

AGUAY CAMBIO CLIMÁTICO

René Lobato Sánchez
Abril Ariana Pérez
Coordinadores

AGUA Y CAMBIO CLIMÁTICO

René Lobato Sánchez
Abril Ariana Pérez Canales
Coordinadores

Noviembre 2018

577.22 Lobato Sánchez, René (coord.)
L22 *Agua y cambio climático* / René Lobato Sánchez, Abril Ariana Pérez Canales,
coordinadores. -- Jiutepec, Mor. : Instituto Mexicano de Tecnología del Agua,
2018.

184 p.

ISBN 978-607-8629-10-7 (Obra impresa)

ISBN 978-607-8629-09-1 (Obra digital)

1. Cambio climático 2. Recursos hídricos 3. Riesgos ambientales

COORDINADORES

René Lobato Sánchez
Abril Ariana Pérez Canales

EDICIÓN, DISEÑO EDITORIAL Y PORTADA

Gema Alín Martínez Ocampo

Primera edición: 2018

Instituto Mexicano de Tecnología
del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532
62550 Progreso, Jiutepec, Morelos
México
www.imta.gob.mx

ISBN 978-607-8629-10-7 (Obra impresa)

ISBN 978-607-8629-09-1 (Obra digital)

COMITÉ EDITORIAL

Juan Manuel Ángeles
Jorge Enrique Brena Zepeda
César Guillermo Calderón Mólgora
Jorge Castillo González
Eduardo Alexis Cervantes Carretero
Maricarmen Espinosa Bouchot
Omar Fonseca Moreno
Juan Gabriel García Maldonado
Cipriana Hernández Arce
René Lobato Sánchez
Martín José Montero Martínez
David Ortega-Gaucin
Amelia Reyes Martínez
Ramiro Vega Nevarez

AUTORES

Juan Manuel Angeles Hernández
Alfonso G. Banderas Tarabay
Luis Alberto Bravo Inclán
César G. Calderón Mólgora
Heidy Viviana Castellano Bahena
Jesús de la Cruz Bartolón
Roberto Galván Benítez
Rebeca González Villela
Norma Hernández Cruz
Mario López Pérez
Gabriela Mantilla Morales
Marco Mijangos Carro
Mario Alberto Montiel Gutiérrez
David Ortega-Gaucin
Ana A. Palacios Fonseca
M. Esperanza Ramírez Camperos
Cecilia Sandoval Ayala
Luciano Sandoval Yoval
Denise Soares
José Javier Sánchez Chávez
A. Cecilia Tomasini Ortiz
Ramiro Vega Nevárez

Las opiniones, datos y citas presentados en esta obra son responsabilidad exclusiva de los autores y no reflejan, necesariamente, los puntos de vista de la institución que edita esta publicación.

Prohibida su reproducción parcial o total, por cualquier medio, mecánico, electrónico, de fotocopias, térmico u otros, sin permiso de los editores.

Para citar el libro:

Lobato, R., et al. (2018). *Agua y cambio climático* (Coord.). México. Editorial IMTA.

Hecho en México

Contenido

1.	Estimación inicial de gases de efecto invernadero por la descarga de aguas residuales municipales en la cuenca del río Apatlaco, Morelos, México	6
	<i>Gabriela Mantilla Morales, Norma Hernández Cruz, Luciano Sandoval Yoval, M. Esperanza Ramírez Camperos, A. Cecilia Tomasini Ortiz, Juan L. García Rojas, César G. Calderón Mólgora</i>	
	RESUMEN	7
	1.1. Introducción	7
	1.2. Objetivo	10
	1.3. Metodología	10
	1.4. Resultados y discusión	13
	1.5. Conclusiones	17
	1.6. Agradecimientos	18
	1.7. Referencias	18
2.	Cambio climático en Ixil, Yucatán. Un acercamiento desde las percepciones sociales	20
	<i>Denise Soares y Cecilia Sandoval Ayala</i>	
	RESUMEN	21
	2.1. Introducción	22
	2.2. Marco conceptual	23
	2.3. Marco Metodológico	24
	2.4. Contexto	25
	2.5. Percepciones sociales sobre el cambio climático y vulnerabilidad social	27
	2.6. Conclusiones	37
	2.7. Referencias	38
3.	Marco normativo e institucional de los compromisos de México ante el cambio climático 2020 – 2030	42
	<i>Roberto Galván Benítez; Mario López Pérez</i>	
	RESUMEN	43
	3.1. Introducción	43
	3.2. Metodología utilizada	44
	3.3. Área de estudio	44
	3.4. Plan Nacional de Desarrollo 2013 – 2018	52
	3.5. Los Compromisos de México ante el Cambio Climático para el periodo 2020 – 2030.	58
	3.6. Los compromisos en materia de mitigación:	59
	3.7. Los compromisos en materia de adaptación, son los siguientes:	59
	3.8. Decreto Promulgatorio del Acuerdo de París	60
	3.9. Resultados	61
	3.10. Comentarios finales.	62
	3.11. Referencias	63

4.	La Hidroenergía en México como medida de adaptación y mitigación ante el Cambio Climático	64
	<i>Ana A. Palacios Fonseca, Mario López Pérez</i>	
	RESUMEN	65
4.1.	Introducción	65
4.2.	Antecedentes	66
4.3.	La hidroenergía en México como medida de adaptación y mitigación ante el cambio climático	68
4.4.	Retos y oportunidades de la hidroenergía en México	70
4.5.	Líneas de investigación y sus esquemas de aprovechamiento	71
4.6.	Conclusiones y recomendaciones	77
5.	Peligro, vulnerabilidad y riesgo por sequía en el contexto del cambio climático en México	78
	<i>David Ortega-Gaucin, Jesús de la Cruz Bartolón y Heidy Viviana Castellano Bahena</i>	
	RESUMEN	79
5.1.	Introducción	80
5.2.	Los conceptos de peligro, vulnerabilidad y riesgo	82
5.3.	Metodología	83
5.4.	Resultados y discusión	93
5.5.	Conclusiones	100
5.6.	Referencias	101
6.	Metodología para determinar la frecuencia, ocurrencia, duración, intensidad y severidad de la sequía intraestival (canícula), con fines de manejo agronómico y adaptación al cambio climático de los cultivos de temporal	104
	<i>Ramiro Vega Nevárez</i>	
	RESUMEN	105
6.1.	Introducción	106
6.2.	Metodología:	113
6.3.	Resultados y Discusión:	124
6.4.	Conclusiones y Recomendaciones	132
6.5.	Recomendaciones	135
6.6.	Referencias	135
7.	La tecnificación del riego como medida de adaptación al cambio climático en el distrito de riego 034 estado de Zacatecas	138
	<i>Juan Manuel Angeles Hernández, Mario Alberto Montiel Gutiérrez</i>	
	RESUMEN	139
7.1.	Introducción	139
7.2.	Vulnerabilidad al cambio climático en la agricultura	141
7.3.	Clima y amenazas de cambio climático para el distrito de riego 034 estado de Zacatecas.	142
7.4.	Identificación de impactos en la agricultura del distrito de riego 034 estado de Zacatecas.	145
7.5.	Capacidad de adaptación al cambio climático	148
7.6.	Tecnificación del riego como medida de adaptación	148
7.7.	Conclusiones	153
7.8.	Referencias	153

8. Efectos del Cambio Climático en la Calidad del Agua del Lago El Sol y Lago de Pátzcuaro	156
<i>Rebeca González Villela, Alfonso G. Banderas Tarabay, José Javier Sánchez Chávez, Luis Alberto Bravo Inclán, Marco Mijangos Carro</i>	
RESUMEN	157
8.1. Introducción	157
8.2. Área de Estudio	158
8.3. Métodos	159
8.4. Resultados	160
8.5. Morfología	167
8.6. Calidad del Agua.	167
8.7. Discusión.	169
8.8. Conclusiones	172
8.9. Referencias	172
Contenido de figuras	177
Contenido de tablas	179

1

ESTIMACIÓN INICIAL DE GASES DE EFECTO INVERNADERO POR LA DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES EN LA CUENCA DEL RÍO APATLACO, MORELOS, MÉXICO

Gabriela Mantilla Morales, Norma Hernández Cruz, Luciano Sandoval Yoval, M. Esperanza Ramírez Camperos, A. Cecilia Tomasini Ortiz, Juan L. García Rojas, César G. Calderón Mólgora
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532. Progreso. Jiutepec, Morelos. México. C.P. 62550. E-mail: mantilla@tlaloc.imta.mx





RESUMEN

El objetivo de este estudio es realizar una estimación preliminar de los gases de efecto invernadero (GEI) generados por los habitantes de las cabeceras municipales que conforman la cuenca del río Apatlaco, en el Estado de Morelos para el periodo 2015 - 2017 para establecer una línea base. Los diez municipios que conforman la cuenca del río Apatlaco son: Huitzilac, Cuernavaca, Jiutepec, Temixco, Emiliano Zapata, Xochitepec, Jojutla, Tlaltizapán, Puente de Ixtla y Zacatepec.

En este análisis, que conforma la línea base, se considera que el agua residual municipal generada se descarga sin tratamiento a los cuerpos receptores. Las estimaciones se realizaron conforme a los lineamientos del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés).

El factor de calentamiento para el metano (CH_4) es 28 veces mayor que el del bióxido de carbono (CO_2), mientras que el del óxido nitroso (N_2O) es de 265 (IPCC, 2013).

Las emisiones de gases de efecto invernadero, específicamente relacionadas a la producción de metano y óxido nitroso, generadas por descargas de aguas residuales de las diez cabeceras municipales durante el periodo de estudio corresponden a 29,052; 29,335 y 29,450 toneladas de CO_2 equivalente.

Solamente, en una de las cabeceras municipales, Jiutepec, tiene un aporte industrial importante en la composición de sus aguas residuales.

Palabras clave: gases de efecto invernadero, agua residual municipal, inventario.

1.1. Introducción

De acuerdo con las Directrices del Panel Internacional de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), las aguas residuales municipales, debido a su contenido de materia orgánica, son fuentes generadoras de gases de efecto invernadero (GEI). De esta manera, pueden ser una fuente de metano (CH_4) cuando se las trata o elimina en medio anaeróbico; y de emisiones de óxido nitroso (N_2O). En este mismo contexto, las emisiones de bióxido de carbono (CO_2), a pesar de ser también un GEI, no se consideran en la estimación de emisiones ya que son de origen biogé-

nico. En este trabajo se presenta la estimación de las emisiones que se generarían de manera directa por la población en las cabeceras de los diez municipios que conforman la cuenca del río Apatlaco, en el Estado de Morelos, México, bajo la premisa inicial de que se descargan de forma directa a los cuerpos receptores.

La cuenca del río Apatlaco se ubica al noroeste del estado de Morelos (Figura 1.1); cubre un área de 746 km^2 , de los cuales 656.494 km^2 se encuentran en el territorio morelense, y el resto en el Estado de México y en la Ciudad de México. Se localiza entre las coordenadas



- Se vierten sin tratamiento directamente en los cuerpos receptores (Figura 1.2)
- Se disponen en fosas sépticas y luego son descargadas a cuerpos receptores o infiltradas al subsuelo mediante pozos de absorción.

Esto tiene como origen la falta de alcantarillado en algunas zonas de las diferentes cabeceras municipales y el déficit de plantas de tratamiento. En ocasiones si existen las plantas de tratamiento, pero están subutilizadas ya que faltan colectores que conduzcan el agua residual a las mismas.

En este trabajo se determinan las emisiones generadas por la población de las cabeceras municipales (Figura 1.3) que conforman la

cuenca del río Apatlaco: Huitzilac, Cuernavaca, Jiutepec, Temixco, Emiliano Zapata, Xochitepec, Jojutla, Tlaltizapán, Puente de Ixtla y Zacatepec; y se considera que todas ellas descargan sin tratamiento a un cuerpo receptor para establecer la línea base.

En el Estado de Morelos se plantea el desarrollo de una serie de proyectos que implican el mejoramiento de las condiciones de saneamiento de las cabeceras municipales, por lo que es de suma importancia contar con una línea base de cálculo que permita determinar cuál será el beneficio, en términos de disminución de gases de efecto invernadero (GEI), con la construcción y puesta en marcha de las obras propuestas. La aplicación de las metodologías del IPCC proporciona congruencia



Figura 1.2. Descarga de aguas residuales a barranca en la cuenca del río Apatlaco.



Figura 1.3. Cabeceras de los municipios que conforman la Cuenca del río Apatlaco

y complementariedad de este estudio con los generados para el Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático de Morelos (PEACCMOR), y sirve de referencia a las autoridades estatales involucradas en este tema para revisar los avances en esta materia, sobre todo con los nuevos proyectos de recolección y tratamiento de las aguas residuales en el Estado de Morelos.

1.2. Objetivo

Estimar las emisiones de gases de efecto invernadero producto de las descargas de aguas residuales generadas por la población

de las diez cabeceras municipales que conforman la cuenca del río Apatlaco en el Estado de Morelos, y considerando que son vertidas a los cuerpos receptores sin ningún tipo de tratamiento, para establecer una línea base.

1.3. Metodología

Las emisiones dependen de la cantidad de desechos orgánicos generados por la población, y de un factor de emisión que caracteriza la proporción en la que estos desechos generan metano, por lo que es necesario considerar que las aguas residuales generan metano a partir de la degradación anaeró-



bica de la materia orgánica que contienen. La cantidad de metano que puede ser producido depende principalmente de la cantidad de materia orgánica degradable contenida en las aguas residuales, del tipo de cuerpo receptor a la cual se vierte, de la temperatura y en algunos casos, del tipo de sistema de tratamiento aplicado.

El factor de producción de metano aumenta con la temperatura, y esto es particularmente importante en los climas cálidos. Por debajo de 15°C, la producción significativa de metano es improbable, porque los organismos metanogénicos no están activos. Sin embargo, cuando la temperatura sobrepasa los 15°C, es probable que la producción de metano se reinicie. Esta situación es la que se presenta normalmente en el Estado de Morelos: temperaturas superiores a los 15°C durante todo el año, por lo que es muy probable que todo sistema de disposición o de tratamiento de aguas residuales que esté en condiciones anaerobias genere metano por la descomposición de la materia orgánica.

El factor principal para determinar el potencial de generación de metano a partir de las aguas residuales es la cantidad de materia orgánica biodegradable contenida en las aguas, en este caso, la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO). En las mismas condiciones, las aguas residuales con mayor concentración de DBO producen mayor cantidad de metano que las de menor concentración. La concentración de la DBO sólo indica la cantidad de carbono

biodegradable en condiciones aeróbicas. La medición estándar para la DBO es una prueba de cinco días, conocida como DBO₅. De acuerdo con las Directrices del IPCC, se puede utilizar un valor de DBO por defecto para algunos países y regiones del mundo. Se recomienda su utilización cuando no se disponen de datos específicos del país. Para el caso de México, se recomienda utilizar el valor promedio propuesto para América Latina, esto es, 40 g/persona/día. Con este valor se puede determinar el aporte de materia orgánica por persona en las aguas residuales domésticas.

Cabe recalcar que en este trabajo no se considerarán los diferentes tipos de descarga o tratamiento, sino la producción de gases de efecto invernadero cuando las aguas residuales se vierten sin tratamiento a los cuerpos receptores.

Para la determinación de la carga orgánica de las aguas residuales municipales, se utilizó la población de las cabeceras municipales con base en: "La situación demográfica de México 2015", "Proyecciones de la población de México 2010-2050" (CONAPO); Censo de Población y Vivienda 2010 (INEGI); Morelos: Proyecciones de población de localidades seleccionadas, 2010-2030 (Estimaciones del Consejo Nacional de Población. Dirección General de Estudios Sociodemográficos y Prospectiva) y los "Estimadores de las viviendas particulares habitadas y su distribución porcentual según disponibilidad de drenaje y lugar de desalojo por municipio".

1.3.1. Factor de emisión

Para determinar el factor de emisión de metano para cada vía de eliminación o tipo de tratamiento de las aguas residuales domésticas se utiliza la Ecuación 1.1:

$$EF_j = B_o \times FCM_j \quad \text{Ecuación 1.1}$$

Donde

- EF_j = factor de emisión, kg de CH_4 /kg de DBO
- j = cada vía o sistema de tratamiento y/o eliminación
- B_o = capacidad máxima de producción de CH_4 , kg de CH_4 /kg de DBO
- FCM_j = factor corrector para el metano

En este caso, el valor recomendado por las Directrices del IPCC es:

$$B_o = 0.6 \text{ kg de } CH_4/\text{kg de DBO}$$

1.3.2. Factor de corrección de metano

Para determinar el valor del factor de corrección de metano (FCM), las mismas Directrices indican que cuando se trata de eliminación en cuerpo receptor (río, lago y mar) y que no se cuenta con ningún tipo de tratamiento, el intervalo del valor del FCM es de 0 a 0.2, considerando que estos cuerpos receptores pueden generar zonas muertas. En el caso concreto de la cuenca del río Apatlaco, se utiliza un valor de $FCM = 0.1$, ya que los cuerpos receptores también presentan acumulación

de basura y, como consecuencia, se presentan muy frecuentemente zonas anaerobias.

1.3.3. Determinación de la carga orgánica

De esta manera, y considerando:

- Población (P) = corresponde a los habitantes de la cabecera municipal
- Valor de DBO_5 estimado para las aguas residuales domésticas = 40 gramos de DBO_5 /habitante/día
- Factor de Corrección para DBO (I) = 1.0; cuando no hay aporte industrial, se consideran aguas domésticas.
- Factor de Corrección para DBO (I) = 1.25; cuando hay aporte industrial a la red de alcantarillado

En este trabajo, solamente se considerará aporte industrial para el municipio de Jiutepec, que alberga en su seno la Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca (CIVAC), en cuyo caso la carga obtenida debe ser afectada por el $I = 1.25$.

- Capacidad máxima de producción de CH_4 (B_o) por defecto, para las aguas residuales domésticas = 0.6 kg de CH_4 /kg de DBO
- Conversión de gramos a kilogramos = 0.001

De esta manera, la materia orgánica biodegradable (MOD) o carga orgánica en las aguas



residuales domésticas y por habitante y sin aporte industrial, corresponde a:

$$MOD = 1 \times DBO \times (0.001) \times I \times 365$$

$$MOD = 14.6 \frac{kgDBO_5}{hab.año}$$

Ecuación 1.2

El poder calorífico del metano es 28 veces superior al del bióxido de carbono (CO₂), por lo que es necesario considerar este factor. De esta manera, las emisiones que se calculan como kilogramos de metano deben multiplicarse por este 28, para ser expresada en kilogramos de CO₂ equivalentes (CO₂e).

1.4. Resultados y discusión

Se realizó la estimación de acuerdo con los lineamientos de las Directrices del IPCC. En la Tabla 1.1 se presentan las proyecciones de

población para las cabeceras municipales para los años 2015, 2016 y 2017. En la Tabla 1.2 se presenta la carga orgánica diaria y anual asociada a la población de cada cabecera municipal para los años 2015, 2016 y 2017. La carga orgánica solamente está en función del número de habitantes. Se observa que en las cabeceras se generan anualmente más de doce mil toneladas de materia orgánica, producto del agua residual municipal.

Para este estudio, el factor de emisión es de 0.06, el cual es el producto del factor corrector de metano (*FCM*) por la capacidad máxima de producción de CH₄ (*Bo*). En la Tabla 1.3 se presentan las emisiones por la descomposición de la materia orgánica a gas metano para el periodo 2015 - 2017. Los principales aportadores, en este caso, son la localidad con la mayor población (Cuernavaca) y, dada su vocación industrial además de que también es un núcleo de población muy importante, Jiutepec.

Tabla 1.1. Proyecciones de la población para el periodo 2015 – 2017 en las cabeceras municipales.

Localidad	2015	2016	2017
Huitzilac	4,758	4,764	4,765
Cuernavaca	351,499	353,230	354,878
Jiutepec	172,144	173,553	174,917
Temixco	104,781	105,892	106,989
Emiliano Zapata	57,274	58,509	59,697
Xochitepec	21,305	21,594	21,865
Tlaltizapán	11,168	11,247	11,321
Puente de Ixtla	20,762	20,621	20,472
Zacatepec	21,619	21,581	21,540
Jojutla	18,030	17,800	17,564
TOTAL	783,340	788,791	794,008

Tabla 1.2. Carga orgánica diaria y anual generada en las cabeceras municipales de la cuenca del río Apatlaco.

Cabecera municipal	Carga orgánica, kg/día			Carga orgánica, ton/año		
	2015	2016	2017	2015	2016	2017
Huitzilac	190.32	190.56	190.60	69.47	69.74	69.57
Cuernavaca	14,059.96	14,129.20	14,195.12	5,131.89	5,171.29	5,181.22
Jiutepec	8,607.20	8,677.65	8,745.85	3,141.63	3,176.02	3,192.24
Temixco	4,191.24	4,235.68	4,279.56	1,529.80	1,550.26	1,562.04
E. Zapata	2,290.96	2,340.36	2,387.88	836.20	856.57	871.58
Xochitepec	852.20	863.76	874.60	311.05	316.14	319.23
Tlaltizapán	446.72	449.88	452.84	163.05	164.66	165.29
Puente de Ixtla	830.48	824.84	818.88	303.13	301.89	298.89
Zacatepec	864.76	863.24	861.60	315.64	315.95	314.48
Jojutla	721.20	712.00	702.56	263.24	260.59	256.43
TOTAL				12,065.09	12,183.10	12,230.96

Tabla 1.3. Emisiones de metano generada por las descargas de aguas residuales sin recolección ni tratamiento en las cabeceras municipales de la cuenca del río Apatlaco.

Cabecera municipal	Emisiones CH ₄ , ton/año		
	2015	2016	2017
Huitzilac	4.168	4.185	4.174
Cuernavaca	307.913	310.277	310.873
Jiutepec	188.498	190.561	191.534
Temixco	91.788	93.016	93.722
Emiliano Zapata	50.172	51.394	52.295
Xochitepec	18.663	18.968	19.154
Tlaltizapán	9.783	9.879	9.917
Puente de Ixtla	18.188	18.113	17.933
Zacatepec	18.938	18.957	18.869
Jojutla	15.794	15.636	15.386
TOTAL	723.91	730.99	733.86

Se debe tomar en cuenta que el poder calorífico del metano es 28 veces superior al del bióxido de carbono, por lo que es necesario considerar este factor en la estimación. Las emisiones, expresadas en toneladas de CO₂ equivalentes (CO₂e), se presentan en la Tabla 1.4.

Por otra parte, se consideran también las emisiones de óxido nitroso (N₂O), producto de la ingesta proteica de la población. Para determinación de las emisiones, se consideró un consumo anual de proteína de 92.2 g/hab/día, valor correspondiente al año 2015 (FAOSTAT, 2015).



Tabla 1.4. Emisiones de metano expresadas en CO₂e para las cabeceras municipales.

Cabecera municipal	Emisiones CO ₂ e de CH ₄ , ton/año		
	2015	2016	2017
Huitzilac	116.70	117.17	116.88
Cuernavaca	8,621.57	8,687.76	8,704.45
Jiutepec	5,277.94	5,335.71	5,362.96
Temixco	2,570.07	2,604.43	2,624.23
Emiliano Zapata	1,404.82	1,439.04	1,464.25
Xochitepec	522.57	531.11	536.30
Tlaltizapán	273.93	276.62	277.68
Puente de Ixtla	509.25	507.18	502.14
Zacatepec	530.27	530.79	528.33
Jojutla	442.24	437.79	430.81
TOTAL	20,269.35	20,467.62	20,548.02

El óxido nitroso está asociado con la degradación de los componentes nitrogenados en las aguas residuales, esto es, urea, nitrato y proteínas. De acuerdo con los lineamientos metodológicos del IPCC 2006 para el tratamiento y eliminación de aguas residuales, el factor de emisión por defecto para las emisiones de óxido nitroso en aguas residuales municipales domésticas con efluentes con nitrógeno es de 0.005 kg

N₂O-N/kg N, y el valor de la fracción de nitrógeno en proteína es de 0.16 kg N/kg de proteína. El óxido nitroso es importante en su participación como gas de efecto invernadero porque tiene un potencial de calentamiento de 285. En la Tabla 1.5 se presentan las emisiones de óxido nitroso generadas en las cabeceras municipales, mientras que en la Tabla 1.6 se presentan expresadas en toneladas de CO₂ equivalentes.

Tabla 1.5. Emisiones de óxido nitroso generadas por las cabeceras municipales

Cabecera municipal	Emisiones N ₂ O, ton/año		
	2015	2016	2017
Huitzilac	0.221	0.222	0.222
Cuernavaca	16.358	16.483	16.515
Jiutepec	8.011	8.099	8.140
Temixco	4.876	4.941	4.979
E. Zapata	2.665	2.730	2.778
Xochitepec	0.991	1.008	1.018
Tlaltizapán	0.520	0.525	0.527
Puente de Ixtla	0.966	0.962	0.953
Zacatepec	1.006	1.007	1.002
Jojutla	0.839	0.831	0.817
TOTAL	36.455	36.809	36.951

Tabla 1.6. Emisiones a partir del óxido nitroso, expresadas en CO₂e, para las cabeceras municipales.

Cabecera municipal	Emisiones CO ₂ e de N ₂ O, ton/año		
	2015	2016	2017
Huitzilac	58.68	58.91	58.76
Cuernavaca	4,334.82	4,368.10	4,376.49
Jiutepec	2,122.95	2,146.19	2,157.14
Temixco	1,292.20	1,309.48	1,319.43
E. Zapata	706.32	723.53	736.21
Xochitepec	262.74	267.04	269.65
Tlaltizapán	137.73	139.08	139.61
Puente de Ixtla	256.04	255.00	252.47
Zacatepec	266.61	266.87	265.64
Jojutla	222.35	220.12	216.61
TOTAL	9,660.45	9,754.32	9,792.01

En la Tabla 1.7 se presentan las emisiones totales, expresadas en CO₂e, de las descargas de aguas residuales generadas por los habitantes de las cabeceras municipales de la cuenca del río Apatlaco. Este valor teórico de

casi treinta mil toneladas anuales refleja la importancia de dar un tratamiento adecuado a las aguas residuales, ya que los factores de emisión varían de acuerdo con el tipo de disposición o tratamiento que se aplique.

Tabla 1.7. Emisiones totales expresadas en CO₂e, para las cabeceras municipales.

Cabecera municipal	Emisiones CO ₂ e totales, ton/año		
	2015	2016	2017
Huitzilac	175.38	176.08	175.64
Cuernavaca	12,956.39	13,055.86	13,080.94
Jiutepec	7,400.88	7,481.90	7,520.10
Temixco	3,862.27	3,913.91	3,943.66
E. Zapata	2,111.14	2,162.57	2,200.45
Xochitepec	785.31	798.14	805.95
Tlaltizapán	411.66	415.70	417.30
Puente de Ixtla	765.30	762.18	754.61
Zacatepec	796.88	797.66	793.97
Jojutla	664.59	657.91	647.42
TOTAL	29,929.80	30,221.94	30,340.03



En la Figura 1.4 se presentan las emisiones totales de cada una de las cabeceras municipales para cada uno de los años del periodo de estudio. Al considerar que las aguas residuales se descargan sin tratamiento, las emisiones están directamente relacionadas con el número de habitantes de cada localidad. Esta distribución de emisiones se modificará en cuanto se consideren los diferentes tipos de disposición y tratamiento de las descargas.

1.5. Conclusiones

En México, las emisiones generadas por los residuos representan el 4.6% del total nacional, y de ellas, las aguas residuales municipales conforman el 1%. Al analizar las emisiones teóricas provenientes de las aguas residuales municipales sin tratamiento que se generan de manera directa en las cabeceras municipales que conforman la Cuenca

del río Apatlaco, las descargas de las aguas residuales municipales pueden generar casi 30 mil toneladas al año de emisiones CO₂e, que sin tratamiento ni disposición adecuada se incrementan conforme el aumento de la población.

Las emisiones asociadas con la carga orgánica del agua residual, esto es, las emisiones de metano, varían significativamente conforme a la disposición de las aguas residuales debido a que el valor del factor de corrección de metano está directamente asociado con la vía, sistema de tratamiento y/o eliminación.

Al considerar una descarga directa sin tratamiento al cuerpo receptor es posible determinar como aumentan o disminuyen las emisiones de acuerdo con los proyectos de saneamiento que se realicen en la cuenca, considerando sistemas descentralizados básicos como las fosas sépticas, o incrementar

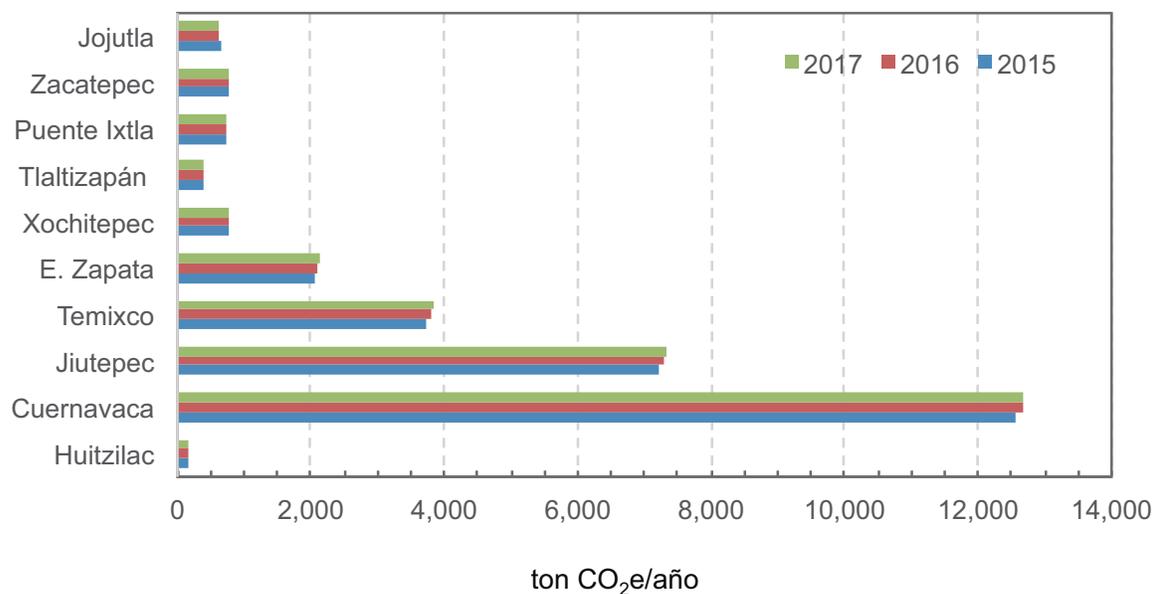


Figura 1.4. Emisiones totales anuales de las cabeceras municipales.

la cobertura de alcantarillado para que las descargas sean tratadas en una planta de tratamiento y no se generen emisiones directas.

Las emisiones del óxido nitroso están directamente asociadas con el número de habitantes y a la ingesta proteica de la población. En la zona de estudio no se cuentan con plantas de tratamiento centralizadas que puedan propiciar que las emisiones de este gas sean más significativas.

Los factores de emisión teóricos deben ser evaluados con medidas *in situ* que permitan tomar en cuenta las condiciones de cada sitio, pero en primera instancia permiten tener una visión general del problema generado por no contar con una disposición adecuada. Establecer la línea base resulta de gran importancia, ya que permite evaluar las estrategias de saneamiento de las localidades no solamente en función de la mejora de la calidad del agua de los cuerpos receptores, sino también para determinar en qué medida se coadyuva con la disminución de las emisiones de los gases de efecto invernadero.

1.6. Agradecimientos

Este trabajo se realizó gracias al apoyo de la Secretaría de Innovación, Ciencia y Tecnología del Estado de Morelos y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), a través del Fondo Mixto CONACYT - Gobierno del Estado de Morelos.

1.7. Referencias

- CONAPO (2010). Morelos: Proyecciones de población de localidades seleccionadas, 2010-2030. Estimaciones del Consejo Nacional de Población. Dirección General de Estudios Sociodemográficos y Prospectiva.
- Foley J., Yuan Z., Keller J., Senante E., Chandran K., Willis J., Shah A., Van Loosdrecht M., Voorthuizen E. (2015). N_2O and CH_4 Emission from Wastewater Collection and Treatment Systems: State of the Science Report and Technical Report. GWRC Report Series. IWA Publishing. London, UK. ISBN: 9781780407333.
- Gobierno del Estado de Morelos (2015). Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático de Morelos. Poder Ejecutivo del Estado de Morelos. Periódico Oficial 5268. Segunda Sección "Tierra y Libertad". México.
- INEGI (2016). Estimadores de las viviendas particulares habitadas y su distribución porcentual según disponibilidad de drenaje y lugar de desalojo por municipio. Tabulados básicos. México.
- Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC (2006). Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Volumen 5: Desechos. Capítulo 6: Tratamiento y eliminación de aguas residuales
- Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC (2013). Climate change 2013:



The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Stocker, T. F., D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P.M. Midgley (eds.). Cambridge University Press. Cambridge, UK.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y Secretaría de Medio

Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2015). Primer Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. INECC/Semarang, México.

Zhan X., Hu Z., Wu G. (2018) Greenhouse gas emission and mitigation in municipal wastewater treatment plants. IWA Publishing. London, UK. ISBN: 9781780406305.

2

CAMBIO CLIMÁTICO EN IXIL, YUCATÁN. UN ACERCAMIENTO DESDE LAS PERCEPCIONES SOCIALES

Denise Soares y Cecilia Sandoval Ayala

*Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532. Progreso. Jiutepec,
Morelos. México. C.P. 62550. E-mail: denisefsoares@yahoo.com.mx ;
ncecisandoval@hotmail.com*





RESUMEN

En esta contribución se busca compartir los hallazgos encontrados en el desarrollo de un estudio de caso sobre percepciones sociales y cambio climático entre los pobladores del municipio de Ixil, ubicado en el estado de Yucatán, en el cual se abordan las posiciones de los actores sociales locales acerca de: a) el concepto y las características del cambio climático, b) los impactos del cambio climático a nivel local, y c) la percepción sobre la gestión de las autoridades municipales para hacer frente al cambio climático. Con el presente estudio de caso, se pretende documentar las brechas entre el sentir de las poblaciones locales y el discurso gubernamental sobre el cambio climático.

Los resultados encontrados permiten aseverar que existe una percepción generalizada en la población, acerca del cambio en algunas variables del clima en los últimos años, plasmadas en argumentos relacionados con el cambio e incremento de la temperatura, modificación de las estaciones, incremento de huracanes, entre otros. Asimismo asocian estos cambios a factores antrópicos, debido a la deforestación y al mal manejo de los recursos naturales por los seres humanos.

Al mencionar el tema de los impactos del cambio climático en los pobladores de Ixil, la mayor proporción de los encuestados menciona que afecta negativamente sus cultivos y cosechas, seguido por afectaciones negativas en la salud y en la economía. Finalmente, en términos de la percepción sobre la gestión de las autoridades municipales para hacer frente al cambio climático, se quedó patente la vulnerabilidad institucional del municipio. Sin embargo, en el imaginario colectivo de la localidad, la institucionalidad para atender el cambio climático se restringe exclusivamente a protección civil, siendo que sus impactos son multisectoriales, por lo cual tendría que efectuarse la coordinación interinstitucional e intersectorial, para abordar cuestiones de índole climática, social, económica y ambiental.

Palabras clave: cambio climático, percepciones, gestión, Ixil.

2.1. Introducción

Sin la menor duda, el cambio climático es un tema de primordial relevancia en la agenda global, debido a sus impactos en los ecosistemas, así como en los medios de vida y sustento de las poblaciones de todo el planeta, de tal suerte que se está convirtiendo en uno de los más grandes retos a los que se enfrenta la humanidad en la actualidad. De hecho, el informe presentado por la European Commission (2009) lo considera el cuarto problema más grave que enfrenta el mundo moderno, después de la pobreza, falta de alimento y agua. Asimismo, el PNUD (2008) asevera que contribuirá sustancialmente a frenar los esfuerzos de combate a la pobreza, además de paralizar y revertir los avances obtenidos en términos de salud, nutrición, educación, entre otros ámbitos del desarrollo humano. Por lo tanto, el cambio climático contribuirá a ensanchar la brecha existente entre países desarrollados y en desarrollo.

Desde la Primera Conferencia Mundial sobre el Clima, celebrada en 1976, el tema empezó a posicionarse y a reconocerse como problema, debido al incremento de las temperaturas globales, resultante del aumento en la concentración de los gases de efecto invernadero en la atmósfera. A partir de ahí se a estado construyendo un consenso internacional respecto a: 1) el reconocimiento del origen antropogénico de la problemática; 2) el impacto diferen-

cial del cambio climático, de acuerdo a los niveles de vulnerabilidad de los grupos sociales; 3) la necesidad de la intervención de los gobiernos, por sus implicaciones políticas, medioambientales, socioeconómicas y de salud pública. En virtud de ello los países trabajan en definir políticas para controlar sus causas, reducir las condiciones de vulnerabilidad y fortalecer las acciones de mitigación y adaptación (Castañeda *et al.*, 2014; Kindelán, 2013; Mujer y Medio Ambiente, 2010).

En México, el incremento en la intensidad y cambio en la frecuencia de fenómenos hidrometeorológicos en las dos últimas décadas, ha estado asociado al cambio climático. Mientras que los desastres provocados por los terremotos (eventos extremos de orden geofísico) han mantenido un número constante, los desastres ocasionados por fenómenos hidrometeorológicos se han duplicado, tales como huracanes, inundaciones o sequías.

En el estado de Yucatán han sido documentados una serie de disturbios hidrometeorológicos, entre ellos cambios en los periodos de lluvias, así como el incremento en los periodos de sequías, con consecuencias desastrosas en el ámbito económico y social. De hecho, investigaciones aseveran que los impactos de los eventos hidrometeorológicos han incrementado los niveles de pobreza y exclusión social, reducido las oportunidades de empleo y la seguridad alimentaria y provo-



cado procesos de emigración (Fetzek, 2009).

En esta contribución se busca reconocer las percepciones sociales sobre el cambio climático en el municipio de Ixil, ubicado en el estado de Yucatán, el cual es severamente afectado por los huracanes que se forman en el Caribe. En particular el presente documento trata de contestar a las siguientes interrogantes:

¿Qué es el cambio climático?

¿Cómo repercute el cambio climático en la vida de los pobladores?

¿Cuál es la institucionalidad a nivel local para actuar frente al cambio climático?

2.2. Marco conceptual

Para el abordaje del estudio de caso nos enfocaremos en dos conceptos clave: cambio climático y percepciones sociales. El cambio climático es un cambio del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera del planeta, como resultado del uso intensivo de la atmósfera como receptora de emisiones de gases de efecto invernadero. El cambio climático tiene un impacto negativo decisivo en las poblaciones humanas, al modificar los ciclos hidrológicos y regímenes de lluvias, la temperatura media global, provocar el alza en el nivel del mar, y los cambios en la ocurrencia e intensidad de los eventos

hidrometeorológicos extremos, incrementando de ésta manera, el riesgo y la vulnerabilidad en consecuencia de las amenazas sobre sus medios de sustento, su salud y seguridad. Es decir, las transformaciones en el clima están dando como resultado impactos económicos, sociales y ambientales importantes. Además, existen evidencias de que los fenómenos climáticos y sus impactos asociados se intensificarán en el futuro (PNUD, 2008; IPCC, 2013; IPCC, 2007).

En virtud de la complejidad de las causas y consecuencias del cambio climático, un acercamiento a su comprensión demanda un abordaje también complejo, incorporando dimensiones culturales, relacionadas con el significado y relevancia que el tema representa para los diferentes grupos sociales. Al poner en evidencia la dimensión subjetiva del análisis del cambio climático, relacionada con la forma como las personas entienden el fenómeno y en qué medida se sienten afectadas por él, cobra relevancia el estudio de las percepciones. La relación que los seres humanos establecen con el ambiente es en gran medida el reflejo de sus percepciones ambientales, entendidas como la forma en que las personas consideran y valoran su entorno, y a partir de ahí toman decisiones que pueden contribuir a su deterioro o conservación (Moyano *et al.*, 2009).

Según Vargas Melgarejo (1994) la percepción consiste en el reconocimiento, la

interpretación y la significación para la elaboración de juicios en torno a las sensaciones obtenidas del ambiente físico y social, en el cual intervienen el aprendizaje, la memoria y la simbolización. Lazos Chavero (1999) abona al concepto que las percepciones atribuyen características cualitativas a los objetos o circunstancias del entorno mediante referentes que se elaboran desde sistemas culturales e ideológicos específicos construidos y reconstruidos por el grupo social, lo cual permite generar evidencias sobre la realidad.

Toda vez que las percepciones actúan como una guía para las actitudes y conductas humanas, conocerlas aporta al conocimiento de cómo las poblaciones actuarán frente al fenómeno y por ello su estudio contribuye a diseñar políticas públicas relacionadas con el cambio climático con mayores posibilidades de éxito, o por lo menos a comprender hasta qué punto el contenido de las políticas climáticas refleja el modo en que las poblaciones perciben los problemas globales asociados con el cambio climático (Ruiz, 2014; Araújo *et al.*, 2011; Olmos-Martínez *et al.*, 2016).

Por otro lado, no hay que menospreciar las aseveraciones de O'riordan & Jordan (1996), quienes plantean que, si bien las políticas públicas se formulan y aplican en el marco de una institucionalidad muy clara y definida, sus orientaciones, contenidos y desarrollo son fruto, en última

instancia, del conjunto de valores, creencias, normas y expectativas sociales que predominan en una sociedad concreta y en un momento histórico determinado. Abonando a la relevancia del estudio de las percepciones para entender mejor el fenómeno del cambio climático, el propio Informe del IPCC (2014) plantea que será cada vez más importante conocer las percepciones públicas sobre el cambio climático, por constituirse una variable fundamental para contextualizar las estrategias y políticas de adaptación y mitigación.

2.3. Marco Metodológico

Para el desarrollo de éste estudio se estableció una metodología compuesta por tres fases: 1) diseño de la investigación y de instrumentos de recolección de datos, 2) obtención de información empírica y 3) análisis de los datos obtenidos. En la etapa uno se realizó una consulta a fuentes de información secundaria, para una caracterización del municipio de estudio en términos de variables demográficas y socioeconómicas, así como se diseñaron los contenidos temáticos de encuestas y entrevistas. En la etapa dos, de generación de información empírica, se desarrolló el trabajo de campo, en el cual se obtuvo información mediante la combinación de métodos cuantitativos y cualitativos, enunciados a continuación:



- Una encuesta sobre percepciones sociales, en la que se cubren aspectos referentes a: conceptualización del cambio climático, cómo repercute el cambio climático en la vida de los pobladores y cuál es la institucionalidad a nivel local para actuar frente al cambio climático. Las encuestas fueron aplicadas a 82 habitantes (41 mujeres y 41 hombres).
- Entrevistas semiestructuradas a 17 personas de Ixil (10 mujeres y 7 hombres), en donde se profundizó en el análisis de los tópicos abordados en la encuesta, con el objetivo de obtener información cualitativa y triangular los datos obtenidos. También se han aplicado entrevistas a dos personas de Protección Civil Estatal, con el eje centrado en la evaluación del actuar de protección civil municipal.

En la fase tres, de análisis de los datos obtenidos, se construyó una base de datos para la encuesta y se realizó el tratamiento estadístico con el programa SPSS. Asimismo, se transcribieron las entrevistas y se arribó a la integración de los resultados y conclusiones.

2.4. Contexto

Se ha seleccionado la costa de Yucatán para el desarrollo del estudio de caso debido a la vulnerabilidad natural que presenta el estado frente al cambio climá-

tico. Por su ubicación, la Península de Yucatán es afectada de modo directo o indirecto por la mayoría de los huracanes que se forman en El Caribe; cuyos impactos, manifestados en inundaciones, pérdida de la biodiversidad en los ecosistemas, productividad pesquera y cultivos ponen en riesgo a miles de personas, representando un elevado costo económico en daños materiales (Munguía Gil *et al.*, 2009; Munguía, 2012). El municipio de Ixil - en donde se realiza el estudio de caso - es doblemente vulnerable a los impactos negativos del cambio climático, dado que se suma a su posición geográfica frágil, el nivel de pobreza de sus habitantes y su elevada dependencia hacia los recursos naturales, pues sus habitantes dependen de la agricultura.

El municipio de Ixil se ubica entre los paralelos 21°08' y 21°20' de latitud norte y los meridianos 89°24' y 89°32'. Colinda norte con el Golfo de México y con los municipios de: Progreso (al poniente); Chicxulub Pueblo (al sur poniente); Mocoehá (al sur); Motul (al sur oriente); y al oriente, con Dzemul y Telchac Puerto. Tiene una altitud sobre el nivel del mar entre 6 y 10 metros. Ocupa el 0.37% de la superficie del estado de Yucatán, una superficie total de 134.13 kilómetros cuadrados. El tipo de clima es semiseco de muy cálido y cálido (56.71%), seco muy cálido y cálido (40.33%) y cálido subhúmedo con lluvias en verano, de menor humedad (2.96%) (INEGI, 2009).

Adentrándonos a la realidad demográfica y socioeconómica de la localidad de estudio, Ixil es una pequeña localidad de 4,073 habitantes, en donde 2,053 son hombres y 2,020 son mujeres. Existen en el municipio 1,034 viviendas particulares habitadas y de éstas el 65.5% cuenta con agua entubada, el 89.0% tiene excusado, el 99.0% posee electricidad y el 0.8% tiene piso de tierra. La población alfabeta de Ixil es del 92.65%, correspondiente a la población de 15 años y más en el municipio. De dicha población, la masculina alcanza el 57.99% de los alfabetos, mientras que la femenina un 42.01%. En términos de población derechohabiente de servicio de salud, el 98.43% es derechohabiente (INEGI, 2015; INEGI, 2015a).

Ixil es la cabecera del municipio con el mismo nombre y se ubica aproximadamente unos 28 kilómetros de la ciudad de Mérida y a unos escasos 25 kilómetros de la costa. A pesar de que el municipio cuenta con litoral costero, por razones geográficas y políticas, su población no tiene acceso a la explotación de los recursos del mar y se dedica a la agricultura, en la producción de hortalizas con empleo de invernaderos (Orilla, 1998: 17; INEGI, 2015). El municipio forma parte de la Región Noroeste del Estado, la cual se caracteriza por su alto nivel de desarrollo económico y su elevada concentración de población. Sin embargo, ninguna de las dos condiciones se distribuyen homogéneamente en la región, que se caracteriza

por su gran dependencia económica con respecto al municipio de Mérida, además de grandes desigualdades de desarrollo (Sandoval, 2013).

Según INEGI (2009), el uso potencial de la tierra en el municipio de Ixil es 100% no apta para la agricultura. El tipo de suelo dominante es calcáreo y pedregoso y en palabras de los propios pobladores, son unos 7 o 10 centímetros de tierra sobre la superficie rocosa, los que hay que limpiar completamente de piedras para luego ser utilizados para el cultivo de las hortalizas, dicen ellos que ocasionalmente “con las lluvias, la tierra se desplaza de un terreno a otro”.

A pesar de ello, los ixileños, antes de dedicarse al cultivo del henequén, debieron haber sido horticultores y sea quizá por ello que derive el significado de Ixil, “tierra estregada, labrada muchas veces” y por ello quizás también, después del desplome del henequén, los pobladores volvieron nuevamente sus ojos al cultivo de las hortalizas como el cilantro, el rábano, chile habanero, las cebollinas y las cebollitas, de donde proviene su fama (Orilla, 1998: 11-13).

Algunos otros pobladores complementan sus ingresos con la ganadería, la apicultura o como moto taxistas o triciclistas. Algunas amas de casa apoyan la economía familiar elaborando y vendiendo artesanías, produciendo aves, frutas



y hortalizas de traspatio o ayudando a sus maridos en la comercialización de los productos. Otra parte de la población se emplea -regularmente fuera de comunidad-, en pequeñas o medianas industrias que ellos aún nombran indistintamente como “la maquila”.

2.5. Percepciones sociales sobre el cambio climático y vulnerabilidad social

En éste apartado brindaremos los resultados encontrados con la investigación empírica realizada en el municipio de Ixil, en donde se aplicaron encuestas y entrevistas para lograr un acercamiento al conocimiento del fenómeno de cambio climático por los actores sociales locales. Partimos del supuesto que el conocimiento de las percepciones sociales constituye un insumo relevante para comprender los intereses y necesidades de las poblaciones y como tal sienta las bases para reconocer cómo se construye la vulnerabilidad. Retomaremos el conocimiento del concepto de cambio climático por los actores sociales locales, la percepción sobre su vulnerabilidad frente al fenómeno y su valoración de la institucionalidad a nivel local para actuar frente al cambio climático.

Con relación al primer punto abordado, relativo al conocimiento del concepto de

cambio climático, 33 de los 41 hombres encuestados contestaron saber qué es el cambio climático, es decir una proporción de 8 por cada 10 hombres. En tanto, para el caso de las mujeres, 27 de las 41 entrevistadas dijeron saber qué es el cambio climático, lo que indica que por cada 10 mujeres, 6.6 tiene conocimiento del término. Podemos concluir entonces que una menor proporción de mujeres que de hombres tiene conocimiento del término de cambio climático.

A las personas encuestadas se les solicitó nos dijeran lo primero que viene a su mente cuando se menciona el término de cambio climático. Debido a que los pobladores no tienen una imagen clara del fenómeno, asociamos respuestas como “cambio del clima”, “es el desajuste del clima”, “los cambios extremos del clima”, “va cambiando bruscamente el clima” o “el tiempo ha cambiado bastante” con el ítem de cambios abruptos del estado del tiempo, o bien afirmaciones como “calor y frío extremos”, “las temperaturas cambian frío/calor”, “la temperatura que sube” o “cambios bruscos de temperatura” quedaron incluidas en el renglón de cambios bruscos de temperatura, y así sucesivamente para crear la tabla de distribución n° 1, en la cual, como era de esperarse, pudimos constatar que las respuestas, tanto de hombres como de mujeres, giran en torno a las consecuencias que podrían presentarse por el cambio climático, como el caso de los cambios abruptos del esta-

do del tiempo (28%); cambios bruscos de la temperatura (25%), alteración o modificación de las estaciones del año (8%), o mayor cantidad o intensidad de los huracanes (7%). Algunos términos más relacionados con el cambio climático fueron mencionados en menos proporción por la población encuestada: calentamiento global (5%) o el efecto invernadero (2%). Dichos términos, aunque fueron señalados por la población, no necesariamente significa que conozcan su definición.

Por otro lado, un 33% de las percepciones asociadas al cambio climático, tanto mujeres (12%), como hombres (13%), relacionan con el término las posibles fuentes antropogénicas del fenómeno, como por ejemplo, los efectos de la contaminación, el agotamiento de los recursos naturales, por efecto de la deforestación o por las afectaciones que el ser humano provoca en la naturaleza. Podemos afirmar entonces que la percepción asociada con el término de cambio climático por los pobladores en Ixil se encuentra relacionada con los impactos o las causas antrópicas del fenómeno, pero no con el fenómeno en sí.

La idea general que la población encuestada tiene acerca del cambio climático es el cambio del clima (temperatura, estaciones), lo cual representa uno de sus impactos, y no se asocia a una causa definida. Otro aspecto relevante a observar es el hecho de que muy pocos hombres (3%) y ninguna mujer lo asociaron con cambios en el clima

por efectos de la destrucción ambiental (deforestación), percepción que sí, se acerca a una causa del fenómeno. Ello nos indica la poca información que la población posee sobre el tema o la necesidad de no sentirse involucrada directamente en sus causas, dado que la destrucción ambiental es algo frecuente en la región.

De la tabla de distribución anterior podemos destacar además, que la alteración o modificación en las estaciones (8%) fue citada únicamente por los hombres que contestaron la encuesta, preocupación relacionada principalmente con la actividad económica principal (la horticultura), así identificada por los pobladores de la localidad y que es llevada a cabo mayormente por hombres.

En la tabla Tabla 2.1 es observable también, de qué manera la percepción de riesgos asociados al cambio climático de mujeres y hombres, están más relacionadas con amenazas climáticas de aparición lenta como alteraciones paulatinas del tiempo, cambios en las estaciones del año, sequías o cambios bruscos de la temperatura, y en un menor porcentaje con amenazas de aparición súbita como huracanes. Es decir, la percepción de riesgo de los pobladores pudiera estar más relacionada con aquellos impactos del cambio climático que representen impactos acumulativos en su bienestar económico que con aquellos que pudieran repercutir en forma más dramática sobre el mismo.



Tabla 2.1. Distribución de porcentajes de percepciones asociadas al término de cambio climático.

Percepción asociada con el término de Cambio Climático	Distribución		
	Hombres	Mujeres	Total
Cambios abruptos del clima	18%	41%	28%
Cambios bruscos de la temperatura	24%	26%	25%
Alteración o modificación en las estaciones	15%	0%	8%
Más huracanes o más intensos	6%	7%	7%
Por efectos de la contaminación	3%	11%	7%
Calentamiento global	6%	4%	5%
Afectación en la forma de vida de las familias y su economía	0%	4%	2%
Aumento en la temperatura	3%	0%	2%
Efecto invernadero	3%	0%	2%
Es el agotamiento de los recursos naturales	3%	0%	2%
Ha escuchado de ello en la TV	3%	0%	2%
Más enfermedades	0%	4%	2%
Más lluvias y vientos	0%	4%	2%
Mayores temperaturas	3%	0%	2%
Mucho sol	3%	0%	2%
Por efectos de la deforestación	3%	0%	2%
Porque el ser humano provoca afectaciones en la naturaleza	3%	0%	2%
Se están derritiendo los polos	3%	0%	2%
Total general	100%	100%	100%

Fuente: elaboración propia.

Nos parece interesante resaltar el hecho de que se presenta una cierta paradoja cuando indagamos en la encuesta la percepción asociada al cambio climático, en donde sólo el 7% de las personas encuestadas afirma estar relacionada con los huracanes; mientras que en las entrevistas, tanto los hombres como las mujeres asumen que los huracanes son la principal consecuencia del cambio climático a nivel local. Inclusive el paso del huracán

Isidoro (2002) fue el fenómeno climático que más reflexiones generó dentro de la población de Ixil.

Recordar las amenazas climáticas en la localidad, tanto por hombres como por mujeres, tiene una significación práctica inmediata para la cuestión de si las experiencias históricas se pueden aprovechar o no para la prevención y atenuación de las secuelas de los desastres ocasiona-

dos por fenómenos hidrometeorológicos extremos como los huracanes o inundaciones, lo que se constituye un conocimiento colectivo construido socialmente frente a este tipo de amenazas.

Asimismo, se puede distinguir claramente los diferentes roles de hombres y mujeres frente a este tipo de amenazas. En el proceso de percepción-aprendizaje de las mujeres, el huracán Isidoro generó cargas emocionales adicionales por la aparición de enfermedades como dengue o cólera. Otra consecuencia importante del Isidoro en Ixil fue la incorporación femenina en el trabajo asalariado, con la finalidad de complementar los ingresos masculinos, y hacer frente a la gran afectación de la economía familiar y de la localidad, por las consecuencias del desastre provocado por el huracán. En este sentido, varias mujeres perciben que el machismo disminuyó un poco después de Isidoro, porque después de superada la crisis las mujeres continuaron trabajando. Fue un cambio positivo en ese sentido.

El paso del huracán Isidoro, con el consecuente desastre para los medios de vida familiares, tuvo como consecuencia para los hombres, la necesidad de organizarse con otros grupos de horticultores y crear su primera triple S¹, para poder acceder a los recursos, insumos y trabajo temporal

por parte del gobierno. Los hombres afirman que, además del huracán Isidoro, las sequías vienen afectando sus cosechas y cuentan con muy poco apoyo gubernamental para lograr recuperarse del embaute de fenómenos climáticos que les afectan y lograr seguir viviendo de la agricultura. En palabras de un horticultor:

Primero fue Isidoro que acabó con todas nuestras cosechas, luego hace como cuatro años, se perdió la cosecha por sequía, tuvimos que empeñar las alhajas y las autoridades locales apoyaron con mil pesos para tratar de recuperar la cosecha. Dos años después, nuevamente hubo pérdida de cosechas por sequía e ya no hubo apoyo de las autoridades, finalmente tuvimos que vender nuestro auto para poder comprar semillas. Si no, como.

Mientras la población de éste municipio de Yucatán retoma variables climáticas y ambientales para acercarse al concepto de cambio climático, en la cuenca de Jovel, en los Altos de Chiapas, los indígenas campesinos asocian el fenómeno a una fuerza divina que castiga, dado que "dios" está molesto debido al declive moral de la humanidad. De hecho no es raro encontrarse con este tipo de discursos en comunidades campesinas en Latinoamérica, en periodos de proliferación de cultos religiosos, en donde los seres humanos están

1 Sociedad de Solidaridad Social que se integra por una o más Sociedades de Producción Rural de la región.



sujetos a los designios celestes, cuya ira divina se manifiesta a través del castigo climático (Soares y García, 2014; Soares *et al.*, 2018).

Según Flores Moreno y Valdivia Corrales (2011), en un panorama de incertidumbres globales, este discurso ofrece algo de seguridad, dado que promete la salvación mediante el arrepentimiento y la autocorrección. Bajo esta racionalidad, sería más sencillo y económico revertir la situación actual relacionada con el cambio climático, por no ser necesaria la inversión en estrategias de adaptación o mitigación.

Como podemos observar en los resultados del gráfico siguiente, en las respuestas a la pregunta de cómo repercute el cambio climático en la vida de los pobladores de Ixil, la mayor proporción de los encuestados, un 45% contestó que el cambio climático afecta negativamente en sus cultivos y cosechas. Siendo una mayor proporción de hombres que de mujeres.

Otra importante proporción, un 32% respondió que el fenómeno afecta la salud de los pobladores, principalmente en los niños y adultos mayores, siendo mayor la proporción de mujeres que de hombres, quienes señalaron que el cambio climático repercute negativamente en la salud. Cabe señalar que, en entrevistas llevadas a cabo con mujeres, las participantes perciben mayores amenazas para la salud de ellas y de sus familias, principalmente

sus hijos, por las inundaciones ocasionadas por las lluvias, más que por los huracanes. De hecho una entrevistada comenta:

...nosotras las mujeres sufrimos mucho cuando vienen las inundaciones, pues se enferman los niños y tenemos que cuidarlos. Con los huracanes hay más riesgos, pero no son tan seguidos y las lluvias sí y nos causan daño...

Las mujeres comentan sobre las inundaciones de los terrenos traseros de sus casas, argumentando que los pozos se llenan de basura y luego con agua de lluvia, o las fosas sépticas que aún no han sido terminadas y luego hay que fumigar para evitar el desarrollo de patógenos que pueden causar enfermedades, además de la inundación en las calles de la población. Lo anterior genera problemas de salud por la presencia de dengue, contaminación de alimentos por presencia de moscas que ocasionan diarrea o gastroenteritis, o bien, los cambios bruscos de temperatura (mucho calor y de repente mucho frío), que luego ocasionan enfermedades respiratorias y de la piel.

En menor proporción, la población manifestó que el cambio climático repercute tanto en la salud como en sus cultivos y cosechas (7%); su economía y el trabajo (6%); y un (5%) de mujeres y hombres declaró no saber, o que no piensa que el cambio repercute en la vida de los pobladores.

Los resultados de la encuesta nos muestran que la afectación de los cultivos y cosechas o en la economía y el trabajo, fueron mencionadas principalmente por los hombres. En tanto las mujeres se inclinaron mayormente por los impactos negativos del fenómeno en la salud de la población, principalmente mencionando a los niños y ocasionalmente a los adultos mayores. Para este caso, de acuerdo con Munguía (2012: 62) "la percepción del riesgo por amenazas climáticas entre mujeres y hombres obedece a sus valores diferenciados en la protección, bienestar y cuidado familiar". Es decir, debido a la división sexual del trabajo a las mujeres y hombres les toca desarrollar actividades diferentes y de ahí, sus intereses y preocupaciones están articulados a sus quehaceres principales. Mientras a las mujeres se les responsabiliza principalmente por las actividades de cuidado y

mantenimiento de la unidad doméstica, a los hombres les toca la provisión.

Por otro lado, independiente de las proyecciones de los impactos del cambio climático en el futuro, los medios de subsistencia o de la salud de los habitantes de Ixil ya están considerablemente afectados por los cambios paulatinos en el estado del clima, la variabilidad de las estaciones de lluvias o en forma gradual por el aumento de la temperatura, lo anterior conforme a la percepción al riesgo del cambio climático identificada por las mujeres y los hombres de la localidad, misma que se encuentra más relacionada con amenazas climáticas de aparición lenta que con aquellas amenazas de aparición súbita, como los huracanes.

Con relación al tercer punto abordado en este trabajo de investigación, acerca de la

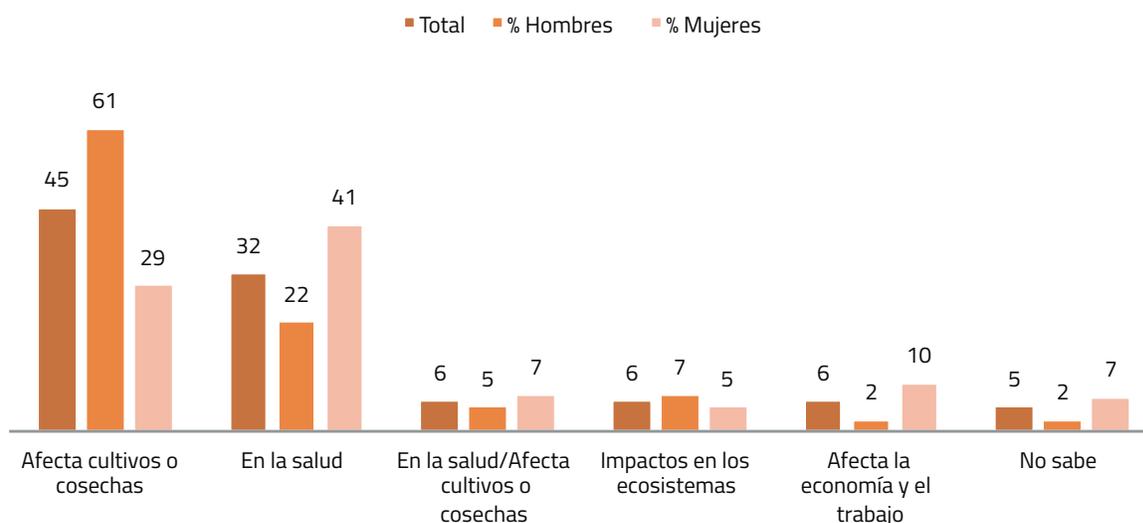


Figura 2.1. Repercusiones del cambio climático en la vida de la población de Ixil.
Fuente: elaboración propia.



institucionalidad a nivel local para actuar frente al cambio climático, la población encuestada está dividida, pues el 40% considera que la gestión de las autoridades municipales es regular, el 33% la evalúa como buena y el 27% como mala o pésima.

Observamos una contradicción al comparar las percepciones sobre el concepto de cambio climático y la institucionalidad a nivel local para actuar frente al cambio climático, toda vez que, mientras la mayoría de las personas encuestadas relaciona el cambio climático directamente con el cambio de la temperatura y muy pocas (solamente el 7%) lo asumen como un incremento de los fenómenos meteorológicos extremos (huracanes); al contestar sobre la capacidad institucional para hacer frente al cambio climático, en el imaginario colectivo sobresalen los huracanes y las personas entrevistadas se refieren exclusivamente a protección civil como la institucionalidad local para hacer frente al cambio climático. Al homologar la institucionalidad para hacer frente al cambio climático a nivel local con las organizaciones encargadas de prevenir y proteger a la población en el paso de los huracanes, nos circunscribimos a la gestión de riesgos y como tal, a protección civil, y no a toda la gama de facetas que implica el cambio climático, dado que tiene implicaciones económicas, sociales, productivas y ambientales, en donde tendría que haber la coordinación interinstitucional

e intersectorial, para abordar cuestiones de estas diversas índoles. Las diferencias de opinión entre sexos son relevantes. En general las mujeres tienen una postura más crítica sobre la labor de las autoridades municipales: la mayoría opina que su gestión es regular (el 41%). Por su parte, la mayoría de los hombres considera que las autoridades realizan una buena gestión (49%). Lo que podría explicar esta diferencia de opiniones, es la mayor presencia y participación de los hombres en las labores que realiza el municipio para proteger la población ante el paso o amenaza de un huracán.

En el municipio de Ixil, la política de atención a desastres, en especial a huracanes, se concibe a partir del 2002, después del paso de huracán Isidoro, como respuesta a las cuantiosas pérdidas ocurridas por la falta de cultura institucional de prevención de desastres. De hecho, no sólo en Ixil se quedó comprobada la ineficiencia y carencia de una visión de prevención por parte de protección civil, sino en todo el estado de Yucatán, en dónde, según Ceballos (2002), citado por Munguía (2012) las pérdidas alcanzaron 1,000 millones de dólares y su población fue unánime al afirmar que la asistencia gubernamental fue tardía, lenta y escasa.

Según la Ley Estatal de Protección Civil (LEPC, 2016) el sistema de protección civil a nivel municipal debe estar integrado por el Consejo municipal, la Unidad municipal y

los representantes de los sectores público, social y privado. Los Consejos de protección civil constituyen “un órgano consultivo de coordinación de acciones y de participación social para la planeación de la protección en el territorio municipal, y será el responsable de propiciar la participación de los sectores de la sociedad a fin de integrar el Sistema Municipal” (LEPC, 2016: 10) Con base en el artículo 38 de dicha ley, los Consejos Municipales se integran conforme a la siguiente estructura:

- Presidente del consejo: presidente municipal.
- Coordinador General: secretario del ayuntamiento.
- Regidores del ayuntamiento.
- Secretario técnico: Director de la unidad municipal de protección civil.
- Titulares y representantes de las dependencias y entidades de la Administración Pública Municipal cuya área de competencia corresponda a los objetivos del Sistema Municipal, y
- Representantes de las organizaciones sociales y privadas de carácter municipal.

Por su parte, las Unidades Municipales de Protección Civil (UMPC) tienen como función: “elaborar, instrumentar, dirigir y operar la ejecución de los programas en la materia, coordinando sus acciones con las dependencias, instituciones y organismos del sector público, social y privado de carácter municipal” (LEPC, 2016: 11).La

participación del sector social se da a través de grupos de voluntarios que participan en las tareas de emergencia y rescate, y del sector privado mediante la disposición de vehículos, instalaciones e insumos aportados de manera voluntaria o mediante convenios.

Un nudo importante para el actuar con buenos resultados de protección civil municipal es la rotatividad de sus directores. De hecho los directores de protección civil municipal son nombrados por la administración en turno, de tal suerte que se cambia a cada tres años, con el cambio del presidente municipal. Un puesto tan crucial para la sustentabilidad del municipio se decide con criterios de afinidades personales y políticas del presidente municipal en turno. De acuerdo a la percepción de un funcionario de Protección Civil Estatal (PCE), la rotación de los directores municipales de protección civil es uno de los mayores problemas que se tienen para avanzar de manera sólida en atención de desastres:

Ese es un gran problema. Los cambios. El problema más grande que nosotros tenemos con ellos. Porque cuando nosotros capacitamos a los directores e ya podemos trabajar a un nivel más alto, los cambian. Inclusive se les trae capacitación de la Ciudad de México, de Cenapred, de la Coordinación General, pero cuando ellos ya están capacitados se van...



Sin embargo esta postura no es compartida por directores de protección civil a nivel municipal, quienes están interesados en ser beneficiados con un empleo público. De hecho, el director de protección civil de Ixil en el año 2012² asume el argumento de la necesidad de cambio de los titulares de estas direcciones a cada administración, a fin de que el máximo posible de ciudadanos que apoyaron la campaña electoral del presidente municipal en turno pueda tener la oportunidad de ser beneficiado con un trabajo. Retomamos sus propias palabras al respecto:

...cada determinado tiempo viene uno, es decir, el de 2012 vence y entra otro y mayormente los que están ayudando al que va a ser presidente, si es que gana, él va acomodando a su gente que está más allegada a él ... yo creo que a cada quien le debe tocar algo ¿no?

Como era de esperarse, dicha postura no es compartida por muchos, sino solamente por quienes se ven beneficiados en este proceso, de tal suerte que un habitante de Ixil argumenta:

En ocasiones se utiliza como un modo de empleo temporal, y entonces si hay una persona que no tiene empleo, aunque no tenga la capacidad para ello, lo integran al grupo de protección civil y ahí está, pero pudiera hacerse una selección de algunas

personas que demuestren capacidad para estar en esto.

Abonando a la debilidad en la operación de la dirección de protección civil de Ixil, encontramos que el director de protección civil desconoce si el municipio cuenta con un plan de emergencia que establezca una ruta crítica para proceder en caso de una amenaza o si se ha definido una estructura organizativa a través de la cual se coordinen los diferentes sectores del municipio frente a una situación de emergencia (el consejo municipal de desastres). Dice, en situación de emergencia, estar sujeto a las decisiones del presidente municipal y las indicaciones y apoyo de protección civil estatal. Si bien es cierto que el presidente municipal es la figura principal del consejo y en él recae la responsabilidad de tomar decisiones y coordinar la participación de las diversas instituciones y dependencias que participan en el SMPC, según el artículo 44 de la LEPC, corresponde al director de la unidad municipal "coordinar sus acciones con las autoridades federales y estatales, así como con los sectores social y privado de carácter municipal, para prevenir y controlar emergencias o desastres"(LEPC, 2016:12).

Otra problemática comentada por las personas entrevistadas de Protección Civil Estatal, directamente relacionada con la anterior, es decir, el compadrazgo para la

2 En el año 2012 se realizaron las entrevistas y encuestas de dicha investigación.

selección de la persona a ocupar el puesto de dirección de protección civil municipal, es la falta de compromiso y vocación de servicio en algunas de las personas que ocupan dicho cargo. Los entrevistados afirman que algunos directores de protección civil desconocen sus funciones y responsabilidades, no son localizados en sus lugares de trabajo durante su horario de servicio y le otorgan poca importancia al cargo que ocupan y las funciones que deben realizar.

Una persona de Ixil también expresa la misma preocupación de los entrevistados de PCE, al referir que no todos los directores y las personas que laboran en el ayuntamiento están interesados y comprometidos con la comunidad, en palabras de una entrevistada: "...lo que sí se necesitaría es capacitación para ellos y la iniciativa de querer trabajar por parte de quienes reciben un sueldo, querer trabajar en cuestiones de la comunidad. Veo que hace falta". Evidentemente, todo ello contribuye en la delineación de una percepción ciudadana que no aprueba del todo la gestión de las autoridades municipales ante los eventos extremos.

La problemática de la debilidad institucional de protección civil municipal no es exclusiva de Ixil, sino compartida entre una serie de municipios, no sólo del estado de Yucatán, sino de varias entidades de la república mexicana. Al respecto, personal de PCE afirma que hay directores muni-

cipales de protección civil que no saben leer y escribir, de edad avanzada, quienes lejos de poder ayudar a la gente tienen que ser atendidos en caso de emergencia o a quienes se les dificulta el uso de herramientas de cómputo, así como la redacción de documentos o llenado de formatos, porque son personas de campo.

Es evidente que algunos puestos municipales de extrema relevancia para la sustentabilidad del municipio, como es el caso de la dirección de protección civil, son ocupados como pago a apoyos prestados y no en base a un perfil profesional de habilidades, capacidades o competencias para quienes ocupan dichos cargos. Esta situación obliga a PCE, cada cambio de administración municipal, a fortalecer las capacidades de los directores a través de cursos de inducción al tema y de una relación permanente mediante la cual se les asesora, supervisa, capacita y monitorea para el cumplimiento de sus funciones y responsabilidades, entre las que se encuentran: elaborar el plan municipal de contingencias, en el que se establecen las acciones que se deben seguir para cada agente perturbador: incendios, lluvias, huracanes, etc.; la instalación de los consejos municipales para las temporadas de incendios y huracanes; la elaboración de atlas de riesgo; entre otras.

Pese a este esquema, la coordinación y colaboración de los ayuntamientos con PCE no es la deseable. Como ejemplo de



esta afirmación, personal de PCE menciona que no se reportan los cambios de directores de protección civil para actualizar el directorio que se maneja a nivel estatal en caso de emergencia; no se cumple en tiempo y forma con los procedimientos para la elaboración de los planes de emergencia o la instalación de los consejos municipales; o bien, no se autoriza, supervisa y promueve la asistencia de los directores a las reuniones mensuales. Los comentarios del presidente municipal de Ixil en torno a las funciones y responsabilidades de esta dirección son ilustrativos de la poca importancia que se le otorga al tema en esta localidad en particular. Al preguntarle si el municipio cuenta con un plan municipal de atención a riesgos o si realiza actividades de información o capacitación dirigidas a la comunidad, asegura que no. En relación con el plan de emergencia afirma: "hasta ahorita no tenemos nada de eso. Mayormente cuando sale ese tipo de problemas nosotros vemos cómo resolverlo con los de protección civil estatal, nos apoyan los policías, nosotros mismos también salimos y hay gente acá que también sale".

Toda esta debilidad institucional para atender un tema clave para el desarrollo de los municipios plantea un gran reto, relacionado no sólo con la necesidad de fortalecimiento institucional a nivel local, sino con la necesidad de fortalecimiento de la coordinación entre instituciones.

2.6. Conclusiones

En esta contribución nos acercamos a tres temas: a) conocimiento sobre el cambio climático y b) percepciones sobre su impacto y c) gestión de las autoridades municipales para hacer frente al fenómeno. Con relación al primer tema, relativo al conocimiento manifestado por las personas entrevistadas con relación al fenómeno, existe una percepción generalizada acerca del cambio en algunas variables del clima en los últimos años, plasmadas en argumentos relacionados con el cambio e incremento de la temperatura, modificación de las estaciones, incremento de huracanes, entre otros. Asimismo asocian estos cambios a factores antrópicos, relacionándolos con la deforestación y el mal manejo de los recursos naturales por los seres humanos. De tal suerte que las manifestaciones del cambio climático en el imaginario local están muy cercanas a la cotidianidad local.

Con relación al segundo tema, concierne a las percepciones sobre el impacto del cambio climático a nivel local, el municipio de Ixil posee una serie de características que lo vuelve vulnerable a las consecuencias del cambio climático, no sólo en términos de exposición a las amenazas hidrometeorológicas, es decir, desde el referente físico, sino también desde el punto de vista socioeconómico, dado que la población depende casi que exclusi-

vamente de los recursos naturales para asegurar su sobrevivencia y no cuenta con suficientes recursos económicos para hacer frente a desastres.

El cuanto al tercer punto abordado en esta contribución, relativo a la evaluación de la gestión de las autoridades municipales para hacer frente al cambio climático, quedó patente la vulnerabilidad institucional del municipio para hacer frente al fenómeno, de tal suerte que la situación social, económica e institucional del municipio crean condiciones adicionales de vulnerabilidad a los riesgos, con la continua amenaza de desastre. Es imprescindible avanzar hacia el fortalecimiento de los procesos de gestión de riesgos en Ixil, pues ello es una condición básica para la reducción de su vulnerabilidad y por consiguiente, disminución de pérdidas en desastres.

Si bien la gestión de riesgos es un tema de suma relevancia al abordar el fenómeno del cambio climático, no se puede soslayar su multidimensionalidad y como tal, la necesidad urgente de fortalecer la coordinación interinstitucional e intersectorial para atender al fenómeno, sumando a protección civil, los sectores ambiental, económico y social de los municipios. Es decir, el municipio debería plantear una agenda de temas estratégicos relacionados con el cambio climático, que defina áreas de intervención articuladas entre gestión de riesgos, políticas sociales, económicas y gestión ambiental.

2.7. Referencias

- Adger W., N. (2006). Vulnerability. *Global Environmental Change* 16 (3), 268-281.
- Araújo, J., Cavalcanti, I. & Eiró, F. H. (2011). Percepção ambiental e mudanças climáticas. IX Encontro Nacional da Sociedade Brasileira de Economia Ecológica – Políticas públicas e a perspectiva da Economia Ecológica. Outubro de 2011. Brasília - DF – Brasil.
- Ayala, M. R., Gutiérrez, V. & Zapata, E. (2016). Género, cambio climático y REDD+: Experiencias en el tiempo. *Terra Latinoamericana* 34: 139-153.
- Becoña, E. (2006). Resiliencia: definición, características y utilidad del concepto. *Revista de Psicopatología y Psicología Clínica*, vol. 11, núm. 3: 125-146.
- Cardona, O. D. (2003). *La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo. "Una crítica y una revisión necesaria para la gestión"*. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, La Red. http://www.desenredando.org/public/articulos/2003/rmhcvr/rmhcvr_may-08-2003.pdf
- CARE. (2010). *Manual para el Análisis de Capacidad y Vulnerabilidad Climática (CVCA)*. http://www.careclimatechange.org/files/adaptation/CARE_CVCA_Handbook-2009-Spanish.pdf
- Castañeda, I., Hernández, B. & Aguilar, C. (2014). *Transversalización de la perspectiva de género en las políticas de cambio climá-*



- tico en México: sistematización y lecciones aprendidas*. México, D. F.: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
- CONEVAL. (2010). *Medición de la pobreza 2010*. Obtenido de CONEVAL: <http://www.coneval.gob.mx/Paginas/principal.aspx>
- Cutter, S.L., Emrich Ch.T., Webb, J.J. & Morath, D. (2009), *Social Vulnerability to Climate Variability Hazards: A Review of the Literature*. Final Report to Oxfam America. Hazard and Vulnerability Research Institute, University of South Carolina.
- Chambers, R. (2010). Prefacio. En A. Dazé, K. Ambrose, & Ch. Ehrhart (2010), *Manual para el análisis de la capacidad y vulnerabilidad climática*. Perú: CARE.
- European Commission, (2009). Europeans' attitudes towards climate Change. *Special. Eurobarometer 322. TNS Opinion & Social*. http://ec.europa.eu/comm-frontoffice/publicopinion/archives/ebs/ebs_322_en.pdf
- Fetzek, Shiloh. (2009). Impactos relacionados con el clima en la seguridad Nacional de México y Centroamérica. Gran Bretaña: Primer Informe. Instituto Real de Servicios Unidos/ FUNDAECO.
- Flores M., A. & Valdivia C.G. (2011). Las percepciones de la población rural campesina de la Microcuenca Mollebamba sobre la incidencia del cambio climático en su forma de vida. *Serie Investigación, Núm. 5*. Cusco: Centro Bartolomé de las Casas, PACC Perú, Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación.
- INEGI. (2005). *Población rural y rural ampliada en México 2000*. http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/censos/poblacion/2000/pob_rural/Rural_y_Rural_Ampliada.pdf
- INEGI. (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Ixil, Yucatán*. <http://mapserver.inegi.org.mx/dsist/prontuario/index2.cfm>.
- INEGI. (2011). *Censo General de Población y Vivienda 2010*. México: Author
- INEGI. (2015). *Encuesta Intercensal 2015*. <http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/enchogares/especiales/intercensal/>
- INEGI. (2015). *Panorama sociodemográfico de Yucatán 2015*. http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/intercensal/panorama/702825082437.pdf
- IPCC (2014). Pachauri, R. K., Meyer, L., Plattner, G. K., y Stocker, T. (2015). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC.
- IPCC (2007). Bernstein, L., Bosch, P., Canziani, O., Chen, Z., Christ, R., y Riahi, K. (2008). Climate change 2007: synthesis report. IPCC.
- Kindelán, A.C. (2013). *Percepción, información y comunicación del cambio climático, conocimiento en estudiantes universitarios*. (Tesis doctoral). Universidad de las Palmas de Gran Canaria, Las Palmas de Gran Canaria, España.
- Lampis, A. (2010). *Pobreza y riesgo medioambiental: un problema de vulnerabilidad y desa-*

- rollo. CIDER. http://www.desenredando.org/public/varios/2010/2010-08-30_Lampis_2010_Pobreza_y_Riesgo_Medio_Ambiental_Un_Problema_de_Developmento.pdf
- Lampis, A. (2013). Vulnerabilidade e adaptação às mudanças climáticas: debates sobre o conceito de vulnerabilidade e sua medição. *Cuadernos de Geografía. Revista Colombiana de Geografía*. Vol. 22, núm. 2, 17-33.
- Lazos Chavero, Ma. Elena. (1999). "Utopía y realidad: perspectivas de los acervos de conocimiento agrícolas y ecológicos para el desarrollo rural". En Haydea Izazola (coord.). *Desarrollo sustentable, medio ambiente y población, a cinco años de Río*. México: Coespo, El Colegio Mexiquense. pp. 101-136.
- Ley Estatal de Protección Civil (LEPC, 2016). Ley de Protección Civil del Estado de Yucatán, fecha de publicación. 16 de agosto de 1999, fecha de última reforma: 16 de diciembre del 2016. http://www.congresoyucatan.gob.mx/detalle_ley.php?idley=41 file:///C:/Users/dmsoares/Downloads/e1c346193ef8a7ef5a7528832391d618.pdf
- Montoya, G., Soto, L., De Jong, B., Nelson, K., Farías, P., Yakac Tic, P., Taylor, J. & Tipper, R. (1995). *Desarrollo Forestal Sustentable: Captura de Carbono en las Zonas Tzeltal y Tojolabal del Estado de Chiapas*. México: Instituto Nacional de Ecología.
- Moyano, E., Paniagua, Á. & Lafuente, R. (2009). Políticas ambientales, cambio climático y opinión pública en escenarios regionales. El caso de Andalucía. *Revista internacional de sociología*. Septiembre-diciembre, vol. 67, (3): 681-699.
- Mujer y Medio Ambiente, A.C. (2010). *Género y cambio climático en México: En dónde está el debate*. México, D.F.: Fundación Heinrich Boll Stiftung, México, Centro América y El Caribe.
- Munguía, M.T., Méndez G., Murúa, L. & Noriega C. (2009), *Género vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en la costa de Yucatán*. Mérida: Colectivo Sinergia.
- Munguía, M.T. (2010), *Informe: Atlas de vulnerabilidad social frente al cambio climático*, Mérida: EDUCE.
- Munguía, M.T. (2012a). *Informe: Vulnerabilidad de género frente al cambio climático. Diagnóstico situacional*. Jiutepec: IMTA.
- Munguía, M.T. (2012b). Metodología para el análisis de la vulnerabilidad de género frente al cambio climático. En M. T. Munguía Gil, y G. Méndez Cárdenas (Coords), *Vulnerabilidad Social y de Género: Ixil frente al Cambio Climático* (pp. 51-6).
- Olmos, E., Arizpe, O., Contreras M., & Gómez, I. (2016). El cambio climático: una perspectiva de género. *Opción*, 32 (13), 1136-1157.
- Orellana, R., Espadas, C., Conde, C., & Gay, C. (2009). *Atlas. Escenarios de Cambio Climático en la Península de Yucatán*. Mérida: Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. (CYCY), pp. 111
- Orilla, M. (1998). *Monografía de Ixil: Tierra de las Cebollitas*. Mérida: PACMYC, Gobierno del Estado de Yucatán; Instituto de Cultura de Yucatán; Dirección General de Culturas Populares.



- O'riordan, T. & Jordan, A. (1996). Social institutions and climate change. En O'riordan, T., & Jäger, J. (Eds.), *Politics of Climate Change*. London: Routledge.
- Ortiz, E. & Castillo, A. (2008). *Plan Local de Manejo de Riesgos: Comunidad de Ixil, Yucatán*. PNUD, Proyecto de Manejo Local de Riesgos en la Península de Yucatán y Tabasco, Unidad Micro regional de Atención a Contingencias Costa-Nororiental Yucatán.
- Pachauri, R. K., Meyer, L., Plattner, G. K., & Stocker, T. (2015). *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC.
- PNUD (2007). Informe sobre Desarrollo Humano 2007-2008 - La lucha contra el cambio climático: Solidaridad frente a un mundo dividido. Nueva York: Author.
- PNUD (2008). Guía recursos de género para el cambio climático. México: Author.
- Rösing, I. (1994). La Deuda de Ofrenda: Un concepto central de la religión andina. *Revista Andina*, Núm. 1: 89-117.
- Ruiz, L. E. (2014). Género y percepciones sociales del riesgo y la variabilidad climática en la región del Soconusco, Chiapas. *Alteridades*, 24 (47), 77-88.
- Sandoval, N. C. (2013). *Vulnerabilidad y capacidad climática en Ixil, Yucatán, México: Activos familiares y capitales de la localidad*. (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de Yucatán. Facultad de Economía, Yucatán, México.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2007), *Programa Maestro de Desarrollo de Puerto Progreso y Puertos Pesqueros de Yucatán 2009-2014*. Documento Impreso.
- Soares, D. & García, A. (2014). Percepciones campesinas indígenas acerca del cambio climático en la cuenca de Jovel, Chiapas – México. *Cuadernos de Antropología Social*, 39, 63 – 88.
- Soares, D., García, A. & Manzano, L. R. (2018). Cambio climático. Percepciones sobre manifestaciones, causas e impactos en el Distrito de Temporal Tecnificado Margaritas-Comitán, Chiapas. *CIENCIA ergo-sum*, vol. 25, núm. 1, 1-13.
- Transparencia Mexicana A.C. (2017). Medición multidimensional de capacidad institucional a nivel municipal que fomente la adaptación al cambio climático. Informe Final. Ciudad de México: SEMARNAT, INECC, PNUD.
- Vargas Melgarejo, Luz María. (1994). "Sobre el concepto de percepción". *Alteridades*. Núm. 8: 47-53.

3

Marco normativo e institucional de los compromisos de México ante el cambio climático 2020 – 2030

Roberto Galván Benítez; Mario López Pérez
*Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532 Progreso. Jiutepec, Morelos.
México C.P. 62550.*
e-mail: rgalvan@tlaloc.imta.mx, mario_lopezperez@tlaloc.imta.mx





RESUMEN

El presente trabajo analiza el marco normativo e institucional, compromisos y avances por parte de México para reducir las emisiones nacionales de gases de efecto invernadero y de carbono negro, en mitigación y adaptación en materia de cambio climático para los años 2020 – 2030. Una de las metas, es la reducción no condicionada del volumen de sus emisiones nacionales de carbono negro, es - 51% y - 22% para gases de efecto invernadero. Asimismo México, se comprometió a aprobar los marcos normativos e institucionales en la materia, entre ellos la reforma energética.

El análisis se realizó utilizando el método sistemático jurídico para los compromisos y avances en la materia.

Palabras claves: Compromisos México Cambio Climático.

3.1. Introducción

La contribución por parte de México para reducir las emisiones nacionales de gases de efecto invernadero y de carbono negro, en mitigación y adaptación en materia de cambio climático para los años 2020 – 2030, es la siguiente:

Se integra de los componentes de mitigación y de adaptación. El primero contempla dos tipos de medidas, las no condicionadas y las condicionadas. Las primeras son aquellas en las que México puede solventarlas con sus pro-

prios recursos económicos, y las segundas (no condicionadas) son las que requiere de aportaciones financieras de carácter internacional.

Se trabaja en dos grandes componentes en materia de cambio climático, como es la mitigación y la adaptación, en la reducción de emisiones nacionales de gases de efectos invernadero (GEI) y de carbono negro (CN), en los siguientes rubros: transporte, generación de electricidad, residencial y comercial, petróleo y gas, industria, agricultura y ganadería, residuos y uso de suelo, cambio en el uso de suelo y silvicultura (USCUSS).

Para cada uno están señaladas las emisiones para 2020, 2025 y 2030, y estas son las que se deberán reducir a ciertos porcentajes.

Se analizó el marco normativo e institucional vigente, para ubicar las atribuciones de cada una de las partes que intervienen en la materia. Se ubicaron los resultados de las metas programadas en la materia sobre los cuales se realizaron comentarios y recomendaciones.

3.2. Metodología utilizada

Se utilizó el método sistemático jurídico que tiene como procedimiento el análisis y argumentación de lo general a lo particular, en relación con los compromisos y las metas generales que se fijó México para reducir las emisiones nacionales de GEI y CN en materia de cambio climático, ubicar los avances en su cumplimiento de las metas para los años 2020, 2025 y 2030, así como instrumentar su marco normativo e institucional en la materia (tabla 1).

3.3. Área de estudio

Las áreas objeto de la investigación, análisis y argumentación para determinar la actualización e integración del marco normativo e institucional, así como los avances de los compromisos de México en materia de mitigación y adaptación al

Cambio Climático, y de los cuales, se consideran como básicos a los siguientes: Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos; Decreto promulgatorio del Acuerdo de París, suscrito en París el doce de diciembre de dos mil quince, publicado en el Diario Oficial de la Federación el día cuatro de noviembre de dos mil dieciséis; Compromisos de mitigación y adaptación ante el Cambio Climático para el periodo 2020 – 2030, manifestado por el Presidente de México, Enrique Peña Nieto, en la Cumbre Climática, en Nueva York, Estados Unidos, el día veintitrés de septiembre de dos mil catorce; Ley General de Cambio Climático, publicada en el Diario Oficial de la Federación el día seis de junio de dos mil doce; Plan Nacional de Desarrollo 2013 – 2018, y todas las documentales normativas institucionales, como la Estrategia Nacional de Cambio Climático, visión 10 – 20 - 40; Programa Especial de Cambio Climático 2014 – 2018; Declaratoria del Sistema Nacional de Cambio Climático y su Reglamento; Minutas de trabajo del 2014, 2015, 2016 y 2017, Comisión Intersecretarial de Cambio Climático, y su Reglamento; y la Reforma Energética. Se analizaron dichos instrumentos legales y técnicos por orden jerárquico de carácter nacional e internacional.

Desde el ámbito Internacional, podemos mencionar el Derecho Humano al Agua y al Saneamiento, mismos conceptos que tienen relación directa con el Cambio Climático, en los aspectos de sequías,



Tabla 3.1. Instrumentos de Política de Cambio Climático en los tres órdenes de gobierno (SEMARNAT, 2012).

	Nacional	Federal	Estatal	Municipal
Marco jurídico	Ley General de cambio Climático		Leyes estatales en materia de cambio climático existentes ¹	
Planeación	Estrategia Nacional de Cambio Climático	Programa Especial de Cambio Climático	Programas estatales de cambio climático ²	Programas municipales en materia de cambio climático
Arreglos institucionales	Sistema Nacional de Cambio Climático	Comisión Intersecretarial de Cambio Climático	Comisiones estatales intersecretariales de cambio climático ³	
	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático	Consejo de Cambio Climático		
Instrumentos	Registro Nacional de Emisiones	Normas Oficiales Mexicanas	Inventarios Estatales de Emisiones	Atlas de riesgos de municipios vulnerables
	Inventario Nacional de Emisiones			
	Atlas Nacional de Riesgos		Atlas estatales de riesgos	
	Sistema de Información			
Evaluación	Coordinación de Evaluación INECC	Coordinación de Evaluación INECC	Procedimientos de evaluación del programa estatal	Procedimientos de evaluación del programa municipal
Financiamiento	Fondo de Cambio Climático	Fondo de Cambio Climático	Fondo de Cambio Climático y Fondos Estatales	Fondo de Cambio Climático y gestión de otros recursos

- 1 A febrero de 2013 se encuentran publicadas cinco leyes estatales de cambio climático: Veracruz (noviembre de 2010), Chiapas (diciembre de 2010), Distrito Federal (junio de 2011), Quintana Roo (mayo de 2012) y Baja California (junio de 2012).
- 2 En la Quinta Comunicación Nacional ante la CMNUCC se menciona que ocho entidades cuentan con este tipo de programas: Chiapas, Distrito Federal, Guanajuato, Hidalgo, Nuevo León, Puebla Tabasco y Veracruz.
- 3 En la Quinta Comunicación Nacional ante la CMNUCC se menciona que 16 entidades cuentan con este tipo de comisiones: Campeche, Coahuila, Distrito Federal, Durango, Guanajuato, Guerrero, Jalisco, Michoacán, Querétaro, Quintana Roo, San Luis Potosí, Tabasco, Tamaulipas, Tlaxcala, Veracruz y Yucatán.

inundaciones, así como en materia de saneamiento de las aguas, mismas que tienen relación con un medio ambiente sano.

El Consejo de Derechos Humanos de la ONU, mediante resolución 7/22, del mes de marzo de dos mil ocho, decidió nombrar, a un experto independiente por un periodo de tres años, sobre cuestiones de las obligaciones de derechos humanos al acceso al agua potable y al saneamiento, y en abril del dos mil once, mediante resolución 16/2, el mismo Consejo decidió extender el mandato por un periodo de tres años más, para que el experto independiente supervise e informe sobre la implementación por parte de los Estados miembros, respecto al derecho humano al agua, y las violaciones a este.

La Asamblea Mundial de la Salud la Organización Mundial de la Salud, mediante resolución 64/24 del mes de mayo de dos mil once, hizo un llamamiento a todos los Estados miembros a garantizar que las estrategias de salud nacionales contribuyan al logro de los objetivos de Desarrollo del Milenio (hoy Objetivos de Desarrollo Sostenible) en materia de agua y saneamiento, apoyando al derecho humano al agua y al saneamiento. Asimismo realizó un llamamiento al Director General de la OMS para reforzar la colaboración de la misma con los correspondientes socios y miembros de la ONU – Agua y otras organizaciones – para

promover el acceso a un servicio de agua, saneamiento e higiene saludable.

El Consejo de Derechos Humanos, mediante resolución A/HRC/RES/18/1, del veintiocho de septiembre de dos mil once, aprobó una nueva resolución que contiene el derecho humano al agua potable y a un saneamiento saludable. Dando la bienvenida a la compilación de buenas prácticas sobre este derecho. La relatora especial fue muy enfática en las soluciones prácticas relacionadas con la implementación del derecho humano al agua y a un saneamiento saludable, haciendo un llamado a los Estados miembros a garantizar los recursos financieros para el suministro sostenible de servicios de agua y saneamiento.

Posteriormente, la Asamblea General de las Naciones Unidas, emitió la resolución número 64/292, del veintiocho de julio de dos mil diez, reconociendo explícitamente el derecho humano al agua y al saneamiento, reafirmando que el agua potable limpia y el saneamiento son esenciales para la realización de todos los derechos humanos, exhortando a los estados miembros y organizaciones internacionales a proporcionar los recursos financieros, con el objeto de propiciar la capacitación y la transferencia de las tecnologías para apoyar a los países, y en particular a los que están en vías de desarrollo, a proporcionar un suministro de agua potable y saneamiento saludable, limpio, accesible y asequible para todos.

Por otro lado, en el mes de noviembre de dos mil dos, el Comité de Derechos Económicos,



Sociales y Culturales adoptó la Observación General número 15 sobre el derecho al agua, que en su artículo I.1, establece “El derecho humano al agua es indispensable para una vida humana digna. Así como el derecho al agua de cada uno a disponer de agua suficiente, saludable, aceptable, físicamente accesible y asequible para su uso personal y doméstico”.

Derivado de lo anterior, es que se procedió a reformar la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en dos reformas fundamentales relativas en materia de derechos humanos, mismas que tienen relación o conexión con el Cambio Climático.

La primera reforma, que se publicó en el Diario Oficial de la Federación el diez de junio de dos mil once, se refiere al artículo 1 Constitucional, dejando previsto que todas las personas gozarán de los derechos humanos reconocidos en la constitución en cita, y en los tratados internacionales, en los que México sea parte, así como sus garantías en su protección. Debiéndose interpretar dichas disposiciones normativas de conformidad a dicha constitución y los tratados internacionales, favoreciendo en todo tiempo a las personas la protección más amplia, esto quiere decir en forma “PRO – PERSONA”.

Además, deberán respetar, promover, proteger, garantizar los Derechos Humanos, bajo los principios de universalidad, interdependencia, indivisibilidad y progresividad. Por lo que, el Estado mexicano tiene la obligación

de prevenir, investigar, sancionar y reparar las violaciones en materia de Derechos Humanos.

Posteriormente, la segunda reforma constitucional fue al artículo 4, párrafos quinto y sexto, publicándose en el Diario Oficial de la Federación el ocho de febrero de dos mil doce. Esta reforma contiene dos figuras importantes y trascendentes, ya que el recurso hídrico está íntimamente ligado con la energía, alimentos, medio ambiente, salud, e impactado por el Cambio Climático, como son:

- 1) El Derecho a un medio ambiente sano. (Párrafo quinto).
- 2) El Derecho Humano al acceso al Agua y al Saneamiento. (Párrafo sexto).

Es importante precisar, que dicha disposición constitucional, señala que tal derecho es para que toda persona tenga acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible.

Para tal efecto, en el ámbito internacional, se definen estas cuatro figuras, de la siguiente manera:

Suficiente. “El abastecimiento de agua por persona debe ser suficiente y continuo para el uso personal y doméstico. Estos usos incluyen de forma general el agua para beber, el saneamiento personal, el agua para realizar la colada, la preparación de los alimentos, la limpieza del hogar y la higiene personal. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), son

necesarios entre 50 y 100 litros de agua por persona y día para garantizar que se cubren las necesidades más básicas y surgen pocas preocupaciones en materia de salud”.

Salubre. “El agua necesaria, tanto para el uso personal como doméstico, debe ser salubre; es decir, libre de microorganismos, sustancias químicas y peligrosas radiológicos que constituyan una amenaza para la salud humana. Las medidas de seguridad del agua potable vienen normalmente definidas por estándares nacionales y/o locales de calidad del agua de boca. Las Guías para la calidad del agua potable de la Organización Mundial de la Salud proporciona las bases para el desarrollo de estándares nacionales que, implementadas adecuadamente, garantizarán la salubridad del agua potable”.

Aceptable. “El agua ha de presentar un color, olor y sabor aceptables para ambos usos, personal y doméstico. Todas las instalaciones y servicios de agua deben ser culturalmente apropiadas y sensibles al género, al ciclo de la vida y a las exigencias de privacidad”.

Físicamente accesible. “Todo el mundo tiene derecho a unos servicios de agua y saneamiento accesibles físicamente dentro o situados en la inmediata cercanía del hogar, de las instituciones académicas, en el lugar de trabajo o las instituciones de salud. De acuerdo con la OMS, la fuente de agua debe encontrarse a menos de 1.00 kilómetro del hogar y el tiempo de desplazamiento para la recogida no debe superar los 30 minutos”.

Asequible. “El agua y los servicios e instalaciones de acceso al agua deben ser asequibles para todos. El Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) sugiere que el coste del agua no debería superar el 3% de los ingresos del hogar”.

De esta segunda reforma al artículo 4, párrafo quinto constitucional, se prevé el concepto del “derecho a un medio ambiente sano” publicada en el Diario Oficial de la Federación el ocho de febrero de dos mil doce.

Y de esta manera, dando origen a su Ley Reglamentaria, Ley General de Cambio Climático, misma que fue publicada en el Diario Oficial de la Federación el seis de junio de dos mil doce.

En su Título primero. Disposiciones generales. Capítulo único, artículo 1, prevé la reglamentación en materia de protección al ambiente, desarrollo sustentable, preservación y restauración del equilibrio ecológico.

En la Ley en cita, artículo 2, prevé el objeto:

- I. Garantizar el derecho a un medio ambiente sano y establecer la concurrencia de facultades de la federación, las entidades federativas y los municipios en la elaboración y aplicación de políticas públicas para la adaptación al cambio climático y la mitigación de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero;
- II. Regular las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero para que



México contribuya a lograr la estabilización de sus concentraciones en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático considerando, en su caso, lo previsto por el artículo 2o. de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y demás disposiciones derivadas de la misma;

- III. Regular las acciones para la mitigación y adaptación al cambio climático;
- IV. 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;
- V. Fomentar la educación, investigación, desarrollo y transferencia de tecnología e innovación y difusión en materia de adaptación y mitigación al cambio climático;
- VI. Establecer las bases para la concertación con la sociedad;
- VII. Promover la transición hacia una economía competitiva, sustentable, de bajas emisiones de carbono y resiliente a los fenómenos hidrometeorológicos extremos asociados al cambio climático, y
- VIII. Establecer las bases para que México contribuya al cumplimiento del Acuerdo de París, que tiene entre sus objetivos mantener el aumento de la temperatura media mundial por debajo de 2°C, con respecto a los niveles preindustriales, y proseguir con los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1.5°C,

con respecto a los niveles preindustriales, reconociendo que ello reduciría considerablemente los riesgos y los efectos del cambio climático.

En dicha Ley, se prevé las atribuciones de la Federación, Entidades Federativas, Municipios, INECC, del Consejo de Cambio Climático, de la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático, del Sistema de Información sobre Cambio Climático, así como del Fondo para el Cambio Climático.

Para las entidades federativas o estados corresponden las siguientes (Artículo 8° de la Ley):

- I. Formular, conducir, evaluar la política de la entidad federativa en materia de cambio climático en concordancia con la política nacional;
- II. Formular, regular, dirigir e instrumentar acciones de mitigación y adaptación al cambio climático, de acuerdo con la estrategia Nacional y el programa en las materias siguientes: a) Preservación, restauración, manejo y aprovechamiento sustentable de los ecosistemas y recursos hídricos de su competencia; b) Seguridad alimentaria; Agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y acuicultura; d) Educación; e) Infraestructura y transporte eficiente y sustentable; f) Ordenamiento territorial de los asentamientos humanos y desarrollo urbano de los centros de población en coordinación con sus municipios o delegaciones; g) Recursos naturales y protección al ambiente dentro de

- su competencia) Residuos de manejo especial; i) Protección civil, y j) Prevención y atención de enfermedades derivadas de los efectos del cambio climático;
- III. Incorporar en sus instrumentos de política ambiental, criterios de mitigación y adaptación al cambio climático;
- IV. Elaborar e instrumentar su programa en materia de cambio climático, promoviendo la participación social, escuchando y atendiendo a los sectores público, privado y sociedad en general;
- V. Establecer criterios y procedimientos para evaluar y vigilar el cumplimiento del programa estatal en la materia y establecer metas e indicadores de efectividad e impacto de las acciones de mitigación y adaptación que implementen;
- VI. Gestionar y administrar fondos locales para apoyar e implementar acciones en la materia;
- VII. Celebrar convenios de coordinación con la federación, entidades federativas y los municipios, para la implementación de acciones para la mitigación y adaptación;
- VIII. Fomentar la investigación científica y tecnológica, el desarrollo, transferencia y despliegue de tecnologías, equipos y procesos para la mitigación y adaptación al cambio climático;
- IX. Desarrollar estrategias, programas y proyectos integrales de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero para impulsar el transporte eficiente y sustentable, público y privado;
- X. Realizar campañas de educación e información para sensibilizar a la población sobre los efectos adversos del cambio climático;
- XI. Promover la participación responsable de la sociedad en la adaptación y mitigación, de conformidad con lo dispuesto en las leyes locales aplicables;
- XII. Elaborar e integrar, en colaboración con el INECC, la información de las categorías de fuentes emisoras de su jurisdicción, para su incorporación al Inventario Nacional de Emisiones y en su caso, integrar el inventario estatal de emisiones, conforme a los criterios e indicadores elaborados por la federación en la materia;
- XIII. Elaborar, publicar y actualizar el atlas estatal de riesgo, en coordinación con sus municipios o delegaciones, conforme a los criterios emitidos por la federación;
- XIV. Establecer las bases e instrumentos para promover el fortalecimiento de capacidades institucionales y sectoriales para enfrentar al cambio climático;
- XV. Diseñar y promover el establecimiento y aplicación de incentivos que promuevan la ejecución de acciones para el cumplimiento del objeto de la ley;
- XVI. Convenir con los sectores social y privado la realización de acciones e inversiones concertadas hacia el cumplimiento de su programa;
- XVII. Gestionar y administrar fondos estatales para apoyar e implementar las acciones en la materia;
- XVIII. Vigilar, en el ámbito de su competencia, el cumplimiento de esta ley y los demás ordenamientos que de ella se deriven, así como sancionar su incumplimiento, y



XIX. Las demás que les señalen esta ley y otras disposiciones jurídicas aplicables.

Para los Municipios, corresponden las siguientes atribuciones (Artículo 9° de la Ley):

- I. Formular, conducir y evaluar la política municipal en materia de cambio climático en concordancia con la política nacional y estatal;
- II. Formular e instrumentar políticas y acciones para enfrentar al cambio climático en congruencia con el Plan Nacional de Desarrollo, la Estrategia Nacional, el programa, el programa estatal en materia de cambio climático y con las leyes aplicables, en las siguientes materias: a) Prestación de los servicios de agua potable y saneamiento; b) Ordenamiento ecológico local y desarrollo urbano municipal; c) Recursos naturales y protección al ambiente de su competencia; d) Protección civil municipal; e) Manejo de residuos sólidos municipales; f) Transporte público de pasajeros eficiente y sustentable en su ámbito jurisdiccional;
- III. Fomentar la investigación científica y tecnológica, el desarrollo, transferencia y despliegue de tecnologías, equipos y procesos para la mitigación y adaptación al cambio climático;
- IV. Desarrollar estrategias, programas y proyectos integrales de mitigación al cambio climático para impulsar el transporte eficiente y sustentable, público y privado;
- V. Realizar campañas de educación e información, en coordinación con el gobierno

estatal y federal, para sensibilizar a la población sobre los efectos adversos del cambio climático;

- VI. Promover el fortalecimiento de capacidades institucionales y sectoriales para la mitigación y adaptación;
- VII. Participar en el diseño y aplicación de incentivos que promuevan acciones para el cumplimiento del objeto de la presente ley;
- VIII. Coadyuvar con las autoridades federales y estatales en la instrumentación de la Estrategia Nacional, el programa y el programa estatal en la materia;
- IX. Gestionar y administrar recursos para ejecutar acciones de adaptación y mitigación ante el cambio climático;
- X. Elaborar e integrar, en colaboración con el INECC, la información de las categorías de las fuentes emisoras que se originan en su territorio, para su incorporación al inventario nacional de emisiones, conforme a los criterios e indicadores elaborados por la federación en la materia;
- XI. Vigilar y promover, en el ámbito de su competencia, el cumplimiento de esta ley, sus disposiciones reglamentarias y los demás ordenamientos que deriven de ella, y
- XII. Las demás que señale esta ley y las disposiciones jurídicas aplicables.

Los municipios, con acuerdo de sus ayuntamientos podrán coordinarse y/o asociarse para una eficiente implementación de las disposiciones previstas en este artículo.

3.4. Plan Nacional de Desarrollo 2013 – 2018

I.1. Diagnóstico. México demanda un pacto social más fuerte y con plena vigencia en materia de protección civil y prevención de desastres. (Página 37 del PND 2013 – 2018).

VI. Objetivos, estrategias y Líneas de acción.

Objeto 1.6. Salvaguardar a la población, a sus bienes y a su entorno ante un desastre de origen natural u humano.

En las Líneas de acción 1.6.1. Política estratégica para la prevención de desastres y no prevé la mitigación y adaptación en materia de Cambio Climático, como tal. Tal vez podría ser, porque en el Plan Nacional de Desarrollo se elaboró antes del 2013, y la Ley General de Cambio Climático fue publicada tiempo después.

En el Plan Nacional de Desarrollo PND 2013 – 2018, se preveía el fortalecer la política nacional en materia de Cambio Climático y cuidado al medio ambiente para transitar hacia una economía competitiva, sustentable, resiliente y de bajo carbono.

En cuanto a las líneas de acción, se preveían las siguientes:

Ampliar la cobertura de infraestructura y programas ambientales que protejan la salud pública y garanticen la conservación de los

ecosistemas y recursos naturales; Desarrollar las instituciones e instrumentos de política del Sistema Nacional de Cambio Climático; Acelerar el tránsito hacia un desarrollo bajo en carbono en los sectores productivos primarios, industriales y de la construcción, así como en los servicios urbanos, turísticos y de transporte; Promover el uso de sistemas y tecnologías avanzados, de alta eficiencia energética y de baja o nula generación de contaminantes o compuestos de efecto invernadero; Impulsar y fortalecer la cooperación regional e internacional en materia de cambio climático, biodiversidad y medio ambiente; Lograr un manejo integral de residuos sólidos, de manejo especial y peligrosos, que incluya el aprovechamiento de los materiales que resulten y minimice los riesgos a la población y al medio ambiente; Realizar investigación científica y tecnológica, generar información y desarrollar sistemas de información para diseñar políticas ambientales y de mitigación y adaptación al cambio climático; Lograr el ordenamiento ecológico del territorio en las regiones circunscripciones políticas prioritarias y estratégicas, en especial en las zonas de mayor vulnerabilidad climática; Continuar con la incorporación de criterios de sustentabilidad y educación ambiental en el Sistema Educativo Nacional, y fortalecer la formación ambiental en sectores estratégicos; Contribuir a mejorar la calidad del aire y reducir emisiones de compuestos de efecto invernadero mediante combustible más eficientes, programas de movilidad sustentable y la eliminación de los apoyos ineficientes a los usuarios de los combustibles fósiles; Lograr un mayor



monitoreo de la calidad del aire mediante una mayor calidad de los sistemas de monitoreo existentes y una mejor cobertura de ciudades. (Total, líneas de acción 11, página 135, PND 2013 – 2018).

Atribuciones de la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático.

Están previstas en la Ley General de Cambio Climático, artículo 47, que al efecto señala:

Que promoverá la coordinación las acciones entre las diversas dependencias y entidades de la Administración Pública Federal en materia de cambio climático. Esta, está integrada por catorce secretarías de Estado, cuyas principales atribuciones de dicha Comisión, son las siguientes:

Formular e instrumentar políticas nacionales de mitigación y adaptación al cambio climático, así como su incorporación a los programas y acciones sectoriales correspondientes.; Desarrollar los criterios de transversalidad e integralidad de las políticas públicas para enfrentar al cambio climático para que los apliquen las dependencias y entidades de la administración pública federal centralizada y paraestatal; Aprobar la estrategia nacional y las contribuciones determinadas a nivel nacional; Participar en la elaboración e instrumentación del Programa; Participar en la elaboración e instrumentación del Programa Especial de Cambio Climático y la Política Nacional de Adaptación; Proponer y apoyar estudios y proyectos de innovación, investigación, desarrollo y trans-

ferencia de tecnología, vinculados a la problemática nacional de cambio climático, así como difundir sus resultados; Proponer alternativas para la regulación de los instrumentos de mercado previstos en la ley, considerando la participación de los sectores involucrados; Impulsar las acciones necesarias para el cumplimiento de los objetivos y compromisos contenidos en la Convención y demás instrumentos derivados de ella; Formular propuestas para determinar el posicionamiento nacional por adoptarse ante los foros y organismos internacionales sobre el cambio climático; Promover, difundir y dictaminar en su caso, proyectos de reducción o captura de emisiones del mecanismo para un desarrollo limpio, así como de otros instrumentos reconocidos por el Estado mexicano tendentes hacia el mismo objetivo; Promover el fortalecimiento de las capacidades nacionales de monitoreo, reporte y verificación, en materia de mitigación o absorción de emisiones; Difundir sus trabajos y resultados así como publicar en el mes de septiembre un informe anual de actividades en la página de Internet prevista en el artículo 107 de esta Ley; Convocar a las organizaciones de los sectores social y privado, así como a la sociedad en general a que manifiesten su opinión y propuestas con relación al cambio climático; Promover el establecimiento, conforme a la legislación respectiva, de reconocimientos a los esfuerzos más destacados de la sociedad y del sector privado para enfrentar al cambio climático; Solicitar recomendaciones al consejo sobre las políticas, estrategias, acciones y metas para atender los efectos del cambio climático, con el deber de fundamentar y motivar

la decisión que adopte sobre aquellas; Emitir su reglamento interno; Revisar e informar, con el apoyo de la Secretaría y la opinión del Consejo, sobre el avance de la Estrategia Nacional y las contribuciones determinadas a nivel nacional, y Las demás que le confiera la presente Ley, sus Reglamentos y otras disposiciones jurídicas que de ella deriven. Para esto, se integraron varios grupos de trabajo, como son:

- Programa Especial de Cambio Climático (GT-PECC).
- Políticas de Adaptación (GT-ADAPT).
- Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación (GT-REDD).
- Mitigación (GT-MITIG).
- Negociaciones Internacionales en Materia de Cambio Climático (GT-INT).
- Comité Mexicano para proyectos de reducción de emisiones y de captura de gases de efecto invernadero (COMEGEI).
- Vinculación con la Sociedad Civil (GT-VINC).

Las atribuciones del Consejo de Cambio Climático están previstas en la Ley General de Cambio Climático, artículo 57, que al efecto se prevé, conforme a lo siguiente:

Asesorar a la Comisión en los asuntos de su competencia; Recomendar a la Comisión realizar estudios y adoptar políticas, acciones y metas tendientes a enfrentar los efectos adversos del cambio climático; Promover la participación social, informada y responsable, a través de las consultas públicas que deter-

mine en coordinación con la Comisión; Dar seguimiento a las políticas, acciones y metas previstas en la presente Ley, evaluaciones de la Estrategia Nacional, el Programa y los programas estatales; las contribuciones determinadas a nivel nacional; así como formular propuestas a la Comisión, a la Coordinación de Evaluación del INECC y a los miembros del Sistema Nacional de Cambio Climático; Integrar grupos de trabajo especializados que coadyuven a las atribuciones de la Comisión y las funciones del Consejo; Integrar, publicar y presentar a la Comisión, a través de su Presidente, el informe anual de sus actividades, a más tardar en el mes de febrero de cada año; y las demás que se establezcan en el Reglamento Interno o las que le otorgue la Comisión.

Los instrumentos de planeación están previstos en la Ley General de Cambio Climático, artículo 58, que al efecto señala:

- I. La Estrategia Nacional;
- II. El Programa, y
- III. La Política Nacional de Adaptación;
- IV. Las contribuciones determinadas a nivel nacional, y
- V. Los programas de las Entidades Federativas.

La Estrategia Nacional para enfrentar los efectos del Cambio Climático está prevista en la Ley General de Cambio Climático, artículos, del 60 al 64), que al efecto señala:

La Estrategia Nacional constituye el instrumento rector de la política nacional en el



mediano y largo plazos para enfrentar los efectos del cambio climático y transitar hacia una economía competitiva, sustentable y de bajas emisiones de carbono.

En la elaboración de la Estrategia Nacional se promoverá la participación y consulta del sector social y privado, con el propósito de que la población exprese sus opiniones para su elaboración, actualización y ejecución, en los términos previstos por la Ley de Planeación y demás disposiciones aplicables.

La Estrategia Nacional deberá reflejar los objetivos y ambición de las políticas de mitigación y adaptación al cambio climático establecidas en la presente Ley y contendrá entre otros elementos, los siguientes:

- I. Diagnóstico y evaluación de las acciones y medidas implementadas en el país, así como su desempeño en el contexto internacional;
- II. Escenarios climáticos;
- III. Evaluación y diagnóstico de la vulnerabilidad y capacidad de adaptación ante el cambio climático de regiones, ecosistemas, centros de población, equipamiento e infraestructura, sectores productivos y grupos sociales;
- IV. Tendencias y propuestas en la transformación del territorio y usos de recursos a nivel nacional, regional y estatal incluyendo cambio de uso de suelo y usos del agua;
- V. Diagnóstico de las emisiones en el país y acciones que den prioridad a los sectores de mayor potencial de reducción y

que logren al mismo tiempo beneficios ambientales, sociales y económicos;

- VI. Oportunidades para la mitigación de emisiones en la generación y uso de energía, quema y venteo de gas natural, uso de suelo y cambio de uso de suelo, transporte, procesos industriales, gestión de residuos y demás sectores o actividades;
- VII. Escenario de línea base;
- VIII. Emisiones de línea base;
- IX. Trayectoria objetivo de emisiones;
- X. Acciones y metas de adaptación y mitigación teniendo como año meta 2050, con metas intermedias de corto y mediano plazo, diferenciadas por fuente emisora y o sector emisor y con una hoja de ruta para asegurar su cumplimiento. Las metas establecidas en la estrategia constituyen porcentajes mínimos.
- XI. Requerimientos nacionales de investigación, transferencia de tecnología, estudios, capacitación y difusión;
- XII. Los demás elementos que determine la Comisión.

Los procesos de elaboración, están previstos en el punto 3.3., siendo los siguientes:

Los insumos técnicos y científicos; Reflejar el estado del arte de todos los temas tratados en la estrategia; Usar los documentos construidos y publicados en 2012 en materia de cambio climático; Aportaciones por todas las dependencias del CICC; Aportaciones de los Consejos Núcleos de Desarrollo Sustentable, Resultados del taller presencial, con más de 80 representantes de la sociedad civil organizada,

participativa del sector académico, privado y social.

La visión de la Estrategia Nacional de Cambio Climático, es a 10, 20 y 40 años, de la siguiente manera:

A 10 años.

- a) Sociedad/población: Se atiende a los grupos más vulnerables ante los efectos del cambio climático; La sociedad está involucrada y participativa activamente en el tema del cambio climático; b) Ecosistemas (agua, bosques, biodiversidad): Los ecosistemas más vulnerables se protegen y reciben atención y flujos de capital; El manejo ecosistémico y el manejo sustentable son ejes para la estrategia de conservación; Acciones de conservación y uso sustentable en los ecosistemas del país implementadas; Esquema de gestión territorial implementados; Esquemas de financiamiento apropiados para promover paisajes sustentables; Existen y se utilizan herramientas técnicas y tecnológicas para la adaptación a nivel local; Se implementan estrategias para transitar a una tasa de cero por ciento de pérdida de carbono en los ecosistemas originales; c) Energía: Tecnologías limpias integradas al desarrollo productivo nacional; Esquemas socioeconómicos incentivan el uso de energías limpias; Sistema de incentivos promueve las mayores ventajas del uso de combus-

tibles no fósiles, la eficiencia energética, el ahorro de energía y el transporte público sustentable con relación al uso combustibles fósiles; Cerca de alcanzar el 35% de la generación eléctrica proveniente de fuentes limpias; d) Reducción de 30% de emisiones respecto a línea base; México reduce sustancialmente las emisiones de contaminantes climáticos de vida corta; Las industrias paraestatales energéticas implementan esquemas de eficiencia energética en todas sus operaciones y aumentan el uso de energías renovables; Los centros urbanos con más de cincuenta mil habitantes cuentan con infraestructura para el manejo de residuos que evita emisiones de metano (CH_4) a la atmósfera; e) Sistemas productivos: Los impactos ambientales en el sector productivo se entienden, conocen, monitorean y enfrentan; Las tecnologías y prácticas productivas contribuyen a disminuir los riesgos al cambio climático, Se implementa NAMA en diversos sectores de la economía; f) Sector privado/industria: Las empresas incorporan criterios de cambio climático en sus proyectos productivos; Las principales fuentes emisoras de GEI reportan su componente de emisiones en el Registro Nacional de Emisiones; Las empresas reducen sus emisiones de gases y compuestos y aprovechan las oportunidades de eficiencia energética, ahorro de energía y uso de energías limpias y renovables; g) Movilidad: Los sectores público y pri-



vado adoptan sistemas de movilidad sustentables; Esquemas socioeconómicos incentivan el uso de transporte sustentable; Uso común de vehículos eléctricos en transporte público.

A 20 años.

- a) Sociedad/población: La sociedad está comprometida con la tarea de reducir los efectos del cambio climático; Los asentamientos humanos han ampliado su capacidad adaptativa a los embates del cambio climático; b) Ecosistemas (agua, bosques, biodiversidad): Los ecosistemas y las especies que los habitan son aprovechados y conservados de manera sustentable; Los recursos naturales son valorados económicamente de manera correcta y adecuada; Existe la infraestructura suficiente para un manejo sustentable y eficiente del agua; El uso eficiente de los recursos hídricos ayuda a restaurar las funciones ecológicas y físicas de los cuerpos de agua; El desarrollo económico y social del país es potenciado a través del mejoramiento del capital natural del país; c) Energía: Al menos 40% de la generación de energía eléctrica proviene de fuentes limpias; La generación de electricidad mediante fuentes limpias crea empleo, incluyendo a los sectores vulnerables; Los sectores residencial, turístico e industrial utilizan fuentes diversas de energía limpia, esquemas de eficiencia energética y ahorro de energía; d) Emisiones: Creci-

miento económico desacoplado de la dependencia a combustible fósiles y sus impactos ambientales; Se minimizan las emisiones de contaminantes climáticos de vida corta; e) Sistemas productivos: Tasa positiva de sumideros forestales de carbono; El manejo forestal sustentable frena la deforestación; Las prácticas de manejo sustentable en sectores extractivos, agropecuarios y forestales aumentan la productividad, disminuyen la vulnerabilidad y conservan el suelo; f) Sector privado/industria: Las empresas manejan integralmente sus residuos; Se implementan esquemas de producción y consumo sustentable; g) Movilidad: Los planes de desarrollo urbano integran sistemas de transporte sustentable para cubrir las necesidades de la población de forma limpia, eficiencia y segura; El transporte de carga es multimodal eficiente y de bajas emisiones.

A 40 años.

- a) Sociedad/población: La sociedad se integra culturalmente y socialmente al combate al cambio climático; Sociedad rural poco vulnerable; b) Ecosistemas (agua, bosques, biodiversidad): El balance hídrico se asegura mediante el uso sustentable y eficiente del agua; La conservación y el uso sustentable de los ecosistemas ayuda a la resiliencia de los mismos al cambio climático; Niveles adecuados de resiliencia

a nivel local; c) Energía: La generación de energía limpia soporta el desarrollo económico de todos los sectores productivos de forma equitativa y sustentable; Al menos el 50% de la generación de energía eléctrica proviene de fuentes limpias; d) Emisiones: Reducción del 50% de emisiones respecto a las emisiones del año 2000; e) Sistemas productivos: Los sistemas productivos son resilientes ante los efectos del cambio climático; f) Sector privado/ industria: Las empresas tienen ciclos sustentables de producción; g) Movilidad: Uso común de trenes y vehículos eléctricos.

3.5. Los Compromisos de México ante el Cambio Climático para el periodo 2020 – 2030.

México, se comprometió a instrumentar sus marcos normativos e institucionales, aprobando la Ley General de Cambio Climático (LGCC), diseño e implementación de los instrumentos de carácter institucional, como las políticas públicas.

En el año 2012, se aprobó la LGCC y se creó el Fondo de Cambio Climático.

En el 2013, se instaló el Consejo de Cambio Climático, se aprobó la estrategia nacional de cambio climático, visión 10-20-40, aprobó el

órgano descentralizado del gobierno federal, denominado Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, se instaló la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático.

En 2014, se aprobó el Reglamento del Registro Nacional de Emisiones, se presentó el INEGCEI en la COP20, se instaló el Sistema Nacional de Cambio Climático, se aprobó el PECC 2014-2018.

En 2015, se entregaron los compromisos 2020 – 2030 por parte de México.

Asimismo, México se comprometió, primordialmente a dos cosas:

Primero. A disminuir – 51% de Emisiones nacionales de carbono negro, de manera o condicionada para 2020 -2030. (-51 % CN).

Segundo. A disminuir en – 22% de Emisiones nacionales de gases de efecto invernadero, de manera o condicionada para 2020- 2030. (-22 % GEI).

En estas condiciones, las reducciones nacionales de carbono negro podrá incrementarse a 70% y las de GEI alcanzar un 36% al 2030, llegando así a una trayectoria planteada en la Ley General de Cambio Climático, reduciendo al 2050 el 50% del volumen de las emisiones con relación a las registradas en el año 2000.

Los compromisos en los sectores energético e industrial, son los siguientes:



Generar 35% de energía limpia para el año 2024, así como el 43% al 2030; La energía limpia incluye fuentes renovables, la cogeneración eficiente con gas natural y termoelectricas con captura de CO₂; Sustituir en la industria nacional los combustibles pesados por gas natural, energías limpias y biomasa; Reducir en 25% las fugas, venteo y quemas controladas de metano; Controlar las prácticas negras de hollín en equipos e instalaciones industriales.

En el sector del transporte:

Homologar en el Tratado de Libre Comercio de América del Norte la normativa ambiental tanto para los vehículos nuevos como en circulación, vehículos no carreteros como: locomotoras, barcos, maquinaria móvil agrícola y de construcción; Abastecer de gasolina y diésel de ultra bajo azufre; Incrementar la flota vehicular a gas natural, disponer de combustibles limpios; Modernizar el parque vehicular y reducir la importación de automóviles usados; Impulsar el transporte multimodal de carga y de pasajeros.

Para el sector urbano:

Impulsar la construcción de edificaciones y la transformación hacia ciudades sustentables, con eficiencia energética y bajo carbono; Promover el uso doméstico de calentadores y celdas solares; Recuperar y usar el metano en los rellenos sanitarios municipales y las plantas de tratamiento de aguas residuales.

Sectores forestal y agropecuario:

Alcanzar para el año 2030 la tasa cero de deforestación, Mejorar el manejo forestal; Impulsar la tecnificación sustentable del campo; Promover biodigestores en granjas agropecuarias y recuperar pastizales.

3.6. Los compromisos en materia de mitigación:

Privilegiar las acciones con mayor potencial de reducción de emisiones al menor costo y que, a la vez, brinden con-beneficios en materia de salud y bienestar para la población; las emisiones están definidas como "Liberación a la atmosfera de gases de efecto invernadero y/o sus precursores y aerosoles en la atmosfera; En los casos de compuestos de efectos invernadero, en una zona y un periodo de tiempo específico". Por esta razón, tanto el ENCC, el PECC y el INDC de México, prevén planes prioritarios de mitigación la reducción de las emisiones de los contaminantes climáticos de vida corta (CCVC).

3.7. Los compromisos en materia de adaptación, son los siguientes:

Proteger a la población de los efectos del cambio climático, como son los fenómenos

hidrometeorológico lógicos extremos y, paralelamente aumentar la resiliencia de la infraestructura estratégica, ecosistemas que albergan biodiversidad; Fortalecer la resiliencia a un 50% en los municipios más vulnerables en México; Establecer sistemas de prevención y alerta temprana y gestión de riesgos en todos los órdenes del gobierno mexicano; Alcanzar una tasa cero de deforestación en 2030, Impulsar la adquisición, adecuación e innovación tecnológica de apoyo a la adaptación en aspectos en materia de protección de infraestructura, agua, transporte, recuperación de suelos.

3.8. Decreto Promulgatorio del Acuerdo de París

Es el Acuerdo de París, suscrito en París, publicado en el Diario Oficial de la Federación el día doce de diciembre de dos mil quince, que en lo conducente, señalaremos algunos de los aspectos más importantes de dicho acuerdo:

Tiene por objeto reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, en el contexto del desarrollo sostenible y de los esfuerzos para erradicar la pobreza. Para esto, se requiere cumplir con lo siguiente:

Mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de los 2 °C con respecto a los niveles preindustriales. Limitar el aumento de la temperatura a 1.5 °C con res-

pecto a los niveles preindustriales, para reducir los riesgos y los efectos del cambio climático; Aumentar la capacidad de adaptación a los efectos adversos del cambio climático y promover la resiliencia al clima y un desarrollo de baja emisiones de gases de efecto invernadero para no comprometer la producción de alimentos; Situar los flujos financieros en un nivel compatible con una trayectoria que conduzca a un desarrollo resiliente al clima y con bajas emisiones de gases de efecto invernadero. (Acuerdo de París, artículo 2, incisos a, b y c.).

Señala dicho acuerdo, que para cumplir con el objetivo a largo plazo cada parte deberá comunicar una contribución determinada a nivel nacional cada cinco años, así como rendir cuentas de sus contribuciones. (Acuerdo de París, artículo 4, del 1 al 19).

Las partes reconocen que algunas Partes podrán cooperar voluntariamente en la aplicación de sus contribuciones. (Acuerdo de París, artículo 6).

Para determinar el balance mundial, independiente de las previstas en el artículo 14 de este acuerdo, se deberá tomar en cuenta, entre otras, las siguientes:

- a). Reconocer los esfuerzos de adaptación de las Partes que son países en desarrollo.
- b). Mejorar la aplicación de las medidas de adaptación teniendo en cuenta la comunicación sobre la adaptación mencionada en el párrafo 10 del presente artículo.



- c). Examinar la idoneidad y eficiencia de la adaptación y el apoyo prestado para ella.
- d). Examinar los progresos globales realizados en el logro del objetivo mundial relativo a la adaptación que se enuncia en el párrafo 1 del presente artículo.

Por otro lado, para dar una respuesta mundial eficaz y a largo plazo al cambio climático y promover el crecimiento económico y el desarrollo sostenible es indispensable posibilitar, alentar y acelerar la innovación. Así como prestar apoyo financiero a los países en desarrollo. (Acuerdo de París, artículo 10, puntos 5 y 6).

México debe cooperar en la adopción de las medidas que correspondan para mejorar la educación, la formación, la sensibilización, participación de la sociedad, acceso público a la información sobre el cambio climático. (Acuerdo de París, artículo 12).

Cada una de las Partes, deben proporcionar periódicamente la siguiente información:

Informa de inventario nacional de las emisiones antropogénicas; Seguimiento de los progresos alcanzados; Información relativa a los efectos del cambio Climático; Los países desarrollados, suministrar información en materia financiera, en los apoyos a los países subdesarrollados; la información que comunique cada una de las Partes, se someterá a un examen técnico de los expertos, en términos de la decisión 1/CP.21.(Acuerdo de París, artículo 13).

Se hará periódicamente un balance de la aplicación del presente acuerdo para determinar el balance colectivo en el cumplimiento de su propósito, sus objetivos a largo plazo, como es el balance mundial, de manera global, facilitadora, examinando la mitigación y la adaptación.

Así como, de los resultados del balance mundial se aportará información a las Partes para que se actualicen y mejoren las acciones a nivel nacional y para aumentar la cooperación internacional en materia de cambio climático. (Acuerdo de París, artículo 14).

El Comité de expertos, funcionará de manera transparente, no contenciosa y no punitiva. Prestará especial atención a las respectivas circunstancias y capacidades nacionales de las Partes. (Acuerdo de París, artículo 15). Es importante mencionar, que la Conferencia de las Partes, es el órgano supremo de la Convención.

Por otro lado, las Partes que no sean partes en el presente acuerdo podrán participar como observadores en las deliberaciones, en cualquier periodo de las sesiones de la Conferencia de las Partes.

3.9. Resultados

Del análisis comparativo que se realizó, entre los compromisos, avances y metas, que México fijó para la reducción de emisiones nacionales de Carbono Negro de manera no condicionada para el 2020 – 2030, es – 51% de CN,

así como de emisiones nacionales de gases de efecto invernadero como metas de reducción de manera no condicionada para 2020 – 2030, es de – 22% GEI, dichos avances arrojaron los siguientes porcentajes, de acuerdo a los señalado en la última minuta de trabajo del año 2017, llevada a cabo por los expertos, que se refleja en el siguiente cuadro comparativo:

Los avances correspondientes al año 2015, en materia de *gases efecto invernadero*, y de *carbón negro*, se obtuvieron de la 2ª Sesión Ordinaria 2015, llevada a cabo el dos de octubre de dos mil quince, por la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (CICC), teniendo como meta para 2030, reducción de -22 % GEI, los siguientes:

Reducciones de GEI	Meta 2020	Avance %
Transporte	214	-18
Generación de electricidad	143	-31
Residencial y Comercial	27	-18
Petróleo y gas	123	-14
Industria	125	-5
Agricultura y ganadería	88	-8
Residuos	40	-28
USCUSS	32	-14

En materia de Carbono Negro, la meta de reducción de las emisiones nacionales, es de – 51% para el año 2020 y 2030, los avances al año 2015, son, los siguientes:

Reducciones de CN	Meta 2020	Avance %
Transporte	47	-83
Generación de electricidad	4	-33
Residencial y Comercial	16	-60
Petróleo y gas	3	-1
Industria	43	-16
Agricultura y ganadería	11	-23
Residuos	1	-88
USCUSS	4	-----

3.10. Comentarios finales.

México se comprometió a reducir las emisiones nacionales de Carbono Negro, a – 51% y de Gases de efecto invernadero a -22% ambos para los años 2020 y 2030, de manera no condicionada, pero deberá someter los resultados a la aprobación de la autoridad internacional en materia de cambio climático, cada cinco años. México debe promover la integridad ambiental, la transparencia, la exactitud, la exhaustividad, la comparabilidad y la coherencia, evitar la duplicidad de cómputo. Mediante acta de la primera sesión ordinaria 2016 de la Comisión Intersecretarial, llevada a cabo el día ocho de abril de dos mil dieciséis, se señaló, entre otros puntos, los siguientes:

Que México tiene como meta, lograr llegar a 1.5°C en materia de temperatura, prevista para que sea durante la mitad del Siglo; Que uno de



los escenarios, previstos, es que podríamos alcanzar una temperatura entre 2.7 o 3.2°C, por esta razón se tiene la obligación y con carácter preventivo, impulsar las opciones de las transferencias de tecnologías con el objeto de acelerar la transición del mundo a un mundo de bajas emisiones de carbono, y esto se debe reflejar en el balance mundial próximo a celebrarse.

3.11. Referencias

- Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, artículos 1 y 4 párrafos quinto y sexto.
- Decreto Promulgatorio del Acuerdo de París, hecho en París el 12 de diciembre de 2015, Diario Oficial de la Federación el 4 de noviembre de 2016.
- Gobierno de la República, 2015, Compromisos de Mitigación y Adaptación ante el Cambio Climático para el periodo 2020 – 2030. Cumbre Climática, Nueva York, Estados Unidos, 23 de septiembre de 2014.
- Acta de la 2ª Sesión Ordinaria, del 2 de octubre de 2015, Comisión Intersecretarial de Cambio Climático.
- Ley General de Cambio Climático, Diario Oficial de la Federación el 6 de junio de 2012. Última reforma publicada DOF 13-07-2018. Recuperado de: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC_130718.pdf
- Gobierno de la República, 2013, Plan Nacional de Desarrollo 2013 – 2018, Diario Oficial de la Federación, 20 de mayo de 2013.
- Acuerdo por el que se expide la Estrategia Nacional de Cambio Climático, Diario Oficial de la Federación el 3 de junio de 2013.
- Programa Especial de Cambio Climático 2014 – 2018.
- Fondo de Cambio Climático.
- Comisión Intersecretarial de Cambio Climático.
- Sistema Nacional de Cambio Climático.
- Reforma energética, 2013.
- SEMARNAT, 2012. *Quinta Comunicación Nacional ante la CMNUCC*. México: Gobierno Federal. Recuperado de: www2.ine.gob.mx/publicaciones/download/685.pdf

4

La Hidroenergía en México como medida de adaptación y mitigación ante el Cambio Climático

Ana A. Palacios Fonseca, Mario López Pérez
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532. Progreso,
Jiutepec, Morelos. México. C.P. 62550. E-mail: ana_palacios@tlaloc.imta.mx,
mario_lopezperez@tlaloc.imta.mx





RESUMEN

La generación de energía eléctrica a través de la hidráulica (hidroeléctrica) es una de las opciones más atractivas de energía limpia entre los esquemas existentes, por su alta flexibilidad de operación, su amplio ciclo de vida y el balance que brinda para la integración de fuentes intermitentes. Sin embargo se requiere un cambio en la matriz del desarrollo hidroeléctrico nacional, enfocado a la generación en pequeña escala, modernización de centrales, equipamiento en embalses existentes y al desarrollo de sistemas de almacenamiento por bombeo, entre los más importantes. Atendiendo los principios de sostenibilidad ambiental y viabilidad social, así como en un nuevo marco de gobernanza, dentro del binomio agua-energía. Asimismo, el nuevo esquema energético nacional establece el cumplimiento de las metas de energías limpias en un 50% en el 2050, de acuerdo a lo establecido en la Ley General de Cambio Climático, donde se menciona, además, como un importante detonador de mitigación y adaptación ante el cambio climático. El desarrollo tecnológico, la innovación y la colaboración nacional e internacional permitirán en un corto plazo, desarrollar la generación hidroeléctrica nacional.

4.1. Introducción

La generación de energía hidroeléctrica, es la tecnología más utilizada ya que ofrece una clara ventaja con respecto a otras tecnologías limpias utilizadas para la producción de energía, tanto en el ámbito nacional como en el internacional. Es una forma de generación con amplio ciclo de vida y con capacidad de dar soporte a la participación de otras fuentes de generación intermitentes como son la solar y la eólica. En sistemas bien planificados ofrece importantes beneficios complementarios, entre los que se pueden citar el desarrollo

de las comunidades en la zona de influencia de los proyectos, localización estratégica de reservas hídricas y derrama económica local por su alto porcentaje de integración nacional.

La Reforma Energética impulsa el uso de las energías limpias a través de La Ley de Transición Energética (LTE), impulsando los siguientes puntos: 1. Aprovechamiento sustentable de la Energía, 2. Incremento gradual de las Energías Limpias y 3. Reducción de la generación de emisiones contaminantes. Lo anterior va alineado a lo establecido en la Ley General de Cambio Climático (LGCC), en el

corto, mediano y largo plazo para impulsar un futuro bajo en carbono. Sin embargo, la generación hidroeléctrica en México se encuentra sin un avance en su desarrollo, en consecuencia, de la implementación de las nuevas reglas del Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) y que impactan la participación ante la entrada de tecnologías con mayor rentabilidad presente (solar y eólica) y que hacen uso de recursos renovables a costos altamente competitivos.

A través de mecanismos unificados para la colaboración y la difusión de los mejores procedimientos y los hallazgos científicos disponibles se podría impulsar el desarrollo hidroeléctrico: mediante la innovación tecnológica en equipos y componentes de generación; el uso de estructuras civiles modulares; la implementación de otras formas de explotación como son la mini y micro generación; el equipamiento de infraestructura hidráulica existente; el almacenamiento mecánico de energía por bombeo y los sistemas integrados solar-hidroeléctricos, como algunos de los elementos para alcanzar ese objetivo.

Se requiere incorporar formal y metodológicamente principios de sostenibilidad para equilibrar los factores ambientales, sociales y económicos, previendo un futuro en que el cambio climático puede influir en el suministro de agua y otros recursos, a medida que aumenta la demanda de energía renovable. Resulta fundamental considerar y exa-

minar las interacciones entre los proyectos hidroeléctricos y los otros usos del recurso hídrico.

4.2. Antecedentes

Las tecnologías consideradas limpias corresponden a centrales cuya fuente de energía y procesos de generación de electricidad producen emisiones o residuos, en cantidades menores que los umbrales establecidos en las diversas disposiciones aplicables. Para que una fuente de energía o proceso de generación eléctrica pueda ser considerado como Energía Limpia (EL), sus emisiones de CO₂ deberán ser menores a los 100 kilogramos por cada MWh generado.¹

México tiene un gran potencial en Energías Limpias gracias a sus condiciones geográficas y climáticas, ya que puede disponer del viento, la radiación solar, los océanos, los mares, los ríos, los yacimientos geotérmicos, los bioenergéticos (biomasa y biogás), el metano y otros gases asociados a residuos sólidos u orgánicos, la energía nuclear y la energía generada por las centrales de cogeneración eficiente. Mientras más amplia sean las tecnologías consideradas como limpias, menor será el costo de incorporar dichas tecnologías al sistema, esto permitirá contar con una matriz de generación eléctrica diversificada y mantener un balance eficiente y seguro del sistema.

¹ Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional, PRODESEN 2018-2032.



4.2.1. Ley General de Cambio Climático y la Transición Energética

En el 2015 se implementó la Reforma Energética y se establecieron regulaciones e instituciones para llevar a cabo la transición energética que requiere el país, basado en un modelo con más energías limpias y mejor gestión del consumo energético. La regulación más importante en materia de Energías Limpias en la Reforma Energética es la Ley de Transición Energética (LTE), la cual establece las metas de 25% de generación limpia para 2018 y 35% para 2024.²

Dichas metas también se encuentran alineadas a la Ley General de Cambio Climático (LGCC), que orienta el desempeño de México hacia una economía baja en carbono. En el Artículo Segundo Transitorio de la LGCC se asume una meta de reducirlas en 2020 un 30% con respecto a la línea base; así como un 50% de reducción de emisiones al 2050, en relación con las emitidas en el año 2000.³

Entre los puntos más destacados para la promoción de energías limpias en la LGCC, se mencionan los siguientes:

- Garantizar el derecho a un medio ambiente sano, a desarrollo sustentable y la preservación y restauración del equilibrio ecológico.
- Regular las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero
- Regular las acciones para la mitigación y adaptación al cambio climático
- Reducir la vulnerabilidad de la población y los ecosistemas del país frente a los efectos adversos del cambio climático
- Fomentar la educación, investigación, desarrollo y transferencia de tecnología e innovación
- Promover la transición hacia una economía competitiva, sustentable y de bajas emisiones de carbono

Asimismo, la LTE atiende la Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC), dentro de sus pilares de la Política Nacional de Cambio Climático donde promueve el manejo sustentable, eficiente y equitativo de los recursos naturales, así como del uso de energías limpias y renovables que permiten un desarrollo con bajas emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero.

Los hitos mas relevantes en este tema son:⁴

2 Ley de Transición Energética, LTE 2015.

3 Ley General de Cambio Climático (LGCC). DOF 02-04-2015.

4 Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC). Visión 10-20-40. 2015

10 años

- Tecnologías limpias integradas al desarrollo productivo.
- Esquemas socioeconómicos que incentiven el uso de Energías Limpias (EL).
- Sistema de incentivos
- Alcanzar el 35% de la generación eléctrica proveniente de EL.

20 años

- 40% de la generación de energía eléctrica proviene de fuentes limpias.
- La generación mediante fuentes limpias crea empleos.
- Los sectores residencial, turístico e industrial utilizan fuentes diversas de EL.

40 años

- La generación de EL soporta el desarrollo económico de todos los sectores productivos de forma equitativa y sustentable.
- El 50% de la generación de energía eléctrica proviene de fuentes limpias.

Figura 4.1. Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC). Visión 10-20-40. 2015

4.2.2. Contexto del cambio climático y sus estrategias de mitigación en el corto y largo plazo

En las últimas décadas se ha identificado un importante incremento en la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) alterando la composición química atmosférica. Esta concentración ha incrementado en un 40% los valores medios registrados en el último medio millón de años, por lo que se espera un incremento en la temperatura promedio del planeta, que puede sobrepasar los 4°C. Como consecuencia de eso se esperan graves impactos ambientales, económicos y sociales, por lo que es imprescindible emprender acciones inmediatas que minimicen el agravamiento y los impactos del cambio climático.⁵

4.3. La hidroenergía en México como medida de adaptación y mitigación ante el cambio climático

En el tema de hidroenergía, México cuenta con importantes recursos hídricos y su potencial hidroeléctrico está en función del almacenamiento de las presas, que es del orden de 150 mil millones de metros cúbicos, este volumen depende de la precipitación y los escurrimientos en las distintas regiones del país. Actualmente se tienen 181 presas que representan casi el 80% de la capacidad total de almacenamiento del país.

De acuerdo con datos del PRODESEN 2018-2032, en el 2017 el 70.5% de la capacidad ins-

5 Ciencia del Cambio Climático, ENCC.

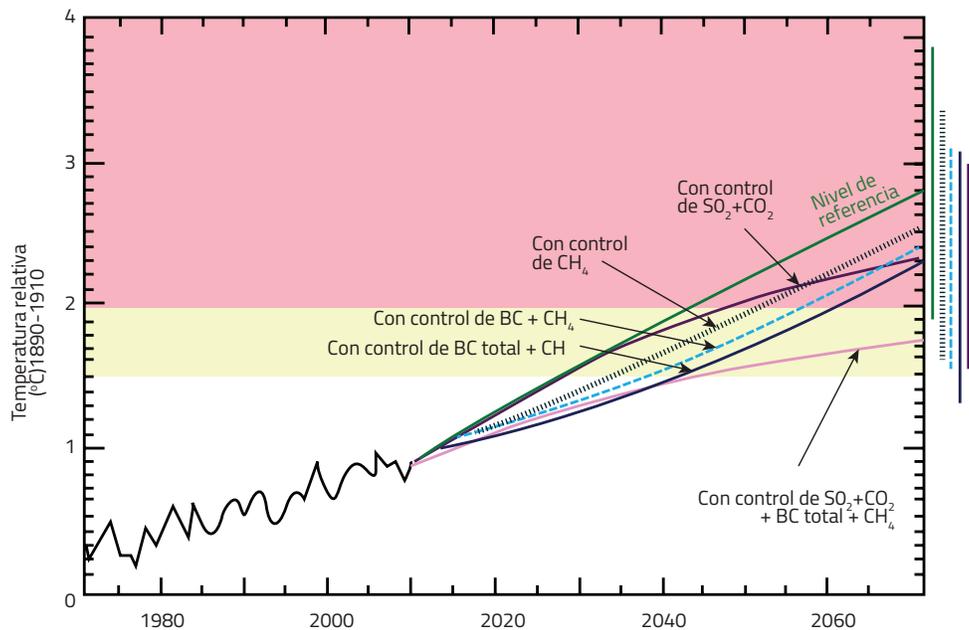


Figura 4.2. Estrategias de mitigación en el corto y largo plazo. ENCC Visión 10-20-40
 Fuente: Shindell D., J. K., Vignati, E., Van Dingenen, R., et al. (13/enero/2012). "Simultaneously mitigating near-term climate change and improving human health and food security". Science. Vol. 335: pp. 183-189. Recuperado de: <http://www.sciencemag.org/content/335/6065/183.full>

talada provino de tecnologías convencionales (53,358 MW) y el 29.5% de tecnologías limpias (22,327 MW).

En capacidad instalada, en 2017 las hidroeléctricas representaron el 17%, con 12,589 MW en 84 centrales hidroeléctricas: 1 de cada 4 MW instalados a nivel nacional.

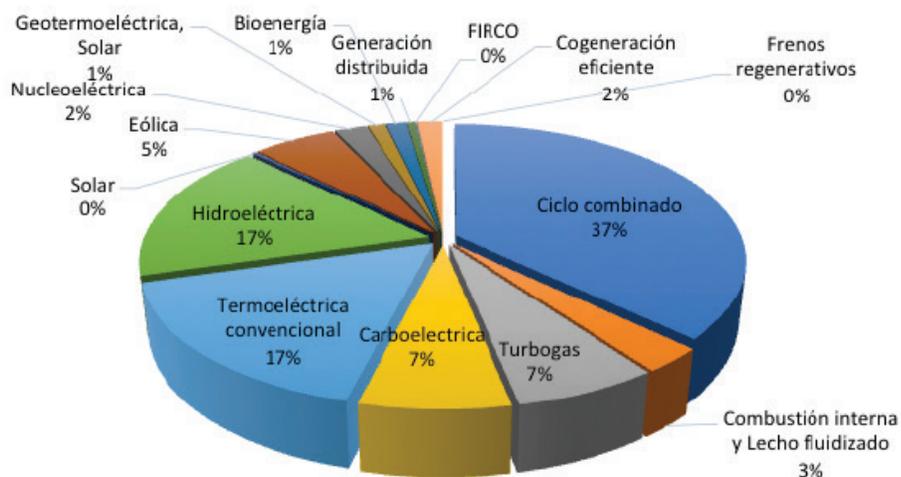


Figura 4.3. Capacidad instalada por tipo de fuente. PRODESEN 2018-2032 SENER

En generación anual, las energías limpias contribuyen con el 20.3%, es decir 64,868 GWh, del cual las hidroeléctricas aportan el 46%, que en suma con la energía eólica (15%), representan el 61% de la generación nacional.⁶

4.4. Retos y oportunidades de la hidroenergía en México

Se requiere de la innovación tecnológica y un enfoque multipropósito en la generación hidroeléctrica: producción de energía, gestión del agua, protección del medio ambiente y socialización de los proyectos, así como colaboración multidisciplinaria e interinstitucional reflejada en las políticas nacionales. La

hidroenergía requiere atención y avances en los rubros siguientes:

- Tecnología y modalidades de generación

La innovación tecnológica en equipos y componentes, tales como el diseño y evaluación de turbinas bajo una base ambiental y el uso de estructuras civiles modulares, así como la explotación a través de otras modalidades de generación; el equipamiento de infraestructura hidráulica existente y el almacenamiento mecánico de energía por bombeo, son algunos de los elementos para alcanzar el objetivo.

- Operación y Desarrollo Sustentable

Mediante principios de sostenibilidad: ambiental, social y económico, previendo un futuro en que el cambio climático influye en

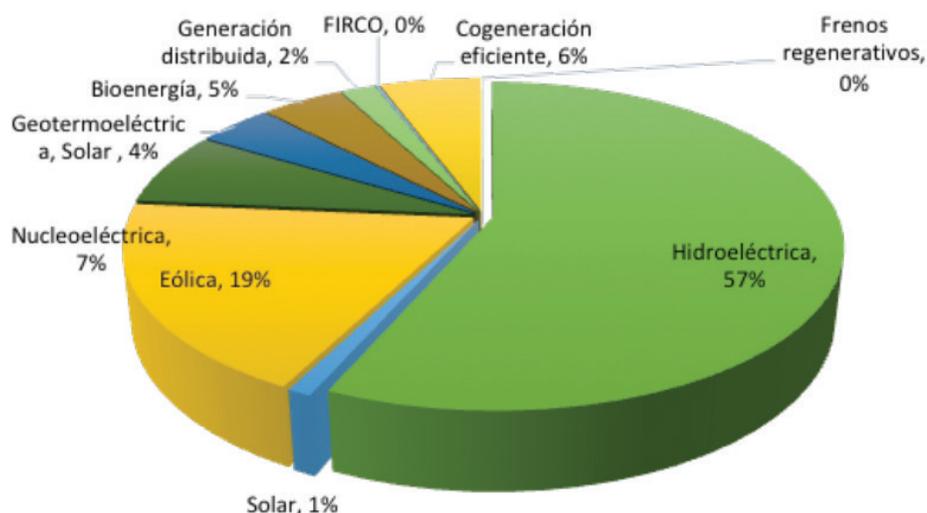


Figura 4.4. Capacidad instalada en Energías Limpias. PRODESEN 2018-2032 SENER

6 Programa de Desarrollo del Sector Eléctrico Nacional, PRODESEN 2018-2032. SENER.



la disponibilidad de agua y otros recursos, a medida que aumenta la demanda de energía renovable, así como para otros usos.

- Mejores ingresos y estructuras de mercado

Además de generar energía, capacidad y servicios auxiliares a la red, la energía hidroeléctrica ofrece flexibilidad operativa, almacenamiento de energía y servicios esenciales para la confiabilidad continua del sistema eléctrico nacional. Las estructuras del mercado deben disponer de mecanismos de compensación más apropiados a la energía hidroeléctrica nueva y existente por los numerosos servicios y beneficios que proporciona.

- Difusión tecnológica y educación

La difusión de los mejores procedimientos y hallazgos científicos disponibles podrían permitir a los participantes y reguladores obtener beneficios mutuos aumentando la eficacia del proceso de aprobación, proporcionando a las partes interesadas de la hidroelectricidad una mayor base de conocimientos, un acceso más fácil a la información relevante para sus proyectos y mayores mecanismos de colaboración. La energía hidroeléctrica como fuente de energía renovable confiable debe ser articulada y diseminada para aumentar la conciencia de sus beneficios y sus impactos, actualizando periódicamente las mejores prácticas para el mantenimiento, la operación y la construcción de instalaciones hidroeléctricas.

4.5. Líneas de investigación y sus esquemas de aprovechamiento

Las oportunidades de desarrollo de la generación hidroeléctrica se plantean dentro de tres líneas principales de investigación y en cuatro esquemas de aprovechamiento:

- I. Investigación y desarrollo tecnológico para la innovación.
- II. Seguridad hídrica, medio ambiente y sociedad
- III. Regulación y participación en el MEM

Y a través de cuatro esquemas de aprovechamiento hidroeléctrico:

1. Nuevas centrales de generación,
2. Infraestructura hidráulica existente,
3. Modernización y/o repotenciación de centrales y,
4. Almacenamiento por bombeo hidráulico.

4.5.1. Nuevas centrales de generación: con embalse y a filo del agua

Se refiere al potencial con nuevas centrales de generación hidroeléctrica con capacidad instalada menor o igual a 30 MW o con una densidad de potencia mayor o igual a 10 watts/m², lo que se considera energía renovable

según la normatividad en México. Dentro de este tipo de centrales se ubican las micro, mini y pequeñas centrales de generación, ya sea con embalse o a filo del agua (con turbinas hidrocínéticas), con potencial de hacer aportes importantes en generación distribuida y democratización del acceso a la energía eléctrica en zonas aisladas.

Este tipo de centrales, por sus dimensiones y características, no tienen asociados los efectos sociales y ambientales propios de las grandes centrales, lo que amplía la posibilidad de licencia social para la concreción de las inversiones.

Para lograr lo anterior se requiere la identificación del potencial hidroeléctrico, para lo

cual es necesario articular una metodología con los recursos tecnológicos y científicos disponibles como los sistemas de información geográfica (SIG's), tecnologías informáticas, bases de datos ambientales detallados, modelos de simulación, técnicas de optimización, tecnología de infraestructura y equipamiento hidroeléctrico, economía de la energía, marco regulatorio, evaluación de proyectos, impactos ambientales y sociales, entre otros. De esta forma será posible aprovechar el escurrimiento de las corrientes naturales de una cuenca, principalmente mediante los aprovechamientos *Al Hilo del Agua* y en sistemas en cascada, estudiando criterios de generación de energía máxima y mayor viabilidad económica, ambiental y social.



Figura 4.5. Líneas de investigación para el desarrollo de la generación hidroeléctrica en México.



4.5.2. Equipamiento en infraestructura hidráulica existente

Este aprovechamiento hidroeléctrico ofrece grandes ventajas, consiste en el equipamiento de instalaciones no concebidas originalmente para la generación de energía eléctrica, como son: presas de almacenamiento, derivadoras, canales de riego, acueductos, plantas de tratamiento, obras de regulación, entre otras, respetando las necesidades actuales en los usos del agua y sin afectar el entorno económico, social y ambiental.

Durante el 2017 se realizó un estudio que identifica, de acuerdo con datos del Sistema de Seguridad de Presas (SISP) de la CONAGUA, un total de 4,903 estructuras hidráulicas existentes, de las cuales se estiman susceptibles de generación hidroeléctrica 2,917 estructuras. Asimismo, las estructuras con posibilidad de equipamiento son aquellas con uso principalmente en riego, y que cuentan con una obra de toma. Se identifican 362 estructuras hidráulicas que tienen esas características y en los rangos de pequeña (menor a 30 MW), mini (1 a 5 MW) y micro (menor a 1 MW). El potencial identificado es de 484.41 MW y 1,697 GWh de generación anual.⁷



Figura 4.6. Infraestructura existente con potencial de 5 a 30 MW (Pequeñas centrales)

7 Sistema de Seguridad de Presas, SISP, CONAGUA, 2017



Figura 4.7. Presa derivadora “Juan Sabines”, Chiapas 1982

4.5.3. Modernización y repotenciación de centrales de generación

Este esquema de explotación hidroeléctrica puede resultar altamente competitivo, ya que la vida útil de muchas instalaciones puede superar los 100 años y es usual contar con equipos con bajas eficiencias de operación, ya sea por su diseño original o por las pérdidas acumuladas durante su vida de servicio, por lo cual se puede trabajar en la modernización de equipos e instalaciones auxiliares que permitan recuperar las eficiencias operativas originales y/o incrementar la capacidad de generación.

También durante el 2017 se analizó la situación de las presas actuales considerando lo publi-

cado en el Sistema de Seguridad de Presas (SISP): de las 101 presas de generación actual tanto de CFE como de privados, se identifican 54 presas mayores a 50 años de operación, siendo la más antigua y sin rehabilitación la Central Portezuelos 1 en Atlixco, Puebla; La Laguna, en Tecojotal, Hidalgo construida en 1903 y Umécuaro en 1904, operadas actualmente por CFE; y la Generadora Fénix con la Central Necaxa, en Puebla.

Asimismo, de las presas con capacidad instalada menor a 30 MW se identifican 43 centrales, con una vida útil mayor a 50 años: destaca la Derivadora Echeverría en Puebla, construida en 1880 y una capacidad instalada de 2.80 MW, entre otras.⁸

⁸ Inventario Nacional de Energías Renovables (INERE), Cooperación de América del Norte en Información Energética. <https://dgel.energia.gob.mx/inere/>, <http://www.nacei.org/#!/overview>

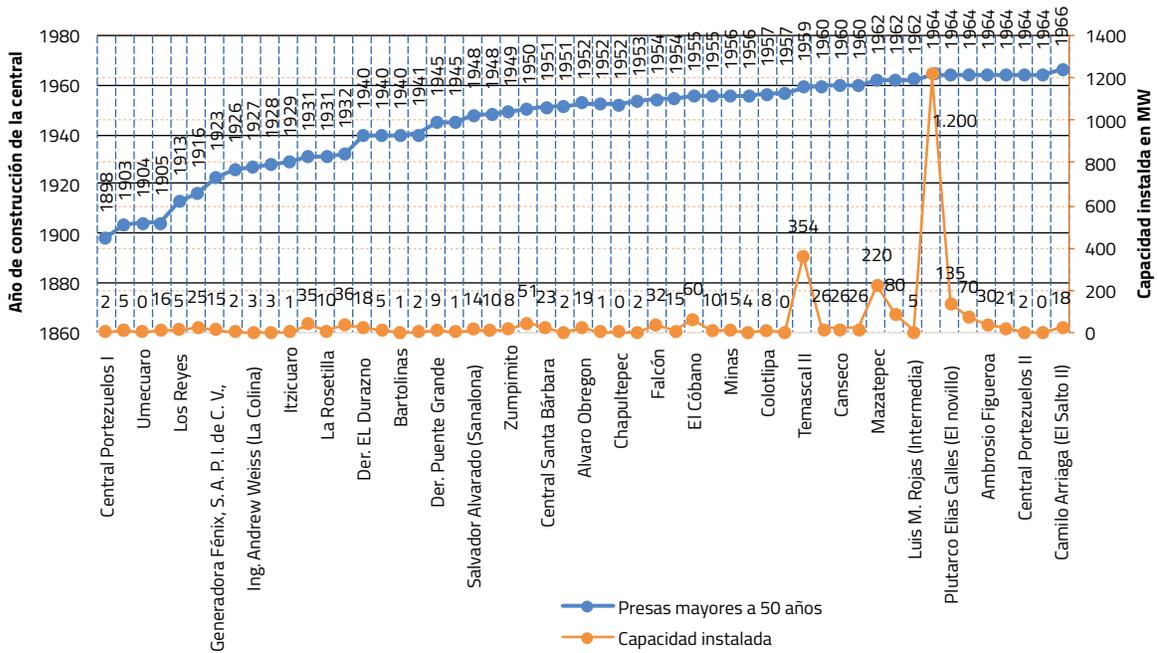


Figura 4.8. Centrales actuales mayores a 50 años



Figura 4.9. Centrales actuales con más de 50 años y menores a 30 MW



Figura 4.10. Presa Adolfo Ruíz Cortínez, "Mocuzari", Álamos, Sonora, 1955

4.5.4. Almacenamiento de energía por bombeo hidráulico

El almacenamiento de energía por bombeo permite satisfacer las horas de demanda pico, utilizando energía para el bombeo de agua en las horas de baja demanda (energía barata) y utilizando la energía potencial almacenada para generar energía en las horas de demanda máxima (energía cara). A estos atractivos se suma el hecho de que se dispone de la tecnología y experiencia para concebir sistemas de almacenamiento de cualquier capacidad, pues se trata de centrales hidroeléctricas en las que se añade el equipo de bombeo. En muchos casos se utiliza el mismo conjunto turbina-generador tanto para bombear como para generar (sistemas reversibles).

Actualmente en países con una participación mayor de fuentes intermitentes de energía,

como es el caso de los Estados Unidos de Norteamérica y diversos países europeos, este esquema de almacenamiento brinda una alta competitividad y funcionalidad.

A pesar de las ventajas económicas y funcionales que ofrecen este tipo de sistemas en México no se han implementado y la experiencia se limita a un número reducido de estudios preliminares.

4.5.5. Seguridad hídrica, medio ambiente y sociedad

Es importante destacar que las presas son proyectos multipropósitos que proveen de seguridad hídrica en varios sentidos: suministran un caudal ambiental, mejoran la calidad del agua, recargan acuíferos, controlan avenidas y sequías, suministran agua a la población, la industria, al turismo, proveen alimentos, pesca,



agricultura y ganadería, recreación y desarrollo inmobiliario, además de almacenar energía. Asimismo, los embalses minimizan los riesgos por sequías e inundaciones, siendo este el objetivo principal de control que hace la CONAGUA.

La planeación en el largo plazo debe estar alineada tanto del sector agua como energía, contribuyendo a elevar la calidad de vida de los pobladores en las diversas regiones, ampliando el capital regional y los activos con beneficios locales claros. Asimismo, tienen un papel fundamental en la seguridad hídrica ya que se planea como un objetivo estratégico a largo plazo, en horizontes de 50 años y cuyo objetivo es atender los tres grandes retos de la seguridad hídrica:

- El riesgo por la falta de disponibilidad al aumentar la capacidad de regulación de los escurrimientos,
- El riesgo por la contaminación del recurso y,
- Los riesgos asociados a los fenómenos naturales o antropogénicos.

4.6. Conclusiones y recomendaciones

En México, un gran potencial hidroeléctrico se encuentra principalmente en las zonas

sur-sureste y pacífico norte. Los estados de Chiapas, Tabasco, Oaxaca y Veracruz, y representan el mayor potencial y es donde se han construido grandes centrales; no obstante, se tienen cuencas que se pueden aprovechar con desarrollos de menor escala, pero que requieren ser evaluadas.

Es importante recordar que los sistemas de agua y energía del mundo se encuentran estrechamente unidos, estos requieren cantidades significativas de agua en casi todos los procesos energéticos, por lo que la generación de electricidad es sensible a la disponibilidad de agua. Los proyectos hidroeléctricos son multipropósitos que deben estar alineados a la seguridad hídrica del país, para lo cual requieren una trayectoria de desarrollo sostenible donde la gestión de los retos del agua y de la energía deben trabajar de manera integrada.

Asimismo, el desarrollo de la hidroelectricidad requiere de tener avances significativos en la tecnología y la inversión privada para lo cual es necesaria la investigación y el desarrollo tecnológico, así como la innovación para el desarrollo de nueva infraestructura, modernización y repotenciación de centrales existentes, el uso de bombes y otros componentes que ayuden a incrementar el uso de estas energías.

5

Peligro, vulnerabilidad y riesgo por sequía en el contexto del cambio climático en México

David Ortega-Gaucin, Jesús de la Cruz Bartolón y
Heidy Viviana Castellano Bahena
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col.
Progreso, C.P. 62550, Jiutepec, Morelos. E-mail: dortega@tlaloc.imta.mx





RESUMEN

El cambio climático está provocando una intensificación en la variabilidad climática natural, con un aumento en la frecuencia y severidad de las sequías en muchas partes del mundo. El peligro por sequía se refiere a la probabilidad de que ocurra un evento de sequía en un espacio y tiempo determinados con suficiente intensidad como para producir daños; la vulnerabilidad ante la sequía es el grado en que un sistema es susceptible e incapaz de hacer frente a los efectos adversos, daños o perjuicios causados por este fenómeno natural; y el riesgo por sequía está determinado por la confluencia del peligro y la vulnerabilidad. Con base en estos conceptos, en este artículo se presentan los resultados de la aplicación de una metodología desarrollada por los autores para determinar índices municipales de peligro, vulnerabilidad y riesgo por sequía en México. Los resultados indican que la metodología es viable para su aplicación a nivel nacional, e inclusive puede ser adaptado para aplicarse a nivel estatal o regional. Su principal ventaja es que se basa en un procedimiento analítico objetivo que permite identificar los municipios más vulnerables desde los puntos de vista económico, social y ambiental, y aquellos con mayor propensión y riesgo de ser afectados por sequía. Se concluye que los resultados obtenidos pueden ser útiles para los tomadores de decisiones y los responsables de formular políticas públicas en varios sentidos, tales como: establecer prioridades en la implementación de medidas de prevención y mitigación; entender dónde y cómo mejorar las capacidades de adaptación; entender dónde y cómo disminuir la exposición y la sensibilidad; y, en última instancia, optimizar la distribución de recursos de los diversos programas gubernamentales orientados al desarrollo social, los cuales contribuyen al fortalecimiento de capacidades para hacer frente a los fenómenos hidrometeorológicos extremos y a la adaptación al cambio climático.

Palabras clave: Sequía, vulnerabilidad, riesgo, prevención, mitigación, capacidad de adaptación.

5.1. Introducción

El cambio climático global ha provocado de forma gradual, la intensificación de la variabilidad climática natural, con un aumento en la frecuencia y severidad de los fenómenos hidrometeorológicos extremos (como las sequías y las inundaciones) que dañan los bienes y la integridad física de las personas, en una cadena compleja de impactos que afectan prácticamente a todas las dimensiones del desarrollo humano (Landa *et al.*, 2008). La sequía es un fenómeno natural que forma parte intrínseca del clima y al que eventualmente todos los lugares del planeta están expuestos, incluso las zonas más lluviosas del mundo. Se caracteriza por ser un evento inevitable y todavía poco predecible, no tiene epicentro ni trayectoria precisa, es de avance lento y gradual, y abarca grandes extensiones geográficas, razones por las cuales se hace difícil identificar sus límites espaciotemporales y proporcionar ayuda a la población afectada por el fenómeno (Ortega-Gaucin, 2013).

De acuerdo con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2013), las tendencias previstas para el siglo XXI como resultado del cambio climático indican una menor disponibilidad natural de agua en muchas regiones del mundo (Figura 5.1).

En el caso específico de México, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2016) ha elaborado mapas con mayor detalle para la república mexicana, con base en los nuevos escenarios de emisión de las denominadas Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés). En la Figura 5.2 se presentan los mapas de anomalía de precipitación esperada para el período 2015-2039, para los escenarios RCP 6.0 y RCP 8.5. En ambos casos se esperan disminuciones en la precipitación del orden de -10 a -20% en la mayor parte del norte del país y de 0 a -10% en el resto de la república, con excepción de algunas zonas ubicadas en estados del sureste (Chiapas, Oaxaca y Quin-

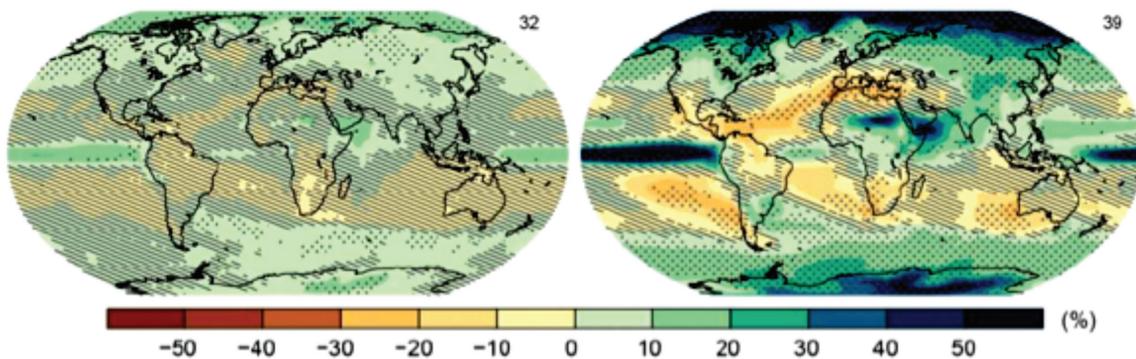


Figura 5.1. Cambios esperados en la precipitación promedio mundial para el periodo 2081-2100 respecto del periodo 1986-2005, con base en los escenarios RCP 2.6 (izquierda) y RCP 8.5 (derecha). Fuente: IPCC (2013).



tana Roo) donde se esperan incrementos en la lluvia de 0 a 10% bajo el escenario RCP 6.0.

En este contexto, como consecuencia de la disminución de la lluvia y el aumento asociado de la temperatura y la evaporación en gran parte del país, es de esperarse que las sequías ocurran con mayor frecuencia y severidad, sobre todo en los estados del norte, los cuales se caracterizan por tener climas secos y semi-secos, donde la precipitación promedio oscila entre 300 y 500 milímetros anuales.

Debido al cambio climático, el peligro de que ocurran sequías severas está aumentando y, dado el incremento en la vulnerabilidad, la condición de riesgo alcanza niveles críticos con mayor frecuencia. Para establecer cuánto es mucho o poco riesgo se requiere cuantificar, al menos en términos relativos, el peligro y la vulnerabilidad. A través de la construcción de escenarios de riesgo cuantitativos, los tomadores de decisiones podrán priorizar las acciones de adaptación necesarias para pre-

pararse a un clima diferente al actual (Magaña, 2013).

Ante estas circunstancias cabe preguntarse ¿Cuál es la vulnerabilidad, el peligro y el riesgo por sequía que existe actualmente en México y cómo podrían comportarse estas variables en el futuro cercano como consecuencia del cambio climático? Para dar respuesta a esta interrogante es necesario conocer la distribución espacial y dimensionar a través de indicadores e índices cuantitativos la vulnerabilidad, el peligro y el riesgo de nuestro país ante la sequía. No obstante, no existe una metodología que sea unánimemente aceptada para este propósito, por lo que el presente trabajo tiene como objetivo proponer una metodología para determinar índices y mapas de peligro, vulnerabilidad (económica, social y ambiental) y riesgo por sequía en México, usando indicadores relativos a escala municipal. Estos índices y mapas pueden ser útiles para los tomadores de decisiones y los responsables de formular políticas públicas para identificar prioridades de inversión en reducción de la vulnerabilidad,

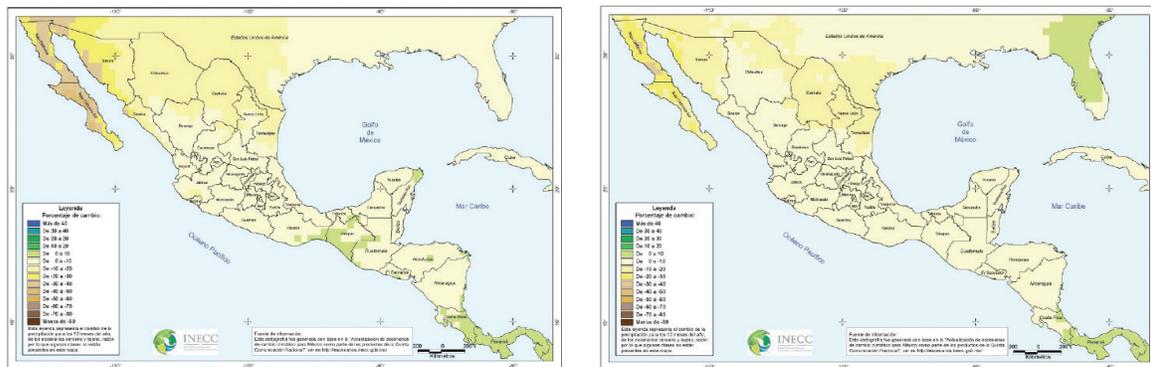


Figura 5.2. Cambios esperados en la precipitación promedio anual de México para el período 2015-2039, según los escenarios RCP 6.0 (izquierda) y RCP 8.5 (derecha). Fuente: INECC (2016)

y para identificar y proponer acciones efectivas de gestión del riesgo, considerando aspectos económicos, sociales y ambientales.

5.2. Los conceptos de peligro, vulnerabilidad y riesgo

El climático peligroso, en general, es una condición de tiempo o clima que puede provocar efectos negativos en un sistema vulnerable. Por lo general, el peligro se estima con información meteorológica o climática histórica y se representa por la probabilidad de que ocurra un fenómeno meteorológico particular (por ejemplo, ciclón tropical, lluvia torrencial, etc.). En este caso, el peligro que nos interesa es el fenómeno de la sequía (entendida en su sentido más amplio, es decir, aquella disminución severa y prolongada de la lluvia que es capaz de provocar graves desequilibrios hidrológicos y afectar las actividades humanas y los ecosistemas). Así, el peligro por sequía se refiere a la probabilidad de que ocurra un evento de sequía en un espacio y tiempo determinados con suficiente intensidad como para producir daños. Los valores del peligro varían de una región a otra y dependen de las características específicas del fenómeno estudiado (Magaña, 2013).

Por otro lado, la vulnerabilidad, en general, es una condición de fragilidad o debilidad de un individuo o sistema ante algún tipo de amenaza (sea ésta de origen físico como las sequías, terremotos, inundaciones, o de tipo

antropogénico como los accidentes, devoluciones, crisis económicas, etc.). Tiene un carácter multifacético y multidimensional; es dinámica tanto espacial como temporalmente; y está siempre vinculada a un peligro específico (Birkmann, 2007). Así, para los propósitos del presente trabajo, la vulnerabilidad ante la sequía se entiende como: el grado en que un sistema es susceptible e incapaz de hacer frente a los efectos adversos, daños o perjuicios causados por este fenómeno natural. De esta manera, la vulnerabilidad está vinculada a los impactos potenciales ocasionados por los episodios de sequía, y se utiliza para evaluar la susceptibilidad de los sistemas socioeconómicos y ambientales (representados en este caso por los municipios de México) ante este peligro.

La exposición es un factor que genera vulnerabilidad, de tal forma que si no hay exposición a un fenómeno específico no existe riesgo. En el presente artículo se trabaja con el concepto de riesgo, como la combinación del peligro y la vulnerabilidad, tal como se ilustra en la Figura 5.3. Es decir, el riesgo es la probabilidad de que se produzca un daño en las personas, en uno o varios ecosistemas, originado por un fenómeno natural (en este caso una sequía) o antropogénico (DOF, 2012). Así, un sistema es vulnerable y se encuentra en riesgo por sequía en la medida en que esté expuesto a este peligro natural.

En este sentido, los desastres pueden considerarse como una "materialización del riesgo", lo que significa que, en ocasiones, éste



Figura 5.3. Diagrama de la estructura del riesgo bajo cambio climático.
Fuente: adaptada de CEPAL (2000).

alcanza niveles por encima de un valor crítico. Explicar un desastre requiere documentar tanto las características de los peligros como las de la vulnerabilidad, no sólo considerando el enfoque naturalista que explica el desastre únicamente como la expresión de las fuerzas de la naturaleza (Magaña, 2013). En décadas recientes, los desastres provocados por fenómenos naturales han aumentado a nivel mundial como resultado principalmente del incremento en la vulnerabilidad (IPCC, 2012), y sólo en parte por cambios en las características del peligro mismo. La mayor exposición de la población a fenómenos meteorológicos extremos, ha resultado en mayor número de desastres.

De esta forma, con base en los conceptos descritos anteriormente, desarrollamos la metodología para determinar índices de peligro, vulnerabilidad y riesgo por sequía que se describe a continuación.

5.3. Metodología

La metodología propuesta consta de tres etapas (Figura 5.4): primero se realiza el análisis del peligro por sequía a escala municipal, con base en los registros históricos del Monitor de Sequía de México (MSM); posteriormente se obtienen índices de vulnerabilidad ante la sequía, tomando en cuenta aspectos econó-

micos, sociales y ambientales de los municipios de México; y finalmente se determinan los índices de riesgo por sequía, mediante la combinación de los índices de peligro y vulnerabilidad. En los siguientes apartados se describe puntualmente cada una de estas etapas.

5.1.1. Primera etapa: análisis del peligro por sequía

En México, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) es la dependencia oficial del gobierno encargada de proporcionar información meteorológica (estado del tiempo) y climatológica. Para ello utiliza las redes de observación tales como estaciones automáticas, observatorios sinópticos, radares, estaciones

de radiosondeo y estaciones receptoras de imágenes de satélite. Como parte de sus actividades de monitoreo, el SMN se encarga de detectar el estado actual y la evolución de la sequía mediante el Monitor de Sequía en México (MSM) que a su vez forma parte del Monitor de Sequía de América del Norte (NADM, por sus siglas en inglés). El MSM inició su operación en 2002 dentro de las actividades del NADM, pero fue hasta el año de 2014 que adquirió su carácter nacional, lo que le permitió emitir mapas de sequía en escala de tiempo diferente a la mensual, siempre basada en la metodología utilizada por el Monitor de Sequía de Estados Unidos (USDM, por sus siglas en inglés) y el NADM. A partir de febrero de 2014 la emisión del MSM es quincenal.

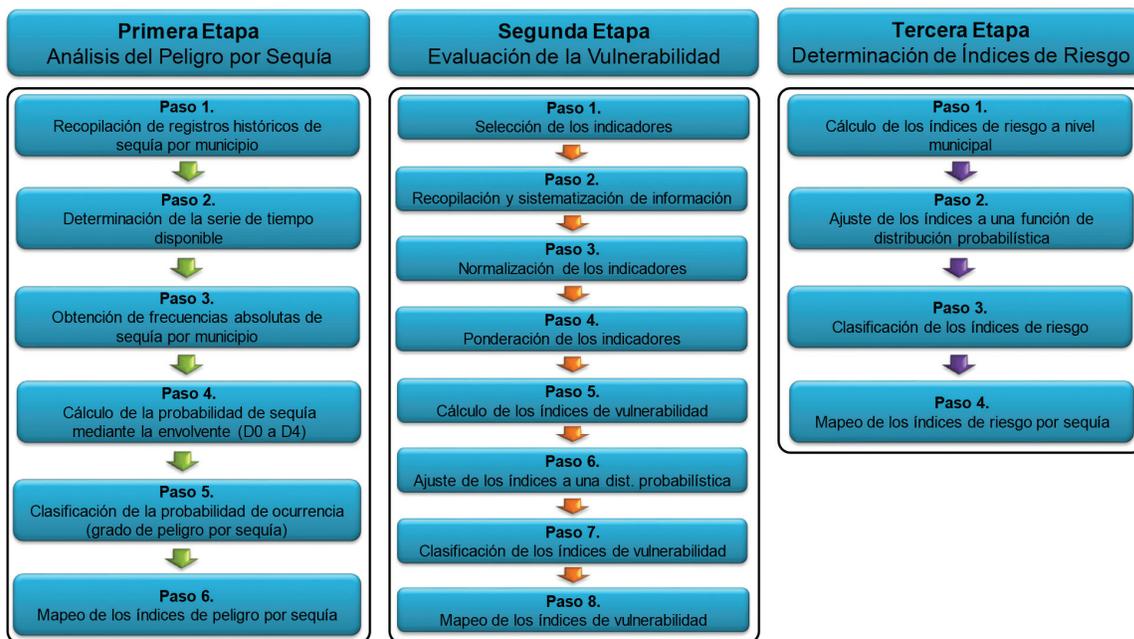


Figura 5.4. Etapas que conforman la metodología para determinar índices de peligro, vulnerabilidad y riesgo por sequía en México. Fuente: elaboración propia.



La metodología del MSM se basa en la obtención e interpretación de diversos índices o indicadores de sequía tales como el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), el Índice Satelital de Salud de la Vegetación (VHI), el Modelo de Humedad del Suelo Leaky Bucket, y el Índice Normalizado de Diferencia de la Vegetación (NDVI), entre otros, los cuales se complementan con la aportación de expertos locales. Estos índices se despliegan en capas o *layers* a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG) y mediante un consenso se determinan las regiones afectadas por sequía, de acuerdo a la escala de intensidades que es común en los tres países (Estados Unidos, México y Canadá), que va desde anormalmente seco (D0), sequía moderada (D1), sequía severa (D2), sequía extrema (D3), hasta sequía excepcional (D4).

Así, con base en los registros históricos del MSM (enero de 2003 a junio de 2018) para cada categoría de sequía y en función de los datos municipales, se determinó el peligro por sequía mediante el cálculo de la probabilidad de ocurrencia de sequía (frecuencia relativa) para cada uno de los municipios de México, con base en los pasos siguientes:

Paso 1. Recopilación de los registros históricos de sequía por municipio. De la página Web del MSM (<http://smn.cna.gob.mx/>), se obtuvo la base de datos de los registros históricos de los municipios con al menos el 40% de su territorio afectado por alguna intensidad o condición de sequía, desde D0 (condición anormal seca) hasta D4 (sequía excepcional).

Paso 2. Determinación de la serie de tiempo disponible. Tomando en cuenta desde el primero hasta el último mes reportado por el MSM, se analizaron los datos correspondientes al periodo de enero de 2003 a junio de 2018; así, el total de meses examinados fue de 186. Sin embargo, debido a factores externos, el Monitor de Sequía no se elaboró en agosto de 2003 ni en febrero de 2004, por lo que el total de meses incluidos en el análisis fue de 184.

Paso 3. Obtención de las frecuencias absolutas correspondientes a cada tipo de severidad de sequía por municipio. Como ya se mencionó, se tomaron en cuenta aquellos municipios con al menos el 40% de su territorio afectado por algún grado de sequía (D0 a D4). En el periodo de febrero de 2014 a junio de 2018 los registros se encontraron de manera quincenal. Sin embargo, dado que el análisis se realizó de manera mensual, se contabilizaron únicamente los registros correspondientes a la segunda quincena de cada mes en el periodo mencionado. Para obtener las frecuencias absolutas se realizó un conteo de los municipios afectados por sequía en los 184 meses registrados.

Paso 4. Cálculo de la probabilidad de sequía mediante la envolvente (D0 a D4). La probabilidad de ocurrencia de un evento determinado, es decir el nivel de certeza que tenemos de que ocurra dicho suceso, es la razón entre el número de veces en que ocurrió dicho evento y el número de repeticiones del experimento. A esta razón se le denomina frecuencia relativa. Para calcular la frecuencia relativa con

que ocurre la sequía en un determinado municipio se utilizó la siguiente fórmula:

$$P(A) = \frac{A}{N}$$

Ecuación 5.1

Dónde:

- P = Es la probabilidad de ocurrencia de sequía
- A = Es el número de meses con sequía
- N = El número total de registros en el periodo

Paso 5. Clasificación de la probabilidad de ocurrencia (grado de peligro por sequía). Los valores de la probabilidad oscilan en un rango cerrado de [0, 1]. Con el objetivo de clasificar estas probabilidades en percentiles con categorías de igual tamaño se ajustaron estos valores a una distribución normal y el resultado se multiplicó por 100 para expresarlas en porcentaje. Dado que se tienen cinco categorías de clasificación de la probabilidad de la sequía, entonces cada rango de percentil obedece al 20% (Tabla 5.1).

Paso 6. Mapeo de los índices de peligro por sequía. El mapa de peligro por sequía se realizó mediante el software ArcGis®, utilizando

como mapa base el Marco Geoestadístico Nacional (INEGI, 2018), el cual permite referenciar correctamente la información estadística con los lugares geográficos correspondientes, que en este caso son los municipios.

5.1.1. Segunda etapa: evaluación de la vulnerabilidad ante la sequía

Con la finalidad de propiciar una mejor comprensión de la multidimensionalidad de la vulnerabilidad, la metodología se basa en la concepción de vulnerabilidad del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2007), en la que ésta se explica en función de tres componentes: el grado de exposición (GE), la sensibilidad (S) y la capacidad de adaptación (CA). El grado de exposición se define como la posibilidad de un sistema de quedar expuesto a un cambio ante una posible situación desestabilizadora positiva o negativa; la sensibilidad se refiere al grado en que un sistema responde a variaciones del entorno; y la capacidad de adaptación se refiere a la aptitud de un sistema para adecuarse o ajustarse a las nuevas condiciones de su entorno. Los dos primeros componentes juntos representan el impacto potencial (I) del fenómeno (es decir, la magnitud del daño esperado), y la capacidad

Tabla 5.1. Categorías para clasificar la probabilidad de las diferentes categorías de sequía.

Clasificación de la probabilidad	Valor del percentil
Muy baja	$0 < P \leq 20$
Baja	$20 < P \leq 40$
Media	$40 < P \leq 60$
Alta	$60 < P \leq 80$
Muy alta	$80 < P \leq 100$

Fuente: elaboración propia.



de adaptación es la medida en que estos impactos pueden ser evitados; por lo tanto, la vulnerabilidad es igual al impacto potencial menos la capacidad de adaptación, tal como se expresa en la siguiente ecuación:

$$V = f(I - CA) = f(GE + S - CA)$$

Ecuación 5.2

De acuerdo con la Ecuación 5.2, al existir mayor grado de exposición y sensibilidad se tendrá mayor vulnerabilidad ante la sequía; y, en caso contrario, una mayor capacidad de adaptación en comparación con los otros dos parámetros, resultará en una menor vulnerabilidad.

Además de lo anterior, es importante tomar en cuenta que existen varios tipos de vulnerabilidad (física, económica, política, institucional, educativa, etc.) (Wilches-Chaux, 1993). Por ello, para efectos de este trabajo, se analizaron cuatro tipos de vulnerabilidad ante la sequía: económica, social, ambiental y global, cuyos conceptos son los siguientes:

- *Vulnerabilidad económica:* Se formula a partir de la relación indirecta entre los niveles de ingresos y el impacto de la sequía, provocando el aumento en el riesgo de padecer el desastre debido a la falta de financiamiento a la producción, insuficiencia de ingresos, desempleo o subempleo e inestabilidad laboral, entre otros.
- *Vulnerabilidad social:* Se refiere, por una parte, a la inseguridad e indefensión que experimentan las comunidades, familias

e individuos en sus condiciones de vida ante el impacto causado por una sequía. La pobreza, la marginación, el rezago social, la dificultad de acceso a los servicios de salud, educación y recreación, limitan la capacidad de prevenir, mitigar y dar respuesta oportuna ante una situación de desastre por déficit hídrico.

- *Vulnerabilidad ambiental:* Está relacionada con la susceptibilidad intrínseca del medio o los recursos naturales a sufrir daños por la falta de agua, debido a que todos los seres vivos necesitan de ciertas condiciones ambientales para desarrollarse, y en caso de existir un deterioro de la naturaleza por la vía de la destrucción de las reservas del ambiente, los ecosistemas resultan altamente vulnerables ante amenazas como la sequía.
- *Vulnerabilidad global:* Es la integración de los tres tipos de vulnerabilidad descritos anteriormente, en la cual confluyen factores de tipo económico, social y ambiental.

Con base en los conceptos anteriores, se desarrolló esta etapa de la metodología para determinar índices de vulnerabilidad (económica, social, ambiental y global) ante la sequía, la cual consta de ocho pasos, mismos que se describen a continuación.

Paso 1. Selección de los indicadores. La formulación de un índice de vulnerabilidad debe estar basada en indicadores que reflejen aspectos relevantes y orientadores del tipo de acción

que se debe llevar a cabo por los tomadores de decisiones a nivel nacional. Así, de todos los indicadores posibles, se deben seleccionar aquéllos que sean más relevantes, con base en la disponibilidad de datos, en el juicio personal o en investigación previa (Stathatou *et al.*, 2014).

De acuerdo con el estudio realizado por el Banco Interamericano de Desarrollo (Cardona, 2007), los indicadores que cumplen mejor la función de medir la exposición y/o susceptibilidad física ante cualquier tipo de desastre son los que reflejan población susceptible, activos, inversiones, producción, medios de sustento, patrimonios esenciales y actividades humanas; también pueden considerarse como indicadores de este tipo los que reflejan tasas de crecimiento y densidad poblacional. Por otro lado, la sensibilidad o fragilidad socioeconómica se representa mediante indicadores de pobreza, inseguridad humana, dependencia, analfabetismo, desigualdad social, desempleo, inflación, deuda y degradación ambiental; estos indicadores reflejan debilidades relativas o condiciones de deterioro que agravarían los efectos directos causados por fenómenos peligrosos; aunque dichos efectos no necesariamente son aditivos y, en algunos casos, podrían considerarse redundantes o correlacionados, su influencia es de especial importancia a nivel económico y social. Finalmente, la capacidad de adaptación puede representarse por un amplio número de indicadores relacionados con el nivel de desarrollo humano, el capital humano, la redistribución económica, la gobernabilidad, la protección

financiera, la percepción colectiva, la preparación para enfrentar situaciones de crisis y la protección ambiental; este conjunto de indicadores por sí solos y particularmente desagregados en el nivel local podrían facilitar la identificación y la orientación de las acciones que se deben promover, fortalecer o priorizar para lograr un mayor nivel de seguridad.

Así, con base en lo descrito líneas arriba y tomando en cuenta estudios previos de vulnerabilidad ante la sequía realizados en México (CONAGUA, 2012; Ortega-Gaucin *et al.*, 2018), para los efectos de la presente investigación se seleccionó un conjunto de 24 indicadores de tipo social, económico y ambiental (Tabla 5.2), cuyos valores fueron obtenidos a nivel municipal a partir de cifras, índices, tasas o proporciones existentes en bases de datos generadas por instituciones reconocidas en el país, tales como: el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI); la Comisión Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL); la Secretaría de Agricultura, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA); la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA); el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP); la Comisión Nacional de Población (CONAPO); la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR); y la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). A partir de los 24 indicadores elegidos se construyó una matriz mediante la agrupación de los mismos en las tres componentes de la vulnerabilidad (exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación) y en los cuatro tipos de vulnerabilidad



analizados (económica, social, ambiental y global), tal como se indica en la Tabla 5.2.

Como se observa en esta tabla, para el cálculo de la vulnerabilidad global ante la sequía, se tomaron en cuenta todos y cada uno de los indicadores descritos anteriormente, siguiendo el procedimiento que se indica más adelante.

Paso 2. Recopilación y procesamiento de información. Este paso consistió en recopilar la información necesaria para determinar el valor de cada uno de los indicadores considerados en el análisis, de acuerdo con las fórmulas y las fuentes de información que se presentan en la Tabla 5.3.

Tabla 5.2. Matriz de indicadores seleccionados y agrupados en los tipos y componentes de la vulnerabilidad ante la sequía.

Tipo de vulnerabilidad		Componentes de la vulnerabilidad		
		Grado de exposición (GE)	Sensibilidad (S)	Capacidad de Adaptación (CA)
		Indicadores		
Global	Económica	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Densidad de población (hab/km²) ✓ Población económicamente activa desocupada (%) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Valor de la producción agrícola de riego y temporal (miles \$) ✓ Valor de la producción del ganado en pie (miles \$) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Superficie rehabilitada al riego (ha) ✓ Superficie agrícola tecnificada (ha) ✓ Longitud de caminos rurales (km)
	Social	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Población en condiciones de pobreza (%) ✓ Población sin derechohabencia a servicios de salud (%) ✓ Población analfabeta (%) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Viviendas sin agua entubada (%) ✓ Viviendas sin drenaje ni excusado (%) ✓ Viviendas sin energía eléctrica (%) ✓ Viviendas con piso de tierra (%) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Ingreso per cápita anual (dólares) ✓ Beneficiarios del programa Oportunidades (%) ✓ Beneficiarios del programa Liconsa (%) ✓ Años promedio de escolaridad (adim.)
	Ambiental	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Grado de explotación de las cuencas (adim.)* ✓ Grado de explotación de los acuíferos (adim.)* 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Deforestación (% de área crítica forestal) ✓ Superficie afectada por incendios forestales (ha) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Superficie reforestada (ha) ✓ Áreas naturales protegidas (% de área)

* Debido a su importancia para la sequía, estos dos indicadores están contemplados en los tres tipos de vulnerabilidad: económica, social y ambiental. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.3. Fórmulas y fuentes de información para el cálculo de los indicadores.

Indicador	Fórmula y unidades de medida	Fuente de información
Densidad de población (DP)	$DP = \frac{\text{No. habitantes}}{\text{Área (km}^2\text{)}} ; \text{ hab/km}^2$	INEGI
Población económicamente activa desocupada (PEAD)	$PEAD = \frac{\text{PEA desocupada}}{\text{PEA total}} ; \%$	INAFED
Población sin derecho a servicios de salud (PSD)	$PSD = \frac{\text{Pob. derechohabiente}}{\text{pob. total}} \%$	CONEVAL
Población en condiciones de pobreza (PCP)	$PCP = \frac{\text{Pob. en condiciones de pobreza}}{\text{Pob. total}} \%$	CONEVAL
Población analfabeta (PA)	$PA = \frac{\text{No. hab misma edad no saben leer}}{100 \text{ hab misma edad}} ; \%$	CONAPO
Viviendas sin agua entubada (VSA)	$VSA = \frac{\text{No. viv. sin serv. agua entubada}}{\text{No. total viviendas}} ; \%$	CONAGUA
Viviendas sin drenaje ni excusado (VSD)	$VSD = \frac{\text{No. viv. sin drenaje ni excusado}}{\text{No. total viviendas}} ; \%$	CONAGUA
Viviendas sin energía eléctrica (VSE)	$VSE = \frac{\text{No. viv. sin energía eléctrica}}{\text{No. total viviendas}} ; \%$	CONAPO
Viviendas con piso de tierra (VPT)	$VPT = \frac{\text{No. viv. con piso de tierra}}{\text{No. total viviendas}} ; \%$	CONAPO
Ingreso per cápita anual (IPC)	$IPC = \frac{\text{PIB anual (dólares)}}{\text{No. habitantes}} ; \text{ dólares/hab}$	PNUD
Años promedio de escolaridad (APE)	Años acumulados de educación en personas mayores a 24 años; adim.	PNUD
Beneficiarios del programa Oportunidades (BPO)	$BPO = \frac{\text{No. beneficiarios Liconsa}}{\text{No. habitantes}} ; \%$	INEGI
Beneficiarios del programa Liconsa (BPL)	$BPL = \frac{\text{No. beneficiarios Linconsa}}{\text{No. habitantes}} ; \%$	INEGI
Longitud de caminos rurales (LCR)	LCR; cantidad, km	INEGI
Valor de la producción agrícola de riego y temporal (VPA)	VPA; cantidad, miles de \$	SAGARPA
Valor de la producción del ganado en pie (VPG)	VPG; cantidad, miles de \$	SAGARPA
Superficie rehabilitada al riego (SRR)	SRR; cantidad, ha	SAGARPA
Superficie agrícola tecnificada (SAT)	SAT; cantidad, ha	SAGARPA
Grado de explotación de las cuencas (GEC)	$GEC = \frac{\text{Vol. anual de extr. sup. (hm}^3\text{)}}{\text{Vol. medio anual escurr. (hm}^3\text{)}} ; \text{ adim.}$	CONAGUA
Grado de explotación de los acuíferos (GEA)	$GEA = \frac{\text{Vol. extracción (hm}^3\text{)}}{\text{Rec arg a media anual (hm}^3\text{)}} ; \text{ adim.}$	CONAGUA
Deforestación (DF)	$DF = \frac{\text{Área deforestada (km}^2\text{)}}{\text{Área total (km}^2\text{)}} ; \%$	CONAFOR
Superficie afectada por incendios forestales (SAI)	$DF = \frac{\text{Área afectada por incendios (km}^2\text{)}}{\text{Área total (km}^2\text{)}} ; \%$	CONAFOR
Superficie reforestada (SR)	SR; cantidad, ha	CONAFOR
Áreas naturales protegidas (ANP)	$ANP = \frac{\text{Área cob. veg. protegida (km}^2\text{)}}{\text{Área total (km}^2\text{)}} ; \%$	CONANP

Fuente: elaboración propia.



Paso 3. Normalización de los valores de los indicadores. Debido a que los indicadores están expresados en diferentes unidades de medida, fue necesario normalizarlos, con el propósito de que todos estuvieran expresados en valores adimensionales que oscilaran en un rango entre 0 y 1. Para llevar a cabo este procedimiento, primero se identificó la relación funcional del indicador respecto a la vulnerabilidad ante la sequía. Existen dos tipos posibles de relaciones funcionales: la vulnerabilidad aumenta o disminuye con el valor del indicador. En el primer caso, la relación es directa y se identifica con el símbolo \uparrow ; en el segundo caso, la relación es inversa y se denota mediante el símbolo \downarrow . De los 24 indicadores seleccionados, todos los que pertenecen a las componentes de grado de exposición (**GE**) y sensibilidad (**S**), tienen una relación directa (\uparrow) con la vulnerabilidad, mientras que los indicadores que representan la capacidad de adaptación (**CA**), tienen una relación inversa con la misma (\downarrow). Por lo anterior, una vez identificado el impacto positivo o negativo de los indicadores sobre la vulnerabilidad, se procedió a normalizarlos mediante las fórmulas que se describen a continuación:

$$X_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

Ecuación 5.3

Y en el caso de los indicadores con una relación funcional inversa (\downarrow), se utilizó la siguiente:

$$X_i = \frac{x_{\max} - x_i}{x_{\max} - x_{\min}}$$

Ecuación 5.4

Donde, en ambas ecuaciones se tiene que: X_i es el valor normalizado de los valores de la variable x_i ; x_{\min} y x_{\max} son los valores mínimo y máximo del conjunto de datos x_i respectivamente.

Paso 4. Ponderación de los indicadores. Una vez obtenidos los valores normalizados de los indicadores, se procedió a calcular sus pesos usando el método propuesto por Iyengar y Sudarshan (1982), mediante la siguiente expresión:

$$P_i = \frac{1}{(\sigma_i) \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i} \right)}$$

Ecuación 5.5

Donde: P_i es el peso del indicador normalizado i ; n_i es la desviación estándar del conjunto de valores del indicador i ; y n es el número de indicadores seleccionados.

Este método de ponderación garantiza que grandes variaciones de uno o más indicadores, no dominen la contribución del resto de los indicadores.

Paso 5. Cálculo de los índices de vulnerabilidad.

Para determinar los índices de vulnerabilidad global, primero se calcularon los índices de vulnerabilidad económica, social y ambiental (*IVE*, *IVS* e *IVA*, respectivamente), mediante la siguiente fórmula:

$$IVE, IVS, IVA = \sum_{i=1}^n X_i P_i$$

Ecuación 5.6

Donde: X_i es el valor normalizado del indicador i ; P_i es el peso del indicador normalizado i ; n es el número de indicadores correspondientes a cada tipo de vulnerabilidad.

Y posteriormente se calcularon los índices de vulnerabilidad global (IVG), asumiendo un peso P_i de 1/3 para cada una de sus componentes:

$$IVG = \frac{IVE}{3} + \frac{IVS}{3} + \frac{IVA}{3}$$

Ecuación 5.7

Paso 6. Ajuste de los índices a una función de distribución probabilística. Con la finalidad de clasificar en categorías los índices de vulnerabilidad obtenidos, éstos se ajustaron a la distribución probabilística beta, siguiendo la recomendación de Iyengar y Sudarshan (1982), quienes afirman que dicha distribución es la adecuada para este propósito, dado que generalmente es sesgada y toma valores en el intervalo (0,1).

Paso 7. Clasificación de los índices de vulnerabilidad. Para clasificar los índices de vulnerabilidad (IV) con base en su probabilidad de ocurrencia, primero se multiplicaron por 100 los valores de probabilidad obtenidos para expresarlos en porcentaje, y luego se agruparon en cinco categorías de percentiles de igual tamaño (de 20% cada una de ellas), de tal manera que se definieron cinco grados de vulnerabilidad, tal como se indica en la Tabla 5.4.

Paso 8. Mapeo de los índices de vulnerabilidad. Los mapas de vulnerabilidad económica, social, ambiental y global, se realizaron de manera similar a los mapas de peligro por sequía, es decir, mediante el software ArcGis®, utilizando como mapa base el Marco Geoestadístico Nacional (INEGI, 2018).

5.1.1. Tercera etapa: determinación de los índices de riesgo por sequía

Una vez que han sido calculados los índices de peligro (probabilidad de ocurrencia) y los índices de vulnerabilidad global ante la sequía, es posible determinar los índices de riesgo a

Tabla 5.4. Categorías para clasificar el grado de vulnerabilidad ante la sequía.

Grado de vulnerabilidad	Valor del percentil
Muy baja	$0 < IV_i \leq 20$
Baja	$20 < IV_i \leq 40$
Moderada	$40 < IV_i \leq 60$
Alta	$60 < IV_i \leq 80$
Muy alta	$80 < IV_i \leq 100$

Fuente: elaboración propia.



partir de la combinación de los dos anteriores. Es decir, el riesgo por sequía es la probabilidad de que se produzca un daño en las personas, en uno o varios ecosistemas, como consecuencia de una sequía, y es directamente proporcional al peligro y a la vulnerabilidad del sistema analizado. De esta manera, los pasos que se siguieron para obtener y mapear los índices de riesgo fueron:

Paso 1. Cálculo de los índices de riesgo a nivel municipal. Estos índices se determinaron mediante la fórmula:

$$IR = P * IVG$$

Ecuación 5.8

Donde: *IR* es el índice de riesgo por sequía; *P* es la probabilidad de ocurrencia de sequía; e *IVG* es el índice de vulnerabilidad global ante la sequía.

Paso 2. Ajuste de los índices a una función de distribución probabilística. Los valores de los índices de riesgo oscilan en un rango cerrado de [0, 1]. Con la finalidad de clasificar en categorías estos índices, se ajustaron a la distri-

bución probabilística normal y el resultado se multiplicó por 100 para expresarlos en porcentaje.

Paso 3. Clasificación de los índices de riesgo. De manera similar a los índices de peligro y vulnerabilidad, los índices de riesgo por sequía se agruparon en cinco categorías donde cada una de ellas corresponde a un rango de percentil de 20% (Tabla 5.5).

Paso 4. Mapeo de los índices de riesgo por sequía. El mapa de riesgo por sequía se realizó de forma análoga a los mapas de peligro y vulnerabilidad, es decir, mediante el software ArcGis®, utilizando como mapa base el Marco Geoestadístico Nacional (INEGI, 2018).

5.4. Resultados y discusión

5.1.1. Mapa nacional de peligro por sequía

En la Figura 5.5 se presenta el mapa nacional de peligro por sequía. En este mapa se puede

Tabla 5.5. Categorías para clasificar los índices de riesgo por sequía.

Grado de riesgo	Valor del percentil
Muy bajo	$0 < IR \leq 20$
Bajo	$20 < IR \leq 40$
Medio	$40 < IR \leq 60$
Alto	$60 < IR \leq 80$
Muy alto	$80 < IR \leq 100$

Fuente: elaboración propia.

observar claramente que, según los registros del Monitor de Sequía en México, los estados de la república donde existe mayor probabilidad de que ocurra sequía con algún grado de severidad –desde moderada hasta extrema– son los del noroeste (Baja California, Baja California Sur, Sonora, Sinaloa) y los de la altiplanicie mexicana (Chihuahua, Durango, Coahuila, Nuevo León, Jalisco, Zacatecas, Michoacán). Estos resultados coinciden con los registros históricos de más largo plazo de las sequías ocurridas en México (e.g. Florescano, 2000; CENAPRED, 2014), pues los estados del territorio nacional que históricamente han sido más afectados por las sequías –y donde se presenta con mayor fre-

cuencia este fenómeno– están ubicados en el norte y en el altiplano mexicano. En orden de severidad de sus efectos desfavorables se encuentran: Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León, Baja California, Sonora, Sinaloa, Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes, Guanajuato, Querétaro e Hidalgo (CENAPRED, 2014). Estos estados tienen el agravante de estar ubicados en zonas que se caracterizan por ser eminentemente áridas, por lo que su población y las distintas actividades económicas son altamente vulnerables ante la escasez y la falta de agua provocada por sequía, dado que en la mayor parte de estos estados predominan los climas secos y semi-secos extremos.

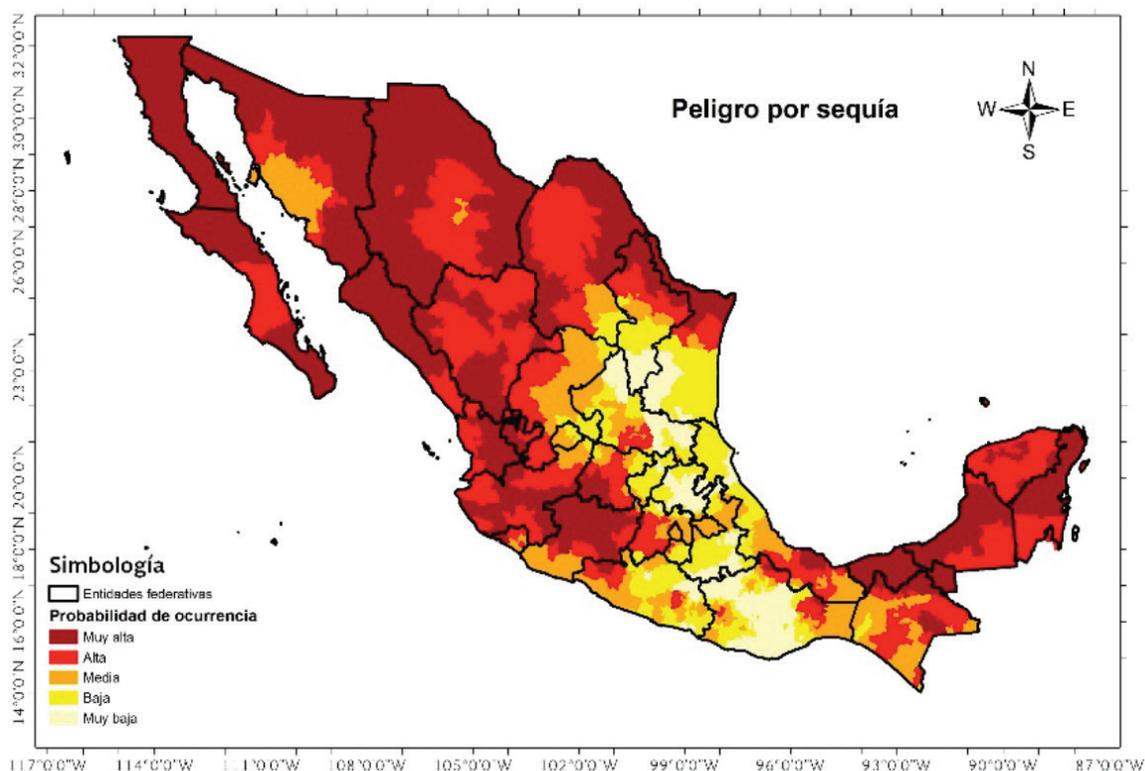


Figura 5.5. Mapa nacional de peligro por sequía. Fuente: elaboración propia.



Sin embargo, también es posible apreciar que en algunos estados del sureste que son típicamente lluviosos como Tabasco, Chiapas y los que se ubican en la península de Yucatán (Campeche, Yucatán y Quintana Roo), se presenta una probabilidad alta y muy alta de que sean afectados por sequías con distinto grado de severidad. Esto nos indica que el fenómeno de la sequía puede ocurrir –y de hecho sucede– en cualquier tipo de clima, y no es exclusivo de los climas secos como comúnmente se piensa (Wilhite, 2011).

Los efectos del cambio climático, como ya se ha mencionado, tendrán secuelas en la disminución de la precipitación del orden de -10 a -20% en la mayor parte del norte del país y de 0 a -10% en el resto de la república, con excepción de algunas zonas ubicadas en estados del sureste (Chiapas, Oaxaca y Quintana Roo) donde se esperan incrementos en la lluvia de 0 a 10% (INECC, 2016). Con ello, se espera que se incremente la frecuencia y severidad de las sequías, sobre todo en el norte de la república mexicana, donde ya de por sí el agua es escasa debido a las condiciones climatológicas imperantes en las zonas áridas y semiáridas del país. Indudablemente, ello tendrá incidencia directa sobre los estados y municipios más vulnerables, tal como se analiza a continuación.

5.1.2. Mapas nacionales de vulnerabilidad ante la sequía

En la Figura 5.6 se presentan los mapas nacionales de vulnerabilidad económica, social, ambiental y global a escala municipal para

la república mexicana. Con respecto a la vulnerabilidad económica, los estados que presentan mayor grado de vulnerabilidad (alta y muy alta) se ubican en diferentes latitudes: en el norte se encuentran Baja California y Baja California Sur, Sonora, Chihuahua, Coahuila, Durango y San Luis Potosí, entre otros; y en el centro se encuentran Hidalgo, Guanajuato, Puebla y Estado de México, principalmente. Estos resultados coinciden en términos generales con los registros de declaratorias de desastre por sequía emitidas por la SAGARPA en el período 2000-2015. De acuerdo con estos registros, los estados que han tenido más declaratorias de desastre por sequía en el sector agropecuario son los siguientes: en el norte Chihuahua, Coahuila, Durango, Sonora, Sinaloa, San Luis Potosí y Nuevo León, principalmente; en el centro Puebla, Guanajuato y Estado de México; y en el sur y sureste Guerrero, Veracruz, Chiapas y Yucatán, entre otros. Esto es debido a que todos estos estados se caracterizan por tener una actividad agrícola y ganadera intensa, por lo que generan un alto valor de la producción agropecuaria con respecto al total nacional (en conjunto, los estados mencionados generan en promedio el 60.5% del valor de la producción agropecuaria).

En lo que respecta a la vulnerabilidad social, los estados de la república mexicana que tienen mayor proporción de municipios con alto y muy alto grado de vulnerabilidad, se ubican principalmente en el sur y centro del país: destacando los estados de Oaxaca y Guerrero que tienen más del 75% de sus municipios en condiciones de alta y muy alta vulnerabilidad

social. Estos resultados son similares a los obtenidos en otros estudios de vulnerabilidad social realizados en México (e.g. Soares *et al.*, 2015), donde los municipios más vulnerables desde el punto de vista social, se ubican en el sur del país, y entre ellos destacan los estados de Oaxaca y Guerrero como los más críticos, lo cual se debe a la larga historia de pobreza, marginación y rezago social en que se encuentran sus habitantes.

Por otro lado, en lo relativo a la vulnerabilidad ambiental, los estados que presentan mayor grado de vulnerabilidad (alta y muy alta) son principalmente los que se ubican en el noroeste (Baja California, Baja California Sur,

Sonora, Sinaloa) y en la altiplanicie mexicana (Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León, San Luis Potosí, Zacatecas, Querétaro, Guanajuato, Aguascalientes, Michoacán e Hidalgo, entre otros). Dentro de los factores ambientales que propician en mayor medida el hecho de que una región sea vulnerable a los efectos causados por la sequía se encuentra, sin lugar a dudas, la degradación de los recursos naturales (también conocida como degradación ambiental), causada por la sobreexplotación de cuencas y acuíferos, la deforestación, los cambios de uso del suelo, el sobrepastoreo y los incendios forestales; los cuales incrementan significativamente el grado de exposición y la sensibilidad de la población y del

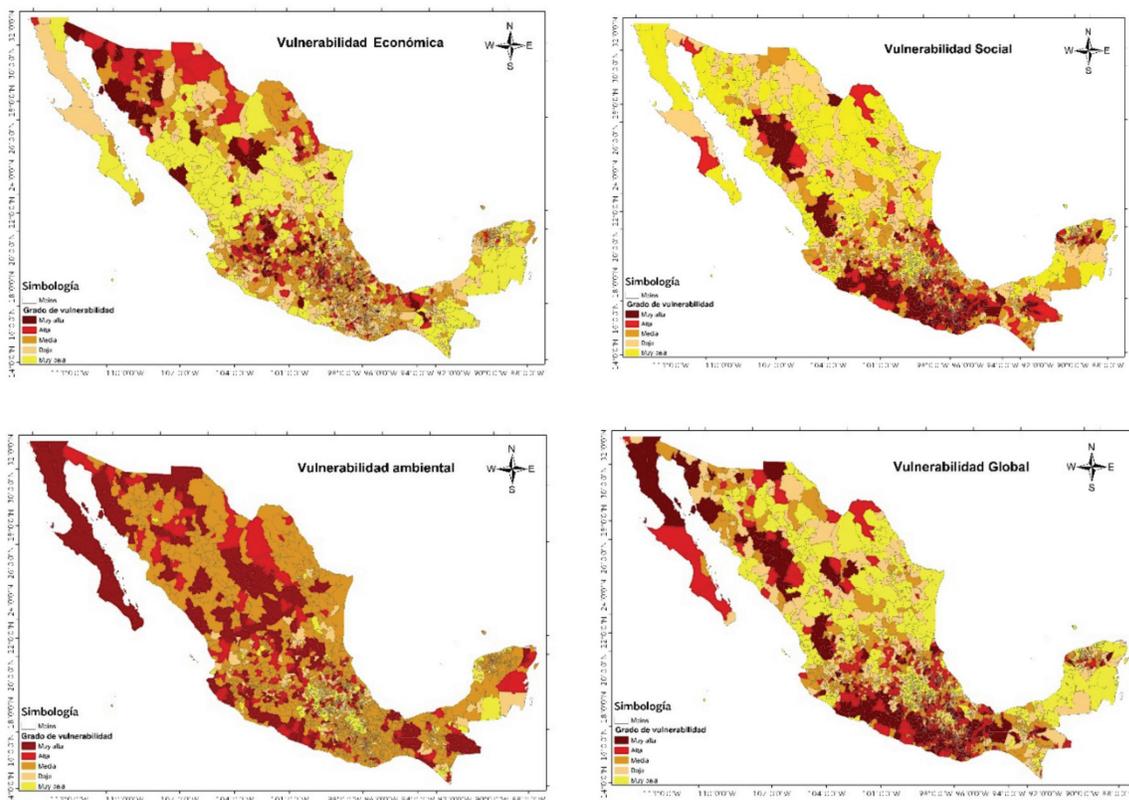


Figura 5.6. Mapas de vulnerabilidad económica, social, ambiental y global ante la sequía en México. Fuente: elaboración propia.



ambiente frente a este peligro natural. Todos estos factores tienen como consecuencia que se produzcan cambios climáticos de mayor o menor escala. Al cambiar la superficie del terreno, al deforestar, quemar, desviar cauces de ríos, pavimentar y degradar los suelos, la tierra pierde rápidamente su capacidad de atrapar y retener humedad. Esto genera microclimas áridos que terminan por alterar el patrón climático regional. Como resultado de ello, las zonas áridas pueden hacerse aún más secas y extenderse (Moreno, 2004).

En México más de 100 de los 653 acuíferos están siendo sobreexplotados (CONAGUA, 2017), lo cual causa un daño ambiental considerable y pone en riesgo la seguridad hídrica y alimentaria. Además, 31 acuíferos tienen presencia de suelos salinos y agua salobre, localizados principalmente en la península de Baja California y la altiplanicie mexicana, donde convergen condiciones de poca precipitación pluvial, altos índices de radiación solar y por tanto de evaporación, así como la presencia de aguas congénitas y minerales evaporíticos de fácil disolución. En algunos casos, como el acuífero costero de Hermosillo, Sonora, el bombeo en exceso ha ocasionado la intrusión de agua salada y el ensalitramiento de los terrenos agrícolas.

Y finalmente, como resultado de la combinación de los tres tipos de vulnerabilidad analizados (económica, social y ambiental), se tiene que los estados con mayor grado de vulnerabilidad global ante la sequía son principalmente los que se ubican en el

noroeste (Baja California, Baja California Sur, Sonora, Sinaloa), y en la altiplanicie mexicana (Chihuahua, Coahuila, Durango, San Luis Potosí, Zacatecas, Querétaro, Guanajuato, Michoacán, Jalisco, entre otros), incluyendo algunos del sur (Guerrero, Oaxaca y Chiapas, principalmente). Como ya se ha mencionado, muchos de los municipios de estos estados tienen características socioeconómicas y ambientales que los hacen particularmente vulnerables, como son: población en condiciones de pobreza, marginación y rezago social; actividad agropecuaria expuesta y sensible a las variaciones del clima porque carece de infraestructura adecuada, de asistencia técnica, de financiamiento y seguros; y deterioro grave de los recursos naturales caracterizado por la deforestación, la degradación del suelo y la sobreexplotación de acuíferos, entre otros. Aunque la gran mayoría de los estados y municipios más vulnerables se ubican en el norte del país y en la altiplanicie mexicana (donde se encuentran las zonas áridas, que por sus características climáticas están más expuestas y son más sensibles a la sequía), lo cierto es que incluso en estados del sur como Guerrero, Oaxaca y Chiapas (que se caracterizan por ser típicamente lluviosos) existen municipios con alto grado de vulnerabilidad social, económica y ambiental ante la sequía, y también son severamente afectados por el fenómeno. Esto tiene incidencia directa en el incremento del riesgo por sequía, es decir, en la mayor probabilidad de que se produzcan daños en las personas y en los ecosistemas como consecuencia de este fenómeno natural.

5.1.3. Mapa nacional de riesgo por sequía

La combinación del peligro y la vulnerabilidad ante la sequía da como resultado el riesgo. Así, en la Figura 5.7 se presenta el mapa nacional de riesgo por sequía. En este mapa se puede observar claramente que los estados de la república mexicana que tienen mayor proporción de municipios con alto y muy alto riesgo por sequía son los del noroeste (Baja California, Baja California Sur, Sonora, Sinaloa) y los de la altiplanicie mexicana (Chihuahua, Durango, Coahuila, Nuevo León, Jalisco, Zacatecas, Michoacán). Como se mencionó anteriormente, estos estados son los que históricamente han sido más afectados por las sequías y en ellos se presenta con mayor frecuencia este fenómeno. Sus condiciones climatológicas predominantes (con climas secos y semisecos extremos) se conjugan con la vulnerabilidad de su población y de las diversas actividades económicas (principalmente la agricultura y la ganadería), para propiciar que de manera recurrente se presenten desastres asociados a la escasez y falta de agua como consecuencia de las sequías severas y prolongadas, tal como sucedió durante la última sequía de 2011-2012, la más severa de los últimos 70 años. Esta sequía generó pérdidas económicas en la producción agrícola que superaron los 16 mil millones de pesos mexicanos –un mil 300 millones de dólares americanos– y se estima que las pérdidas totales en los diferentes sectores económicos equivalieron al 10% del producto interno bruto nacional; se calcula que alrededor de 48 millones de mexicanos pade-

cieron las consecuencias del fenómeno en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, y fue un problema que afectó a dos de cada tres hectáreas cultivadas y ocasionó la muerte de miles de cabezas de ganado (INEGI, 2011).

En México, donde la agricultura y la ganadería son actividades productivas muy importantes desde los puntos de vista económico y social, la vulnerabilidad de los productores –agricultores y ganaderos– implica un alto riesgo ante la presencia de sequías, que con frecuencia han asolado grandes extensiones y propiciado severos desajustes en la economía regional y nacional. La agricultura de temporal depende exclusivamente del agua de lluvia para la producción, por lo que es altamente vulnerable a la sequía meteorológica (déficit de precipitaciones con respecto a los niveles considerados como normales); mientras que la agricultura de riego se abastece de agua mediante pozos, presas, bombeos y derivaciones de ríos, por lo que es más vulnerable a la sequía hidrológica (déficit de caudales superficiales y subterráneos). Dado que el agua es un insumo indispensable en la producción agrícola tanto de riego como de temporal, cuando hay escasez del recurso como consecuencia de una sequía, el déficit hídrico se refleja sensiblemente en bajas en la producción y en el ingreso y nivel de vida de los productores; en la importación y alza de precios en los productos; en la degradación de la infraestructura productiva; etc.

Junto con la agricultura, la actividad ganadera es la que más resiente los efectos de la sequía en el corto, mediano y largo plazos. En la



ganadería el impacto inicial de este fenómeno se percibe en la escasez y falta de agua para abrevadero, en la reducción del forraje disponible y, posteriormente, en la disminución de su producción, misma que se refleja en el peso del ganado, sus tasas de reproducción y en la producción de leche. En muchos casos, las sequías han provocado la muerte del ganado por inanición.

Ahora bien, aunque la gran mayoría de los estados y municipios más vulnerables y que tienen mayor probabilidad y riesgo de sequía se ubican en el norte del país y en la altiplanicie mexicana, es posible observar que incluso en estados del sur como Guerrero, Oaxaca y Chiapas, donde se tienen normal-

mente lluvias abundantes, existen municipios con alto grado de vulnerabilidad global ante la sequía, y también son severamente afectados por el fenómeno, sobre todo en aquéllos años en que ocurre la presencia de El Niño, como sucedió en 2015. En ese año, muchos municipios de Chiapas, Guerrero, Oaxaca y Tabasco, principalmente, fueron declarados en situación de emergencia y desastre por sequía, y sumaron cuantiosas pérdidas en la producción agrícola y pecuaria. Por ejemplo, tan sólo en el estado de Guerrero, la sequía afectó más de 163 mil hectáreas de maíz en 66 municipios de esa entidad federativa; en Chiapas el 49.2% del territorio estatal padeció los efectos de una sequía severa; y en Tabasco (el estado más lluvioso del país) la sequía afectó a 17

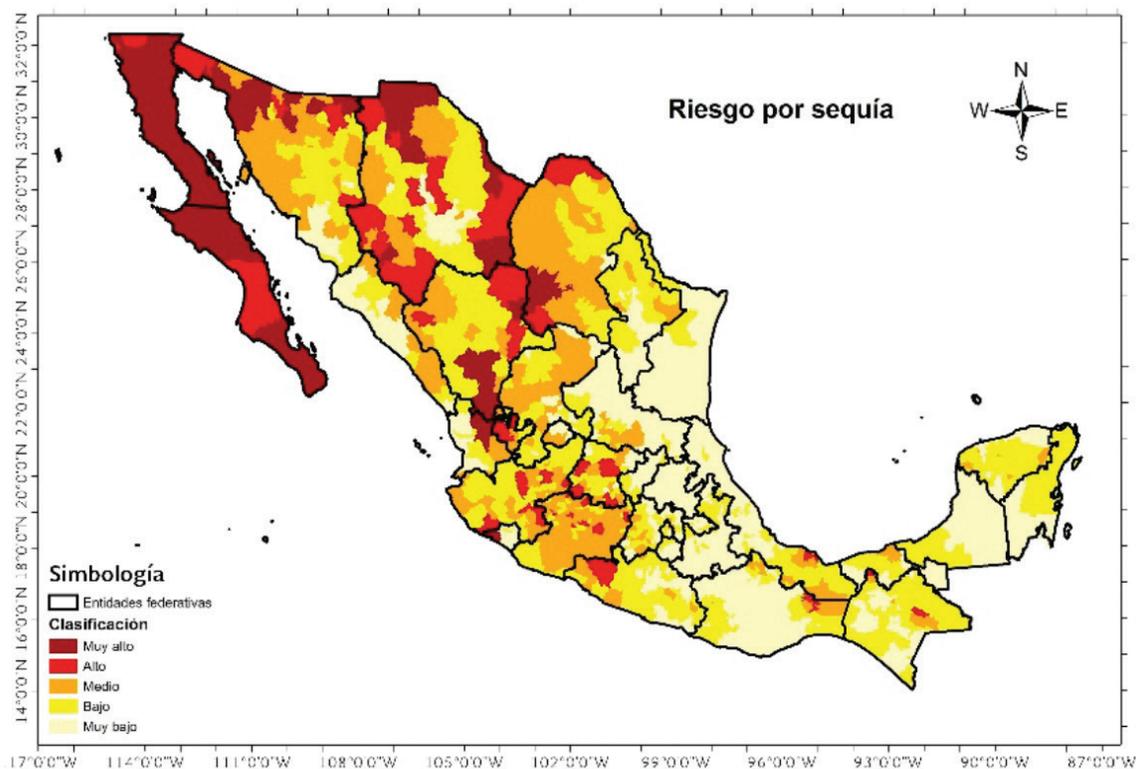


Figura 5.7. Mapa nacional de riesgo por sequía. Fuente: elaboración propia.

municipios provocando pérdidas en 60% de las cosechas de sorgo (El Universal, 2015).

5.5. Conclusiones

Para implementar estrategias adecuadas de respuesta a los efectos negativos del cambio climático, dentro de los cuales se encuentran la mayor frecuencia y severidad de las sequías, es necesario determinar con precisión cuál es la vulnerabilidad, el peligro y el riesgo de que ocurran fenómenos adversos como estos en un lugar determinado. Para ello, hay que tomar en cuenta que existen diversos factores socioeconómicos y ambientales que hacen que la población de un país, estado o municipio sea más o menos vulnerable al aconteci-

miento de un peligro o desastre asociado a un fenómeno natural como puede ser una sequía severa y prolongada. No obstante, no existe un método que sea universalmente aceptado para evaluar y dimensionar el grado de vulnerabilidad de una región a los eventos de déficit hídrico. Por ello, en este artículo se ha presentado un método que permite construir índices municipales y mapas nacionales de peligro, vulnerabilidad y riesgo por sequía en México, a partir de un conjunto de indicadores de tipo socioeconómico y ambiental que se combinan mediante un procedimiento analítico objetivo para identificar los estados y municipios más vulnerables desde los puntos de vista social, económico y ambiental, así como aquéllos que presentan mayor probabilidad de ocurrencia y riesgo de sequía. Estos índices y





mapas pueden ser útiles para los tomadores de decisiones y los responsables de formular políticas públicas en varios sentidos, tales como: establecer prioridades en la implementación de medidas de prevención y mitigación; entender dónde y cómo mejorar las capacidades de adaptación; entender dónde y cómo disminuir la exposición y la sensibilidad; y, en última instancia, optimizar la distribución de recursos de los diversos programas gubernamentales orientados al desarrollo social, los cuales contribuyen al fortalecimiento de capacidades para hacer frente a los fenómenos hidrometeorológicos extremos y a la adaptación al cambio climático.

5.6. Referencias

- Birkmann J. (2007) Risk and vulnerability indicators at different scales: applicability, usefulness and policy implications, *Environmental Hazards* 7, 20-31.
- Cardona A., O. D. (2007). Indicadores de riesgo de desastre y gestión de riesgos: programa para América Latina y el Caribe. Informe Resumido. Banco Interamericano de Desarrollo. Washington, D. C.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2012). Análisis de las regiones más vulnerables ante las sequías en México. SEMARNAT. México, D.F.

- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2017). Estadísticas del agua en México. SEMARNAT. Ciudad de México.
- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres). (2014). *Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México*. Secretaría de Gobernación, México, D.F. 225 pp.
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y El Caribe). (2000). Un tema del desarrollo: la reducción de la vulnerabilidad frente a los desastres. Documento presentado en el Seminario *Enfrentando Desastres Naturales: Una Cuestión del Desarrollo*, 25 y 26 de marzo de 2000, Nueva Orleans, 47 pp.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). (2015). Ley General de Cambio Climático (LGCC). Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. Consultada el 12 de junio de 2018 desde: <http://www.dof.gob.mx/>
- EL Universal (2015). Por la sequía, todo se está acabando [En línea]. Consultado el 13 de septiembre de 2016 desde: <http://www.eluniversal.com.mx/articulo/estados/2015/08/30/por-la-sequia-todo-se-esta-acabando>
- Florescano, E. (2000). *Breve historia de la sequía en México*, 2a Ed., CONACULTA, México, D.F. 252 pp.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, WMO/UNEP, Geneva, 103 pp.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2012). Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. By: Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (Eds.) Cambridge University Press, 582 pp.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2013). *Climate Change 2013. The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC, WMO/UNEP, Geneva, 27 pp.
- INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). (2016). Escenarios de cambio climático. [En línea] Consultado el 10 de enero de 2018 desde: <http://escenarios.inecc.gob.mx/>.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2018). Marco Geoestadístico Nacional. [En línea] Consultado el 15 de marzo de 2018 desde: http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/m_geoestadistico.aspx
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2011). Estadísticas a propósito del día mundial contra la desertificación y la sequía, http://www.inegi.gob.mx/contenido/GeografiaMedioAmbiente/INEGI_Diamundialcontraladesertificacionylasequia.pdf (accessed 15th June 2015).
- Iyengar, N. S. & P. Sudarshan (1982). "A Method of Classifying Regions from Multivariate Data". *Economic and Political Weekly*,



- Vol. 17, Núm. 51, Dec. 1982, pp. 2048-52.
- Landa, R., Magaña, V. y Neri, C. (2008). *Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 133 pp.
- Magaña, V. (2013). *Guía metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad ante cambio climático*. Instituto Nacional de Ecología y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. México, D.F. 61 pp.
- Moreno P. (2004). *Nubes ausentes: las sequías*. Editorial Planeta Mexicana. México, D.F.
- Ortega-Gaucin, D. (2013). Sequía: causas y efectos de un fenómeno global, *Ciencia UANL*, 16(61), pp. 8-15.
- Ortega-Gaucin, D., Castellano B., H. V. y de la Cruz B., J. (2017). Economic, social and environmental vulnerability to drought in the Northwest River Basin System, Mexico. *Int. Journal of Environmental Impacts*, 1(3): 240-253.
- Soares D., Romero R. & López R. (2015) Conceptualización de vulnerabilidad y construcción de un índice de vulnerabilidad social, In: *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático*, F. I. Arreguín C. (coord.), Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, México, pp. 11-16.
- Stathatou P. M., Kampragou E., Grigoropoulou H. & Assimacopoulos D. (2014) Vulnerability of water systems: a comprehensive framework for its assessment and identification of adaptation strategies, *Proc. Adapt to Climate Intern. Conf.*, Nicosia, 27-28 March.
- Wilches-Chaux G. (1993). La vulnerabilidad global, In: *Los desastres no son naturales*, A. Maskrey (comp.), Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, Puerto Limón, Costa Rica, pp. 11-44.
- Wilhite D. A. (2011). Drought, In: *Encyclopedia of Water Science*, 2nd ed., Taylor & Francis, New York, pp. 215-217.

6

Metodología para determinar la frecuencia, ocurrencia, duración, intensidad y severidad de la sequía intraestival (canícula), con fines de manejo agronómico y adaptación al cambio climático de los cultivos de temporal

Ramiro Vega Nevárez

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532. Progreso. Jiutepec, Morelos. México. C.P. 62550. E-mail: ramiro@tlaloc.imta.mx





RESUMEN

El 70% de la superficie agrícola en México se cultiva bajo condiciones de temporal, por lo que los hace más vulnerables al cambio climático; su desarrollo y rendimiento dependen del comportamiento de las lluvias. La precipitación (PPT) es errática e impredecible y tanto la falta de agua como los excesos afectan el rendimiento. El riesgo mayor es la interrupción de la lluvia en las etapas fenológicas críticas como floración y llenado de grano. Las sequías intermedias son más frecuentes en regiones influenciadas por el monzón de Norteamérica. Las metodologías para determinar la duración en meses y la intensidad en porcentaje de la sequía intraestival o canícula, son de tipo climático. En el presente trabajo se propone una metodología que asocia las variables climáticas diarias, y la respuesta de los cultivos; así como sus opciones de manejo agrícola. Se introducen los términos período húmedo (PH) y canícula agronómica (CA); así como su descripción y metodología para determinarlos. La intensidad de la CA se cuantifica en función de su duración en días, la acumulación de energía para el cultivo y el déficit hídrico (DH); la severidad como la reducción del rendimiento ocasionado por la intensidad sobre la etapa fenológica del cultivo. La metodología consiste en: (1) Obtener información del sitio, clima, suelo y cultivo. (2) Homogenización de la información climática. (3) Sistematizar información y asignar el día juliano (DJ) a fechas del calendario civil para cálculo de índices e indicadores. (4) Determinar el promedio de las fechas de inicio, fin y duración en días del PH, así como su frecuencia. (5) Determinar el promedio las fechas de inicio, fin y duración de la CA en días y la frecuencia. (6) Determinar la intensidad de la CA con base en la duración, la acumulación de Grados Día de Desarrollo (GDD) y Unidades fototérmicas (Ufoto) del cultivo; la Radiación neta (R_n) en mm de agua evaporable, la Evapotranspiración potencial (ETP) medida o estimada en mm y el déficit hídrico (ETP- PPT) en mm; durante la CA. (7) Determinar el grado de severidad de la CA. (8) Aplicar y validar la metodología en varias estaciones meteorológicas, y (9). Emitir las recomendaciones para las prácticas de manejo del cultivo y otras acciones agronómicas para atenuar los daños de la sequía y los efectos del cambio climático. La metodología se aplicó en cuatro estaciones de la cuenca del Río Apatlaco y para validar el procedimiento con la estación Progreso IMTA.

Palabras clave: Período húmedo, canícula agronómica, déficit hídrico.

6.1. Introducción

En México se cuenta con 15.5 millones de hectáreas dedicadas al cultivo de varias especies agrícolas y de frutales de temporal y representa el 70% de la superficie agrícola nacional que en total son 22.2 millones de hectáreas. En el caso de la agricultura bajo riego la superficie irrigada es de 6.5 millones de ha. La agricultura de temporal es más vulnerable ante el cambio climático ya que depende completamente del establecimiento y el comportamiento de la temporada de lluvias. El periodo lluvioso es errático e inconsistente tanto en tiempo como en espacio, lo que ocasiona un bajo nivel productivo comparado con las zonas de riego (CONAGUA, 2016).

Tanto falta de agua ocasionada por presencia las sequías como los excesos de humedad afectan el desarrollo y rendimiento de los cultivos. (Allen *et al*, 2006). Se ha determinado que aparte de la variación normal o natural de las lluvias, esta variación se ha visto incre-

mentada por los efectos ocasionados por el calentamiento global, afectando severamente en conjunto las actividades agrícolas y ecológicas de las diferentes regiones climáticas del país (Taboada y Oliver, 2009).

El régimen de precipitación en la república mexicana en general es de tipo monzónico ya que es considerado como parte del monzón de Norteamérica donde la precipitación se concentra en un período relativamente corto. En el país el 80% de la lluvia acumulada anual se presenta en los meses de mayo a octubre. En algunas regiones tropicales y subtropicales puede ser mayor este porcentaje, por ejemplo, en el estado de Morelos el régimen monzónico se ve más acentuado (Figura 6.1). En sólo en 4 meses (de junio a septiembre) se registra el 82% de la precipitación total anual y son en estos meses cuando se establecen los cultivos de temporal, o bien este tiempo es cuando se deja de aplicar el riego en los cultivos de medio riego, de punteo o parcial (Vega, 2017).

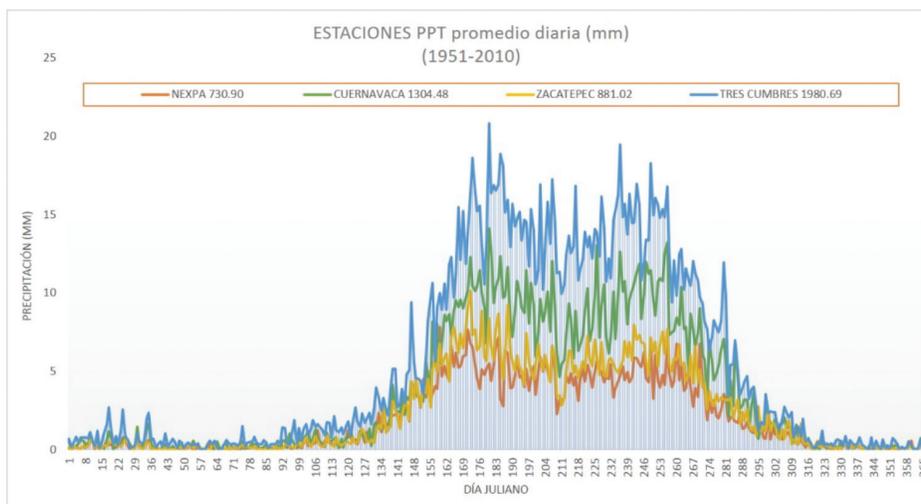


Figura 6.1. Distribución de la precipitación promedio diaria durante el año en cuatro estaciones del estado de Morelos de 1951 a 2010. (Fuente: elaboración propia)



La cantidad de lámina precipitada durante junio a octubre en Morelos, en promedio supera los requerimientos hídricos de los cultivos establecidos como maíz, sorgo, frijol, cacahuate, jamaica, ajonjolí, calabaza, pepino, sandía de sereno, jitomate, tomate de cáscara, nopal para verdura, y algunas especies de frutas (Vega, 2016). Desafortunadamente, la cantidad de agua no asegura una buena distribución durante el ciclo del cultivo, ya que la falta o exceso del agua en ciertas especies cultivadas y en algunas etapas del desarrollo de las mismas pueden ser de nocivas a catastróficas. El rendimiento en algunos casos se reduce drásticamente o bajo el peor escenario el rendimiento puede ser nulo.

En la mayoría de los años (80%) a mediados de este período lluvioso en julio y agosto se presenta una disminución considerable de la precipitación denominada sequía intraestival

o intermedia y se refiere al período seco que se presenta dentro de la estación lluviosa; si esta sequía coincide con el período de días con las temperaturas más altas del año generalmente se le conoce como Canícula o Veranillo. ¿Qué es la canícula?: *“La palabra se deriva del término latín canis, que significa perro y hace referencia a la estrella Sirio que pertenece a la constelación Can mayor. En la antigüedad se creía que durante los meses de julio y agosto esta estrella conjuntamente con el sol, unían su energía calórica y por esa razón, la temperatura más intensa del año se presenta en esos meses”* (SMN-CONAGUA, 2018).

“Las áreas más afectadas por la canícula en México son el istmo de Tehuantepec, las planicies costeras del Golfo de México, además de múltiples porciones ubicadas en el altiplano mexicano” (Vidal 2005, citada por Sanchez-Santillán et al 2018). Los mismos autores citan que otras



Foto 6.1. Desarrollo del cultivo de maíz de temporal en el Copalar, Yautepec. Morelos a los 61 días después de la siembra (23/06/2018).

regiones del mundo que también registran canícula son: el sur de los Estados Unidos (Brown, Warnecke y McKinney 2006), Centro América (Karnauskas et al. 2013), India (Mapes, Liu y Buenning 2005) y China (Geng et ál. 2011).

La metodología para determinar la duración e intensidad de la sequía intraestival, canícula o veranillo, es de tipo climático y fue propuesta por Mosiño y García (1968); dicho procedimiento sólo toma en cuenta la lluvia mensual acumulada, sin indicar la distribución de cuánta agua recibe y utiliza el cultivo diariamente durante su ciclo de vida. Tampoco considera otras variables agrometeorológicas que inciden directamente con el establecimiento y manejo de cultivos. Sanchez-Santillán et al, (2018) utilizaron la metodología anterior para evaluar la intensidad y frecuencia de la canícula con datos pluviométricos mensuales, que consiste en calcular la disminución relativa del polígono mensual de precipitación durante la temporada de lluvias resumida en la Ecuación 6.1:

$$\text{Intensidad de la canícula} = \frac{\text{Área del polígono pluvial deficitario}}{\text{Cantidad total del polígono de lluvia de mayo a octubre}}$$

Ecuación 6.1

En el mismo trabajo de Sanchez-Santillán et al (2018), evaluaron la canícula en la Reserva de la Biosfera El Cielo, así como su variabilidad interanual. "Los resultados mostraron que el 86% de los veranos analizados se presentó canícula. El 55,6% los años con canícula fueron de intensidad débil, el 23,1%, media, y el 5,7%

restante fue severa. Señalan que la canícula tiene un comportamiento cíclico, con periodo de nueve años y que comienza con intensidad débil, aumenta a media o severa y disminuye a débil. El análisis de tendencia no muestra un incremento del fenómeno".

Para el caso del estado de Morelos, Taboada y Oliver (2009), mencionan que "antes del 2000, la intensidad de la sequía registraba valores máximos de 20%, con duración promedio de dos meses, agosto es el mes que mayor impacto tiene. En los últimos años, la intensidad canicular se ha incrementado en 50% de la superficie estatal con valores entre 33 y 62%, causadas por el incremento de temperatura y disminución de precipitación, elementos mayormente afectados por el cambio climático. Evidentemente, una de las principales afectaciones biológicas se manifiesta en la superficie dedicada a agricultura de temporal, ya que se interrumpe el desarrollo de diversas fases vegetativas".

Si durante este periodo caluroso no se presentan lluvias o bien la lámina de lluvia precipitada es muy poca, la humedad del aire y suelo se abaten, la tasa evapotranspirativa de las plantas aumenta, la radiación que se recibe sobre la superficie del suelo es alta y esto provoca un déficit hídrico o sequía que conocemos como canícula (Vega, 2016). La Comisión Nacional del Agua (SMN-CONAGUA, 2018) señala que "aún con los estudios realizados no es posible pronosticar con precisión la fecha de inicio, duración e intensidad del periodo canicular, ya que en algunos lugares de manera excepcional podría registrarse a partir de junio o



extenderse hasta septiembre y está relacionado con las precipitaciones registradas durante los inviernos anteriores y que la intensidad tiene un comportamiento gaussiano". Vega (2017), menciona que para la parte media de Morelos la canícula se presenta en promedio a mediados de julio y termina a mediados de agosto (Foto 6.2).

Desde el punto de vista agronómico el efecto de la canícula, no solo depende de la temperatura y la precipitación sino de la severidad y afectación al cultivo. Los daños dependen de cuando se presente, de su duración y que tan intensa es; ello dependerá del tipo de suelo, el cultivo establecido, variedad, etapa de desarrollo que se encuentre: pero sobre todo las medidas y practicas agronómicas que se realicen en los terrenos de cultivo. Vega (2016) analizó la precipitación diaria durante 20 años y determinó que el inicio y duración de la canícula en tres localidades de la parte media del Estado de Morelos, con referencia al cultivo de maíz, sembrado en promedio el día 23 de junio. El mismo autor asoció el efecto de la duración de la canícula con el detrimento de la producción y determinó que si la caní-

cula dura menos de diez días no existe efecto negativo sobre rendimiento; es decir, si la duración es menor a 10 días, no existe sequía para los cultivos estudiados. La canícula agronómica puede ser mayor a diez días y durar en algunos años hasta 45 días o más y en estos casos el rendimiento de los cultivos es nulo ya que generalmente el cultivo de seca, salvo en algunos casos extraordinarios donde los suelos son muy profundos y con alto contenido de materia orgánica, la muerte de las plantas resistentes como el sorgo ocurre hasta los 60 días.

Es importante diferenciar la metodología para determinar la intensidad de la canícula de tipo climático y la canícula agronómica. En la canícula agronómica se considera analizar simultáneamente la precipitación histórica a nivel diario, para definir el inicio y fin de la estación lluviosa e inicio del Periodo Húmedo (PH), la frecuencia, el inicio, fin y duración de la canícula en días, la intensidad en grados día de desarrollo y unidades fototérmicas, para los cultivos involucrados, la lámina de lluvia acumulada durante este periodo y la lámina acumulada que demandan las condiciones



Foto 6.2. Cultivo de maíz en etapa desarrollo vegetativo afectado por la canícula (22/07/2018) y su recuperación (16/08/2018) en El Copalar, Yautepec, Morelos.

del climáticas (ETP) y su déficit (ETP-PPT) acumulado, la intensidad de la radiación solar y los cultivos establecidos, así como los días después de la siembra y la etapa de desarrollo en la que se encuentra cuando se presenta la canícula.

La FAO (1997) para realizar la Zonificación de Agroecológica (ZAE) de cultivos, utiliza como parámetro la duración del período de crecimiento efectivo (PCE). El PCE lo define como el período del año en el que tanto las condiciones de humedad como de temperatura son favorables para el desarrollo de los cultivos. Dentro del PCE está el período de crecimiento húmedo (PCH), definido como el periodo en días en el año donde no existen limitantes de humedad para los cultivos. Es un balance simple tomando en cuenta periodos mayores a treinta años de precipitación media mensual, propone que el inicio del PCH ocurre cuando la precipitación supera a la mitad (50%) de la Evapotranspiración potencial (ETP) y finaliza

cuando la precipitación es menor al 50% de la ETP. En este procedimiento no se incluye la Capacidad de almacenaje del suelo (CAS) ni que el cultivo puede utilizar la humedad residual del suelo (HRS) aun cuando la precipitación sea mínima o nula. En la Figura 6.2, se muestra la duración del PCH en días en 4 estaciones de Morelos.

Por esta razón es necesario incluir el concepto de Período húmedo (PH) definido como el periodo del año en días donde se satisfagan las condiciones de humedad del suelo requeridas para la siembra y germinación, desarrollo vegetativo, floración, fructificación y madurez fisiológica de los cultivos. El inicio del (PH) en día juliano (DJ) considera que el suelo haya sido humedecido lo suficiente para que se realice la siembra y se presente la germinación o para plantar los cultivos frutales o especies perennes (Vega, 2016). El fin del PH ocurre cinco días después de cuando se suspende la lluvia (considerando una CAS fija de

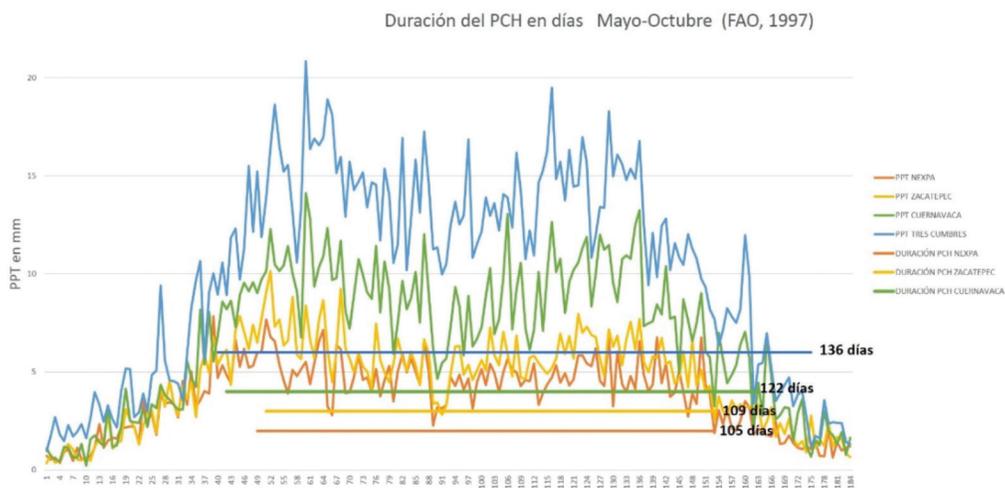


Figura 6.2. Inicio, Fin y Duración del Período de Crecimiento Húmedo (PCH) para cuatro estaciones del estado de Morelos (1951-2010). (Fuente: elaboración propia)



10 cm = 100 mm). o bien si lámina es menor de 20 cm y le precede un periodo seco mayor a 10 días consecutivos.

Un año seco es aquel donde no existe el PH o bien si este es menor a 45 días. Antes de establecer un cultivo se debe cerciorar que la duración del ciclo del cultivo coincida la duración del PH y que la lámina precipitada en este periodo cubra las necesidades hídricas, o a la inversa; conociendo la duración y la intensidad del PH, seleccionar los cultivos más apropiados a estas condiciones agroclimáticas.

Es necesario determinar la frecuencia, el inicio, el fin y duración del PH en días. Generalmente en forma empírica cuando el agricultor realiza la siembra casi siempre coincide con el inicio del Periodo Húmedo y ello ocurre de 5 a 7 días (una semana) después de haber iniciado la temporada de lluvias y que el suelo haya sido humedecido lo suficiente para que se presente la germinación o para plantar frutales (Vega, 2016); como se muestra en la Figura 6.3. El periodo húmedo inicia cuando se hayan acumulado 60 cm en tres días con-

secutivos y se suspende la lluvia, o bien si la precipitación continua hasta por 5 días y se superan los 60 cm necesarios para iniciar con la siembra. Si la estación cuenta con registros de Evaporación diaria en mm se puede utilizar otro criterio agrometeorológico donde el inicio del PH ocurre si durante los 5 días consecutivos de lluvia se acumula una lámina equivalente a el triple de la evaporación (Ev) del tanque, durante ese mismo periodo, es decir si la Ev diaria acumulada en 5 días es de 25 mm, la lámina requerida para iniciar el PH es de 75 mm de Ev equivalente a los 60 mm requeridos de ETP estimados con el método del coeficiente de tanque ($ETP = KEv$; y $K= 0.8$) utilizado por Vega y Aceves (1993).

Allen *et al* (2006), mencionan que es muy peligroso que se agote la humedad en el suelo si se presentan días prolongados con condiciones de alta temperatura y sin lluvia o riego; sobre todo si la planta se encuentra en etapa fenológica sensible como la floración, llenado o amarre de fruto. A esta etapa la considera "periodo crítico".

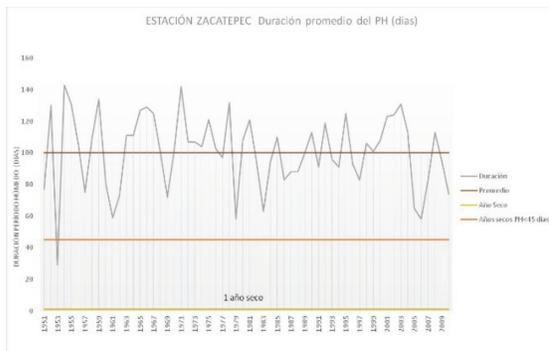


Figura 6.3. Variación de la duración y promedio del Inicio, fin y duración del PH en días de la Estación Zacatepec (1951-2010). (Fuente: elaboración propia)

La canícula es más peligrosa cuando el cultivo ya se estableció, porque al llegar a ser una canícula prolongada se pierde semilla, preparación del terreno y tiempo, mano de obra jornales y todos los insumos (que en conjunto pueden representar el 50 de los costos de producción). Si la canícula se presenta en las primeras etapas fenológicas las plantas son más resistentes a la falta de agua (Figura 6.4). Por el contrario, la severidad de la canícula puede ser mayor si la sequía se presenta en las etapas críticas (Vega, 2017). El mismo autor establece que por duración e intensidad la severidad puede ser diferenciada por cultivo en cinco categorías: nula, ligera, media, alta y extrema. La nula es cuando no se presenta canícula (de 0 a 10 días), la ligera considera una duración de 11 días y 150 GDD acumulados para maíz y 12 días y 156 GDD acumulados para sorgo. La media hasta 17 días y 255 GDD acumulados para maíz y 19 días y 247 GDD para sorgo. Alta, hasta 24

días y 360 GDD para maíz y 28 días y 340 GDD para sorgo. Extrema mayor de 30 días y 450 GDD para maíz y mayor de 35 días y 420 GDD para sorgo. Agronómicamente significa que cuando se presenta una sequía con severidad ligera sólo disminuye un 10% en el rendimiento en las etapas de desarrollo vegetativo y 20% si se presenta durante la floración y el llenado de grano. La media de 20% y 40%, alta de 40% y 60% y la extrema 60% y 100% respectivamente. A estos porcentajes de afectación al rendimiento deberán seguirse mejorando mediante mayor experimentación en campo ampliando el rango de cultivos. Como puede observarse la canícula agronómica aparte de clima involucra conocer los requerimientos agroclimáticos de cada especie cultivada, en cada una de sus etapas fenológicas (Ruiz *et al*, 2013). Estudiar el comportamiento de la canícula en forma cuantitativa ha ayudado a proponer recomendaciones a la medida para de cada sitio o condición. La metodo-

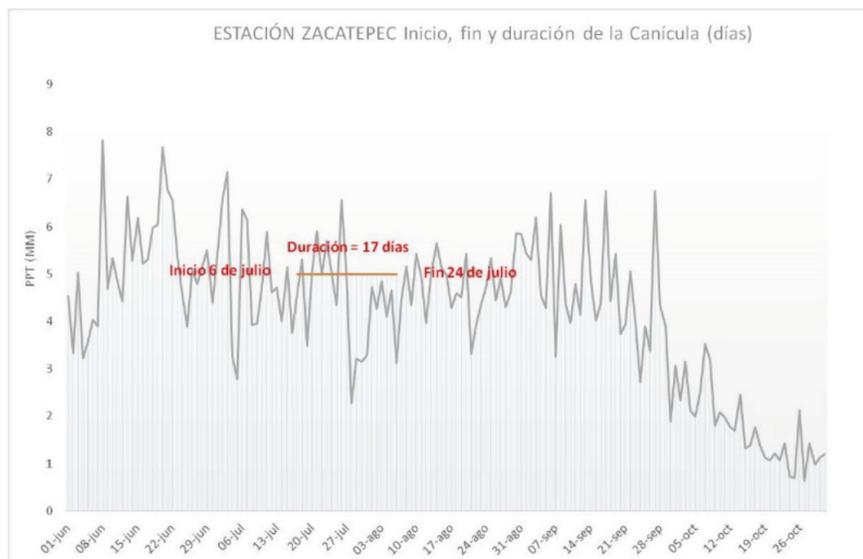


Figura 6.4. Inicio, fin y duración promedio en días de la CA en la estación de Zacatepec, Morelos (1951-2010). (Fuente: elaboración propia)



logía propuesta es mejorable y perfectible si se integra la medición de las variables agrometeorológicas y se generan los datos de la fenología y los rendimientos de los cultivos derivados de experimentos diseñados para este fin.

6.2. Metodología:

1. Obtener la información de calidad y suficiente del sitio, clima, suelo y cultivo.
 - a). Sitio. Seleccionar el sitio o el área de estudio. Obtener la ubicación geográfica y fisiográfica de la cuenca hidrológica donde se localiza el sitio o área de estudio. (latitud y longitud en grados y altitud en metros sobre el nivel medio del mar). Seleccionar la o las estaciones cercanas que cuentan registros diarios de las variables requeridas.
 - b) Datos climáticos. Estación o Estaciones meteorológicas. Se puede utilizar una sola estación meteorológica si la evaluación es puntual o varias estaciones si se pretende estudiar una cuenca, área o superficie dentro de un polígono determinado. Cada estación deberá contar con registros históricos diarios (al menos de 30 años) de la mayoría de las variables meteorológicas involucradas con la producción de cultivos y el cambio climático, que pueden ser: Precipitación (PP en mm), Temperatura máxima (Tmáx en °C) Temperatura mínima (Tmín en °C), Humedad relativa máxima (HRmáx en %), Humedad relativa mínima (HRmín

en %), Evapotranspiración de referencia (ET₀ en mm) o en su defecto la Evaporación del tanque tipo A (Ev en mm), Radiación global (R_g en Calorías/cm²/día, mm de agua evaporable/día ó kW/m²) o horas insolación real obtenidos del heliógrafo (H en horas) y la velocidad del viento (V en m/seg).

Para el ejemplo se contó con la información de 44 estaciones localizados dentro o con influencia de la Cuenca del Río Apatlaco. Sólo se seleccionaron cuatro estaciones alineadas longitudinalmente, pero ubicadas a diferente altitud y latitud que son: Nexpa, Zacatepec, Cuernavaca y Tres Cumbres en el estado de Morelos, (Figura 6.5) pertenecientes a la Región Hidrológica administrativa del Río Balsas. Todas ellas cuentan con datos diarios de precipitación y temperatura del periodo 1951 a 2010 (60 años), de la base de datos existentes en el CLICOM proporcionados en archivos digitales por Montero y Pita (2018) y que se presentan en el Tabla 6.1. En mismo cuadro se presenta la estación de Progreso IMTA que se incluyó por tener registrado sin interrupción todos los datos diarios termopluviométricos, además de contar con datos de evaporación diaria de 2013 a la fecha, y por la cercanía de los terrenos donde se siembran cultivos de temporal y las parcelas de observación de las últimas tres canículas y con ellas realizar la validación de la metodología.

c). Suelo. Obtener información del tipo o tipos de suelo. Textura, profundidad, pendiente, salinidad, fertilidad, contenido de materia orgánica y pedregosidad. Con la textura y profundidad se determina la capacidad de almacenaje del suelo (CAS). Se asume que la CAS mínima es igual a 100 mm. Para el

ejemplo es un suelo vertisol sobre roca basáltica, con textura una arcillosa y una profundidad de 70 cm.

d). Cultivo o cultivos. Conocer la especie o especies a sembrar o plantar. La variedad y características de la variedad si son de ciclo corto intermedio o largo. Tipo de planta (C3, C4 y CAM). Dura-

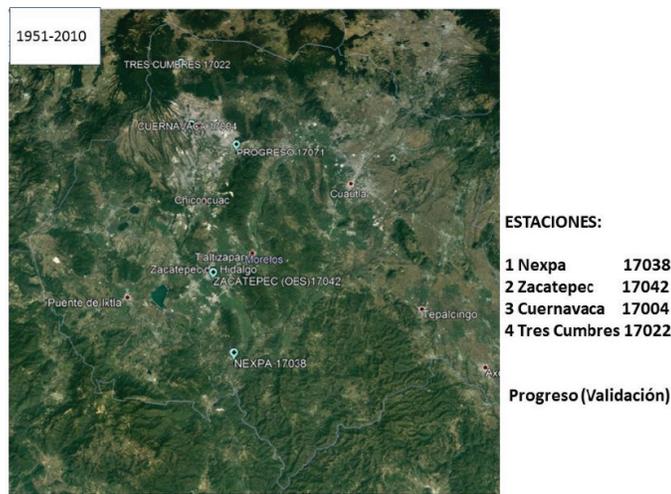


Figura 6.5. Imagen con la ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas para el presente estudio.

Tabla 6.1. Estaciones meteorológicas utilizadas para la aplicación de la metodología y determinación del PH y la CA.

Estación	Clave	Latitud (grados)	Longitud (grados)	Altitud (msnm)	PPT (mm)	Tmax, Tmin (°C)
NEXPA	17038	18.52	-99.145	800	730.9	32.57, 17.54
ZACATEPEC (OBS)	17042	18.65	-99.183			
	918	881.2	33.69, 15.45			
CUERNAVACA	17004	18.92	-99.234	1510	1308.95	26.74, 16.17
TRES CUMBRES	17022	19.04	-99.258			
	2639	1980.69	18.57, 5.04			
PROGRESO IMTA*		18.88	-99.159	1372	1224.1	

*(Validación de la metodología) (Fuente: elaboración propia)



ción de su ciclo de vida en días desde la siembra a la cosecha. Sus etapas fenológicas. Si se adaptan a las condiciones de la zona y los requerimientos agroecológicos y climáticos del cultivo como suelo, temperatura, agua, fotoperiodo, radiación etc. Y de ser posible saber si existe información sobre los requerimientos agroclimáticos por etapa (modelo fenológico). Se puede utilizar la guía "Requerimientos agroecológicos de cultivos" de Ruiz *et al* (2013).

e) Labores culturales y de manejo del cultivo.

Tomar en cuenta si existe una guía técnica local o regional del cultivo o cultivos a evaluar. Realizar un Plan o programa de cultivo. Conocer si durante el periodo de estiaje se realiza la preparación del terreno y las características del mismo (barbecho, rastreo o labranza de conservación). Siembra: conocer si la siembra se realiza con variedades criollas, mejoradas, certificadas o bien transgénicas. Si la siembra se realiza manual con estaca o coa, surcos con tracción animal, sembradora mecánica o sembradora para labranza de conservación. Anotar la fecha del inicio de las lluvias y las fechas de siembra, germinación, desarrollo vegetativo, estrés hídrico, presencia de plagas, recuperación del cultivo, floración, madurez y cosecha. Anotar las fechas y el tipo de actividad como: Fertilización (subsuelo, superficial o foliar), aporque o remoción de tierra, aplicación de plaguicidas, con-

trol de maleza o deshierbe (manual, químico o mecánico), etc.

2. Realizar pruebas de calidad y homogenización de la información climática.

Antes de utilizar información climatológica es necesario verificar si esta completa y si cuenta al menos con más de 30 años de registros. Si los datos son homogéneos y consistentes, ya que pueden existir parámetros fuera de rango o errores al momento de registrarlos. Porque puede influir si hubiese un cambio de ubicación de la estación, la calibración de los sensores y la falta de servicio y mantenimiento de del instrumental meteorológico. Existen procedimientos y metodologías para completar series de datos, la depuración de los mismos y realizar su homogenización como los utilizados por Montero y Pita (2018).

3. Sistematizar archivos y asignar el Día Juliano (DJ) a las fechas del calendario civil y cálculo directo de índices e indicadores. Las ventajas de utilizar el día juliano en vez de las fechas con el formato día, mes y año son muchas. El DJ es un dato de entrada en múltiples algoritmos para calcular índices climáticos y agroclimáticos, por ejemplo. la de declinación (DS), solar, el ángulo horario (AH), el fotoperiodo etc. También permite realizar operaciones con el tiempo para determinar las fechas de ocurrencia de eventos clave a través del tiempo como cambio de estación, solsticios, equinoccios, el inicio y fin de

PH, la canícula climática, la agronómica y cualquier evento físico con efecto biológico como helada agronómica, fotoperiodo y temperaturas sobre el ciclo fenológico de cultivos (germinación, desarrollo vegetativo, floración, amarre de fruto, grano lechoso, madurez fisiológica), emergencia plagas y patógenos, así como fechas de eventos de manejo del cultivo como barbecho, surcado, siembra, riegos, fertilización, deshierbes, acciones fitosanitarias, polinización, cosecha, etc. La única y mínima desventaja es que dentro del análisis diario no se toma en cuenta los valores del día 29 de febrero registrado en los años bisiestos. Cualquier operación que se realice con el DJ y el resultado sea fraccionario se considera lo siguiente; si la fracción es menor de 0.50, se toma solamente el día entero. Si la fracción es igual o mayor se

toma el siguiente día del entero (DJ+1), (Vega, 2016).

Como la base de datos climáticos utilizados vienen ordenados en los formatos establecidos por el "CLICOM" y la depuración y complementación de los mismos se realiza con el programa "Climatol" y los archivos de datos depurados vienen por variable, es necesario organizar la información bajo el formato siguiente:

Con este formato en la hoja de cálculo se obtienen los promedios diarios y anuales y se pueden hacer operaciones matemáticas y macros con las fechas. De la misma forma se procede para cada variable climática analizada como temperatura, radiación, evaporación, etcétera.

Cálculo de Índices e indicadores. Los indicadores se obtienen directamente de los datos analizados, por ejemplo: la temperatura

Tabla 6.2. Formato utilizado para la sistematización, procesamiento y cálculo de índices e indicadores para determinar el PH y la CA (IMTA, 2018).

Estación: Nexpa, Morelos. Clave: 17038 Latitud: 18.52 grados.

Variable: Precipitación diaria (PPT) en mm Período: 1951-2010 (60 años)

Día	Día Juliano (DJ)	Año 1 (1951)	Año 2 (1952)	Año (...)	Año "n" (2010)	Promedio
01-Ene	1	0	0	.....	0	0.0
02-Ene	2	0	0	.....	12	0.05
03-Ene	3	0	0	.....	0	1.0
.....
30-Dic	364	0	8	.....	2	2.0
31-Dic	365	0	0	.....	0	0
PROMEDIO		782	670	820	.....	730.9

(Fuente: elaboración propia)



media, extremas, promedios por día, mes y las fechas de ocurrencia y los estadísticos; la precipitación máxima extrema diaria, la acumulada por periodos, promedios, el porcentaje estacional etcétera.

Los Índices requieren de la interacción con otras variables o indicadores, así como operaciones matemáticas y algebraicas para obtenerlos, por ejemplo: los grados días de desarrollo, los índices de confort climático, la lámina de agua evapotranspirada, la precipitación efectiva durante el periodo húmedo, el agua utilizada por el cultivo, el índice de escurecimiento, las unidades fototérmicas y otros índices de tipo climático y agrometeorológicos.

El primer índice a calcular para cada estación es la duración astronómica del día o Fotoperiodo (*FOTO*) en horas. La duración del día y la noche son determinadas en función del día juliano (*DJ*) y la latitud (*LAT*) en grados, con estos valores se determinan la Declinación Solar (*DS*) y el Angulo Horario (*AH*) en grados respectivamente. El fotoperiodo se puede calcular mediante la siguiente ecuación propuesta por Sellers en 1969 y citadas por Vega y Aceves (1993).

$$FOTO = 2 * AH / 15$$

Ecuación 6.2

Si la estación cuenta con información de los valores promedios diarios de la Radiación global (*Rg*) en calorías/cm²/días se transforma a milímetros de agua evaporable dividiendo entre 59. De no contar con esta información, se

puede estimar *Rg* con los registros diarios del Brillo solar (*BS*) utilizando la ecuación de Glover y MacCulloch (1958) citado por Ortiz (1987).

$$Foto = 2 * AH / 15$$

Ecuación 6.3

Donde:

- Rg* = Radiación global en mm de agua evaporable
- a* = 0.29 cos(LAT)
- b* = 0.52
- RA* = Radiación solar extraterrestre en mm de agua evaporable (utilizada por Cervantes et al, 2012)

Para las estaciones que no cuenten con datos de *Rg*, ni *BS* se puede estimar *Rg* con el *BS* de dos estaciones cercanas contiguas a la misma latitud y altitud obtener el promedio. Ejemplo: Datos de *Rg* los observatorios de Puebla y Zacatepec, Mor. Se puede estimar la *Rg* de Cuernavaca. De no existir datos de *Rg* de otras estaciones se puede obtener del promedio de estaciones consideradas del *BS*.

Radiación neta (*Rn*). Si se cuenta con datos de *Rn* medidos por un radiómetro neto, se puede transformar a lámina evaporada. También se puede estimar la *Rn* conociendo la *Rg* diaria ya sea medida o estimada, el albedo o coeficiente de reflexión (*r*) de la superficie y la proporción de la radiación terrestre que se queda mediante la siguiente ecuación considerada por Romo y Arteaga (1983). Para el cultivo de referencia utilizar *r* = 0.23 (Allen et al, 2006)

$$Rg = RA (a + b (BS / FOTO))$$

Ecuación 6.4

$R_g\downarrow$ = Radiación solar global sobre la superficie en calorías/ cm²/día, o mm de agua evaporable.

$R_L\downarrow$ = Radiación atmosférica (onda larga) que llega

$R_L\uparrow$ = Radiación terrestre (onda larga) que sale

Evaporación (Ev) diaria en mm. Si se cuenta con los datos de Ev medidos por un tanque de evaporación, se puede estimar la Evapotranspiración potencial (ETP). Si no se cuenta con datos de Ev se pueden calcular directamente de la radiación neta medida o estimada en mm.

Evapotranspiración potencial (ETP) diaria en mm ($ETP \approx ET_0$). Para conocer el déficit hídrico diario o las necesidades de agua de un cultivo, se requiere conocer la ETP estimada, o la Evapotranspiración de un cultivo de referencia (ET_0) medida por una estación agrometeorológica. Si no se cuentan con estos datos; se puede estimar la ETP directamente con los datos de la Ev en mm medida o estimada por la siguiente ecuación propuesta por Palacios (1977) y utilizada por Vega y Aceves (1993).

$$ETP = K(Ev)$$

Ecuación 6.5

Donde:

K = Radiación solar global sobre la superficie en calorías/ cm²/día, o mm de agua evaporable.

El Déficit Hídrico (DH) en mm es un balance entre la pérdida de agua debido a demanda climática generada por la evaporación del

suelo y la evapotranspiración de agua por la vegetación y los cultivos (ETP) y la entrada de agua por la lluvia (PPT).

$$DH = ETP - PPT$$

Ecuación 6.6

En el caso de contar con datos medidos de la ET_0 y conociendo la etapa fenológica del cultivo y su K_c , los contenidos de humedad en el suelo y precipitación efectiva, se pueden calcular las necesidades o requerimiento de riego del cultivo. También se puede estimar la ET_0 por la ecuación de Penman-Monteith modificada (citada por Allen *et al*, 2006), siempre y cuando una estación registre las variables meteorológicas requeridas para calcularla.

Cálculo de los Grados día de desarrollo o unidades térmicas o unidades calor (GDD) diarios para el cultivo "x". Conociendo la temperatura umbral mínima o base del cultivo (T_b) y utilizando el método agronómico se calculan los GDD diarios (Citada por Romo y Arteaga, 1983).

$$GDD = T_{med} - T_b$$

Ecuación 6.7

Con las temperaturas T_{max} y T_{min} diarias se calcula la T_{med} ;

$$T_{med} = (T_{max} + T_{min}) / 2.$$

Para el presente trabajo se utilizaron 3 temperaturas base, 8, 10 y 12 °C. y se calcularon respectivamente: GDD_1 , GDD_2 y GDD_3 . Los GDD_2 para Maíz ($T_b = 10$).



Cálculo de las Unidades Fototérmicas (*Ufoto*). Para el caso de cultivos sensibles al fotoperiodo y cuyo desarrollo fenológico no solo dependa de la acumulación de los *GDD*, es necesario realizar el cálculo de las *Ufoto* e índice heliotérmico o de Geslin, que se obtiene al multiplicar los *GDD* diarios por el fotoperiodo en horas (*FOTO*) y es adimensional (Ortiz, 1987).

$$Ufoto = GGD * FOTO$$

Ecuación 6.8

Para el presente trabajo, se calcularon 3 *UFoto*, una para cada grupo de *GDD*.

Con los datos de precipitación diaria para el año "i", se obtienen los indicadores *PPT* total o acumulada anual en mm. *PPT* acumulada de mayo a octubre, la *PPT* acumulada cada 5 días (pentadal) a partir del 1 de junio al 31 de octubre. Con el seguimiento diario a la *PPT* se calcula en forma visual y aritmética o se genera el algoritmo para determinar las fechas de inicio, fin y duración del PH. Si PH es menor a 45 días, se considera como año seco. También dando seguimiento a la *PPT* diaria a partir del inicio del PH, se define el inicio fin y duración de la CA. Si la duración es menor a 10 días no se considera sequía agronómica. Si no existe período húmedo, la duración de la canícula agronómica nunca se presenta solamente la climática y esta será de 42 días, iniciado el 14 julio. la mayor duración de la canícula agronómica es de 45 días, porque con esta duración se presentará la muerte de cul-

tivos. Para conocer la severidad consultar los parámetros definidos por Vega (2017), estos porcentajes continúan afinándose. Para todos los años se realiza el mismo procedimiento, obtiene la *PPT* promedio diaria, la *PPT* promedio anual. La *PPT* de mayo a octubre, la *PPT* del período húmedo si lo hubiera, la fecha promedio de inicio y fin de PH, la duración promedio del PH, la moda inicio, fin y duración del PH. La frecuencia de años secos en porcentaje se obtiene mediante la ecuación siguiente.

$$Frecuencia\ de\ años\ secos = \frac{Número\ de\ años\ secos}{Número\ de\ años\ analizados} (100)$$

Ecuación 6.9

También se obtiene para cada estación la frecuencia de la canícula de la misma manera; número de años con canícula dividida entre el total de años analizados por cien. Se obtiene la fecha promedio de inicio y fin de la canícula, así como el promedio de la duración. Se cuantifica la intensidad de la canícula mediante la acumulación de *GDD*, *Ufoto*, *Rg*, *Rn*, *Ev*, *ETP* y el *DH*.

4. Determinar para cada año en DJ las fechas del inicio, fin y duración en días del período húmedo (PH).

Con base en las estadísticas de la precipitación en México el período lluvioso en México se inicia durante el mes de junio porque coincide con actividad ciclónica y la entrada de huracanes y ondas tropicales cargados de humedad al territorio nacional. A partir del primero de junio se comienza a contabilizar la lluvia diaria; el día en que se presente

una lluvia igual o superior a 60 mm o bien el momento en que se acumulen durante tres días consecutivos de lluvia la misma cantidad, aunque deje de llover después de esa fecha es tomada como el inicio del *PH*. Lo más probable que suceda es que si acumulen los 60 mm requeridos para que el suelo se humedezca lo suficiente para iniciar la siembra o plantación, pero en un periodo de 5 días de lluvia ininterrumpida, porque a láminas más pequeñas la precipitación efectiva aumenta. Por esta razón también si estas condiciones ocurren, también son tomadas en cuenta para iniciar el *PH*. Para que el *PH* no sea interrumpido por la sequía debe llover al menos durante tres días consecutivos una lámina mínima de 20 mm cada 10 días. El fin del *PH* ocurre cinco días después de cuando se suspende la lluvia, o si la precipitación después de 1° días es menor a 20 mm, considerando que la *CAS* es de 10 cm (100 mm). Todas las fechas deberán ser registrados en *DJ*. Un año seco es aquel donde no existe el *PH* o bien si éste es menor a 45 días. La duración en días es importante para saber a partir cuando se pueden sembrar o plantar cultivos y la lluvia que recibirá durante ese periodo. Si la duración del *PH* es mayor que la duración del cultivo se considera como exceso. Los resultados de todos los años se tabulan y se sacan los promedios y la moda y se determina su frecuencia.

5. Determinar presencia, fechas de inicio, fin y duración en días de la canícula agronómica (*CA*).

Considerando que la canícula climática o astronómica está asociada a las altas temperaturas

veraniegas y que ésta nunca ocurre antes del solsticio de verano y que la temporada de ciclones y huracanes para la república mexicana inicia el primer día de junio, es a partir de esta fecha donde se comienza a dar seguimiento a el comportamiento de las variables climáticas diarias asociadas a las actividades agrícolas. Los registros históricos de la lluvia donde estadísticamente se comprueba que el inicio o establecimiento de la temporada de lluvias o temporal para las estaciones analizadas y en todo el estado de Morelos ocurre a mediados del mes de junio. Independientemente de que no se presentara lluvia o la precipitación registrada es muy baja y no existen condiciones para que inicie el período húmedo durante un año seco, la canícula climática si se presenta de forma astronómica y durará 40 días a partir del día 14 de julio. Bajo las condiciones anteriores no existiría canícula agronómica, ya que nunca se presenta el *PH* y sin el inicio del *PH*, no hay siembra ni actividad agrícola. Para determinar la frecuencia en porcentaje de la canícula se suman los años con canícula climática o astronómica y los años con canícula agronómica y se divide entre el número de años analizados y se multiplica por 100. El inicio de la canícula agronómica para cualquier año es necesario que exista un inicio previo del *PH* (condición normal), la fecha de inicio en *DJ* será cuando se suspenda la lluvia y se prolongará hasta cuando la precipitación sea suficiente para romper el efecto de la canícula y ello ocurre cuando el suelo acumule el 20 por ciento de su *CAS*, es decir por lo menos 20 mm, Las lluvias por encima de este valor pueden ser aprovechadas por los cultivos. Puede ser que esta cantidad de lámina ocurra



con un solo evento, pero también es válido que se acumule esta cantidad hasta en tres días consecutivos de lluvia (en ambos casos la precipitación superará a la *ETP*). Si la sequía se prolonga por más de 10 días si se considera canícula agronómica y la fecha del final de la canícula ocurrirá el día que regrese de nuevo el temporal y se rompa en definitiva el efecto canicular sobre el cultivo. Si el *PH* se presenta después del 25 de julio y antes del 23 de agosto, la canícula iniciará 10 días después (5 de agosto) si la hubiere. Lo menos probable es que el inicio del *PH* se registre después del 23 de agosto ya sea un año seco y la canícula climática ya se presentó y agronómica ya no sería considerada a menos que iniciara a partir del 2 de septiembre y si hubieran sembrado cultivos tardíos de ciclo corto.

Igual que para el *PH* se determina la frecuencia y la moda analizando todos los años. Se realizará una comparación del inicio, fin y duración del *PH* para cada estación utilizando esta metodología y la propuesta por la *FAO* para determinar el *PCH*.

6. Determinación de la intensidad de la CA.

Determinar la intensidad de la CA no es un proceso simple, es necesario tomar en cuenta en orden de importancia la duración en días, el déficit hídrico (*DH*) en milímetros ($ETP - PPT$), la acumulación de Grados Día de Desarrollo (*GDD*) y Unidades fototérmicas (*Ufoto*) del cultivo y la Radiación neta (*Rn*) medida o estimada en mm de agua evaporable. Con los datos diarios de *Rg* medida o estimada se estima la *Rn*.

Con los datos de la Evaporación (*Ev*) diaria en mm medidos o los valores estimados con la *Rn*, se calculan los valores diarios de la Evapotranspiración potencial (*ETP*) en mm. Con los datos de la Evapotranspiración de un cultivo de referencia (*ETo*) en mm, obtenidos de estación agrometeorológica o con los estimados con la *ETP*, se realiza el balance con los datos de la *PPT* diaria y con ello el *DH* en mm. Este procedimiento se realiza para todos los años y se calculan los promedios y la moda.

Para el cálculo los Grados Día de Desarrollo (*GDD*), se consideraron las temperaturas base (*Tb*) de 8, 10 y 12°C y calculadas con el método agronómico como se describe en los índices e indicadores, a partir del inicio de la *CA* y acumulados hasta el final de la *CA*. base las tres *Tb* se generan tres los *GDD1*, *GDD2* y *GDD3* y es el usuario quien define el cultivo y su temperatura base. Para el ejemplo se considera el cultivo de maíz y una *Tb* igual a 10. (*GDD2*). De igual manera se realiza el cálculo y acumulación de las Unidades fototérmicas (*Ufoto*), generándose tres resultados *Ufoto1*, *Ufoto2* y *Ufoto3*; debido a que los *GDD* utilizados presentan tres valores (Vega et al, 2016). Será aplicado para tres tipos de cultivos; para el ejemplo del maíz, el valor a utilizar es las *Ufoto2*.

La radiación neta diaria y acumulada se estima a partir de la *Rg* con la ecuación descrita por Romo y Arteaga (1983). Se transforman los valores de *Rn* a milímetros de agua evaporable o sea la *Ev* estimada diaria en mm.

7. Determinar el grado de severidad de la canícula agronómica

Para determinar el grado de severidad de la CA para cada año en que ésta se presenta es necesario conocer la intensidad de la misma, conocer las etapas críticas del cultivo y la etapa en que se encuentra el cultivo al momento de dar inicio y el final de la CA. El grado de afectación es diferenciado para cada etapa del cultivo, normalmente las primeras etapas de desarrollo son más tolerantes o resistentes a la falta de agua. También el grado de afectación es diferenciado para especies o aun entre variedades cultivadas. Sin duda también los suelos pesados a francos, profundos y con gran contenido de materia orgánica ayudan a las plantas a resistir a la sequía o en caso contrario: suelos ligeros, pedregosos, someros y con poco contenido de materia orgánica ayuda a que el daño al cultivo se magnifique. Desafortunadamente existen pocos trabajos locales donde se relacione la afectación del rendimiento del cultivo con la duración e intensidad de la CA. Solo se conoce el trabajo de Vega (2017) donde asigna cinco grados de severidad en función de la duración e intensidad con la disminución en porcentaje del rendimiento de los cultivos de temporal maíz y sorgo en la parte media del estado de Morelos. la severidad o afectación nula, ligera, media, alta y extrema. Es necesario conocer esta información y ampliarla a otros cultivos o variedades para determinar el porcentaje de la reducción del rendimiento en cada etapa fenológica al presentarse diferente duración e intensidad de la CA. Para el ejemplo se utiliza el cultivo de maíz variedad mexicano de junio y

las categorías mencionadas anteriormente. El maíz fue sembrado el 23 de junio de 2018 en un suelo vertisol en la localidad de El Copalar Morelos a 7 km de distancia de la estación más cercana que es Progreso IMTA, Morelos, perteneciente a SEMARNAT y operada por el Organismo de Cuenca Balsas de la CONAGUA. (Foto 6.3)

8. Validar el procedimiento.

Para dar seguimiento puntual y validar la metodología propuesta para determinar el PH y la CA, se aplica el ejercicio en cuatro estaciones localizadas a diferente altitud y latitud dentro de la cuenca del Río Apatlaco y se corrobora con datos diarios del clima medidos en la Estación Progreso IMTA de la CONAGUA con registros completos e ininterrumpidos de 2013 a la fecha (6 años) de Temperaturas máxima y mínima diaria, lluvia diaria, Evaporación diaria y tres años consecutivos dando seguimiento al desarrollo y rendimiento al cultivo de maíz sembrado bajo condiciones de estricto temporal de la parcela experimental y demostrativa descrita en el capítulo anterior.

9. Emitir las recomendaciones para mejorar el manejo del cultivo, laboreo del suelo y otras acciones agronómicas para atenuar los daños la canícula agronómica y los efectos del cambio climático.

Con base en los resultados obtenidos de la aplicación de esta metodología en las estaciones seleccionadas, se emitirán las recomendaciones más importantes con la finalidad de mejorar el aprovechamiento de



recurso climático en favor de la producción agrícola y la planeación de la superficie y cultivos que se sembrarán o plantar bajo condiciones de temporal. Reducir los riesgos y el número de siniestros de tipo agroclimático dando seguimiento de la CA. También se harán recomendaciones para el manejo del cultivo y otras actividades que deben realizarse en la agricultura para reducir los efectos negativos de CA y los efectos del cambio climático.

En un próximo capítulo se analizarán por separado los últimos 10 años de información climática disponible para las mismas estaciones

utilizadas en el presente estudio y se aplicará la metodología propuesta para determinar el PH y la CA para estos "últimos" años con el propósito de detectar cambios de magnitud, de intensidad y de frecuencia en las variables, índices e indicadores calculados respecto a los registros históricos anteriores. Al mismo tiempo se registrarán las modificaciones y los cambios en la fenología del cultivo, sus rendimientos y la fechas ocurrencia y duración de eventos agrometeorológicos clave de los cultivos atribuibles al cambio climático. También se analizarán las medidas agronómicas y culturales que realiza o adopta el productor para adaptarse a ese cambio.



Foto 6.3. Estación meteorológica Progreso IMTA utilizada como referencia para realizar la validación de la metodología

6.3. Resultados y Discusión:

6.3.1. De la aplicación de la Metodología.

Se obtuvo la información climatológica confiable de 14 estaciones localizadas dentro de la cuenca del río Apatlaco y las restantes muy cerca de su área de influencia. Los registros históricos de las variables analizadas fueron precipitación (*PPT*) diaria, temperatura máxima ($T_{m\acute{a}x}$) diaria y temperatura mínima ($T_{m\acute{i}n}$) diaria, para un periodo ininterrumpido de 60 años (de 1951 a 2010). Los archivos electrónicos utilizados para cada variable ya estaban estandarizados y cumplieron con los requisitos de cantidad y calidad por el trabajo previo realizado por Montero y Pita (2018). Se diseñó un formato (Cuadro 2) para sistematizar los archivos y asignarles el día juliano (DJ) que permitió facilitar la operaciones matemáticas y algebraicas para determinar los índices e indicadores necesarios para aplicar la metodología propuesta. Todas las estaciones estudiadas en el estado de Morelos están alineadas a una misma latitud en la parte central del estado exprofeso, para determinar la influencia de la altitud y latitud sobre las variables de tipo agroclimático y de manejo de del cultivo.

6.3.2. El comportamiento de la precipitación y la temperatura.

En cuanto a la precipitación se presentan un patrón de distribución de la lluvia de tipo mon-

zónico de verano, de mayo a octubre se concentra el 94% y de junio a septiembre el 82% tal como lo habían reportado Taboada y Oliver (2009) y son en estos meses cuando se establecen los cultivos de temporal (Vega, 2017). La precipitación promedio diaria a través del año puede ser representada como una función de forma de dos crestas (bimodal) más acentuada para las estaciones con menor cantidad de lámina precipitada acumulada. El valle entre las dos crestas de la precipitación representa una disminución considerable; en algunos años la lluvia es nula o la lámina es escasa, pero se disfraza como una simple disminución debido a que en la gráfica se incluyen los promedios diarios de los 60 años analizados, si se tomarán promedios mensuales es imposible detectar la *CA*. Este período seco es conocido comúnmente como canícula. La cantidad de lámina precipitada en promedio para cada estación es diferente y se observa un gradiente altimétrico. A mayor altitud se registra mayor cantidad de lluvia; tal como se muestra en la Figura 6.6. La estación con mayor precipitación es Tres Cumbres que se encuentra a una altura de 2639 msnm y la menor es Nexpa con promedio anual de 731 mm y ubicada a una altitud de 800 msnm., en promedio para las estaciones estudiadas fue de 1228 mm.

En cuanto a la temperatura también existe una relación lineal con la altitud. Los resultados se muestran en el Tabla 6.2. La estación más caliente es Nexpa porque las temperaturas mínimas son más cálidas todo el año, sin embargo, las temperaturas más extremas



se registran en Zacatepec, las más templadas para Cuernavaca. La estación más fría es Tres Cumbres y aunque en promedio la temperatura mínima anual es de casi 5°C, durante la temporada invernal se presentan temperaturas por debajo del punto de congelación, presentándose heladas durante las noches y las mañanas (Figura 6.6).

Si los valores precipitación y temperatura se ven definidos por la altura de las estaciones, lo demás índices e indicadores calculados a partir de estos valores también presentarán la misma tendencia.

De los índices e indicadores agroclimáticos calculados

El resultado de los índices e indicadores agroclimáticos aplicados en cuatro estaciones

de Morelos para determinar el PH y la CA se muestran en el Tabla 6.3.

Del Periodo Húmedo (PH) y la CA

El inicio del PH ocurre primero en las estaciones más altas debido las lluvias orográficas que se presentan en las zonas montañosas y de nuevo se observa que en las partes más bajas existe un retraso de ocurrencia. En todas las estaciones el inicio del PH se registra durante el mes de junio, en promedio el día 19. Casi tres semanas después de inicio del PH se presenta la CA en promedio el 09 de julio. El fin de la CA ocurre en promedio el día 26 de julio y tiene una duración promedio de 17 días. En estos promedios se encuentran valores extremos de 45 días de CA y algunos años lluviosos donde la CA no se presenta. Nexpa presenta la mayor duración de la CA de 21 días y Tres Cumbres más baja de 14 días (Figura 6.7).

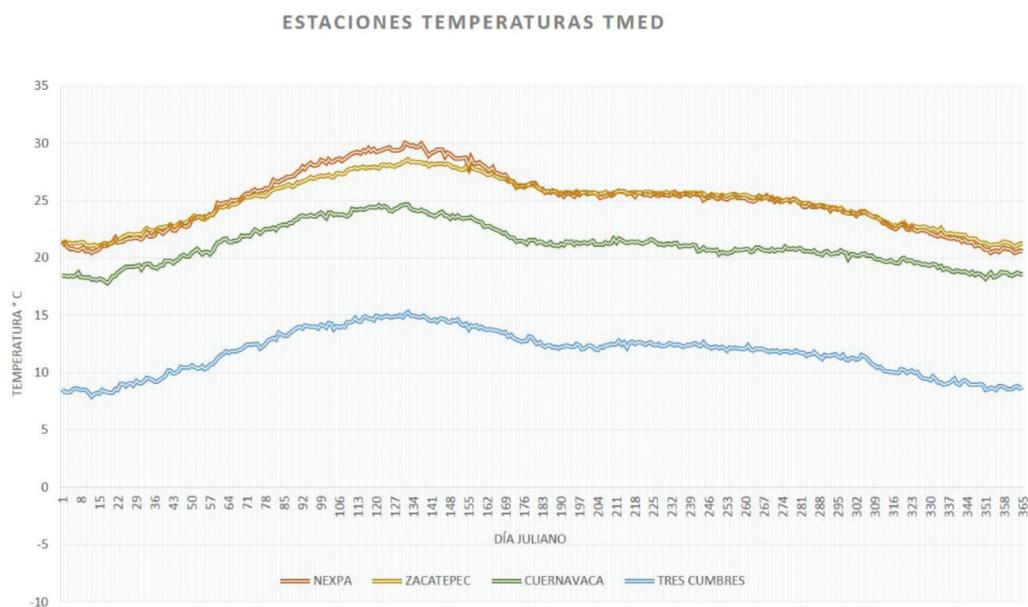


Figura 6.6. Comportamiento de la temperatura media diaria promedio en cuatro estaciones de Morelos de 1951 a 2010. (Fuente: elaboración propia)

Tabla 6.3. Resultados del análisis termo pluviométrico de 1951 a 2010 de cuatro estaciones aplicando la metodología para determinar el PH y la CA.

Clave	17038	17042	17004	17022	
Estación	Nexpa	Zacatepec	Cuernavaca	Tres cumbres	Promedio
Inicio del PH (fecha)	30-jun	20-jun	13-jun	10-jun	19-jun
Inicio de CA (fecha)	17-jul	06-jul	10-jul	03-jul	09-jul
Fin de la CA (fecha)	06-ago	24-jul	27-jul	17-jul	26-jul
Duración de la CA (días)	21	17	16	14	17 días
Número de años con CA	56	59	49	21	46 años
Fin PH (fecha)	09-sep	29-sep	03-oct	10-oct	28-sep
Duración PH (días)	72	101	112	124	102 días
PPT promedio anual (mm)	730.9	881.02	1308.95	1980.69	1225.39
PPT (May - Oct) promedio	694.61	838.74	1240.98	1855.82	1157.54
PPT (PH) promedio mm	403.49	630.31	1027.76	1665.3	931.72
PPT CA promedio mm	93.54	109.32	165.23	227.37	148.87
Número de años secos (No hay periodo húmedo o ≤ 45 días)	15	1	0	0	4 años
Años húmedos (Período Húmedo ≥ 45 Días)	45	59	60	60	56 años
Promedio T max °C	32.57	33.69	26.74	18.57	27.89
Promedio T min °C	17.81	16.02	15.45	4.92	13.55
Promedio T med °C	25.2	24.85	21.1	11.73	20.72
Promedio Tmax del PH °C	29.04	32.61	25.69	17.73	26.27
Promedio Tmin del PH °C	18.68	18.75	16.62	7.05	15.28
Promedio Tmed del PH °C	23.82	25.68	21.16	12.4	20.77
Promedio GDD1 (Tb = 8°C)	16.95	16.85	13.1	3.73	12.66
Promedio GDD2 (Tb = 10°C)	14.95	14.85	11.1	1.73	10.66



Tabla 6.3 Resultados del análisis termo pluviométrico de 1951 a 2010 de cuatro estaciones aplicando la metodología para determinar el PH y la CA. (Continuación)

Clave	17038	17042	17004	17022	
Estación	Nexpa	Zacatepec	Cuernavaca	Tres cumbres	Promedio
Promedio GDD3 (Tb = 12°C)	12.95	12.85	9.1	-0.27	8.66
Promedio GDD1 del PH	16.38	17.68	13.16	4.42	12.91
Promedio GDD2 del PH	14.51	15.68	11.16	2.38	10.93
Promedio GDD3 del PH	12.75	13.68	9.16	0.39	9.00
Promedio UFoto1	207.3	205.36	159.85	47.98	155.12
Promedio UFoto2	181.7	179.76	134.25	22.38	129.52
Promedio UFoto3	155.39	153.4	108.61	-1.44	103.99
Fotoperiodo promedio CA (horas)	12.89	13.03	12.98	13.08	12.99
Brillo solar estimado n (horas)	6.82	6.72	6.4	5.12	6.27
Radiación global Rg estimada mm	188.97	151.98	140.96	110.88	148.20
Radiación neta estimada Rn en mm	186.36	136.85	126.88	99.68	137.44
Evaporación estimada Ev mm	186.36	136.85	126.88	99.68	137.44
Evapotranspiración potencial ETP estimada mm	136.14	122.36	114.3	85.5	114.58
Déficit hídrico (ETP - PPT) de CA	42.6	13.04	-50.93	-141.87	-34.29

(Fuente: elaboración propia)

Utilizando la metodología descrita la para determinar la frecuencia de la CA se muestran en la Figura 6.8. En esta figura se resumen los resultados de la frecuencia de la canícula en porcentaje. Para la parte baja de Morelos la frecuencia de la CA e mayor, ya que se reciben menores láminas de precipitación. En estas zonas la frecuencia es en promedio de un 95%. En la parte alta existen estaciones más lluviosas donde la canícula en menos frecuente como el Tres Cumbre donde la frecuencia es tan solo del 35%. La parte media como Cuernavaca, Progreso y Yautepec, la frecuencia es de un 80%; es decir de cada 10 años, en 8 se presenta la CA. Si un año se presenta canícula en la parte alta, es muy probable que se presentara en la parte media y seguro en la parte baja.

lluviosas, localizadas en la partes más altas, húmedas y frías como Tres Cumbres. En promedio el fin del PH ocurre el día 28 de septiembre, con una duración promedio de 102 días. La duración del PH en algunos años es menor a 45 días y es considerado como un año seco (Figura 6.9). En la estación Nexpa la frecuencia de que se presente un año seco es del 25%, En Zacatepec es sólo el 1.7%, en las estaciones de Cuernavaca y Tres Cumbres, nunca se presentó un año seco en el periodo analizado. La precipitación acumulada en el PH demuestra que solo Nexpa no cubre las necesidades hídricas del cultivo de maíz; El promedio dentro del PH es de 932 mm. Es muy frecuente que en las estaciones con una duración del PH menor a 90 días no cultiven el maíz, pero si siembren sorgo, jamaica, ajonjolí, cacahuete o frijol, que son especies más resistentes a la sequía o de ciclo más corto,

El fin del PH ocurre primero en las estaciones más secas como Nexpa y las últimas las más

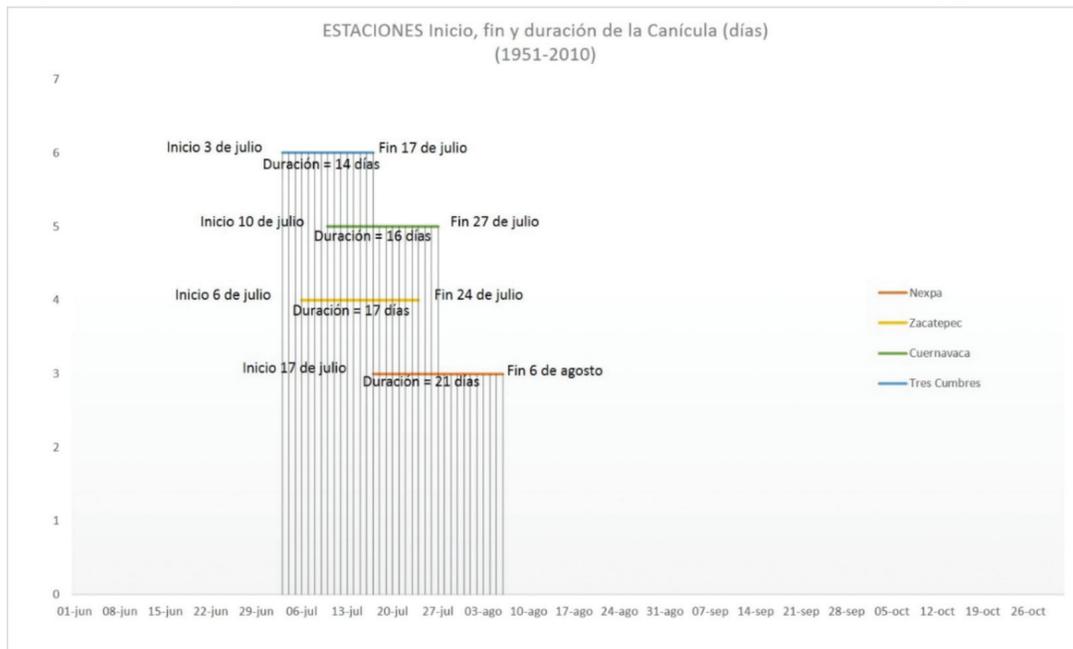


Figura 6.7. Inicio, fin y duración promedio de la canícula agronómica en días en 4 estaciones del estado de Morelos (de 1951 a 2010). (Fuente: elaboración propia)

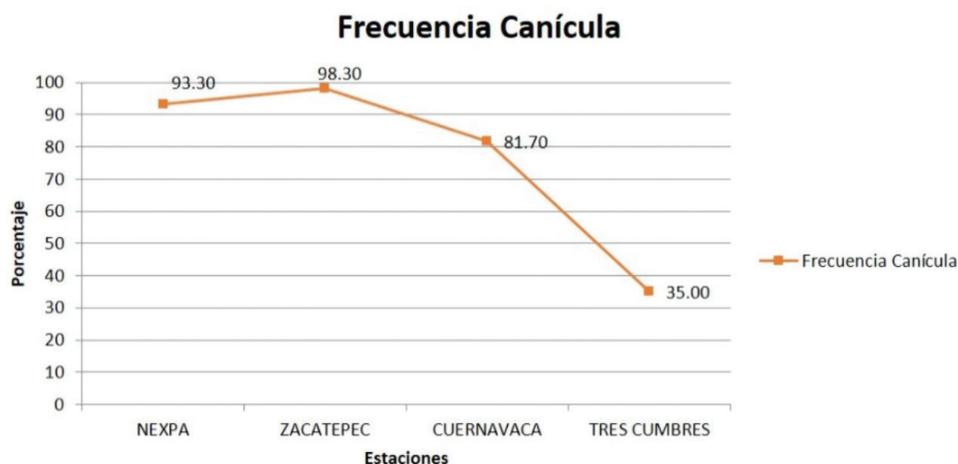


Figura 6.8. Frecuencia de la canícula agronómica para cuatro estaciones de Morelos. (Fuente: elaboración propia)

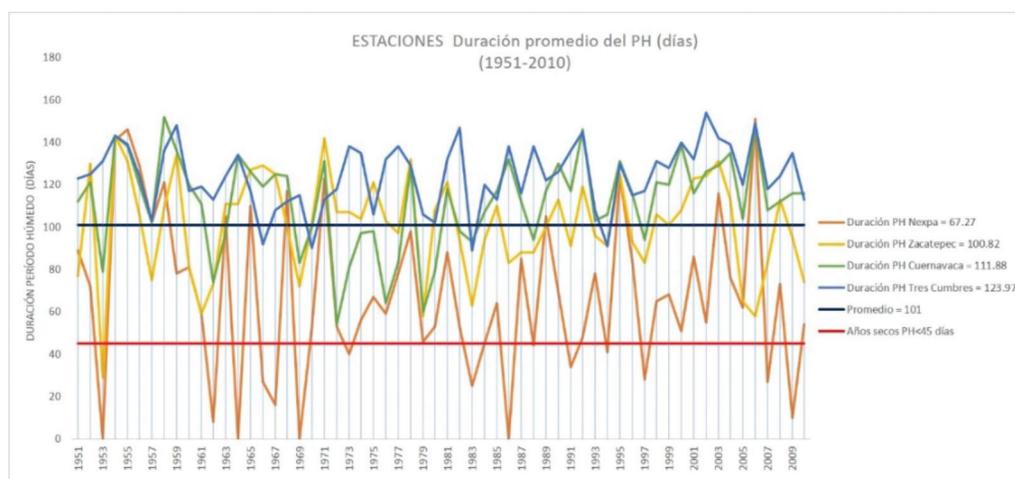


Figura 6.9. Variación y promedio de la duración en días del período húmedo (PH) y los años secos en cuatro estaciones de Morelos de 1951 a 2010. (Fuente: elaboración propia)

como es el caso del oriente y la parte sur del estado de Morelos que son las menos húmedas.

FAO, (1997) contra los valores del PH agronómico calculados para las cuatro estaciones, se muestran en la Figura 6.10.

Los resultados de la comparación del periodo de crecimiento húmedo (PCH) utilizado por

A pesar de ser valores muy parecidos el PCE inicia tres días antes que del PH porque no

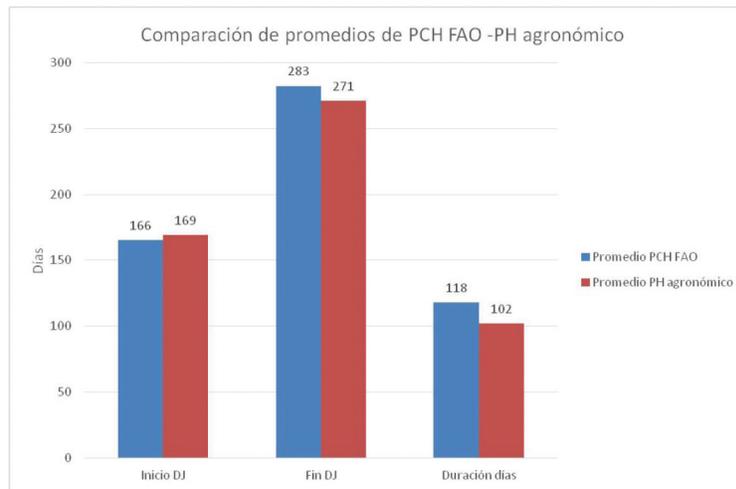


Figura 6.10. Comparación de los promedios de las fechas de ocurrencia en DJ del inicio, fin y la duración en días obtenidas con el PCH y el PH agronómico. (Fuente: elaboración propia)

toma en cuenta el número de días requerido humedecer el suelo. Además, los promedios mensuales y en menor grado los diarios enmascaran la falta y el exceso de agua de los eventos hidrometeorológicos que experimenta el cultivo durante la estación lluviosa: aun con los promedios diarios no es posible detectar los años secos ni la frecuencia de los mismos. También la fecha del fin es más tardía porque el PH considera que la humedad residual se agota en 5 días si se suspende la lluvia. Por esta razón la duración del PCE sobreestima con 16 días respecto al PH. Determinar el PCE como herramienta de planeación es buena, pero no para dar seguimiento puntual a las necesidades hídricas del cultivo.

La intensidad de la CA en cuanto a su duración es diferenciada por la altura y a la vez por la precipitación, para las zonas bajas y secas puede ser mayor a tres semanas (21 días) para las intermedias de 21 a 16 días y para

las altas y húmedas de 16 a 14 días como en Tres Cumbres.

La severidad de la CA en Nexpa para el cultivo del maíz es alta ya que dura 21 días, se acumulan 305 GDD2, para Zacatepec es media por duración y alta por temperatura dura 17 días se acumulan 267 GDD2, En Cuernavaca es media tanto por duración como por temperatura, dura 16 días y se acumulan 179 GDD. En Tres Cumbres es ligera por duración, pero no existe condiciones para establecer el cultivo de maíz, pero si para papa, avena y zanahoria donde solo se acumulan 33 GDD2 y 62 GDD1. En promedio la duración de la CA en las estaciones analizadas es de 17 días se acumulan 196 GDD2, lo que significa que, en promedio para maíz, la severidad es media.

La duración diaria del fotoperiodo en horas y la estacional prácticamente es la misma para todas las estaciones ya que la variación de la latitud es mínima. La distancia máxima de las



estaciones más distantes que son Nexpa y Tres Cumbres es sólo de 30 minutos (medio grado) de latitud y 59 Km en línea recta. Si se promedia el fotoperiodo diario de todo el año es de 12 horas en todas las estaciones, por eso este valor constante para cada día en cada latitud sólo se calcula para generar otros índices.

Las temperaturas extremas definen la media y la media a los *GDD*. El incremento de las *GDD* si la *Tmed* se mantiene constante, sólo depende de la temperatura base y esa temperatura la selecciona el usuario y depende del cultivo, la variedad y la etapa fenológica del cultivo o de cualquier organismo poiquilotérmico. En maíz la *Tb* requerida es de 10°C. Durante la *CA* los *GDD* describen el promedio de calor que experimentan las plantas. También está la opción de saber cómo se desarrolla la planta si ésta es sensible a la acción

conjunta del fotoperiodo y se calculan sus unidades fototérmicas cuya tendencia depende en gran medida de la temperatura media de la estación. Aparte del incremento de la temperatura al fotoperiodo.

Los valores de la *Rg* que siguen el mismo comportamiento estacional del fotoperiodo en ausencia de nubes, pero decae cuando inicia la nubosidad y la temporada lluviosa debido al incremento de la nubosidad el mes que más recibe *Rg* en todas las estaciones evaluadas y sirve como dato de entrada para calcular la radiación neta (Figura 6.11). La porción de la reflexión(albedo) por el cultivo es del 23% de *Rg* y el balance negativo entre la radiación atmosférica de onda larga que llega (R_L) y la mayor parte de la radiación de terrestre de onda larga (R_L) que sale representa perder el 14% de la *Rg*. La radiación resultante es la *Rn* estimada. Si esta *Rn* se convierte a lámina evaporable, ten-

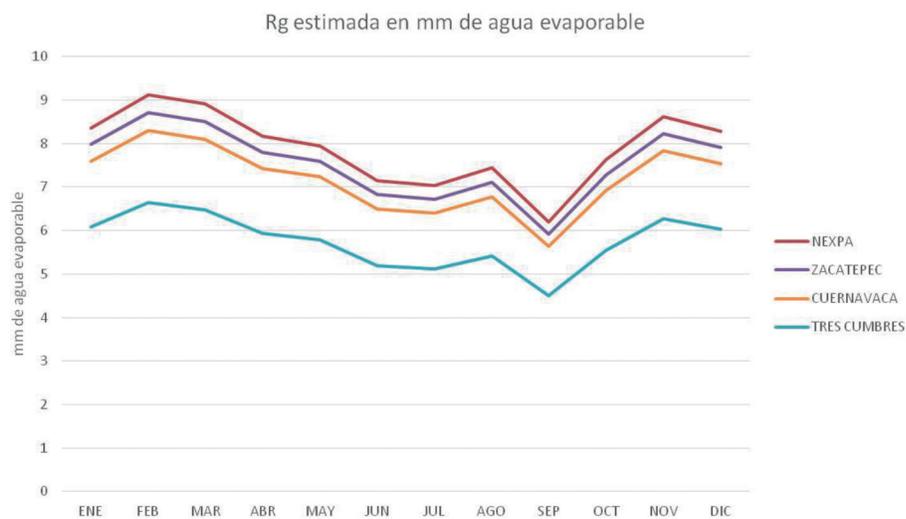


Figura 6.11. Estimación del Radiación global (*Rg*) mensual en mm de agua evaporable para cuatro estaciones de Morelos. (Fuente: elaboración propia).

dremos la E_v en mm estimada. Con los datos de la E_v se calculó la ETP . El déficit hídrico DH , se calculó para las cuatro estaciones. Si el DH es positivo existe el déficit; si los valores son negativos no existe el DH .

6.3.3. De la validación de la metodología

Los datos climáticos originales de la estación Progreso IMTA de 2013 a la fecha, fueron procesados y analizados con los mismo algoritmos, parámetros y criterios que las estaciones anteriores para validar la metodología propuesta para determinar inicio, fin y duración del PH y la CA, así como también darle seguimiento al cultivo del maíz y a las medidas culturales y manejo del cultivo del maíz. Los datos se muestran en la Tabla 6.4, donde sobresale que la PPT promedio anual coincide con el promedio de PPT calculada para todas las estaciones analizadas. El inicio del PH es el día 19 junio y la siembra se realiza en promedio el día 23. Un mes después se presenta la canícula agronómica (20 de julio) y termina el día 10 de agosto con una duración de 21 días (tres semanas) como ya lo habían reportado otros autores como Vega (2017). La lámina durante este periodo puede ser nula o muy escasa en promedio solo se acumulan 55 mm, pero los promedios lo disfrazan ya que solo representa el 6.3% de la lámina acumulada en todo el PH. El fin del PH ocurre el día 3 de octubre, y esto coincide con la primera semana de octubre que ellos reportan. La duración es de 106 días y durante ese periodo se acumulan en promedio 888 mm, ello

representa del 72% de la lámina precipitada durante el verano. Nuevamente se observa que la lámina acumulada en promedio para la variedad de maíz utilizada satisface en cantidad los requerimientos hídricos de 500 a 600 mm, pero no en oportunidad, porque las lluvias están bien distribuidas durante todo el ciclo como lo reportan en varios autores. Con estos resultados se valida la metodología propuesta ya que se asemeja mucho a las condiciones reales.

6.4. Conclusiones y Recomendaciones

La metodología propuesta permite y facilita efectuar el cálculo de índices e indicadores para determinar el PH y la CA y la ocurrencia de eventos agroclimáticos clave con datos medidos con el instrumental meteorológico o bien de datos estimados. Las estimaciones realizadas son congruentes y conservan la misma tendencia y rango que los valores medidos para cada estación seleccionada, siendo una herramienta útil en estaciones que no cuenten con la información requerida. En la medida que la calidad y cantidad de los datos de las variables de entrada requeridas sean medidas correctamente, la precisión de los resultados también lo serán.

Se aplicó adecuadamente y sin exclusión la metodología para determinar el PH y la CA en todas las estaciones por lo que se comprueba su universalidad.



Tabla 6.4. Resultados del análisis pluviométrico de la estación Progreso IMTA para validar la metodología y determinar el PH y la CA en relación al cultivo de maíz.

Progreso IMTA	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Promedio	Detalle
PPT ANUAL	1053.3	1277.8	902.1	1573.0	1314.2	716.5	1224.1	
PPT May-oct	990.9	1234.4	776.9	1361.3	1295.2	657.0	1131.7	92% de la anual
Inicio PH DJ	188.0	159.0	182.0	164.0	162.0	165.0	170.0	19 de junio
Inicio CA DJ	216.0	202.0	204.0	206.0	194.0	181.0	200.5	20 de julio
Fin CA DJ	235.0	225.0	220.0	224.0	209.0	216.0	221.5	10 de agosto
Fin PH DJ	270.0	280.0	274.0	280.0	279.0	274.0	276.2	03 de octubre
Duración PH	82.0	121.0	92.0	116.0	117.0		106.2	106 días
Duración CA	19.0	23.0	16.0	18.0	15.0	35.0	21.0	21 Días
PPT del PH	595.2	1016.3	502.5	1200.8	1126.2		881.8	72% Del verano
PPT de la CA	58.5	51.1	32.7	71.4	50.5	67.5	55.3	6.3% Respecto a ph
EV de la CA Medida	101.41	151.5	81.4	97.2	81.4	228.4	123.6	
ETP de la CA	81.128	121.2	65.12	77.76	65.12	182.72	98.8	
DH de la CA	22.6	70.1	32.4	6.4	115.2	43.6	43.66	

(Fuente: elaboración propia)

Se validó ampliamente la metodología dando seguimiento puntual al comportamiento de las variables climáticas y agronómicas de la estación Progreso IMTA ya que los valores de los índices e indicadores determinados se parecen o son muy similares a los promedios del estado.

Las temperaturas, la precipitación, la radiación, la evaporación y la *ET_o* y los índices e indicadores agroclimáticos calculados con estas variables de entrada, dependen de la

ubicación de la estación, en mayor grado por la altura y el relieve.

Se ha determinado que en todas las estaciones utilizadas tanto para aplicación como para validación de la metodología y ubicadas en Morelos, el inicio de la temporada de lluvias inicia de la segunda semana de junio y el periodo húmedo inicia normalmente una semana después y coincide con la fecha elegida por los productores para iniciar la siembra.

La duración del PH es de casi cuatro meses y en ese periodo en promedio de la precipitación es suficiente para satisfacer en cantidad de agua requerida por los cultivos, pero no satisface la oportunidad ya en la mayoría de los años dentro del periodo lluvioso se presenta la sequía intraestival o canícula con una duración promedio de 19 días, con déficit hídrico de 28 mm. A pesar de ser más larga en la zona media y baja del estado de Morelos, se compensa en parte porque los suelos (feozem y vertisoles) generalmente son profundos y de textura fina. Afortunadamente la sequía en la mayoría de los años se presenta en primera o segunda etapa de desarrollo de los cultivos y no en el periodo crítico de floración y llenado de grano por lo que el grado de severidad se considera

media, reduciendo hasta el 20% del rendimiento. El PH termina el 3 de octubre y con ello la duración del PH de 105 días. La frecuencia de años secos en promedio es muy baja (menos del 5%).

La cantidad de lámina precipitada en promedio supera los requerimientos de los cultivos estudiados, desafortunadamente, la cantidad de agua no asegura una buena distribución durante el ciclo del cultivo.

Se pueden utilizar las tendencias de la frecuencia, fechas de ocurrencia, duración, intensidad y severidad de la canícula agronómica como manifestación real del cambio climático.





A futuro se considera realizar la determinación probabilística de todas las variables de entrada, así como el cálculo de indicadores e índices agrometeorológicos ya que hace falta determinar en términos de probabilidad de ocurrencia los valores de las variables, las fechas en DJ, la duración, la intensidad y eventos de manejo y prácticas agronómicas como la siembra, cosecha etc. que intervienen en la determinación del periodo húmedo y la canícula agronómica.

6.5. Recomendaciones

En el caso de Morelos la canícula es diferenciada como también la *PPT* lo es; en localidades ubicadas en la parte baja (menor a 1200 msnm) la canícula normal dura 3 semanas (21 días) puede ser mitigada con algunas prácticas agrícolas que son: Utilizar la fecha del inicio de la CA para realizar el deshierbe y antes de que el suelo se seque y remover los primeros 10 cm suelo con la finalidad de romper la capilaridad de la primera capa de suelo mediante el cultivo mecánico o manual. Después del deshierbe es recomendable el dar tierra a plantas (aporque). Si se cuenta surcado o forma de proporcionar el riego se da un auxilio a los 11 días de iniciada la canícula. La práctica más recomendable es el retraso de siembra 5 días después de inicio del PH o 10 días después a fecha tradicional del 21 de junio. Otra recomendación es sustituir el cultivo

de maíz por especies más tolerantes a la severidad de la canícula como el sorgo, frijol, cacahuete, ajonjolí y jamaica. Tampoco se recomienda fertilizar el cultivo en plena canícula, hacerlo antes o después de una semana terminada la canícula. La práctica más recomendable es el retraso de siembra a 10 días a la tradicional la razón más importante es que cuando se presenta la canícula, la planta es de menor tamaño y aún está en pleno desarrollo vegetativo; esta condición permite hacer a tiempo los deshierbes mecánicos y manuales sin lastimar al cultivo. Si la siembra realiza cuando se presenta la primera o primeras lluvias es posible que la canícula se presenta cuando el cultivo espiga o jilotea y bajo estas condiciones el rendimiento puede ser nulo. Si la PH se presenta después de 23 agosto ya no arriesgarse a sembrar a menos que sean cultivos utilizados para forraje o de ciclo muy corto.

6.6. Referencias

- Allen G, R., L. Santos P., D. Raes, y M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. FAO. Riego y Drenaje 56. Roma, Italia. 298 pp.
- Cervantes O. R., R. Arteaga R., M.A. Vázquez P. y W. Ojeda B. 2012. Radiación global diaria estimada con métodos convencionales y redes neuronales artificiales

- en el Distrito de riego 075. Ingeniería Agrícola y Biosistemas 4(2): 55-60, 2012.
- CONAGUA, 2016, "Estadísticas del agua en México", SEMARNAT, Coyoacán, México D.F. www.conagua.gob.mx.
- CONAGUA. SMN. 2018. Entérate de qué es la canícula y cuándo se presenta en nuestro territorio publicada el 13 de julio de 2018. Centro Nacional de Prevención de Desastres (www.smn.cna.gob.mx).
- FAO. 1997. Zonificación agro-ecológica Guía general. Servicio de Recursos, Manejo y Conservación de suelos Dirección de Fomento de Tierras y Aguas, FAO. Roma.
- Montero M.M.J. y O. Pita D.. 2018. Homogeneización de Datos y Cálculo de Índices de Cambio Climático para la Cuenca del Río Apatlaco. En prensa.
- Ortiz S. C. A. 1987. Elementos de Agrometeorología cuantitativa. Con aplicaciones en la República mexicana. 3ª. Ed. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 327 pp.
- Mosiño, P.A. y E. García, 1968. Evaluación de la Sequía Intraestival en la Republica de Mexicana. Serie de Sobretiros número 6 de Los Climas del Valle de México, editado por Enriqueta García. México: Colegio de Posgraduados, Escuela Nacional de Agricultura. 57 pp.
- Romo G. J.R. y R. Arteaga R. 1983. Meteorología Agrícola. Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 442 pp.
- Ruiz C., J.A., G. Medina G., I. J. González A., H.E. Flores L., G. Ramírez O., C. Ortiz T., K.F. Byerly M. y R.A. Martínez P. 2013. Requerimientos agroecológicos de cultivos. Segunda Edición. Libro Técnico Núm. 3. INIFAP. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias-CIRPAC-Campo Experimental Centro Altos de Jalisco. Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México. 564 pp.
- Sanchez-Santillán, Norma, Gilberto Sven Binnquist Cervantes, y René Garduño López. 2018. "Sequía intraestival en La Reserva de la Biosfera El Cielo y su entorno, Tamaulipas, México." Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía 27 (1): 146-163. doi: 10.15446/rcdg.v27n1.56485.
- Taboada S. M y Oliver, G. R. 2009. La sequía intraestival, una manifestación de cambio climático en el estado de Morelos, México. Revista. Investigación Agropecuaria. 2009. Volumen 6(1). p. 51-62.
- Vega N. R. y L. Aceves N. 1993. Prácticas de Agrometeorología. Apuntes de Clase. Programa de Agrometeorología. Centro de Hidrociencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Vega N. R., Jaimes G.S., González C. A. y J.A. Guillén G. 2015. Análisis de requerimiento de riego en cultivos perennes y anuales en las Unidades de Riego de Calvillo, Aguascalientes. Memorias del I Congreso Nacional COMEII. IMTA. Jiutepec. Morelos. México.
- Vega N. R. 2016. Duración de la sequía intraestival (canícula o verano) para



el cultivo de maíz en la zona media del estado de Morelos. Memoria del II Congreso Nacional de Riego y Drenaje COMEII 2016. Del 08 al 10 de septiembre del 2016. Chapingo, México.

Vega N. R. 2017. Severidad de la sequía intraestival (canícula) en dos cultivos

bajo temporal y medio riego en el estado de Morelos. Memoria técnica del XXIV Congreso Nacional de Hidráulica. Acapulco, Guerrero. México. Marzo 2017.

7 La tecnificación del riego como medida de adaptación al cambio climático en el distrito de riego 034 estado de Zacatecas

Juan Manuel Angeles Hernández, Mario Alberto Montiel Gutiérrez
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532. Progreso.
Jiutepec, Morelos. México. C.P. 62550. E-mail: jangeles@tlaloc.imta.mx





RESUMEN

Se presenta la tecnificación del riego como una medida de adaptación al cambio climático del sector agrícola para el distrito de riego 034 estado de Zacatecas. Se identificó una alta vulnerabilidad en la agricultura de riego analizado bajo los escenarios de emisiones A2 y A1B y una vulnerabilidad media en el escenario RCP8.5, para el ciclo agrícola otoño invierno, considerando los mapas de vulnerabilidad contenidos en el Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático (IMTA 2010, IMTA 2015). Por otro lado, existe una baja capacidad adaptativa por parte de los usuarios de riego debido a los siguientes factores identificados: (a) baja diversidad de ingresos y bajo acceso a créditos y seguros, (b) poco capital y recursos para la modernización de los sistemas de riego, (c) a nivel distrito de riego 034, apenas un 5.6% de la superficie física regable cuenta con sistemas de riego presurizado (IMTA, 2006); aunado a esto se considera que uno de los principales impactos en este distrito es la disminución de la disponibilidad de volúmenes de agua para riego en las fuentes de abastecimiento. Por lo anterior, es importante implementar sistemas de riego más eficientes, como los sistemas de riego por goteo, para elevar la eficiencia de aplicación al 75 % en al menos una superficie de 3,233 ha, que permita mejorar la productividad del agua y de la tierra en los principales cultivos como maíz, frijol y chile. La inversión requerida para la tecnificación del riego en la superficie propuesta es del orden de 194 millones de pesos, pero con un ahorro anual de 9.2 millones de metros cúbicos de agua de riego, y pasar de una productividad del agua de 0.80 kg/m^3 a 1.58 kg/m^3 , lo que significa un incremento de casi el 100 por ciento.

Palabras clave: riego, capacidad de adaptación, tecnificación, cambio climático.

7.1. Introducción

México cuenta con una superficie de treinta millones de hectáreas potencialmente cultivables para uso agrícola, que representan el 15% de su superficie total (INEGI, 2009). En

el año agrícola 2017 la superficie total sembrada fue de 21'590,575 ha, de las cuales 15'514,678 ha (71.9%) fueron de temporal y el resto 6'075,897 ha (28.1%) correspondió a la superficie bajo riego; con un valor de la producción agrícola de 587,232.9 millones de pesos,

correspondiendo el 36.6 % a la agricultura de temporal y el 63.4% a la agricultura bajo riego (SAGARPA, 2018). Estas cifras permiten ver la importancia que tienen las áreas de riego, ya que con tan solo el 28.1 % de la superficie total se genera el 63.4% del valor de la producción agrícola del país. La superficie de riego en nuestro país dominada con aguas superficiales y subterráneas mediante la infraestructura correspondiente es del orden de 6.3 millones de hectáreas, de las cuales 3.3 millones de hectáreas están bajo la jurisdicción de 86 Distritos de riego y 3.0 millones de hectáreas pertenecen a obras de pequeña irrigación, bajo la jurisdicción de aproximadamente 40,000 Unidades de riego (CONAGUA, 2013).

En términos de la superficie sembrada en los distritos de riego de 3'058,153 ha para el año agrícola 2015-2016, el ciclo otoño-invierno concentró el 49.9% de la superficie total, seguido por el de perennes 20.9%, el

ciclo primavera-verano con el 18.9% y el ciclo segundos cultivos con el 10.4% (CONAGUA, 2017), en la Figura 7.1 se presenta la distribución porcentual en los distritos de riego. Se observa que a nivel nacional en las áreas de riego se tiene un índice de repetición de cultivos de tan solo el 1.104, (10.4% de segundos cultivos) lo cual refleja una problemática al interior de los distritos de riego, al no sembrarse más de un cultivo por año en la gran mayoría de las zonas de riego, debido principalmente a la poca disponibilidad de agua en las zonas áridas y semiáridas. La importancia social y económica de los distritos de riego radica en el beneficio de 462,586 usuarios a nivel nacional, que producen aproximadamente 54.1 millones de toneladas de maíz, frijol, trigo, soya, sorgo, caña de azúcar, hortalizas, frutales, forrajes y otros cultivos (CONAGUA, 2017), que se convierten en parte de la canasta básica y el principal proveedor de la ganadería y la agroindustria nacional.

**Distribución porcentual de la superficie de riego.
Año agrícola 2015-2016**



Figura 7.1. Distribución porcentual por ciclo agrícola de la superficie sembrada en distritos de riego, año agrícola 2015-2016 (Elaboración propia con datos de la CONAGUA, 2017).



7.2. Vulnerabilidad al cambio climático en la agricultura

El grupo de expertos del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2001) señala que la vulnerabilidad es una función de tres componentes: Exposición (E), Sensibilidad (S) y Capacidad de Adaptación (CA). La exposición se define como la posibilidad de un sistema de quedar expuesto a un cambio ante una posible situación desestabilizadora positiva o negativa. La sensibilidad se refiere al grado en que un sistema responde a fluctuaciones del entorno. La capacidad de adaptación o resiliencia se refiere a la capacidad de un sistema para recuperar su estado inicial

ante un cambio permanente o temporal de su entorno (IMTA, 2010). Los estudios de vulnerabilidad son la base para definir acciones de adaptación y mitigación al cambio climático en regiones críticas detectadas por interrelaciones de los componentes de vulnerabilidad (Figura 7.2).

La vulnerabilidad (V) de un sistema al cambio climático se expresa a través de los componentes: los Impactos potenciales (I) que representan la magnitud del daño natural esperado cuando se conjugan determinadas condiciones climáticas y la CA que representa la habilidad del sistema para soportar los impactos, recuperarse o adaptarse al cambio climático. La vulnerabilidad es función de I y CA; I es función de E y S, esta

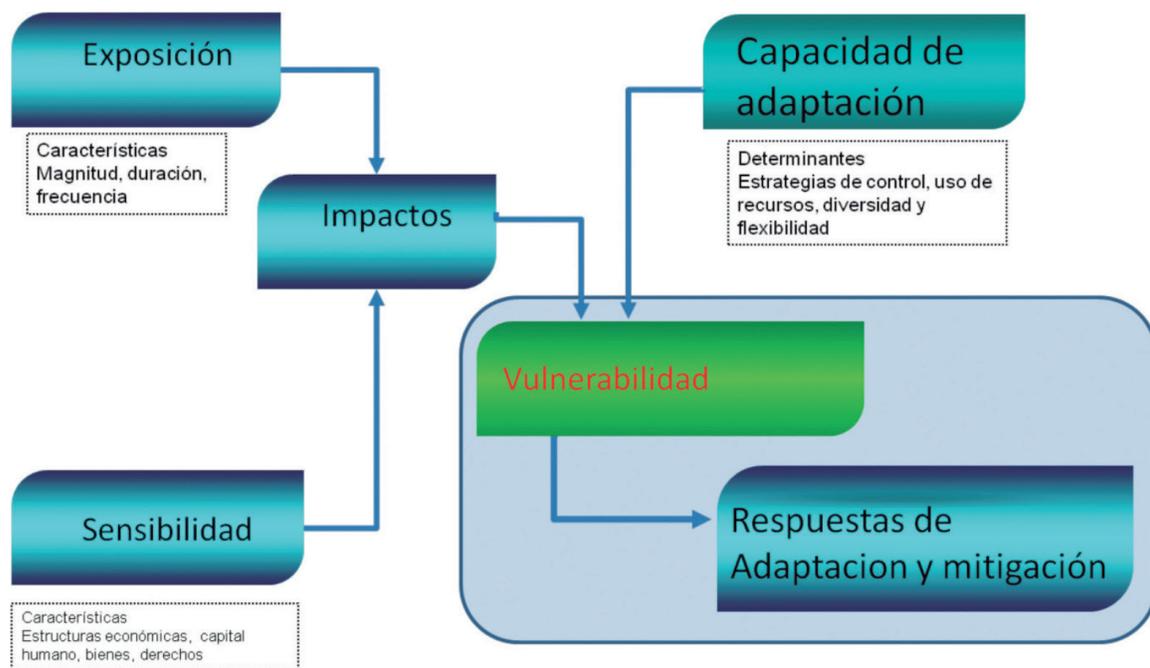


Figura 7.2. Componentes para evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático. (Gbetibouo y Ringler, 2009 citados por IMTA, 2010).

relación puede ser expresada mediante la siguiente ecuación.

$$V = f(I - CA) = f(E + S - CA)$$

Ecuación 6.10

De acuerdo a la Ecuación 6.10, a mayor impacto mayor es la vulnerabilidad; mientras que, a mayor capacidad de adaptación menor es la vulnerabilidad.

Las regiones agrícolas del país son vulnerables a la variabilidad climática actual ocasionada por la recurrencia de sequías y lluvias torrenciales que impactan en el desarrollo de los cultivos. El incremento de la temperatura puede reducir la productividad de los cultivos debido a la reducción de sus periodos de crecimiento y ocurrencia de temperaturas fuera del rango óptimo de su desarrollo. En forma global, la mayoría de los cultivos podrían ser afectados por cambios en los patrones climáticos; particularmente, en regiones que ya muestran valores de estrés hídrico y térmico en forma recurrente (Gadgil, 1995).

La agricultura es una actividad que depende fuertemente de las condiciones ambientales. El mejoramiento de paquetes tecnológicos, basados en el uso de variedades mejoradas e híbridos que dependen de la aplicación óptima de insumos, ha incrementado notablemente la producción agrícola en los últimos años. Estos incrementos pueden disminuir e incluso nulificarse por efectos del cambio climático (IMTA, 2010).

Por otro lado, el proceso de apertura económica y liberación de los mercados debido a la globalización de las economías de los países, ha modificado las estructuras y los sistemas de producción agrícola. En México el sector rural ha resentido dichos impactos e incrementado no solo en sus niveles de marginación y baja rentabilidad; sino también en la degradación de sus recursos naturales. El carácter multifuncional de la agricultura ha sido reconocida por la FAO en los siguientes aspectos: alimentario, ambiental, económico, y social (FAO, 1999). El sector agrícola será también impactado por efectos del cambio climático, por lo que varias zonas productivas podrían experimentar situaciones de crisis.

7.3. Clima y amenazas de cambio climático para el distrito de riego 034 estado de Zacatecas.

El clima predominante en el estado de Zacatecas es principalmente seco y semiseco, con una temperatura media de 18°C y precipitación pluvial anual inferior a los 800 mm. El Sureste, por la influencia de la Sierra Madre Oriental, es *templado subhúmedo* con precipitaciones que alcanzan los 1,000 mm anuales. En la Figura 7.3 se presenta el comportamiento de la precipitación y de la temperatura, así por ejemplo la precipitación normal anual varía desde una mínima de 285 milímetros en la estación de Agua Nueva (en el oriente del

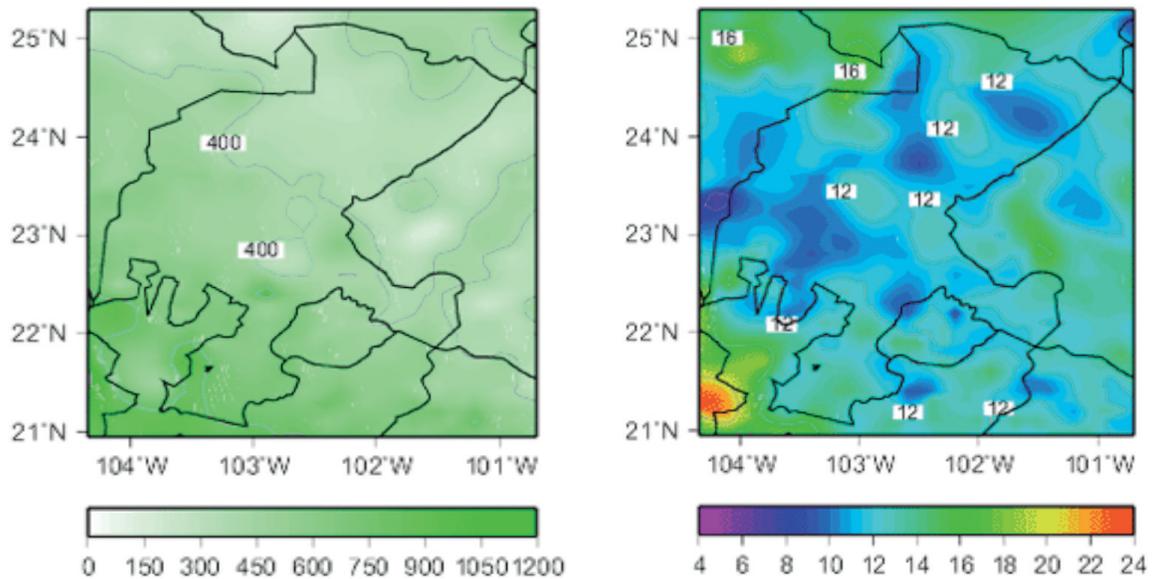


Figura 7.3. Precipitación anual en mm y temperatura media anual (°C) para el estado de Zacatecas. Fuente Instituto Nacional de Ecología (INE), 2008.

estado), a una máxima de 799 milímetros en el poblado de Teúl de González Ortega (INIFAP, 2015).

De acuerdo con los diferentes escenarios de emisiones que proyectan las concentraciones de gases de efecto invernadero, la precipitación para el año 2050 disminuirá del orden del 5 al 10%, y la temperatura media anual se incrementará entre 1 y 2°C, y para el año 2080 la precipitación disminuirá del orden de 5 al 15% y la temperatura aumentará entre 2 y 4 °C, (INE, 2008). Otro escenario es el del Atlas de Vulnerabilidad Hídrica ante el Cambio Climático (IMTA, 2010), en él se presentan condiciones muy similares a las que reportó el Instituto Nacional de Ecología (INE) ahora Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). De acuerdo a esta fuente, la reducción de la precipitación para el Estado de Zacatecas, en el año 2080 en el escenario

A2, será del 13.13%, con la variante de que en invierno disminuirá del orden de 23.07% y en el verano del orden del 6.06%, la temperatura media anual aumentará en 3.47°C, con las variantes de que en el invierno aumentará a 3.23°C y en el verano 3.36°C. En la Figura 7.4 y Figura 7.5 se muestra la climatología para el período base, con las proyecciones de las anomalías de la precipitación y la temperatura, para el Estado de Zacatecas para diferentes escenarios de emisión.

El análisis de vulnerabilidad por sector del INE (2008), destaca que en el caso del sector agua, se estima que el estado de Zacatecas, se encontrará bajo fuerte presión (60-80%) en el año 2025 y que las sequías se incrementarán notablemente. En el caso de la agricultura, al ser el principal consumidor de agua en el Estado, será afectado principalmente en su disponibilidad de volúmenes para riego. Se

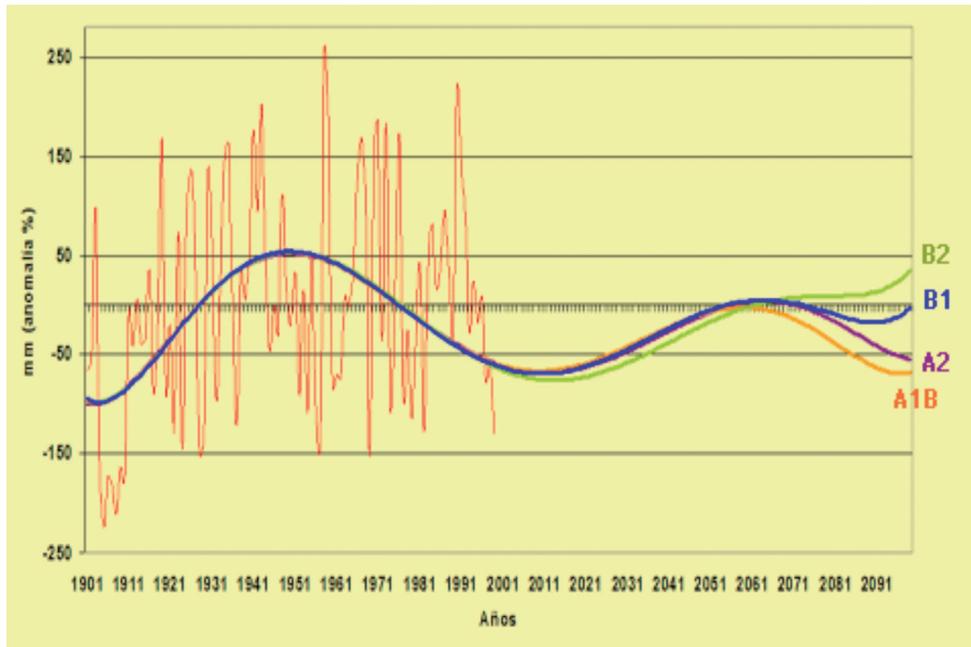


Figura 7.4. Proyección de variación de la precipitación en el Estado de Zacatecas de acuerdo con los diferentes escenarios de emisión. Fuente: Instituto Nacional de Ecología (INE), 2008.

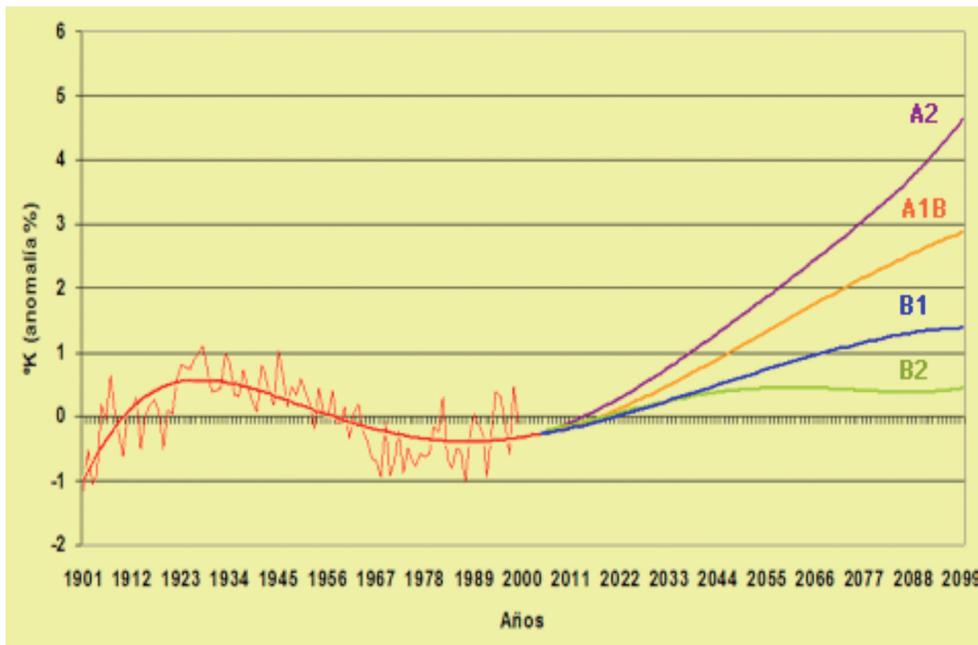


Figura 7.5. Proyección de incremento de temperatura media anual en el Estado de Zacatecas de acuerdo con los diferentes escenarios de emisión. Fuente: Instituto Nacional de Ecología (INE), 2008.



constató la vulnerabilidad del distrito de riego 034 estado de Zacatecas, al cambio climático. La cual está clasificada como muy alta bajo los escenarios de emisiones A2 y A1B, y en especial el ciclo agrícola otoño-invierno, al ser la condición más crítica en cuanto a superficie sembrada durante el ciclo anual.

Sin embargo, cabe mencionar que de acuerdo a IMTA (2015) bajo un análisis reciente utilizando el escenario de emisiones RCP8.5 muestran que la vulnerabilidad global al cambio climático para el ciclo agrícola OI del distrito de riego 034 estado de Zacatecas está clasificado con un nivel Medio, con un 60 %.

Para el caso de las Unidades de riego vistas a nivel estatal le corresponde un nivel Alto con un 67 por ciento.

7.4. Identificación de impactos en la agricultura del distrito de riego 034 estado de Zacatecas.

El distrito de riego 034, se encuentra ubicado en los municipios de Río Grande, Fresnillo, Tepechitlán, Tlaltenango, Momax, Tabasco,

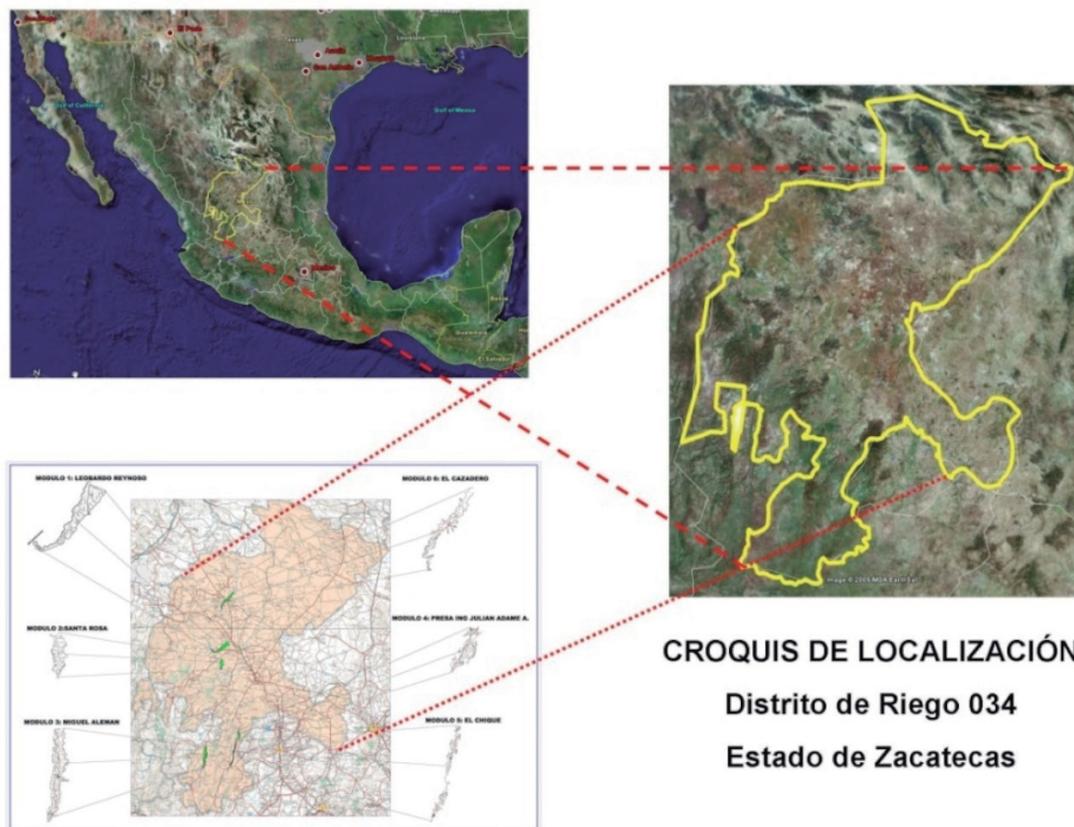


Figura 7.6. Ubicación geográfica del Distrito de Riego 034 Estado de Zacatecas.

Huanusco y Jalpa en el estado de Zacatecas. El distrito de riego tiene como corrientes principales a los ríos Juchipila, Tlaltenango en la región Lerma Santiago Pacífico, y al río Aguanaval y su afluente el río Chico en la Región Cuencas Centrales del Norte. En la figura 6 se presenta la ubicación geográfica del distrito de riego 034 estado de Zacatecas.

Este distrito de riego se conforma de seis zonas de riego dispersas en varios municipios del estado, operadas por seis Asociaciones Civiles de Usuarios de Riego (ACUR), su fuente de abastecimiento es una presa de almacenamiento, dispone de una pequeña red de canales de poca capacidad, sistemas de riego tradicionales con estructuras parcelarias para el riego por gravedad, es decir, una condición muy semejante a las 40,000 Unidades de riego del país. La superficie total es de 18,357 ha en beneficio de 5,658 usuarios, distribuidas con un 56.43 % como pequeña propiedad, 39.6% ejidal y 3.6 % otros.

Resumiendo la información de los diferentes escenarios de emisiones que proyectan las concentraciones de gases de efecto invernadero, la precipitación en Zacatecas para el año 2050 disminuirá entre 5 y 10%, y la temperatura media anual se incrementará entre 1 y 2°C. Para el año 2080 la precipitación disminuirá entre 5 y 15% y la temperatura se incrementará entre 2 y 4 °C. (INE, 2008); y aunado a la información del Atlas de Vulnerabilidad Hídrica ante el Cambio Climático (IMTA, 2010), la reducción de la precipitación total anual para el Estado de Zacatecas, en el período

del 2061-2090 bajo escenario A2, será del 13.13%. En invierno disminuirá del orden del 23.07% y en el verano del orden del 6.33%. La temperatura media en el período del 2061-2090 aumentará en 3.47°C; en el invierno aumentará 3.23°C y en el verano 3.36°C. Y por otro lado, la existencia de una baja capacidad adaptativa, debido a varios de los siguientes factores identificados: (a) La población cuenta con baja diversidad de ingresos y bajo acceso a créditos y seguros, además de que la superficie agrícola promedio por usuario es de solo 3.2 ha. (b) La población cuenta con poco capital y recursos para la modernización de sus sistemas de riego. (c) A nivel distrito de riego, apenas un 5.6% de la superficie física para riego cuenta con sistemas de riego presurizado, el nivel tecnológico es bajo, ya que la superficie de riego nivelada y/o equipadas con sistemas de riego entubados solamente representa un 38% de la superficie física para riego. (d) Las estructuras hidráulicas en la red de distribución se encuentran en mal estado de mantenimiento y falta instalar estructuras de medición y control para permitir una operación eficiente, equitativa y flexible de los canales, la eficiencia de la red de conducción es 66% y la de aplicación solamente 53%, lo que resulta en una eficiencia global a nivel distrito muy baja, del 35%. (e) Falta una reglamentación para el manejo de las presas de almacenamiento de Módulos que comparten la misma cuenca hidrológica (IMTA, 2006). Se concluye que la susceptibilidad/sensibilidad de los usuarios de riego es alta, ya que la diversidad de cultivos es muy baja, por ejemplo, 6 cultivos anuales, incluyendo los granos maíz, avena, frijol, y forrajes



como avena, pasto y alfalfa representan el 81% de la superficie total sembrada del distrito de riego (Figura 7.7), mientras que el único cultivo perenne significativo es el guayabo que ocupa solamente un 10.3%. Las hortalizas chile y cebolla solamente representan un 8.5% de la superficie sembrada.

Con base a esta información, se espera una reducción en la productividad de los cultivos debido a sequías más frecuentes y a un incremento significativo en temperaturas causando un cambio del ciclo de desarrollo (ciclo de floración) y apariciones de plagas más frecuentes. Es especialmente preocupante la reducción esperada de más de 23% en las lluvias invernales, afectando a los cultivos más importantes del ciclo otoño invierno. El grado de vulnerabilidad del sector agua, para el estado de Zacatecas, se encontrará bajo muy

fuerte presión (60-80%) en el año 2025. Las sequías se incrementarán notablemente, se presentarán con frecuencia periodos de baja o nula precipitación que afectarán aún más a la agricultura. Por ejemplo, dos casos recientes, en el año agrícola 2004-2005 de la superficie regable (18,272 ha), solamente se sembraron 10,155 ha (IMTA, 2006) y en el 2011-2012 se llegó a tal grado de sequía, que se restringieron al 100% las presas del Cazadero, Leobardo Reynoso y Santa Rosa pertenecientes a este distrito de riego 034, de manera que no se autorizó ninguna hectárea de riego a sembrar, lo que provocó un problema social grave, al ser la agricultura y la ganadería actividades primarias en la zona.

Por lo anterior, se considera que uno de los principales impactos en el distrito de riego 034 estado de Zacatecas, es la disminución

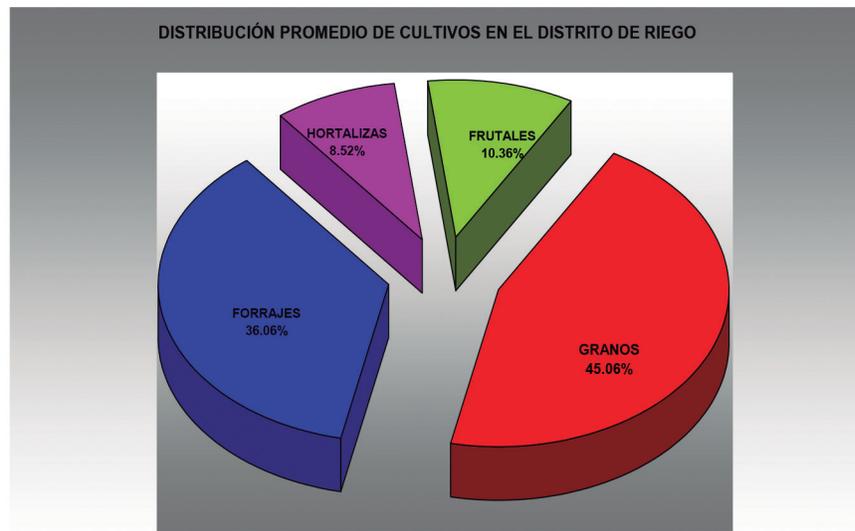


Figura 7.7. Distribución promedio de la superficie por cultivos frutales, hortalizas, granos y forrajes en el distrito de riego 034 estado de Zacatecas. Fuente: IMTA, 2006.

de volúmenes disponibles para riego en las fuentes de abastecimiento. En la zona del altiplano mexicano, la presencia de sequías es recurrente y está impactando fuertemente en la agricultura de la región, afectando completa y parcialmente a los estados de Durango, Coahuila, Zacatecas, San Luis Potosí y Chihuahua. De acuerdo con el estudio realizado por el IMTA (2010) en cuencas cercanas como el Río Conchos en Chihuahua, la disponibilidad de volúmenes escurridos disminuirá de un 10 a un 15% de acuerdo con el escenario de emisiones que se considere, esto es debido principalmente al cambio en el coeficiente de escurrimiento de las cuencas hidrológicas, que al disminuir la precipitación o incrementar su variación entre períodos de sequía, varía en forma proporcional, disminuyendo los volúmenes escurridos hacia los embalses o presas de almacenamiento. Esta menor disponibilidad de volúmenes de agua para riego se traduce en menores superficies sembradas y por lo tanto afectaciones al entorno socioeconómico de la región centro del estado de Zacatecas, que sin duda, generarán mayores conflictos en la asignación de volúmenes para riego y otros usos teniendo como efecto inmediato una mayor competencia por los recursos hídricos en la región.

7.5. Capacidad de adaptación al cambio climático

La capacidad de adaptación al cambio climático se define como el grado en que un ajuste

en prácticas, procesos o estructuras puede moderar o reducir el daño potencial, o ser una oportunidad de acciones derivadas del cambio climático (Yusuf y Francisco, 2009). La capacidad de adaptación depende de factores socioeconómicos, tecnológicos, institucionales y estructurales de la agricultura, en este caso.

En la Tabla 7.1 se presentan los indicadores usados para estimar la componente de vulnerabilidad derivada de la capacidad de adaptación de las zonas agrícolas, con información disponible a nivel de municipios.

7.6. Tecnificación del riego como medida de adaptación

Para enfrentar el alto grado de sequía hidrológica que ha impactado al distrito de riego 034 Estado de Zacatecas, en los últimos años agrícolas, y dado las altas necesidades de agua para los cultivos, es importante promover y hacer un uso eficiente del agua de riego y sobre todo incrementar su productividad. Los valores elevados de lámina de riego aplicada repercuten en un bajo aprovechamiento del recurso agua a nivel parcelario y por lo tanto en eficiencias de aplicación del orden del 52% a nivel distrito de riego. Por lo anterior, es importante implementar sistemas de riego más eficientes, como los sistemas de riego por goteo, para alcanzar eficiencia de aplicación al menos del 75 %.



Tabla 7.1. Indicadores y fuentes de datos para estimar la capacidad de adaptación como componente de la vulnerabilidad al cambio climático.

Indicador	Clave	Descripción	Relación del indicador con la vulnerabilidad	Fuente de datos
Marginación	Margina	Grado de marginación	Margina =>Vul	Conapo (2010)
Analfabetismo	Analf	% población analfabeta mayor de 15 años	Analf =>Vul	Conapo (2010)
Cobertura de servicios	Servicios	% cobertura servicios en domicilios de productor (agua, drenaje y electricidad)	Servicios =>Vul	Censo Agropecuario 2007 (INEGI, 2009)
Dependientes	Depend	Número de dependientes económicos por productor agrícola	Depen =>Vul	Censo Agropecuario 2007 (INEGI, 2009)
Acceso a centros urbanos	Tiempo	Tiempo de acceso a centros urbanos	Tiempo =>Vul	Cimmy (Hodson, et. Al., 2002)
Ingreso agrícola	Agrícola	Porcentaje de ingresos del productor relacionados con la agricultura	Agrícola =>Vul	Censo Agropecuario 2007 (INEGI, 2009)
Intensidad en el uso de la tierra	IUT	Porcentaje de repetición de cultivos promedio en los años agrícolas 2002-2008 solo incluye agricultura de riego	IUT =>Vul	SIAP, 2013
Mecanización agrícola	Mecánica	Porcentaje de agricultores que usan mecanización agrícola	Mecánica =>Vul	Censo Agropecuario 2007 (INEGI, 2009)
Cobertura de crédito/Seguro	Crédito	Porcentaje de cobertura de crédito y seguro	Crédito =>Vul	Censo Agropecuario 2007 (INEGI, 2009)

Fuente: Atlas de Vulnerabilidad Hídrica en México ante el cambio climático, IMTA, 2015.



Figura 7.8. Fotos de sistemas de riego por goteo en cultivos de maíz, frijol y chile, respectivamente.

La tecnificación de los sistemas de riego por gravedad consiste en reemplazar los sistemas de riego rodado (por gravedad) por sistemas de riego por goteo para cultivos anuales de maíz, frijol y chile (figura 8). El sistema de riego por goteo consta de un equipo de bombeo, un sistema de filtrado y de inyección de fertilizantes, una red de conducción principal, una unidad de control autónoma, una red de distribuidores, de líneas regantes y de los emisores o goteros. Se propone utilizar mangueras de polietileno o cintillas biodegradables, esto con el fin de minimizar los riesgos ambientales al ser reemplazados al término de su vida útil.

El riego por goteo retoma mucha importancia en la agricultura de riego cuando se cultiva en una forma muy intensiva, principalmente las hortalizas y granos, ya que estos cultivos resultan ser muy sensibles a cualquier déficit de agua que se produzca durante su etapa de crecimiento. Esto puede dar como resultado un proceso fotosintético empobrecido y un reducido sistema de raíces. Si hay déficit de agua durante la floración y la maduración del fruto o grano, el rendimiento se ve todavía más perjudicado. El estrés durante la etapa de crecimiento reproductivo frecuentemente da como resultado una mayor senescencia foliar y una reducción de la tasa y de la duración del llenado de los granos y en el caso de las hortalizas una disminución del volumen de fruto y pérdida de calidad comercial y alimenticia.

Para efecto de conseguir los mejores rendimientos y utilidades para los productores, es

importante realizar un manejo eficiente del agua en la parcela, bajo condiciones climáticas variables, estos rendimientos altos y estables se alcanzarán únicamente por medio de un riego uniforme, eficiente y oportuno como lo permite el riego presurizado (goteo). El riego por goteo es el método más efectivo de riego que existe en la actualidad ya que permite la aplicación puntual del agua y los fertilizantes a las raíces de las plantas con oportunidad, cantidad y frecuencia, logrando maximizar el rendimiento potencial de los cultivos. El riego por goteo tiene los siguientes beneficios:

- Mayor uniformidad.
- Mayor eficiencia de riego - ahorro de agua y fertilizantes.
- Menor presión hidráulica de operación y de consumo de energía, comparado con otros sistemas de riego presurizados.
- Ahorro de mano de obra.
- Reducción de enfermedades foliares y de la raíz (fungosas).
- Uso del sistema durante todas las horas del día – sin afectación del viento.
- Mayor uniformidad y menor desperdicio de agua en los extremos de la parcela.
- Mayores rendimientos (10 – 20%), principalmente debido a la uniformidad y a la fertilización eficiente y la mejora de la atmósfera del suelo.

Se realizó una propuesta para tecnificar con sistemas de riego por goteo en una superficie de 3,233 ha del distrito de riego 034, tomando como referencia beneficiar un promedio de 1,000 productores agrícolas, considerando



que la superficie promedio por productor es 3.23 ha. Además de acuerdo a información de IMTA (2006) de la superficie total del distrito de riego, alrededor de 4,340 ha tienen problemas de nivelación de los terrenos, pero, de éstas más de 1,000 ha ya tienen instalados sistemas de riego por goteo, microaspersión y aspersión. Se realizó la proyección del volumen de agua ahorrado a partir del requerimiento de riego promedio de tres cultivos, de la superficie establecida, y de la eficiencia de aplicación proyectada. En la Tabla 7.2 se presenta la información de la superficie para cada uno de los cultivos de maíz (2,965 ha), frijol (156 ha) y chile seco (112 ha), considerando requerimientos de riego de 49 cm para el maíz, de 39 cm para el frijol y de 45 cm para el chile seco. Se determinaron las láminas de riego aplicadas y los volúmenes de riego utilizados para las condiciones actuales con sistemas de gravedad con una eficiencia

de aplicación del 52 %, y para la situación futura con sistemas de riego por goteo, con eficiencias de aplicación del 75 %.

Se estima que el volumen actual que se utiliza para la superficie beneficiada de 3,233 ha es de 30.079 millones de metros cúbicos, y el volumen que se utilizaría mediante sistemas de riego por goteo sería de 20.855 millones de metros cúbicos; resultando un ahorro de 9.224 millones de metros cúbicos por año agrícola, considerando que la superficie establecida sea de un solo cultivo anual.

Se realizó un análisis de los costos de producción y del valor de la producción de los cultivos de maíz, frijol y chile seco, así como la determinación del costo para la adquisición e instalación del sistema de riego por goteo, considerando la superficie de 3,233 ha. En

Tabla 7.2. Requerimientos de riego y lámina de riego aplicada para cultivos de maíz, frijol y chile, eficiencia de aplicación para riego por gravedad y goteo, y el volumen de agua utilizado, para una superficie del distrito de riego 034 estado de Zacatecas.

	Superficie (ha)	Requerimiento de riego (cm)	Eficiencia de aplicación (decimal)	Lámina de riego aplicada (m)	Volumen utilizado (millones de m ³)
Situación actual, con sistemas de riego por gravedad					
Maíz	2,965	49	0.52	0.94	27.939
Frijol	156	39	0.52	0.75	1.170
Chile seco	112	45	0.52	0.87	0.969
Total					30.079
Situación futura, con sistemas de riego por goteo					
Maíz	2,965	49	0.75	0.65	19.371
Frijol	156	39	0.75	0.52	0.811
Chile seco	112	45	0.75	0.60	0.672
Total					20.855
Volumen ahorrado					9.224

Fuente: Elaboración propia con datos de requerimiento y eficiencias de riego de FIRCO-IMTA (2010).

la Tabla 7.3 se presenta la situación actual de los conceptos de rendimiento, costos de producción, precio medio rural y el valor de la producción para los cultivos de maíz, frijol y chile seco con información para el estado de Zacatecas. En éste caso en particular, la productividad del agua global es de 0.8 kilo-

gramos de producto por metro cúbico de agua utilizada.

Con base en la Tabla 7.4, la inversión para la tecnificación de la superficie propuesta asciende a la cantidad de 193.98 millones de pesos, para una superficie de 3,233 ha

Tabla 7.3. Situación actual de los conceptos de rendimiento, costos de producción, precio medio rural y el valor de la producción para los cultivos de maíz, frijol y chile seco con información para el estado de Zacatecas.

Concepto	Unidad	Maíz	Frijol	Chile seco	Total
Rendimiento	ton/ha	8	2	2	
Costo de producción	\$/ha	17,978	17,617	35,000	
Precio Medio Rural	\$/ton	3,500	13,770	40,000	
Valor de producción	\$	28,000	27,540	80,000	
Superficie	ha	2,965	156	112	3,233
Costo producción total	miles \$	53,305	2,748	3,920	59,973
Producción total	ton	23,720	312	224	24,256
Productividad del agua	kg/m ³	0,85	0,7	0,23	0,80
Valor de producción total	miles \$	83,020	4,296	8,960	96,276
Ingresos	miles \$	29,715	1,548	5,040	36,303

Fuente: Elaboración propia con datos de rendimiento, costos de producción y precio medio rural de: INIFAP, 2015. CONAGUA, 2017. SAGARPA 2018.

Tabla 7.4. Situación a futuro con los sistemas de riego por goteo, para los conceptos de rendimiento, costos de producción, precio medio rural y el valor de la producción para los cultivos de maíz, frijol y chile seco con información para el estado de Zacatecas.

Concepto	Unidad	Maíz	Frijol	Chile seco	Total
Rendimiento	ton/ha	11	2,5	2,5	
Costo de producción	\$/ha	20,500	17,617	35,000	
Precio Medio Rural	\$/ton	3,500	13,770	40,000	
Valor de producción	\$	38,500	34,425	100,000	
Superficie	ha	2,965	156	112	3,233
Costo producción total	miles \$	60,783	2,748	3,920	67,451
Producción total	ton	32,615	390	280	33,285
Productividad del agua	kg/m ³	1,68	0,48	0,42	1,58
Valor de producción total	miles \$	114,153	5,370	11,200	130,723
Ingresos	miles \$	53,370	2,622	7,280	63,272
Costo del sistema de riego por goteo	miles \$	177,900	9,360	6,720	193,980

Fuente: Elaboración propia con datos de rendimiento, costos de producción y precio medio rural de: INIFAP, 2015. CONAGUA, 2017. SAGARPA 2018.



de riego por gravedad y su reemplazamiento por sistemas de riego por goteo, con un costo promedio de 60,000 pesos por hectárea.

Por otro lado, se está contemplando que con los sistemas de riego por goteo, el productor apoyado con asesoría y con el acompañamiento de un paquete tecnológico de los cultivos obtendrá mayores rendimientos y calidad de su producto, aumentando sus ingresos que le permitan mejorar su calidad de vida.

Para el cultivo de maíz se está considerando aumentar de 8 a 11 ton/ha, para lo cual se contempla el uso de una mayor dosis de fertilización, lo cual se contempla al pasar de un costo de producción actual de \$ 17,978/ha a un costo de producción a futuro de \$ 20,500/ha, y para los cultivos de frijol y chile seco pasar de un rendimiento actual de 2.0 ton/ha a 2.5 ton/ha. Con ese incremento viable en los rendimientos, considerando el mismo precio medio rural de la cosecha, se estará pasando de un ingreso neto de 36.3 millones de pesos a un ingreso neto de 63.272 millones de pesos, con el respectivo ahorro del volumen de agua de 9.224 millones de metros cúbicos. La productividad del agua ponderada se incrementa de 0.80 kg/m³ a un valor de 1.58 kg/m³, lo que significa un incremento de casi el 100 por ciento.

7.7. Conclusiones

Con estas acciones, en forma directa se beneficiarán 1,000 productores y sus familias,

aumentando sus ingresos que le permitan mejorar su calidad de vida y tener una mayor capacidad de adaptación ante el cambio climático, de la agricultura de riego que desarrollan actualmente, al disponer de una mejor infraestructura de irrigación que les garantice una mayor producción agrícola y mejor calidad de sus cosechas. Pero en general el beneficio de esta medida de adaptación sería para todos los productores del distrito de riego y la sociedad mexicana en general al tener garantizado un mayor volumen de agua para la producción de alimentos. Además, con la tecnificación de los sistemas de riego parcelarios, se generarán empleos en la región al incrementarse la productividad del agua y de la tierra, y se tendrá mayor movimiento de la economía local. Con los resultados obtenidos los productores agrícolas tendrán una mayor conciencia del uso eficiente del agua de riego, además de tener un cuidado y un mejor mantenimiento preventivo de los sistemas de riego presurizados que se instalen. La duración de los impactos de esta medida de adaptación será de al menos 20 años, pudiendo ser mayor en la medida que los productores realicen un mantenimiento preventivo a los componentes del sistema de riego.

7.8. Referencias

Agrawala, S. (ed.). 2005. Bridge over troubled waters: linking climate change and development. Organization for Economic Cooperation and Development. Francia. 154 pp.

- CONAGUA, 2017. Estadísticas agrícolas de los Distritos de riego. Año agrícola 2015-2016. Gerencia de Distritos de Riego. Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola. Comisión Nacional del Agua. México.
- CONAGUA, 2013. Estadísticas agrícolas de las Unidades de riego. Año agrícola 2011-2012. Gerencia de Unidades de Riego. Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola. Comisión Nacional del Agua. México.
- FIRCO, 2010. Seguimiento y Evaluación del Proyecto Estratégico de Tecnificación del Riego. Informe final. Proyecto desarrollado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) para el Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO) de la SAGARPA. México.
- Gbetibouo, G. A. and C. Ringler. 2009. Mapping South African Farming Sector Vulnerability to Climate Change and Variability: A Subnational Assessment. IFPRI Discussion Paper 00885. International Food Policy Research Institute. Environment and Production Technology Division. Washington, D.C. 30 pp.
- IMTA, 2015. Atlas de Vulnerabilidad Hídrica en México ante el cambio climático (Efectos del cambio climático en el recurso hídrico de México). Capítulos 5. Vulnerabilidad de la agricultura de riego en México ante el cambio climático. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos.
- IMTA, 2013. Desarrollo de un portafolio priorizado de medidas de adaptación públicas identificadas para el sector agrícola. Proyecto elaborado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua para el Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de Alemania (GIZ).
- IMTA, 2010. Atlas de Vulnerabilidad Hídrica en México ante el cambio climático. Capítulos 5. Vulnerabilidad de la agricultura de riego en México ante el cambio climático. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos.
- IMTA, 2010. Atlas de vulnerabilidad hídrica de México ante el cambio climático: vulnerabilidad de las grandes zonas de riego ante el cambio climático Informe de proyecto. Coordinación de Riego y Drenaje. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México.
- IMTA, 2006. Plan Director para la modernización del riego del Distrito de Riego 034 Estado de Zacatecas. Informe de proyecto. Coordinación de Riego y Drenaje. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos.
- INE. 2008. Mapa de riesgos hidrológicos de la República Mexicana. Instituto Nacional de Ecología. México. (cartografía digital).
- INEGI. 2009. Marco geoestadístico estatal de la República Mexicana. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. (mapa digital).
- INIFAP, 2015. Agenda técnica agrícola Zacatecas. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa).



- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. Impacts, adaptation, and vulnerability climate change 2001. Third Assessment Report of the IPCC. Cambridge, UK., University Press.
- SAGARPA (2018). Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa). Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (Siacon). México, <http://www.siap.sagarpa.gob.mx>.
- Yusuf A. A. and Francisco, H. A. 2009. Climate Change Vulnerability Mapping for Southeast Asia. Special and Technical Paper tp200901s1. Economy and Environment Program for Southeast Asia (EEPSEA). Pp 26. Disponible en línea. <http://www.eepsea.org>.

8

Efectos del Cambio Climático en la Calidad del Agua del Lago El Sol y Lago de Pátzcuaro

Rebeca González Villela, Alfonso G. Banderas Tarabay, José Javier Sánchez Chávez, Luis Alberto Bravo Inclán, Marco Mijangos Carro
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532. Progreso. Jiutepec, Morelos. México. C.P. 62550. E-mail: rebeca_gonzalez@tlaloc.imta.mx





RESUMEN

En el presente estudio se compararon los datos de las estaciones meteorológicas Pátzcuaro (070 y 16087) y Nevado de Toluca (15062) para identificar el efecto del cambio climático entre dos periodos: anterior (1921 -1960 y 1964-1985) y posterior (1986-2008 y 1973-2007), respectivamente. Los resultados de los diagramas de caja, la prueba de "t" y la regresión y correlación lineal, con los datos de precipitación, evaporación, temperatura del aire (observada, mínima, y máxima), indicaron cambios significativos entre periodos con $p \leq 0.05$ para ambos lagos. A los datos fisicoquímicos del lago de Pátzcuaro se les aplicó la prueba de "t", regresión y correlación lineal de 2006 a 2011, encontrando cambios significativos asociados con florecimientos de cianobacterias y las actividades agrícola, ganadera, forestal, pesca, turismo y comercio. En el lago El Sol, los cambios entre 1982-1983 (Anterior), y 2002 (Posterior) se asociaron con el turismo, la actividad pecuaria y la biomasa de fitoplancton. Resalta la influencia antrópica y climática. Ambos lagos presentaron entre periodos un incremento de turbiedad, nutrientes y biomasa de fitoplancton, asociados a una disminución en la profundidad, área superficial, longitud y ancho máximos, relacionada con una variación climática que influye negativamente en el balance de calor del cuerpo de agua, debido a cambios en la temperatura del aire, la precipitación, el escurrimiento y la evaporación. Se recomienda un plan de manejo (reforestación, conservación y manejo de humedales, control y aprovechamiento de lirio acuático, regulación de los residuos urbanos, domésticos y de las actividades agropecuarias, turísticas e industriales) según corresponda.

Palabras clave: Vulnerabilidad climática, Limnología, Análisis Multivariado.

8.1. Introducción

El Calentamiento Global (CG), afecta las condiciones climáticas regionales del país e induce cambios en los ecosistemas lacus-

tres. El cambio climático impacta impredeciblemente a los sistemas acuáticos, siendo necesario generar modelos y metodologías analíticas para predecir sus tendencias y posibles cambios, con el fin de efectuar un manejo sostenible de los recursos asociados

(Jones y Wigley, 2010; Swart et al., 2010). Es necesario generar herramientas estandarizadas para evaluar los impactos biofísicos del cambio climático incorporando los elementos socio-económicos dentro del análisis de los ecosistemas (Cohen, 2010), para generar las estrategias que incrementen la capacidad de enfrentar el efecto del cambio sobre el desarrollo sustentable (Arnell, 2010; Yarime et al., 2010). Las modificaciones causadas por la actividad humana son también propicias para realizar estudios multidisciplinarios que analicen los problemas derivados del CG en los sistemas de agua dulce (Kobashi *et al.*, 2009; Link y Tol, 2009).

La información limnológica del país es insuficiente, así como sobre el efecto que está ejerciendo el cambio climático en la calidad del agua y su vulnerabilidad, por lo que en el presente trabajo se analizan 85 años de registros meteorológicos del lago de Pátzcuaro y 44 años del lago El Sol utilizando la clasificación de Köppen con fines comparativos. La mediana, prueba de "t", regresión y correlación, se calcularon con los datos de precipitación, evaporación, temperatura del aire (observada, mínima y máxima) de Pátzcuaro (1969-1988 anterior y 1988-2007 posterior) y El Sol (1964-1985 anterior y 1986-2008 posterior). La prueba "t", la regresión y la correlación lineal múltiple, se aplicó a los datos fisicoquímicos y biológicos del agua de ambos lagos (1981-2011), con el fin de evaluar la variación en la calidad del agua y la vulnerabilidad del sistema ante el cambio climático.

8.2. Área de Estudio

La cuenca del Lago de Pátzcuaro pertenece a la Región Hidrológica 12 (Río Lerma), ubicada en México Central en el Estado de Michoacán, entre las coordenadas 19° 82' 70" y 19° 84' 40" N; 101° 82' 60" y 101° 85' 30" W a 350 km al W de la ciudad de México y a 2035-2041 msnm. Es un cuerpo de agua interior y colector de las escorrentías de la cuenca. Su perímetro es de 22.6 km, con 18.4 km de longitud y 12.4 km de ancho (Figura 8.1). El bosque (natural y alterado) cubre el 42.6 % de la cuenca. El área urbana y rural el 3.3%, y la agricultura el 3.2%. La población de la Cd. de Pátzcuaro es de 51,124 habitantes (Mijangos et al., 2008). Dentro del área de la subcuenca se encuentran seis ambientes topográficos: 1) lago; 2) islas; 3) humedales de tule rojo asociados a la ribera con presencia de vegetación acuática marginal; 4) montañas de origen volcánico o lava con poca pendiente; 5) montañas en la parte alta con grandes pendientes propias de las sierras; 6) montañas volcánicas de regiones subalpinas (Chacón, 1993; Bernal-Brooks et al., 2002).

El Sol es un lago cráter de alta montaña de origen volcánico-erosivo combinado. Se emplaza en el cráter del Volcán Nevado de Toluca con coordenadas 19° 06' 43.39" N; 99° 45' 34.22" W; a 4,231 msnm y a 200 m por arriba del límite boscoso. Pertenece a la misma región hidrológica en el Estado de México en dirección sureste de la ciudad de

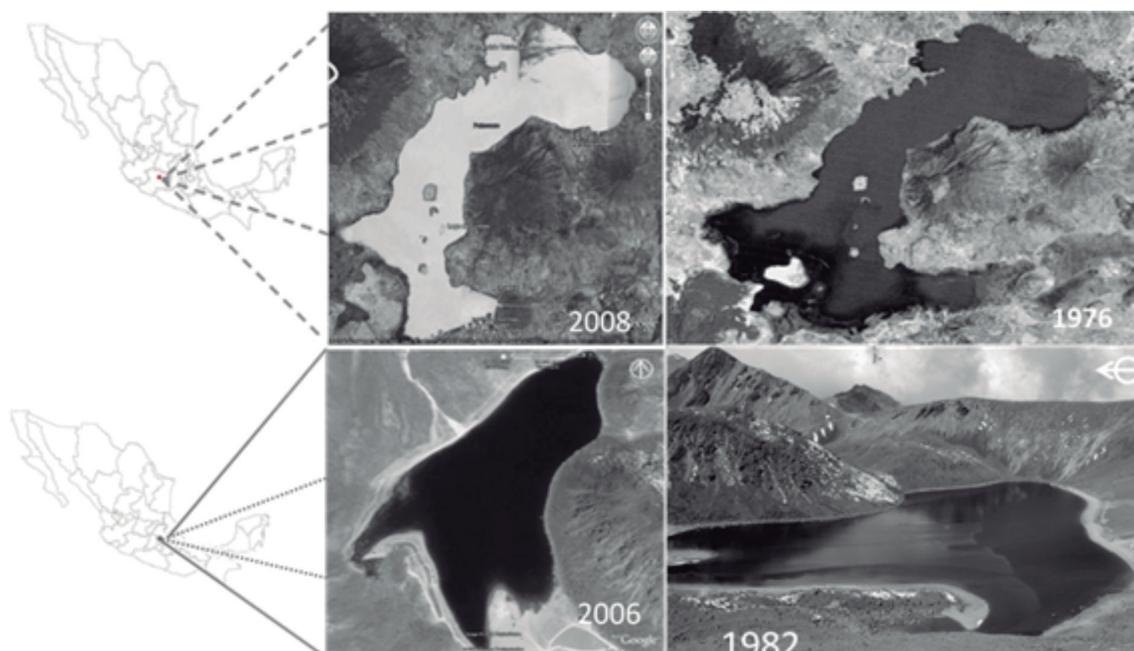


Figura 8.1. Ubicación e imágenes comparativas en el tiempo del Lago de Pátzcuaro (arriba) y El Sol (abajo), (Fuente: Para Lago de Pátzcuaro Imágenes Landsat MSS (1976, 2008); Para El Sol imágenes Google Earth (2006) y foto de elaboración propia de 1982).

Toluca. También es un cuerpo de agua interior cuya fuente de agua es la precipitación y el deshielo de los periglaciares. El clima es frío de tundra alta con poca actividad turística y pecuaria en la cuenca del lago (Banderas *et al.*, 1991).

8.3. Métodos

La morfometría de ambos lagos se elaboró con imágenes de satélite 2.44m Multispectral Quickbird (2013). Los climas entre periodos se clasificaron acorde con Köppen modificado por García (1973), quien usó datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), entonces dependiente de la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH), del periodo 1921-1960. Así como los obtenidos posteriormente por el

SMN, como parte de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), y los de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), de las estaciones meteorológicas 070 y 16087 de la cuenca de Pátzcuaro del periodo 1964-2008. Para la cuenca de El Sol, del periodo 1973-2006 se utilizó la estación 15062. Ambos datos disponibles en el Extractor Rápido de Información Climática (ERIC) del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) que concentra los datos del SMN.

Los datos y el monitoreo de la calidad del agua de Pátzcuaro de los años 1981 y 1993 fueron obtenidos de Mazari-Hiriart (1981) y SARH (1987); y de 2006 a 2011 de Sánchez *et al.* (2011). Los datos limnológicos e hidrobiológicos de El Sol (1983-2006) fueron obtenidos de Loeffler (1972), Kusel-Fetzmann (1973), Banderas (1986 y 1997), Banderas et

al., (1991), Sarma et al., (1997), González-Villela et al., (2000) González-Villela & Banderas (2002), Alcocer *et al.* (2004) y Dimas-Flores et al. (2008).

Los análisis no paramétricos (medianas y dispersión) mediante gráficos y estadísticos, se aplicaron a los datos de precipitación (mm), evaporación (mm), temperatura (observada, mínima y máxima, °C), con el programa *Statistica* (Microsoft Corporation 2004) e *IHA V7* (Indicators of Hydrological Alteration; TNC, 2006), para los periodos anterior y posterior, acorde con su comportamiento en las series de tiempo y rangos de variabilidad, dados por los percentiles 25% a 75%. La prueba de "t", se aplicó con la hipótesis de nulidad de efectos: no hay diferencias entre las medianas de las variables analizadas entre los periodos de estudio y las áreas de interés $H_0: \mu^1 = \mu^2$ y $H_a: \mu^1 \neq \mu^2$. Los análisis de Agrupación y Componentes Principales se aplicaron para agregar y jerarquizar las variables fisicoquímicas y biológicas de los lagos.

8.4. Resultados

8.1.1. Pátzcuaro.

Variables Meteorológicas.- La clasificación climática del lago de Pátzcuaro basada en los registros de 39 años (1921–1960) indican un clima $C(w_2)(w)_b(c)_g$, o sea, templado lluvioso o subhúmedo con lluvias en verano, temperatura media del mes más frío entre -3 y 18 °C y la del mes más caliente mayor de 6.5 °C. El más

húmedo de los subhúmedos. El mes más lluvioso a la mitad del verano es diez veces más lluvioso que el mes más seco, con un porcentaje de lluvia invernal anual menor al 5%. El cociente P/T comprendido entre 43.2 y 55.0. Para el periodo 1973–2006, la temperatura media anual de 26 años y precipitación media mensual de 30 años de la Estación 16087, señalan que el clima ha cambiado al tipo $Cb'(fm)(e)$ definido como: templado húmedo, con temperatura media del mes más frío de -3 a 18 °C y la del mes más caliente mayor de 6.5 °C, igual al periodo anterior (1921–1960), pero ahora con una modificación (fm) que se refiere a una precipitación del mes más seco mayor de 40 mm y un porcentaje de lluvia invernal con respecto a la anual menor de 18 mm y extremoso.

Asimismo, el análisis no paramétrico de la variación temporal (diagramas de caja) y su dispersión mediante percentiles a lo largo del tiempo, señalan que la temperatura observada en el periodo posterior es menor significativamente en todos los meses excepto en enero (Figura 8.2) y con altos valores en el factor de cambio (coeficiente de variación) para diciembre (33.33%), julio (4.76%) y septiembre (50%), en forma coincidente con la prueba de "t" (Tabla 8.1).

La temperatura máxima fue significativamente mayor en todos los meses en el periodo posterior (1990–2007), excepto en enero (19.15%), coincidiendo con la prueba "t". Los diagramas de caja muestran que la temperatura mínima decreció significativamente en los meses de septiembre, octubre

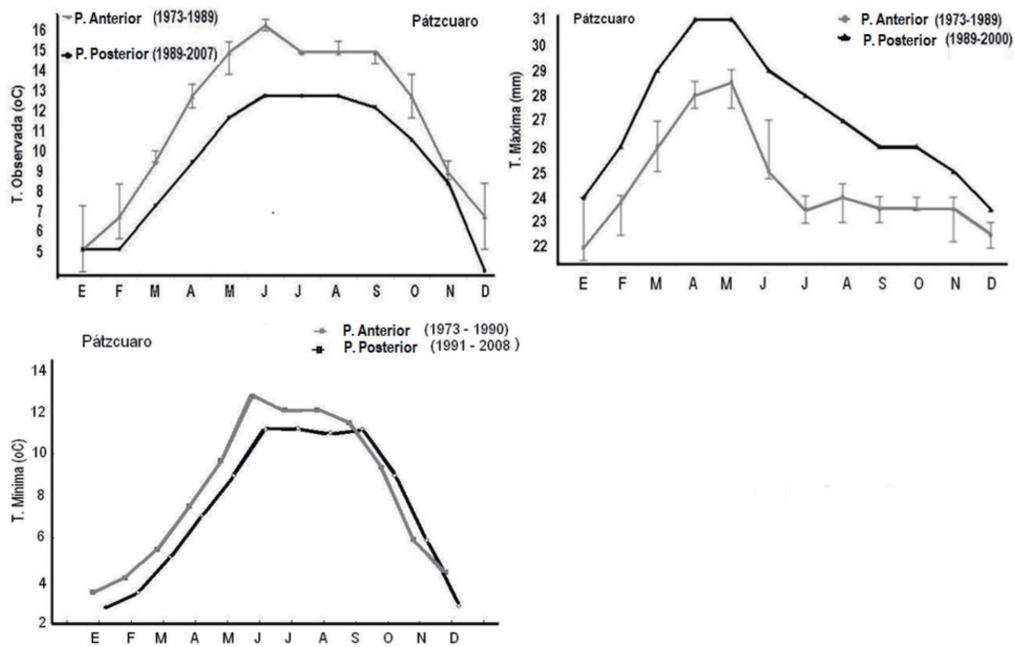


Figura 8.2. Variación de la temperatura observada, máxima y mínima (medianas) de la Estación Pátzcuaro.

y noviembre. Sin embargo en la prueba "t" todos los meses señalan decrementos significativos a $P < 0.05$ y 0.01 , excepto mayo, abril y noviembre

un incremento significativo en septiembre del 50% en los diagramas de caja, a diferencia de la prueba "t" que señala al mes de octubre con un incremento significativo (Figura 8.3).

La precipitación muestra decrementos significativos en todos los meses del año, excepto febrero, julio, agosto y septiembre. Sin embargo

La evaporación disminuyó significativamente en enero, marzo, abril, mayo, agosto, octubre y diciembre (primavera y verano), proceso aso-

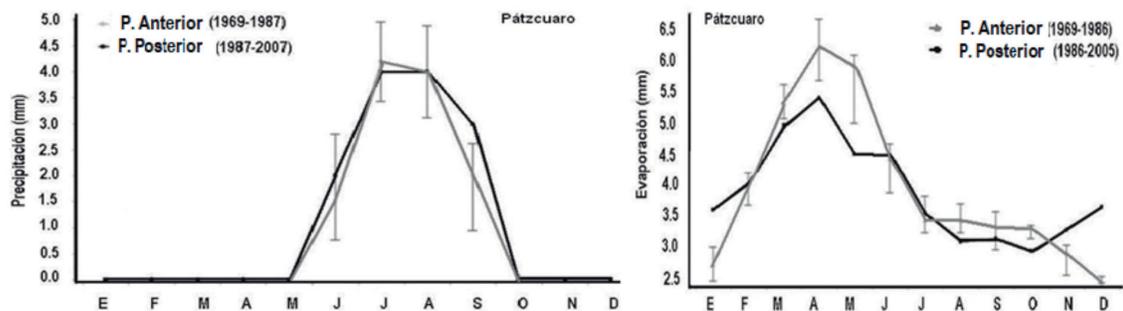


Figura 8.3. Variación de la precipitación y evaporación (medianas) en la Estación Pátzcuaro.

Tabla 8.1. Prueba de "t" de la temperatura observada, máxima, mínima, precipitación y evaporación de Pátzcuaro en los periodos de anterior (1973–1990; G₁) y posterior (1991–2007; G₂). En negritas los resultados significativos a $p \leq 0.05$ y $p \leq 0.01$.

Mes	T. Observada (°C)		T. Máxima (°C)		T. Mínima (°C)		Precipitación (mm)		Evaporación (mm)	
	G ₁	G ₂	G ₁	G ₂	G ₁	G ₂	G ₁	G ₂	G ₁	G ₂
E	6.3	5.0	22.4	23.4	3.4	2.8	2.9	3.4	0.6	1.1
F	7.3	5.4	23.8	25.7	4.1	3.43	4.0	4.0	0.2	0.2
M	9.7	7.4	26.1	29.0	5.5	5.1	5.5	4.8	0.2	0.3
A	12.8	10.0	27.8	31.11	5.4	5.1	6.2	4.9	0.3	0.2
M	14.7	12.2	28.5	31.0	7.5	7.1	5.8	4.7	1.1	1.5
J	16.6	13.5	26.0	28.9	12.7	11.1	4.6	4.1	4.9	5.0
J	15.1	13.3	23.6	26.8	12.1	11.2	3.8	3.4	7.1	6.6
A	15.2	13.0	23.6	27.0	12.0	11.0	3.7	3.5	6.6	6.5
S	14.7	12.8	23.5	26.4	11.4	11.2	3.5	3.3	5.4	6.1
O	12.8	11.0	23.8	25.8	9.4	9.0	3.4	3.0	1.9	3.2
N	9.5	7.7	23.4	25.0	5.9	5.9	2.9	3.23	0.5	0.8
D	7.6	5.0	22.3	23.4	4.4	2.8	2.6	3.5	0.4	0.3

ciado con la capacidad calorífica del agua que puede favorecer la conservación del volumen de agua en el lago a futuro y coincide con la prueba "t" para abril y mayo. Por el contrario en enero, noviembre y diciembre la evaporación crece significativamente.

La prueba "t" aplicada a los datos meteorológicos a los periodos anterior y posterior señaló incrementos significativos a $P \leq 0.05$ y 0.01 para la evaporación, la temperatura observada, máxima y mínima (Tabla 1), indicando variaciones del clima hacia condiciones extremosas en la temperatura ambiental e incremento en la evaporación en invierno, coincidiendo con los resultados obtenidos del análisis comparativo del clima mediante la clasificación de Köppen.

La evaporación mostró una tendencia negativa significativa en verano y un incremento en febrero, confirmando la variación del clima hacia condiciones extremosas en la temperatura ambiental e incremento en la evaporación en invierno, coincidiendo con los resultados obtenidos del análisis comparativo del clima según la clasificación de Köppen, y con las proyecciones climáticas efectuadas por Montero et al. (2010) para esta región. Con una decremento en la precipitación registrada para invierno (enero de 5.77%, en febrero de 1.85% y en marzo de 2.44%) y en verano (julio con 0.15% y julio con 4.07%) y en la temperatura observada con un incremento en el invierno (enero 20.16% y febrero 18.17%) y en verano (junio 7.41%. julio 1.73% y agosto 3.21%).



8.1.2. El Sol.

El lago El Sol, con un clima E(T)C (w0)(w) i (e) (Húmedo y Subhúmedo isoterma y extremo). Clima de tundra alta, con temperatura media del mes más cálido de 0 °C a 10 °C. Con una media del mes más frío de 6.4 °C (mayor de -3 °C). Con oscilaciones anuales de temperaturas medias mensuales de 2.8 °C o isoterma. Con un régimen de lluvias en verano con 10 veces mayor precipitación en el mes más húmedo (en la mitad caliente del año), que el mes más seco. Semifrío húmedo con lluvias en verano y menos del 5% de lluvia invernal en el periodo anterior (1964–1986), acorde con la clasificación de Köppen. Para el periodo posterior (1987–2008), el tipo de clima se conservó en E(T)C (w0)(w) i (e), pero con una modificación correspondiente a la marcha anual de la temperatura tipo Ganges

(con el mes más caliente antes del Solsticio de Verano, en junio), considerado intertropical.

El análisis de la variación del clima en el tiempo mediante los Diagramas de Caja y su dispersión por percentiles a lo largo de la serie de datos en el tiempo mostró un incremento significativo en la temperatura observada para enero (20.16% de variación) entre el periodo anterior y el posterior, febrero (18.17%) y junio (7.41%). Por el contrario, un decremento significativo en la temperatura observada para el mes de mayo (1.74%), octubre (5.14%), noviembre (12.20%) y diciembre (21.02%), coincidiendo con la prueba "t" (Tabla 8.2 y Figura 8.4).

Ambos lagos señalan diferencias significativas a $p > 0.01$ para la temperatura del aire, mínima máxima, precipitación y evaporación para dife-

Tabla 8.2. Prueba de "t" aplicada a la temperatura observada, mínima, máxima, precipitación, y evaporación del lago de El Sol a los periodos anterior (1964–1985; G₁) y posterior (1986–2008; G₂), en negritas los resultados significativos a $p \leq 0.05$ y $p \leq 0.01$.

Mes	T. Observada (°C)		T. Maxima (°C)		T. Mínima (°C)		Precipitación (mm)		Evaporación (mm)	
	G ₁	G ₂	G ₁	G ₂	G ₁	G ₂	G ₁	G ₂	G ₁	G ₂
E	0.8	1.0	-1.9	-3.1	6.8	7.3	0.5	0.5	2.6	2.2
F	0.9	1.4	-2.0	-2.4	6.7	8.4	0.8	0.3	2.7	2.0
M	2.5	2.4	-0.6	-0.9	8.8	10.1	0.6	0.2	3.3	1.4
A	3.4	3.3	0.2	0.01	9.9	10.8	2.0	1.7	3.6	1.5
M	4.0	3.7	0.3	0.4	10.0	10.2	3.7	3.8	3.0	1.8
J	3.5	4.0	0.7	0.7	9.2	9.7	6.8	6.8	2.7	2.0
J	3.1	3.1	0.6	0.5	8.1	8.6	8.1	7.5	2.5	2.2
A	2.8	2.8	0.5	0.4	7.9	8.6	7.2	7.6	2.6	2.2
S	2.7	2.7	0.5	0.4	8.0	8.4	6.8	7.3	2.3	2.0
O	2.6	2.3	-0.2	-0.3	8.0	8.1	2.5	3.6	2.3	2.0
N	1.7	1.3	-1.2	-1.7	7.2	7.8	0.9	1.0	2.4	2.3
D	1.2	0.7	-1.6	-2.8	6.7	7.5	0.6	0.4	2.3	1.6

rentes meses, aspecto que señala variaciones en ambas regiones que pueden ser explicadas por el cambio climático. Aunque es notorio que para el Lago de Pátzcuaro estas variaciones fueron principalmente para la temperatura del

aire, mínima y máxima. Y para el Lago el Sol la variación fue para la evaporación. Esto debido a los diferencias en la presión atmosférica y temperatura, consecuencia de la altitud a la que se encuentran ambos lagos.

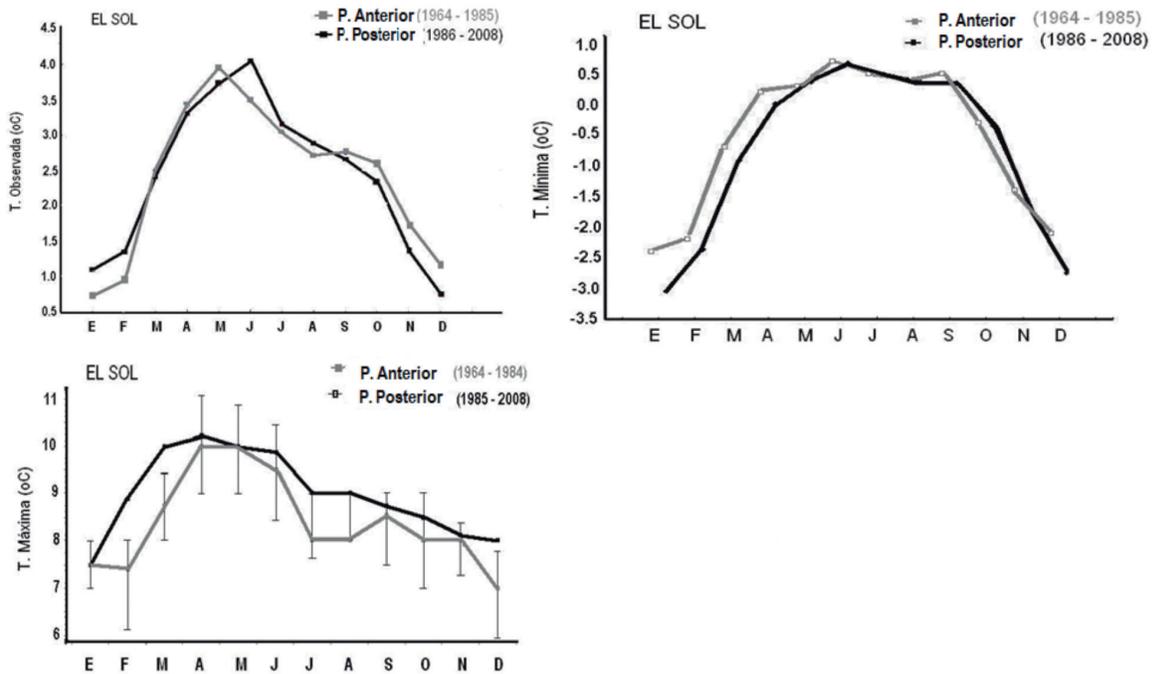


Figura 8.4. Variación de las medianas de la temperatura observada, máxima y mínima de la Estación Nevado de Toluca (1964-1985 y 1985-2008).

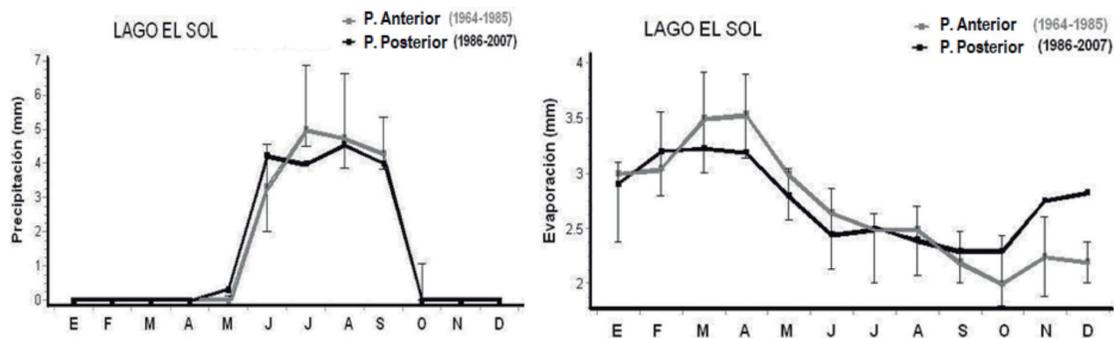


Figura 8.5. Variación de las medianas de la temperatura observada, máxima y mínima de la Estación Nevado de Toluca (1964-1985 y 1985-2008).



Para la temperatura mínima del aire todos los meses presentaron un decremento excepto mayo. Asimismo todos los meses señalaron diferencias significativas entre los periodos anterior y posterior excepto mayo, junio y agosto, coincidiendo con la prueba "t". La temperatura máxima del aire presentó un aumento significativo en febrero, marzo, junio, agosto y diciembre con 52.69, 25.32, 38.59, 40.63 y 11.84%, señalando la mayor variación entre los periodos anterior y posterior (Figura 5). En la prueba "t" todos los meses se incrementan significativamente, excepto mayo y octubre.

En los diagramas de caja, la precipitación presenta un decremento significativo en el mes de junio (94.09% en el coeficiente de variación). La prueba "t" señala decrementos significativos en enero (5.76%), febrero (1.84%), mayo (2.44%), junio (0.15%) y julio (4.07%), e incrementos significativos en octubre (3.75%) y noviembre (7.77%).

Estos resultados indican un aumento en la temperatura máxima del aire y la evaporación, coincidiendo en noviembre y diciembre, lo que aunado a la disminución significativa de enero a julio en la precipitación origina un cambio en el balance de calor del agua con la consecuente disminución del nivel del agua del lago, como se observa en los datos morfométricos.

La evaporación mostró un aumento significativo en los diagramas de caja solo para noviembre y diciembre con 74.97 y 36.64% en el coeficiente de variación. Sin embargo, la prueba "t" resultó significativa en todos los meses del año, excepto para noviembre.

El análisis comparativo de la variación de las medianas en las variables meteorológicas en ambos lagos muestra cambios más acentuados para la temperatura observada, temperatura mínima y temperatura máxima en Pátzcuaro aunque con la misma tendencia (decremento en la temperatura observada

Tabla 8.3. Regresiones lineales de los datos meteorológicos de la estación Pátzcuaro, Mich. (16087), en negritas las relaciones significativas a $P \leq 0.05$ y 0.01 .

Mes	T. Observada (°C)	T. Mínima (°C)	T. Máxima (°C)	Precipitación (mm)	Evaporación (mm)
E	T= 46.96 - 0.0203 (t)	T= - 17.07 + 0.011 (t)	T= - 181.4 + 0.1027 (t)	PP= - 55.60 + 0.0285 (t)	E= - 53.94 + 0.0287 (t)
F	T= 99.64 - 0.0464 (t)	T= 17.25 - 0.007 (t)	T= - 221.1 + 0.1236 (t)	PP= - 37.67 + 0.0191 (t)	E= - 12.85 + 0.0085 (t)
M	T= 135.3 - 0.0632 (t)	T= 12.25 - 0.003 (t)	T= - 247.0 + 0.1379 (t)	PP= - 47.15 + 0.0239 (t)	E= 17.83 - 0.006 (t)
A	T= 212.9 - 0.1008 (t)	T= 40.88 - 0.017 (t)	T= - 324.5 + 0.1778 (t)	PP= - 32.60 + 0.0166 (t)	E= 99.21 - 0.047 (t)
M	T= 230.6 - 0.1088 (t)	T= 84.97 - 0.038 (t)	T= - 284.7 + 0.1580 (t)	PP= - 43.23 + 0.0224 (t)	E= 109.2 - 0.052 (t)
J	T= 304.9 - 0.1454 (t)	T= 202 - 0.096 (t)	T= - 309.3 + 0.1692 (t)	PP= 40.86 - 0.0182 (t)	E= 37.65 - 0.017 (t)
J	T= 213.3 - 0.1000 (t)	T= 137 - 0.0634 (t)	T= - 371.6 + 0.1700 (t)	PP= 110.3 - 0.0521 (t)	E= 19.98 - 0.008 (t)
A	T= 299.3 - 0.1434 (t)	T= 139.2 - 0.064 (t)	T= - 348.5 + 0.1880 (t)	PP= - 87.42 - 0.0406 (t)	E= 8.95 - 0.003 (t)
S	T= 263.7 - 0.1257 (t)	T= 113.5 - 0.052 (t)	T= - 306.8 + 0.1667 (t)	PP= - 48.11 - 0.0215 (t)	E= 11.05 - 0.004 (t)
O	T= 238.2 - 0.1138 (t)	T= 85.2 - 0.0382 (t)	T= - 256.8 + 0.1416 (t)	PP= - 19.95 + 0.0106 (t)	E= 39.81 - 0.018 (t)
N	T= 188.5 - 0.0903 (t)	T= - 0.15 + 0.0030 (t)	T= 233.7 - 0.1297 (t)	PP= - 11.68 + 0.0062 (t)	E= - 50.90 + 0.027 (t)
D	T= 282.0 - 0.1383 (t)	T= 101.5 - 0.048 (t)	T= - 204.6 - 0.1145 (t)	PP= - 18.09 - 0.0089 (t)	E= - 107.0 + 0.055 (t)

y mínima e incremento en la temperatura máxima). Así como para la evaporación (menor evaporación en la mayor parte del año y un incremento en invierno), aspecto que señala condiciones climáticas más extremosas.

Los análisis de regresión y correlación lineal de los datos de temperatura observada (1973–2006), muestran una tendencia negativa significativa en invierno (Tabla 3). La temperatura mínima con una tendencia negativa significativa en invierno y primavera. La temperatura máxima solo con resultados negativos significativos en diciembre. La precipitación con tendencias negativas significativas en verano y positivas en otoño e invierno.

Para El Sol, la temperatura observada en los análisis de regresión señalo incrementos significativos en los meses de enero, febrero y junio; y decrementos en la temperatura observada de septiembre a diciembre, mayo y julio (Tabla 8.4).

La temperatura mínima mostró una tendencia negativa significativa para invierno y verano. La temperatura máxima con tendencias positivas significativas en todos los meses del año, excepto mayo, junio, septiembre y octubre. La precipitación con decrementos significativos en junio, agosto y septiembre, observándose los incrementos positivos en los demás meses (excepto marzo, julio y diciembre).

El estudio comparativo en las tendencias (regresiones) para Pátzcuaro y el Sol, señalan coincidencias para la temperatura mínima en invierno y la menor evaporación en diferentes épocas. Por el contrario, la temperatura observada señala un comportamiento inverso en ambos sistemas en invierno. Para Pátzcuaro la Precipitación mostró una tendencia positiva en época de secas y una tendencia negativa para la época de lluvias que señalan una tendencia hacia condiciones más extremosas. Para El Sol es notorio la tendencia positiva en la temperatura máxima para casi todo el año.

Tabla 8.4. Regresiones lineales de los datos de la estación Nevado de Toluca (15062), en negritas las relaciones significativas a $P \leq 0.05$ y 0.01 .

Mes	T. Observada (°C)	T. Mínima (°C)	T. Máxima (°C)	Precipitación (mm)	Evaporación (mm)
E	$T_5 = -38.59 + 0.020$ (t)	$T = 91.39 - 0.047$ (t)	$T = -36.33 + 0.022$ (t)	$PP = 100.05 - 0.048$ (t)	$E = + 0.011$ (t) -19.27
F	$T = -34.95 + 0.018$ (t)	$T = 45.75 - 0.024$ (t)	$T = -112.3 + 0.060$ (t)	$PP = 7.25 - 0.001$ (t)	$E = 14.39 - 0.006$ (t)
M	$T = 8.27 - 0.003$ (t)	$T = 26.70 - 0.014$ (t)	$T = -66.44 + 0.038$ (t)	$PP = 81.40 - 0.038$ (t)	$E = 80.87 - 0.039$ (t)
Al	$T = 9.18 - 0.003$ (t)	$T = 15.64 - 0.008$ (t)	$T = -42.74 + 0.027$ (t)	$PP = -155.6 + 0.082$ (t)	$E = 144.18 - 0.071$ (t)
M	$T = 23.89 - 0.010$ (t)	$T = -2.61 + 0.001$ (t)	$T = 19.23 - 0.005$ (t)	$PP = -70.60 + 0.040$ (t)	$E = 50.57 - 0.024$ (t)
J	$T = -29.70 + 0.017$ (t)	$T = 0.54 + 0.00007$ (t)	$T = -10.34 + 0.010$ (t)	$PP = -7.61 + 0.009$ (t)	$E = 28.88 - 0.013$ (t)
J	$T = 18.36 - 0.0076$ (t)	$T = 24.19 - 0.012$ (t)	$T = -10.32 + 0.009$ (t)	$PP = -48.25 + 0.029$ (t)	$E = -9.81 + 0.006$ (t)
A	$T = -0.633 + 0.002$ (t)	$T = 19.01 - 0.009$ (t)	$T = -40.95 + 0.025$ (t)	$PP = -26.38 + 0.018$ (t)	$E = 5.69 - 0.002$ (t)
S	$T = 20.29 - 0.009$ (t)	$T = 16.76 - 0.008$ (t)	$T = -4.77 + 0.006$ (t)	$PP = -44.31 + 0.027$ (t)	$E = 2.17 - 0.000009$ (t)
O	$T = 35.15 - 0.016$ (t)	$T = 13.03 - 0.007$ (t)	$T = -5.49 + 0.007$ (t)	$PP = -138.43 + 0.073$ (t)	$E = 1.96 + 0.0001$ (t)
N	$T = 50.34 - 0.025$ (t)	$T = 52.49 - 0.027$ (t)	$T = -31.45 + 0.020$ (t)	$PP = -106.61 + 0.057$ (t)	$E = -23.64 + 0.013$ (t)
D	$T = 33.21 - 0.016$ (t)	$T = 82.32 - 0.043$ (t)	$T = -60.63 + 0.034$ (t)	$PP = -82.27 + 0.044$ (t)	$E = -5.36 + 0.004$ (t)

Tabla 8.5. Variación de los parámetros morfológicos y fisicoquímicos del lago



Aspecto que muestra una sensibilidad mayor en cuanto a la influencia de la temperatura observada por efectos del cambio climático para el Lago el Sol.

8.5. Morfología

De 1976 a 2008 el área superficial de Pátzcuaro decreció en 700.35 ha, así como en la profundidad (2.8 m). De 1976 a 2010 hay abatimiento de la longitud máxima de 600m y de 1,100 m en el ancho máximo (Tabla 8.5, Figura 8.1).

La morfometría de El Sol, evaluada con datos de Alcocer (1980) y con el 2.44m Multispectral Quickbird (2008), presentó un decremento en el área superficial de 4.13 ha, en la longitud máxima (13.87 m), en el ancho máximo (38.45 m), en la línea de costa (1.8 km) y en la profundidad (5 m) que representan del 18 al 20% del área superficial. Esta pérdida de nivel es de importancia debido a que el lago es relativamente profundo con un valor de $Z_r = 2.75\%$ (Margalef, 1983). En la morfología se aprecia una reducción de dos bahías localizadas al sur y sureste del lago, así como en la parte norte. Ambos lagos muestran un decremento en el área superficial, profundidad longitud máxima, señalando la influencia del cambio climático.

8.6. Calidad del Agua.

De 1976 a 2008 en Pátzcuaro se observaron incrementos de temperatura del agua (19.6

a 20.17° C), en la clorofila-a (30.85 en 2006; a 78.4 mg/L en 2010). Asimismo, de 1993 a 2010, en el N-NH₄ (<0.1 a 0.56), en el N-NO₂ (<0.016 a 0.035), en el N-NO₃ (<0.015 a 0.26), en el P-PO₄ (0.036 a 0.13) todos en mg/L, en la conductividad (820 a 966.19 $\mu\text{S cm}^{-1}$), mientras que el oxígeno disuelto (OD) se abatió de 6.95 a 5.08 mg/L. El pH varió de 7.25 (1976) a 9.13 (2010), Tabla 5. Variables que señalan una tendencia hacia la eutroficación (Lampert y Sommer, 2003).

En el Sol, de 1983 a 2001, el OD bajó de 7.4 a 5.37 mg/L, el pH de 6.96 a 5.4, la conductividad de 19.3 a 16 μScm^{-1} , la transparencia de 9 a 4.6 m, y la clorofila-a de 1.126 a 0.58 mg/L. Y aumentaron el amonio de 0.09 a 2.89, el nitrito de 0.01 a 0.19, el nitrato de 0.1 a 4.71, el fosfato de 0.01 a 0.15 ($\mu\text{M/L}$). Se conservó la relación N:P>16, y por lo tanto el P como factor limitante de la productividad. El comportamiento de las variables señala una tendencia a la mesotrofia (Margalef, 1983).

Los coeficientes de regresión respecto al tiempo ($P<0.05$) y entre las variables evaluadas en Pátzcuaro, durante la campaña de muestreo realizada de 2006 a 2011, con sus tendencias y gradientes, señala a la transparencia con una tendencia negativa (45.41% de variación), mientras que la turbiedad y la conductividad una tendencia positiva (23.40 y 50.1%), indicando la influencia de los sólidos suspendidos orgánicos e inorgánicos, que pueden asociarse con sedimentos derivados de las actividades agropecuaria, industrial y urbana, el escurrimiento natural en la cuenca, con la composición iónica

de Pátzcuaro y El Sol en el tiempo

Parámetro	Pátzcuaro						EL SOL			
	1976 ^H	1993 ^{CH}	2000 ^{IMTA}	2006 ^{IMTA}	2010 ^{IMTA}	1980	1983	2001	2006	
Area superf. (m ²)	84'332,400	13'000	74'535,000	77'328,900		237,321			196,000	
Máx. longitud (m)	18,600	19,750			18,000	795			781.13	
Ancho Máximo (m)	13,500	10,950			12,400	482			443.55	
Línea de costa (km)				24,300	22,600	3.68			2.5	
Max. profund. (m)	10.8	12.2	8.22	8.00		15	14	10		
T. agua (°C)	16.2 - 23		19.45-4.85	14.5-22.5	18.73-1.6		8.85	8.5		
O ₂ disuelto (mg l ⁻¹)		6.0 - 7.9	0.01 - 9.76		4.3 - 5.85		7.4	5.37		
pH	6 - 8.5	8.8 - 9.7	9.08 - 9.24	7.56-9.91	8.99-9.26		6.96	5.4		
Conductividad (µS cm ⁻¹)		740 - 900	833 - 1093	524 - 993	855.4 - 1077		19.3	16		
Transparencia (m)	0 - 1.64	0.1 - 0.5	0.2 - 0.3	0.28	0.18 - 0.354		9	4.6		
Clorofila-a (mg L ⁻¹)				16.94-4.76	25.9 - 6.7		0.6-2.43	1.91-8.4		
N-NH ₄ (mg L ⁻¹)		< 0.05 - 0.16			0.45-0.67		0 - 1.26	0.98-5.95		
N-NO ₂ (mg L ⁻¹)		< 0.002 - 0.03			0.01 - 0.06		0 - 0.15	0.03-1.15		
N-NO ₃ (mg L ⁻¹)		< 0.01 - 0.02			0.11 - 0.30		0.3 - 0.46	0.08-10.3		
P-PO ₄ (mg L ⁻¹)		0.026 - 0.049			0.07 - 0.19		0 - 0.3	0.01-0.50		
N:P							< 16	> 16		

*H (Herrera, 1979); CH (Chacón 1993); IMTA (Brena, 2000); IMTA (Huerto et al. 2008); IMTA (Sánchez et al. 2011)

Tabla 8.6. Coeficientes de regresión entre las variables físicoquímicas y biológicas en el Lago de Pátzcuaro (2006-2011) y El Sol (1981-1982). P <



del agua, los procesos de óxido-reducción dentro del lago y florecimientos fitoplanctónicos (Tabla 8.6; Margalef, 1983).

El fósforo total se asocia con el aumento de materia orgánica alóctona en los escurrimientos de la cuenca y/o autóctonos por el florecimiento de macrofitas en la zona litoral y la productividad algal, con la descomposición de los residuos de flora y fauna, y con los ácidos grasos, como lo señala la relación positiva significativa en las grasas y aceites (40.94% de la variación; Lampert y Sommer 2003).

En Pátzcuaro, el Potencial REDOX, muestra una tendencia negativa significativa, asociada con reacciones de la respiración, fermentación y otras no fotosintéticas de los organismos, y las fluctuaciones en la concentración de oxígeno en el lago (cf. De Mars y Wassen 1999). El OD, en algunas épocas y en algunos sitios de muestreo, se encuentra dentro de rangos críticos para el desarrollo de la mayoría de

los peces (5.0 mg/L; Wetzel 2001). La regresión positiva del aluminio en el tiempo señala altos rangos (1 a 10 mg/L) que en combinación con el pH promedio (8.0) indican que este compuesto se encuentra ejerciendo también funciones de amortiguamiento a través de su unión con los radicales hidroxilo (Lampert y Sommer, 2003).

Para el lago El Sol los coeficientes de regresión en 1981-1982 señalaron la alta dependencia de la producción primaria (Clorofila-a), con respecto de las variables meteorológicas de temperatura y precipitación, así como de la concentración de nutrientes (NH_4^+ , NO_2^- , PO_4^-), pH and conductividad (Tabla 8.6).

8.7. Discusión.

Considerando los registros de temperatura y precipitación, y utilizando el sistema de clasificación del clima según Köppen (García

0.05.

Pátzcuaro (2011)	B	El Sol (1982)	B
Transparencia - t	-0.00004	T. aire - Chl-a	0.80
Turbiedad - t	0.014	PP - Chl-a	0.48
Conductividad - t	0.17	NH_4^+ - Chl-a	14.05
Fósforo total - t	0.00004 0.00033	NO_2^- - Chl-a	-7.69
GyA - t	-0.0626	PO_4^- - Chl-a	2.8
Potencial redo - t	-0.0011	pH - Chl-a	-1.56
Oxígeno - t	0.0022	COND - Chl-a	0.16
Aluminio - t		T.agua-Chl-a	r = 0.72

1973), el clima en Pátzcuaro cambió de C(w₂) (w)_b(c)_g en el periodo 1921-1960, a Cb'(fm)(e) en 1973-2006, similar al anterior, pero extremo, con la precipitación del mes más seco mayor de 40 mm y un porcentaje de lluvia invernal menor de 18 mm, coincidente con la menor temperatura observada en el periodo posterior en todo el año, excepto enero. Mayor temperatura máxima todo el año; mayor evaporación en invierno y lluvia en septiembre, como lo muestran los diagramas de caja. Asimismo, con las tendencias positivas en los coeficientes de regresión para la temperatura máxima y evaporación (en estiaje) y la tendencia negativa de la precipitación, temperatura mínima y observada en el verano, que señalan un comportamiento similar a las variaciones observadas por Wetherald (2010), en las proyecciones climáticas realizadas en la parte norte media de la zona templada, donde los cambios incluyen el incremento de la precipitación durante el otoño con la duplicación de la concentración de CO₂, que aparentemente ha generado cambios en las escorrentías, con eventos extremos de sequía y humedad. Similar a las proyecciones climáticas para el Estado de Michoacán en 2030, proyectadas con el modelo MP1 ECHAM5 A2, aprobado por IPCC (Arroyo et al., 2010), donde la temperatura promedio aumentará 1.2 °C en junio y de 0.7 °C en septiembre para el área del lago. Y donde la precipitación aumentará de 0 a 20 mm en el mes de junio y de 20 a 40 mm en septiembre (Fernández et al., 2012), aspectos que parecen estar favoreciendo actualmente al lago, cuyo nivel de agua aumentó 40 cm, situación que coincide con cambios en las

zonas climáticas definidas previamente por Köppen, para la temperatura media y la precipitación en Europa (1901-2003), aumentando la temperatura media y disminuyendo la precipitación en los meses más secos (Gerstengarbe y Werner, 2009). Contrario a lo que está sucediendo en Pátzcuaro, Randall *et al.* (2007), señalan que el clima futuro en muchas partes de la zona templada de Europa será más seco en el verano y más húmedo en el invierno.

En El Sol se mantuvo el clima E(T)C(w0)(w) i(e), pero con una modificación correspondiente a la marcha anual de la temperatura tipo Ganges (con el mes más caliente antes del Solsticio de Verano, considerado intertropical), coincidiendo con la proyección climática efectuada por Montero *et al.* (2010) para el Estado de México, con incrementos de temperatura en invierno y verano, y decrementos en la precipitación sólo para el invierno, como lo indican las Prueba de "t y de regresión calculadas para todos los meses.

En El Sol, los análisis estadísticos aplicados en 1982 señalaron al clima como el factor determinante de los procesos lacustres, coincidiendo con la disminución de 4.13 ha en el área superficial (18-20%), y correlaciones altas entre temperatura, precipitación y nivel del agua. El lago solo recibe agua de los escurrimientos por lluvia y deshielo, de los periglaciares, y su latitud determina la cantidad de radiación solar que ingresa como calor al agua. Estos factores combinados con la altitud, la baja temperatura y los fuertes vientos provocan la pérdida de calor por irradiación y eva-



poración (significativamente mayor en verano). La temperatura máxima del agua en verano es comparable con las temperaturas mínimas de otros lagos tropicales en invierno, incluyendo una mayor variación que en los lagos tipo páramo ecuatoriales (Banderas et al., 1991).

Pátzcuaro tiende a aumentar su turbidez, el P total, el aluminio, la conductividad, las grasas y aceites, en contraste con la transparencia, el potencial redox y el OD, debido a los aportes doméstico e industrial. Bernal-Brooks *et al.* (2003), encontraron una relación entre la carga de nutrientes, la lluvia y la producción de Clorofila *a*, asociada con la reducción de la visibilidad del Disco de Secchi, fenómeno asociado desde mediados de 1930 con en el transporte de sedimentos en las escorrentías. En El Sol, las correlaciones de la clorofila-*a* (productividad lacustre), con los nutrientes, señalan también el aumento de sólidos disueltos totales, materia orgánica y aporte de sedimentos de la cuenca debido a las actividades humanas (Banderas et al. 1991; González-Villela, et al. 2000).

En Pátzcuaro y El Sol la concentración de OD fue alta, pero se observó una tendencia negativa que, con el tiempo, puede generar el cambio de estado trófico de ambos lagos. La distribución del oxígeno en la columna de agua es importante para la sobrevivencia de muchos organismos y afecta la solubilidad y disponibilidad de muchos nutrientes y, por lo tanto, a la productividad del ecosistema. La disminución de oxígeno puede asociarse con el decaimiento masivo de flora litoral o de fitoplancton en el perfil vertical y

originar una reducción drástica en el contenido de oxígeno y provocar la muerte de muchos animales acuáticos (Margalef, 1983; Lampert y Sommer, 1997).

En El Sol, la correlación positiva de la temperatura del agua con la clorofila-*a* coincide con el florecimiento de fitoplancton e incremento de la biodiversidad anual, señalándolo como cuerpo de agua sensible a la variación climática (González-Villela y Banderas, 2002). Sin embargo, los sistemas acuáticos tienen una alta capacidad de amortiguamiento a la variación de la temperatura debido a la alta capacidad calorífica del agua (Livingstone, 2003), aspecto que permite a los organismos acuáticos adaptar su ciclo de vida y periodos de crecimiento en el tiempo a las variaciones observadas en los sistemas lénticos. Por lo mismo, es común observar especies de eras geológicas antiguas en los cuerpos de agua dulce y el mar (Karanob et al. 2004). Por lo mismo, ambos lagos mantuvieron las características fisicoquímicas estables de 1981 a 2006.

Este estudio muestra la necesidad de recolectar datos durante largos periodos para que los cambios hidrobiológicos ocurridos en los sistemas acuáticos sean estadísticamente significativos (cf. Webster, 2009; Jones y Wigley, 2010). Acorde con Jones et al. (2010), los efectos del cambio climático en los procesos ecológicos a nivel global se distribuyen heterogéneamente en el espacio geográfico. Estos impactos no son conducidos únicamente por el cambio de temperatura, sino también por los cambios en el régimen de

precipitación, que predomina sobre la productividad primaria de los ecosistemas.

La diferenciación regional en la distribución de la biomasa es más evidente en zonas tropicales semiáridas y en ciudades en desarrollo, donde los cambios son más severos, como parece suceder en Pátzcuaro y El Sol.

Livingstone (2003) señala que los cambios en el balance de radiación global dará como resultado un cambio climático regional que tendrá impacto en la atmósfera, océanos y cuerpos de agua superficiales.

8.8. Conclusiones

Los estudios de cambio climático en los ecosistemas son necesarios para entender los eventos extremos que están aconteciendo en el planeta.

Con los evidentes cambios en el clima, se requiere generar las condiciones necesarias para limitar la carga externa de nutrientes de origen antrópico, con el objetivo de prevenir un mayor deterioro en la calidad del agua.

Como consecuencia del cambio climático, es posible que los ecosistemas, y en especial la sobrevivencia de muchas especies, se encuentren más amenazados actualmente que hace una década.

La vulnerabilidad potencial de los lagos de El Sol y Pátzcuaro al cambio climático es evi-

dente: en un futuro escenario, el continuo descenso del nivel del agua de ambos lagos puede llegar a ser de un orden de magnitud por década, debido a que los cambios del clima están influenciando negativamente el balance natural de calor del agua, a través de los cambios en la temperatura del aire, la precipitación, escorrentías y evaporación.

8.9. Referencias

- Alcocer, J. (1980). *Aportaciones limnológicas al estudio del "Lago del Sol" y "Lago de la Luna". Nevado de Toluca, Edo. de Mex.* Servicio Social. Licenciatura en Biología. Ciencias Biológicas y de la Salud, Depto. de Zootecnia. UAM-I.
- Alcocer, J., Oseguera, L.A., Escobar, E., Peralta, L., & Lugo, A. (2004). Phytoplankton biomass and water chemistry in two high-mountain tropical lakes in Central Mexico. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 36(3), 342-346.
- Arnell N.W. (2010). Adapting to climate change: an evolving research programme. *Climate Change* (100), 107-111.
- Arroyo, C.C.E., Calderón, B.O., Castelán, H.C., Fernández, E.A., Mata, C.M.A., Mendoza, P.E., Romero, C.R., & Zavala, H.J. (2010). *México Atlas de cambio climático del Estado de Michoacán, México (Versión cero)*. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM-Gobierno del Estado de Michoacán. México.
- Banderas, T.A. (1986). *Colección de algas bentónicas del Lago El Sol, en el cráter del volcán*



- Nevado de Toluca, México: Guía de consulta*. Instituto de Biología, Herbario MEXU. UNAM. México
- Banderas, T.A., González-Villela, R., & De la Lanza, G. (1991). Limnological aspects of a high-mountain lake in Mexico. *Hydrobiologia* (224), 1-10.
- Banderas, T.A. (1997). Phycoflora of the tropical high mountain lake El Sol, central Mexico, and some biogeographical relationships. *Hydrobiologia* (354), 17-40.
- Bernal-Brooks, F.W., Gomez-Tagle Rojas, A. & J. Alcocer (2002). Lake Patzcuaro (Mexico): a controversy about the ecosystem water regime approached by field references, climatic variables, and GIS. *Hydrobiologia* (467), 187-197.
- Bernal-Brooks, F.W., L. Dávalos-Lind y O.T. Lind (2003). "Seasonal and spatial variation in algal growth potential and growth-limiting nutrients in a shallow endorheic lake. Lake Pátzcuaro (Mexico)". *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 8: 83 – 93.
- Chacón T.A. (1993). "Lake Pátzcuaro, Mé(t)ico: watershed and water quality deterioration in a tropical high-altitude Latin America Lake". *Lake and Reserv. Manage.* 8(1): 37-47.
- Cohen, S.J., 2010. From observer to extension agent—using research experiences to enable proactive response to climate change. *Climatic Change* 100: 131–135.
- De Mars H. y M.J. Wassen (1999). Redox potentials in relation to water levels in different mine types in the Netherlands and Poland. *Plant Ecology* 140: 41-
- Dimas-Flores, N., Alcocer, J., Ciro-Pérez, J. (2008). The structure of the zooplankton assemblages from two neighboring tropical high mountain lakes. *J. Freshwater Ecology*. 23(1), 21-31.
- Fernández, E.A., C.R. Romero, H.J. Zavala, B.O. Calderón, P.E. Mendoza, H.C.I. Castelán, C.E. Arroyo, C.M.A. Mata (2012) *Atlas de cambio climático del Estado de Michoacán, México. Versión Cero*. Centro de Ciencias de la Atmósfera. UNAM. Gobierno del Estado de Michoacán, México.
- García, E. (1973). *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*. Instituto de Geografía. UNAM. México. pp 246.
- Gerstengarbe F.W. y P.C. Werner (2009). "A short update on Koeppen climate shifts in Europe between 1901 and 2003". *Climatic Change* 92:99–107.
- González-Villela, R., Banderas, T.A., De la Lanza, G. (2000). Dynamic models of primary production in a tropical high-mountain lake: El Sol, Mexico. In: Munawar, M., Lawrence, S.G., Munawar, I.F., Malley, D.F., (Eds) *Aquatic Ecosystem of Mexico. Status and Scope*. Ecovision World Monograph Series. Backhuys Publishers. Leiden. Netherlands.
- González-Villela, R., Banderas, T.A. (2002). Multivariate analysis of the primary production in a tropical high mountain lake in Mexico. *J. Freshwater Ecology* 17(1), 75-83.
- Herrera, B.E. (1979). *Características y manejo del Lago de Pátzcuaro*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Biológicas. UNAM. México. 82 pp.

- Jones, Ph. D., · T.M.L. Wigley (2010). "Estimation of global temperature trends: what's buckets important and what isn't". *Climatic Change* 100:59–69.
- Karanob, E., D. Williams, K. Kuzmin, V. Sidel-eva, G. Khursevich and A. Prokopenko (2004). Ecological collapse of Lake Baikal and Lade Hovsgol ecosystems during the Last Glacial and consequences for aquatic species diversity, Palaeogeography, Palaeoclimatology. *Palaeoecology* 209 (14): 227-243.
- Kobashi T, J.P. Severinghaus, J.M. Barnola, K. Kawamura, T. Carter, T. Nakaegawa (2009). "Persistent multi-decadal Greenland temperature fluctuation through the last millennium". *Climatic Change*. Recuperado de: <http://Springerlink.com>, DOI 10.1007/s10584-009 9689-9.
- Kusel-Fetzmann, E. (1973). Beitrage zur Kenntnis der Algenflora der Hochgebirge Zentralamerikas und der Nodilchen Anden. *Hochgebirgsforschung Heft*. 3(5), 29-68.
- Lampert, W. Y U. Sommer (1997). *Limnoecology*. Oxford University Press. USA.
- Link, P.M., Tol, R.S.J. (2009). Estimation of the economic impact of temperature changes induced by a shutdown of the thermohaline circulation: an application of FUND. 201. *Clim Chang*. Springerlink.com DOI 10.1007/s10584-009-9796-7.
- Livingstone, D.M. (2003). "Impact of secular climate change on the thermal structure of a large temperate central European lake". *Climatic Change* 57: 205–225.
- Loeffler, H. (1972). Contribution to the limnology of high-mountain lakes in Central America. *Int Revue Ges Hydrobiol*. 57(3), 397-408.
- Mazari-Hiriart, M. (1981). *Evaluación de la calidad del agua desde el punto de vista bacteriológico y fisicoquímico en el lago de Pátzcuaro, Michoacán, México*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM. México. 53 p.
- Margalef, R. (1983). *Limnología*. Ed. Omega. Barcelona.
- Mijangos Carro, M., J. Izurieta D., A. Gómez B, R. Hernández L., R. Huerto D, J. Sánchez Ch. y L. Bravo I. (2008). Importance of diffuse pollution control in the Patzcuaro Lake Basin in Mexico. *Water Science and Technology*. 58 (11) .
- Montero, M.M.J., J. Martínez J., N.I. Catillo P. y B.E. Espinosa T. (2010). Escenarios climáticos en México proyectados para el siglo XXI. En: *Efectos del Cambio Climático en México. Volumen III. Atlas de Vulnerabilidad Hídrica en México ante el Cambio Climático*. (Eds.) Martínez, A.P.F. y Patiño G.C. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Mexico.
- Microsoft Corporation, 2004. *Statistica*. The Small Book. StatSoft. USA.
- Randall D.A., R.A. Wood, S. Bony, R. Colman, T. Fichefet, J. Fyfe, V. Kattsov, A. Pitman, J. Shukla, J. Srinivasan, R.J. Stouffer, A. Sumi, and K.E. Taylor (2007). Climate models and their evaluation. En: *Climate Change: the physical science basis, working group I contribution to the fourth assessment report of the intergovern-*



- mental panel on climate change*. Cambridge University Press, Cambridge, England.
- Sánchez Ch.J.J., L. Bravo I, C. Tomasini O, F. Brenal B. 2011. Calidad del agua del lago de Pátzcuaro. En: *Estudio Ecosistémico del Lago de Pátzcuaro*. (Eds) Huerto D.R.I., S. Vargas V.A.F. Ortiz P. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México.
- SARH (1987). *Clasificación del lago de Pátzcuaro*. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Subdelegación de Infraestructura Hidráulica. Residencia General de Administración y Control de Sistemas Hidrológicos. Unidad Hidráulica de Calidad del Agua. Morelia. Mich. 39 p.
- Sarma, S.S.S., Elías-Gutiérrez, M., Serranía-Soto, C., 1997. Rotifers from high altitude crater-lakes at Nevado de Toluca Volcano, Mexico. *Hidrobiología* 6, 33-38.
- Swart R., Bernstein, L., Ha-Duong, M., Petersen. A., 2010. Agreeing to disagree: uncertainty management in assessing climate change, impacts and responses by the IPCC. *Climatic Change* 92, 1–29.
- TNC (The Nature Conservancy) 2006. Indicators of Hydrologic Alteration, Version 7. User's Manual. Totten Software Design. Smythe Scientific Software, USA.
- Webster, M. 2009. Uncertainty and the IPCC, An editorial comment. *Climatic Change* 92: 37-40.
- Wetherald, R.T. 2010. Changes of time mean state and variability of hydrology in response to doubling and quadrupling of CO2 changes. *Climatic Change*. Recuperado de. DOI 10.1007/s10584-009-9701-42009.
- R.G. Wetzel. 2001. *Limnology, Lake and River Ecosystem*, 3th. Edition, Academic Press, United States, 2001.
- Yarime M, Y. Takeda, Y. Kajikawa (2010). Towards institutional analysis of sustainability science: a quantitative examination of the patterns of research collaboration. *Sustain Science*. 5: 115–125.

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1.1.	Cuenca del río Apatlaco, Morelos, México.	8
Figura 1.2.	Descarga de aguas residuales a barranca en la cuenca del río Apatlaco.	9
Figura 1.3.	Cabeceras de los municipios que conforman la Cuenca del río Apatlaco	10
Figura 1.4.	Emisiones totales anuales de las cabeceras municipales.	17
Figura 2.1.	Repercusiones del cambio climático en la vida de la población de Ixil. Fuente: elaboración propia.	32
Figura 4.1.	Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC). Visión 10-20-40. 2015	68
Figura 4.2.	Estrategias de mitigación en el corto y largo plazo. ENCC Visión 10-20-40 Fuente: Shindell D., J. K., Vignati, E., Van Dingenen, R., et al. (13/enero/2012). "Simultaneously mitigating near.term climate change and improving human health and food security". Science. Vol. 335: pp. 183-189. Recuperado de: http://www.sciencemag.org/content/335/6065/183.full	69
Figura 4.3.	Capacidad instalada por tipo de fuente. PRODESEN 2018-2032 SENER	69
Figura 4.4.	Capacidad instalada en Energías Limpias. PRODESEN 2018-2032 SENER	70
Figura 4.5.	Líneas de investigación para el desarrollo de la generación hidroeléctrica en México.	72
Figura 4.6.	Infraestructura existente con potencial de 5 a 30 MW (Pequeñas centrales)	73
Figura 4.7.	Presa derivadora "Juan Sabines", Chiapas 1982	74
Figura 4.8.	Centrales actuales mayores a 50 años	75
Figura 4.9.	Centrales actuales con más de 50 años y menores a 30 MW	75
Figura 4.10.	Presa Adolfo Ruíz Cortínez, "Mocuzari", Álamos, Sonora, 1955	76
Figura 5.1.	Cambios esperados en la precipitación promedio mundial para el periodo 2081-2100 respecto del periodo 1986-2005, con base en los escenarios RCP 2.6 (izquierda) y RCP 8.5 (derecha). Fuente: IPCC (2013).	80
Figura 5.2.	Cambios esperados en la precipitación promedio anual de México para el período 2015-2039, según los escenarios RCP 6.0 (izquierda) y RCP 8.5 (derecha). Fuente: INECC (2016)	81
Figura 5.3.	Diagrama de la estructura del riesgo bajo cambio climático. Fuente: adaptada de CEPAL (2000).	83
Figura 5.4.	Etapas que conforman la metodología para determinar índices de peligro, vulnerabilidad y riesgo por sequía en México. Fuente: elaboración propia.	84
Figura 5.5.	Mapa nacional de peligro por sequía. Fuente: elaboración propia.	94
Figura 5.6.	Mapas de vulnerabilidad económica, social, ambiental y global ante la sequía en México. Fuente: elaboración propia.	96
Figura 5.7.	Mapa nacional de riesgo por sequía. Fuente: elaboración propia.	99
Figura 6.1.	Distribución de la precipitación promedio diaria durante el año en cuatro estaciones del estado de Morelos de 1951 a 2010. (Fuente: elaboración propia)	106
Figura 6.2.	Inicio, Fin y Duración del Período de Crecimiento Húmedo (PCH) para cuatro estaciones del estado de Morelos (1951-2010).(Fuente: elaboración propia)	110
Figura 6.3.	Variación de la duración y promedio del Inicio, fin y duración del PH en días de la Estación Zacatepec (1951-2010). (Fuente: elaboración propia)	111
Figura 6.4.	Inicio, fin y duración promedio en días de la CA en la estación de Zacatepec, Morelos (1951-2010). (Fuente: elaboración propia)	112

Figura 6.5.	Imagen con la ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas para el presente estudio.	114
Figura 6.6.	Comportamiento de la temperatura media diaria promedio en cuatro estaciones de Morelos de 1951 a 2010. (Fuente: elaboración propia)	125
Figura 6.7.	Inicio, fin y duración promedio de la canícula agronómica en días en 4 estaciones del estado de Morelos (de 1951 a 2010). (Fuente: elaboración propia)	128
Figura 6.8.	Frecuencia de la canícula agronómica para cuatro estaciones de Morelos. (Fuente: elaboración propia)	129
Figura 6.9.	Variación y promedio de la duración en días del período húmedo (PH) y los años secos en cuatro estaciones de Morelos de 1951 a 2010. (Fuente: elaboración propia)	129
Figura 6.10.	Comparación de los promedios de las fechas de ocurrencia en DJ del inicio, fin y la duración en días obtenidas con el PCH y el PH agronómico. (Fuente: elaboración propia)	130
Figura 6.11.	Estimación del Radiación global (Rg) mensual en mm de agua evaporable para cuatro estaciones de Morelos. (Fuente: elaboración propia).	131
Figura 7.1.	Distribución porcentual por ciclo agrícola de la superficie sembrada en distritos de riego, año agrícola 2015-2016 (Elaboración propia con datos de la CONAGUA, 2017).	140
Figura 7.2.	Componentes para evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático. (Gbetibouo y Ringler, 2009 citados por IMTA, 2010).	141
Figura 7.3.	Precipitación anual en mm y temperatura media anual (°C) para el estado de Zacatecas. Fuente Instituto Nacional de Ecología (INE), 2008.	143
Figura 7.4.	Proyección de variación de la precipitación en el Estado de Zacatecas de acuerdo con los diferentes escenarios de emisión. Fuente: Instituto Nacional de Ecología (INE), 2008.	144
Figura 7.5.	Proyección de incremento de temperatura media anual en el Estado de Zacatecas de acuerdo con los diferentes escenarios de emisión. Fuente: Instituto Nacional de Ecología (INE), 2008.	144
Figura 7.6.	Ubicación geográfica del Distrito de Riego 034 Estado de Zacatecas.	145
Figura 7.7.	Distribución promedio de la superficie por cultivos frutales, hortalizas, granos y forrajes en el distrito de riego 034 estado de Zacatecas. Fuente: IMTA, 2006.	147
Figura 7.8.	Fotos de sistemas de riego por goteo en cultivos de maíz, frijol y chile, respectivamente.	149
Figura 8.1.	Ubicación e imágenes comparativas en el tiempo del Lago de Pátzcuaro (arriba) y El Sol (abajo), (Fuente: Para Lago de Pátzcuaro Imágenes Landsat MSS (1976, 2008); Para El Sol imágenes Google Earth (2006) y foto de elaboración propia de 1982).	159
Figura 8.2.	Variación de la temperatura observada, máxima y mínima (medianas) de la Estación Pátzcuaro.	161
Figura 8.3.	Variación de la precipitación y evaporación (medianas) en la Estación Pátzcuaro.	161
Figura 8.4.	Variación de las medianas de la temperatura observada, máxima y mínima de la Estación Nevado de Toluca (1964-1985 y 1985-2008).	164
Figura 8.5.	Variación de las medianas de la temperatura observada, máxima y mínima de la Estación Nevado de Toluca (1964-1985 y 1985-2008).	164

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1.1.	Proyecciones de la población para el periodo 2015 – 2017 en las cabeceras municipales.	13
Tabla 1.2.	Carga orgánica diaria y anual generada en las cabeceras municipales de la cuenca del río Apatlaco.	14
Tabla 1.3.	Emisiones de metano generada por las descargas de aguas residuales sin recolección ni tratamiento en las cabeceras municipales de la cuenca del río Apatlaco.	14
Tabla 1.4.	Emisiones de metano expresadas en CO ₂ e para las cabeceras municipales.	15
Tabla 1.5.	Emisiones de óxido nitroso generadas por las cabeceras municipales.	15
Tabla 1.6.	Emisiones a partir del óxido nitroso, expresadas en CO ₂ e, para las cabeceras municipales.	16
Tabla 1.7.	Emisiones totales expresadas en CO ₂ e, para las cabeceras municipales.	16
Tabla 2.1.	Distribución de porcentajes de percepciones asociadas al término de cambio climático.	29
Tabla 3.1.	Instrumentos de Política de Cambio Climático en los tres órdenes de gobierno (SEMARNAT, 2012).	45
Tabla 5.1.	Categorías para clasificar la probabilidad de las diferentes categorías de sequía.	88
Tabla 5.2.	Matriz de indicadores seleccionados y agrupados en los tipos y componentes de la vulnerabilidad ante la sequía.	91
Tabla 5.3.	Fórmulas y fuentes de información para el cálculo de los indicadores.	92
Tabla 5.4.	Categorías para clasificar el grado de vulnerabilidad ante la sequía.	94
Tabla 5.5.	Categorías para clasificar los índices de riesgo por sequía.	95
Tabla 6.1.	Estaciones meteorológicas utilizadas para la aplicación de la metodología y determinación del PH y la CA.	116
Tabla 6.2.	Formato utilizado para la sistematización, procesamiento y cálculo de índices e indicadores para determinar el PH y la CA (IMTA, 2018).	118
Tabla 6.3.	Resultados del análisis termo pluviométrico de 1951 a 2010 de cuatro estaciones aplicando la metodología para determinar el PH y la CA.	128
Tabla 6.4.	Resultados del análisis pluviométrico de la estación Progreso IMTA para validar la metodología y determinar el PH y la CA en relación al cultivo de maíz.	135
Tabla 7.1.	Indicadores y fuentes de datos para estimar la capacidad de adaptación como componente de la vulnerabilidad al cambio climático.	151
Tabla 7.2.	Requerimientos de riego y lámina de riego aplicada para cultivos de maíz, frijol y chile, eficiencia de aplicación para riego por gravedad y goteo, y el volumen de agua utilizado, para una superficie del distrito de riego 034 estado de Zacatecas.	153
Tabla 7.3.	Situación actual de los conceptos de rendimiento, costos de producción, precio medio rural y el valor de la producción para los cultivos de maíz, frijol y chile seco con información para el estado de Zacatecas.	154
Tabla 7.4.	Situación a futuro con los sistemas de riego por goteo, para los conceptos de rendimiento, costos de producción, precio medio rural y el valor	

	de la producción para los cultivos de maíz, frijol y chile seco con información para el estado de Zacatecas.	154
Tabla 8.1.	Prueba de " t " de la temperatura observada, máxima, mínima, precipitación y evaporación de Pátzcuaro en los periodos de anterior (1973–1990; G1) y posterior (1991–2007; G2). En negritas los resultados significativos a $p \leq 0.05$ y $p \leq 0.01$.	164
Tabla 8.2.	Prueba de " t " aplicada a la temperatura observada, mínima, máxima, precipitación, y evaporación del lago de El Sol a los periodos anterior (1964–1985; G1) y posterior (1986–2008; G2), en negritas los resultados significativos a $p \leq 0.05$ y $p \leq 0.01$.	165
Tabla 8.3.	Regresiones lineales de los datos meteorológicos de la estación Pátzcuaro, Mich. (16087), en negritas las relaciones significativas a $P \leq 0.05$ y 0.01 .	167
Tabla 8.4.	Regresiones lineales de los datos de la estación Nevado de Toluca (15062), en negritas las relaciones significativas a $P \leq 0.05$ y 0.01 .	168
Tabla 8.5.	Variación de los parámetros morfológicos y fisicoquímicos del lago de Pátzcuaro y El Sol en el tiempo	170
Tabla 8.6.	Coefficientes de regresión entre las variables físicoquímicas y biológicas en el Lago de Pátzcuaro (2006–2011) y El Sol (1981–1982). $P < 0.05$.	171



SEMARNAT
SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS NATURALES



IMTA
INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGÍA
DEL AGUA

