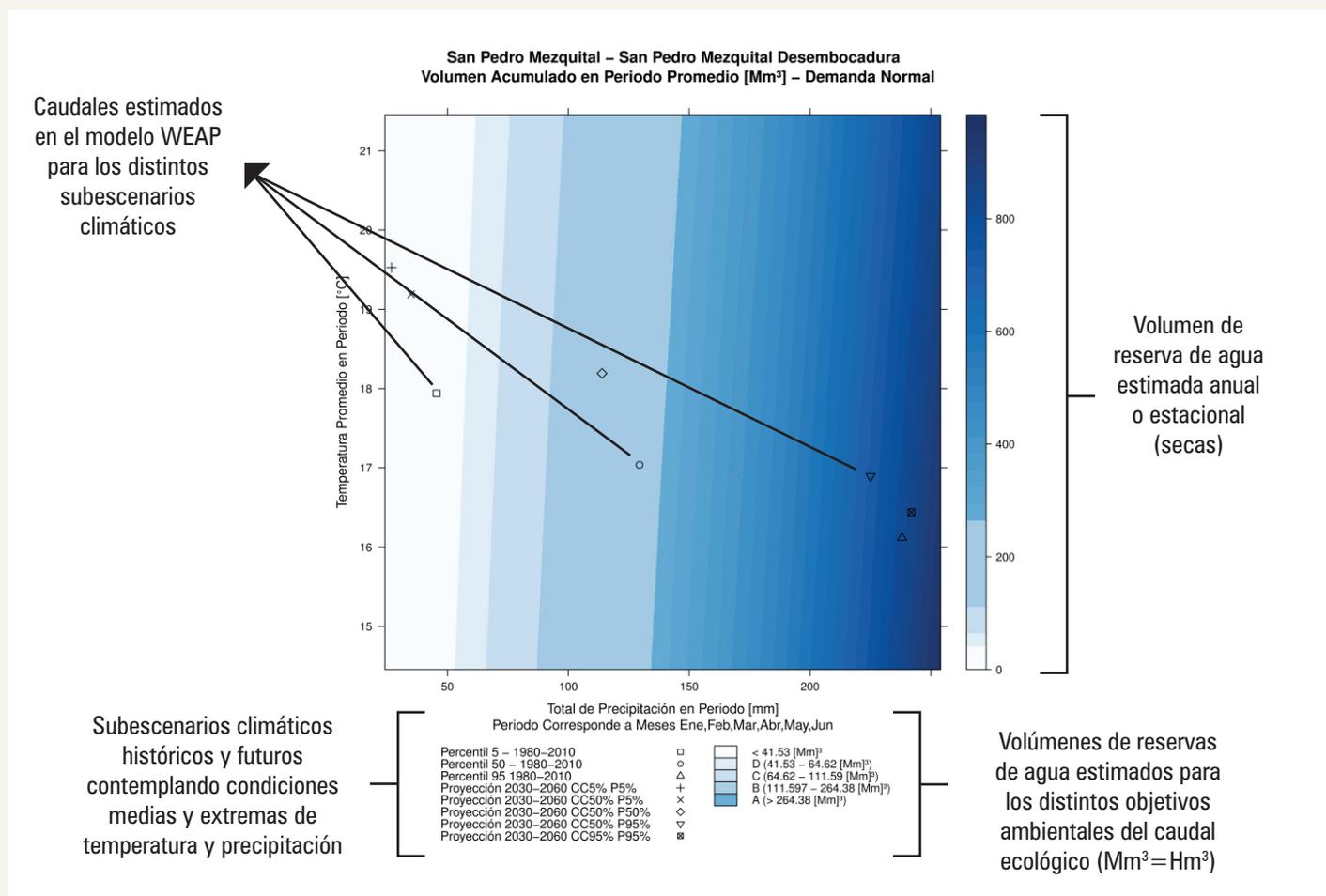
Para cada cuenca piloto se crearon tres superficies de respuesta que permiten visualizar las siguientes situaciones:

- Volumen acumulado anual promedio (en Hm³) para la cuenca de estudio con los escenarios climáticos observados y proyectado bajo la situación de extracción de agua actual.
- Volumen acumulado promedio (en Hm³) en los meses más secos para la cuenca de estudio con los escenarios climáticos observados y proyectados bajo la situación de extracción de agua actual.
- Volumen acumulado promedio (en Hm³) en los meses más secos para la cuenca de estudio con los escenarios climáticos observados y proyectados bajo la situación sin extracción de agua antropogénica.

En la Figura 3 se muestra una representación de las superficies de respuesta creadas para este análisis, explicando el significado de cada componente y usando como ejemplo la cuenca del San Pedro Mezquital.

La ejecución de este paso para las cuencas de estudio, implicó un esfuerzo importante de modelación en WEAP y SINGEM.

Figura 3. Descripción de una superficie de respuesta



IV. RESULTADOS DEL ANÁLISIS

Como un primer ejercicio, el análisis de vulnerabilidad incluyó el cálculo de los porcentajes de años en los periodos histórico y futuro en los cuales los caudales ecológicos no son alcanzados para los objetivos A y C que corresponden a los estados “Muy Bueno” y “Moderado”. Este ejercicio permite identificar las cuencas que ya han sufrido cierto grado de estrés hídrico y las que puedan sufrirlo en el futuro bajo las condiciones climáticas medias (CC50%). En la Tabla 6 se muestran los resultados.

Tabla 6. Porcentaje de años dentro del periodo de evaluación en que el caudal ecológico en sus objetivo A y C no es alcanzado

CUENCA	Histórico (1980-2010)		CC50% (2030-2060)	
	Frecuencia debajo de Reserva de Agua Tipo A*	Frecuencia debajo de Reserva de Agua Tipo C*	Frecuencia debajo de Reserva de Agua Tipo A*	Frecuencia debajo de Reserva de Agua Tipo C*
CASAS GRANDES 2	100	90	100	100
SAN LUCAS	55	23	65	29
RIO PURIFICACIÓN 2	74	23	88	52
RIO CORONA	32	13	48	13
SAN PEDRO MEZQUITAL	45	10	100	74
TEHUANTEPEC	55	23	87	39
COATZACOALCOS	13	0	45	10

Al analizar los datos de la tabla, podemos observar que en todos los casos se incrementan las frecuencias de los años que no se cumplirían las condiciones de caudal ecológico en condiciones medias anuales. En estos resultados destacan dos situaciones de relevancia: i) las cuencas que en la actualidad ya se encuentran bajo fuerte presión por extracción de agua y ii) las cuencas localizadas en zonas donde se esperaría un mayor impacto por la variabilidad climática.

En el primer caso esta la cuenca Casas Grandes 2 que presenta las condiciones de mayor vulnerabilidad al ya no cumplir en un 90% con el caudal ecológico en su objetivo C durante el periodo histórico. Para el periodo futuro, se proyecta una vulnerabilidad aún mayor ya que en ningún año se cumple el caudal en nivel C. En menor grado de vulnerabilidad, están las cuencas de San Lucas, Río Purificación 2 y Tehuantepec con un porcentaje de incumplimiento de alrededor del 22% para el objetivo C en el periodo histórico. Para éstas últimas dos cuencas, los porcentajes de incumplimiento aumentan significativamente a 52% y 39%, lo que refleja un aumento significativo de la vulnerabilidad futura.

En el segundo caso se encuentran las cuencas de San Pedro Mezquital y Coatzacoalcos donde las frecuencias de incumplimiento aumentan marcadamente del periodo histórico al periodo futuro. Bajo las condiciones climáticas medias, prácticamente en ningún año se estaría cumpliendo el caudal en su objetivo A siendo que para el periodo histórico se cumplió prácticamente en la mitad de los años. Esto puede deberse a que se proyecta que los cambios climáticos serán drásticos en esta cuenca y a que la respuesta hidrológica del sistema será de igual manera. Cabe señalar que la cuenca del San Pedro Mezquital fue el primer decreto de reserva de agua para el medio ambiente en ser publicado en el país por un volumen anual cercano al 80% del Escurrimiento Medio Anual.

Finalmente, en la tabla podemos ver que la cuenca de Coatzacoalcos también enfrenta un aumento significativo entre la vulnerabilidad histórica y la vulnerabilidad futura que pasa de 13% a 45% para el objetivo A.

A partir de estos resultados y asumiendo que el cumplimiento del caudal ecológico, representaría el cumplimiento de los volúmenes comprometidos con otros usos, empezando por el consumo doméstico, entonces la presencia de caudal ecológico o reserva de agua es una acción para el manejo de las condiciones de vulnerabilidad de un sistema. A partir de esta consideración se pueden realizar diferentes análisis para cuantificar el riesgo de impactos a la población, la economía o la biodiversidad de una cuenca.

Por ejemplo, los impactos de la reducción del caudal futuro en las cuencas dependerán en gran medida de las condiciones poblacionales y sociales en dichos territorios. En general podríamos decir que el mayor impacto afectaría a la población rural bajo condiciones limitadas de acceso al agua, por el incumplimiento del caudal ecológico, sobretodo en sus objetivos más altos. En la Tabla 7 se presentan algunos datos oficiales de población y acceso al agua que permiten identificar en qué cuencas podrían esperarse un mayor número de afectados por la reducción del caudal futuro.

Tabla 6. Porcentaje de años dentro del periodo de evaluación en que el caudal ecológico en sus objetivo A y C no es alcanzado

indicadores /Cuencas	Casas Grandes 2	Purificación 2	Corona	San Pedro Mezquital	Alto Río Coatzacoalcos	Tehuantepec	San Lucas
Población 2010	11,309	16,677	30,328	93,070	203,533	7,353	131,395
Población rural 2010	7,791	7,760	23,722	61,033	148,365	104	3,338
% rural	69%	47%	78	66%	73%	1%	3%
ÍNDICE DE MARGINACIÓN PONDERADO							
Media	-0.023	-0.036	-0.011	-0.001	-0.001	-0.234	-0.029
Viviendas particulares habitadas	3,511	4,595	8,044	21,828	52,087	2,084	35,380
Sin acceso a agua dentro de casa	98	91	767	3,640	19,699	155	9,093
Sin drenaje	520	1,689	5,307	5,436	8,734	103	789
% sin acceso a agua dentro de casa	2.8%	2.0%	9.5%	16.7%	37.8%	7.4%	25.7%
% sin drenaje	14.8%	36.8%	66.0%	24.9%	16.8%	4.9%	2.2%

Fuente: Elaboración propia con información de INEGI, CONAPO y CONAGUA

En el caso de la cuenca de Casas Grandes, existe un alto porcentaje de la población de la cuenca que vive en asentamientos rurales y que podrían ser los primeros afectados de una disminución del caudal, sobretodo en periodo de secas. Lo mismo sucede en el caso de San Pedro Mezquital y Coatzacoalcos, aunque para esta última cuenca habría que considerar que si bien el porcentaje de incumplimiento aumenta significativamente del periodo histórico al periodo futuro, éste sigue siendo bajo (10%). En estos casos, un análisis de este tipo permite priorizar acciones de adaptación para disminuir el riesgo de impactos a esta población, como podrían ser sistemas descentralizados de abastecimiento por aguas subterráneas.

Es importante destacar que en los ejercicios de modelación no se contempló el cambio en el uso de suelo como tampoco el aumento de la demanda para usos diferentes al público-urbano. Estos serían aspectos a considerar en análisis futuros.

Un aspecto relevante de este análisis de vulnerabilidad son las superficies de respuesta estimadas que se muestran en el anexo. Este instrumento visual resulta de utilidad para evaluar el impacto y las diferencias entre los distintos escenarios y subescenarios climáticos especificados en las tablas 4 y 5. Al respecto, destacan cuatro hallazgos principales:

1. A mayor superficie, mayor espacio de respuesta del sistema para cumplir la condición esperada, en este caso el volumen asociado al objetivo ambiental del caudal ecológico y por lo tanto menor vulnerabilidad.
2. Los caudales estimados para los distintos subescenarios climáticos están determinados en mayor medida por cambios en la precipitación y en mucho menor medida por cambios en la temperatura. Esto se puede ver en la verticalidad de las franjas de azules lo que indica que los caudales en la cuenca están determinados en mucho mayor medida por los cambios en la precipitación (eje X) que por los cambios en la temperatura (eje Y).
3. En prácticamente todas las cuencas se reducirán los caudales en el futuro para todos los subescenarios climáticos y en la mayoría de los casos la reducción será aún más significativa para los periodos de secas. Esto se puede apreciar a partir del desplazamiento de los escenarios históricos vs futuros de derecha a izquierda.
4. La demanda actual y futura de agua representa para las cuencas de Casas Grandes 2, Purificación, Corona y Tehuantepec un factor de vulnerabilidad adicional en periodo de secas al reducir significativamente la cantidad de agua disponibles para proteger el caudal ecológico. Esto se observa al comparar la segunda con la tercera superficie en términos de cumplimiento de los caudales ecológicos para sus cuatro objetivos.

V. CONCLUSIONES

El Programa Nacional de Reservas de Agua se plantea desde su diseño como una política que promueve la adaptación basada en ecosistemas a través de la protección del caudal ecológico y sus servicios ecosistémicos en gran parte del territorio nacional. El caudal ecológico mantiene un volumen de agua en régimen estacional anual en los cauces que funciona como un amortiguador de la variabilidad climática. Bajo el marco de la Ley de Aguas Nacionales, el caudal ecológico se establece como reserva de agua para la protección ecológica. El desarrollo de estudios técnicos para la determinación del caudal ecológico en cada cuenca aplicando la Norma Mexicana de Caudal Ecológico (NMX-AA-159-SCFI-2012) es sustento científico de esta política pública y del desarrollo de nuevas herramientas y análisis.

Este ejercicio representa un primer análisis formal para valorar la capacidad de las reservas de agua como medida de adaptación al cambio climático a partir de un análisis de vulnerabilidad en el ámbito de cuenca. En términos generales, el análisis desarrollado evidencia como la presencia de caudal ecológico reduce la vulnerabilidad de las cuencas en términos de disponibilidad de agua al mantener una capacidad de amortiguamiento a la variación de la precipitación y evitar la sobreconcesión y su consecuentre sobreexplotación.

Si bien los resultados obtenidos se trabajaron para condiciones medias, por razones prácticas, las propuestas de caudal ecológico se plantean como régimen mensual y para diferentes condiciones estacionales como años secos, medios, húmedos y muy húmedos. Esto aunado a los escenarios del análisis de vulnerabilidad (superficies de respuesta) obtenido en el presente estudio, proporciona los elementos para establecer acciones de adaptación al cambio climático en los ámbitos del uso del agua.

En cuanto a las diferencias entre los niveles de vulnerabilidad entre las cuencas, resultan evidentes dos factores determinantes; el primero relacionado con la exposición a los cambios en el clima (ubicación principalmente) y el segundo con la sensibilidad de la cuenca (tipo y estado de conservación de los ecosistemas y sistemas hídricos, grado de intervención humana sobre los caudales y niveles de demanda para distintos usos). De aquí que una conclusión de este ejercicio es que este tipo de análisis debe enfocarse a identificar los factores en los que puede incidir la buena gestión del agua para reducir la vulnerabilidad del sistema en el mediano y largo plazo, más allá de únicamente el límite a la demanda que significan las decretos reservas.

La demanda de agua destaca como variable de gran significado en términos de adaptación. Una gestión flexible de esta permitiría cumplir con el caudal ecológico, protegiendo el ecosistema y la renovabilidad del ciclo hidrológico, factores que contribuyen a la seguridad hídrica de la cuenca y del país en general. La identificación de umbrales de competencia entre el caudal y los distintos usos bajo escenarios futuros es una línea de investigación relevante para futuros análisis.

Otro factor importante que seguramente reduciría la vulnerabilidad estaría asociado a medidas de manejo del territorio, en particular de protección de la cobertura vegetal y conservación de las zonas riparias aunque esto no fue analizado y modelado en este ejercicio.

Resulta evidente que los instrumentos para establecer el caudal ecológico, en este caso la reserva de agua y su reglamentación requiere de un mecanismo de revisión transparente y sustentado en ciencia. En este sentido es crucial el monitoreo del caudal y del clima a través de las estaciones hidrométricas y climáticas disponibles en el territorio. Fortalecer las capacidades de medición de estas redes es vital para el diseño y operación de las reservas de agua como medida de adaptación al cambio climático.

Es importante destacar la viabilidad de aplicar la metodología Segmentación de Decisiones Eco-Ingenieriles y su efectividad para responder a las preguntas clave que se plantearon al inicio del presente ejercicio. Si bien existieron limitaciones en términos de disponibilidad, cantidad y calidad de la información, se considera que su aplicación para las cuencas seleccionadas fue exitosa al lograr construir modelos lo suficientemente confiables y llegar a resultados concretos en el sentido esperado.

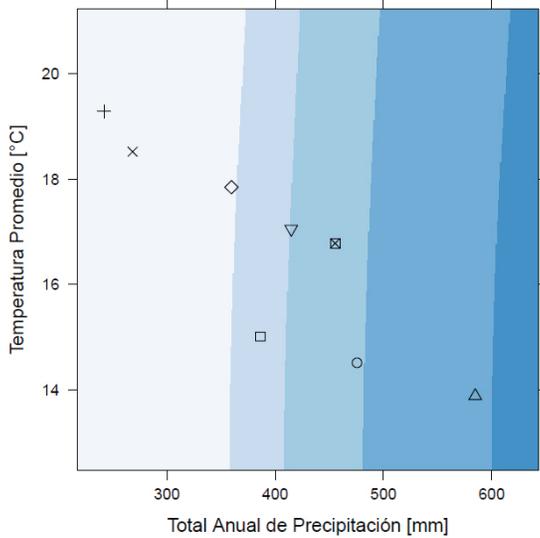
Finalmente, resalta el potencial de la metodología para enmarcar la toma de decisiones a nivel de cuenca bajo el enfoque de vulnerabilidad y manejo de riesgos. De aquí la importancia de contar con nuevas y mejores herramientas para transformar la gestión del agua y el territorio en un contexto de cambio climático.

VI. REFERENCIAS

- IPCC (2014) *Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas*. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- Guo, D., Westra, S. and Maier, H. (2017) ‘Use of a scenario-neutral approach to identify the key hydro-meteorological attributes that impact runoff from a natural catchment’, *Journal of Hydrology*, 554, pp. 317–330. doi: 10.1016/J.JHYDROL.2017.09.021.
- Kim, D., Chun, J. A. and Choi, S. (2018) ‘Assessing water supply capacity in a complex river basin under climate change using the logistic eco-engineering decision scaling framework’, (May), pp. 1–32.
- Poff, N. L. *et al.* (2015) ‘Sustainable water management under future uncertainty with eco-engineering decision scaling Sustainable water management under future uncertainty with eco-engineering decision scaling’, *Nature Publishing Group*, (September), pp. 0–34. doi: 10.1038/nclimate2765.
- DOF, (2012). *Ley General de Cambio Climático, artículo 2*. Diario Oficial de la Federación, México.
- Matthews J. *et al.* (2014) ‘More than the Fish: Environmental Flows for Good Policy and Governance, Poverty Alleviation and Climate Adaptation’ *Aquatic Procedia 2* (2014) 16–23
- SEMARNAT (2013). *Estrategia Nacional de Cambio Climático. Visión 10-20-40*. Gobierno de la República, México.
- SEMARNAT (2015) *Compromisos de Mitigación y Adaptación ante el Cambio Climático para el periodo 2020-2030*. México.
- Secretaría de Economía (2012) *Norma Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012 que establece el procedimiento para la determinación de caudal ecológico en cuencas hidrológicas*. Diario Oficial de la Federación, México.
- Sonoran Institute México, A. C. (2016) *Desarrollo de dos modelos precipitación-escurrimiento para la estimación de caudal ecológico en dos sistemas de cuencas en Baja California Sur*. Convenio de Consultoría PI37.

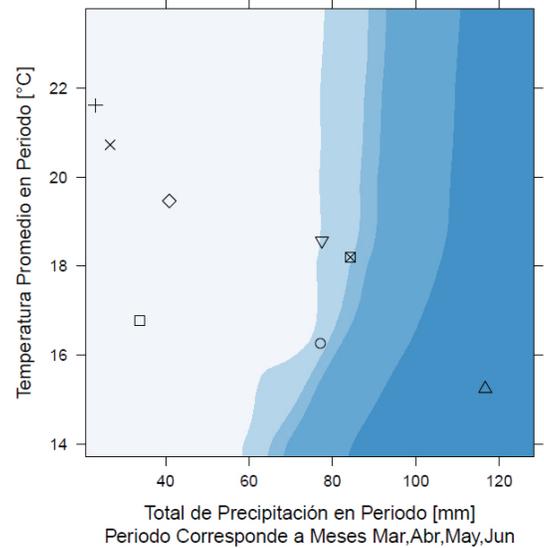
ANEXO 1. SUPERFICIES DE RESPUESTA

Casas Grandes – Casas Grandes 2
Volumen Acumulado Anual Promedio [Mm³]



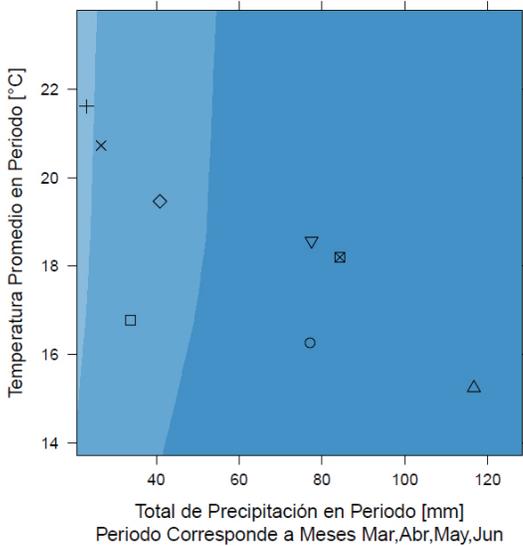
- Percentil 5 – 1980-2010 – 28.07 [Mm³]
 - Percentil 50 – 1980-2010 – 52.77 [Mm³]
 - Percentil 95 1980-2010 – 100.09 [Mm³]
 - Proyección 2030-2060 CC5% P5% – 6.81 [Mm³]
 - Proyección 2030-2060 CC50% P5% – 9.55 [Mm³]
 - Proyección 2030-2060 CC50% P50% – 21.77 [Mm³]
 - Proyección 2030-2060 CC50% P95% – 34.13 [Mm³]
 - Proyección 2030-2060 CC95% P95% – 45.16 [Mm³]
- < 22.69 [Mm³]
 - D (22.69 – 33.87 [Mm³])
 - △ C (33.87 – 55.22 [Mm³])
 - ◇ B (55.22 – 108.52 [Mm³])
 - × A (> 108.52 [Mm³])

Casas Grandes – Casas Grandes 2
Volumen Acumulado en Periodo Promedio [Mm³] – Demanda Normal



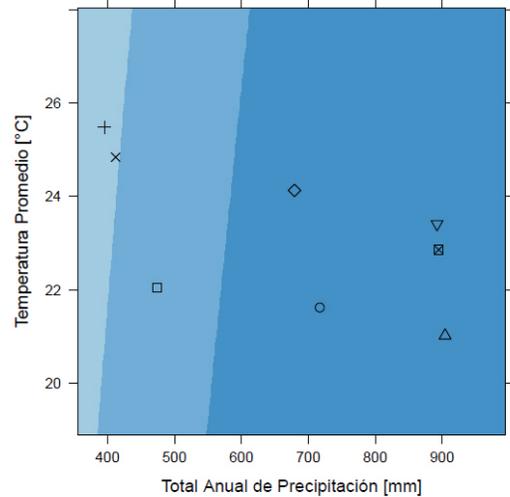
- Percentil 5 – 1980-2010 – 0 [Mm³]
 - Percentil 50 – 1980-2010 – 0.06 [Mm³]
 - Percentil 95 1980-2010 – 4.68 [Mm³]
 - Proyección 2030-2060 CC5% P5% – 0 [Mm³]
 - Proyección 2030-2060 CC50% P5% – 0 [Mm³]
 - Proyección 2030-2060 CC50% P50% – 0 [Mm³]
 - Proyección 2030-2060 CC50% P95% – 0 [Mm³]
 - Proyección 2030-2060 CC95% P95% – 0.09 [Mm³]
- D (0 – 0.1 [Mm³])
 - C (0.1 – 0.19 [Mm³])
 - △ B (0.19 – 1.12 [Mm³])
 - ◇ A (> 1.12 [Mm³])

Casas Grandes – Casas Grandes 2
Volumen Acumulado en Periodo Promedio [Mm³] – Demanda Cero



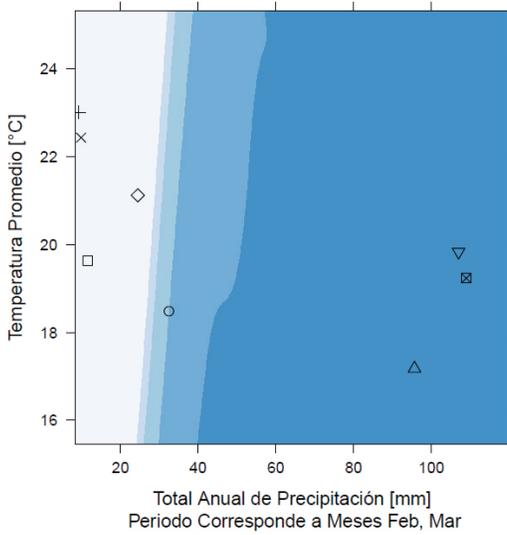
- Percentil 5 – 1980-2010 – 0.45 [Mm³]
 - Percentil 50 – 1980-2010 – 3.7 [Mm³]
 - Percentil 95 1980-2010 – 13.31 [Mm³]
 - Proyección 2030-2060 CC5% P5% – 0.16 [Mm³]
 - Proyección 2030-2060 CC50% P5% – 0.22 [Mm³]
 - Proyección 2030-2060 CC50% P50% – 0.62 [Mm³]
 - Proyección 2030-2060 CC50% P95% – 3.05 [Mm³]
 - Proyección 2030-2060 CC95% P95% – 3.87 [Mm³]
- D (0 – 0.1 [Mm³])
 - C (0.1 – 0.19 [Mm³])
 - △ B (0.19 – 1.12 [Mm³])
 - ◇ A (> 1.12 [Mm³])

SOTO LA MARINA – Río Corona
Volumen Acumulado Anual Promedio [Mm³]



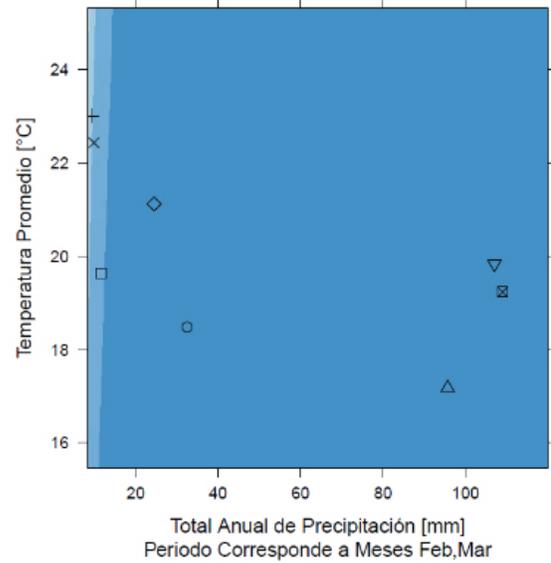
- Percentil 5 – 1980-2010 – 74.16 [Mm³]
 - Percentil 50 – 1980-2010 – 165.9 [Mm³]
 - Percentil 95 1980-2010 – 264.88 [Mm³]
 - Proyección 2030-2060 CC5% P5% – 48.19 [Mm³]
 - Proyección 2030-2060 CC50% P5% – 52.96 [Mm³]
 - Proyección 2030-2060 CC50% P50% – 141.28 [Mm³]
 - Proyección 2030-2060 CC50% P95% – 245.69 [Mm³]
 - Proyección 2030-2060 CC95% P95% – 249.97 [Mm³]
- < 22.73 [Mm³]
 - D (22.73 – 33.28 [Mm³])
 - △ C (33.28 – 54.55 [Mm³])
 - ◇ B (54.55 – 105.65 [Mm³])
 - × A (> 105.65 [Mm³])

Soto La Marina – Río Corona
Volumen Acumulado Anual Promedio [Mm³] – Demanda Normal



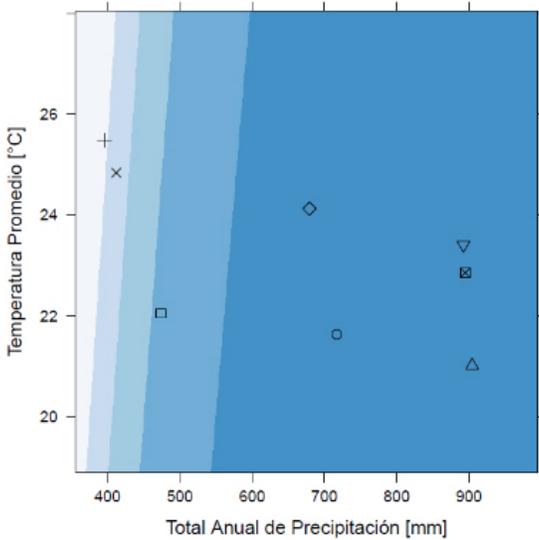
- | | | |
|---|---|------------------------------------|
| Percentil 5 – 1980–2010 – 0.23 [Mm] ³ | □ | < 0.78 [Mm] ³ |
| Percentil 50 – 1980–2010 – 1.14 [Mm] ³ | ○ | D (0.78 – 0.89 [Mm] ³) |
| Percentil 95 1980–2010 – 36.91 [Mm] ³ | △ | C (0.89 – 1.15 [Mm] ³) |
| Proyección 2030–2060 CC5% P5% – 0.18 [Mm] ³ | + | B (1.15 – 2.02 [Mm] ³) |
| Proyección 2030–2060 CC50% P5% – 0.19 [Mm] ³ | × | A (> 2.02 [Mm] ³) |
| Proyección 2030–2060 CC50% P50% – 0.56 [Mm] ³ | ◇ | |
| Proyección 2030–2060 CC50% P95% – 44.62 [Mm] ³ | ▽ | |
| Proyección 2030–2060 CC95% P95% – 46.87 [Mm] ³ | ⊠ | |

Soto La Marina – Río Corona
Volumen Acumulado Anual Promedio [Mm³] – Demanda Cero



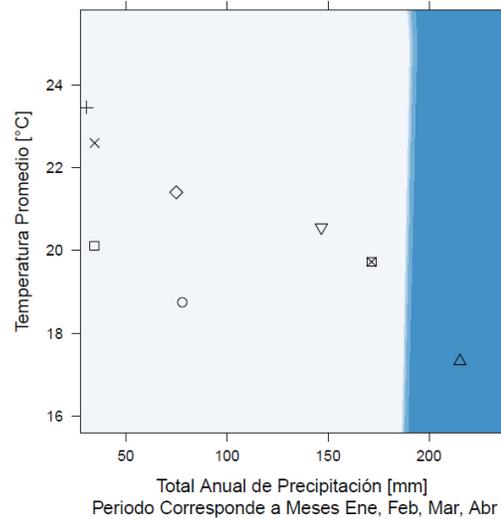
- | | | |
|---|---|------------------------------------|
| Percentil 5 – 1980–2010 – 1.8 [Mm] ³ | □ | < 0.78 [Mm] ³ |
| Percentil 50 – 1980–2010 – 9.44 [Mm] ³ | ○ | D (0.78 – 0.89 [Mm] ³) |
| Percentil 95 1980–2010 – 47.84 [Mm] ³ | △ | C (0.89 – 1.15 [Mm] ³) |
| Proyección 2030–2060 CC5% P5% – 1.08 [Mm] ³ | + | B (1.15 – 2.02 [Mm] ³) |
| Proyección 2030–2060 CC50% P5% – 1.22 [Mm] ³ | × | A (> 2.02 [Mm] ³) |
| Proyección 2030–2060 CC50% P50% – 5.52 [Mm] ³ | ◇ | |
| Proyección 2030–2060 CC50% P95% – 53.21 [Mm] ³ | ▽ | |
| | ⊠ | |

SOTO LA MARINA – Río Purification 2
Volumen Acumulado Anual Promedio [Mm³]



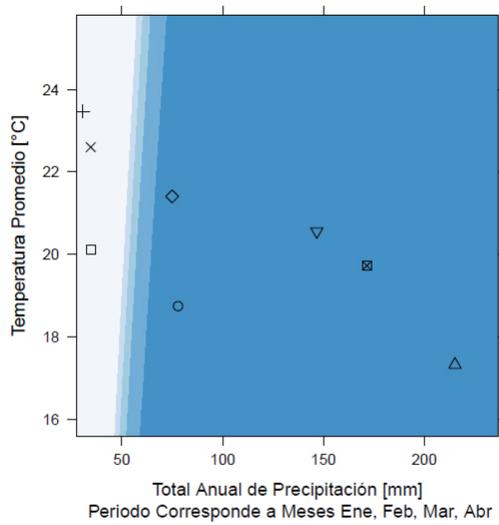
- | | | |
|--|---|--|
| Percentil 5 – 1980–2010 – 186.85 [Mm] ³ | □ | < 112.40 [Mm] ³ |
| Percentil 50 – 1980–2010 – 478.3 [Mm] ³ | ○ | D (112.40 – 136.98 [Mm] ³) |
| Percentil 95 1980–2010 – 791.35 [Mm] ³ | △ | C (136.98 – 175.21 [Mm] ³) |
| Proyección 2030–2060 CC5% P5% – 108.76 [Mm] ³ | + | B (175.21 – 276.88 [Mm] ³) |
| Proyección 2030–2060 CC50% P5% – 122.89 [Mm] ³ | × | A (> 276.88 [Mm] ³) |
| Proyección 2030–2060 CC50% P50% – 403.64 [Mm] ³ | ◇ | |
| Proyección 2030–2060 CC50% P95% – 736.82 [Mm] ³ | ▽ | |
| Proyección 2030–2060 CC95% P95% – 748.97 [Mm] ³ | ⊠ | |

Soto La Marina – Río Purification 2
Volumen Acumulado Anual Promedio [Mm³] – Demanda Normal



- | | | |
|--|---|--------------------------------------|
| Percentil 5 – 1980–2010 – -0.01 [Mm] ³ | □ | < 32.8 [Mm] ³ |
| Percentil 50 – 1980–2010 – 0.33 [Mm] ³ | ○ | D (32.8 – 34.54 [Mm] ³) |
| Percentil 95 1980–2010 – 108.94 [Mm] ³ | △ | C (34.54 – 36.89 [Mm] ³) |
| Proyección 2030–2060 CC5% P5% – -0.01 [Mm] ³ | + | B (36.89 – 42.05 [Mm] ³) |
| Proyección 2030–2060 CC50% P5% – -0.21 [Mm] ³ | × | A (> 42.05 [Mm] ³) |
| Proyección 2030–2060 CC50% P50% – 0.21 [Mm] ³ | ◇ | |
| Proyección 2030–2060 CC50% P95% – 1.19 [Mm] ³ | ▽ | |
| Proyección 2030–2060 CC95% P95% – 5.38 [Mm] ³ | ⊠ | |

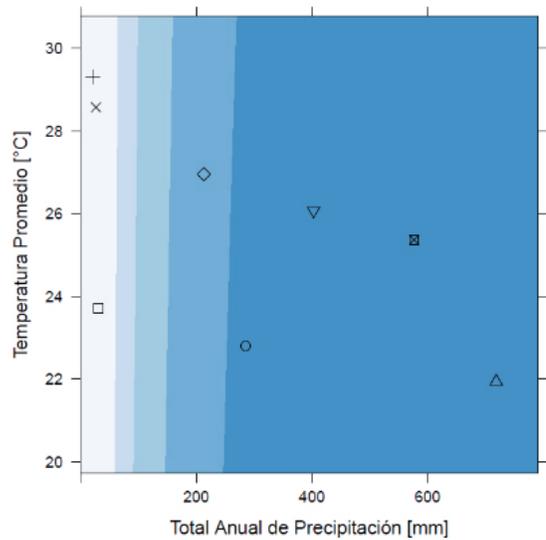
Soto La Marina – Río Purification 2
Volumen Acumulado Anual Promedio [Mm³] – Demanda Cero



Percentil 5 – 1980–2010 – 23.31 [Mm]³
 Percentil 50 – 1980–2010 – 53.53 [Mm]³
 Percentil 95 1980–2010 – 220.93 [Mm]³
 Proyección 2030–2060 CC5% P5% – 20.31 [Mm]³
 Proyección 2030–2060 CC50% P50% – 48.16 [Mm]³
 Proyección 2030–2060 CC50% P95% – 118.45 [Mm]³
 Proyección 2030–2060 CC95% P95% – 151.1 [Mm]³

□ < 32.8 [Mm]³
 ○ D (32.8 – 34.54 [Mm]³)
 △ C (34.54 – 36.89 [Mm]³)
 + B (36.89 – 42.05 [Mm]³)
 × A (> 42.05 [Mm]³)

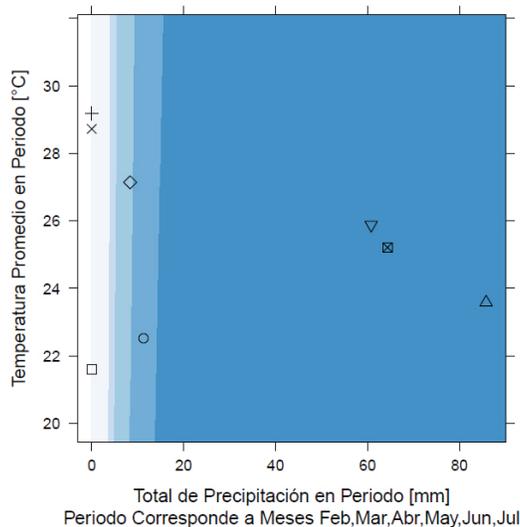
San Lucas
Volumen Acumulado Anual Promedio [Mm³]



Percentil 5 – 1980–2010 – 0.24 [Mm]³
 Percentil 50 – 1980–2010 – 3.44 [Mm]³
 Percentil 95 1980–2010 – 15.3 [Mm]³
 Proyección 2030–2060 CC5% P5% – 0.16 [Mm]³
 Proyección 2030–2060 CC50% P50% – 0.2 [Mm]³
 Proyección 2030–2060 CC50% P95% – 2.17 [Mm]³
 Proyección 2030–2060 CC95% P95% – 5.53 [Mm]³

□ < 0.48 [Mm]³
 ○ D (0.48 – 0.79 [Mm]³)
 △ C (0.79 – 1.42 [Mm]³)
 + B (1.42 – 2.9 [Mm]³)
 × A (> 2.9 [Mm]³)

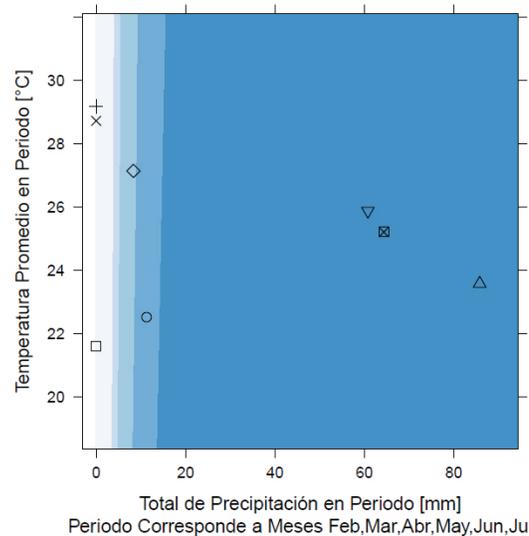
San Lucas
Volumen Acumulado en Periodo Promedio [Mm³] – Demanda Normal



Percentil 5 – 1980–2010 – 0 [Mm]³
 Percentil 50 – 1980–2010 – 0.09 [Mm]³
 Percentil 95 1980–2010 – 1.79 [Mm]³
 Proyección 2030–2060 CC5% P5% – 0 [Mm]³
 Proyección 2030–2060 CC50% P50% – 0.05 [Mm]³
 Proyección 2030–2060 CC50% P95% – 0.97 [Mm]³
 Proyección 2030–2060 CC95% P95% – 1.07 [Mm]³

□ < 0.02 [Mm]³
 ○ D (0.02 – 0.03 [Mm]³)
 △ C (0.03 – 0.06 [Mm]³)
 + B (0.06 – 1.2 [Mm]³)
 × A (> 1.2 [Mm]³)

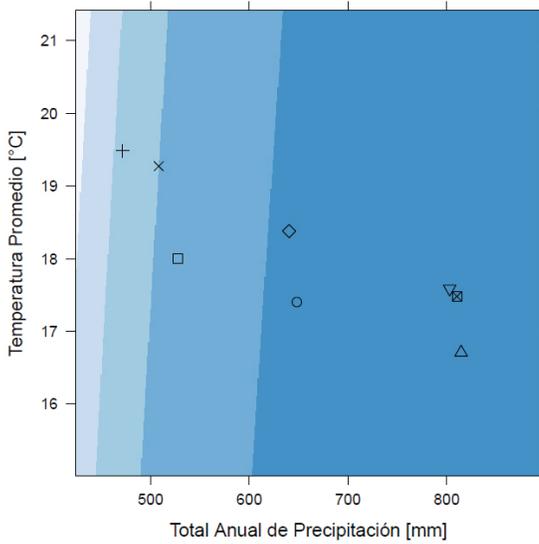
San Lucas
Volumen Acumulado en Periodo Promedio [Mm³] – Demanda Cero



Percentil 5 – 1980–2010 – 0 [Mm]³
 Percentil 50 – 1980–2010 – 0.09 [Mm]³
 Percentil 95 1980–2010 – 1.8 [Mm]³
 Proyección 2030–2060 CC5% P5% – 0 [Mm]³
 Proyección 2030–2060 CC50% P50% – 0 [Mm]³
 Proyección 2030–2060 CC50% P95% – 0.05 [Mm]³
 Proyección 2030–2060 CC95% P95% – 1.07 [Mm]³

□ < 0.02 [Mm]³
 ○ D (0.02 – 0.03 [Mm]³)
 △ C (0.03 – 0.06 [Mm]³)
 + B (0.06 – 1.2 [Mm]³)
 × A (> 1.2 [Mm]³)

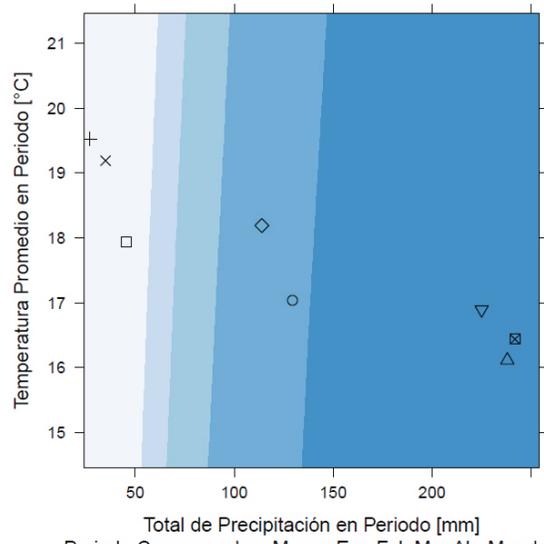
San Pedro Mezquital – San Pedro Mezquital Desembocadura
Volumen Acumulado Anual Promedio [Mm³]



Percentil 5 - 1980-2010 - 1567 [Mm]³ □
 Percentil 50 - 1980-2010 - 2529 [Mm]³ ○
 Percentil 95 1980-2010 - 4198 [Mm]³ △
 Proyección 2030-2060 CC5% P5% - 1168 [Mm]³ +
 Proyección 2030-2060 CC50% P50% - 1401 [Mm]³ ×
 Proyección 2030-2060 CC50% P50% - 2421 [Mm]³ ◇
 Proyección 2030-2060 CC50% P95% - 4018 [Mm]³ ▽
 Proyección 2030-2060 CC95% P95% - 4103 [Mm]³ ⊠

< 946.41 [Mm]³ □
 D (946.41 - 1,120.11 [Mm]³) ○
 C (1,120.11 - 1,404.78 [Mm]³) △
 B (1,404.78 - 2,246.83 [Mm]³) +
 A (> 2,246.83 [Mm]³) ×

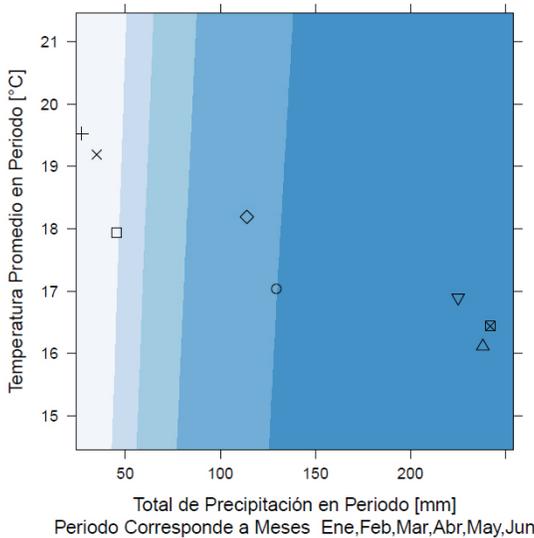
San Pedro Mezquital – San Pedro Mezquital Desembocadura
Volumen Acumulado en Periodo Promedio [Mm³] – Demanda Normal



Percentil 5 - 1980-2010 - 25.46 [Mm]³ □
 Percentil 50 - 1980-2010 - 229.51 [Mm]³ ○
 Percentil 95 1980-2010 - 822.49 [Mm]³ △
 Proyección 2030-2060 CC5% P5% - 9.03 [Mm]³ +
 Proyección 2030-2060 CC50% P5% - 14.16 [Mm]³ ×
 Proyección 2030-2060 CC50% P50% - 170.47 [Mm]³ ◇
 Proyección 2030-2060 CC50% P95% - 721.78 [Mm]³ ▽
 Proyección 2030-2060 CC95% P95% - 845.28 [Mm]³ ⊠

< 41.53 [Mm]³ □
 D (41.53 - 64.62 [Mm]³) ○
 C (64.62 - 111.59 [Mm]³) △
 B (111.597 - 264.38 [Mm]³) +
 A (> 264.38 [Mm]³) ×

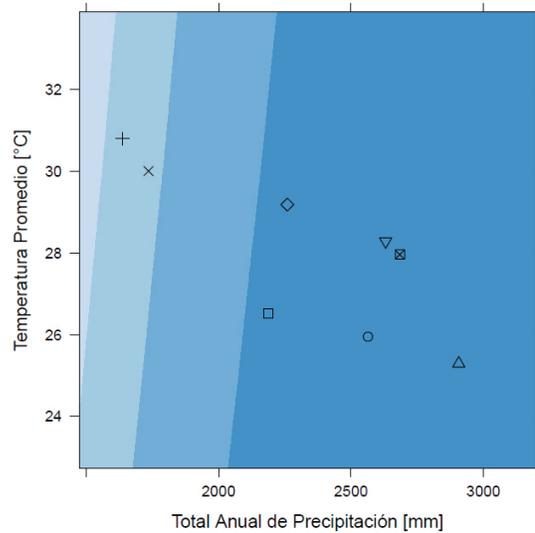
San Pedro Mezquital – San Pedro Mezquital Desembocadura
Volumen Acumulado en Periodo Promedio [Mm³] – Demanda Cero



Percentil 5 - 1980-2010 - 39.4 [Mm]³ □
 Percentil 50 - 1980-2010 - 261.68 [Mm]³ ○
 Percentil 95 1980-2010 - 872.61 [Mm]³ △
 Proyección 2030-2060 CC50% P5% - 14.96 [Mm]³ +
 Proyección 2030-2060 CC50% P50% - 23.73 [Mm]³ ×
 Proyección 2030-2060 CC50% P50% - 199.66 [Mm]³ ◇
 Proyección 2030-2060 CC50% P95% - 769.34 [Mm]³ ▽
 Proyección 2030-2060 CC95% P95% - 895.91 [Mm]³ ⊠

< 41.53 [Mm]³ □
 D (41.53 - 64.62 [Mm]³) ○
 C (64.62 - 111.59 [Mm]³) △
 B (111.597 - 264.38 [Mm]³) +
 A (> 264.38 [Mm]³) ×

Alto Río Coatzacoalcos
Volumen Acumulado Anual Promedio [Mm³]

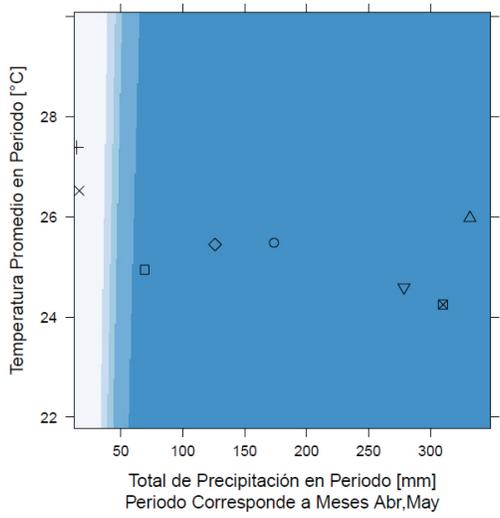


Percentil 5 - 1980-2010 - 10810 [Mm]³ □
 Percentil 50 - 1980-2010 - 13313 [Mm]³ ○
 Percentil 95 1980-2010 - 15672 [Mm]³ △
 Proyección 2030-2060 CC5% P5% - 7034 [Mm]³ +
 Proyección 2030-2060 CC50% P5% - 7681 [Mm]³ ×
 Proyección 2030-2060 CC50% P50% - 10974 [Mm]³ ◇
 Proyección 2030-2060 CC50% P95% - 13474 [Mm]³ ▽
 Proyección 2030-2060 CC95% P95% - 13864 [Mm]³ ⊠

< 5527.1 [Mm]³ □
 D (5527.1 - 6651.61 [Mm]³) ○
 C (6651.61 - 8009.23 [Mm]³) △
 B (8009.23 - 10262.02 [Mm]³) +
 A (> 10262.02 [Mm]³) ×

Coatzacoalcos

Volumen Acumulado en Periodo Promedio [Mm³] – Demanda Normal



Percentil 5 - 1980-2010 - 394.79 [Mm]³	□	< 200.05 [Mm]³
Percentil 50 - 1980-2010 - 927.1 [Mm]³	○	D (200.05 - 234.28 [Mm]³)
Percentil 95 1980-2010 - 1749.88 [Mm]³	△	C (234.28 - 263.46 [Mm]³)
Proyección 2030-2060 CC5% P5% - 61.78 [Mm]³	+	B (263.46 - 339.85 [Mm]³)
Proyección 2030-2060 CC50% P5% - 77.06 [Mm]³	×	A (> 339.85 [Mm]³)
Proyección 2030-2060 CC50% P50% - 693.29 [Mm]³	◇	
Proyección 2030-2060 CC50% P95% - 1478.11 [Mm]³	▽	
Proyección 2030-2060 CC95% P95% - 1656.23 [Mm]³	⊠	

CAMBIO CLIMÁTICO, CAUDAL ECOLÓGICO Y SEGURIDAD HÍDRICA

ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD PARA SIETE CUENCAS DE MÉXICO



Por qué estamos aquí

Para detener la degradación del ambiente natural del planeta y construir un futuro en el cual los humanos convivan en armonía con la naturaleza.

www.wwf.org.mx

© 1986 Logotipo del Panda de WWF

® "WWF" es una Marca Registrada de WWF.

WWF México, Ave. México #51, Col. Hipódromo, México, D.F., C.P. 06100— Tel. (55) 5286-5631.

Para más información visite www.wwf.org.mx