

**Atlas de vulnerabilidad hídrica de México ante el cambio
climático: vulnerabilidad de las grandes zonas de riego ante el
cambio climático
(RD-1004.1)**

INFORME FINAL

SUBCOORDINACIÓN DE INGENIERIA DE RIEGO
COORDINACIÓN DE RIEGO Y DRENAJE

Jefe de proyecto
Dr. Waldo Ojeda Bustamante

Colaborador
Dr. Mauro Iñiguez Covarrubias

México, 2010

**Atlas de vulnerabilidad hídrica de México ante el cambio climático:
vulnerabilidad de las grandes zonas de riego ante el cambio climático
RD-1004.1**

Informe final

INDICE

RESUMEN EJECUTIVO	1
1. OBJETIVO GENERAL	1
2. ANTECEDENTES	1
3. METODOLOGÍA.....	2
3.1. Compilación de información base y selección del área de estudio	2
3.2. Caracterización agroclimática	2
3.3. Estimación de impactos del cambio climático	3
3.4. Estimación de la vulnerabilidad hídrica global	3
4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES	3
4.1 Resultados obtenidos.....	3
4.2 Conclusiones	3
5. ANEXO	4
Resumen.....	4
5.1. Introducción	4
5.2 Panorama de la agricultura de riego en México	5
5.3 Marco metodológico	6
5.4 Variables y fuentes de datos	8
5.5 Vulnerabilidad de la agricultura de riego	14
5.6 Conclusiones y recomendaciones	28
5.7 Referencias.....	29

RESUMEN EJECUTIVO

Atlas de vulnerabilidad hídrica de México ante el cambio climático: vulnerabilidad de las grandes zonas de riego ante el cambio climático

PROYECTO RD-1004.1

El IMTA en el marco del Programa Especial de Cambio Climático y el Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012, ha realizado varios estudios sobre el impacto del cambio climático en los recursos hídricos del país. Durante el año 2010 se llevó a cabo un proyecto multidisciplinario para elaborar el Atlas de vulnerabilidad hídrica de México ante el cambio climático, que tuvo como objetivo poner a disposición de la sociedad y de las instituciones, información accesible que permita conocer la vulnerabilidad espacial hídrica del país ante escenarios de cambio climático. El atlas incluye seis capítulos, el capítulo 5 sobre “Vulnerabilidad de la agricultura de riego en México ante el cambio climático” fue realizado por personal de la Coordinación de Riego y Drenaje a través del proyecto RD-1004.1. El presente informe muestra las actividades realizadas y resultados obtenidos por dicho proyecto.

En el capítulo desarrollado se exponen un conjunto de indicadores físicos, técnicos y socioeconómicos desarrollados para estimar la vulnerabilidad de las zonas de riego a nivel nacional para los ciclos agrícolas otoño-invierno y primavera-verano, con base en proyecciones regionalizadas de temperatura y precipitación para fines del presente siglo, según dos posibles escenarios de emisiones A1B y A2.

1. OBJETIVO GENERAL

Estimar la vulnerabilidad hídrica de los principales distritos de riego del país

2. ANTECEDENTES

El cambio climático es considerado en este momento como el fenómeno natural de mayor impacto para la convivencia de los seres humanos en el presente siglo, siendo las actividades agrícolas las de mayor vulnerabilidad. Dicho fenómeno afectará el desarrollo y sustentabilidad de la agricultura de riego. No se conoce con precisión dichos efectos, espacialmente y temporalmente, y las posibles acciones de adaptación, por lo que el país requiere de estudios sobre el impacto y vulnerabilidad regional al cambio climático en dicho sector.

El cambio climático es un hecho incuestionable e inminente con el que hay que adaptarse a “convivir”. Varias zonas de riego del país son muy vulnerables al cambio climático por su

situación geográfica, cultivos que se producen, y características socioeconómicas y tecnológicas. Los sistemas agrícolas son ecosistemas en continua evolución, por lo que estimar el impacto y la vulnerabilidad al cambio climático de dichos sistemas es una tarea difícil, ya que implica primeramente la necesidad de estimar cuales serán los cambios en los patrones de las variables climáticas, principalmente la lluvia y la temperatura. Para la mayor parte del país se prevé, en promedio para fines de siglo, una disminución en la precipitación del orden del 20% y un incremento en la temperatura media anual del orden de tres grados centígrados. Estimar la vulnerabilidad de un sistema agrícola no solo depende del grado de exposición climática, sino también su sensibilidad y de la habilidad del sistema para soportar los impactos, recuperarse o adaptarse al cambio climático

El riego es una práctica fundamental en la agricultura para asegurar una producción rentable en las zonas áridas y semiáridas del país. La variabilidad climática y los efectos potenciales del cambio climático, constituyen las principales amenazas de la agricultura de riego del presente siglo. En este sentido es fundamental generar conocimiento sobre, los impactos espacial y temporal, de la vulnerabilidad del sector agrícola de riego ante la variabilidad y el cambio climático, para implantar políticas de estado hacia identificar e implantar acciones de adaptación de dicho sector.

3. METODOLOGÍA

3.1. Compilación de información base y selección del área de estudio

Se compiló información climática histórica promedio de precipitación y temperatura para el periodo base comprendido de 1961 a 1990 y las proyecciones de cambio climático para tres periodos futuros: 2011-2040, 2041-2070, y 2071-2098 (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007). Se compiló información de producción agrícola de bases de datos existentes en Conagua y SAGARPA. Así como sobre las características de acuíferos de país de la Conagua. Del Consejo Nacional de Población se usó la base de datos a nivel municipal sobre los índices de marginación. Se consultó el portal del Center for Remote Sensing of Ice Sheets de la University of Kansas, USA, para consultar información espacial en formato electrónico de la superficie inundable por efecto de un incremento en el nivel del mar. Se tuvo acceso de INEGI a los Datos vectoriales edafológicos y datos del VIII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal.

3.2. Caracterización agroclimática

Se seleccionaron las variables que son función de alguno de los tres componentes para estimar la vulnerabilidad de la agricultura de riego, seleccionando seis indicadores de exposición, ocho de sensibilidad y nueve de capacidad de adaptación. Dichos indicadores fueron la base para estimar la variación espacial de cada componente de vulnerabilidad.

3.3. Estimación de impactos del cambio climático

Se estimaron espacialmente los Impactos potenciales, expresado por el grado de exposición y sensibilidad al cambio climático, que representan la magnitud del daño natural esperado cuando se conjugan determinadas condiciones climáticas.

3.4. Estimación de la vulnerabilidad hídrica global

Usando los componentes de vulnerabilidad: exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación se estimó la vulnerabilidad global de las zonas de riego del país. Se generaron mapas que muestran la vulnerabilidad espacial al cambio climático de la agricultura de riego para los ciclos agrícolas OI y PV bajo los escenarios A1B y A2. Se generaron en total dieciséis mapas de vulnerabilidad al cambio climático para la agricultura de riego del país, de los cuales 6 fueron para representar la exposición al cambio climático, 3 para representar la sensibilidad, 3 para representar la capacidad de adaptación, y 4 para representar la vulnerabilidad global.

4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

4.1 Resultados obtenidos

- Desarrollo de indicadores para estimar la vulnerabilidad de las grandes zonas de riego ante el cambio climático
- Documento técnico-científico sobre la vulnerabilidad de las zonas de riego al cambio climático, capítulo del atlas de vulnerabilidad hídrica de México ante el cambio climático.
- Serie de mapas de vulnerabilidad hídrica de las zonas de riego del país

4.2 Conclusiones

Los indicadores normalizados para estimar los componentes de la vulnerabilidad: exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación al cambio climático, fueron calculados espacialmente para generar mapas de vulnerabilidad a nivel nacional. En los mapas se muestran los resultados de la clasificación de las zonas agrícolas de riego en función del grado de vulnerabilidad. Los mapas pueden servir como un instrumento de apoyo para definir políticas gubernamentales y elaborar planes de adaptación en regiones prioritarias del país. Los resultados indican que las zonas agrícolas más vulnerables son las zonas marginadas, con baja capacidad de adaptación y limitado desarrollo tecnológico y socioeconómico.

En el anexo se presenta el capítulo del libro comprometido en el marco del proyecto.

5. ANEXO

Vulnerabilidad de la agricultura de riego de México al cambio climático

Resumen

El riego es una práctica fundamental en la agricultura para asegurar una producción rentable en las zonas áridas y semiáridas del país. La variabilidad climática y los efectos potenciales del cambio climático, constituyen las principales amenazas de la agricultura de riego del presente siglo. En este contexto, resulta primordial caracterizar la vulnerabilidad de las zonas agrícolas de riego a los efectos potenciales del cambio climático. En este capítulo se muestran un conjunto de indicadores físicos, técnicos y socioeconómicos desarrollados para estimar la vulnerabilidad de las zonas de riego a nivel nacional para los ciclos agrícolas otoño-invierno y primavera-verano, con base en proyecciones regionalizadas de temperatura y precipitación para fines del presente siglo, según dos posibles escenarios de emisiones A1B y A2. Indicadores normalizados para la exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación al cambio climático, fueron calculados espacialmente para generar mapas de vulnerabilidad a nivel nacional. En los mapas se muestran los resultados de la clasificación de las zonas agrícolas de riego en función del grado de vulnerabilidad. Éstos pueden servir como un instrumento de apoyo para definir políticas gubernamentales y elaborar planes de adaptación en regiones prioritarias del país. Los resultados indican que las zonas agrícolas más vulnerables son las zonas marginadas, con baja capacidad de adaptación y limitado desarrollo tecnológico y socioeconómico.

5.1. Introducción

El cambio climático debido al incremento en la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero podría modificar los flujos térmicos y dinámicos de la atmósfera según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC por sus siglas en Inglés, 2007). Los Modelos de Circulación General Atmosférica (MCGA) prevén para México incrementos significativos de la temperatura y una disminución de la precipitación para fines del siglo XXI, con un incremento en la frecuencia de años menos lluviosos y más calientes en la mayor parte del territorio nacional (Montero y Pérez, 2008). El sector agrícola será afectado por estos cambios climáticos debido a su alta sensibilidad a cambios en los factores ambientales (Ojeda, *et al.*, 2008). Diversos estudios de impactos del cambio climático basados en respuestas biofísicas de los cultivos indican que el cambio climático podría provocar repercusiones adversas en la agricultura.

Varias zonas de riego del país son actualmente vulnerables a la variabilidad climática, debido a la baja disponibilidad hídrica producto de los periodos de sequía recurrentes en el

pasado reciente. La agricultura de riego representa una actividad esencial para el desarrollo del país y la seguridad alimentaria, por ende, es de interés nacional caracterizar su vulnerabilidad con el propósito de contar con instrumentos cuantitativos de apoyo para definir políticas públicas que identifiquen las regiones agrícolas más sensibles al cambio climático. En este trabajo se presenta un análisis espacio-temporal de la vulnerabilidad al cambio climático de las zonas de riego de México, con base en indicadores biofísicos, técnicos y socioeconómicos.

5.2 Panorama de la agricultura de riego en México

México es un país tradicionalmente agrícola que cuenta con 30 millones de ha potencialmente cultivables para uso agrícola, que representan 15 % de su superficie total (INEGI, 2009). Anualmente se cultivan en promedio, cerca de 20 millones de ha que representan 70 % de la superficie agrícola, con un rango de variación de 60 % a 85 %. Para el período 1980-2007, la superficie total cosechada promedio fue de 18.6 millones de ha (Figura 5.1), de las cuales, 27 % corresponden a la modalidad de riego y 73 % a la modalidad de temporal. La superficie cosechada bajo riego es menor que la de temporal; sin embargo, la productividad bajo riego (expresada en \$/ha) es 300 % mayor que la de temporal. Por ello, las zonas de riego contribuyen con 53 % y las zonas de temporal con 47 % del valor total de la producción cosechada.

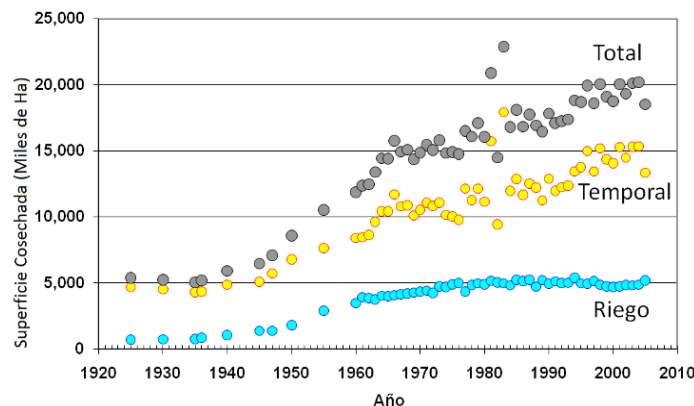


Figura 5.1. Evolución anual histórica de la superficie cosechada por modalidad (Elaboración propia con datos del SIAP, 2009; CONAGUA, 2009a).

En el México pre-revolucionario el desarrollo de las zonas de riego fue esencialmente de carácter privado. Posteriormente, la consolidación de los gobiernos federales al finalizar el periodo revolucionario y la promulgación de la ley sobre irrigación en 1926 permitieron la creación de la Comisión Nacional de Irrigación para impulsar el desarrollo de la agricultura de riego. En el período de 1926-1931 se realizaron importantes inversiones que dieron inicio a los grandes distritos de riego. En 1931 se estableció el primer distrito de riego en Pabellón, Aguascalientes, abastecido por la Presa "Plutarco Elías Calles". Actualmente, México cuenta con 85 distritos de riego que cubren 54 % de la superficie de riego y 39 mil

unidades de riego que cubren la superficie de riego restante (CONAGUA, 2010). La distribución actual de las unidades y distritos de riego se muestra en el Mapa 5.1.



La agricultura de riego ha sido un factor importante para el desarrollo del país. México ocupa el sexto lugar mundial en superficie agrícola con infraestructura para riego, estimada en 6.5 millones de ha (CONAGUA, 2010). Sin embargo, desde la década de los setentas, únicamente se cultivan en promedio 5 millones de ha (Figura 5.1), que incluye segundos cultivos. El porcentaje promedio de segundos cultivos en los últimos 20 años es del orden de 11 % de la superficie física de riego anual cultivada, estimada en 4.4 millones de ha, que representa 68 % de la superficie agrícola con infraestructura de riego.

5.3 Marco metodológico

En los sistemas de producción agrícola intervienen factores físicos, químicos y biológicos; así como factores socioeconómicos e institucionales. Un sistema de producción agrícola incluye tres subsistemas interdependientes.

- El subsistema natural (SN) contiene los procesos físicos, químicos y biológicos.
- El subsistema socioeconómico (SSE), incluye las actividades sociales (humanas) relacionadas con el uso de sistemas de producción agrícola.

c) El subsistema institucional (SI) involucra el contexto legal, regulatorio y organizacional donde ocurren los procesos de decisión, planeación y manejo agrícola.

En la Figura 5.2 se muestran los tres subsistemas que interactúan en un sistema de producción agrícola.

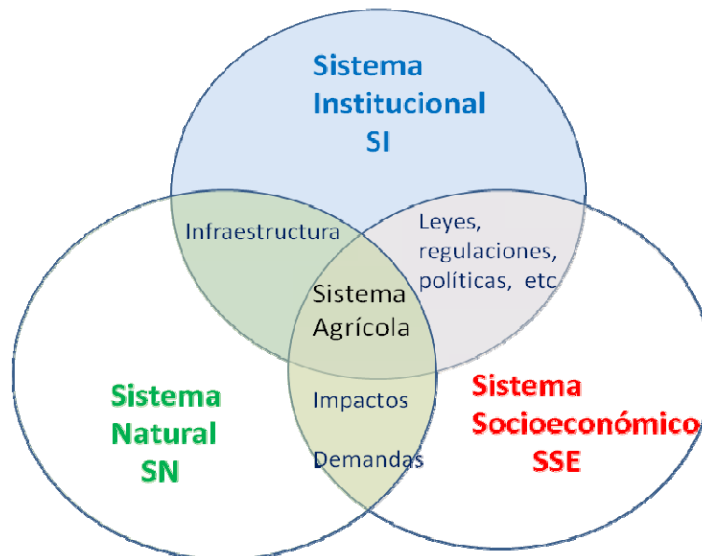


Figura 5.2. Interacciones en un sistema de producción agrícola (Loucks y van Beek, 2005).

El término vulnerabilidad se aplica en las disciplinas naturales y sociales, y se define según la orientación y perspectiva del estudio; éste indica el grado de fragilidad de un individuo o sistema. En un contexto social y ambiental la vulnerabilidad se refiere a la pérdida potencial de una característica inherente del individuo (grupo o sistema), o una función que combina la sensibilidad y la fuerza a las cual el individuo o sistema es sensible.

El IPCC (2001) señala que la vulnerabilidad es una función de tres componentes: Exposición (E), Sensibilidad (S) y Capacidad de Adaptación (CA). La exposición se define como la posibilidad de un sistema de quedar expuesto a un cambio ante una posible situación desestabilizadora positiva o negativa. La sensibilidad se refiere al grado en que un sistema responde a fluctuaciones del entorno. La capacidad de adaptación o resiliencia se refiere a la capacidad de un sistema para recuperar su estado inicial ante un cambio permanente o temporal de su entorno. Los estudios de vulnerabilidad son la base para definir acciones de adaptación y mitigación al cambio climático en regiones críticas detectadas por interrelaciones de los componentes de vulnerabilidad como se indica en la Figura 5.3.

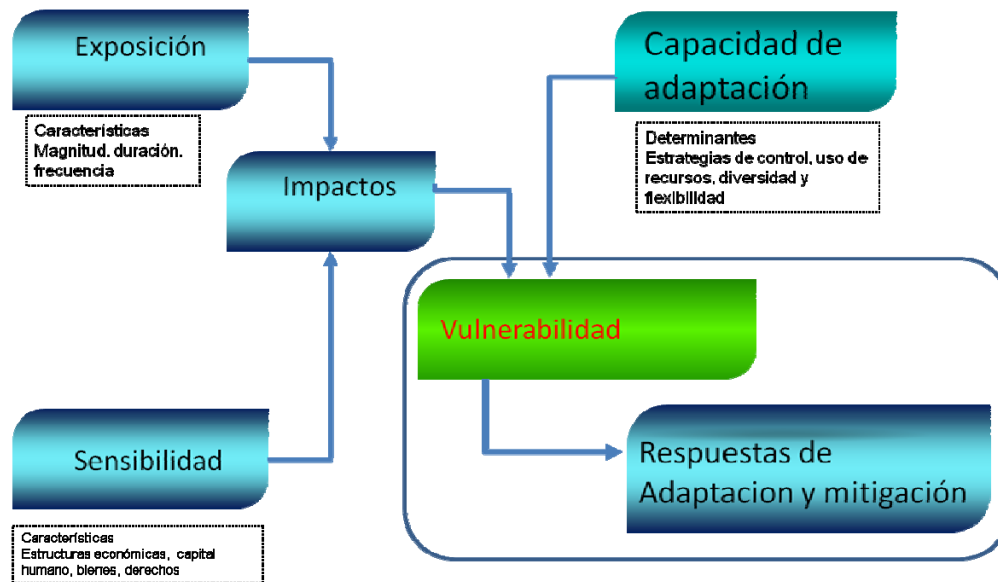


Figura 5.3. Componentes para evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático (Gbetibouo, y Ringler, 2009).

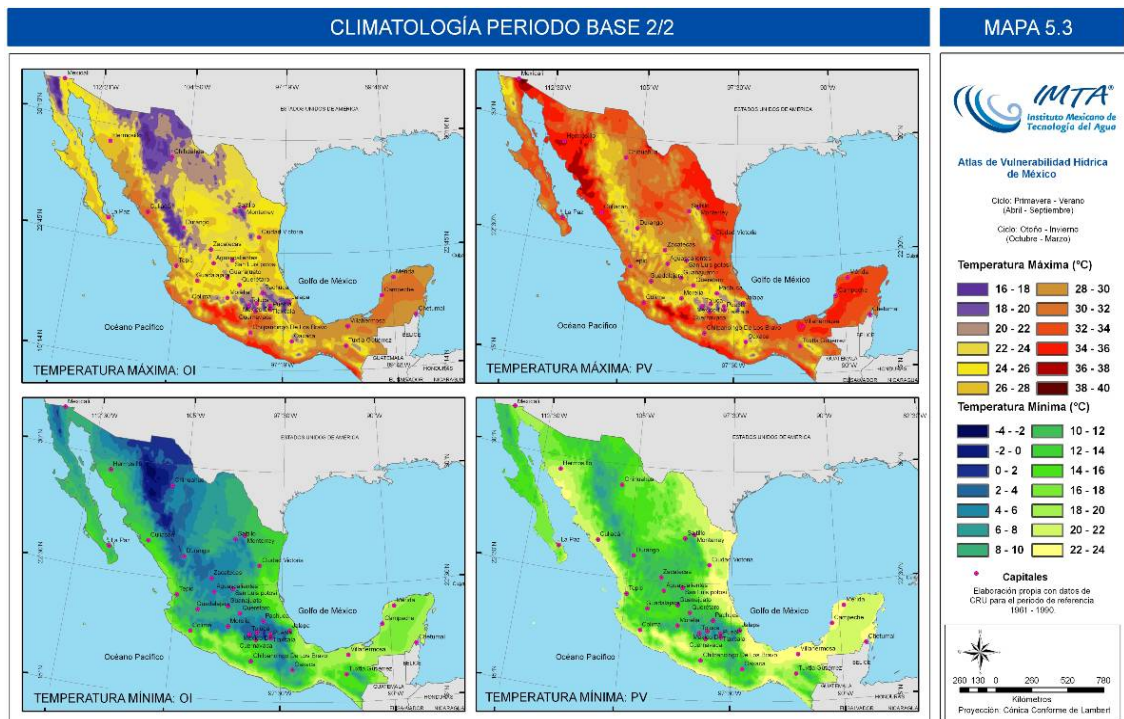
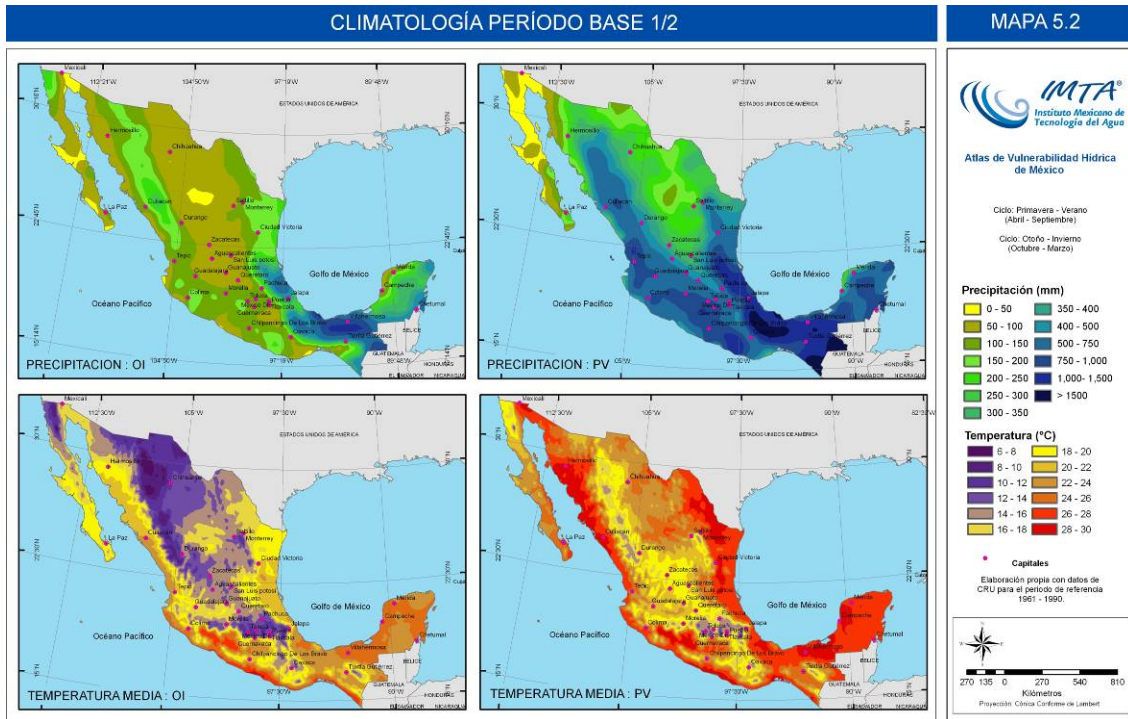
La vulnerabilidad (V) de un sistema al cambio climático se expresa a través de los componentes (Figura 5.3): los Impactos potenciales (I) que representan la magnitud del daño natural esperado cuando se conjugan determinadas condiciones climáticas y la CA que representa la habilidad del sistema para soportar los impactos, recuperarse o adaptarse al cambio climático. La vulnerabilidad es función de I y CA; I es función de E y S, esta relación puede ser expresada mediante la siguiente ecuación.

$$V = f(I - CA) = f(E + S - CA) \quad (5.1)$$

De acuerdo a la Ecuación 5.1, a mayor impacto mayor es la vulnerabilidad; mientras que, a mayor capacidad de adaptación menor es la vulnerabilidad.

5.4 Variables y fuentes de datos

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) tiene establecido para propósitos de gestión del agua, que un año agrícola comprende del 1 de octubre de un año cualquiera al 31 de septiembre del año siguiente; el año agrícola comprende dos ciclos anuales, el ciclo otoño-invierno (OI) y el ciclo primavera-verano (PV). La caracterización de la vulnerabilidad de la agricultura de riego se realizó por ciclo agrícola; el ciclo OI cubre el periodo de octubre a marzo del siguiente año y el ciclo PV de abril a septiembre. Durante el ciclo OI la precipitación es baja en la mayor parte del país (Mapa 5.2), por lo que la agricultura requiere de riego para suministrar los requerimientos hídricos de los cultivos. Para el caso de la temperatura, el ciclo OI, a diferencia del PV, presenta valores de temperatura cercanos al rango deseable para los cultivos (Mapas 5.2 y 5.3) en regiones bajo agricultura de riego.



Los datos de las variables climáticas históricas y proyectadas corresponden para una malla regular de 50x50 km, mientras que las variables socioeconómicas y productivas se describen a nivel de municipios; de manera que, los estados con mayor número de municipios como Oaxaca, Puebla, Veracruz, y estado de México, presentan mejor resolución espacial que estados con menor número de municipios como Baja California y Baja California Sur.

En los Cuadros 5.1, 5.2 y 5.3 se describen las variables, indicadores asociados, unidades y fuente información, para cada componente de la vulnerabilidad (exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación). En forma adicional, se identifican también las relaciones funcionales entre los indicadores y la vulnerabilidad. Se identifican dos tipos de relaciones funcionales: relación directa o inversa del valor de indicador con la vulnerabilidad.

5.4.1 Exposición al cambio climático

En este estudio, para el periodo 2071-2098 con los escenarios A1B y A2, se utilizaron proyecciones mensuales promedio de la temperatura y la precipitación con una malla regular de 50x50 km, obtenida por técnicas estadísticas de reducción de escala a partir de proyecciones de modelos MCGA. La base de datos de precipitación y temperatura fue obtenida a través de promedios ponderados de las proyecciones de 23 MCGA disponibles en el centro de distribución de datos del IPCC (www.ipcc-data.org) para los escenarios A1B y A2, de acuerdo a la metodología de confiabilidad de promedios de ensamble (Reliability Ensemble Averaging) aplicada por Montero y Pérez (2008).

El período de referencia considerado es de 30 años (1961-1990) y los valores históricos de las variables climáticas para México fueron extraídos de la base de datos TS3.0 de la Unidad de Investigación Climática de la Universidad de East Anglia de Inglaterra, conocida por CRU por sus iniciales en inglés (Climate Research Unit) que presenta series de datos mensuales en el periodo 1901-2006 a una resolución aproximada 50x50 km (Brohan, et al., 2006; Jones, 1994.).

En el Cuadro 5.1 se resumen los indicadores aplicados para estimar el grado de exposición al cambio climático, los primeros cuatro indicadores son las anomalías de las variables climáticas del período 2071-2098 con respecto al periodo base 1961-1990. Los dos últimos indicadores definen el impacto potencial de la frecuencia de ciclones y el área inundable por incremento del nivel del mar.

Cuadro 5.1. Indicadores y fuente de datos para estimar la exposición climática como componente de la vulnerabilidad al cambio climático.

Indicador	Clave	Unidad	Relación del indicador con la vulnerabilidad	Fuente
Anomalía de la temperatura media diaria en el ciclo agrícola	ΔT_{med}	Anomalía proyectada en °C en el ciclo agrícola para el período 2071-2098 con respecto al período base	$\Delta T_{med} \uparrow \Rightarrow Vul \uparrow$	REA-IMTA (Montero y Pérez, 2008) Base de datos histórica de CRU (Brohan, et al., 2006)
Anomalía de la temperatura máxima diaria en el ciclo agrícola	ΔT_{max}	Anomalía proyectada en °C en el ciclo agrícola para el período 2071-2098 con respecto al período base	$\Delta T_{max} \uparrow \Rightarrow Vul \uparrow$	
Anomalía de la precipitación acumulada en el ciclo agrícola	$\Delta Precip$	Cambio proyectado en % de la precipitación acumulada en el ciclo agrícola para el período 2071-2098 con respecto al base	$\Delta Precip \uparrow \Rightarrow Vul \uparrow$	
Probabilidad de sequías	$\Delta sequía$	Anomalía proyectada del índice estandarizado de precipitación (SPI6) para seis meses para los ciclos OI (marzo) y PV (septiembre) para el período 2071-2098 con respecto al período base	$\Delta Sequia \uparrow \Rightarrow Vul \uparrow$	
Frecuencia de ciclones	Ciclones	Probabilidad de ocurrencia de ciclones de 1960-2006	Ciclones $\uparrow \Rightarrow Vul \uparrow$	
Nivel mar 5m	Mar	Área inundable asumiendo un incremento del nivel de mar de 5 m	NMar $\uparrow \Rightarrow Vul \uparrow$	Peduzzi, Dao and Herold (2005) CReSIS, 2010. University of Kansas, USA

5.4.2 Sensibilidad al cambio climático

La sensibilidad al cambio climático se refiere al grado en que un sistema agrícola responde, positiva o negativamente, a cambios en los patrones climáticos. En el Cuadro 5.2 se presentan los indicadores usados para estimar la componente de sensibilidad para evaluar la vulnerabilidad al cambio climático.

En el Cuadro 5.2 se incluye el índice de diversificación de cultivos (I_d) que está relacionado con el grado de sensibilidad de un sistema agrícola al cambio climático. A mayor diversificación de un sistema agrícola menor es su sensibilidad. Este índice se estimó adaptando el índice de diversidad de Simpson usado en Ecología (Magurran, 1988) de acuerdo con la siguiente expresión:

$$I_d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_c} A_i^2}{A_t^2} \quad (5.2)$$

donde A_i es el área cosechada del cultivo i en ha; A_t es el área total cosechada en la zona agrícola de interés en ha; y N_c es el número total del cultivos reportados.

Cuadro 5.2. Variables y fuente de datos para estimar la sensibilidad como componente de la vulnerabilidad al cambio climático.

Indicador	Clave	Unidad	Relación del indicador con la vulnerabilidad	Fuente
Diversidad de cultivos	Diversa	Índice adimensional estimado con la Ecuación 5.2 que relaciona la suma de cuadrados de las superficies por cultivo con respecto al cuadrado de la suma total de la superficie cosechada por ciclo	Diversa $\uparrow \Rightarrow$ Vul \downarrow	SIAP, 2009
Tamaño parcela	Sup	Superficie de la parcela media de riego	Sup $\uparrow \Rightarrow$ Vul \downarrow	Censo Agropecuario 2007 (INEGI, 2009)
Población rural	Rural	% población con menos de 5000 hab	Sup $\uparrow \Rightarrow$ Vul \uparrow	Conapo (2005)
Uso de fertilizantes	Fertiliza	Uso de fertilizantes	Fertiliza $\uparrow \Rightarrow$ Vul \downarrow	Censo Agropecuario 2007 (INEGI, 2009)
Variabilidad en la precipitación	Precip	Desviación estándar de la precipitación anual acumulada periodo base (1961-1990)	Desv $\uparrow \Rightarrow$ Vul \uparrow	Base de datos histórica de CRU (Brohan, et al., 2006)
Variabilidad en el rendimiento	Rend	Rendimiento máximo del maíz de riego a nivel municipal para los años agrícolas 2002-2008	Rend $\uparrow \Rightarrow$ Vul \downarrow	SIAP, 2009
Evapotranspiración	ET _o	Evapotranspiración anual de referencia acumulada	ET _o $\uparrow \Rightarrow$ Vul \uparrow	Trabucco y Zomer, 2009
Degradación de suelos y acuíferos	Degrada	Suelos con problemas de sales solubles y/o sodio intercambiable y acuíferos con problemas de salinización, intrusión salina o sobreexplotación.	Degrada $\uparrow \Rightarrow$ Vul \uparrow	Inegi (1998) Conagua (2009b)

Un posible indicador de sensibilidad podría ser la variabilidad histórica en la disponibilidad de agua de las zonas de riego, que no fue incluido en este estudio por falta de datos a nivel nacional. Conviene anotar que no fue considerado también el efecto en la disponibilidad de agua de las zonas de riego que forman parte de cuencas binacionales compartidas entre México y E.E.U.U. de los ríos Bravo y Colorado y cuyo suministro de agua superficial depende de los derechos de asignación especificados en el Tratado de Aguas Internacionales entre México y Estados Unidos de 1944.

5.4.3 Capacidad de adaptación al cambio climático

La capacidad de adaptación al cambio climático se define como el grado en que un ajuste en prácticas, procesos o estructuras puede moderar o reducir el daño potencial, o ser una oportunidad de acciones derivadas del cambio climático (Yusuf y Francisco, 2009). La capacidad de adaptación depende de factores socioeconómicos, tecnológicos, institucionales y estructurales de la agricultura. En el Cuadro 5.3 se presentan los indicadores usados para estimar la componente de vulnerabilidad derivada de la capacidad de adaptación de las zonas agrícolas, con información disponible a nivel de municipios.

Cuadro 5.3. Indicador y fuente de datos para estimar la capacidad de adaptación como componente de la vulnerabilidad al cambio climático.

Indicador	Clave	Descripción	Relación del indicador con la vulnerabilidad	Fuente
Marginación	Margina	Grado de marginación	Margina ↑ ⇒ Vul ↑	Conapo (2005)
Analfabetismo	Analf	% población analfabeta mayor de 15 años	Analf ↑ ⇒ Vul ↑	Conapo (2005)
Cobertura de servicios	Servicios	% cobertura servicios en domicilios de productor (agua potable, drenaje y electricidad)	Servicios ↑ ⇒ Vul ↓	Censo Agropecuario 2007 (INEGI, 2009)
Dependientes	Depend	Número de dependientes económicos por productor agrícola	Depen ↑ ⇒ Vul ↑	Censo Agropecuario 2007 (INEGI, 2009)
Acceso a centros urbanos	Tiempo	Tiempo de acceso a centros urbanos	Tiempo ↑ ⇒ Vul ↑	Cimmyt (Hodson, et. al., 2002)
Ingreso agrícola	Agrícola	Porcentaje de ingresos del productor relacionados con la agricultura	Agrícola ↑ ⇒ Vul ↑	Censo Agropecuario 2007 (INEGI, 2009)
Intensidad en el uso de la tierra	IUT	Porcentaje de repetición de cultivos promedio en los años agrícolas 2002-2008 solo incluye agricultura de riego	IUT ↑ ⇒ Vul ↓	SIAP, 2009

Indicador	Clave	Descripción	Relación del indicador con la vulnerabilidad	Fuente
Mecanización agrícola	Mecánica	Porcentaje de agricultores que usan mecanización agrícola	Mecánica ↑ ⇒ Vul ↓	Censo Agropecuario 2007 (INEGI, 2009)
Cobertura de crédito/seguro	Crédito	Porcentaje de cobertura de crédito y seguro	Crédito ↑ ⇒ Vul ↓	Censo Agropecuario 2007 (INEGI, 2009)

5.5 Vulnerabilidad de la agricultura de riego

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

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

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

5.5.1 Estimación de mapas de vulnerabilidad

La vulnerabilidad de los sistemas de producción agrícola se representa con el apoyo de instrumentos cualitativos (mapas) y su cuantificación se estimó mediante el siguiente procedimiento:

- 1) Se seleccionaron las variables que capturan algún componente de la vulnerabilidad del sistema y que se contaba con información disponible a escala nacional (Cuadros 5.1, 5.2, y 5.3).
- 2) Los indicadores de las variables seleccionadas se normalizaron en el intervalo [0,100] para facilitar su comparación (Vincent 2004) mediante la siguiente expresión:

$$X_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} 100 \quad (5.3)$$

donde X_i es el valor normalizado de los valores de la variable x_i ; x_{\min} y x_{\max} son los valores mínimo y máximo del conjunto de datos x_i , respectivamente. Se asume que a mayor valor del indicador mayor es la vulnerabilidad.

Los indicadores normalizados de la componente exposición (E) se presentan en los Mapas 5.4 al 5.8. Los indicadores normalizados de la componente sensibilidad (S) se presentan en los Mapas 5.10 y 5.11. Mientras que los indicadores normalizados de la componente capacidad de adaptación (CA) se presentan en los Mapas 5.14 y 5.15.

- 3) Se estimaron las componentes de vulnerabilidad (E, S, y CA) mediante la siguiente expresión:

$$E, S, CA = \sum_{j=1}^n P_j X_j \quad (5.4)$$

donde P_j es el factor de ponderación y X_j es el valor normalizado del indicador j para estimar los componentes de vulnerabilidad. El índice de vulnerabilidad varía entre 0 y 100; esto es, de menor a mayor vulnerabilidad. Un valor de 100 indica la mayor vulnerabilidad. Los pesos (P_i) fueron estimados con el método propuesto por Lyengar y Sudarshan (1982) con la siguiente ecuación:

$$P_i = \frac{c}{\frac{1}{\sqrt{\text{var}_i(X_{i,j})}}} \quad (5.5)$$

donde P_i es el peso para el indicador normalizado i ; c es la constante de normalización estimada como la suma total de las inversas de las desviaciones estándar, de los n indicadores seleccionados.

$$c = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{\text{var}_i(X_{i,j})}} \quad (5.6)$$

El método de Lyengar y Sudarshan asegura que grandes variaciones de uno o más indicadores no dominen la contribución del resto de los demás indicadores.

Los pesos estimados de las variables seleccionadas para estimar la exposición al cambio climático se presentan en el Cuadro 5.4; para estimar la sensibilidad en el Cuadro 5.5; y para estimar el componente de capacidad de adaptación en el Cuadro 5.6.

Cuadro 5.4. Pesos estimados (P_i) de los indicadores usados (Cuadro 5.1) para estimar la exposición al cambio climático, escenarios A1B y A2 y ciclos agrícolas OI y PV.

Indicador	A1B		A2	
	OI	PV	OI	PV
ΔT_{med}	0.136	0.149	0.124	0.149
ΔT_{max}	0.122	0.140	0.112	0.144
$\Delta Precip$	0.135	0.137	0.188	0.139
$\Delta sequía$	0.203	0.157	0.199	0.145
Ciclones	0.201	0.208	0.188	0.211
Mar	0.202	0.209	0.189	0.212
Suma	1.0	1.0	1.0	1.0

Por ejemplo para calcular la componente E, usando los indicadores del Cuadro 5.1 y los respectivos pesos del Cuadro 5.4 para el escenario A1B y el ciclo OI, se obtiene la Ecuación 5.7 para estimar la componente E de la vulnerabilidad a partir de la ecuación 5.4.

$$E = 0.136\Delta T_{med} + 0.122\Delta T_{max} + 0.135\Delta Precip + 0.203\Delta sequia + 0.201ciclones + 0.202Mar \quad (5.7)$$

Cuadro 5.5. Pesos estimados (P_i) de los indicadores usados (Cuadro 5.2) para estimar la sensibilidad al cambio climático.

Indicador	Diversa	Sup	Rural	Fertiliza	Precip	Rend	ETo	Degrada	Suma
Peso	0.078	0.144	0.070	0.085	0.145	0.210	0.169	0.097	1.0

Cuadro 5.6. Pesos estimados (P_i) de los indicadores usados (Cuadro 5.3) para estimar la capacidad de adaptación al cambio climático.

Indicador	Margina	Analf	Servicios	Depende	Tiempo	Agrícola	IUT	Mecánica	Credito	Suma
Peso	0.122	0.145	0.133	0.176	0.051	0.115	0.060	0.062	0.134	1.0

4) La vulnerabilidad global V es estimada con la Ecuación (5.8) que asume un peso P_i de $\frac{1}{3}$ para cada uno de los componentes de la vulnerabilidad. La capacidad de adaptación fue ajustada para invertirla de signo (Ecuación 5.1) e indicar que a mayor capacidad de adaptación menor es la vulnerabilidad.

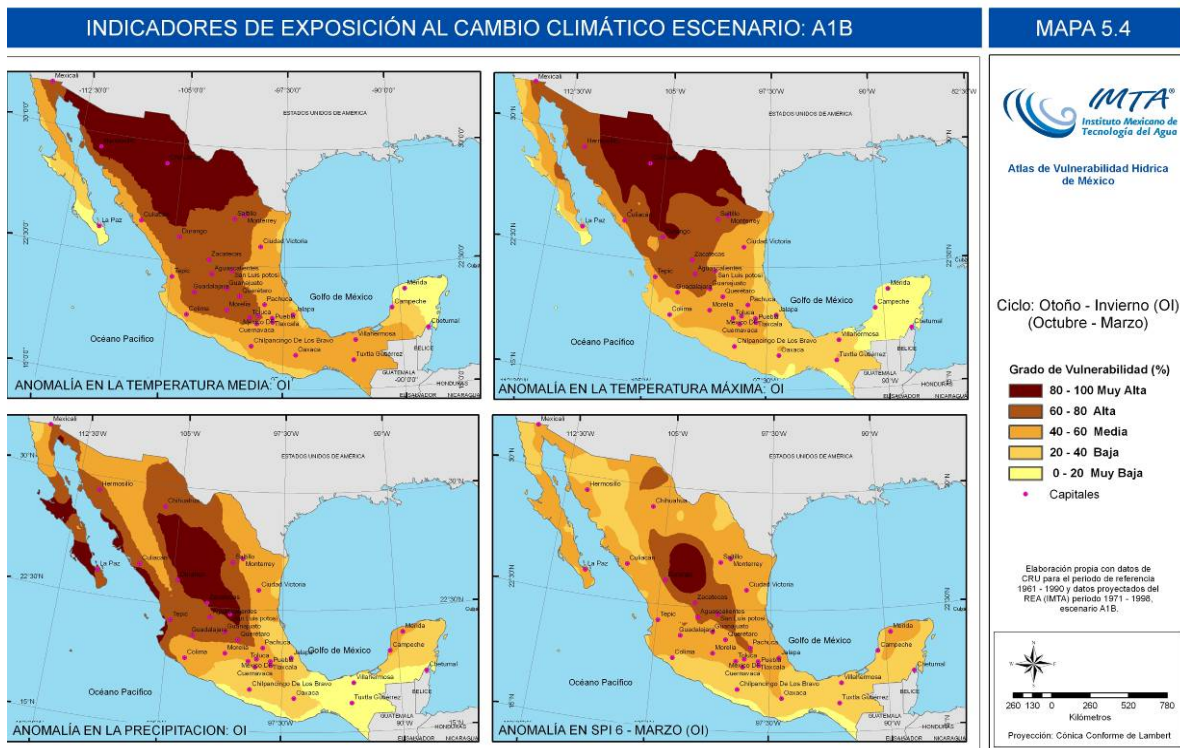
$$V = P_1 E + P_2 S + P_3 CA = \frac{E}{3} + \frac{S}{3} + \frac{CA}{3} \quad (5.8)$$

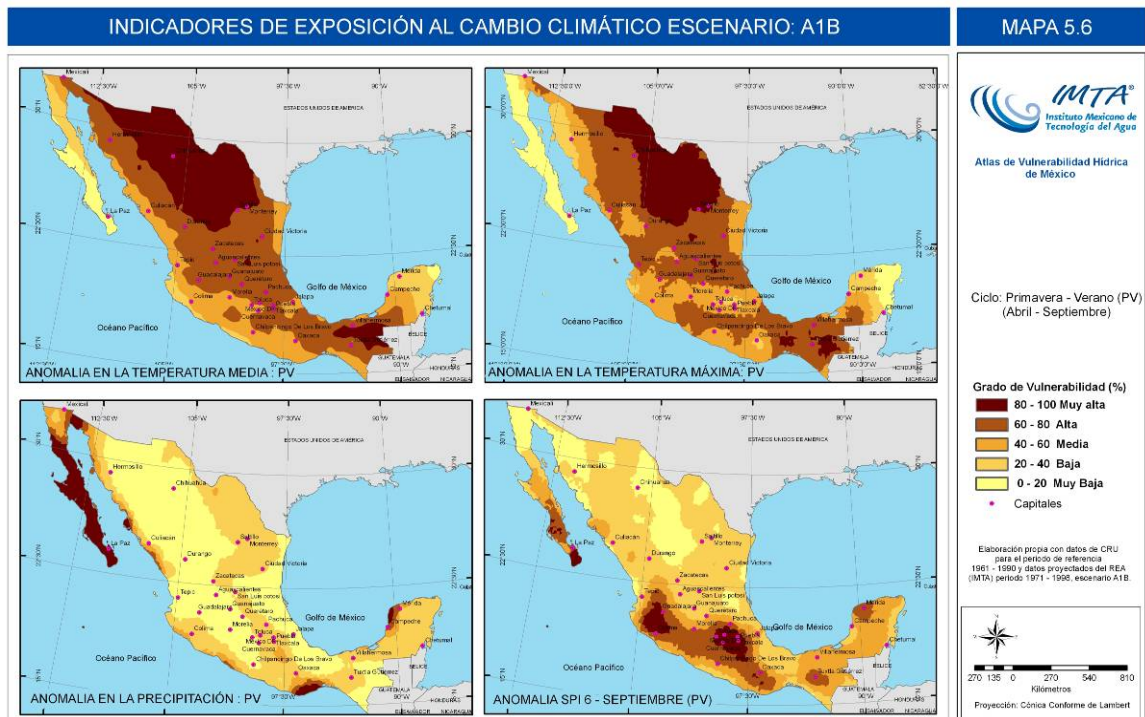
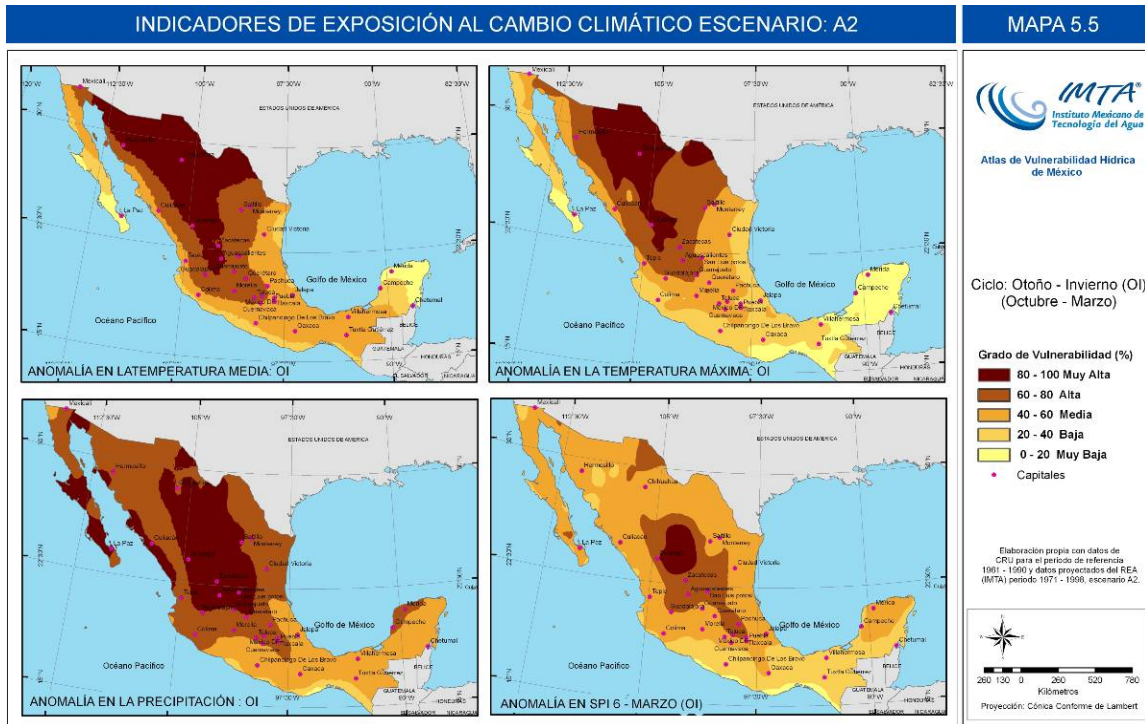
5) Generación del mapa global de vulnerabilidad (V) para la zona de estudio de acuerdo al cálculo espacial dada por la Ecuación 5.8.

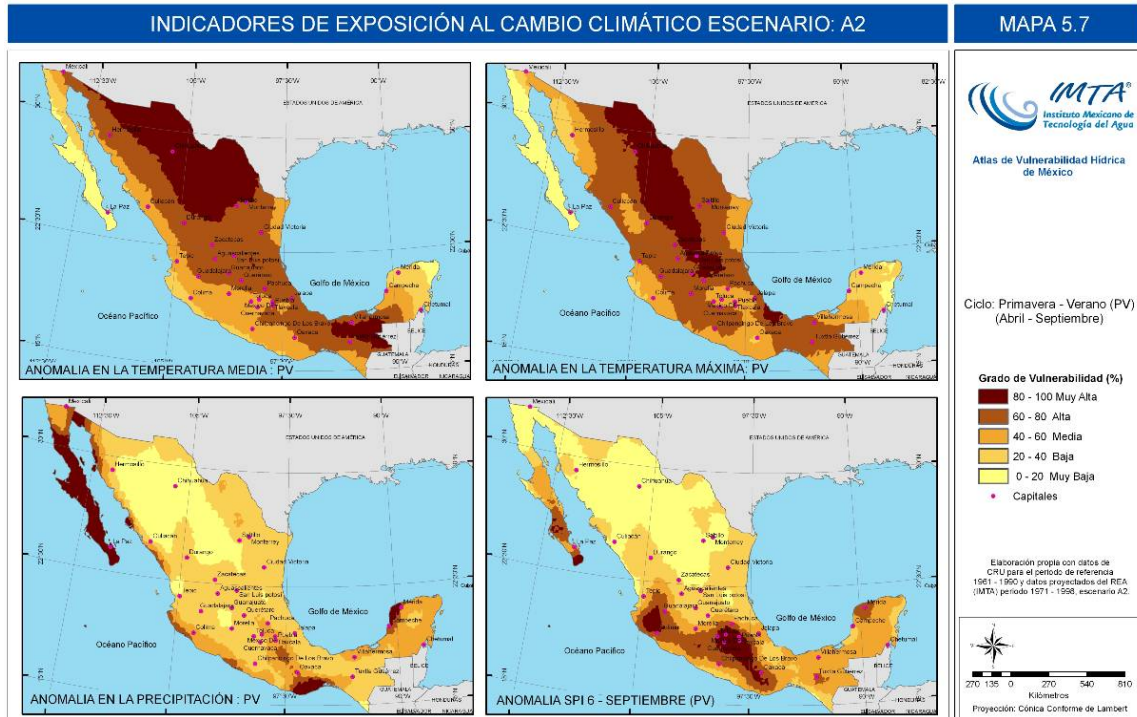
5.5.2 Mapas de exposición al cambio climático

La componente E está relacionada con el grado de estrés climático que se ejerce sobre una unidad de estudio. Se asume que las regiones con mayores cambios climáticos previstos tendrán más problemas para adaptarse. Para estimar el grado de exposición se generaron cuatro mapas de exposición climática con seis indicadores cada uno (Cuadro 5.1).

Se estimaron las anomalías de las variables climáticas: ΔT_{med} , ΔT_{max} , $\Delta Precip$ y $\Delta sequía$, y se normalizaron de acuerdo a la Ecuación 5.3. Estas anomalías normalizadas para el ciclo OI se presentan en los Mapas 5.4 y 5.5 para los escenarios A1B y A2, respectivamente. Para el ciclo PV, se elaboraron los Mapas 5.6 y 5.7 para los escenarios A1B y A2, respectivamente. Para el caso de los indicadores de ciclones y nivel del mar se elaboró el Mapa 5.8.





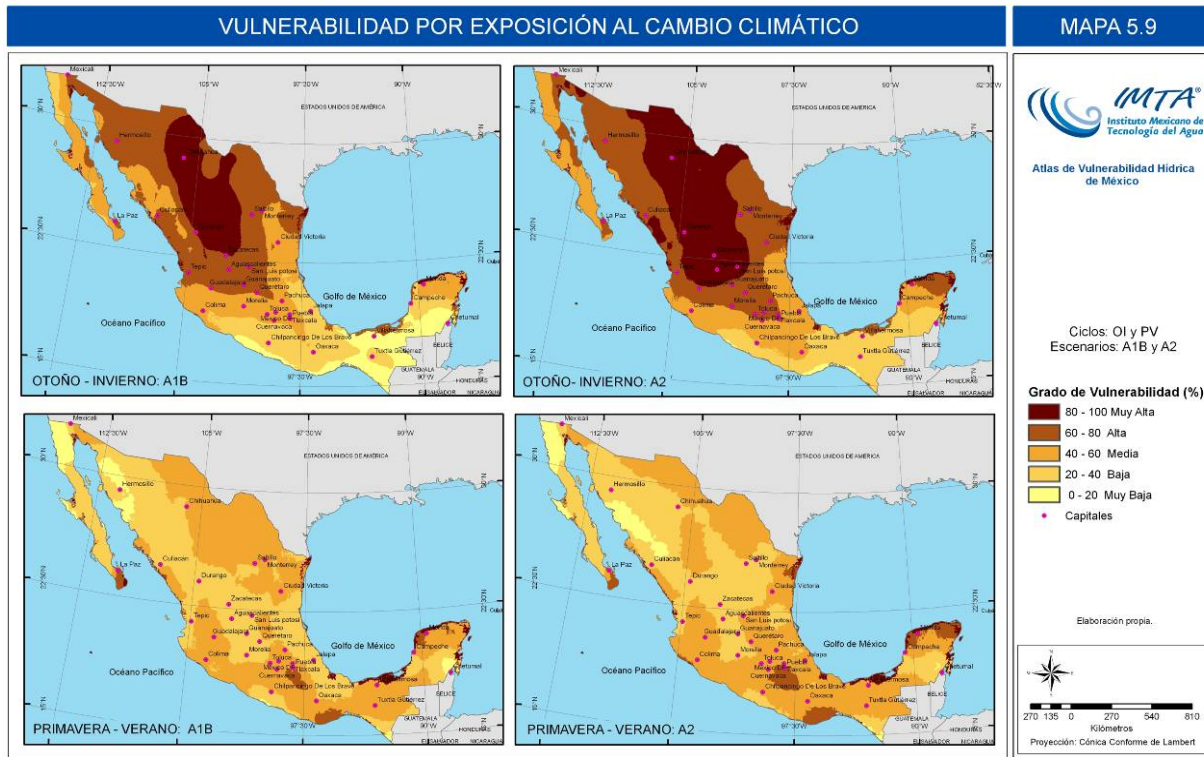


Se observa que las anomalías de precipitación para el ciclo OI resultan más contrastantes que las correspondientes para el ciclo PV (comparando Mapas de precipitación 5.4 y 5.5 con 5.6 y 5.7). Las regiones sur y sureste del país son las regiones de menor vulnerabilidad por exposición a cambios en los patrones de precipitación durante el ciclo OI. La península de Baja California muestra alta vulnerabilidad a anomalías en la precipitación para ambos ciclos agrícolas y ambos escenarios A1B y A2. La región norte centro presenta alta vulnerabilidad a cambios en la precipitación durante el ciclo OI pero para el ciclo PV su vulnerabilidad es baja.

Las mayores anomalías en las temperaturas (media y máxima), y en consecuencia mayor vulnerabilidad, se presentan para ambos ciclos en los estados del norte del país que colindan con los E.E.U.U. como se muestra en los Mapas 5.4-5.7. Se presenta una superficie con mayor vulnerabilidad por exposición a altas temperaturas en el ciclo PV que para el ciclo OI.

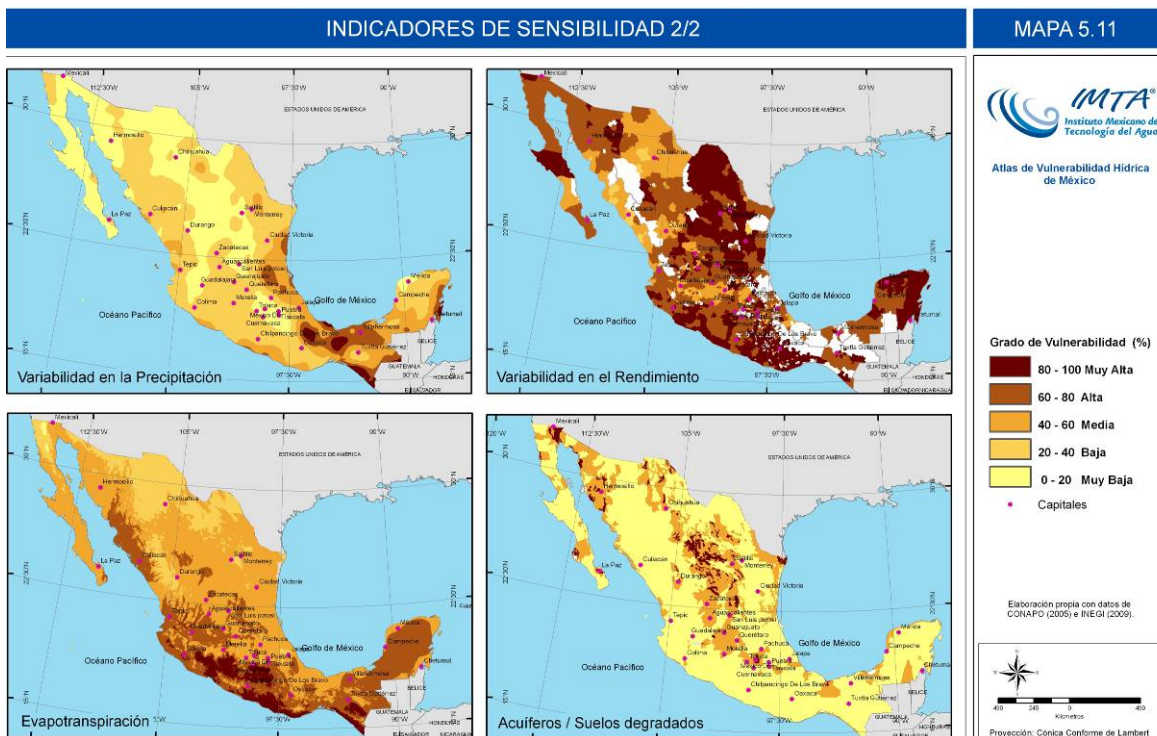
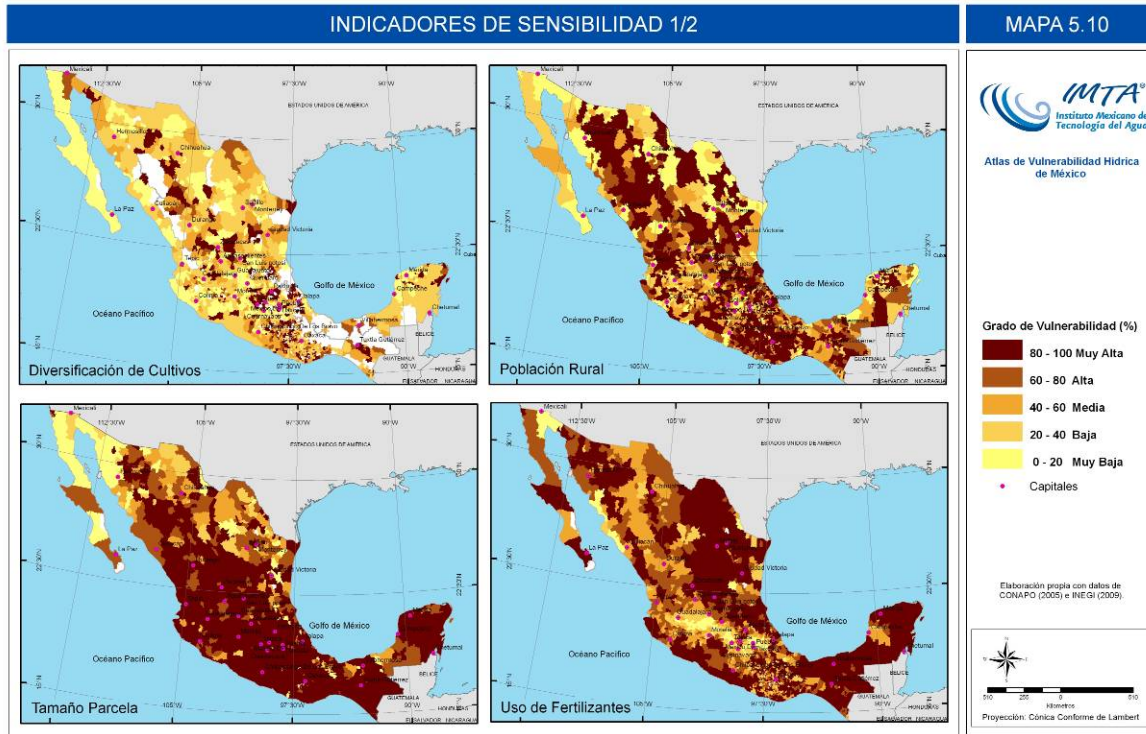
El cambio climático puede incrementar la intensidad de los eventos ciclónicos que impactan los estados costeros del país. En consecuencia las zonas agrícolas cercanas al mar presentan la mayor vulnerabilidad por exposición a eventos ciclónicos, principalmente las localizadas en el norte de Tamaulipas, la península de Yucatán, y el sur de la península de Baja California (Mapa 5.8). Otro de las repercusiones del cambio climático es el ascenso del nivel del mar, el Mapa 5.8 muestra la alta vulnerabilidad de algunas zonas costeras del país por incremento potencial en el nivel del mar.

Se generaron cuatro mapas de exposición al cambio climático (Mapa 5.9), para los dos ciclos agrícolas con dos escenarios de emisiones. Se observa un incremento en superficie total para las zonas de alta vulnerabilidad para el ciclo OI con respecto al ciclo PV, y en el escenario A2 con respecto al A1B. El norte del país y varias zonas costeras del país muestran alta vulnerabilidad por exposición al cambio climático para el ciclo OI. Las zonas de alta y muy alta vulnerabilidad son menores en el ciclo PV que para el ciclo OI.



5.5.3 Mapa de sensibilidad al cambio climático

En el Mapa 5.10 se presentan los indicadores de sensibilidad normalizados: Diversidad de cultivos, Tamaño parcela, Población rural, y Uso de fertilizantes. En el Mapa 5.11 se presenta la parte complementaria de los indicadores de sensibilidad normalizados: Variabilidad en la precipitación, Variabilidad en el rendimiento, Evapotranspiración y Degradación de suelos y acuíferos.

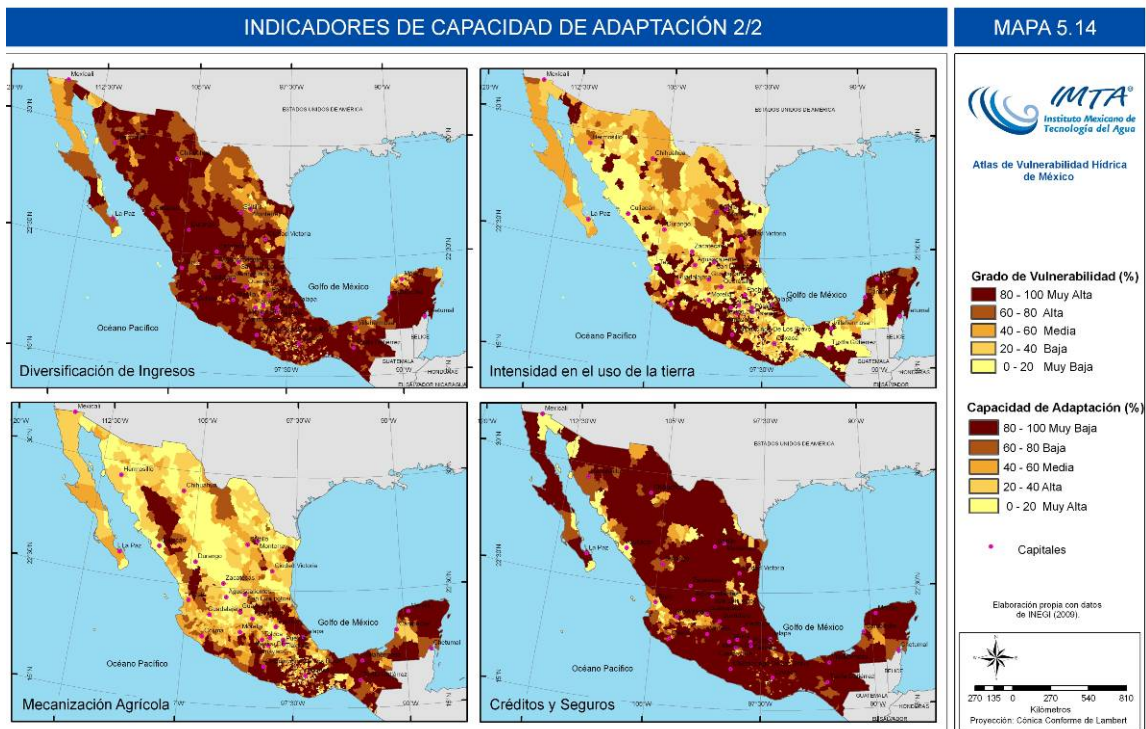
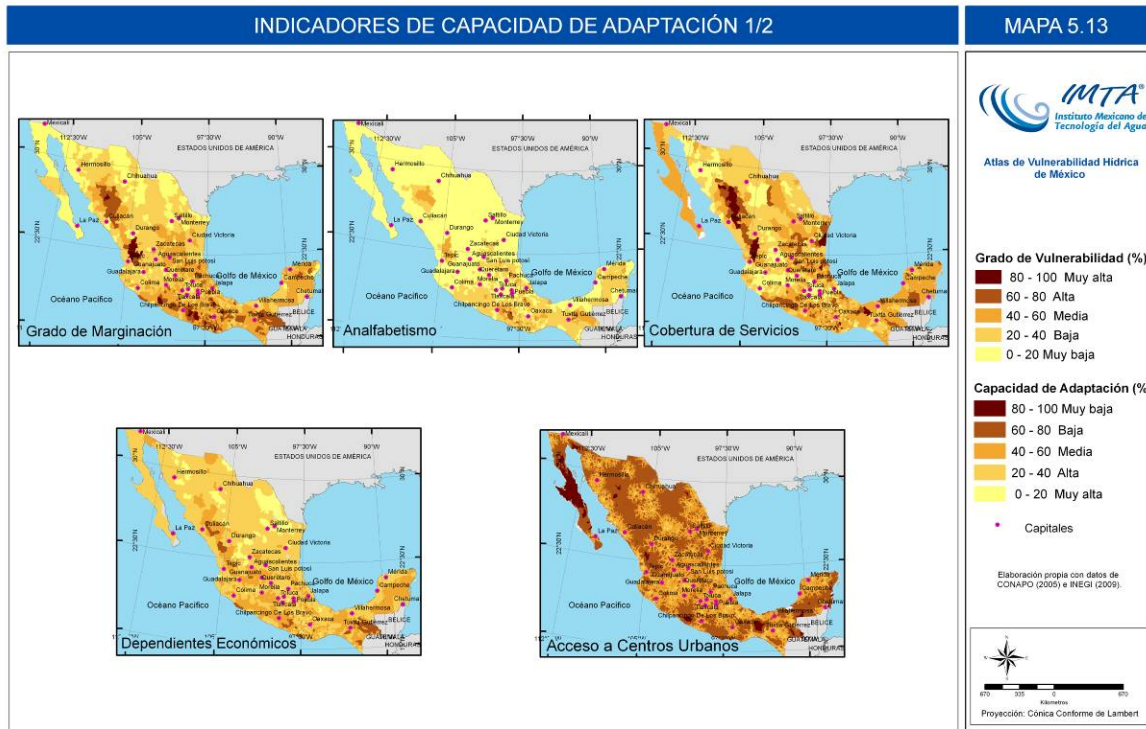


Los mapas de los indicadores de sensibilidad muestran una alta variabilidad en donde se practica la agricultura (Mapas 5.10 y 5.11). Existe una superficie importante localizada principalmente en las zonas áridas y semiáridas del país con alta vulnerabilidad debido a la degradación del suelo y acuíferos (Mapa 5.11). Se generó un mapa de sensibilidad actual al cambio climático (Mapa 5.12) que integra los nueve indicadores del Cuadro 5.2. Varios municipios de los estados de Guerrero, Oaxaca y Chiapas muestran alta vulnerabilidad por sensibilidad al cambio climático.



5.5.4 Mapa de capacidad de adaptación al cambio climático

En el Mapa 5.13 se presentan los indicadores de sensibilidad normalizados: Marginación, Analfabetismo, Cobertura de servicios, Dependientes económicos y Acceso a centros urbanos. En el Mapa 5.14 se presenta la segunda parte de los indicadores de sensibilidad normalizados: Ingreso agrícola, Intensidad en el uso de la tierra, Mecanización agrícola y Cobertura de crédito/seguro. Los indicadores de capacidad de adaptación indican que a mayor capacidad de adaptación menor es su vulnerabilidad.



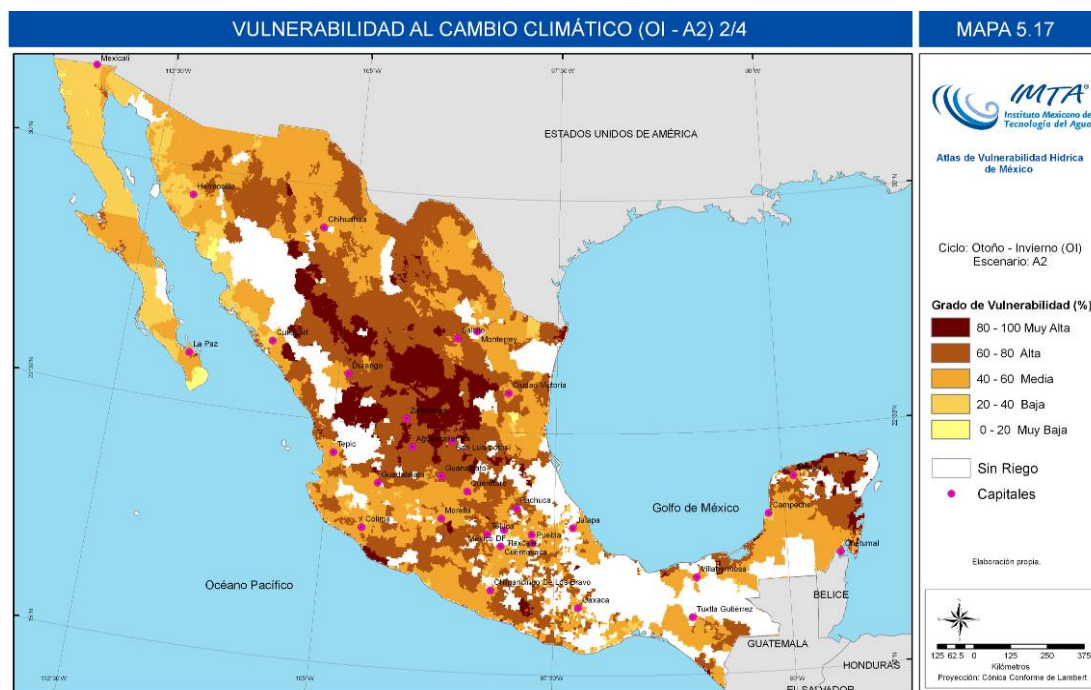
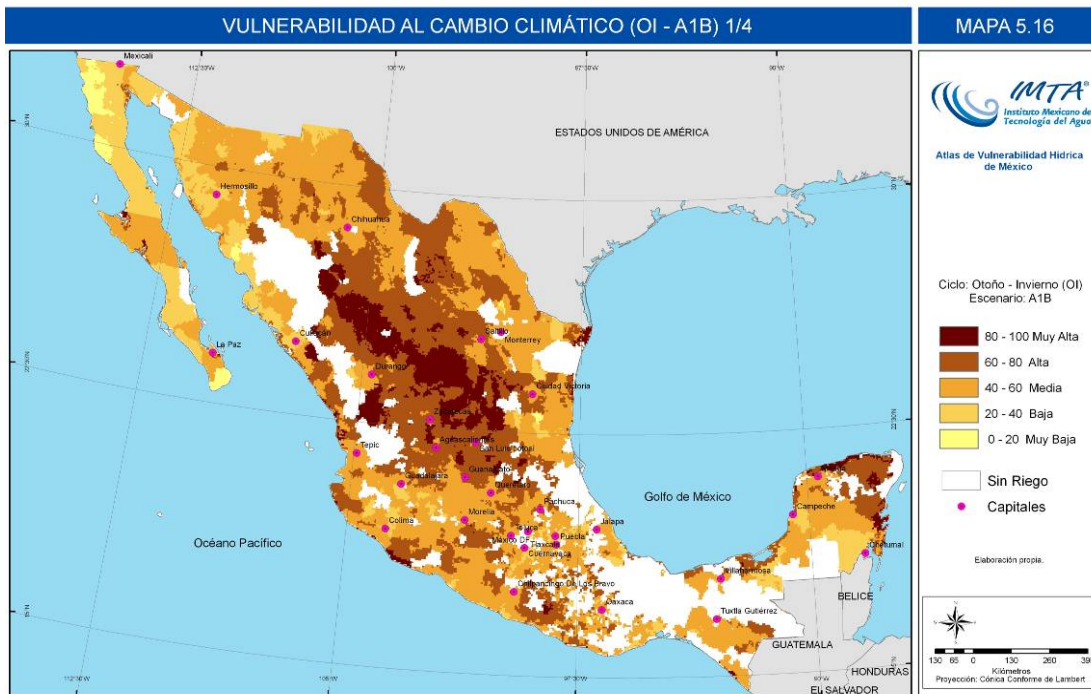
Se usaron 8 indicadores para evaluar la capacidad de adaptación al cambio climático. La variación espacial de los indicadores de capacidad de adaptación se presenta en los Mapas 5.13 y 5.14. El Mapa 5.15 de vulnerabilidad al cambio climático por capacidad de adaptación muestra una concentración de zonas de alta vulnerabilidad en zonas marginadas del sur, sureste y noroeste de México. Las zonas de alta vulnerabilidad por capacidad de adaptación (sur y sureste del país) no necesariamente son las zonas de alta vulnerabilidad por exposición al cambio climático.

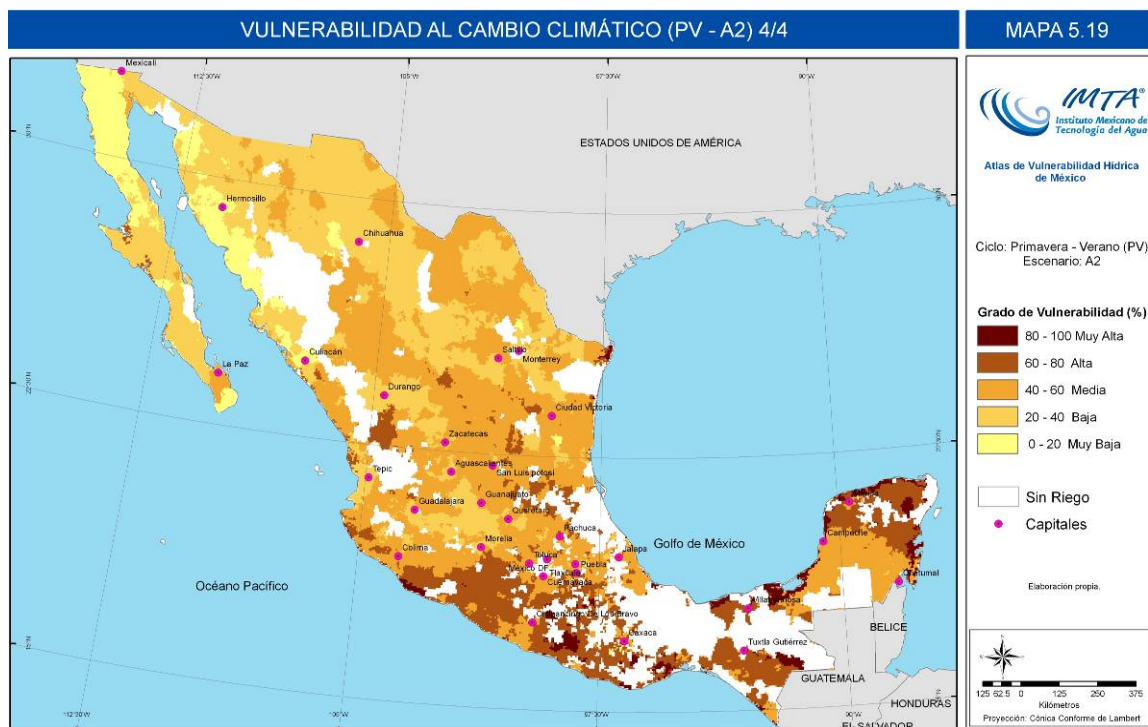


5.5.5 Mapas de vulnerabilidad de la agricultura de riego

Los Mapas 5.16 al 5.19 muestran la vulnerabilidad espacial al cambio climático de la agricultura de riego para los ciclos agrícolas OI y PV bajo los escenarios A1B y A2. Se observa que la capacidad de adaptación define los patrones de vulnerabilidad en regiones de alta marginación como fue reportado por Yusuf y Francisco (2009). Varias regiones del país, localizadas en las regiones marginadas, son vulnerables principalmente debido a su baja capacidad de adaptación. Los mapas de vulnerabilidad global indican que las zonas de mayor exposición al cambio climático no son necesariamente las zonas de mayor vulnerabilidad global. Para el ciclo OI, las regiones de muy alta y alta vulnerabilidad se concentran en la regiones norte centro, sur y península de Yucatán (Mapas 5.16 y 5.17).

Mientras que para el ciclo PV, estas zonas se concentran en el sur, sureste y península de Yucatán.





5.6 Conclusiones y recomendaciones

Los sistemas agrícolas son ecosistemas antropogénicos en continua evolución que responden a cambios no solo climáticos sino también socioeconómicos relacionados con el proceso productivo como son el mercado, organización y gestión productiva, infraestructura, recursos, y tecnología. Estimar la vulnerabilidad de la agricultura al cambio climático es una tarea difícil, debido a la incertidumbre de las proyecciones climáticas, la dificultad para caracterizar la agricultura actual y la incertidumbre en las respuestas adaptativas, planificadas o autónomas que los agricultores e instituciones gubernamentales implanten en el futuro, dadas su condiciones actuales.

Este estudio responde a la necesidad de identificar las regiones agrícolas bajo riego más vulnerables al cambio climático. Con las limitaciones en la disponibilidad de datos a nivel nacional, se usaron diversos indicadores para estimar la exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación al cambio climático y se generaron mapas de vulnerabilidad para los ciclos agrícolas de otoño-invierno y primavera-verano usando proyecciones climáticas regionalizadas para dos escenarios de emisiones (A1B y A2).

La precisión de los datos socioeconómicos y productivos utilizados no permite capturar las diferencias entre productores y zonas agrícolas que pudieran presentarse al interior de los municipios con gran extensión territorial. Tampoco capturan la dinámica actual de la capacidad de adaptación y sensibilidad de las regiones agrícolas. Sin embargo, los mapas de vulnerabilidad generados ayudan a identificar las grandes zonas más susceptibles de afectación por cambio climático y donde las políticas públicas deben dirigir sus acciones para optimizar los recursos y priorizar las áreas de intervención. Los resultados indican que las zonas agrícolas más vulnerables no necesariamente son las zonas con el mayor impacto por exposición al cambio climático, sino las zonas marginadas con baja capacidad de adaptación.

La estimación de la vulnerabilidad se realizó, en su mayoría, considerando la información a nivel de municipios disponible para México a partir de fuentes nacionales e internacionales. Varios indicadores no estaban desglosados por modalidad de agricultura, por lo que los mapas generados indican valores promedio tanto para agricultura de riego como de temporal. A medida que se dispongan de bases de datos de mejor calidad y con más variables, este estudio podrá actualizarse.

5.7 Referencias

- Brohan, P., J.J. Kennedy, I. Harris, S.F.B. Tett and P.D. Jones. 2006. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850. *J. Geophysical Research* 111, D12106, doi:10.1029/2005JD006548
- CONAGUA, 2009a. Estadísticas de producción agrícola de los Distritos de Riego. Comisión Nacional de Agua. Gerencia de Distritos de Riego. México, D. F.
- CONAGUA, 2009b. Características de acuíferos de país: Datos vectoriales y base de datos. Comisión Nacional de Agua. México, D. F.
- CONAGUA. 2010. Estadísticas del agua en México. Comisión Nacional de Agua. México, D. F. 249 pp.
- CONAPO. 2005. Índices de marginación. Consejo Nacional de Población. Base de datos. Mexico, D.F.
- Cresis. 2010. Sea Level Rise Maps. Center for REmote Sensing of Ice Sheets. University of Kansas, USA. Disponible en línea, <http://www.cresis.ku.edu/data/sea-level-rise-maps>
- FAO. 1999. Cultivating Our Futures. Documento expositivo: El carácter multifuncional de la agricultura y la tierra. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Documento preparado para la Conferencia FAO/Países Bajos sobre el Carácter Multifuncional de la Agricultura y la Tierra. 12-16 de septiembre de 1999. Maastricht, Países Bajos.
- Gadgil, D. 1995. Climate Change and agriculture: An Indian perspective. *Current Science* 9:649-659.

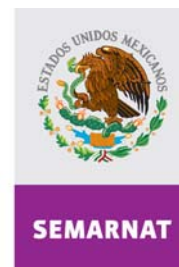
- Gbetibouo, G. A. and C. Ringler. 2009. Mapping South African Farming Sector Vulnerability to Climate Change and Variability: A Subnational Assessment. IFPRI Discussion Paper 00885. International Food Policy Research Institute. Environment and Production Technology Division. Washington, D.C. 30 pp.
- Hodson, D.P., E. Martínez-Romero, J.W. White, J.D. Corbett, and M. Bänziger. 2002. Latin America Maize Research Atlas (v1.0). Mexico D.F.: CIMMYT. CD.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. Impacts, adaptation, and vulnerability climate change 2001. Third Assessment Report of the IPCC. Cambridge, UK., University Press.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. In: Pachauri, R.K., and A. Reisinger (eds). Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del IPCC. Ginebra. pp:104.
- INEGI. 1998. Datos vectoriales edafológicos 1:250,000. Aguascalientes, Ags.
- INEGI. 2009. Censo Agropecuario 2007, VIII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal. Estados Unidos Mexicanos. Aguascalientes, Ags.
- Lyengar, N.S. and P. Sudarshan. 1982. A Method of Classifying Regions from Multivariate Data. Economic and Political Weekly. Special Article: 2048-52.
- Jones, P. D. 1994. Hemispheric surface air temperature variations: A re-analysis and an update to 1993, J. Clim., 7, 1794–802.
- Loucks, D. P, y van Beek, E. 2005. Water Resources Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models and Applications. Studies and Reports in Hydrology. UNESCO Publ. 680 pp.

- Magurran, A.E. 1988. Ecological Diversity and its Measurement. Princeton University Press. Princeton, New Jersey. Pp 192.
- Montero, M. J., y J. L., Pérez. 2008. Regionalización de proyecciones climáticas en México de precipitación y temperatura en superficie usando el método REA para el siglo XXI. In: P. Martínez y A. Aguilar (eds). Efectos del Cambio Climático en los Recursos Hídricos de México. Vol. II. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Ojeda, W., P. Martínez, y L. Hernandez. 2008. Repercusiones del cambio climático en la agricultura de riego. In: P. Martínez y A. Aguilar (eds). Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México. Vol. II. Eds. A. Aguilar y P. Martínez. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Pp 73-83.
- Peduzzi, P.; H. Dao; and C. Herold. 2005. Mapping Disastrous Natural Hazards Using Global Datasets. Natural Hazards. 35 (2). 265 - 289.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2009. Información estadística agrícola con desagregación geográfica de acuerdo en nivel Distrito de Desarrollo Rural (DDR) (1999-2008) y nivel municipal (2003-2008). Disponible en línea en el portal del SIAP: <http://www.siap.gob.mx/>
- Trabucco, A., and Zomer, R.J. 2009. Global Aridity Index (Global-Aridity) and Global Potential Evapo-Transpiration (Global-PET): Geospatial Database. CGIAR Consortium for Spatial. Disponible en línea, <http://www.csi.cgiar.org>.
- Vincent, K., 2004. Creating an index of Social vulnerability to climate change for Africa. Working paper 56. Norwich, U.K. Tydall Centre for Climate change Research, University of East Anglia.
- Yusuf A. A. and Francisco, H. A. 2009. Climate Change Vulnerability Mapping for Southeast Asia. Special and Technical Paper tp200901s1. Economy and



Atlas de vulnerabilidad hídrica de México ante el cambio climático: vulnerabilidad de las grandes zonas de riego ante el cambio climático

SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE Y
RECURSOS NATURALES



Environment Program for Southeast Asia (EEPSEA). Pp 26. Disponible en línea, <http://www.eepsea.org>.