



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

VULNERABILIDAD DEL SECTOR HÍDRICO POR EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO

Tesis profesional para obtener el título de Ingeniero Civil

Autor: Miguel Velasco Gutiérrez

Director de tesis: M en C. María Inés Josefina Navarro González

Ciudad Universitaria, México, 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos

Quiero dar gracias primero que nada a Dios por ponerme en este camino y darme siempre todo lo necesario para seguir adelante y llegar hasta este punto.

En segundo lugar a mis padres por apoyarme siempre, por inculcarme los valores con los que hoy manejo mi vida, por apoyarme siempre en mis decisiones y por darle siempre una gran importancia a mi formación profesional. Junto con mis padres, a mis hermanos Armida y Héctor, que siempre me enseñaron tanto gracias a ellos, soy una mejor persona, mi hermana que sigue siendo una fuente de inspiración para mí y mi hermano que aunque ya no está conmigo sigue recordándome todos los días la importancia de seguir adelante con la mejor actitud y con una sonrisa.

A mi tutora, la maestra Inés por todas sus horas invertidas en mí y en este proyecto, por sus valiosas enseñanzas y consejos a lo largo de este proyecto y en especial por su enorme paciencia, voluntad y disposición de apoyarme a cada paso de este trayecto.

Un agradecimiento muy especial a mis compañeras del Instituto de Ingeniería Nidya, Maru y Raquel y Sol, por las incontables veces que me ayudaron en este proyecto, por todo lo que me enseñaron, y por todos los grandes favores que me hicieron siempre de buena voluntad.

A mis amigos por siempre estar a mi lado y tener confianza en mí, son tantos que no acabaría de mencionarlos en esta hoja y en especial a mi novia Annia, por darme ese último empujón de motivación que tanto necesitaba para cerrar esta etapa de mi vida.

Por último pero no menos importante quiero agradecer a la institución que me dio mi formación profesional, a la Universidad Nacional Autónoma de México mi más grande agradecimiento ya que sin todo lo que la institución hizo por mí tanto dentro como fuera de las aulas yo no tendría el conocimiento ni la formación que tengo el día de hoy.

Contenido

1.	Introducción	7
1.1	Antecedentes	7
1.2	Justificación	9
1.3	Objetivo	10
	Alcance	11
	Metas.....	11
1.4	Contenido	11
2.	Marco teórico	13
	Clima.....	13
	Cambio climático	13
	Cambios en el clima.....	15
	Gases de efecto invernadero	17
2.1	Escenarios de emisiones	19
2.1.1	Escenarios de cambio climático, modelos y proyecciones	22
2.2	Impactos del cambio climático.....	25
	Ecosistemas	25
	Alimentos, fibras y productos forestales	25
	Sistemas costeros y zonas de baja altitud.....	25
	Asentamientos y sociedad	26
	Salud.....	26
	Impactos en el sector hídrico	26
2.2.1	Impactos del cambio climático en México en el sector hídrico	30
2.3	Vulnerabilidad	31
	Vulnerabilidad al cambio climático	31
	Vulnerabilidad y resiliencia	32
2.3.1	Estudios de vulnerabilidad	32
	Vulnerabilidad en el sector hídrico	33
	Qué se ha hecho.....	33

En México	34
2.4 Metodologías aplicadas.....	35
Estudio de vulnerabilidad por medio de índices	36
Procedimiento para la construcción de un índice de vulnerabilidad.....	36
Bases de datos de la información	37
Normalización de los indicadores utilizando relación funcional.....	37
2.4.1 Métodos de construcción de índices de vulnerabilidad	38
Métodos de asignación del mismo peso	38
Métodos con pesos distintos	39
Técnicas estadísticas multivariadas	41
3. Metodología.....	42
3.1 Área de estudio: Regiones hidrológico-administrativas	42
Regiones hidrológico-administrativas.....	42
3.2 Metodología para evaluar vulnerabilidad.....	45
3.2.1 Identificación de indicadores	45
Bases de datos e información disponible.....	47
Proyecciones	48
3.2.2 Método para normalizar indicadores.....	53
3.3 Evaluación de la vulnerabilidad.....	54
3.2.3 Obtención de proyecciones mediante la plataforma SEDEPECC	54
4. Resultados y discusión	57
4.1 Resultados	57
4.2 Análisis de resultados y discusión	61
5. Conclusiones.....	67
Referencias.....	68

Índice de Figuras

Figura 1: This image shows the instrumental record of global average w:temperatures as compiled by the w:NASA's w:Goddard Institute for Space Studies. (2006) "Global temperature change". Proc. Natl. Acad. Sci. 103: 14288-14293. Following the common practice of the w:IPCC, the zero on this figure is the mean temperature from 1961-1990. This figure was originally prepared by Robert A. Rohde from publicly available data and is incorporated into the Global Warming Art project.	14
Figura 2 This figure shows the last 25 years of globally averaged instrumental surface temperature measurements according to data collected by the Hadley Centre of the UK Meteorological Office and the Climatic Research Unit of the University of East Anglia. Data set TaveGL2v was used. The most recent documentation for this data set is Jones, P.D. and Moberg, A. (2003).	14
Figura 3 <i>Proyecciones de temperatura al 2100 la línea naranja muestra la temperatura en caso de que la situación atmosférica se mantuviera como se encuentra actualmente. Las otras líneas muestran varios escenarios (SRES) para distintos niveles de desarrollo socioeconómico global, explicados más adelante. (IPCC, 2007)</i>	15
Figura 4 <i>Esquema que muestra en conjunto todos los distintos cambios que se han detectado en los océanos como consecuencia del cambio climático (IPCC, 2007)</i>	17
Figura 5 Concentraciones de gases de efecto invernadero obtenidas de núcleos de hielo extraídos en el antártico (IPCC, 2007)	18
Figura 6: Mapa que muestra la distribución de las regiones hidrológico administrativas con respecto a los estados	43
Figura 7 Pantalla de inicio de la plataforma SEDEPECC en línea	55
Figura 8 Nivel de vulnerabilidad para el escenario de emisiones 2010	59
Figura 9 Nivel de vulnerabilidad para el escenario de emisiones A1B 2030.....	59
Figura 10 Nivel de vulnerabilidad para el escenario de emisiones A2 2030	60
Figura 11 Comparación de los índices de vulnerabilidad para los 3 escenarios.	60
Figura 12 Desglose de los índices de vulnerabilidad por componente, para el escenario base 2010	61
Figura 13 Desglose de los índices de vulnerabilidad por componente, para el escenario A1B 2030	63
Figura 14 Desglose de los índices de vulnerabilidad por componente, para el escenario A2 2030	64
Figura 15 Gráfica comparativa de los tres escenarios para la componente de sensibilidad a la exposición climática	65
Figura 16 Gráfica comparativa de los tres escenarios para la componente de sensibilidad al suministro de agua	65
Figura 17 Gráfica comparativa de los tres escenarios para la componente de sensibilidad de capacidad adaptativa	66

Índice de Tablas

Tabla 1: <i>Presenta un panorama general de emisiones para el próximo siglo. (IPCC, 2000), muestra los promedios de los intervalos obtenidos de concentraciones para los distintos escenarios descritos para algunos de los gases de efecto invernadero.</i>	21
Tabla 2: <i>Proyección estimada del aumento en la temperatura global de superficie para finales de siglo, Estos estimados se hicieron con diversos modelos como los EMC's y los AOGCM's. (IPCC, 2007), "constante" quiere decir que se mantiene constante la concentración actual durante todo el siglo.</i> .	21

Tabla 3: Modelos de circulación general, utilizados por el IPCC, e menciona la institución donde se hicieron, el país y sus siglas y resoluciones, *estos modelos fueron los que se utilizaron para el cálculo de anomalías en el método REA (explicado más adelante). (IPCC 2007)	23
Tabla 4: Categorías para clasificar el nivel de vulnerabilidad	41
Tabla 5 Regiones Hidrológico-administrativas, su superficie nacional. Su población estimada, datos de agua renovable y su aportación al producto interno bruto nacional. Fuente: CONAGUA 2011.	42
Tabla 6 muestra la distribución de las superficies en porcentajes de los estados dentro de las RHA's Fuente: CONAGUA, 2001.	44
Tabla 7 Lista de los 22 indicadores utilizados para la evaluación en sus cuatro clasificaciones	46
Tabla 8: Indicadores clasificados por grupo y fuente.....	48
Tabla 9: Proyecciones de los indicadores para los escenarios A1B y A2	50
Tabla 10 Los 22 indicadores con su relación funcional	53
Tabla 11 Resultados de vulnerabilidad para el escenario 2010, 2030 A1B y 2030 A2	58

1. Introducción

A partir de los últimos 250 años han ocurrido varios cambios en la composición de la atmósfera y en la superficie terrestre, estos alteran el sistema de almacenamiento natural que tiene la atmósfera terrestre haciendo que diversos aspectos de clima cambien. Uno de los principales cambios en la composición de la atmósfera y del almacenamiento de energía que en ella se realiza es la concentración de gases de efecto invernadero (Montero & Perez 2008).

Esta variabilidad climática afecta varios sistemas naturales y humanos. Uno de los principales retos en la investigación de este campo es el de obtener información adecuada, manejada por una variedad de disciplinas. No se tienen suficientes recursos para que los climatólogos obtengan un resultado en su investigación que satisfaga todas las necesidades de esta. Por lo tanto se tienen que hacer estudios particulares que cubran la mayor cantidad de áreas de estudio con la mayor cantidad de información disponible (Mitchell & Jones, 2005). Es importante que esta información este homogeneizada para una correcta evaluación de los efectos del clima para una región.

Un enfoque particular en los estudios del impacto del cambio climático corresponde a la evaluación de la vulnerabilidad de un sistema en específico y ante riesgos específicos. En general la vulnerabilidad ante riesgos climatológicos se refiere a la probabilidad de una pérdida. La vulnerabilidad climática se deriva de condiciones extremas del clima que afectan al planeta y los impactos en un ecosistema o en una sociedad. Estos impactos dependen de la intensidad o duración de la anomalía, así como del grado de vulnerabilidad del ecosistema o la sociedad (Magaña, 2012). En nuestro caso se analizará la vulnerabilidad del país, específicamente en el sector hídrico.

1.1 Antecedentes

La mayoría de la literatura existente en cuando a estudios de evaluación de vulnerabilidad ante el cambio climático esta presentada en estudios de caso para sociedades particulares y para un sector en específico (Ibarrarán, 2010). En el caso de México podemos considerar que los estudios de vulnerabilidad al cambio climático son recientes.

Por ejemplo, Magaña et al. (2004) realizaron un estudio de vulnerabilidad en el que consideraron las consecuencias de anomalías en la precipitación, ya que mencionan que la precipitación es el elemento climático que más afecta a todas las actividades socioeconómicas del país. No es un estudio detallado del clima, es el análisis de las consecuencias de las sequías e inundaciones y concluyen que al no tener una política de manejo de agua que se base en escenarios o pronósticos, estos fenómenos terminan en desastres.

Martínez & Patiño (2010), en su trabajo Atlas de Vulnerabilidad Hídrica en México mencionan que la vulnerabilidad social está fuertemente ligada con los impactos climáticos que se presentarán; realizan una selección de los mejores indicadores para hacer su evaluación, pero se encuentran

con la limitante de la disponibilidad de información. Al final, utilizando solo 15 indicadores, presentan sus resultados por municipio indicando cinco diferentes niveles de vulnerabilidad.

Algo interesante de sus resultados es que presentan que una región socialmente vulnerable no será hidrológicamente vulnerable, ni viceversa.

En este mismo documento realizan una evaluación del impacto climático sobre los escurrimientos superficiales en tres cuencas del país, la cuenca del río Conchos, La cuenca Lerma-Chapala y la cuenca del Grijalva. Consideran la variación de la precipitación por cambio climático para evaluar el escurrimiento superficial, permitiéndoles encontrar las zonas más sensibles a cambios en precipitación.

Realizan un análisis de la calidad del agua en tres cuencas, río Bravo, Lerma-Chapala y Grijalva; existen pocos trabajos de vulnerabilidad que evalúen la calidad del agua, en especial por falta de datos adecuados. Para realizar su evaluación utilizaron datos de temperatura superficial y de precipitación proyectadas para los escenarios de emisiones A1B y A2 regionalizados para México. Sus parámetros de calidad del agua fueron la Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días (DBO₅), y la Demanda Química de Oxígeno (DQO).

Estos mismos autores, Martínez & Patiño (2012), realizan un estudio llamado Efectos del Cambio Climático en la Disponibilidad de Agua en México. Explican los diversos efectos que se podrían presentar al sufrir los efectos esperados del cambio climático en el país. Mencionan que el país ya tiene problemas de disponibilidad aun sin cambio climático y que la disminución de precipitación es debido a la latitud en la que se encuentra el país; mencionan también que se esperan eventos extremos que provocarán inundaciones y disminuirán la calidad del agua. Al final recomiendan que se realicen medidas de adaptación al cambio climático, en especial en las regiones que ellos evaluaron como más vulnerables.

Ibarrarán & Rodríguez (2007), hacen un análisis de vulnerabilidad por estados, donde consideran desigualdad social, vulnerabilidad y resiliencia al cambio climático y desastres naturales. Realizan estimaciones futuras de los costos de adaptación, precios del agua por su uso, disponibilidad de agua y desagregación por uso de agua.

Domínguez & Jiménez, (2010) realizan un estudio donde mencionan las deficiencias de la cobertura de agua potable en México, mencionan que si bien la cobertura en México es amplia, la calidad del servicio es muy deficiente en términos de cantidad y de calidad, pese a las repercusiones en la salud que esto último podría traer. Mencionan que estas deficiencias se presentan a causa de una mala o nula planeación, y de los bajos costos de las tarifas, entre otros factores. Concluyen que la falta de planeación en las obras públicas y la falta de recursos para realizarlas y el incumplimiento de los organismos responsables de proveer el servicio, son lo que está impidiendo una adecuada cobertura de agua potable y saneamiento.

Ibarrarán et al. (2010) hacen una evaluación de vulnerabilidad y resiliencia. Aplican el método cuantitativo VRIM que involucra información socioeconómica y ambiental; consideran como

indicadores de sensibilidad: infraestructura, seguridad alimentaria, salud, uso de fertilizantes en ecosistemas, entre otros. En sus resultados observan que las condiciones geográficas no son el único factor que determina la resiliencia al cambio climático sino que depende en gran medida del desarrollo económico y de la capacidad de adaptación a problemas ambientales y climáticos. Algo muy importante que mencionan es la gran relevancia de estos estudios como fundamento para políticas públicas a distintos horizontes.

Existen muchos estudios de caso más, como lo son el de Carbajal (2011), que realiza una estimación de la vulnerabilidad de las regiones costeras a causa del incremento del nivel del mar. Muy parecido a este es el trabajo de Botello et al. (2010), quienes evalúan la vulnerabilidad ante la misma situación; el primero es un estudio más enfocado a lo social, mientras que el segundo da más importancia a efectos biogeofísicos, ambos con resultados muy similares, marcando los estados costeros del golfo como más vulnerables.

Hernández (2011), analiza la vulnerabilidad demográfica ante eventos hidrometeorológicos, donde desarrolla una metodología para encontrar un índice que lo cuantifique.

Existen otros estudios enfocados a distintos impactos climáticos en el país, para ciertas regiones; la mayoría se enfrentan con el problema de la falta de información o de lo mala que es la calidad de ésta. Sin embargo, a partir de éstos estudios se pueden tomar decisiones y crear políticas públicas mejor fundamentadas y con un enfoque más concreto, ya que casi todos éstos estudios concluyen que no existe un plan adecuado de adaptación y que más bien las instituciones correspondientes tienden a realizar acciones reactivas y no preventivas.

1.2 Justificación

El estudio del cambio climático se ha vuelto un área de investigación muy importante en la actualidad. Si no se toman las medidas de adaptación adecuadas, los impactos en las sociedades alrededor del mundo podrían ser muy severos. Estos impactos podrían tener diversos efectos en muchos sectores como lo son los sistemas agrícolas, costeros, afectar a la salud humana, a los asentamientos, el empleo, y en general cualquier aspecto de la sociedad (Moss et al, 2001).

Para asegurar que los programas de desarrollo reduzcan la vulnerabilidad de las personas al cambio climático, es necesario comenzar por identificar, quiénes son, en dónde están y por qué son vulnerables (Magaña, 2012).

Ante el cambio climático uno de los mayores desafíos para el país será garantizar el abasto de agua. Por un lado, los aumentos de temperatura podrían provocar sequía hidrológica y, por otro, más eventos extremos como lluvias intensas disminuirían la calidad del agua ocasionando problemas en la infraestructura hidráulica.

El análisis y evaluación de la vulnerabilidad de México ante el cambio climático en el tema del sector hídrico, es relevante debido a su ubicación geográfica, ya que 40% del territorio nacional es

árido o semiárido y en consecuencia, presenta bajos niveles de precipitación. Para el periodo 1971-2000, la precipitación normal del país fue de 760 mm (CONAGUA, 2011).

Las acciones de adaptación podrían cambiar este escenario al usar información climática para la adecuación a condiciones cambiantes. Lamentablemente no existe experiencia de cómo usarla para la gestión del agua, ya que en México pocas veces se toma en cuenta de manera sistemática el pronóstico estacional del clima. (CONAGUA, 2008)

Considerando que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) es el organismo normativo, técnico y consultivo, es el que regula todo lo referente al sistema hídrico a través de las Regiones Hidrológico-Administrativas (RHA), que son unidades de gestión de los recursos hídricos. Tratándose este estudio de un análisis de la vulnerabilidad del sector hídrico, se consideró lo más correcto realizar este estudio para las 13 Regiones Hidrológicas Administrativas en las que está dividido el país.

Realizar estudios de vulnerabilidad de este tipo, para la situación actual de nuestro país, es de suma importancia para poder realizar una correcta toma de decisiones en cuanto a qué medidas de adaptación se pueden tomar y saber de qué manera se debe reaccionar ante catástrofes climáticas actuales. Más importante aún, es el estudio de vulnerabilidad que se realice para escenarios futuros, ya que de un estudio completo de vulnerabilidad es de donde se debe partir para un plan nacional de medidas de adaptación ante un futuro que tendrá importantes cambios climáticos que afectarán a la sociedad.

No se pueden realizar medidas de adaptación sin el conocimiento de las regiones más vulnerables del país y sin saber a qué factores climatológicos, geográficos o sociales están más expuestas. Estas medidas de adaptación deben tener en cuenta distintos escenarios, es por esto que en esta investigación se utilizaron dos de los escenarios que presentan situaciones de desarrollo social muy distintas, seleccionados dentro de los que utiliza el Panel Internacional de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés).

1.3 Objetivo

Presentar un análisis cuantitativo de vulnerabilidad por medio de índices que estén contruidos con la mayor cantidad de datos disponibles y utilizando la metodología y proyecciones más adecuados. Que estos índices sean medibles entre sí para poder realizar una comparación entre regiones y que a su vez la metodología nos permita ver cuáles son los componentes más vulnerables de cada región.

Realizar un análisis de la vulnerabilidad del sector hídrico del país ante el cambio climático, donde se identifiquen que regiones del país son más vulnerables y frente a cuales cambios se verían más afectados.

Alcance

La evaluación de la vulnerabilidad del sector hídrico se acota al uso consuntivo del agua municipal, es decir, se evalúa la vulnerabilidad de los servicios de agua municipal responsables del suministro de agua potable a la población.

La evaluación se realiza para las 13 Regiones Hidrológicas Administrativas, organismos de gestión del agua administrados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2008).

Se hace un análisis presente de la vulnerabilidad generando un escenario actual con base en datos disponibles. Se utilizan proyecciones basadas en el escenario base para generar escenarios futuros para un horizonte al año 2030, se utilizaron los escenarios de emisiones del IPCC como base para los escenarios futuros, los escenarios seleccionados fueron el A1B y A2 los cuales se explican en el siguiente capítulo.

Para realizar las proyecciones de estos datos en el caso de los escenarios, se utilizó la plataforma del Sistema para la Exhibición de Datos del Ensamble Ponderado de Escenarios de Cambio Climático (SEDEPECC), que proporciona datos de temperatura y precipitación para el país para éstos dos escenarios.

Metas

Identificación de los niveles de vulnerabilidad actuales y futuros en los servicios de suministro de agua potable.

1.4 Contenido

El trabajo consiste en 4 capítulos, marco teórico, metodología, resultados y conclusiones.

El marco teórico presenta una explicación de lo que es el cambio climático y de sus efectos en los diversos sistemas tanto humanos como naturales. Se habla de los escenarios futuros, de cómo pueden haber diversas posibilidades y las repercusiones en el desarrollo del planeta. Incluye una breve explicación de los gases de efecto invernadero.

Se mencionan los diversos modelos utilizados para analizar el clima, las características que estos modelos requieren y cuales se han usado en nuestro país; sus ventajas y desventajas y las maneras para adecuarlos a nuestra situación.

Se hablará de los impactos del cambio climático en diversos sectores, tanto a nivel mundial como en México. Con este tema se abordará el tema de la vulnerabilidad, de los factores que hacen vulnerable a una región y de los métodos o técnicas que se pueden utilizar para evaluarla. Se darán algunos ejemplos de cómo se ha evaluado en México. Y se ahondará en la vulnerabilidad del sector hídrico.

La última sección del marco teórico consiste en una explicación general de diversas metodologías utilizadas para la evaluación de la vulnerabilidad, dando especial interés en la metodología seleccionada para este trabajo.

El capítulo de metodología presenta una explicación detallada de las trece regiones de estudio, conocidas como Regiones Hidrológico-Administrativas.

Definida la región de estudio se habla de la metodología seleccionada y de cómo esta fue adaptada para nuestro caso de estudio. Se explican los indicadores seleccionados para la evaluación del índice de vulnerabilidad, porqué estos indicadores y, de dónde y de qué manera se obtuvo la información utilizada. Se hace una detallada explicación de las fuentes de información utilizadas para la elaboración de nuestra base de datos, tanto para los casos actuales como para las bases de datos de escenarios futuros, dando a conocer las consideraciones tomadas en cuenta en los indicadores, en especial en el caso de indicadores de escenarios futuros. Se presenta una explicación de la manera en que se procedió, de la clasificación de la información y de cómo se ordenaron los resultados.

Después se explica brevemente la manera en la que se obtuvieron los datos y las consideraciones tomadas para realizar las proyecciones, para obtener los resultados y ya con toda la información proporcionada, se procede a presentar los resultados en el siguiente capítulo.

Se presentan a manera de tablas, gráficas y mapas de vulnerabilidad, obtenidos de la plataforma: Global Mapper v. 15

Posteriormente se realiza un análisis de los resultados, presentando las tendencias más claras de la vulnerabilidad para todos los escenarios, así como en qué aspectos las regiones son más vulnerables y las diferencias entre los distintos escenarios presentados.

En el último capítulo se presentan las conclusiones, donde se explican las ventajas y desventajas de nuestra metodología, las complicaciones presentadas en la realización de esta evaluación de vulnerabilidad.

Por último se presentan las referencias.

2. Marco teórico

Clima

El clima es un promedio de las condiciones atmosféricas de un lugar medidas durante un periodo de tiempo determinado, el cual puede ser de días o de miles de años. Según la Organización Meteorológica Mundial, el periodo de tiempo más común a utilizar es de 30 años.

El clima medio global terrestre está determinado por la energía entrante del sol y por las propiedades de la tierra y su atmósfera, llámese: reflexión, absorción y emisión de energía dentro de la atmósfera y en su superficie. (Montero et al., 2008).

Cambio climático

Cuando sucede un cambio considerable y sostenido en el clima, de más de 10 años aproximadamente, se dice que existe un cambio climático, y este puede ser causado tanto por condiciones naturales, internas de la tierra, o por cambios en la composición de la atmósfera. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC por sus siglas en inglés) define al cambio climático como un cambio en el clima atribuible únicamente a cambios en la composición de la atmósfera causados por la actividad humana, independientemente de los cambios naturales en el clima (IPCC, 2001).

Está comprobado que la actividad humana ha afectado la composición química de la atmósfera. Este cambio empieza a ser muy evidente a partir de los años 50s, gracias a estudios realizados en Groenlandia y la Antártica, donde se analiza la composición de las burbujas de aire atrapadas en núcleos de hielo extraídos a distintas profundidades, y se ha podido conocer la composición química de la atmósfera para distintas edades de la tierra.

Medir la temperatura de toda la atmosfera es un proceso sumamente complicado, requiere la homogeneización de las distintas mediciones, acceso a todas estas mediciones y tener un control de calidad sobre estas. Actualmente existe la Organización Meteorológica Mundial, que es la encargada en recopilar todas estas mediciones para obtener un valor aproximado de la temperatura atmosférica global. Pese a estas complicaciones todos los estudios sobre la temperatura atmosférica demuestran una gran similitud en su tendencia desde 1900.

La temperatura global de la atmósfera ha aumentado más en los últimos 50 años que en ningún otro periodo similar en los últimos 1300 años (Figura 1) (Gay et al., 2008).

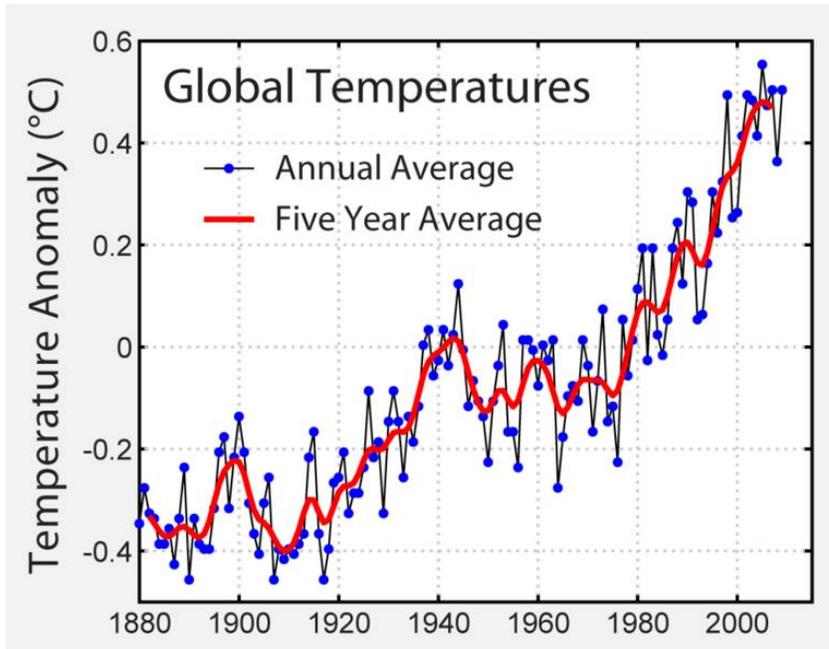


Figura 1: This image shows the instrumental record of global average w:temperatures as compiled by the w:NASA's w:Goddard Institute for Space Studies. (2006) "Global temperature change". Proc. Natl. Acad. Sci. 103: 14288-14293. Following the common practice of the w:IPCC, the zero on this figure is the mean temperature from 1961-1990. This figure was originally prepared by Robert A. Rohde from publicly available data and is incorporated into the Global Warming Art project.

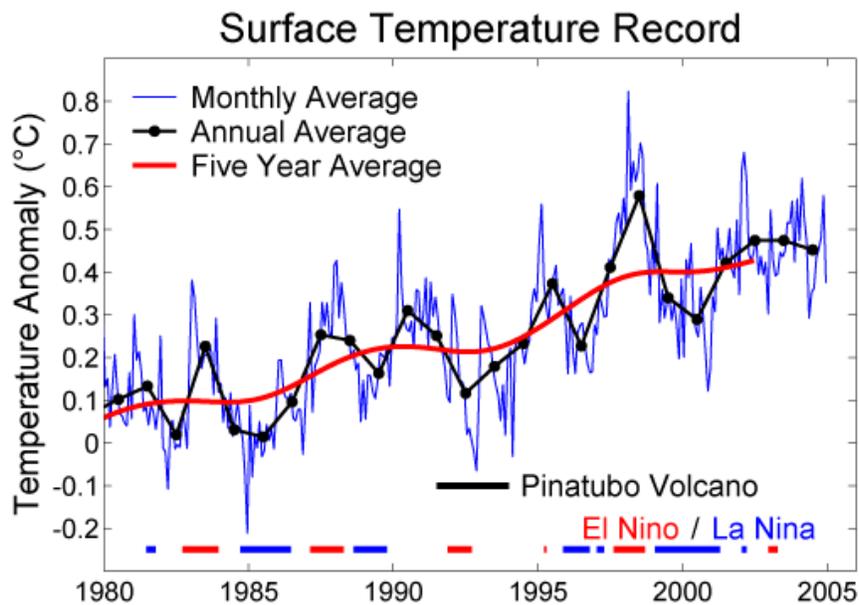


Figura 2 This figure shows the last 25 years of globally averaged instrumental surface temperature measurements according to data collected by the Hadley Centre of the UK Meteorological Office and the Climatic Research Unit of the University of East Anglia. Data set TaveGL2v was used. The most recent documentation for this data set is Jones, P.D. and Moberg, A. (2003).

Se han registrado también numerosos y diversos cambios alrededor de todo el globo, como aumentos en la intensidad de ciclones tropicales, ondas de calor, lluvias torrenciales más intensas o sequías.

Dependiendo del tipo de desarrollo que adopte el mundo podría haber incrementos de temperatura para el próximo siglo de 1.8 a 4°C (IPCC 2007) (Figura 3).

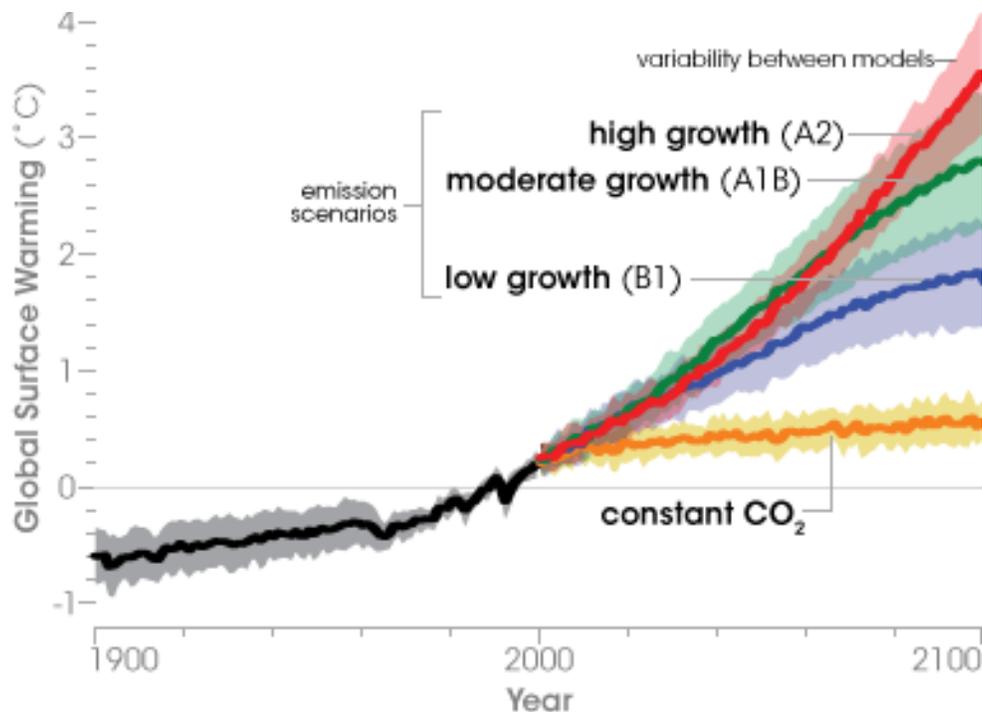


Figura 3 Proyecciones de temperatura al 2100 la línea naranja muestra la temperatura en caso de que la situación atmosférica se mantuviera como se encuentra actualmente. Las otras líneas muestran varios escenarios (SRES) para distintos niveles de desarrollo socioeconómico global, explicados más adelante. (IPCC, 2007)

Cambios en el clima

Se han observado y medido a través de las últimas décadas cambios en el clima, no solo en la atmósfera sino también en los cuerpos de hielo y en los océanos, principalmente.

Atmosféricos

Las mediciones promedio de la atmósfera indican que de 1910 a 1970, esta se ha calentado con un promedio de 0.35°C por década, mientras que de 1970 a la fecha esta se ha calentado cerca de 0.55°C, además 11 de los 12 años más calurosos de los que se tiene registro han sucedido en los últimos 12 años. Las mayores anomalías en temperaturas elevadas también han sucedido de 1980 a la fecha, esto sucede en la superficie terrestre y marina. Por otro lado, la estratósfera ha disminuido su temperatura considerablemente en las últimas décadas desde 1980, lo cual concuerda con todos los modelos de simulación de cambio climático (IPCC, 2007).

Habr  más eventos extremos en temperatura pero también en precipitación, así como fenómenos meteorológicos como ciclones más intensos. La precipitación puede aumentar en las altas latitudes y disminuir en las zonas subtropicales. (Conde & Gay, 2008).

En la criósfera

La criósfera, localizada en las regiones polares del planeta, en las altas montañas con "nieves perpetuas" (las cimas de los Andes y el Himalaya) y en los campos de hielo patagónicos argentino-chilenos, sufre diversos cambios a causa del incremento en la temperatura.

Por ejemplo, el hielo dentro de los continentes ha tendido a disminuir tanto en cantidad como en su duración sobre la superficie, es decir, el derretimiento de los hielos sucede antes cada año.

Se ha observado una gran disminución en la superficie y el espesor de los grandes cuerpos de hielo del  rtico; mientras que en Groenlandia y en el hielo antártico, si bien no han visto gran disminución en su superficie, si han sufrido pérdida del espesor de sus cuerpos de hielo.

Todo esto afecta en gran medida al aumento del nivel medio del mar (IPCC, 2007).

En los océanos

Se ha encontrado un invariable incremento en el contenido de calor de todos los océanos, principalmente en el Atlántico norte debido a sus corrientes de subducción.

La salinidad de los mares ha cambiado considerablemente a causa de varios factores; a altas latitudes el agua es más dulce, debido al derretimiento de la criósfera, mencionado en la sección anterior, mientras que en latitudes cercanas al ecuador debido al incremento en la evaporación y la disminución de las lluvias en algunas zonas, se tiene agua más salada.

También se ha detectado un incremento en el nivel del mar a causa principalmente de los dos factores antes mencionados, primero, un aumento en la temperatura del agua implica una dilatación de esta, y segundo el derretimiento de grandes cuerpos de hielo que van a dar a los océanos (IPCC, 2007) (Figura 4).

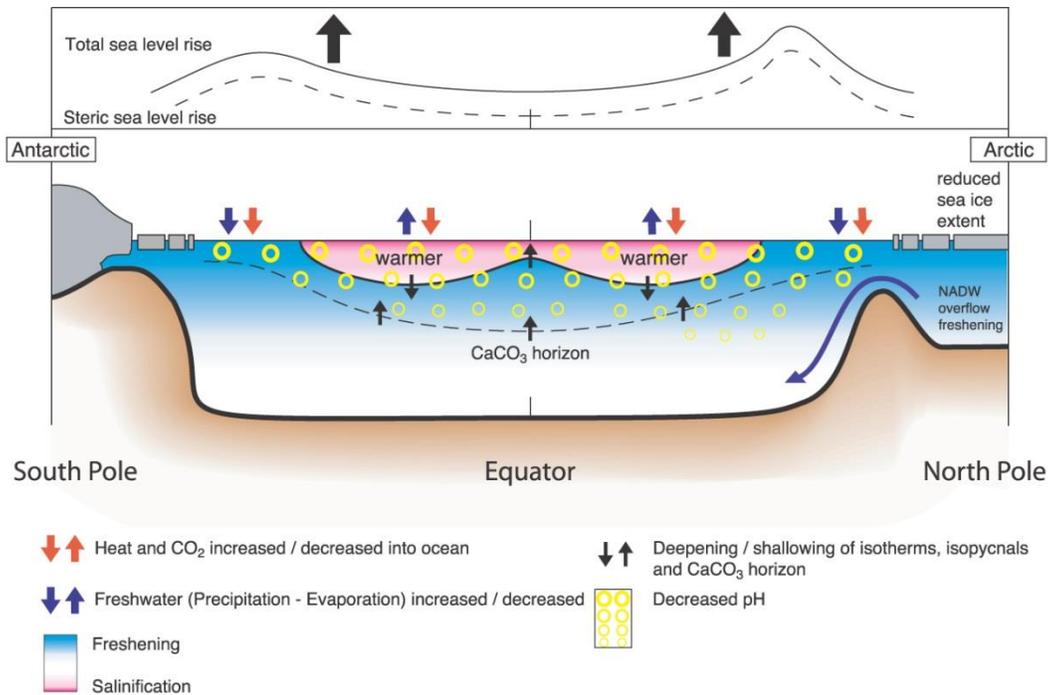


Figura 4 Esquema que muestra en conjunto todos los distintos cambios que se han detectado en los océanos como consecuencia del cambio climático (IPCC, 2007)

Gases de efecto invernadero

Aunque la temperatura de la superficie del mar y la humedad del suelo son los principales forzantes de la variabilidad del clima, el cambio climático responde al forzante dado por la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, esta concentración va relacionada con actividades humanas [Magaña 2010].

Un GEI es un gas que absorbe radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación (radiación infrarroja) emitido por la superficie de la Tierra y por las nubes. El gas, a su vez, emite radiación infrarroja desde un nivel en que la temperatura es más baja que en la superficie. El efecto neto consiste en que parte de la energía absorbida resulta atrapada localmente, y la superficie del planeta tiende a calentarse. En la atmósfera de la Tierra, los gases de efecto invernadero son, básicamente: vapor de agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄) ozono (O₃) dióxido de azufre (SO₂), Oxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂) entre otros. (IPCC 1995).

Se descubrió que del periodo de 1750 hasta 10 mil años atrás, la concentración de CO₂ en la atmósfera se mantuvo constante, con un valor promedio de 280 ppm, y tras la revolución industrial esta aumentó a 367 en 1999 y llegó a 379 en el 2005 (Neftel et al., 1985; Etheridge et al., 1996; IPCC, 2001a.). Con estudios realizados directamente en la atmósfera desde 1970 también se ha demostrado que la concentración de otros gases de efecto invernadero, como lo son el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O), se han incrementado considerablemente (Steele et al., 1996), y

estudios en núcleos de hielo de estos mismos gases demuestran que de hace diez mil años al siglo XIX, hubo un incremento constante en su concentración (IPCC, 2001a) (Figura 5).

También se ha encontrado recientemente la presencia de diversas sustancias sintéticas como lo son los clorofluorocarbonos (CFC), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF_6) entre otros gases, con un alto potencial de cambio climático que no existían en la atmósfera en ningún punto previo a 1930.

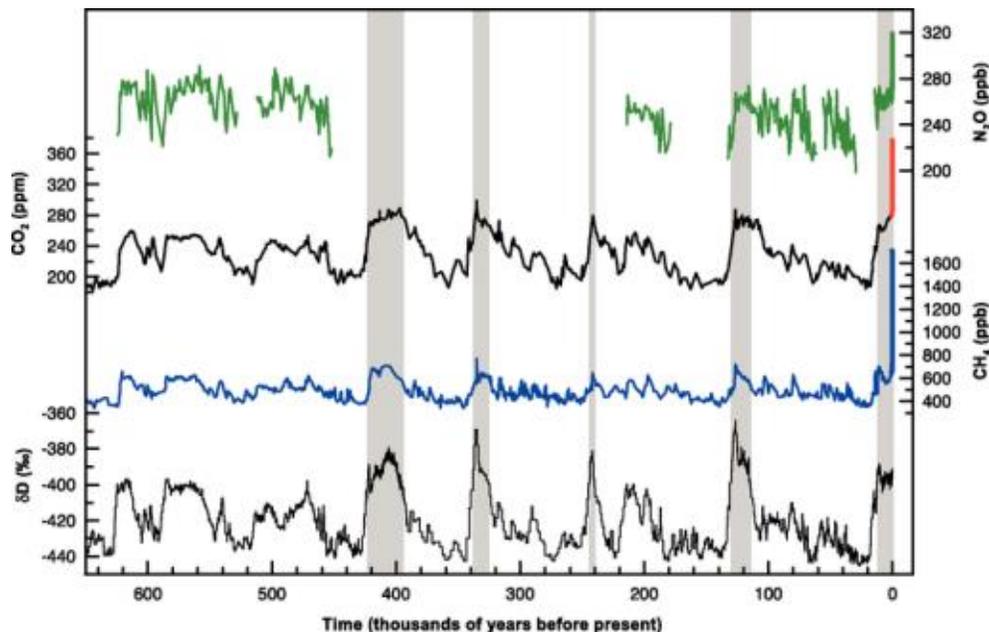


Figura 5 Concentraciones de gases de efecto invernadero obtenidas de núcleos de hielo extraídos en el antártico (IPCC, 2007)

Los científicos del Panel Intergubernamental De Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) declararon que la concentración de estos gases de efecto invernadero en la atmósfera en 1990, era mayor a la concentración medida en cualquier otro punto en el tiempo, medio millón de años atrás (Petit et al., 1999).

El incremento en la concentración de GEI es el factor dominante en el forzante radiativo de la era industrial. Cada uno de los GEI afecta el forzante radiativo dependiendo de su concentración en la composición de la atmósfera y por su capacidad para perturbar el balance energético del sistema tierra-atmósfera.

El forzante radiativo es una medida de la influencia que tiene un cierto factor en la alteración del balance en entrada y salida de radiación del sol al sistema tierra-atmósfera (IPCC 2007)

El forzante radiativo (dado por la concentración de GEI) depende de factores de orden socioeconómico, que no siguen reglas físicas sino decisiones humanas, y por ello se habla de escenarios o proyecciones y no de pronósticos (Magaña 2010). Estas proyecciones consideran al forzante radiativo como un factor determinante.

2.1 Escenarios de emisiones

Un escenario es una “descripción de un estado futuro del mundo, coherente, internamente consistente y plausible” (Parry & Carter, 1998).

El principal propósito de los escenarios es el tener una serie de caminos que podría tomar la sociedad e intentar predecir cómo se afectaría a la atmósfera en cada uno de estos. El IPCC en su Informe Especial Sobre los Escenarios de Emisiones (SRES por sus siglas en inglés) (IPCC, 2000) generó una serie de escenarios, basados en distintas condiciones de desarrollo socioeconómico a nivel mundial, denominadas SRES-A1, SRES-A2, SRES-B1 y SRES-B2, constituyendo las cuatro familias de escenarios de cambio climático:

La familia SRES-A1 describe un crecimiento económico muy rápido, y una población mundial que alcanza su máximo a mediados del presente siglo decreciendo después, también considera una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Esta familia se integra por tres grupos, dependiendo de las tecnologías y sistemas de energía por los que se opte. El A1F considera un uso intensivo de combustibles fósiles, el A1T fuentes de energía no fósiles y el A1B un balance entre fuentes de energía.

La familia de escenarios SRES-A2 presenta un continuo aumento de la población en un mundo heterogéneo, con cambios tecnológicos más lentos que en otros casos y un desarrollo económico orientado de manera regional.

La familia de escenarios SRES-B1 presenta un mundo convergente más homogéneo, con una población que alcanza su máximo a mediados del siglo y comienza a decrecer, al igual que la historia A1. Esta incluye una introducción de tecnologías limpias y usos eficientes de energía, una economía de servicios y de la información, una economía de soluciones globales. Considera una sustentabilidad ambiental y social.

La familia de escenarios SRES-B2, considera soluciones económicas locales, al contrario que las familias del B1, pero también presenta sustentabilidad social y ambiental, este mundo tiene un crecimiento constante en la población pero a una tasa menor que el mundo del caso A2. Desarrollo económico intermedio. Está orientada hacia una equidad social y protección ambiental, enfocada a un nivel local y regional.

Para cada una de las situaciones que presentan estos escenarios corresponde una concentración de emisiones de GEI, y con ello un forzante radiativo, la concentración de GEI atmosférica para los escenarios SRES se presenta en la siguiente tabla (IPCC 2007b).

Familia		A1			A2	B1	B2
Escenario	1990	A1F1	A1B	A1T	A2	B1	B2
Dióxido de carbono, combustibles de origen fósil (GtC/año)							
	6						
2020		11.2	12.1	10	11	10	9

Familia		A1	A2	B1	B2		
Escenario	1990	A1F1	A1B	A1T	A2	B1	B2
2050		23.1	16	12.3	16.5	11.7	11.2
2010		30.3	13.1	4.3	28.9	5.2	13.8
Dióxido de carbono, uso de la tierra (GtC/año)							
	1.1						
2020		1.5	0.5	0.3	1.2	0.6	0
2050		0.8	0.4	0	0.9	-0.4	-0.2
2010		-2.1	0.4	0	0.2	-1	-0.5
Dióxido de azufre (MtS/año)							
	70.9						
2020		87	100	60	100	75	61
2050		81	64	40	105	69	56
2010		40	28	20	60	25	48
Metano (MtCH ₄ /año)							
	310						
2020		416	421	415	424	377	384
2050		630	452	500	598	359	505
2010		735	289	274	889	236	597
Óxido nitroso (MtN/año)							
	6.7						
2020		9.3	7.2	6.1	9.6	8.1	6.1
2050		14.5	7.4	6.1	12	8.3	6.3
2010		16.6	7	5.4	16.5	5.7	6.9
CFC/HFC/HCFC (equivalentes de MtC/año)							
	1672						
2020		337	337	337	292	291	299
2050		566	566	566	312	338	346
2010		614	614	614	753	299	649
PFC (equivalentes de MtC/año)							
	32						
2020		42.7	42.7	42.7	50.9	31.7	54.8
2050		88.7	88.7	88.7	92.2	42.2	106.6
2010		115.3	115.3	115.3	178.4	44.9	121.3
SF ₆ (equivalentes de MtC/año)							
	37.7						
2020		47.8	47.8	47.8	63.5	37.4	54.7
2050		119.2	119.2	119.2	104	67.9	79.2
2010		94.6	94.6	94.6	164.6	42.6	69

Familia		A1	A2	B1	B2		
Escenario	1990	A1F1	A1B	A1T	A2	B1	B2
CO (MtCO/año)							
	879						
2020		1204	1032	1147	1075	751	1022
2050		2159	1214	1770	1428	471	1319
2010		2570	1663	2077	2326	363	2002
COVDM (Mt/año)							
	139						
2020		192	222	190	179	140	180
2050		322	279	241	225	118	217
2010		420	194	128	342	87	170
NO ₂ (MtN/año)							
	30.9						
2020		50	46	46	50	40	43
2050		95	48	61	71	39	55
2010		110	40	28	109	19	61

Tabla 1: Presenta un panorama general de emisiones para el próximo siglo. (IPCC, 2000), muestra los promedios de los intervalos obtenidos de concentraciones para los distintos escenarios descritos para algunos de los gases de efecto invernadero.

El IPCC (2007) realizó proyecciones no solo de la composición de la atmósfera para cada uno de los escenarios, sino también de la temperatura superficial que se espera para cada caso.

	Cambio en la temperatura para 2090-2099, con respecto al periodo de 1980-1999 [°C]	
Escenario	Mejor Estimado	Rango Probable
constante*	0.6	0.3-0.9
B1	1.8	1.1-2.9
A1T	2.4	1.4-3.8
B2	2.4	1.4-3.9
A1B	2.8	1.7-4.4
A2	3.4	2.0-5.4
A1F1	4	2.4-6.4

Tabla 2: Proyección estimada del aumento en la temperatura global de superficie para finales de siglo, Estos estimados se hicieron con diversos modelos como los EMC's y los AOGCM's. (IPCC, 2007), "constante" quiere decir que se mantiene constante la concentración actual durante todo el siglo.

Para generar escenarios de cambio climático es necesario utilizar escenarios de emisiones de GEI, normalmente se utilizan los escenarios descritos en el Reporte especial de escenarios de emisiones (SRES, por sus siglas en inglés), que son los aprobados por el IPCC. A partir de los escenarios de GEI es posible calcular concentraciones globales y con ello el forzante radiativo

correspondiente, lo que lleva, a través de la modelación, a obtener proyecciones del incremento de la temperatura global y variaciones futuras de la precipitación. (Conde y Gay, 2008).

2.1.1 Escenarios de cambio climático, modelos y proyecciones

Escenarios

El escenario se define como una representación posible y simplificada de un clima futuro. Basada en un conjunto de relaciones climatológicas que ha sido construida explícitamente para investigar posibles consecuencias del cambio climático antropogénico, y que en muchas ocasiones sirve como materia prima para modelos de impacto (IPCC, 2007).

Modelos

Para realizar estudios, necesariamente tenemos que utilizar simplificaciones que tengan en cuenta sólo las propiedades más importantes y básicas de los sistemas. Estas versiones simplificadas se llaman modelos (Magaña, 2010).

El recurso más avanzado del que se dispone para el estudio del clima es el conjunto de Modelos de Circulación General (GCM por sus siglas en inglés) y de Atmosfera y Océano Acoplados (AOGCM's) (Conde & Gay 2008). La Tabla 3 muestra los 23 de estos modelos en el Cuarto reporte de evaluación del IPCC (2007).

Institución y Modelo de circulación general	Siglas y Resolución de Malla (Global)	País
1. Bjerknes Centre for Climate Research, Bergen Climate Model Version 2 *	BCCR-BCM2.0 128 lons x 124 lats	NORUEGA
2. Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Coupled Global Climate Model 3*	CCCMA-CGCM3 96 lons x 48 lats	CANADA
3. Centre National de Recherches Meteorologiques, Coupled Model 3 *	CNRM-CM3 128 lons x 124 lats	FRANCIA
4. CSIRO Atmospheric Research, Mk3.5	CSIRO-MK3.5 192 lons x 96 lats	AUSTRALIA
5. CSIRO Atmospheric Research, Mk3 *	CSIRO-MK3 192 lons x 96 lats	AUSTRALIA
6. Max Planck Institute for Meteorology ECHAM5 *	MPI_ECHAM5 192 lons x 96 lats	ALEMANIA
7. Meteorological Institute of the University of Bonn, ECHO-G *	MIUB_ECHO_G 96 lons x 48 lats	ALEMANIA KOREA
8. National Oceanic Atmospheric Administration Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, CM2.0 *	GFDL-CM2.0 144 lons x 90 lats	USA
9. National Oceanic Atmospheric Administration Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, CM2.1 *	GFDL-CM2.1 144 lons x 90 lats	USA
10. National Institute of Geophysics and Volcanology, ECHAM 4.6	INGV-ECHAM-SXG 320 lons x 160 lats	ITALIA
11. Institute for Numerical Mathematics, CM3 *	INMCM3.0 72 lons x 45 lats	RUSIA
12. Institut Pierre-Simon Laplace *	IPSL-CM4 96 lons x 72 lats	FRANCIA
13. Model for Interdisciplinary Research on Climate Medium Resolution *	MIROC3_2_MEDRES 128 lons x 64 lats	JAPON
14. Meteorological Research Institute, Coupled Global Climate Model 3 *	MRI_CGCM2_3_2A 128 lons x 64 lats	JAPON
15. National Center for Atmospheric Research Community Climate System Model *	NCAR_CCSM3_0 256 lons x 128 lats	USA
16. National Center for Atmospheric Research Parallel Climate Model *	NCAR_PCM1 128 lons x 64 lats	USA
17. Hadley Centre for Climate Prediction, Met Office *	UKMO_HADCM3 96 lons x 73 lats	REINO UNIDO

Institución y Modelo de circulación general	Siglas y Resolución de Malla (Global)	País
18. Hadley Centre Global Environmental Model Met Office *	UKMO_HADGEM1 192 lons x 145 lats	REINO UNIDO
19. Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Coupled Global Climate Model 3 T63	CCCMA-CGCM3 128 lons x 64 lats	CANADA
20. Laboratory Atmospheric Sciences and Geophysical Institute of Atmospheric Physics, FGOALS1.0_g	IAP-FGOALS 128 lons x 64 lats	CHINA,
21. National Aeronautics and Space Administration Goddard Institute for Space Studies, Atmosphere-Ocean Model	GISS-AOM 90 lons x 60 lats	USA
22. National Aeronautics and Space Administration Goddard Institute for Space Studies, ModelE20/HYCOM	GISS-EH 72 lons x 46 lats	USA
23. Model for Interdisciplinary Research on Climate High resolution	MIROC3_2_HIRES 320 lons x 160 lats	JAPON

*Tabla 3: Modelos de circulación general, utilizados por el IPCC, e menciona la institución donde se hicieron, el país y sus siglas y resoluciones, *estos modelos fueron los que se utilizaron para el cálculo de anomalías en el método REA (explicado más adelante). (IPCC 2007)*

Los modelos GCM simulan una gran variedad de procesos en un rango muy amplio de escalas espaciales y temporales. Todo modelo tiene que tener una resolución espacial. Existen modelos actualmente con resoluciones de hasta $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$, esto permite que su aplicación sea incluso a nivel regional.

La aplicación de estos modelos para condiciones de cambio climático, da lugar a la construcción de escenarios de cambio climático, para diversas variables y a distintos horizontes. Las variables de análisis por su importancia son temperatura y precipitación. Los horizontes normalmente se proyectan a 100 años es decir aproximadamente al 2100.

Downscaling en los modelos o regionalización

En muchos casos los modelos AOGCMs son suficientes, pero en muchos casos es necesario aplicar técnicas de regionalización, esto es cuando el clima no solo está caracterizado por factores de gran escala sino también por factores regionales o locales. Existen varios métodos para lograr esto. Como construyendo modelos de circulación general de alta resolución (AGCM's por sus siglas en inglés), los modelos regionales o modelos anidados de región limitada (RCMs por sus siglas en inglés) o los modelos empírico estadísticos o estadísticos dinámicos (Montero & Perez, 2008).

Cualquiera que sea el método de regionalización seleccionado siempre debe considerarse una mayor incertidumbre entre mayor sea la resolución, ya que una reducción de escala siempre introducirá al modelo incertidumbres adicionales al escenario.

El uso de distintos escenarios y distintos modelos para regionalizar, sirve para reflejar el rango de incertidumbre en las predicciones de esos modelos. Dando, en lugar de un resultado con una gran incertidumbre, varias alternativas de cómo podría comportarse el clima.

Los escenarios regionales de cambio climático deben cumplir con estas características (Füssel 2009):

- Consistencia con los escenarios globales

- Plausibilidad
- Información apropiada para la evaluación de impactos
- Representatividad del rango potencial del cambio climático regional
- Actualidad
- Resolución espacial
- Validez
- Representatividad en sus resultados
- Comparabilidad
- Utilidad para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación

Que se ha hecho en México

Para la Primera Comunicación de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (INE, 2000), se generaron escenarios de cambio climático, utilizando las salidas de los modelos GFDLR3.0 y CCC. Se obtuvieron salidas de precipitación y temperatura para las 13 regiones de México. El escenario se generó utilizando series de datos de 92 estaciones meteorológicas para temperatura y 279 para precipitación entre los años de 1951-1980.

En la Tercera Comunicación nacional (INE, 2006), se generaron escenarios utilizando el software MAGICC/SCENGEN 4.1. Consta de dos partes, la primera parte es un modelo simple del clima (MAGICC), este estima incrementos de temperatura global en función de las diferentes emisiones de GEI. La otra parte (SCENGEN), combina el MAGICC con los resultados de los GCM's para desplegar la información en un mapa reticular con resolución de 5° X 5 ° a distintos horizontes de tiempo.

Para la Cuarta Comunicación (INE, 2009) se generaron escenarios utilizando una climatología de muy alta y alta resolución (1°X1° y 10°X10°, respectivamente) para un periodo de 1950 a 2000, esto con el apoyo del grupo UNIATMOS del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM. Para la construcción del escenario se utilizó principalmente la metodología de los grupos de trabajo I y II del IPCC (2007) ya que esta metodología permite realizar evaluaciones de impactos y adaptación. Se utilizaron cuatro escenarios de emisiones (A1B, A2, B1 y B2), para un periodo de 2000 a 2100. También se utilizó el software MAGICC/SCENGEN para presentar los datos (Conde & Gay, 2008).

Para la Quinta Comunicación de México (INECC, 2012) se elaboró la regionalización SEDEPECC que es el Sistema para la Exhibición de Datos del Ensamble Ponderado de Escenarios de Cambio Climático para México. Los datos que este sistema presenta se obtienen de datos de clima que

incorporan distintos escenarios de cambio climático, correspondientes a varias décadas por venir para la región de México, a partir de un conjunto de modelos de circulación general. Para la obtención de cada dato, la información de cada modelo se pondera de acuerdo con criterios de la veracidad de cada modelo en la predicción de datos de clima conocidos y del comportamiento del modelo mismo dentro del método de ponderación. Es decir, este sistema utiliza el método de confiabilidad por promedios en los ensambles, (REA, por sus siglas en inglés, para ensamblar los distintos modelos y utiliza dos distintos escenarios de emisiones, el A1B y el A2, utiliza estos escenarios ya que presentan condiciones de emisiones y desarrollo muy distintas entre sí, presentando de esta manera los resultados más extremos dentro de los escenarios posibles (Montero & Pérez, 2008).

2.2 Impactos del cambio climático

Ecosistemas

Los ecosistemas tenderán a tener pérdidas de especies y cambios en su bioma, los más afectados serán la tundra, bosques fríos, y ecosistemas montañosos, en tierra. En las costas los manglares y pantanos a causa, principalmente, de los cambios en los patrones de precipitación, y en los océanos los arrecifes de coral a causa de cambios en temperaturas y el cambio en la salinidad del agua, afectaran a la fauna marina con exoesqueletos. En ecosistemas hielo-mar la pérdida de superficie causara una gran pérdida de depredadores como osos focas y pingüinos. Se estima que algunos ecosistemas tengan incrementos en su productividad primaria, como las tundras, pero esto estará sujeto a que no sucedan eventos extremos, como incendios, los cuales se presentarán con más frecuencia (IPCC, 2007).

Alimentos, fibras y productos forestales

A altas latitudes un calentamiento genera mejoras en los rendimientos de las siembras, pero en latitudes bajas esto genera considerables reducciones en los rendimientos de productos de temporal, por ejemplo. En general, un leve incremento en la temperatura aumentará la producción de alimento global, pero al superar éste los 3°C la producción disminuirá.

Esto implicará que los rendimientos aumenten a mayores latitudes y disminuyan a menores latitudes, haciendo a los países en desarrollo más dependientes de la importación de alimentos.

Las siembras y los bosques son muy vulnerables a eventos extremos como sequías inundaciones, plagas e incendios. Por lo que aunque no se puede medir se espera una reducción en la productividad a causa de esto (IPCC, 2007).

Sistemas costeros y zonas de baja altitud

Todos los ecosistemas costeros son vulnerables al aumento del nivel del mar y el cambio en la salinidad afectará a manglares, marismas y arrecifes principalmente.

Los asentamientos humanos, a menos que tengan una buena capacidad de adaptación, sufrirán de inundaciones, más de 100 millones de personas podrían sufrir inundaciones marinas para el año 2080. (IPCC, 2007)

Asentamientos y sociedad

Grandes urbes en países de ingresos medios o bajos son sitios de alto riesgo para el cambio climático, así como aquellas zonas que dependan de recursos sensibles al clima, como las siembras de temporal.

Los costos provocados por eventos extremos afectaran la economía de zonas donde se hagan más frecuentes de lo normal. Por lo que la intervención de los gobiernos será fundamental. Tanto como apoyo como para la creación de infraestructura para reducir el riesgo, como buenos sistemas de suministro de agua por ejemplo. (IPCC, 2007)

Salud

En algunas zonas la disminución en la producción de alimentos generará desnutrición, esto se verá más agudizado en zonas ya con problemas de alimentación, como algunas regiones de África y Asia.

Se podrá presentar población en riesgo de padecer enfermedades a causa de inundaciones en zonas bajas o cercanas a cuerpos de agua, lo que acarreará todo tipo de enfermedades por falta de salubridad.

En zonas muy calientes el riesgo de morir por deshidratación aumentará, así como por enfermedades que se propagan mejor con el calor, como enfermedades gastrointestinales, o la malaria o el dengue.

En el hemisferio norte incrementaran enfermedades pulmonares a causa de la contaminación del aire y otras enfermedades causadas por el incremento en las concentraciones atmosféricas de ozono. (IPCC, 2007)

Impactos en el sector hídrico

El impacto en el sector hídrico no solo depende de la cantidad, sino también de la calidad y la posibilidad de llevar el líquido a los sectores requeridos (SEMARNAT, 2012).

El IPCC indica que la reducción de la criósfera reducirá considerablemente la disponibilidad de agua en zonas que dependan de esta fuente, de igual manera el incremento del nivel del mar ocasionara la salinización de los acuíferos.

Las variaciones en la precipitación también ocasionaran problemas de disponibilidad. El hecho de que exista un incremento en la precipitación en una región, no implica un aumento en la disponibilidad, ya que las recargas de acuíferos también se verán muy disminuidas.

Zonas áridas y semiáridas son muy vulnerables ya que se espera una reducción de agua superficial (IPCC, 2007).

Uno de los principales impactos en el sector hídrico serán las sequías, Éstas se refieren a un periodo de tiempo con un clima anormalmente seco capaz de producir un fuerte desequilibrio hídrico (IPCC, 2012). La sequía afecta la temperatura de una región, y aun cuando puede ser un

factor detonante en la ocurrencia de incendios, uno de los principales efectos de esta escases de agua se reflejará en la humedad del suelo, lo cual afecta directamente a la agricultura y sus rendimientos, el balance de los ecosistemas y disponibilidad de agua principalmente, haciendo a la sociedad muy vulnerable a este fenómeno (IPCC, 2012).

Algunos factores que generan vulnerabilidad ante la sequía son:

- Los sesgos de la distribución espacial y temporal de la lluvia
- Los sesgos en los asentamientos humanos, centros de cultivo y puntos con gran actividad industrial.
- Uso ineficiente de recursos hídricos y contaminación de los mismos
- Cambios en uso de suelo
- Sobreexplotación del recurso en zonas de alto requerimiento.

(INECC, 2012)

Estudios posteriores al AR4 del IPCC, presentan una alta incertidumbre con respecto a las tendencias, en una escala global, de las sequías. Las tendencias regionales en América del Norte indican que la zona oeste de Canadá Alaska y México se inclinan hacia un periodo más seco en los años que vienen. En Europa las tendencias son a aumentar la sequía en el sur y oriente, y un aumento de la humedad en el resto del continente.

Existe una baja confianza en los resultados de las tendencias de sequía en el sur de América y África, dada la falta de información o inconsistencias en los resultados de los estudios.

Estas tendencias, no pueden ser de un alto nivel de confianza, debido a falta de patrones que demuestren una tendencia clara, a la incapacidad de los modelos para reproducirlas todos los fenómenos, así como la falta de información requerida en ciertas regiones. (IPCC 2012)

Otro factor que genera un gran impacto en el sector hídrico son las inundaciones, una inundación consiste en el desbordamiento del cauce o confín natural de un cuerpo de agua y el sumergimiento de un área que normalmente no lo está. Estos se pueden ocasionar normalmente por una precipitación muy intensa o de larga duración o un excesivo derretimiento de un cuerpo de hielo entre muchos otros factores, entre ellos desastres ocasionados por el ser humano, como el desborde de una presa o dique.

Son tantos los factores que detonan las inundaciones que no se ha podido encontrar un patrón ni algún factor que detone un incremento en las inundaciones en las últimas décadas, al igual que en el caso de las sequías, pero el IPCC en su Cuarto Reporte de Evaluación (AR4) (2007) ha indicado que futuros cambios en el clima podrían empezar a detectarse tendencias de incremento en las inundaciones (IPCC, 2012).

La evidencia que se tiene, que relaciona al cambio climático con tendencia en la ocurrencia, frecuencia y magnitud de las inundaciones es de muy baja confianza debido a una serie de factores que incluyen falta de información y la intervención de otros factores ajenos al cambio climático. Aunque a futuro se tiene una mediana confianza de que incrementos regionales en la precipitación o el derretimiento temprano de cuerpos de hielo ocasionen inundaciones en ciertas regiones específicas. (IPCC, 2012)

Como se puede observar, es complicado predecir impactos precisos en el sector hídrico ya que en muchos estudios intervienen varios factores que causan efectos en los sistemas hídricos. Estos factores pueden ser desde cambios en temperatura y precipitación hasta cambios en el uso de suelo, el cual no está relacionado con el cambio climático (IPCC, 2008), también pueden encontrarse algunos cambios en precipitación a causa de la variabilidad de baja frecuencia natural del clima (SEMARNAT, 2012).

Muchos estudios de impactos en el sector hídrico, especialmente a nivel regional, no han encontrado tendencias lo cual complica aún más evaluar impactos.

Por ejemplo en el caso de los niveles de los lagos, mientras que en algunas partes han incrementado por el incremento del derretimiento del hielo superficial, en otros lugares a causa de sequía o actividad humana este ha disminuido. No siempre existen tendencias para el sector hídrico más bien se deben hacer análisis regionales (IPCC, 2008).

En el caso de calidad de agua, en general el incremento en la temperatura, las variaciones en precipitación (lluvias muy intensas que provoquen grandes flujos de agua o inundaciones, o falta de lluvia que reduzca los caudales) generaran distintos tipos de contaminación del agua de gran impacto para el ser humano. Incluyen sólidos suspendidos, carbón orgánico disuelto, salinización y algunos patógenos.

El IPCC (2008) en su publicación de cambio climático enfocada al sector hídrico, tiene un breve capítulo sobre calidad del agua en el que explica algunos fenómenos ocasionados por el incremento de la temperatura, explica como esta altera los ecosistemas acuáticos contaminando el agua dulce.

Al igual que en el caso de cantidad de agua superficial, no se pueden detectar patrones o tendencias que prueben la disminución de la calidad del agua a causa del calentamiento global ya que la actividad humana ya es un factor predominante en lo que se refiere a este tema (IPCC, 2008).

Es difícil realizar una cuantificación de la disminución de la calidad del agua a causa del cambio climático debido a las similitudes en los efectos hidrológicos y de temperatura a causa del cambio climático y a causa de otros factores humanos como el cambio de uso de suelo, esto hace que encontrar indicadores exclusivos para cambio climático sea muy complejo (Hammilton et al, 2010). En general, hablar sobre cantidad de agua siempre es más fácil sea o no referente a cambio climático, se requieren datos más detallados y la calidad de agua en una región tiene una

distribución espacial más heterogénea, mientras que la disponibilidad es un dato concreto (Voß et al., 2012).

Voß et al., (2012) realizaron un análisis de calidad de agua a escala continental, para simular los sólidos suspendidos y la DBO₅ (demanda bioquímica de oxígeno), para evaluar la calidad en ríos, utilizando el modelo WorldQual, a este modelo aplican diversos escenarios en los que consideran al cambio climático en conjunto con los demás factores dominantes en la afectación de la calidad de agua, principalmente la agricultura. Los resultados de este estudio demuestran que el cambio climático afecta de manera poco significativa a la calidad del agua en comparación con otros factores como el uso de agua para agricultura o industria.

Wu et al (2012) realizan una evaluación de la calidad de agua en el río Songhuajiang en China, utilizando el método Mann-Kendall y consideran diversos factores para su evaluación, entre ellos factores de cambio climático, de igual manera concluyen que la actividad humana es un factor determinante en la disminución de calidad del agua mientras que el cambio en temperatura y precipitación es un factor de muy poca influencia.

Rehana & Mujumdar (2012) realizaron un estudio en el río Tumga-Bhadra en la India, para este estudio utilizaron GCM's para cuantificar riesgos futuros, realizaron una regionalización, y mediante un modelo para cuantificar calidad de agua, QUAL2K, realizaron el estudio. El parámetro utilizado para medir la calidad del agua en este caso es el Oxígeno Disuelto (OD). Este estudio no consideró ningún otro factor ajeno al cambio climático utilizando el escenario A1B, en estos escenarios futuros evaluados hasta el 2100, encontró una disminución del OD para el año 2100 principalmente a causa del incremento en temperatura, causante de una disminución de la capacidad de solución de O₂ en el agua.

El hecho de que el cambio climático no sea el detonante principal de la reducción de la calidad del agua no quiere decir que no se deba considerar en los análisis y estudios. Los cambios en temperatura, radiación solar, precipitación y velocidad del viento todos afectan directamente a los cuerpos de agua, y mientras más aumenten los efectos del cambio climático en la atmósfera más relevante será este tema en términos de calidad del agua (Rehana & Mujumdar, 2012).

Kundzewics & Kryzanova (2010), realizan un estudio multifactorial para la Unión Europea donde consideran al cambio climático, en particular al incremento en la temperatura de la atmósfera como uno de los factores que alteran la calidad de los cuerpos de agua. Indican en su estudio que un aumento de la temperatura ocasiona un incremento en las reacciones químicas y en el ciclo de asimilación de nutrientes, disminuyendo la capacidad de disolución de oxígeno.

En general todos los estudios de calidad de agua revisados presentan las conclusiones previamente analizadas, el incremento en la temperatura, variaciones en la precipitación, y eventos extremos alteran los parámetros utilizados para medir calidad de agua. Una manera más completa de realizar estudios de calidad del agua sería agregando al estudio un análisis de otros factores como los cambios en el uso de suelo y la contaminación de agua con fines agrícolas (Voß et al., 2012).

2.2.1 Impactos del cambio climático en México en el sector hídrico

En México la disponibilidad de agua al 2010 fue de 4200 m³/hab/año, se estima que para el 2030 sea de 3800 m³/hab/año. Esta disponibilidad no es homogénea, algunas regiones del país no utilizan toda su agua disponible mientras que otras importan agua de otras regiones. En unas cuantas décadas, cerca del 55% del territorio nacional tendrá niveles muy altos de requerimiento, presentando fuertes problemas agrícolas y sociales. (CONAGUA, 2011)

Se ha observado que en atmósferas más calientes, como la de Ciudad de México, el número de tormentas intensas ha aumentado al menos en un orden de magnitud; otro caso observado ha sido en regiones áridas o semiáridas donde también se están presentando mayor número de tormentas intensas, pero la amenaza serán las sequías que podrían volverse más comunes (Landa et al., 2008).

La sequía generará grandes impactos en especial en el norte del país en el sector agrícola de temporal y ganadero. Normalmente cuando en el centro-norte del país se presentan sequías, estas vienen acompañadas con eventos de intensa precipitación en el sur y viceversa, es por ello que mientras que en el norte del país se está presentando una sequía también escuchamos hablar de inundaciones en Tabasco o Chiapas (Méndez & Magaña, 2010).

Los grandes asentamientos urbanos también son muy vulnerables a la escases de agua, si la precipitación que alimenta sus fuentes de abastecimiento no es suficiente se produce una sequía que afecta a la población, ciudades que se ven afectadas por esto son la ciudad de México, Monterrey, Tuxtla Gutiérrez entre otras (INECC, 2012).

En contraste, el incremento de eventos extremos de precipitación afecta aproximadamente al 21% de la población que es susceptible a inundaciones, en especial en la zona centro-sur del país, en los estados de Veracruz y Tamaulipas cuando entran ciclones tropicales del Golfo, y Chiapas es un estado muy vulnerable a inundaciones. La ciudad de México también recibe mención especial por ser vulnerable a fuertes precipitaciones (INECC, 2012).

Los eventos climáticos relacionados con afectaciones a la salud de la población mexicana están también relacionados con temperaturas y condiciones de humedad extremas, que llevan a condiciones para la aparición de brotes de enfermedades transmitidas por vectores. Entre 2000 – 2008, se encontró que la mayor incidencia de enfermedades transmitidas por agua, alimentos y golpes de calor entre los menores de cinco años fueron las infecciosas del aparato gastrointestinal (cólera, fiebre tifoidea, infecciones intestinales por otros organismos, y por, intoxicación alimentaria bacteriana, paratifoidea y otras salmonelosis, y shigelosis) (Hernández et al., 2011).

Los escenarios futuros no son nada alentadores, por lo que países de América Latina y en especial México están impulsando nuevos estudios de cambio climático para evaluar los posibles impactos y desarrollar estrategias de adaptación al cambio climático.

Ante el cambio climático uno de los mayores desafíos para el país será garantizar el abasto de agua, no sólo para las necesidades humanas, sino también para los agro-ecosistemas. Por un lado,

los aumentos de temperatura podrían provocar sequía hidrológica y, por otro, más eventos extremos como lluvias intensas disminuirían la calidad del vital líquido y con frecuencia, ocasionarían problemas en la infraestructura hidráulica. Las acciones de adaptación podrían cambiar este escenario al usarse la información climática para la reducción de los impactos; sin embargo, no existe experiencia en cómo usarla en la gestión del agua, pues en México pocas veces se toma en cuenta el pronóstico estacional del clima.

Los manejos de presas, la distribución del agua en la agricultura, o los programas urbanos de cultura del agua parecen seguir una rutina que depende solamente, y en el mejor de los casos, de cuánta agua hay disponible cada año (SEMARNAT, 2012).

Para poder tomar las decisiones correctas en cuanto a medidas de adaptación, se requiere hacer estudios de vulnerabilidad.

2.3 Vulnerabilidad

De manera general, la vulnerabilidad es la capacidad de un sistema a ser dañado (IPCC 2007). Actualmente, el término vulnerabilidad es utilizado en muchas disciplinas y áreas de estudio y por lo tanto tiene una gran variedad de definiciones, por lo que es necesario utilizar una definición que vaya con el contexto de esta investigación.

Vulnerabilidad al cambio climático

EL IPCC dice que la vulnerabilidad es:

El grado en el que un sistema es susceptible, e incapaz de resistir, los efectos adversos ocasionados por el cambio climático, incluyendo variaciones extremas en el clima. La vulnerabilidad es función de la magnitud y de la velocidad con la que cambia el clima, y de la variación a la que un sistema es expuesto, su sensibilidad y su capacidad de adaptación (Parry et al., 2008).

Cutter (1996) separa las definiciones de vulnerabilidad en 3 grandes ramos, la primera como la exposición a los peligros, la segunda como una capacidad de respuesta de una sociedad, y la tercera como una característica de cierto lugar (por ejemplo la vulnerabilidad de las costas a un incremento del nivel del mar es elevada). Basándose en esto propone una definición que dice que la vulnerabilidad es la probabilidad que tiene un individuo o un grupo social de ser expuesto a y ser afectado de forma negativa por un peligro. Es la interacción de los peligros del lugar, con el perfil social de las comunidades.

Los múltiples significados de vulnerabilidad pueden ser atribuidos, en parte, a que es un área relativamente nueva en el campo de la investigación de cambio climático. (Brenkert et al., 2005).

La vulnerabilidad es parte fundamental para analizar el riesgo pues es ésta la que indica donde afectara el impacto, que es la causa del problema en un sector. Esta debe reducirse a partir de la participación de actores clave con conocimiento de dónde, en qué y cómo actuar. Así, la identificación de las causas de la vulnerabilidad, y en caso necesario, de su identificación en el

espacio, es fundamental para realizar la gestión de riesgo necesaria frente al cambio climático (Magaña, 2012).

La estrategia para reducir el riesgo ante el cambio climático a niveles aceptables es la adaptación (Magaña, 2012).

La adaptación busca desarrollar estrategias para reducir la vulnerabilidad al cambio climático, de tal forma que los impactos negativos esperados bajo cambio climático sean menores o queden eliminados, y se pueda, incluso, aprovechar la oportunidad asociada a un nuevo clima (Magaña, 2010).

Existen diversos factores que modifican la vulnerabilidad de una región, por ejemplo, O'Brien & Mileti (1992) dicen que la estructura y la salud de una población son un factor fundamental en la vulnerabilidad de una región, menciona que la edad de la población es importante ya que las personas de poca o gran edad son mucho más vulnerables a eventos climatológicos. Handmer et al (1999) dicen que la estabilidad institucional y una sólida infraestructura pública en una región es sumamente importante para soportar eventos climáticos, una sociedad con un alto conocimiento de los eventos climáticos y una mala infraestructura, seguro transformara el riesgo al que está expuesto en un impacto en su sociedad (Padmaja & Banerjee, 2009).

Vulnerabilidad y resiliencia

El término resiliencia se refiere a la capacidad de un sistema de volver a su estado original. En el caso de sistemas sociales o ecosistemas se refiere también a la posibilidad de adaptarse a un cambio al alcanzar un estado nuevo. Por lo que en nuestro caso la resiliencia se refiere tanto a la recuperación como a la adaptación mediante un cambio. (IPCC, 2008)

La principal diferencia reside en que la resiliencia es un término positivo, por lo que valores altos estimados representan algo bueno, mientras que la vulnerabilidad es un término negativo. Y que el término resiliencia no incluye el cambio climático en su definición, solo se refiere a la capacidad de adaptación, de los sistemas humanos y ecológicos, mientras que nuestra definición de vulnerabilidad sí (Ibarrarán, 2010).

2.3.1 Estudios de vulnerabilidad

Las evaluaciones de vulnerabilidad (y resiliencia) se enfocan en sistemas sociales o en los individuos y su bienestar (Brenkert et al. 2005).

Ribbot (1996) dice que los estudios de vulnerabilidad son estudios de impacto cuyo objetivo principal es remarcar quien es susceptible, que tan susceptible, y porque lo es. Menciona que "con un entendimiento de causa, se pueden desarrollar políticas de respuesta adecuadas para reparar las causas de la vulnerabilidad, en vez de solo responder a los síntomas."

Para hacer evaluaciones de vulnerabilidad, los analistas deben encontrar cierta relación entre la información del medio ambiente y de la sociedad. Para lograr esto existen varias posibilidades.

Los estudios de vulnerabilidad son muy similares a los estudios de impactos climáticos. Inicialmente los análisis de vulnerabilidad eran una extensión de los análisis de impacto climático que incluían evaluación de impactos en bienes y servicios (Füssel, 2009).

Los casos de estudio pueden ser el método para integrar información que describa lugares específicos con sus características geográficas y sistemas sociales como la agricultura.

Los indicadores e índices pueden ser utilizados para integrar información del medio ambiente y de la sociedad de forma cuantitativa como lo hacen Moss et al (2001).

Vulnerabilidad en el sector hídrico

El análisis y evaluación de la vulnerabilidad de México ante el cambio climático en el sector hídrico, es relevante debido a su ubicación geográfica, ya que 40% del territorio nacional es árido o semiárido y en consecuencia, presenta bajos niveles de precipitación. Para el periodo 1971-2000, la precipitación normal del país fue de 760 mm y en la mayor parte del país ocurre predominantemente entre junio y septiembre; excepto en la península de Baja California, donde se presenta principalmente en invierno con una precipitación normal mensual menor a 23 mm para el mismo periodo (CONAGUA, 2011).

Qué se ha hecho

Desde la publicación del cuarto reporte de evaluación del IPCC en el 2007 el enfoque de los estudios ha cambiado, pasó de responder a la pregunta “¿El cambio climático es real?” a “¿Qué tan severos serán los cambios?” y “¿Cómo hará la sociedad para construir una capacidad de adaptación?”. Lo importante de este cambio de enfoque es que ahora se han hecho grandes avances en la investigación de la vulnerabilidad enfocada a lugares más específicos, a potenciales desastres naturales, sus efectos y posibles respuestas y se ha trabajado en la creación de estrategias de respuesta ante estos cambios.

Estos estudios se centran más en el análisis del bienestar humano que en la física o química del clima. Por lo que abren la posibilidad de tomar decisiones que van más allá de recomendaciones sobre la viabilidad técnica de ciertas políticas, sino que pueden considerar también el desarrollo social, en un contexto económico político y cultural. (Ibarraran et al., 2010)

Al tratarse de un tema en el que no hay una sola forma de abordarlo se abre la posibilidad de buscar nuevos caminos para diagnosticar la vulnerabilidad, a partir de las experiencias de trabajo con la vulnerabilidad al clima presente. Esto no significa que se puedan trabajar con cualquier esquema, pues tenemos que asegurarnos de que capta verdaderamente la esencia de la vulnerabilidad. Únicamente se puede hablar de vulnerabilidad de un sistema en específico ante un riesgo específico o conjunto de riesgos (Magaña, 2012).

Uno de los primeros estudios de vulnerabilidad es el de Moss et al, (2001). Ellos desarrollan un modelo para evaluar la vulnerabilidad y la resiliencia ante el cambio climático con las condiciones presentes y con tres escenarios distintos (A1V2, B2h, A2A1). El estudio lo realizaron para 38 países, entre ellos México. En la siguiente sección se abordan las diferentes metodologías en este tipo de estudios. Este estudio utiliza indicadores para medir la vulnerabilidad o resiliencia de una región delimitada.

En México

En México, se considera que los estudios sobre vulnerabilidad al cambio climático son recientes;

Se ubican diferentes estudios que se han realizado para México en el contexto del cambio climático; entre ellos se encuentran los que se enfocan a evaluar la vulnerabilidad social (Aguilar, 2000; Ibararán et al., 2010), el estudio de zonas costeras con mayor vulnerabilidad a la elevación del nivel del mar (Ortiz & Méndez, 1999); el impacto de la sequía (Prieto et al., 2007); la vulnerabilidad a inundaciones (Cotler, 2010) o la vulnerabilidad en cuencas hidrológicas (Mendoza et al., 1997), así como la vulnerabilidad hídrica evaluada para sistemas de riego, escurrimiento superficial e impacto en la calidad del agua superficial para algunas cuencas del país (Martínez y Patiño, 2010)

En México, la vulnerabilidad de la población a eventos extremos del clima es grande. Dado que una vasta parte del territorio es semiárido, los cambios en la temporada de lluvia resaltan en amenaza de sequía, y con frecuencia en desastres para sectores dependientes del agua (Magaña et al., 2004). Según Magaña (2004) el elemento climático de mayor importancia en nuestras actividades socioeconómicas es la lluvia, fluctuaciones en la lluvia llevan generalmente a sequías o inundaciones, que lleva a desastres naturales que presentan muy altos costos.

Ibararán (2010) realizó un estudio de resiliencia ante cambio climático y variabilidad climática para los estados de México, utilizando el método VRIM (metodología que se comenta en la siguiente sección). En sus resultados concluye que la localización geográfica no es un factor delimitante de la resiliencia, más bien la resiliencia es muy baja en lugares de bajo desarrollo y donde no se atienden a tiempo los problemas ambientales.

Se han hecho estudios de vulnerabilidad social, como el de Martínez & Patiño (2010), donde habla de los niveles de vulnerabilidad al cambio climático que presentan los municipios de México. Dicen que la vulnerabilidad social tiene que ver explícitamente con los factores demográficos y socioeconómicos que incrementan o atenúan los impactos de los eventos de riesgo en las poblaciones locales. Para realizar este estudio utilizaron una selección de 15 indicadores agrupados en 5 grandes grupos: empleo e ingreso, educación, salud, vivienda y población, como lo propone el CENAPRED (Centro Nacional para la Prevención de desastres).

Sus resultados los presentan por municipio utilizando 5 grados de vulnerabilidad, Muy Baja, Baja, Moderada, Alta y Muy Alta, dejando muy claro que la vulnerabilidad social y la vulnerabilidad atribuida a factores físicos y ambientales son distintas aunque estén relacionadas.

Se realizó una evaluación del impacto del cambio climático en los escurrimientos superficiales en tres cuencas nacionales: al norte de México en la cuenca del río Conchos, al centro en la cuenca Lerma-Chapala y al sur en la cuenca del río Grijalva, utilizando los escenarios de emisiones A1B y A2. Esta evaluación la hacen a través de la estimación del escurrimiento superficial considerando la variación en la precipitación futura a causa del cambio climático (Martínez & Patiño, 2010).

En su trabajo también incluyen una evaluación de impactos sobre la calidad de agua utilizando los parámetros de DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días) y DQO (Demanda Química de

Oxígeno), para este estudio solo utilizó como factores el incremento en la temperatura y el crecimiento poblacional, aunque como ya sabemos existen más factores que afectan la calidad del agua, la falta de datos impidió un estudio más profundo.

Sus resultados finales los presentan a manera de mapas mostrando la vulnerabilidad para las cuencas mencionadas. Este es uno de los primeros trabajos que analizan la vulnerabilidad nacional en el sector hídrico y como tal es una buena base para futuros estudios.

Estos mismos autores (Martinez & Patiño, 2012) realizan un estudio sobre los efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua de México, donde dicen que los efectos del cambio climático variarán dependiendo de la latitud, altitud y orografía de una región, mencionan también que la disponibilidad ya está variando mucho a causa de factores sociales como el crecimiento de la población y una falta de cultura del cuidado del agua. También hablan de la importancia de una prevención de desastres a causa de eventos extremos, ya que esto incrementa considerablemente la vulnerabilidad en diversas cuencas como las del sistema Grijalva-Usumacinta en Chiapas y Tabasco, o el Papaloapan en la planicie costera de Veracruz. Con este estudio ellos proponen priorizar medidas de adaptación en las cuencas más vulnerables del país.

Un trabajo de Carbajal (2010) realiza una estimación de la vulnerabilidad ante el incremento del nivel medio del mar en el golfo del país, en este realiza un análisis de la pérdida territorial de los diversos estados involucrados, y cuantifica las poblaciones que se verán afectadas ante un escenario en el que el nivel del mar incrementa 1 m.

Botello et al, (2010) también realiza un trabajo de análisis de vulnerabilidad con respecto al incremento del nivel del mar.

Los autores Domínguez y Jiménez (2010) realizan un trabajo con un enfoque social, donde explican la inequidad al acceso de los servicios de saneamiento y abastecimiento de agua. Explica las repercusiones de esto en términos de salud y pobreza. Concluyen que hay una enorme falta de planeación y que una gran parte de la infraestructura ya es obsoleta, ya sea por su edad o a causa de falta de planeación.

Hernández (2011) discute los factores que influyen en la vulnerabilidad socio-demográfica frente a eventos hidrometeorológicos y la evalúa con un índice. Sus resultados indican que los factores más relevantes para la vulnerabilidad son: las características materiales de la vivienda, la posesión de aparatos receptores de información, la dependencia demográfica, el analfabetismo, la condición étnica y la ruralidad, seguidos por factores socioeconómicos e individuales que limitan la capacidad para llevar a cabo medidas preventivas o de adaptación al riesgo.

2.4 Metodologías aplicadas

Existen muchos otros factores que influyen en la vulnerabilidad de una región, algunos son biofísicos y otros sociales. Los estudios de vulnerabilidad toman en cuenta todos estos factores y generan un índice de vulnerabilidad, utilizan diversos métodos y consideraciones para generarlos. Por ejemplo, Chris Easter (2000) construyó su índice de vulnerabilidad basado en dos principios. Primero los impactos externos a los que está sujeta una región, y segundo la capacidad que tiene esta región para soportar y recuperarse de estos.

Moss et al. (2001) evaluó la vulnerabilidad y resiliencia en 38 países. Identificó en total 17 variables proxies o sustitutivas. Estas variables se agrupan en las que reflejan la sensibilidad en cada país a través de las cuales evaluaron el nivel de vulnerabilidad, y en las que indican la capacidad de dar respuesta para estimar el nivel de resiliencia. De las 17 variables, diez variables proxies describen 5 sectores de vulnerabilidad climática, que son: sensibilidad de los asentamientos humanos (población), de la seguridad alimenticia, de los ecosistemas, sensibilidad en la salud humana, y en la disponibilidad de agua. Las 7 proxies restantes describen 3 sectores que reflejan la capacidad de respuesta, estos sectores: son capacidad económica, recursos humanos y capacidad ambiental. Con estos indicadores finalmente construye su índice de vulnerabilidad y resiliencia con el método VRIP (Vulnerability-Resilience Indicator prototype) que se explica más adelante.

Katharine Vincent (2004) utiliza 5 sub-índices compuestos, que son: bienestar y estabilidad, estructura demográfica, estabilidad institucional e infraestructura pública, interconectividad global y dependencia de sus recursos nacionales, para medir la vulnerabilidad social en África; ella da distintos pesos a cada uno de estos subíndices y obtiene un índice de vulnerabilidad.

El IPCC recomienda para la evaluación de la vulnerabilidad el uso de tres componentes, (Mc Carthy et al. 2001):

- Exposición: el peligro directo de una región u las variaciones en el clima por las que se verá afectada.
- Sensibilidad: describe las condiciones humanas y ambientales que podrían aumentar o disminuir el peligro, o que ocasionarían un fuerte impacto en una región.
- Capacidad de Adaptación: representa el potencial de una región para evitar un posible impacto, también representa la capacidad para implementar medidas de adaptación.

La vulnerabilidad se evalúa en función de la magnitud del posible impacto (*I*) menos capacidad de adaptación (*AC*). Lo que lleva a:

$$V = f(I - AC) \dots Ec. 1$$

Estudio de vulnerabilidad por medio de índices

Normalmente los estudios cuantitativos de vulnerabilidad utilizan un “índice de vulnerabilidad”. Un índice es un valor calculado de una serie de variables previamente seleccionadas que nos sirven para comparar las distintas regiones a evaluar, entre ellas o con algún valor de referencia. Este consiste en una serie de indicadores agrupados que representan la vulnerabilidad de una región. La ventaja de este único número es que permite comparar distintas regiones. Este índice varía entre 0 y 1.

Procedimiento para la construcción de un índice de vulnerabilidad

Consiste en varios pasos:

1. Identificar indicadores

2. Normalizar los valores de los indicadores
3. Asignar pesos a los indicadores normalizados
4. Estimar el índice de vulnerabilidad
5. Asignar el nivel de vulnerabilidad

Bases de datos de la información

La información obtenida para el periodo que se evaluará la vulnerabilidad, se acomoda en una matriz rectangular en la que las filas representan regiones y las columnas representan indicadores. Supongamos que hay M regiones y K indicadores. Entonces la tabla tendrá M filas y K columnas. Por lo tanto el elemento X_{ij} de la tabla es el valor del indicador j en la región i.

Región\Indicador	1	2	-	J	-	K
1	X_{11}	X_{12}	-	X_{1j}	-	X_{1K}
2	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
L	X_{i1}	X_{i2}	-	X_{ij}	-	X_{iK}
-			-	-	-	-
M	X_{M1}	X_{M2}	-	X_{Mj}	-	X_{MK}

Normalización de los indicadores utilizando relación funcional

Dado que los indicadores se encuentran en distintas unidades y escalas es necesario normalizarlos, para que queden libres de unidades y bajo la misma escala, la cual se maneja normalmente entre 0 y 1. Es necesario saber si la vulnerabilidad aumenta o disminuye al incrementar el valor del indicador. Si el indicador aumenta junto con la vulnerabilidad se dice que tenemos una relación funcional \uparrow , si sucede lo contrario la relación funcional es \downarrow . Si se tiene una relación funcional ascendente, se utiliza la siguiente fórmula para normalizar:

$$x_{ij} = \frac{X_{ij} - \text{Min}_i\{X_{ij}\}}{\text{Max}_i\{X_{ij}\} - \text{Min}_i\{X_{ij}\}} \dots \text{Ec. 2}$$

En el caso de una relación funcional descendente se utiliza la fórmula:

$$y_{ij} = \frac{\text{Min}_i\{X_{ij}\} - X_{ij}}{\text{Max}_i\{X_{ij}\} - \text{Min}_i\{X_{ij}\}} \dots \text{Ec. 3}$$

Un ejemplo de un índice con relación funcional descendente sería el índice de alfabetismo, ya que entre más alfabetizada esté la población mejor preparada está para cualquier desastre. Es importante que la relación de los índices sea correcta ya que si no los resultados obtenidos serán erróneos.

2.4.1 Métodos de construcción de índices de vulnerabilidad

Para construir el índice se debe dar un cierto nivel de importancia a cada indicador, este “peso” puede ser el mismo para todos o ser distinto dependiendo de la importancia del indicador y de las herramientas estadísticas que se empleen.

Métodos de asignación del mismo peso

Promedio simple

Dos métodos para construir un índice de vulnerabilidad, el primero, simplemente obtiene los promedios de los indicadores normalizados:

$$VI = \frac{\sum_j x_{ij} + \sum_j y_{ij}}{K} \dots Ec. 4$$

Las regiones son clasificadas de acuerdo a su índice, la región con el índice más elevado recibe una clasificación de 1 la siguiente de 2 y así consecutivamente.

El método de Patnaik & Narain (2005)

Otro método similar consiste en encontrar posibles fuentes de vulnerabilidad y clasificar a los indicadores dentro de estas, por ejemplo, clasificar las variables en grupos como vulnerabilidad demográfica, climática, ocupacional etc., y dentro de estos grupos colocar a los indicadores, por ejemplo:

- Vulnerabilidad demográfica
 - Densidad de población
 - Índice de alfabetismo
 - Tasa de mortalidad infantil

Con esta separación de los indicadores se obtiene un promedio índice (AI) para cada fuente de vulnerabilidad y para obtener el índice global se utiliza la siguiente fórmula

$$VI = \left[\sum_{i=1}^n (AI_i)^\alpha \right]^{1/\alpha} / n \dots Ec. 5$$

Donde n es el número de fuentes de vulnerabilidad y $\alpha=n$. Una ventaja de este método es que podemos clasificar a las zonas de manera global o por cada una de las fuentes de vulnerabilidad consideradas.

Cutter et al. (2003) utiliza este método para crear un índice de vulnerabilidad social en los estados unidos a nivel nación.

El modelo VRIP empleado por Moss et al. (2001), y después adaptado por Ibararán (2009), utiliza un método similar a este. Inicia con la estimación de las medias geométricas de cada una de las

variables proxies indizadas previamente, para determinar el valor de un indicador sectorial, y las medias geométricas de los indicadores sectoriales determinan el valor del indicador de la sensibilidad al cambio climático y el valor del indicador de la capacidad de respuesta y adaptación. Por último, se suman aritméticamente los dos indicadores obtenidos para obtener el índice de Vulnerabilidad-Resiliencia, considerando que el indicador de la capacidad de respuesta y adaptación toma valores positivos y que el valor del indicador de la sensibilidad toma valores negativos.

Métodos con pesos distintos

Los métodos de pesos iguales son muy simples, pero la mayoría de los autores consideran dar distintos pesos a cada indicador una manera más correcta de realizar estas evaluaciones (Padmaja & Banerjee, 2009).

Método de juicio de expertos

Se puede utilizar un grupo de expertos que elijan, dentro de un grupo de indicadores, algunos indicadores clave para la evaluación de la vulnerabilidad. Los expertos asignan un peso específico a cada indicador para realizar posteriormente la evaluación. Un ejemplo de este método se presenta en el trabajo de Books et al. (2005). Se puede realizar un análisis de sensibilidad haciendo cambios en los pesos asignados, para ver que indicadores son más relevantes en el estudio de vulnerabilidad (Ibarrarán et al., 2009). (Padmaja & Banerjee, 2009)

El método de Iyengar & Sudarshan (1982)

Iyengar & Sudarshan (1982) desarrollaron un método para generar un índice compuesto para clasificar distritos en términos de su desempeño económico. Esta metodología es utilizable para desarrollar un índice de vulnerabilidad (IV). Con este método se asigna a cada indicador un peso ponderado sobre todos los indicadores que se evalúan a través del estadístico de la varianza. De esta forma se garantiza que no dominan los indicadores que presenten una gran variación y evita que haya sesgos en la contribución del resto de los indicadores; y por tanto, no distorsiona la comparación de los índices de vulnerabilidad estimados entre regiones.

La asignación de pesos se realiza a la matriz de indicadores normalizados x_{ij} , donde $i = 1, \dots, m$ representa a cada región; con la variable $j = 1, \dots, K$ se representa a los K indicadores que se evaluarán.

Para cada indicador j se calcula el valor del peso w_j con la siguiente expresión

$$w_j = \frac{c}{\sqrt{\text{var}_i(x_{ij})}} \quad [\text{Ec. 6}]$$

Donde $\text{var}_i(x_{ij})$ es la varianza del conjunto de valores x_{ij} del indicador j normalizado de cada uno de los $i = 1, \dots, m$ regiones y la suma de todos los pesos cumple con la expresión

$$\sum_{j=1}^k w_j = 1 \quad [\text{Ec. 7}]$$

La variable c es una constante de normalización estimada como

$$c = \left[\sum_{j=1}^k \frac{1}{\sqrt{\text{var}_i(x_{ij})}} \right]^{-1} \quad [\text{Ec. 8}]$$

Donde $k = \text{número total de indicadores}$ $i = 1, \dots, m$ Regiones

Como se observa, en el método de Iyengar y Sudarshan se asume que los pesos varían inversamente a la varianza sobre los estados y los respectivos indicadores de vulnerabilidad.

Finalmente, el índice de vulnerabilidad para la región i (IV_i) se calcula como la suma de los pesos (w_j) multiplicados por el índice normalizado (x_{ij}) de todos los indicadores j evaluados y su expresión matemática es

$$IV_i = \sum_{j=1}^k w_j x_{ij} \quad [\text{Ec. 9}]$$

Posteriormente al cálculo de los índices de vulnerabilidad, se procede a clasificarlos de acuerdo a categorías que reflejen la magnitud de la vulnerabilidad y permita transmitir que tan vulnerable es cada región en comparación con las demás. Para la clasificación de los niveles de vulnerabilidad se consideran típicamente cinco categorías. Para asignar cada nivel se puede aplicar la distribución de probabilidad Beta. La función de densidad de probabilidad de esta distribución está dada por la función:

$$f(z) = \frac{z^{a-1}(1-z)^{b-1}}{\beta(a,b)}, 0 < z < 1, a, b > 0 \dots \text{Ec. 10}$$

Donde la función beta está definida por:

$$\beta(a,b) = \int_0^1 x^{a-1}(1-x)^{b-1} dx \dots \text{Ec. 11}$$

Los valores de los parámetros a y b se pueden obtener mediante la ayuda de algún software estadístico especializado. Una vez que se obtiene la función de distribución, el intervalo de variación del índice de vulnerabilidad (IV_i) para cada categoría está dado por los percentiles indicados en la Tabla 4, donde además se muestran los colores que identifican a cada nivel. De esta forma se sigue un procedimiento objetivo para la asignación de los niveles de vulnerabilidad y permite la comparación de resultados entre regiones y entre escenarios, sin sesgos.

Clasificación del Nivel de Vulnerabilidad	Color de Identificación en Mapas
Muy Baja	0 < IV_i < 20 Percentil
Baja	20 < IV_i < 40 Percentil
Moderada	40 < IV_i < 60 Percentil

Alta	60 < IVi < 80 Percentil
Muy Alta	80 < IVi < 100 Percentil

Tabla 4: Categorías para clasificar el nivel de vulnerabilidad

Técnicas estadísticas multivariadas

Como los datos para construir índices de vulnerabilidad son multivariados en la naturaleza, es posible aplicar técnicas estadísticas multivariadas para dar pesos a los indicadores, algunos ejemplos de estas metodologías son:

Componentes principales.

Esté método nos ayuda a encontrar patrones en la información disponible, es una transformación lineal de las variables originales, que encuentra la relación entre las variables seleccionadas y elimina esta relación al pasar la información de un espacio de alta dimensión a un espacio de baja dimensión sin generar una gran pérdida de información.

Análisis mediante "Clusters"

Esté método consiste en generar "clusters" que agrupan variables que tienen un fuerte nivel de asociación y los separan de variables con un grado bajo de asociación. Esté método fue utilizado por Sharma & Patwarthan, (2007) donde es explicado más a fondo.

A partir de la revisión de las evidencias del cambio climático, sus impactos, particularmente en el sector hídrico, y las principales metodologías empleadas para evaluar la vulnerabilidad a los efectos del cambio climático, en el siguiente capítulo se describen los pasos metodológicos aplicados en esta investigación para la cuantificación de la vulnerabilidad en el sector hídrico.

3. Metodología

A partir de la revisión bibliográfica se eligió la metodología que se adapta mejor a la disponibilidad de datos, y los alcances y objetivos de mi investigación.

3.1 Área de estudio: Regiones hidrológico-administrativas

La metodología se aplicará a México, a la escala espacial de las 13 regiones hidrológico-administrativas (RHA's).

Regiones hidrológico-administrativas

A partir de 1997 el país se ha dividido en 13 regiones hidrológico-administrativas (RHA) (Tabla 4), estas regiones están formadas por agrupaciones de cuencas, las cuales son consideradas como las unidades básicas de gestión de los recursos hídricos. La función de estas regiones es justamente gestionar o administrar y preservar las aguas nacionales (CONAGUA, 2011).

Estas regiones son operadas por sus 13 organismos de cuenca que dependen de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

RHA	Superficie continental (km ²)	Agua renovable (hm ³ /año)	Población a diciembre del 2009	Aportación al PIB nacional (%)
I Península de Baja California	145 385	4 667	3 781 528	3.36
II Noroeste	205 218	8 499	2 615 193	2.44
III Pacífico Norte	152 013	25 630	3 959 757	3.10
IV Balsas	119 248	21 680	10 624 805	10.78
V Pacífico Sur	77 525	32 824	4 127 573	1.79
VI Río Bravo	379 552	12 163	10 982 077	14.29
VII Cuencas Centrales del Norte	202 562	7 898	4 186 376	2.59
VIII Lerma-Santiago-Pacífico	190 367	34 533	20 974 080	14.29
IX Golfo Norte	127 166	25 564	4 968 766	6.87
X Golfo Centro	104 790	95 866	9 647 742	4.72
XI Frontera Sur	101 231	157 754	6 618 463	5.51
XII Península de Yucatán	137 753	29 645	4 064 141	9.55
XIII Aguas del Valle de México	16 438	3 513	21 422 957	20.72
Total	1959248	460237	107973454	100

Tabla 5 Regiones Hidrológico-administrativas, su superficie nacional. Su población estimada, datos de agua renovable y su aportación al producto interno bruto nacional. Fuente: CONAGUA 2011.

Los municipios que conforman cada una de esas RHA (Figura No. 6) se indican en el Acuerdo de Circunscripción Territorial de los Organismos de Cuenca publicado en el Diario Oficial de la Federación, en la actualidad se emplea el del 12 de diciembre de 2007.

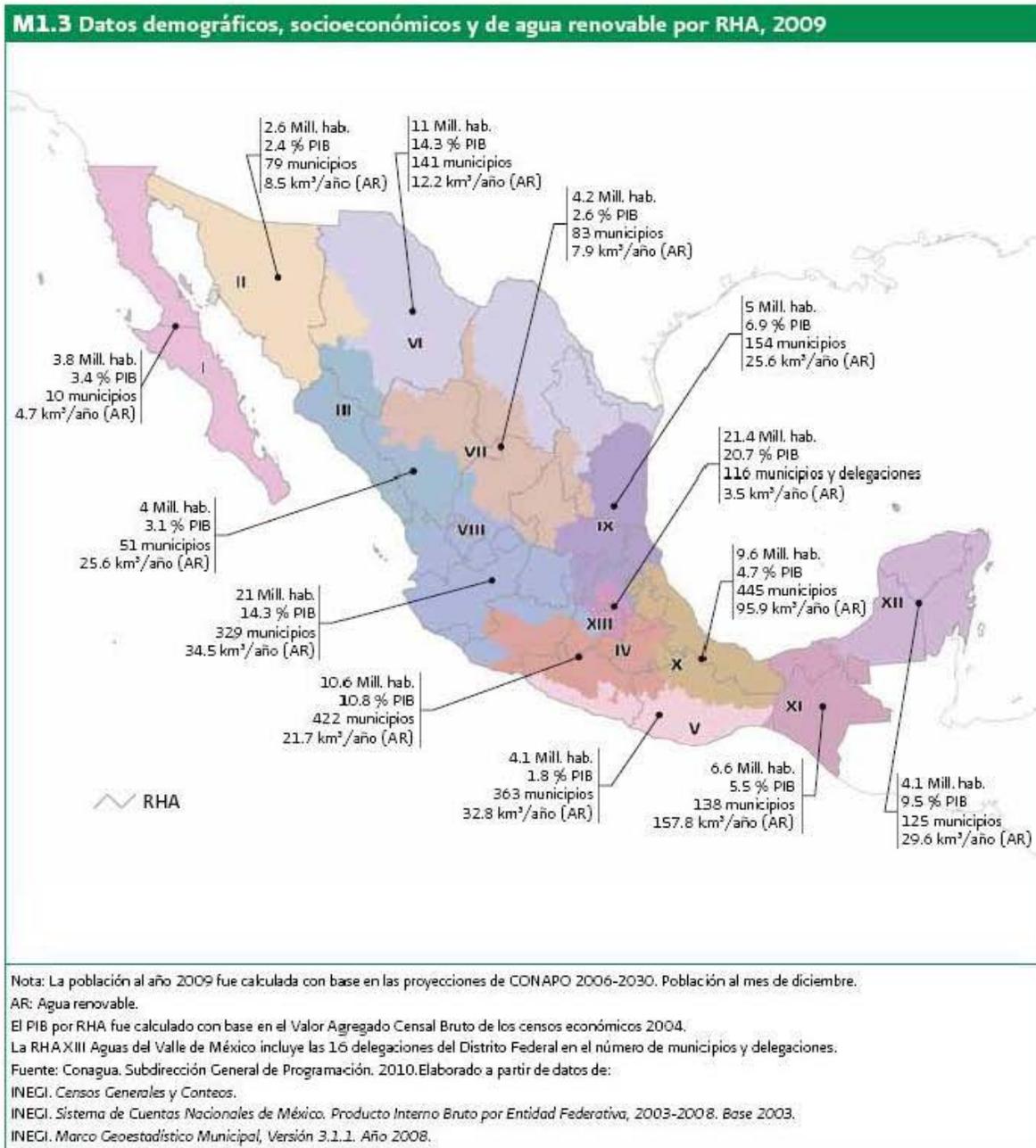


Figura 6: Mapa que muestra la distribución de las regiones hidrológico administrativas con respecto a los estados

La delimitación de las RHA's no coincide con la de los estados, por lo tanto un mapa como el de arriba es útil para saber que estados componen una cierta región. La siguiente tabla muestra que porcentaje de la superficie de cada estado se encuentra dentro de cada RHA.

Estados/RHA	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII
Aguascalientes								100					
Baja California	100												
Baja California Sur	100												
Campeche											4	96	
Chiapas											100		
Chihuahua		11	11			78							
Coahuila						75	25						
Colima								100					
Distrito Federal				100									
Durango			41			3	56						
Estado de México				37				24	9				30
Guanajuato								91	9				
Guerrero				59	41								
Hidalgo									56	5			39
Jalisco				3				97					
Michoacán				55				45					
Morelos				100									
Nayarit			39					61					
Nuevo León						77	21		2				
Oaxaca				9	56					34	1		
Puebla				59						41			
Querétaro								19	81				
Quintana Roo												100	
San Luis Potosí							56		44				
Sinaloa			100										
Sonora		100											
Tabasco											100		
Tamaulipas						21	7		72				
Tlaxcala				87									13
Veracruz									20	80			
Yucatán												100	
Zacatecas			7				61	32					

Tabla 6 muestra la distribución de las superficies en porcentajes de los estados dentro de las RHA's Fuente: CONAGUA, 2001.

Al ser estas regiones organismos de gestión del agua se decidió utilizarlas para realizar la evaluación de vulnerabilidad en el sector hídrico utilizando una metodología compatible con la información disponible

3.2 Metodología para evaluar vulnerabilidad.

Como se explicó en el capítulo anterior la evaluación cuantitativa de la vulnerabilidad por medio de índices e indicadores es la más adecuada. Dentro de esta tendencia existen diversas maneras de proceder para obtener el valor del índice, en este caso obtendremos un índice de vulnerabilidad cuyo valor se encontrará entre 1 y 0, siendo el 1 lo más vulnerable y 0 el menos.

Los indicadores seleccionados se pudieron clasificar dentro de 4 grupos; al agrupar los indicadores se puede observar en qué áreas una región es más vulnerable, esto último resulta ser muy útil en el análisis de los resultados. Los indicadores se clasificaron como: de exposición climática, de sensibilidad al suministro y sensibilidad demográfica, y capacidad adaptativa. Cada indicador seleccionado se utilizó en sólo una de estas áreas y se cuidó que no reflejarán características similares entre ellos.

Se realizó la búsqueda de los datos necesarios para cada uno de los indicadores seleccionados para cada una de las regiones y el periodo de evaluación. En este caso, las regiones son las RHA's y el periodo del año 2005 al 2010; además, se utilizaron proyecciones de los indicadores correspondientes a los escenarios de cambio climático A1B y A2 (IMTA, 2011) para obtener indicadores de vulnerabilidad para el horizonte 2030 con la finalidad de realizar una evaluación a futuro.

3.2.1 Identificación de indicadores

Se eligieron 22 indicadores que se clasificaron dentro de las 4 componentes propuestas por el IPCC. La componente de sensibilidad se divide en dos, indicadores de vulnerabilidad demográfica e indicadores de vulnerabilidad al suministro de agua, estos últimos se refieren principalmente a la cantidad de agua a la que la población tiene acceso basándose en las condiciones naturales de la región y en la infraestructura existente. Por último se utilizaron indicadores que representan la capacidad de adaptación de la región, por ejemplo el porcentaje de la población con cobertura de agua potable, la capacidad de almacenamiento de agua para consumo, entre otros.

Estos indicadores fueron elegidos por su importancia para un análisis completo de vulnerabilidad según la bibliografía revisada y de acuerdo a la disponibilidad de información para las RHA's. En la Tabla 6 se presenta la lista de los indicadores usados en esta investigación y su clasificación.

Indicador

Precipitación normal anual (mm) 1971-2000
Temperatura Media anual °C 1995-2000
Agua renovable per cápita 2009 (m ³ /hab/año)
Escurrimiento natural medio superficial total (hm ³ /año) 1971-2000
Recarga media total de acuíferos (hm ³) 1971-2000
% del Volumen Nacional concesionado 2009

% de Acuíferos sobreexplotados 2009
% de Acuíferos c/intrusión salina 2009
% de Acuíferos c/salinización de suelos y agua subterránea salobre 2009
% de estaciones contaminadas (DBO ₅ >30 mg/L) 2009
% de estaciones contaminadas (DQO>40 mg/L) 2009
% de estaciones contaminadas (SST>150 mg/L) 2009
Población 2009 (hab)
Densidad de población 2009 (hab /km ²)
Aportación al PIB Nacional (Mil \$ Hab)
Presas capacidad al NAMO (hm ³) 2009
Cobertura de la población con servicio de agua potable (hab) 2005
Dotación potencial suministro 2009 (l /hab/ día)
Cobertura de la población con servicio de drenaje (hab) 2005
Núm. De PTAR en operación 2009
Eficiencia de las PTAR (%) 2009
% del PIB 2010 a inversión en adaptación (%)

Tabla 7 Lista de los 22 indicadores utilizados para la evaluación en sus cuatro clasificaciones

Los indicadores marcados con color azul están clasificados como indicadores de exposición, los marcados en rojo son los de sensibilidad al suministro, los verdes representan los factores considerados para integrar las características de la sensibilidad demográfica y los de color morado son los de capacidad de adaptación.

En exposición climática se utilizó el indicador de precipitación, para fines de este estudio se utilizó para el escenario base, la precipitación normal mensual, del año 1971 al año 2000, proporcionado por la CONAGUA. También se utilizó la temperatura de media anual de los años 1995 al 2000 proporcionada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

En sensibilidad al suministro se utilizaron 9 indicadores, estos se podrían dividir en varios subgrupos. Los que se relacionan con la disponibilidad de agua en una región, como lo son el agua renovable per cápita, el escurrimiento natural medio superficial o el grado de presión de las cuencas.

Otros indicadores están relacionados con las características del agua subterránea, ya que hay muchas regiones en el país cuyo suministro depende del agua subterránea, estos indicadores son los que hablan de la sobreexplotación de acuíferos, acuíferos con agua salobre e intrusión salina y recarga media de acuíferos. Adicionalmente se utilizaron los 3 parámetros que comúnmente se

usan en México para referirse a la calidad del agua y se utilizaron como indicadores, estos son la Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días (DBO₅), la demanda química de oxígeno (DQO) y los sólidos suspendidos totales (SST).

En el caso de sensibilidad de población se buscaron diversos datos en distintas fuentes; sin embargo no se encontró nada clasificado por región hidrológica; se buscaron datos referentes a la sensibilidad de la población como el índice de marginación, el riesgo de contraer enfermedades hídricas y distribución de poblaciones menores a 2500 habitantes para ubicar la distribución de la población. Los datos que se tienen son sobre total de la población en la región y por lo tanto la densidad de población de cada región y también CONAGUA proporciona, por región hidrológica, la aportación al PIB nacional.

Por último tenemos los indicadores de capacidad de adaptación que representan toda la información que se tiene acerca de la capacidad de las regiones para abastecerse de agua en caso de un problema climático, como lo son la capacidad de almacenamiento, la capacidad de potabilización de agua y de tratamiento de agua residual, el número de plantas en operación, así como la inversión que se estima que se realice referente a la mejora del suministro de agua potable.

Bases de datos e información disponible

La recopilación de los datos de los indicadores se realizó principalmente a partir de los informes anuales que publica la CONAGUA, llamados *Estadísticas del Agua en México*. En estos se presenta un panorama general del estado del sector hídrico en el país. Estos documentos no siempre tienen la información completa para cada año, y tampoco presentan toda la información que nuestro análisis requiere. Por esto es que algunos datos deben venir de diversas instituciones que proporcionan información estadística, como el INEGI o el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).

En la Tabla 7 se presenta la lista de los indicadores clasificados por grupo; en la segunda columna se indica en qué unidades se manejó cada uno de los indicadores y la última indica la fuente de la información.

INDICADOR	Unidad	Fuente
EXPOSICIÓN		
Precipitación normal anual	mm	Precipitación normal mensual 1971-2000 (CONAGUA 2011)
Temperatura media anual	°C	Temperatura media anual 1995-2000 (SMN)
SENSIBILIDAD SUMINISTRO Y CALIDAD DE AGUA		
Agua Renovable Per Cápita 2009	m ³ /hab/año	Estadísticas del agua 2009 (CONAGUA 2011)
Escorrentamiento natural medio superficial total (1971-2000)	hm ³ /año	Estadísticas del agua 2009 (CONAGUA 2011)
Recarga media total de acuíferos	hm ³	Estadísticas del agua 2009 (CONAGUA 2011)

% Volumen Nacional Concesionado	%	Estadísticas del agua 2009 (CONAGUA 2011)
% Acuíferos sobreexplotados	%	Estadísticas del agua 2009 (CONAGUA 2011)
% Acuíferos con intrusión salina	%	Estadísticas del agua 2009 (CONAGUA 2011)
% Acuíferos con salinización de suelos y agua subterránea salobre	%	Estadísticas del agua 2009 (CONAGUA 2011)
Calidad del agua superficial - % estaciones contaminadas DBO ₅	%	Estadísticas del agua 2009 (CONAGUA 2011)
Calidad del agua superficial - % estaciones contaminadas DQO	%	Estadísticas del agua 2009 (CONAGUA 2011)
Calidad del agua superficial - % estaciones contaminadas SST	%	Estadísticas del agua 2009 (CONAGUA 2011)
SENSIBILIDAD DEMOGRÁFICA		
Población Total 2010	Hab	INEGI Censo 2010
Densidad de población 2030	hab/km ²	INEGI Censo 2010
PIB per cápita o aportación al PIB nacional	Mil\$/hab	INEGI Censo 2010
CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN		
Presas capacidad al NAMO	hm ³	Estadísticas del agua 2009 (CONAGUA 2011)
Población que dispone de agua potable	Hab	Estadísticas del agua 2009 (CONAGUA 2011)
Dotación potencial suministro agua potabilizada	(L/hab-d)	Estadísticas del agua 2009 (CONAGUA 2011)
Población que dispone de drenaje	Hab	Estadísticas del agua 2009 (CONAGUA 2011)
# PTAR en operación	#	Estadísticas del agua 2009 (CONAGUA 2011)
Eficiencia PTAR	%	Estadísticas del agua 2009 (CONAGUA 2011)
% del PIB 2010 a Inversión total	%	Estadísticas del agua 2009 (CONAGUA 2011)

Tabla 8: Indicadores clasificados por grupo y fuente

Teniendo la información para el escenario base se requieren datos futuros para obtener las proyecciones de los indicadores para los escenarios de cambio climático y realizar la evaluación de vulnerabilidad.

Proyecciones

Se realizaron dos proyecciones distintas de los indicadores para el año 2030, la primera para el escenario de emisiones A1B y la segunda para el escenario A2. Estas proyecciones se hicieron basándose en el comportamiento de las bases de datos actuales disponibles pero considerando que debían representar las características de los mundos futuros planteados por los escenarios de emisiones, de acuerdo con el IPCC.

En la Tabla 9 se explica de manera rápida como se obtuvieron los valores de las proyecciones.

INDICADOR	RHA	Escenario A1B	Escenario A2
EXPOSICIÓN			
Precipitación normal anual	mm	Plataforma del IMTA (SEDEPECC)	Plataforma del IMTA (SEDEPECC)
Temperatura media anual	°C	Plataforma del IMTA (SEDEPECC)	Plataforma del IMTA (SEDEPECC)
SENSIBILIDAD SUMINISTRO Y CALIDAD DE AGUA			
Agua Renovable Per Cápita 2009	m ³ /hab/año	Cálculo mediante la anomalía en precipitación	Cálculo mediante la anomalía en precipitación
Escurrimiento natural medio superficial total (1971-2000)	hm ³ /año	Cálculo mediante la anomalía en precipitación	Cálculo mediante la anomalía en precipitación
Recarga media total de acuíferos	hm ³	Cálculo mediante la anomalía en precipitación	Cálculo mediante la anomalía en precipitación
% Volumen Nacional Concesionado	%	80% del escenario base	90% del escenario base
% Acuíferos sobreexplotados	%	Escenario Base	Escenario Base
% Acuíferos con intrusión salina	%	Escenario Base	Escenario Base
% Acuíferos con salinización de suelos y agua subterránea salobre	%	Escenario Base	Escenario Base
Calidad del agua superficial - % estaciones contaminadas DBO ₅	%	% de estaciones contaminadas, calidad aceptable y buena en DBO ₅	% de estaciones contaminadas y calidad aceptable en DBO ₅
Calidad del agua superficial - % estaciones contaminadas DQO	%	% de estaciones contaminadas, calidad aceptable y buena en DQO	% de estaciones contaminadas y calidad aceptable en DQO
Calidad del agua superficial - % estaciones contaminadas SST	%	% de estaciones contaminadas, calidad aceptable y buena en SST	% de estaciones contaminadas y calidad aceptable en SST
SENSIBILIDAD DEMOGRÁFICA			

Población Total 2010	Hab	Proyección de CONAPO para año 2025	Proyección de CONAPO para año 2030
Densidad de población 2030	hab/km ²	Proyección de CONAPO para año 2025	Proyección de CONAPO para año 2030
PIB per cápita o aportación al PIB nacional	Mil\$/hab	Proyección de CONAPO para año 2025 con PIB 2010	Proyección de CONAPO para año 2030 con PIB 2010
CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN			
Presas capacidad al NAMO	hm ³	Escenario Base	Escenario Base
Población que dispone de agua potable	Hab	Proyección de población con porcentaje de cobertura constante	Proyección de población con porcentaje de cobertura constante
Dotación potencial suministro agua potabilizada	(L/hab-d)	Proyecciones Estatales Convertidas a RHA	Proyecciones Estatales Convertidas a RHA
Población que dispone de drenaje	Hab	Proyección de población con porcentaje de cobertura constante	Proyección de población con porcentaje de cobertura constante
# PTAR en operación	#	Valor Máximo para periodo 2005-2010	Valor Medio para periodo 2005-2010
Eficiencia PTAR	%	Eficiencia Máxima para periodo 2005-2010	Eficiencia Media para periodo 2005-2010
% del PIB a Inversión total	%	Proyecciones Estatales Convertidas a RHA	Proyecciones Estatales Convertidas a RHA

Tabla 9: Proyecciones de los indicadores para los escenarios A1B y A2

A continuación se explica con más detalle los métodos y las consideraciones utilizadas para realizar las proyecciones.

Las proyecciones de precipitación y temperatura empleadas en este estudio correspondieron a las aprobadas para la Quinta Comunicación de México; estos datos se encuentran disponibles para todo público en el sitio web del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA); la plataforma se denominó como SEDEPECC y el procedimiento que se siguió para obtener esos datos se explica en su propia sección más adelante.

Un factor importante para la operación de los sistemas de suministro de agua municipal es el volumen de agua disponible. Para los escenarios futuros se consideran tres indicadores, la disponibilidad del agua natural renovable per cápita de acuerdo a CONAGUA (2010), así como el volumen del escurrimiento medio superficial y la recarga media total de acuíferos. Las proyecciones futuras para estos indicadores se realizaron utilizando las proyecciones de precipitación, los indicadores del escenario base y en el caso del agua renovable per cápita, las proyecciones de población para cada escenario futuro.

Las proyecciones de disponibilidad de agua natural renovable se calcularon considerando las proyecciones de precipitación - calculado de la base de datos de la plataforma SEDEPECC, para los escenarios A1B y A2 (procedimiento que se explica más adelante), utilizando estos datos se realizó una comparación con la precipitación del escenario base, de esta manera se encontró una anomalía con la cual se afectaron los indicadores del escenario base y se obtuvieron los indicadores para los escenarios futuros consistentes con los de nuestro escenario base. Este criterio sólo es una aproximación al volumen por región disponible, porque la estimación de la disponibilidad por cuenca hidrológica esta fuera del alcance de esta investigación.

Para establecer el porcentaje del volumen de agua que se destinaría al abastecimiento público estatal, se analizó la tendencia de las concesiones de agua para este uso. La tendencia en los últimos tres años de análisis se refleja en los datos fuente de 2009. Si además se considera que las proyecciones de precipitación para los escenarios A1B y A2, son en general menores a la histórica, es decir habría menos lluvia en ambos escenarios, entonces se tomó como referente los datos fuente de 2009 para el escenario 2030; para el escenario A1B se consideró una disminución en la concesión de 20% y para el escenario A2, de 10%, considerando que la política de reducción en el volumen concesionado no puede ser mayor al 40%, dado que podría afectarse severamente tanto el servicio de agua municipal como el desempeño de la agricultura de riego.

En el caso de los indicadores referentes a los acuíferos, su sobreexplotación, o la intrusión salina o de aguas salobres es difícil conocer cómo se modificarán a futuro dada la complejidad de estos sistemas subterráneos y la gran cantidad de factores involucrados, además estos sistemas no se ven afectados de manera tan inmediata como por ejemplo el agua superficial. Por lo tanto se decidió utilizar los datos del escenario base sin modificar.

En el caso de los tres parámetros de calidad de agua se consideró usar los datos disponibles consultados en CONAGUA reportados para el año 2009, ya que es la información más reciente que se obtuvo. Dado lo complejo y prácticamente imposible de generar proyecciones con tan pocos datos disponibles, se consideró que en el futuro las condiciones serán más severas en términos de la contaminación de las fuentes superficiales y en ese sentido se usaron los porcentajes reportados.

Haciendo un análisis de la precipitación para los dos escenarios futuros, observamos que las precipitaciones para el escenario A1B son más intensas que para el A2, entonces la posibilidad de mayor escurrimiento pluvial en A1B, contribuye al deterioro de la calidad del agua superficial más que en el escenario A2. Para trabajar con esta posible situación se considera que es mayor el

porcentaje de estaciones contaminadas en el A1B. Se consideró que las estaciones que en 2009 fueron clasificadas con calidad buena y aceptable cambiarían a la categoría de aceptable y contaminada, respectivamente. Mientras que para el escenario A2, se incluyó sólo a las estaciones con calidad aceptable que podrían presentar el nivel de contaminada.

Los datos de población futura para las distintas RHA's fueron obtenidos de las proyecciones del Consejo Nacional de Población (CONAPO). Para el escenario 2030-A1B, como se espera un crecimiento menor de la población, según lo descrito por el IPCC (2007), se utilizaron las proyecciones para el año 2025 de CONAPO, mientras que para el escenario 2030-A2 si se utilizaron las del año 2030 cuyos valores son mayores a las del 2025. Estos datos se encuentran disponibles únicamente a nivel estatal, por lo que se realizó una conversión de datos utilizando los porcentajes de superficie de cada estado que componen las RHA's (ver tabla 5).

Con las proyecciones de población se obtuvieron los indicadores de densidad de población y utilizando el dato de aportación al PIB nacional 2010 alterándolo por proyecciones de población, se obtuvieron los indicadores para los escenarios 2030-A1B y 2030-A2.

En los indicadores de capacidad de adaptación, primero tenemos el de la capacidad de almacenamiento de las presas al NAMO, este indicador no fue proyectado para los escenarios futuros sino que se utilizó el del escenario base ya que se hizo la suposición conservadora que no habrá una gran modificación a la capacidad de almacenamiento de presas que tenemos en el país dentro de los próximos 20 años.

El indicador de la población que dispone de agua potable se proyectó tomando como base el porcentaje de población del año 2010 que contaba con este servicio. Este porcentaje es representativo del nivel de avance en la cobertura del servicio en el país y se tomó como la referencia para aplicarlo a la población proyectada para cada uno de los escenarios 2030 A1B y 2030 A2. Esto mismo se hizo para el caso de la población que dispone de drenaje.

Para el indicador de Número de Plantas de Tratamiento de agua Residual en operación (PTAR) y de la eficiencia de las mismas, se tomó en cuenta que bajo el escenario A1B habría apoyo a la introducción de tecnología, entonces deberían estar operando al menos todas las plantas instaladas en el país. Esta situación se expresó con el máximo número de PTAR que operaron en el periodo 2005-2010. Para el escenario A2, donde es posible esperar desarrollo local y desigual introducción de tecnología, se tomaron los datos fuente, correspondientes al valor promedio en el periodo de análisis (2005-2010). El crecimiento del número de PTAR no puede inferirse de la tendencia observada en los últimos años como si tratara de un bien que se produce comercialmente; obedece a factores tales como financiamiento a los municipios y nivel de cobertura del drenaje, principalmente.

Por último dos indicadores que se tomaron de datos estatales y también se convirtieron a datos por RHA fueron el de dotación potencial de agua potable y el del % del PIB que va a inversión para mejorar el abastecimiento, estos datos los proporciona CONAGUA a nivel estatal y se utilizó el mismo método que para pasar los datos de población estatal a población por RHA.

3.2.2 Método para normalizar indicadores

Para normalizar los indicadores se debe primero conocer si su relación funcional es positiva ↑ o negativa ↓, con respecto a la vulnerabilidad, por lo que se hace un análisis de cada indicador para conocerla y en la Tabla 9 se presenta la relación funcional de cada indicador.

Indicador	Relación Funcional
Precipitación normal anual (mm) 1971-2000	↑
Temperatura Media anual °C 1995-2000	↑
Agua renovable per cápita 2009 (m ³ /hab/año)	↓
Escorrentamiento natural medio superficial total (hm ³ /año) 1971-2000	↓
Recarga media total de acuíferos (hm ³) 1971-2000	↓
% del Volumen Nacional concesionado 2009	↑
% de Acuíferos sobreexplotados 2009	↑
% de Acuíferos c/intrusión salina 2009	↑
% de Acuíferos c/salinización de suelos y agua subterránea salobre 2009	↑
% de estaciones contaminadas (DBO ₅ >30 mg/L) 2009	↑
% de estaciones contaminadas (DQO>40 mg/L) 2009	↑
% de estaciones contaminadas (SST>150 mg/L) 2009	↑
Población 2009 (hab)	↑
Densidad de población 2009 (hab /km ²)	↑
Aportación al PIB Nacional (Mil \$ Hab)	↓
Presas capacidad al NAMO (hm ³) 2009	↓
Cobertura de la población con servicio de agua potable (hab) 2005	↓
Dotación potencial suministro 2009 (l /hab/ día)	↓
Cobertura de la población con servicio de drenaje (hab) 2005	↓
Núm. De PTAR en operación 2009	↓
Eficiencia de las PTAR (%) 2009	↓
% del PIB 2010 a inversión en adaptación (%)	↓

Tabla 10 Los 22 indicadores con su relación funcional

La relación funcional se determina basándose en un criterio muy simple, si el incremento en el valor de un indicador incrementa la vulnerabilidad de la región, la relación funcional será positiva

o ascendente, como es el caso de los indicadores que hablan de la cantidad de población, o los que hablan de acuíferos sobreexplotados o contaminados. Los indicadores con relación funcional negativa o descendente son lo que al incrementar disminuirán la vulnerabilidad de una región, evidentemente todos los indicadores de la componente de capacidad de adaptación tienen funcionalidad descendente, también aquellos indicadores que se refieren a cantidad de agua disponible para consumo humano. Una vez asignada la relación, se procede a normalizar los indicadores de acuerdo a la relación de funcionalidad, como se describió en el Capítulo anterior; es decir se usaron las ecuaciones 2 y 3.

3.3 Evaluación de la vulnerabilidad

Para construir el índice de vulnerabilidad es necesario asignar un peso específico a cada indicador, y como se explicó en la sección de metodología del capítulo anterior, existen diversos métodos para hacerlo.

Para asignar los pesos a cada uno de los indicadores de este estudio se utilizó el método de Iyengar y Sudarshan (1982), de manera que se aplicaron las ecuaciones 6, 7, 8, 10 y 11, explicadas en el capítulo anterior.

Se eligió esta metodología ya que es la que mejor se acopla con la información obtenida para este estudio, ya que no se podría utilizar un método más avanzado debido a que la información es limitada.

Esta metodología permite obtener un índice de vulnerabilidad confiable, ya que no se ve afectado por indicadores de valores extremos que tiendan a dar un sesgo indeseable a los resultados. Una vez aplicado el método se obtuvo un índice para cada una de las 13 RHA's.

Se aplicó la metodología para 3 escenarios: el primero fue un escenario actual tomando al año 2010 como base, ya que para este año se tiene la mayor y más reciente disponibilidad de datos para las RHA's; los siguientes dos escenarios se construyeron para el horizonte 2030, con las proyecciones de los indicadores correspondientes, explicadas en la sección anterior, utilizando las definiciones de los escenarios de emisiones SRES A1B y A2, los cuales presentan dos situaciones hipotéticas distintas de desarrollo social. El escenario A1B busca un desarrollo más integral, mientras que el A2 lo hace de manera más localizada. Incluso en cuanto a emisiones el escenario A1B considera muchas menos emisiones que el A2 ya que considera un balance entre el uso de energías, como se explica en el marco teórico de este trabajo.

3.2.3 Obtención de proyecciones mediante la plataforma SEDEPECC

Todos los datos de proyecciones de precipitación y temperatura con los que se trabajó se obtuvieron de la plataforma ubicada en el sitio web del IMTA, denominada SEDEPECC, que se puede acceder desde <http://galileo.imta.mx/aplisedepecc.php>. En esta plataforma se pueden extraer datos mensuales de precipitación y temperatura, para dos distintos escenarios de cambio climático, el A1B y el A2. La plataforma presenta un mapa de la república dividido en 37 regiones hidrológicas (distintas a nuestras Regiones Hidrológico Administrativas), el mapa está dividido con una malla con una resolución de 0.5° de latitud y de longitud y para hacer la consulta de los datos

se elige el cuadro de la malla para elegir la coordenada y la plataforma puede proporcionar los datos a manera de tablas o gráficos.

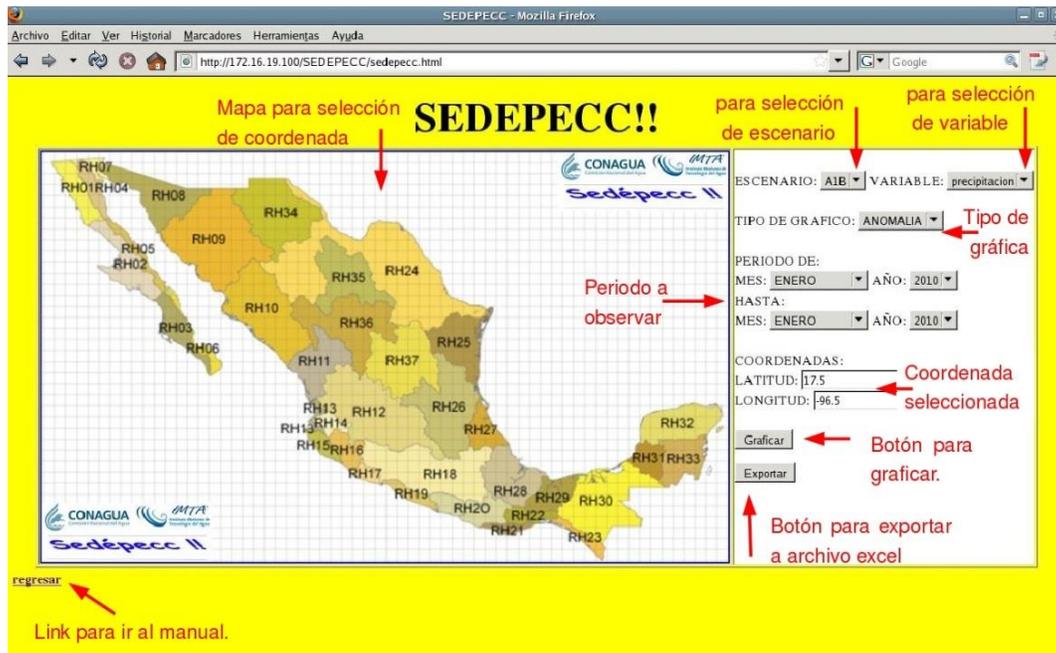


Figura 7 Pantalla de inicio de la plataforma SEDEPECC en línea

Las componentes con las que el sistema trabaja son, los dos distintos escenarios, el tipo de variable, ya sea precipitación o temperatura. El tipo de gráfico, si se desea consultar la anomalía en la variable, su valor absoluto o la normal del periodo a elegir, que sería la siguiente componente, por último se elige la coordenada con ayuda del mapa.

Se consultaron las precipitaciones y temperaturas absolutas para un periodo de enero del 2020 a diciembre del 2040, para los 660 cuadros de la malla que se encuentran dentro de la República, y para los 2 escenarios disponibles. En el caso del Distrito Federal, ya que ningún vértice de la malla cae dentro de su territorio, se tomaron los cuatro vértices a su alrededor para estimar sus datos.

Para tener estos datos por RHA se tomaron las coordenadas de cada uno de los 660 cuadros y se verificó sobre qué estado se encontraban, para después clasificarse en su correspondiente región.

Teniendo todos los datos divididos por estado se calcularon las precipitaciones mensuales [mm/mes] ya que la plataforma daba los resultados en precipitaciones diarias [mm/día], esto se realizó multiplicando el valor obtenido por el número de días en el correspondiente mes. Con estos datos se calculó el valor medio mensual de precipitación y temperatura para todo el estado, para esto se tomó el promedio simple de todos los datos de cada estado.

Ya que los datos de precipitación deben ser la precipitación acumulada anuales [mm/año] se sumaron los datos de todos los meses de cada año. Teniendo la precipitación absoluta anual de

cada uno de los años del 2020 al 2040 se calculó la precipitación media como el promedio simple de estos datos.

En el caso de las temperaturas simplemente se obtuvo el promedio simple de las temperaturas mensuales de toda la RHA.

De igual manera se obtuvieron los valores máximos y mínimos anuales de precipitación así como los máximos y mínimos mensuales de precipitación y temperatura, para posteriormente trabajar con ellos. Todos estos valores se obtuvieron para los dos escenarios A1B y A2.

4. Resultados y discusión

4.1 Resultados

En este capítulo se presentan los resultados (Tabla 11) obtenidos con la metodología previamente descrita realizando también todas las consideraciones mencionadas durante el proceso.

Se observa que existen cuatro regiones que para los tres escenarios mantienen un nivel de vulnerabilidad muy alto; estas son las regiones I de Baja California, II del Noroeste del país, X Golfo Sur y XII Aguas del Valle de México, por lo que es importante tomar medidas de adaptación en estas regiones. Igualmente preocupantes son las regiones V del Pacífico Sur y la VII Cuencas Centrales del Norte, estas dos clasificadas con un nivel de vulnerabilidad Alto, que aunque no es el máximo nivel de vulnerabilidad sigue siendo muy elevado y este no varía bajo ningún escenario, lo que indica que no habrá ningún comportamiento en el futuro que haga mejorar las situaciones actuales de vulnerabilidad de estas 6 RHA's.

La región IV Balsas presenta actualmente un nivel de vulnerabilidad bajo, pero en ambos escenarios futuros su vulnerabilidad aumenta y se encuentra dentro de la clasificación alta. Más adelante se explica en base a los resultados cual podría ser la razón de este cambio. Pero es importante tener un especial cuidado con esta región en los próximos años.

Tres regiones que podrán presentar reducción en el nivel de vulnerabilidad con las proyecciones bajo cambio climático supuestas en esta investigación. La región de la península de Yucatán tiene en el escenario 2010 una vulnerabilidad alta, la cual disminuye para los escenarios A1B y A2, a baja y moderada respectivamente. La región III del Pacífico Norte, que presenta actualmente un nivel moderado de vulnerabilidad; este nivel se mantiene para la proyección del escenario A1B al 2030, mientras que para el escenario A2 disminuye su clasificación a vulnerabilidad baja. La tercera región es la VI Río Bravo que presenta actualmente un nivel bajo de vulnerabilidad, el cual disminuirá aún más a futuro y presenta en ambos escenarios futuros niveles muy bajos de vulnerabilidad.

Las regiones con los niveles de vulnerabilidad más bajos en el escenario actual 2010, son VIII Lerma-Santiago, IX Golfo Norte y la región XI Frontera Sur. Las dos primeras regiones mantienen vulnerabilidad en un nivel bajo como máximo para alguno de los escenarios con cambio climático, pero realmente sus índices de vulnerabilidad no son elevados para ninguno de los 3 casos. La región XI Frontera Sur mantiene el nivel más bajo de vulnerabilidad en los 3 escenarios planteados, esto llama la atención ya que esta región es conocida por ser una región marginada.

Clave	Región Hidrológica Administrativa	Base – 2010	A1B - 2030	A2 – 2030
I	Península de Baja California	MUY ALTA	MUY ALTA	MUY ALTA
		0.564	0.612	0.606
II	Noroeste	MUY ALTA	MUY ALTA	MUY ALTA
		0.572	0.613	0.584
III	Pacífico Norte	MODERADA	MODERADA	BAJA
		0.486	0.531	0.490
IV	Balsas	BAJA	ALTA	ALTA
		0.467	0.557	0.546
V	Pacífico Sur	ALTA	ALTA	ALTA
		0.506	0.545	0.530
VI	Río Bravo	BAJA	MUY BAJA	MUY BAJA
		0.437	0.441	0.417
VII	Cuencas Centrales del Norte	ALTA	ALTA	ALTA
		0.535	0.568	0.546
VIII	Lerma-Santiago-Pacífico	MUY BAJA	BAJA	MUY BAJA
		0.436	0.493	0.460
IX	Golfo Norte	MUY BAJA	MUY BAJA	BAJA
		0.431	0.470	0.466
X	Golfo Centro	MUY ALTA	MUY ALTA	MUY ALTA
		0.558	0.627	0.588
XI	Frontera Sur	MUY BAJA	MUY BAJA	MUY BAJA
		0.363	0.385	0.372
XII	Península de Yucatán	ALTA	BAJA	MODERADA
		0.501	0.518	0.515
XIII	Aguas del Valle de México	MUY ALTA	MUY ALTA	MUY ALTA
		0.665	0.625	0.634

Tabla 11 Resultados de vulnerabilidad para el escenario 2010, 2030 A1B y 2030 A2

Utilizando un código de color (Tabla 4) se realizó un mapa para cada uno de los escenarios donde se pueden apreciar los resultados de una manera más clara. Para realizar los mapas de resultados se utilizó la plataforma llamada Global Mapper v.15. utilizando plantillas proporcionadas por CONAGUA (2007).

**Mapa de vulnerabilidad de México dividido en las 13 RHA's
Escenario Base 2010.**



Figura 8 Nivel de vulnerabilidad para el escenario de emisiones 2010

**Mapa de vulnerabilidad de México dividido en las 13 RHA's
Escenario de emisiones A1B.**



Figura 9 Nivel de vulnerabilidad para el escenario de emisiones A1B 2030



Figura 10 Nivel de vulnerabilidad para el escenario de emisiones A2 2030

Si se comparan los resultados obtenidos del nivel de vulnerabilidad para cada uno de los tres escenarios (Figura 11) se observa que bajo el escenario A1B se presentarán las condiciones de vulnerabilidad más extremas para el país en casi todas las RHA's, salvo en la región XIII Aguas del Valle de México, donde el escenario base presenta la vulnerabilidad más alta.

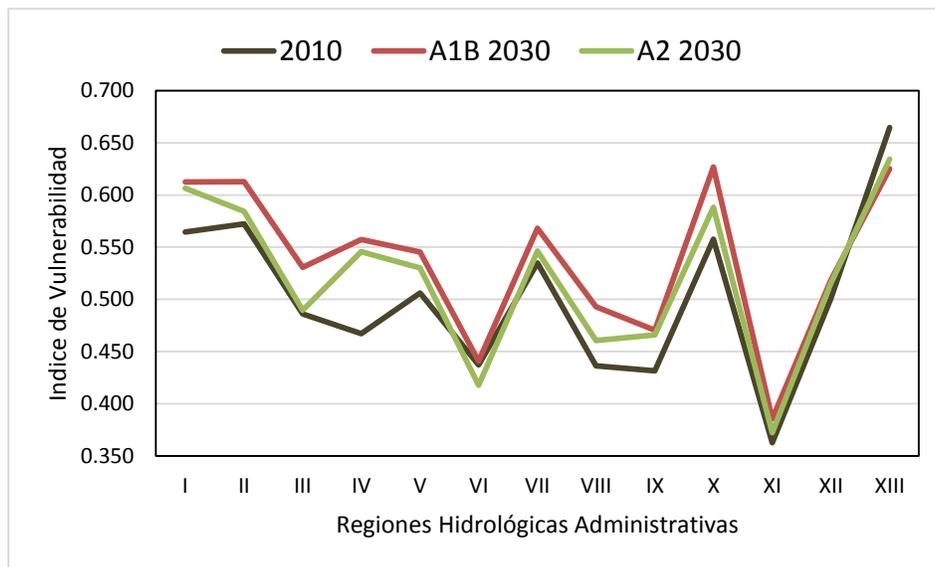


Figura 11 Comparación de los índices de vulnerabilidad para los 3 escenarios.

4.2 Análisis de resultados y discusión

Antes de realizar un análisis es importante aclarar que esta clasificación de vulnerabilidad es relativa a las 13 regiones analizadas y a los indicadores usados, no es una escala fija de ningún tipo ni puede compararse con los resultados de ningún otro estudio, el comparar los resultados de esta evaluación con cualquier otra, sería caer en un error si se hace sin cuidado.

Es posible analizar como varía la vulnerabilidad de un escenario a otro de acuerdo con las distintas componentes utilizadas para la evaluación: exposición, sensibilidad al suministro y demográfica, y capacidad de adaptación. Esta comparación puede ayudar a observar de una manera más clara el cambio en la vulnerabilidad de las distintas áreas de estudio dentro del país.

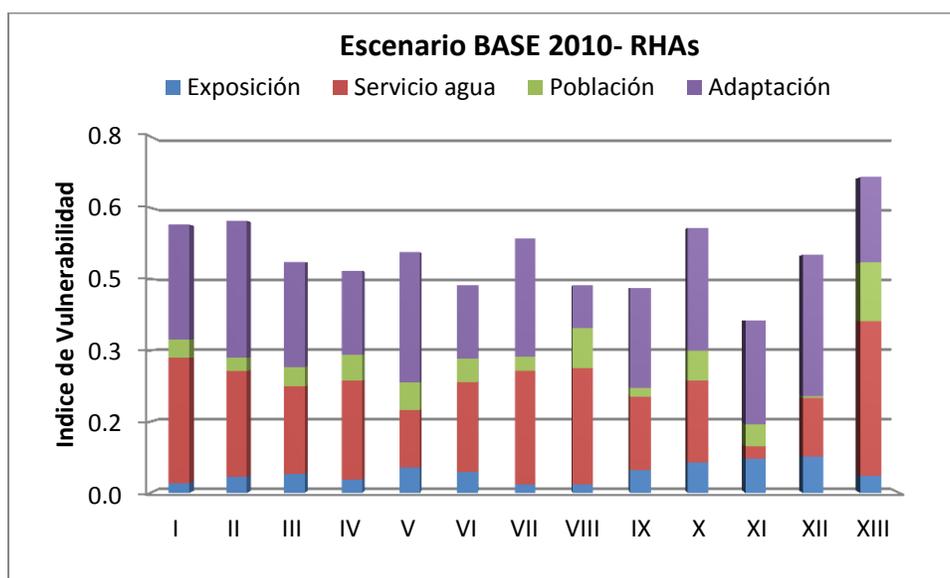


Figura 12 Desglose de los índices de vulnerabilidad por componente, para el escenario base 2010

Con las gráficas desglosadas de los índices de vulnerabilidad, (Figuras 12, 13 y 14) se puede observar cuales son las componentes en las que las regiones son más vulnerables. En el caso del escenario base (Fig. 12) se aprecia que las cuatro regiones más vulnerables (regiones I, II, X y XIII) son muy sensibles en el aspecto de suministro de agua; esto cobra sentido si se analiza que son regiones muy pobladas o con una cantidad de agua disponible considerablemente baja. También se observa que la región XIII tiene el nivel de vulnerabilidad demográfica más alto, lo cual cobra mucho sentido si se toma en cuenta que es la región con la mayor densidad de población. Las regiones VII Cuencas Centrales del Norte y III Pacífico Norte, se encuentran en una situación muy similar aunque su vulnerabilidad está clasificada como alta y media respectivamente.

La región V Pacífico Sur es un caso interesante ya que a diferencia de la mayoría de las regiones no presenta un alto nivel de sensibilidad al suministro de agua, su vulnerabilidad reside principalmente en una falta de capacidad de adaptación y en una vulnerabilidad demográfica.

Tanto la región VI Río Bravo como la IV Balsas son casos similares, presentan niveles altos de sensibilidad al suministro y demográfica; esto es normal dado que la región IV Balsas tiene una

gran población y la región VI del Río Bravo una baja disponibilidad de agua; es la capacidad de adaptación de estas dos regiones lo que hace que tengan una baja vulnerabilidad, su alta inversión y su capacidad de almacenamiento y distribución, en comparación con otras, es lo que hace que se pueda considerar a estas regiones como poco vulnerables.

La región VIII Lerma-Santiago-Pacífico se encuentra en una situación parecida a la explicada en el párrafo anterior pero mucho más marcada la vulnerabilidad demográfica y debido a la baja disponibilidad de agua, hace que su vulnerabilidad al suministro sea muy alta. Pero por otro lado, la cobertura de servicios e inversión en saneamiento hacen que sea una de las regiones menos vulnerables del país, si se eliminara el factor de capacidad de adaptación, esta región sería la segunda más vulnerable después de la del valle de México.

Las regiones IX Golfo Norte y XI Frontera Sur son las menos vulnerables del país en nuestro escenario base; ambas son regiones con una alta disponibilidad de agua superficial, una gran precipitación y baja vulnerabilidad demográfica. Esto hace que tengan bajos niveles de vulnerabilidad en suministro de agua. El gran nivel de precipitación y altas temperaturas hacen que el nivel de vulnerabilidad a la exposición sea elevado. Lo que hay que resaltar de estas regiones es su baja capacidad de adaptación.

Por ejemplo, el caso de la región XI, observamos que tiene el nivel de vulnerabilidad más bajo en cuanto a suministro de agua potable, mientras que los otros tres indicadores están más elevados, la sensibilidad climática esta incluso por encima de los indicadores de varias regiones. Esto se debe a que esta región tiene una gran abundancia de agua y sin embargo la población rural no cuenta con agua potable en la vivienda.

Del escenario base al escenario de emisiones A1B 2030 (Figura 13) la vulnerabilidad de algunas regiones varía un poco, pero es la región IV Río Balsas la que más llama la atención ya que pasa a ser una región de baja vulnerabilidad a una de las más altas. Esto se debe a una serie de factores, principalmente al incremento en la población, seguido por una disminución de la disponibilidad de agua superficial, aumentando así la sensibilidad demográfica y al suministro fuertemente. A la región VIII Lerma-Santiago le sucede algo similar pero la vulnerabilidad no incrementa tanto, solo pasa de muy baja a baja, ya que ni la sensibilidad demográfica ni la población aumentarán como para afectarla.

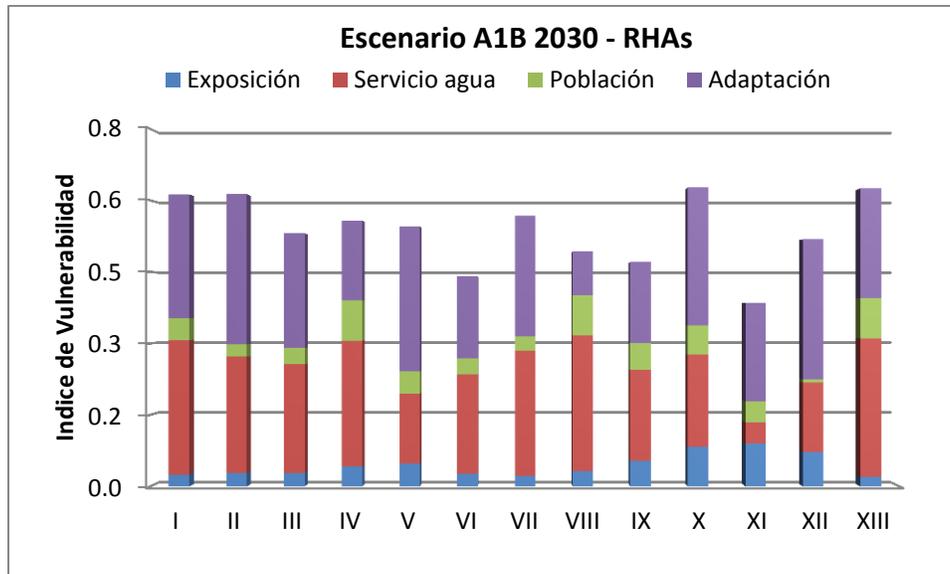


Figura 13 Desglose de los índices de vulnerabilidad por componente, para el escenario A1B 2030

La región VI Río Bravo verá una disminución en su población, según las proyecciones, lo que hará que sus sensibilidad demográfica disminuya y la capacidad de cobertura de agua potable aumente, esto se ve reflejado en una disminución en el índice de vulnerabilidad con respecto a las demás regiones.

La región XII Península de Yucatán disminuye considerablemente su vulnerabilidad, de alta a baja, en las gráficas no se observa ningún cambio notable con respecto a la del escenario base 2010, esto es por lo que se mencionaba anteriormente, los índices de las otras regiones aumentaron con respecto a este índice.

En el escenario A2 2030 (Figura 14) se observa principalmente que la región IV del Balsas tiene un comportamiento muy similar al que tiene en el escenario A1B 2030. Las regiones V Pacífico Sur y VII Cuencas Centrales del Norte mantienen un valor de vulnerabilidad muy similar, con respecto a otras regiones, y su comportamiento en cuanto a sus 4 componentes también es igual para los 3 escenarios. La región III Pacífico Norte tiene una menor vulnerabilidad por exposición climática, por lo que su vulnerabilidad disminuye, esto se debe principalmente a un incremento general en sus precipitaciones. En el caso de la región XII compuesta por la Península de Yucatán sucede lo mismo que en el caso del escenario A1B, el comportamiento es el mismo para los 3 escenarios pero su valor es más similar al de las regiones con vulnerabilidad más baja, por lo que su vulnerabilidad aparece clasificada en un grupo más bajo.

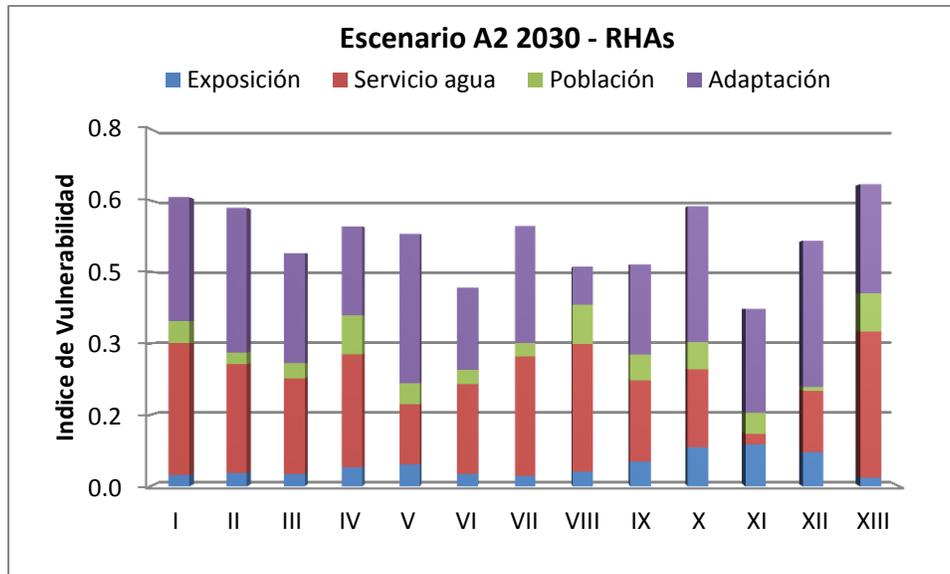


Figura 14 Desglose de los índices de vulnerabilidad por componente, para el escenario A2 2030

En el caso de la región VI Río Bravo, donde la vulnerabilidad es evaluada como muy baja se debe a una gran disminución de la vulnerabilidad demográfica; en esta región, para el escenario A2, la población al año 2030 se considera será casi igual que en el escenario base 2010, a diferencia de la mayoría de las regiones donde ésta aumenta; este factor podría ser la causa de esta disminución en la vulnerabilidad de la región. Sucede exactamente lo opuesto en la región IX Golfo Norte, donde la población se espera crecerá en gran medida, la sensibilidad demográfica aumentará con ella, aumentando el nivel de vulnerabilidad con respecto a los otros escenarios.

Algo que llama mucho la atención realizando el análisis entre los tres distintos escenarios, por componente de vulnerabilidad, es que al comparar los valores de vulnerabilidad en la componente de exposición (Figura 15), se observa que para ambos escenarios futuros, los valores son muy similares, mientras que en el escenario base las condiciones de exposición si son muy distintas. Realmente se esperan cambios en el clima muy similares para ambos escenarios, es más bien lo que sucederá internamente dentro de las distintas regiones lo que definirá el nivel de vulnerabilidad.

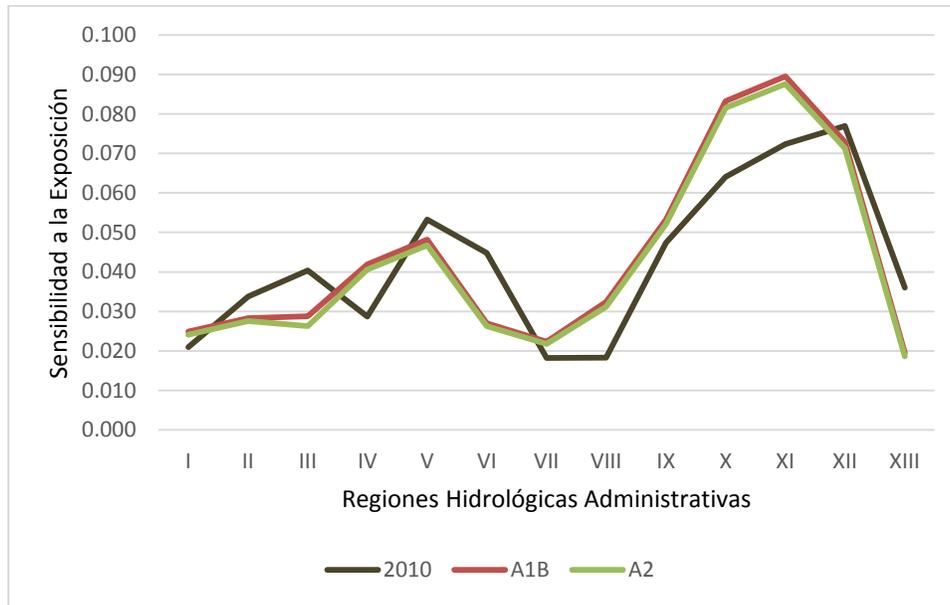


Figura 15 Gráfica comparativa de los tres escenarios para la componente de sensibilidad a la exposición climática

Por otro lado, el sector que más preocupa basándonos en los resultados obtenidos es la sensibilidad en el suministro de agua potable, ya que esta componente del índice es la que más importancia tiene como se puede observar claramente en las figuras 12, 13 y 14. Haciendo un análisis similar al anterior, pero para esta componente, se puede observar (Figura 16) que esta componente se comporta muy parecido al índice de vulnerabilidad, lo cual además de dar una idea de la importancia de este componente, también se observa que de igual manera para el escenario A1B 2030 se tienen los niveles más altos de vulnerabilidad seguidos por los resultados del escenario A2 2030 para la mayoría de las regiones, mientras que en algunas regiones los valores para el A2 2030 y el base 2010 son similares, como ocurre en las regiones V, VI, X, XI y XII.

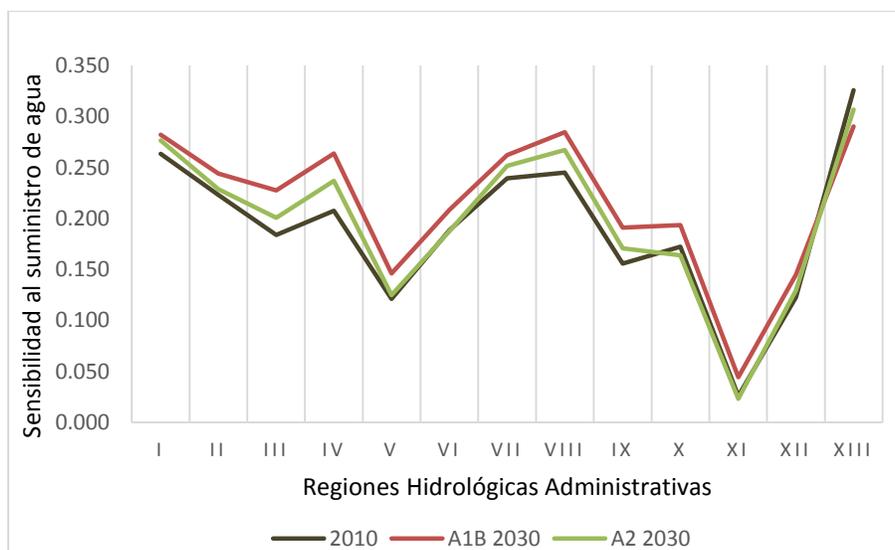


Figura 16 Gráfica comparativa de los tres escenarios para la componente de sensibilidad al suministro de agua

Por último se observa que la componente de capacidad adaptativa (Figura 17), la cual tiene un comportamiento distinto al del indicador final. Lo que se puede obtener de esta componente es que Las regiones II, V, X y XII, tienen un muy elevado nivel de vulnerabilidad en esta componente.

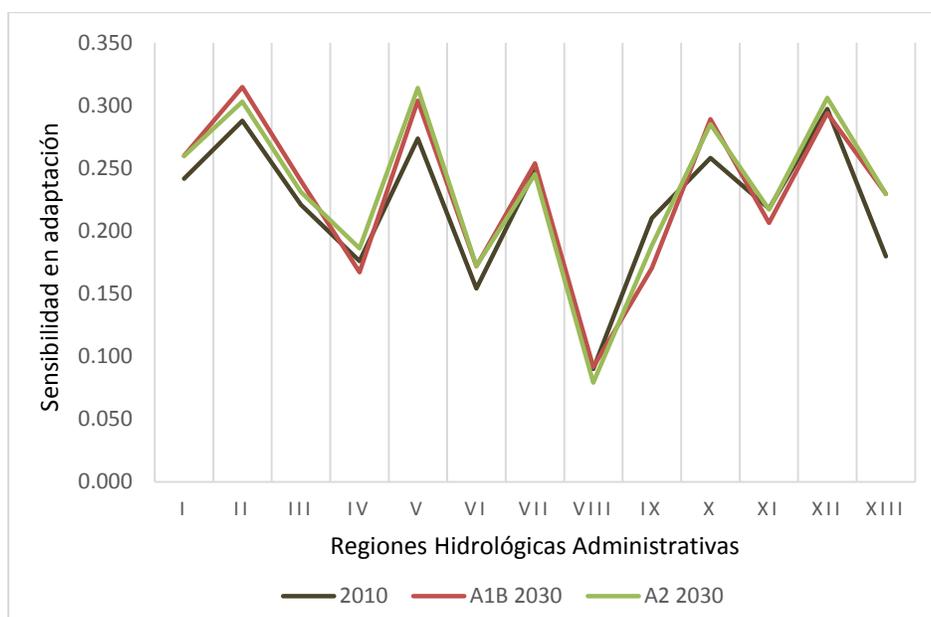


Figura 17 Gráfica comparativa de los tres escenarios para la componente de sensibilidad de capacidad adaptativa

El comportamiento de la vulnerabilidad entre los dos escenarios seleccionados A1B y A2 es muy similar en la sensibilidad de la componente climática o de exposición, ya que se esperan aumentos de temperatura muy similares para ambos escenarios, similares entre sí, pero superiores al escenario base 2010. En el caso de las proyecciones de precipitación para el escenario A1B se espera un mayor valor que para el escenario A2 para el año 2030, pero en general la sensibilidad climática será similar. Al esperarse una cantidad de agua superficial similar tendría sentido esperar que la sensibilidad al suministro de agua potable se comporte de una manera similar, sin embargo varía entre regiones debido a varios aspectos tales como la calidad del agua o la situación de sobreexplotación y recarga de los acuíferos.

Finalmente, cabe recordar que de acuerdo a los perfiles socioeconómicos y tecnológicos de los escenarios A1B y A2, la componente de sensibilidad demográfica proyecta una población mayor para el escenario A2, y la sensibilidad demográfica aumenta con ella. De la misma manera, la capacidad adaptativa de las regiones, vinculada al futuro desarrollo tecnológico, fue un poco mayor para el escenario A1B que para el escenario A2 para casi todas las 13 regiones. Con respecto a la capacidad de adaptación también debería esperarse una fuerte variación futura considerando que el escenario A1B describe que habrá un gran desarrollo económico y tecnológico, pero lamentablemente la construcción de este índice se basó en la infraestructura ya existente, debido a la falta de datos disponibles y a la falta de planes de adaptación concretos por parte de las instancias correspondientes.

5. Conclusiones

La metodología seleccionada cumple perfectamente con los objetivos de esta investigación, permitiendo realizar un análisis cuantitativo más completo de la vulnerabilidad a través de índices finales integrados por distintas componentes, con la principal ventaja de que al normalizar los datos de los indicadores mediante la varianza, impide que los resultados se vean afectados por valores extremos que normalmente introducirían sesgos en los resultados.

Se estima una mayor vulnerabilidad para los escenarios futuros 2030, que para el escenario base 2010. Las estimaciones para las proyecciones del escenario A1B tiene los índices de vulnerabilidad más altos; esto podría deberse a que esta familia de escenarios se basa en un crecimiento sostenido durante el horizonte estudiado creando así una mayor demanda de agua potable para una población más grande, mientras que el escenario A2 tendrá un crecimiento demográfico que tenderá a estabilizarse con el paso del tiempo.

El hecho de que la componente de suministro de agua sea la que más relevancia tiene en los índices finales, advierte que es necesario aplicar medidas de adaptación en casi todas las regiones evaluadas para asegurar el correcto suministro a la población en cuanto a una adecuada calidad y cantidad de agua potable.

Se observa que habrá condiciones más adversas si no se toman las medidas adecuadas para incrementar la capacidad adaptativa del país en general, y en particular en el sector hídrico responsable del abastecimiento de agua a la población. Esto podría ocurrir tanto por la falta imprevista del recurso o por la mala calidad del mismo o incluso por falta de infraestructura. En especial en las regiones identificadas en esta evaluación con baja capacidad adaptativa.

En las décadas futuras es posible que se presenten variaciones sensibles en el clima, sin embargo el incremento de la vulnerabilidad en las regiones del país estará dado principalmente por los cambios internos de las regiones, más que por las variaciones climáticas estimadas por los escenarios. Por lo que tomar medidas de adaptación de inmediato resultara muy importante para enfrentar los retos del futuro.

Finalmente, la falta de información disponible, tanto información actual como en cuanto a proyecciones, es una limitante en estudios como este. Los retos del cambio climático advierten de la necesidad de dar la importancia adecuada a la recopilación de información específica para monitorear las evidencias de los impactos, así como de asegurarse de su correcta difusión y accesibilidad, para estar al alcance de los organismos interesados en realizar estudios de este tipo. La creación de un sistema que genere información climática, social, de disponibilidad de agua superficial o subterránea y de infraestructura debe ser de alta prioridad para los organismos del sector hídrico.

Referencias

- Anja Voß, Joseph Alcamo, Ilona Bärlund, Frank Voß, Ellen Kynast, Richard Williams, Olli Malve, Continental scale modelling of in-stream river water quality: a report on methodology, test runs, and scenario application, 2012
- Antoinette I. Brenkert y Elizabeth I. Malone. 2005. Modeling vulnerability and resilience to climatechange: a case study of India and indian states. *Climatic Change* 72: 57–102
- B. L. Turner II, R. E. Kasperson, P. A. Matson, J. J. McCarthy, R. W. Corell, L. Christensen, N. Eckley, J. X. Kasperson, A. Luers, M. L. Martello, C. Polsky, A. Pulsipher, y A. Schiller. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100:8074–8079, 2003.
- Carbajal, J. (2010) Zonas costeras bajas en el Golfo de México ante el incremento del nivel del mar. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (Eds.) (2010) Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. SEMARNAT-INE, UNAM-ICMYL, Universidad Autónoma de Campeche, 359-380.
- CNA (2003) Estadísticas del Agua en México 2003.
- CNA (2004) Estadísticas del Agua en México. 2004.
- CONAGUA (2007) Regiones Hidrológicas administrativas Shapefile, formato vectorial, escala 1:250000, de la página <http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/rha250kgw.xml?xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc.html.xsl&indent=no>
- CONAGUA (2007) Estadísticas del agua en México. Edición 2007.
- CONAGUA (2008) Estadísticas del agua en México. Edición 2008.
- CONAGUA (2009) Estadísticas del agua en México. Edición 2010.
- CONAGUA (2008) Estadísticas del agua, Región Hidrológico administrativa IV Región Balsas Edición 2009.
- CONAGUA (2010) Estadísticas del Agua en México. Edición 2010.
- CONAGUA (2011) Agenda del Agua, 2030. México, D.F., 2011.
- CONAGUA (2011) Estadísticas del agua en México, Edición 2011.
- CONAPO (2010) Indicadores Demográficos Básicos. Índices de marginación. http://www.portal.conapo.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=125&Itemid=193. [Consultada Octubre 2012].
- Conde, C. (2005) Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático: descripción de un estudio de caso y los retos en las investigaciones actuales. <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/508/vulnerabilidad.pdf> [consultada Agosto 2012]
- Cutter, S.L. 1996. Vulnerability to environmental hazards. *Progress in Human Geography* 20, 529-539.
- Domínguez, J. y Jiménez, P. (2010) El Acceso al Agua y Saneamiento: Un problema de Capacidad Institucional Local. Primer Congreso Red de Investigadores Sociales Sobre Agua.
- Escalante, C. y Reyes, L. (2005) Análisis de sequías. Vol. I y II. México, UNAM, Facultad de Ingeniería, ISBN 970-32-2781-3, pp: 1110.

- Escolero, O.A., Martínez, S.E., Kralisch, S., Perevochtchikova, M. (2009) Vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable de la Ciudad de México en el contexto de cambio climático. Informe Final. Instituto de Geología-UNAM, Centro de Ciencias de la Atmósfera – UNAM, CVCCCM, ICyTDF, pp 165.
- Füssel, H. (2009) Review and quantitative analysis of indices of climate change exposure, adaptive capacity, sensitivity, and impacts. Background note to the World Development Report 2010. Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), Germany, 35p.
- Füssel et al (2009), Füssel, H.-M. and Klein, R. J. T: in press, 'Climate change vulnerability assessments: An evolution of conceptual thinking', *Clim. Change*.
- García, E. (1964) Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). *México*, pp 71.
- Giorgi F. & L. O. Mearns, Calculation of average, uncertainty range, and reliability of regional climate changes from AOGCM simulations via Reliability Ensemble Averaging (REA) method, *J. Climate*, 2002.
- Giorgi, F. & Mearns, L. (2002) Calculation of Average, Uncertainty Range, and Reliability of Regional Climate Changes from AOGCM Simulations via the "Reliability Ensemble Averaging" (REA) Method. *Journal of Climate*, 15, 1141-1158.
- Hammilton Anna T., Barbour Michael T. Bierwagen Rita G. , Implications of Global Change por Maintenance of Water Cuality and Ecological Integrity in the Context of Current Water Laws and Environmental Policies, US Governement, 2010.
- Hernandez et al. (2011). Hernández, C., Aguilera, A. y Castro, E. (2011) Situación de las enfermedades gastrointestinales en México. *Enf Inf Microbiol*, 31(4), 137-151.
- Ibararán, M., Malone, E. & Brenkert A. (2010) Climate change vulnerability and resilience: current status and trends for Mexico. *Environ Dev Sustain*, 12, 365–388.
- Ibararán, M., Rodríguez, M. (2007) Estudio sobre Economía del Cambio Climático en México. INE, Universidad Iberoamericana Puebla, INE/ADE-008/2007, pp 70.
- IMTA, 2011: Manual del sistema SEDEPECC, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, subcoordinación de hidrometeorología, Febrero 2011
- INE (2000), Primera comunicación nacional ante la convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), Instituto Nacional de Ecología, México, 2000.
- INE (2006), Tercera comunicación nacional ante la convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), Instituto Nacional de Ecología, México, 2006.
- INE (2009), Cuarta comunicación nacional ante la convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), Comisión Intersecretarial de Cambio Climático, México, 2009.
- INECC (2012), Quinta comunicación nacional ante la convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), Comisión Intersecretarial de Cambio Climático, México, 2012.
- INEGI (2010) Censo de Población y Vivienda 2010. [consultada Agosto 2012]

report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press.

- Patnaik, U. & Narayanan, K. (2005) Vulnerability and Climate Change: An Analysis of the Eastern Coastal Districts of India. Proceedings International Workshop on Human Security and Climate Change, Asker, Oslo.
- Qin, B., Zhu, G., Gao, G., Zhang, Y., Li, W., Paerl, H., Carmichael, W. (2010) A drinking water crisis in Lake Taihu, China: Linkage to climatic variability and lake management. *Environmental Management*, 45(1), 105–112.
- Rehana & Mujumdar (2007) S. Rehana, P.P. Mujumdar, Climate Change Induced risk in Water Quality Control Problems. 2012
- SMN (2010a) Temperatura media anual. [consultada Abril 2012] http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=108%3A-temperatura-media-por-entidad-federativa&catid=1&Itemid=77
- SMN (2010b) Precipitación media anual. [consultada Abril 2012] http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=12&Itemid=77
- Wu Xinmin, Ling Yi, Gao Peng, Shao Hongbo, Wang Fei, The Runoff Declining Process and Water Quality in Songhuajiang River Catchment, China Under Global Climatic Change, China 2012.