



Environment  
Canada

Environnement  
Canada

SEMARNAT  
SECRETARÍA DE  
MEDIO AMBIENTE  
Y RECURSOS NATURALES



INECC  
INSTITUTO NACIONAL  
DE ECOLOGÍA  
Y CAMBIO CLIMÁTICO



Al servicio  
de las personas  
y las naciones

# Evaluación de impactos del cambio climático sobre los suelos de México

## Informe Final

2016

Documento generado a  
partir de los resultados  
de la consultoría  
realizada por:

Jesús David Gómez Díaz

Serie

2

Evaluación y mapeo de la vulnerabilidad  
y los riesgos climáticos

Derechos Reservados © 2018

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)

Montes Urales 440, Colonia Lomas de Chapultepec, Delegación Miguel Hidalgo, CP.11000, Ciudad de México.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC)

Boulevard Adolfo Ruiz Cortines No. 4209, Colonia Jardines en la Montaña, Delegación Tlalpan, CP. 14210, Ciudad de México.

Todos los derechos están reservados. Ni esta publicación ni partes de ella pueden ser reproducidas, almacenadas mediante cualquier sistema o transmitidas, en cualquier forma o por cualquier medio, sea éste electrónico, mecánico, de fotocopiado, de grabado o de otro tipo, sin el permiso previo del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

El análisis y las conclusiones aquí expresadas no reflejan necesariamente las opiniones del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, de su Junta Ejecutiva, de sus Estados Miembros, o del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

Documento generado a partir de los resultados de la consultoría realizada por: Jesús David Gómez Díaz.

Citar como:

PNUD México-INECC. 2016. *Evaluación de impactos del cambio climático sobre los suelos de México*. Proyecto 86487 “Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México”. 107 pp. Jesús David Gómez Díaz. México.

Esta publicación fue desarrollada en el marco del proyecto 86487 “Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México” del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).

Agradecimiento:

Al gobierno de Canadá a través de Environment Canada por el apoyo financiero recibido para el desarrollo del proyecto 86487 “Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México”, durante 2014-2018. Al Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático por el apoyo prestado para el buen desarrollo.

# Contenido

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>8</b>
1.1 Objetivo.....	8
<b>2. METODOLOGÍA.....</b>	<b>9</b>
2.1 Erosión hídrica.....	9
2.2 Erosión eólica.....	16
2.3 Degradación física y química .....	21
2.4 Índice de Aridez como indicador del régimen de humedad de los suelos en condiciones actuales y bajo escenarios de cambio climático.....	23
2.5 Dinámica del Carbono Orgánico del Suelo (COS) en las tierras agrícolas de México bajo escenarios de cambio climático. ....	29
<b>3. ACOPIO DE INFORMACIÓN Y CARTOGRAFÍA DIGITAL DE FUENTES OFICIALES. 33</b>	
3.1 Evaluación de la degradación de los suelos en México. ....	33
<b>4. OBTENCIÓN, TRATAMIENTO Y ACOMODO DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO QUE SE UTILIZARON EN LA EVALUACIÓN DE IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS SUELOS.....</b>	<b>35</b>
4.1 Obtención de los escenarios de cambio climático para la evaluación de su impacto en los suelos. 35	
4.2 Tratamiento y acomodo de escenarios de cambio climático para la evaluación de su impacto en los suelos.....	35
<b>5. DEGRADACIÓN ACTUAL DE SUELOS POR EROSIÓN HÍDRICA .....</b>	<b>37</b>
<b>6. DEGRADACIÓN ACTUAL DE SUELOS POR EROSIÓN EÓLICA.....</b>	<b>40</b>
<b>7. DEGRADACIÓN ACTUAL DE SUELOS POR DEGRADACIÓN FÍSICA.....</b>	<b>44</b>
<b>8. DEGRADACIÓN ACTUAL DE SUELOS POR DEGRADACIÓN QUÍMICA.....</b>	<b>47</b>
<b>9. DEGRADACIÓN DE SUELOS POR EROSIÓN HÍDRICA EN CONDICIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO .....</b>	<b>50</b>
<b>10. RÉGIMEN DE HUMEDAD EN LOS SUELOS DE MÉXICO EVALUADOS A PARTIR DEL ÍNDICE DE ARIDEZ Y SU VARIACIÓN BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO. 64</b>	
<b>11. ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DE CARBONO EN LOS SUELOS DE MÉXICO.....</b>	<b>83</b>
<b>12. CONCLUSIONES .....</b>	<b>93</b>
<b>13. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>97</b>
<b>ANEXO I EROSIÓN HÍDRICA CON CAMBIO CLIMÁTICO.....</b>	<b>99</b>
<b>ANEXO II ÍNDICE DE ARIDEZ CON CAMBIO CLIMÁTICO .....</b>	<b>103</b>

## Lista de Figuras

Figura 1 Diagrama de flujo RUSLE para un cálculo típico de pérdida de suelo asociado a la lluvia.....	11
Figura 2 Regiones de erosividad de la lluvia en México (Figueroa et al., 1991 a partir de Cortés, 1991). .....	12
Figura 3 Distribución de la erosión hídrica en la República Mexicana.....	38
Figura 4 Superficie afectada por erosión hídrica en los estados.....	39
Figura 5 Distribución de la erosión eólica de la República Mexicana .....	42
Figura 6 Superficie afectada por Erosión eólica en los estados.....	43
Figura 7 Distribución de la degradación física de suelos (SEMARNAT-CP, 2002) .....	45
Figura 8 Superficie afectada por degradación física del suelo en los estados.....	46
Figura 9 Distribución de la degradación química en México. ....	48
Figura 10 Superficie afectada por degradación química en los estados .....	49
Figura 11 Cambios en la superficie relativa de cada clase de afectación por erosión hídrica para el RCP 4.5 y los escenarios de corto, mediano y largo plazo para los diferentes modelos de cambio climático. ....	54
Figura 12 Distribución de los diferentes grados de afectación por erosión hídrica en la República Mexicana para el RCP 4.5 y los escenarios base (a), de corto plazo (b), mediano plazo (c) y largo plazo (d) estimados con el modelo GFDL .....	55
Figura 13 Distribución de los diferentes grados de afectación por erosión hídrica en la República Mexicana para el RCP 4.5 y los escenarios base (a), de corto plazo (b), mediano plazo (c) y largo plazo (d) estimados con el modelo HADGEM .....	56
Figura 14 Cambios en la superficie relativa de cada clase de afectación por erosión hídrica para el RCP 8.5 y los escenarios de corto, mediano y largo plazo para los diferentes modelos de cambio climático. ....	61
Figura 15 Distribución de los diferentes grados de afectación por erosión hídrica en la República Mexicana para el RCP 8.5 y los escenarios base (a), de corto plazo (b), mediano plazo (c) y largo plazo (d) estimados con el modelo GFDL.....	62
Figura 16 Distribución de los diferentes grados de afectación por erosión hídrica en la República Mexicana para el RCP 8.5 y los escenarios base (a), de corto plazo (b), mediano plazo (c) y largo plazo (d) estimados con el modelo HADGEM. ....	63
Figura 17 Tipos climáticos definidos por el Índice de Aridez para las condiciones actuales.....	66
Figura 18 Cambios en la superficie relativa de cada tipo climático para el RCP 4.5 y los escenarios de corto, mediano y largo plazo para los diferentes modelos de cambio climático.....	72
Figura 19 Cambios en la superficie y distribución de cada tipo climático para el RCP 4.5 y los escenarios de corto (b), mediano (c) y largo plazo (d) con respecto al escenario base (a) para el modelo HADGEM. ....	73
Figura 20 Cambios en la superficie y distribución de cada tipo climático para el RCP 4.5 y los escenarios de corto (b), mediano (c) y largo plazo (d) con respecto al escenario base (a) para el modelo GFDL. ....	74
Figura 21 Cambios en la superficie relativa de cada tipo climático para el RCP 8.5 y los escenarios de corto, mediano y largo plazo para los diferentes modelos de cambio climático.....	80

Figura 22 Cambios en la superficie y distribución de cada tipo climático para el RCP 8.5 y los escenarios de corto (b), mediano (c) y largo plazo (d) con respecto al escenario base (a) para el modelo HADGEM..	81
Figura 23 Cambios en la superficie y distribución de cada tipo climático para el RCP 8.5 y los escenarios de corto (b), mediano (c) y largo plazo (d) con respecto al escenario base (a) para el modelo GFDL..	82
Figura 24 Distribución del Carbono Orgánico del Suelo en los terrenos agrícolas de México.....	83
Figura 25 Distribución del Carbono Orgánico del Suelo en los terrenos agrícolas de México en el escenario de tiempo de corto y mediano plazo estimados con los lineamientos del IPCC (2007).....	84
Figura 26 Distribución del Carbono Orgánico del Suelo en los terrenos agrícolas de México en el escenario de tiempo de corto y mediano plazo estimados con el método de mineralización del carbono de Ortiz et al., (1994) para un RCP de 4.5 .....	88
Figura 27 Cambios en el contenido del Carbono Orgánico del Suelo en los terrenos agrícolas de México en el escenario de tiempo de corto y mediano plazo estimados con los lineamientos del IPCC (2007) y el método de mineralización del carbono de Ortiz et al., (1994) .....	89
Figura 28 Distribución del Carbono Orgánico del Suelo en los terrenos agrícolas de México en el escenario de tiempo de corto y mediano plazo estimados con el método de mineralización del carbono de Ortiz et al., (1994) para un RCP de 8.5.....	91
Figura 29 Cambios en el contenido del Carbono Orgánico del Suelo en los terrenos agrícolas de México en el escenario de tiempo de corto y mediano plazo estimados con los lineamientos del IPCC (2007) y el método de mineralización del carbono de Ortiz et al., (1994) .....	92
Figura 30 Distribución de los diferentes grados de afectación por erosión hídrica en la República Mexicana para el RCP 4.5 y los escenarios base (a), de corto plazo (b), mediano plazo (c) y largo plazo (d) estimados con el modelo MPI .....	99
Figura 31 Distribución de los diferentes grados de afectación por erosión hídrica en la República Mexicana para el RCP 4.5 y los escenarios base (a), de corto plazo (b), mediano plazo (c) y largo plazo (d) estimados con el modelo CNRM.....	100
Figura 32 Distribución de los diferentes grados de afectación por erosión hídrica en la República Mexicana para el RCP 8.5 y los escenarios base (a), de corto plazo (b), mediano plazo (c) y largo plazo (d) estimados con el modelo MPI .....	101
Figura 33 Distribución de los diferentes grados de afectación por erosión hídrica en la República Mexicana para el RCP 8.5 y los escenarios base (a), de corto plazo (b), mediano plazo (c) y largo plazo (d) estimados con el modelo CNRM.....	102
Figura 34 Cambios en la superficie y distribución de cada tipo climático para el RCP 4.5 y los escenarios de corto (b), mediano (c) y largo plazo (d) con respecto al escenario base .....	103
Figura 35 Cambios en la superficie y distribución de cada tipo climático para el RCP 4.5 y los escenarios de corto (b), mediano (c) y largo plazo (d) con respecto al escenario base .....	104
Figura 36 Cambios en la superficie y distribución de cada tipo climático para el RCP 8.5 y los escenarios de corto (b), mediano (c) y largo plazo (d) con respecto al escenario base .....	105
Figura 37 Cambios en la superficie y distribución de cada tipo climático para el RCP 8.5 y los escenarios de corto (b), mediano (c) y largo plazo (d) con respecto al escenario base .....	106

## Lista de Tablas

Tabla 1 Estimación del factor K a partir de las unidades de suelo y de la textura media del suelo (FAO, 1980) ..14	14
Tabla 2 Valoración para el factor de erosionabilidad edáfica aplicable a erosión eólica (FAO, 1980) .....	18
Tabla 3 Valores del factor de vegetación natural (V) (adimensional) FAO (1980).....	19
Tabla 4 Valores del factor de uso del suelo (L) (adimensional) FAO (1980).....	19
Tabla 5 Rangos de erosión eólica de acuerdo al criterio de FAO (1980).....	20
Tabla 6 Tipos climáticos definidos por el Índice de Aridez de acuerdo a los criterios de la CNUCL. ....	24
Tabla 7 Factores de cambio de existencias y $SOC_{REF}$ .....	31
Tabla 8 Factores edáficos asociados a la textura del suelo y al contenido de carbonatos de calcio.....	32
Tabla 9 Insumos utilizados para evaluar la degradación de los suelos en México .....	33
Tabla 10 Superficie afectada por erosión hídrica en México .....	37
Tabla 11 Porcentaje de la superficie de México por grado de afectación por erosión eólica en los diferentes tipos climáticos .....	41
Tabla 12 Superficie afectada por degradación física en México .....	44
Tabla 13 Superficie afectada por degradación química en México .....	47
Tabla 14 Superficie afectada por erosión hídrica en México para el escenario a corto plazo (2015-2039) con diferentes Modelos para un RCP de 4.5 Watts m-2.....	51
Tabla 15 Superficie afectada por erosión hídrica en México para el escenario a mediano plazo (2039-2069) con diferentes Modelos para un RCP de 4.5 Watts m-2.....	52
Tabla 16 Superficie afectada por erosión hídrica en México para el escenario a largo plazo (2069-2099) con diferentes Modelos para un RCP de 4.5 Watts m-2.....	53
Tabla 17 Superficie afectada por erosión hídrica en México para el escenario a corto plazo (2015-2039) con diferentes Modelos para un RCP de 8.5 Watts m-2.....	58
Tabla 18 Superficie afectada por erosión hídrica en México para el escenario a mediano plazo (2039-2069) con diferentes Modelos para un RCP de 8.5 Watts m-2.....	59
Tabla 19 Superficie afectada por erosión hídrica en México para el escenario a largo plazo (2069-2099) con diferentes Modelos para un RCP de 8.5 Watts m-2.....	60
Tabla 20 Tipos climáticos estimados por el Índice de Aridez en México para el escenario base y a corto plazo (2015- 2039) con diferentes Modelos para un RCP de 4.5 Watts m-2 .....	69
Tabla 21 Tipos climáticos estimados por el Índice de Aridez en México para el escenario a mediano plazo (2039-2069) con diferentes Modelos para un RCP de 4.5 Watts m-2.....	70
Tabla 22 Tipos climáticos estimados por el Índice de Aridez en México para el escenario a largo plazo (2069-2099) con diferentes Modelos para un RCP de 4.5 Watts m-2.....	71
Tabla 23 Tipos climáticos estimados por el Índice de Aridez en México para el escenario a corto plazo (2015-2039) con diferentes Modelos para un RCP de 8.5 Watts m-2.....	77
Tabla 24 Tipos climáticos estimados por el Índice de Aridez en México para el escenario a mediano plazo (2039-	

2069) con diferentes Modelos para un RCP de 8.5 Watts m-2.....	78
Tabla 25 Tipos climáticos estimados por el Índice de Aridez en México para el escenario a largo plazo (2069-2099) con diferentes Modelos para un RCP de 8.5 Watts m-2.....	79
Tabla 26 Contenido de Carbono Orgánico del Suelo de los terrenos agrícolas de México estimado a partir de los lineamientos del IPCC (2007) .....	85
Tabla 27 Contenido de Carbono Orgánico del Suelo de los terrenos agrícolas de México estimado a partir de la mineralización del Carbono con el método de Ortiz et al., (1994) para un RCP de 4.5 Watts m-2 y escenarios de tiempo de corto y mediano plazo .....	87
Tabla 28 Contenido de Carbono Orgánico del Suelo de los terrenos agrícolas de México estimado a partir de la mineralización del Carbono con el método de Ortiz et al., (1994) para un RCP de 8.5 Watts m-2 y escenarios de tiempo de corto y mediano plazo .....	90

# 1. INTRODUCCIÓN

Una de las principales preocupaciones de nuestra época es la seguridad alimentaria para satisfacer la creciente demanda de alimentos conforme aumenta el número de habitantes en el planeta. La población actual, de poco más de seis mil millones, se está incrementando a un rango de 1.3% anual y se espera que sea de ocho mil millones en el año 2025 pudiendo alcanzar los diez mil millones en el 2050 (Fisher y Heilig, 1997). El incremento en la población va asociado con aumentos drásticos en las emisiones de CO<sub>2</sub> (Etheridge *et al.*, 1996) y con presiones crecientes sobre los ecosistemas para la producción de alimentos. Ante este panorama aumentará la presión sobre los recursos naturales y con ello la emisión de gases de efecto invernadero. Actualmente se estima que 35% del total de las emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> en nuestro país están relacionadas con la actividad agrícola, principalmente por el cambio de uso del suelo y la deforestación (de Jong, 2001). La actividad agrícola es parte importante de la economía en México, por lo que cualquier cambio en el sistema climático la hace vulnerable a dichos cambios y a sufrir impactos negativos. Las actividades primarias en el país que dependen del comportamiento climático son más o menos 30 millones de hectáreas en tierras de cultivo, 115 millones de agostadero y 45.5 con bosques y selvas (SAGARPA, 2007). Además, la producción de alimentos depende del estado de conservación del suelo donde se produce. Así, desde hace tiempo se emprendió un esfuerzo a nivel mundial para diseñar marcos conceptuales y metodológicos para determinar, cualitativa y cuantitativamente, estadísticas y estimaciones confiables de la degradación de tierras y la desertificación. Sin embargo, aun la conexión entre producción agrícola y calidad de suelos no es clara frente a los impactos del cambio climático en el país. Por lo anterior, se requiere identificar los posibles impactos y las oportunidades que surgirán para la agricultura nacional en condiciones de cambio climático pero considerando el estado que guardan los suelos. Se requieren métodos que sirvan para la evaluación de la aptitud para cultivos frente a los escenarios futuros, analizando los cambios tanto espacial como temporalmente al considerar cambio climático. En este contexto, se enmarca la presente consultoría en la cual se desarrolló la caracterización inicial del estado que guardan los suelos en varias de sus propiedades, con el objeto que se pueda integrar en estudios futuros de impacto del cambio climático.

## 1.1 Objetivo

Analizar y evaluar los impactos del cambio climático sobre los suelos de México a través del comportamiento de algunas propiedades físicas, químicas y biológicas y con base a ello proponer indicadores de monitoreo y evaluación de vulnerabilidad al cambio climático.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Erosión hídrica

La evaluación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Mexicana en diferentes estudios se ha realizado empleando los principios de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE por sus siglas en inglés), propuesta por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos. Esta ecuación FAO (1980) la describe como un método de solución empírica o modelo empírico, que se basa en la observación y experimentación y no deriva de la teoría.

Sin embargo, aunque Wischmeier (1976) demostró que el USLE contenía los parámetros que son reconocidos como determinantes para explicar la erosión hídrica de un lugar determinado, se desarrolló empíricamente en zonas de cultivo por lo que no podía ser aplicada en pastizales, en zonas boscosas alteradas, y otros tipos de vegetación, en este contexto, Renard et al., (1991) partieron del modelo USLE para producir un nuevo modelo, el cual nombraron modelo RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation).

Este modelo es del tipo paramétrico que usa los mismos cinco factores contenidos en el modelo USLE pero con procedimientos diferentes de obtener los valores de estos parámetros en donde se incluyen las interacciones de los elementos que propician la erosión del suelo como la lluvia, escurrimiento superficial, suelo, topografía, vegetación e intervención humana. Para ambos modelos la ecuación general es la siguiente:

$$A = R K L S C P$$

Dónde:

**A.-** Pérdida anual de suelo ( $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ ).

**R.-** Factor de erosividad de la lluvia ( $MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ año^{-1}$ )

**K.-** Factor de erosionabilidad del suelo ( $t\ ha\ h\ MJ^{-1}\ mm^{-1}\ ha^{-1}$ )

**LS.-** Factor topográfico asociado a la longitud de la pendiente (L) y el grado de inclinación de la misma (S) (Adimensional)

**C.-** Factor asociado al uso y manejo del suelo (Adimensional)

**P.-** Factor de prácticas mecánicas de control de la erosión (Adimensional)

En la figura 1 se muestra de manera gráfica los cinco factores y los datos de entrada requeridos por el modelo RUSLE para estimar la pérdida de suelo asociado a la lluvia.

## Factor R

El factor R representa la erosividad de la lluvia en una localidad particular, el cual es determinado a partir de la precipitación media anual, por lo que dicho factor comprende la suma anual media de la erosividad de tormentas individuales. La erosividad de una tormenta individual se calcula como el producto de la energía total de la tormenta, que se asocia con la cantidad de lluvia de la tormenta y con la intensidad máxima en 30 minutos, esto estimado a partir del índice  $EI_{30}$  propuesto por Wischmeier (1959), y se define como el producto de la energía cinética total de la lluvia (E) por la intensidad máxima en 30 minutos ( $I_{30}$ ). El efecto combinado de la erosión por salpicamiento, la turbulencia del flujo y el escurrimiento para remover del terreno las partículas desprendidas del suelo, separadas por éste. La suma de los  $EI_{30}$  durante un año forma el factor de erosividad anual de la lluvia R (Wischmeier y Smith, 1978).

En este trabajo para la estimación de R a escala 1:250 000, se aplicaron los modelos generados por Cortés (1991), los cuales se estimaron a partir del análisis de la cantidad e intensidad de las tormentas individuales reportadas en 53 observatorios del país, considerando periodos de observación de 1 a 11 años.

En dicho trabajo se definieron 14 regiones (Figura 2) a partir del comportamiento de los modelos que se generaron al analizar los eventos de lluvia, estimando el  $EI_{30}$  anual.

Para caracterizar la precipitación anual de las diferentes zonas del país se generó la base de variables climáticas a nivel regional escala 1:250 000 para todo México, con información actualizada reportada para las distintas estaciones meteorológicas del país en el sistema CLICOM (WMO, 2007), seleccionando aquellas que tuvieron al menos 20 años de observaciones y más de 80% de datos, resultando un total de 3,770 estaciones meteorológicas. Para la totalidad de las estaciones elegidas se obtuvo el promedio mensual y el anual de las variables temperatura y precipitación, estos valores se utilizaron para la creación de los mapas de isoyetas e isotermas y las bases de datos en las Áreas De Influencia Climática (AIC).

## ESTIMACIÓN DE PÉRDIDA DE SUELO RUSLE

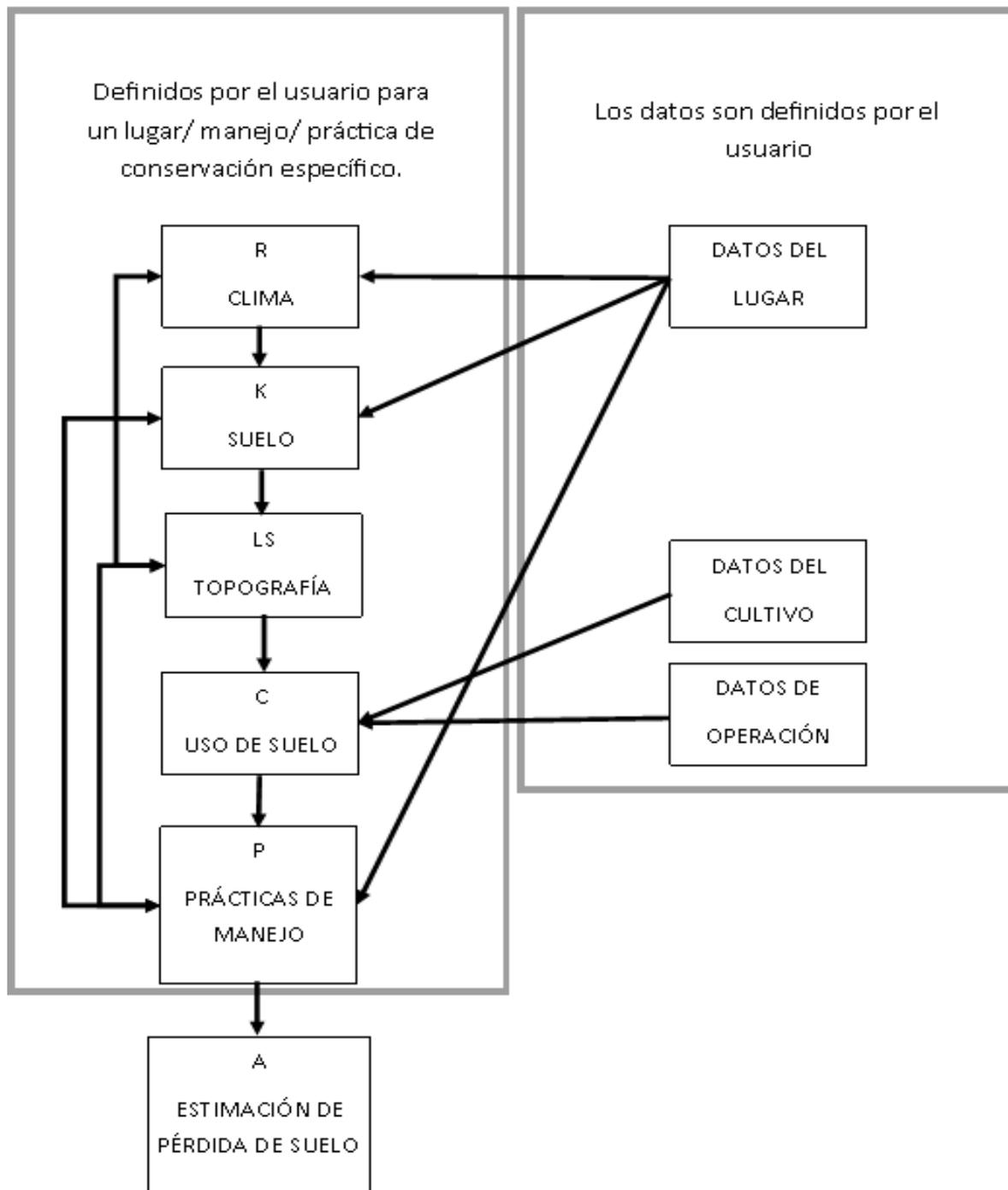


Figura 1 Diagrama de flujo RUSLE para un cálculo típico de pérdida de suelo asociado a la lluvia.



Figura 2 Regiones de erosividad de la lluvia en México (Figuroa et al., 1991 a partir de Cortés, 1991).

Para la delimitación de las isotermas e isoyetas medias anuales se utilizó el método descrito por Gómez et al., (2008). Para las isotermas se generaron modelos de regresión lineal simple para las diferentes zonas de variación térmica del país delimitadas por Gómez et al., (2009) a partir del análisis del comportamiento de la temperatura con referencia a la altura del terreno, esto partiendo de la relación que guarda la variación de la temperatura con el rango altitudinal influenciado por las condiciones de posición geográfica y humedad de las distintas regiones del país. En las zonas con poca variación altitudinal se realizara la interpolación de los datos de las estaciones meteorológicas mediante el Sistema de Información Geográfico ArcGis. Para el trazo de las isoyetas se utilizó el método gráfico, anotando los valores de precipitación media anual sobre imágenes de satélite Landsat 7 en falso color escala 1:250 000, al cual se le sobrepuso el modelo digital de elevación, y a partir del análisis de los distintos sistemas de vientos responsables de las precipitaciones en cada zona y de los impactos que tiene la orografía y otros factores en la cantidad de precipitación reportada por las estaciones meteorológicas, se realizó el trazado de las isoyetas a partir de analogías entre las áreas con información y aquellas que no la tienen (Gómez et al., 2008).

La delimitación de las AIC se realizó a partir de la sobreposición de las capas de isoyetas e isotermas medias anuales con el Sistema de Información Geográfico ArcGis. Las AIC, fueron las unidades básicas en las que se generaron las bases de datos de valores medios mensuales de las variables climáticas. La temperatura, mediante la aplicación de los modelos de regresión mensuales obtenidos para cada zona térmica. La precipitación mediante la división del país en zonas con patrones similares de distribución de la precipitación como lo describe Gómez et al., (2009).

Al aplicar los valores de precipitación media anual a los modelos de las regiones definidas por Cortés (1991) para el cálculo del  $EI_{30}$ , se encontraron varias situaciones discordantes, como

fueron que los límites para la misma precipitación de una zona a otra no coincidían a pesar de que el patrón de distribución y tipo de eventos son muy similares, así como decrementos en este índice cuando aumentaba la precipitación, esto como consecuencia de que los modelos son cuadráticos y sobrepasaban el valor del máximo de  $EI_{30}$  de la función cuadrática. Dada esta situación se analizó región por región y en las áreas discordantes se sustituyó su ecuación por la fórmula general generada en el trabajo de Cortés (1991), la cual se obtuvo analizando la totalidad de las estaciones del país que utilizó para su trabajo.

## Factor K

El factor K es un indicador de la erodabilidad inherente del suelo. Para evaluar el factor K, se construyó una matriz asociando este parámetro con las características de las unidades de suelos reportadas por el INEGI a escala 1: 250 000, considerando también las fases físicas y las químicas, así como la clase textural. Para determinar el factor K, se usaron los lineamientos de FAO presentados en la Tabla 1, aplicándolo a las diferentes unidades de suelos, integradas con las fases físicas y las químicas, así como con la clase textural a escala 1:250 000, esta información se generó con el apoyo de ArcGis y se obtuvo una base de datos detallada de K y los parámetros edáficos con los que se asocia.

Tabla 1 Estimación del factor K a partir de las unidades de suelo y de la textura media del suelo (FAO, 1980)

Unidad	Textura			Unidad	Textura		
	Gruesa	Media	Fina		Gruesa	Media	Fina
A	0.026	0.040	0.013	Lo	0.026	0.040	0.013
Af	0.013	0.020	0.007	Lp	0.053	0.079	0.026
Ag	0.026	0.040	0.013	Lv	0.053	0.079	0.026
Ah	0.013	0.020	0.007	M (a,g)	0.026	0.040	0.013
Ao	0.026	0.040	0.013	N (d,e,h)	0.013	0.020	0.007
Ap	0.053	0.079	0.026	O (d,e,x)	0.013	0.020	0.007
B	0.026	0.040	0.013	P	0.053	0.079	0.026
Bc	0.026	0.040	0.013	Pf	0.053	0.079	0.026
Bd	0.026	0.040	0.013	Pg	0.053	0.079	0.026
Be	0.026	0.040	0.013	Ph	0.026	0.040	0.013
Bf	0.013	0.020	0.007	Pl	0.026	0.040	0.013
Bg	0.026	0.040	0.013	Po	0.053	0.079	0.026
Bh	0.013	0.020	0.007	Pp	0.053	0.079	0.026
BK	0.026	0.040	0.013	Q (a,c,f,l)	0.013	0.020	0.007
Bv	0.053	0.079	0.026	R	0.026	0.040	0.013
Bx	0.053	0.079	0.026	Re	0.026	0.040	0.013
C (g, h, k, l)	0.013	0.020	0.007	Rc	0.013	0.020	0.007
D (d, e, g)	0.053	0.079	0.026	Rd	0.026	0.040	0.013
E	0.013	0.020	0.007	Rx	0.053	0.079	0.026
F (a,h,o,p,r,x)	0.013	0.020	0.007	S	0.053	0.079	0.026
G	0.026	0.040	0.013	Sg	0.053	0.079	0.026
Gc	0.013	0.020	0.007	Sm	0.026	0.040	0.013
Gd	0.026	0.040	0.013	So	0.053	0.079	0.026
Ge	0.026	0.040	0.013	T	0.026	0.040	0.013
Gh	0.013	0.020	0.007	Th	0.013	0.020	0.007
Gm	0.013	0.020	0.007	Tm	0.013	0.020	0.007
GP	0.053	0.079	0.026	To	0.026	0.040	0.013
Gx	0.053	0.079	0.026	Tv	0.026	0.040	0.013
Gv	0.053	0.079	0.026	U	0.013	0.020	0.007
H (c,g,h,l)	0.013	0.020	0.007	V (c,p)	0.053	0.079	0.026
I	0.013	0.020	0.007	W	0.053	0.079	0.026
J	0.026	0.040	0.013	Wd	0.053	0.079	0.026
Jc	0.013	0.020	0.007	We	0.053	0.079	0.026
Jd	0.026	0.040	0.013	Wh	0.026	0.040	0.013
Je	0.026	0.040	0.013	Wm	0.026	0.040	0.013
Jt	0.053	0.079	0.026	Ws	0.053	0.079	0.026
Jp	0.053	0.079	0.026	Wx	0.053	0.079	0.026
K (h,K,l)	0.026	0.040	0.013	X (h,k,l,y)	0.053	0.079	0.026
L	0.026	0.040	0.013	Y (h,k,l,y,t)	0.053	0.079	0.026
La	0.053	0.079	0.026	Z	0.026	0.040	0.013
Lc	0.026	0.040	0.013	Zg	0.26	0.040	0.013
Lf	0.013	0.020	0.007	Zm	0.013	0.020	0.007
Lg	0.026	0.040	0.013	Zo	0.026	0.040	0.013
Lk	0.026	0.400	0.013	Zt	0.056	0.079	0.026

## Factor L y S

Los factores L y S representan en común el efecto de longitud, inclinación y forma de la pendiente en la producción del sedimento. El movimiento del suelo se incrementa a medida que la longitud de la pendiente aumenta lo que se considera por el factor de longitud de la pendiente (L), que se define como la distancia desde el punto de origen de flujo sobre la superficie hasta cualquiera de los siguientes puntos: 1) donde el gradiente de pendiente disminuye de tal forma que ocurre deposición de partículas o 2) donde el escurrimiento llega a concentrarse a un cause

o canal (Wischmeier y Smith, 1978). Las pendientes complejas pueden ser representadas en el RUSLE por medio de una serie de segmentos para tener una mejor estimación del efecto de la topografía.

Este parámetro se estimó usando aplicaciones de Arcmap 10.1, delineando una microcuenca a partir de los lineamientos expresados en la página <http://gis4geomorphology.com/watershed/>, aplicando el tutorial de Watershed y calculando la pendiente y la longitud de la pendiente para que a través de un modelo calcular el factor LS.

## Factor C

El factor C es uno de los factores más importantes en la estimación de pérdida de suelo porque representa las condiciones que pueden ser modificadas por el manejo para reducir la erosión. Este factor depende de la interacción de tres aspectos principales: i) la cobertura vegetal y/o el manejo de los cultivos, ii) el manejo previo y actual del suelo y iii) la distribución de la lluvia a través del tiempo.

Los valores C son ponderados por la tasa de pérdida de suelo promedio. En RUSLE para el cálculo de C se estima en función de 5 sub factores expresados en la siguiente ecuación:

$$C = PLU CC SC SR SM$$

Dónde:

*PLU*: Sub factor de uso de suelo anterior

*CC*: Sub factor del dosel de la vegetación natural o cobertura del cultivo

*SC*: Sub factor de cobertura de la superficie

*SR*: Sub factor de rugosidad de la superficie

*SM*: Sub factor de humedad del suelo

El sub factor PLU y SR representan el efecto del suelo y es calculado a partir de la cantidad de biomasa acumulada en el suelo, principalmente de las raíces y la incorporación de residuos de cosecha. El sub factor SC se calcula con un coeficiente exponencial negativo multiplicado por el porcentaje de cobertura del suelo. El coeficiente se incrementa con la tendencia a la erosión en surcos sobre la erosión de canalillos. El sub factor CC toma en cuenta el rol que tienen las plantas en interceptar la energía cinética acumulada por las gotas de lluvia al caer. El sub factor SM representa el papel de la humedad del suelo y efecto del exceso de lluvias y de riesgo de erosión.

Para este estudio el factor C se estimó a partir de la serie 5 de Uso del Suelos y Vegetación (INEGI, 2013), considerando el tipo de uso del suelo, la clase de cobertura vegetal, asociándola a las condiciones de clima y al análisis de imágenes de satélite LANSAT para determinar el porcentaje de cobertura, tomando como referencia lo reportado en otros estudios para México en donde se generaron valores para algunos cultivos bajo diferentes sistemas de producción, y para algunas regiones climáticas, dentro de los que se reportan para maíz, frijol y cultivos de grano pequeño, bajo labranza tradicional, valores de 0.45, 0.3, y 0.15 respectivamente; en pastizales los valores varían de 0.45 a 0.01, mientras que en áreas forestales no disturbadas van de 0.009 a 0.0001. Valores altos de C se asignan a las áreas con escasa vegetación y disminuyen en aquellas zonas provistas de abundante cobertura vegetal, considerando que el papel más importante de la vegetación, en el proceso de erosión hídrica, es la intercepción de la lluvia, evitando que la energía cinética de las gotas disperse el suelo; la eficiencia de la vegetación, para reducir la erosión, depende de su altura y continuidad de la cobertura de la parte aérea, de la densidad de la cubierta vegetal y la densidad de las raíces.

## Factor P

El factor P representa principalmente el cómo las condiciones de la superficie afectan las trayectorias de flujo de la escorrentía. Este factor se asocia al impacto de las prácticas de control de la erosión y en el contexto de la pérdida de suelo por erosión hídrica puede definirse como una serie de actividades realizadas por el hombre con la finalidad de contrarrestar los efectos causados por este tipo de erosión, hasta el punto de compensar la pérdida de suelo con la tasa de formación, es decir, por debajo de la tasa de pérdida permisible en un terreno determinado. De esta forma está relacionado con el manejo del suelo describiendo los efectos de implementar prácticas tales como: surcado al contorno, melgas, terrazas, manejo de sedimentos, barreras vivas, filtros vivos y drenaje sub superficial entre otras.

En México, hasta el momento, no se cuenta con algún inventario de prácticas de conservación. Además, en el país se practican numerosas técnicas de conservación rudimentaria, sobre todo en la agricultura de subsistencia que es la que representa el mayor porcentaje del área agrícola nacional, las cuales según la definición del factor P del handbook de la RUSLE (1991) no se consideran como prácticas de conservación, por lo que este factor en el actual trabajo se consideró como 1, que a la escala de estimación de la afectación de pérdida del suelos por acción de la lluvia, indica que las prácticas de conservación del suelo no tienen efecto en la pérdida del suelo.

## 2.2 Erosión eólica

Para evaluar la erosión eólica a la escala del presente trabajo se utilizó la Ecuación de la Erosión Eólica (WEQ por sus siglas en inglés de Wind Erosion Quantification) propuesta por la FAO en 1980 (FAO, 1980), la cual es una versión actualizada del modelo de Woodruff y Siddoway (1965) que fue convertida de predicción anual a predicciones diarias o mensuales para hacer

interfase con el Calculador de Impacto Erosión- Productividad (EPIC) y para obtener sensibilidad estacional de las condiciones de la superficie del suelo, cubierta vegetal, susceptibilidad a la erosión, y clima (Skidmore y Williams, 1991). La WEQ considera la evaluación de cinco factores que se relacionan según la siguiente expresión:

$$A = C * S * T * V * L$$

Dónde:

**A** = pérdida de suelo por erosión eólica (t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>).

**C** = factor de agresividad climática (adimensional)

**S** = factor edáfico (adimensional)

**T** = factor topográfico (adimensional)

**V** = factor de vegetación natural (adimensional)

**L** = Factor de uso del suelo (adimensional)

El factor de agresividad climática (C), se determinó mediante la forma modificada del índice eólico de Chepil (1960).

$$C = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{12} v^3 \left[ \frac{ETP - P}{ETP} \right] n$$

Dónde:

**C** = factor de agresividad climática (adimensional)

**v** = velocidad del viento promedio mensual a 2 m de altura en m/s

**ETP** = evapotranspiración potencial mensual (mm)

**P** = precipitación media mensual (mm)

**n** = número de días del mes en que se presenta erosión eólica

El factor de erosionabilidad edáfica (S) se determinó aplicando la valoración que estima la FAO a partir de las tasas de erosión eólica tomando como base la textura del suelo y la condición del suelo ya sea calcáreo, no calcáreo y los suelos pedregosos como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2 Valoración para el factor de erosionabilidad edáfica aplicable a erosión eólica (FAO, 1980)

<i>Textura del suelo</i>	<i>Gruesa (1)</i>	<i>Media (2)</i>	<i>Fina (3)</i>
<i>Suelo no calcáreo</i>	3.50	1.25	1.85
<i>Suelo calcáreo</i>	3.50	1.75	1.85
<i>Suelos pedregosos o gravosos</i>	1.75	0.62*	0.92
		0.87**	

*\*No calcáreo, \*\* Calcáreo*

El factor topográfico (T). Dado que el efecto de la topografía sobre las tasas de erosión eólica se manifiesta en la influencia sobre la velocidad del viento en la superficie del terreno a nivel parcelario (FAO, 1980), por lo cual en el presente trabajo se le asignó el valor de 1.

Factor de Vegetación Natural (V). Para determinar el efecto de la vegetación natural en el control de la erosión eólica, la FAO (1980) propone el uso de los valores reportados en la Tabla 3 para los tipos de vegetación natural y los diferentes porcentajes de cubierta vegetal, los cuales se evaluaron en espaciomasas a falso color compuesto del satélite Landsat (INEGI, 1995) escala 1:250 000 en los cuales se delimitaran los usos del suelo y los tipos de vegetación de la serie IV del INEGI (2008) para contar con la información del tipo de vegetación y el porcentaje de cobertura.

Tabla 3 Valores del factor de vegetación natural (V) (adimensional) FAO (1980)

Uso del suelo	Porcentaje de cobertura					
	0 - 10	10 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100
Matorral	1.0	0.7	0.5	0.3	0.15	0.05
Pastizal	1.0	0.7	0.4	0.2	0.10	0.03
Selva	1.0	0.6	0.3	0.2	0.10	0.01
Bosque	0.9	0.5	0.3	0.15	0.05	0.001
Erosión	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Factor del suelo (L). Este factor se refiere al efecto por el uso del suelo y en particular a los sistemas de cultivo y su influencia en el movimiento de las partículas del suelo por acción del viento, como lo muestra la Tabla 4 con los valores propuestos por FAO (1980).

Tabla 4 Valores del factor de uso del suelo (L) (adimensional) FAO (1980)

Sistema de cultivo	Valor
Agricultura de temporal con cultivos anuales	0.7
Agricultura de temporal con cultivos perenes y cultivos de áreas de temporal en regiones húmedas	0.4
Agricultura de riego con cultivos anuales y perenes	0.2

Después de estimar la pérdida del suelo con la metodología descrita, se delimitaron los rangos o categorías que se detallan en la Tabla 5 de acuerdo a los criterios establecidos por la FAO (1980).

**Tabla 5 Rangos de erosión eólica de acuerdo al criterio de FAO (1980)**

Rango o clase de erosión eólica	Perdida de suelo por erosión eólica Ton ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>
No manifiesta	< 5
Ligera	5 – 10
Moderada	10 – 50
Alta	50- 200
Muy alta	➤200

Con el uso del ArcGis se elaboró el mapa de las diferentes clases de erosión eólica escala 1: 250 000.

Las bases de datos de las variables climáticas a nivel regional escala 1:250 000 para estimar la erosión eólica, para precipitación se emplearon las que se describen en la estimación de la erosión hídrica y para la estimación de la Evapotranspiración Potencial (ETP) se utilizó el método de Penman modificado por Monteith (Sys et al., 1991), para el cual se generaron bases de datos en cada Área de Influencia Climática (AIC) de temperatura media mensual, nubosidad para estimar horas de insolación, humedad relativa y velocidad del viento, que son las que definen la ETP. Para la delimitación de las isotermas medias anuales se utilizó el método descrito por Gómez et al. (2008), generando modelos de regresión lineal simple para las diferentes zonas de variación térmica del país delimitadas por Gómez et al. (2009) a partir del análisis del comportamiento de la temperatura con referencia a la altura del terreno, esto partiendo de la relación que guarda la variación de la temperatura con el rango altitudinal influenciado por las condiciones de posición geográfica y humedad de las distintas regiones del país.

En las zonas sin variación altitudinal considerable se realizó la interpolación de los datos de las estaciones meteorológicas mediante el Sistema de Información Geográfico ArcGis. Las bases de datos de parámetros climáticos adicionales para la estimación de la ETP, en cada una de las AIC se estimó la insolación y la humedad relativa estas a partir de la generación de modelos regionales, para la insolación se utilizó los modelos de radiación global calculada para los Observatorios del país y estos se aplicaron a los valores de nubosidad de las estaciones, para la humedad relativa se generaron modelos a partir de la oscilación térmica (Ortiz, 1987) para cada zona con patrones

de distribución de la precipitación similares como lo describe Gómez et al., (2009), la velocidad promedio del viento se estimara estableciendo relaciones de efecto de desviación y rugosidad del terreno asociado a las cadenas montañosas partiendo de los datos reportados en los observatorios del país.

## 2.3 Degradación física y química

Con base en la cartografía de degradación de suelos, realizada con la metodología ASSOD escala 1:250 000 (SEMARNAT-CP, 2002), se retomaron los tipos de degradación química y física del suelo y su grado de afectación. En la realización de este proyecto, se utilizó la metodología ASSOD (Van Lyden, 1997), que es una modificación de la denominada GLASOD, propuesta por Oldeman (1988). Esta última adoptada por la FAO a nivel mundial y por el Inventario Nacional de Suelos de la Dirección General de Restauración y Conservación de Suelos (DGRyCS) dependiente de la SEMARNAT.

En esta metodología se reconocen dos grandes categorías de procesos de degradación del suelo: la degradación por desplazamiento del material del suelo, que tiene como agente causativo a la erosión hídrica o eólica y la degradación resultante de su deterioro interno, que considera en la actualidad a los procesos de degradación física y química únicamente. Como se indicó con anterioridad, en este apartado se consideraron solo aspectos relacionados con la degradación química y física del suelo como son:

**Declinación de la fertilidad y reducción del contenido de materia orgánica**, misma que consiste en el decrecimiento neto de nutrimentos y materia orgánica disponibles en el suelo, que provocan una disminución en la productividad, esto generado por un balance negativo de nutrimentos y materia orgánica entre las salidas, representadas por los productos de las cosechas, de las quemas, las lixiviaciones, etc., y las entradas, entendidas como la fertilización o el estercolamiento, la conservación de los residuos de cosecha y los depósitos de sedimentos fértiles.

**Polución**, que se consideró como la degradación de suelos que es consecuencia de la localización, concentración y efecto biológico adverso de una sustancia extraña en el suelo, además, se consideraron tanto a las fuentes como tiraderos de basura, derrames, residuos industriales, etc., así como a la polución aérea, deposición de compuestos acidificantes y/o metales pesados. Todo esto como consecuencia de la aplicación de agroquímicos, derrames y depósitos de hidrocarburos y otras fuentes.

**Salinización/Alcalinización**, consideradas como un incremento neto en el contenido de sales en el suelo, que provoca una disminución en el rendimiento de los cultivos, esto como consecuencia principalmente del mal manejo del agua de riego.

**Acidificación**, considerada como una disminución del pH del suelo a través de procesos de movilización o incrementos de compuestos que acidifican al suelo.

**Eutroficación**, que corresponde al exceso de nutrimentos del suelo que perjudican el desarrollo

de las plantas, originado por aplicaciones desbalanceadas de fertilizantes químicos orgánicos e inorgánicos, que originan un exceso de nitrógeno o de fósforo; o por encalado.

**Compactación**, asociada al deterioro de la estructura del suelo por el pisoteo del ganado o por el paso frecuente de maquinaria.

**Encostramiento y sellamiento**, esto asociado al relleno de los poros del suelo por material fino y desarrollo de una capa impermeable en la superficie del suelo que impide la infiltración del agua de lluvia, causado por una cobertura vegetal pobre, así como el efecto máximo del golpeteo de las gotas de lluvia, el bajo contenido de materia orgánica y con la destrucción de la estructura del suelo.

**Anegamiento**, esto asociado con las acciones humanas que inducen al hidromorfismo, excluyendo los campos arroceros inundados. Las posibles causas asociadas con este proceso fueron la elevación del nivel del agua debido a la construcción de represas para riego y/o incremento de la frecuencia de inundaciones.

**Hundimiento del suelo superficial**, asociado a la mineralización de la materia orgánica en suelos orgánicos y al asentamiento de suelos minerales debido al abatimiento del nivel del agua

**Pérdida de la función productiva**, asociada al uso de los suelos para la urbanización y actividades industriales, infraestructura, minería, así como los bancos de material.

**Disminución de la disponibilidad de agua en los suelos**, asociado al abatimiento del nivel del agua por actividades agrícolas o por extracción de agua potable, disminución de la cobertura del suelo así como la reducción del contenido de materia orgánica.

Se evaluaron los niveles de afectación de la degradación del suelo en términos de la productividad biológica de los terrenos considerando cuatro niveles: ligero, moderado, fuerte y extremo. Los terrenos con nivel ligero son aptos para sistemas forestales, pecuarios y agrícolas locales, presentan alguna reducción apenas perceptible en su productividad. Los terrenos con nivel moderado son aptos para sistemas forestales, pecuarios y agrícolas locales y presentan una marcada reducción en su productividad. Los terrenos con niveles de afectación fuerte son a nivel predio o de granja con una degradación tan severa que se pueden considerar con productividad irrecuperable a menos que se realicen grandes trabajos de ingeniería para su restauración. Los terrenos con afectación extrema, son aquellos en que su productividad es irrecuperable y su restauración materialmente imposible.

La evaluación de la degradación de los suelos se realizó a través de recorridos de campo por cada una de las entidades federativas, y se contó generalmente con el apoyo de expertos estatales, profesionales de instituciones gubernamentales o educativas. El personal técnico del Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, se apoyó durante esos recorridos en los espaciomaps (imágenes de satélite) y en la experiencia local de los expertos, para identificar, localizar y evaluar los tipos de degradación de suelos dentro de las unidades.

Además, de la evaluación de la degradación de los suelos, que en gran medida es cualitativa, se documentaron las características de cada unidad con una fotografía terrestre de su paisaje.

Asimismo, para cada tipo de degradación se realizó, hasta donde fue posible, un muestreo de suelos de la capa arable o del suelo superficial (de 0 a 20 cm de profundidad) dentro de cada unidad. Cada punto de muestreo se georreferenció con un GPS, y se colectó 1 kg de muestra, posteriormente, en el laboratorio del Área de Clasificación de Suelos del Colegio de Postgraduados, se determinaron su reacción (pH), conductividad eléctrica (CE) del extracto de saturación, materia orgánica (MO), cationes solubles (Ca, Mg, Na y K), relación de absorción de sodio (RAS), porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y densidad aparente (Dap).

## **2.4 Índice de Aridez como indicador del régimen de humedad de los suelos en condiciones actuales y bajo escenarios de cambio climático**

El régimen de humedad de los suelos se estimó a partir del Índice de Aridez, el cual se toma como criterio por la Convención de Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación (CNULD, 1994) para definir a las tierras secas, en donde establece que la definición de los tipos climáticos se realice a partir de la relación que guarda la precipitación (P) y la evapotranspiración potencial (ETP), lo que se definió como Índice de Aridez. La lluvia define la cantidad de humedad disponible mientras que la evapotranspiración potencial refleja el consumo de ésta por los organismos del suelo y las plantas. De modo que si el cociente de  $P/ETP$  es menor a 0.65 es el criterio que define a las tierras secas y si es igual o mayor a este parámetro, entonces serán tierras húmedas.

Los valores en la clasificación del Índice de Aridez permiten diferenciar siete clases de tipos climáticos para las tierras, como se detalla en la tabla 6. Las tierras secas serán aquellas clases hiperáridas, áridas, semiáridas y subhúmedas secas.

Tabla 6 Tipos climáticos definidos por el Índice de Aridez de acuerdo a los criterios de la CNULD.

Índice de Aridez	Tipos climáticos
0.000 - 0.050	Hiperárido
0.051 – 0.200	Árido
0.201 – 0.500	Semiárido
0.501 – 0.650	Subhúmedo seco
0.651 – 0.750	Subhúmedo húmedo
0.751 – 1.250	Húmedo
1.251 – 2.500	Muy Húmedo
>2.500	Per-húmedo

El Índice de Aridez se determinó para lo que se considera el escenario basé que fue estimado con el promedio de datos climáticos de 1970 al 2012. El cálculo de la Evapotranspiración Potencial (ETP) se realizó con el modelo de Penman modificado por Monteith (Sys et al., 1991), el cual estima por medio de un modelo físico la evapotranspiración potencial diaria sobre la superficie de agua libre y poco profunda expresada en milímetros (ET<sub>o</sub>) y para la estimación de la evapotranspiración potencial mensual (ETP), se multiplica este parámetro por el número de días del mes. La fórmula consta de un término de radiación y de un término aerodinámico, y tiene por expresión:

$$ET_o = k * (W * (Rn + G) + (1 - W) * (u) * (e^0 - e))$$

Dónde:

ET<sub>o</sub> = evapotranspiración sobre superficie agua libre (mm/día)

k = coeficiente de conversión de energía por unidad de superficie a mm de agua que es capaz de evaporar esa energía:

$$k = \frac{10}{\lambda v}$$

Se obtiene fácilmente considerando el calor de vaporización del agua: y se calcula de la siguiente manera:

$$\lambda v = 595 - (T * 0.51)$$

W = factor de ponderación de los efectos de la radiación sobre la ETo. Se calcula por medio de la expresión:

$$W = \frac{\Delta}{\Delta + y}$$

$\Delta$  = pendiente de la curva de saturación del vapor, que se estima con la derivada de la fórmula de Bossen particularizada para la temperatura media T (°C).

$$\Delta = 33.8693(0.05904(0.00738T + 0.8072)^7 - 0.0000342) \frac{mb}{^{\circ}C}$$

y = constante psicométrica, calculada por la expresión:

$$y = \frac{Cp * Pi}{0.62198 * \lambda vi} \frac{mb}{^{\circ}C}$$

Cp = calor específico del aire seco a presión constante P  
= presión atmosférica media mensual

$\lambda v$  = calor de vaporización del agua

$$\lambda v = 595 - (T * 0.51)$$

1-W = factor de ponderación correspondiente a los efectos del viento y de la humedad sobre la ETP. Es complementario del anterior según la expresión:

$$1 - W = \frac{y}{\Delta + y}$$

$G$  = flujo advectivo de calor, energía disponible para evaporar por invasiones de aire cálido. Se puede tomar como valor cero al ser un valor pequeño.

$R_n$  = radiación neta, diferencia entre la radiación neta entrante y la saliente:

$$R_n = (1 - \alpha) R - R_b$$

$(1 - \alpha) R$  = fracción no reflejada

$\alpha$  = albedo (0.23 – 0.25) de la radiación solar

$$R = R_A \left( 0.18 + 0.55 \frac{n}{N_i} \right)$$

$R_A$  = radiación global en el límite superior de la atmósfera  $n_i$

= horas de insolación reales en el observatorio (h/día)  $N_i$  =

horas de insolación máxima (h/día)

$R_b$  = radiación térmica perdida

$$R_b = R_{bo} \left( a \frac{R}{R_{bo}} + b \right)$$

$a = 1.2$  para zonas áridas; o  $1.0$  en zonas húmedas  $b$

=  $-0.2$  para zonas áridas; o  $b_0$  en zonas húmedas  $R =$

radiación solar (calculada anteriormente)

$R_{bo}$  = radiación térmica perdida en un día sin nubes, estimada a partir de la emisión según la temperatura (Ley de Stefan – Boltzmann) afectada por un coeficiente de emisión que es función de la humedad del aire:

$$R_{BO} = \varepsilon \sigma T^4$$

El valor de emisividad  $\varepsilon$  de la ecuación se estima mediante la expresión:

$$\varepsilon = (a_1 + b_1 * e^{0.5}); \text{ de forma que:}$$

$$R_{bo} = (a_1 + b_1 * e^{0.5}) T^4$$

Dónde:

$$a_1 = 0.39$$

$$b_1 = -0.05$$

$$e(T_i) = e_0(T_i) \text{ HR}_i/100$$

$\sigma$  = constante de Stefan – Boltzmann,  $\sigma = 11.71 * 10^{-8}$

$T$  = temperatura del aire en grados Kelvin ( $T_k = 273 + T_c$ )

$R_{so}$  = radiación solar en un día sin nubes ( $R$  cuando  $n=N$ )

$f(u)$  = función de viento, que define los efectos del viento como energía disponible para evaporar agua por medio de la expresión:

$$f(u) = 15.36 (1 + 0.0062 U_2)$$

$U_2$  = velocidad del viento (km/día) a una altura de 2m

Por tanto, se debe conocer la altura del anemómetro; siendo posible corregir la velocidad cuando está situado a una altura diferente ( $z$ ) por medio de la expresión:

$$U_2 = U_z \left(\frac{z}{z_0}\right)^{0.2}$$

$e_0 - e$  = déficit de saturación de vapor; para obtenerlo como media, la tensión de saturación se aproxima según la expresión:

$$e^0 = 0.5 (e^0(T_i) + e^0(t_i))$$

o como:

$$e^0 = e^0(T_i)$$

Y la tensión de vapor se obtienen a partir de la humedad relativa como:

$$e(T) = e^0(T) \frac{HR_i}{100}$$

## 2.5 Dinámica del Carbono Orgánico del Suelo (COS) en las tierras agrícolas de México bajo escenarios de cambio climático.

A partir de las bases de datos de precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial mensual para las Áreas de Influencia Climática del país para el escenario base y los escenarios de cambio climático que se generaron aplicando los Modelos Generales de Circulación Atmosférica (MGCA) HADGEM y GFDL, esto para los horizontes de tiempo de corto y mediano plazo (2015-2039, 2039-2069, respectivamente) para las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP) de 4.5 y 8.5 Watts/m<sup>2</sup> de forzamiento radiativo. Las razones de cambio obtenidas con estos modelos se aplicaron a la base de datos de precipitación y temperatura del escenario base en las Áreas de Influencia Climática y generar las bases de datos para cada condición que se describe de cambio climático.

Para la estimación de la dinámica de mineralización de la materia orgánica de los suelos agrícolas de México se consideraron los escenarios de cambio climático aplicándolos a la base de datos del INEGI que reporta el contenido de materia orgánica del suelo para las zonas agrícolas de México y a partir de los datos reportados de contenido de materia orgánica de los suelo y los datos obtenidos de precipitación y temperatura bajo escenarios de cambio climático, se aplicaran el modelo de contabilidad del carbono establecido en los lineamientos del IPCC (2006) y el modelo de disminución de la materia orgánica del suelo en el proceso de degradación de tierras (Ortiz et al., 1994).

El modelo de contabilidad de carbono del IPCC (2006), se representa en la siguiente formula:

$$\Delta C_{\text{mineral}} = \frac{(SOC_0 - SO_{(0-T)})}{D}$$

$$SOC = \sum_{c,s,i} (SOC_{REF} * F_{LU} * F_{MG} * F_I * A)$$

Donde

$\Delta C_{\text{mineral}}$  = cambio anual en las existencias de carbono de los suelos minerales, Mg/C/año.

$SOC_0$  = existencias de carbono orgánico en el suelo en el último año de un período de inventario, Mg C.

$SO_{(0-T)}$  = existencias de carbono orgánico en el suelo al comienzo de un período de inventario, Mg C.

$D = 30$  años.

$c$  = representa las zonas climáticas,  $s$  = los tipos de suelo, e  $i$  = el conjunto de sistemas de gestión.

$SOC_{REF}$  = las existencias de carbono de referencia, Mg/C/ha.

$F_{LU}$  = factor de cambio de existencias para sistemas de uso de la tierra.

$F_{MG}$  = factor de cambio de existencias para el régimen de gestión.

$F_I$  = factor de cambio de existencias para el aporte de materia orgánica.  $A$  = superficie de tierra del estrato que se estima.

El SOC de referencia fue el reportado por el INEGI para las diferentes unidades de suelos con vegetación natural con las que se asocian las áreas agrícolas del país, esto es la vegetación natural previa al cambio de uso del suelo a actividades agrícolas. El  $SOC_0$  fue el que se determinó en el inventario realizado por el INEGI y reportado para las áreas agrícolas del país. En la tabla 7 se muestran ejemplos de los factores de cambio de existencias y el SOC de referencia que se utilizaron para aplicar la fórmula que se obtuvo por Ruiz (2015) en un trabajo en la Sierra de Huautla, Morelos.

Tabla 7 Factores de cambio de existencias y  $SOC_{REF}$ 

Factores de cambio	Cultivo (maíz, sorgo)	Bosque natural	Pastizal
$F_{LU}$	0.8	1	1
$F_{MG}$	1	1	0.97
$F_I$	1	1	1
$SOC_{REF}$	70	65	52

Fuente: IPCC, 2006.

Debido a que en la zona agrícola generalmente no existen entradas de materia orgánica, se decidió calcular la degradación biológica, obteniendo la disminución de la materia orgánica del suelo mediante la mineralización anual de este material, a partir del enfoque presentado por (Ortiz *et al.*, 1994) que considera los siguientes factores:

### Índice climático:

A nivel general, el índice climático que se utiliza para conocer la velocidad de mineralización de la materia orgánica del suelo en donde se considera al humus resistente, es el índice de Koepf (1953). Con una velocidad de descomposición como se expresa en la ecuación siguiente:

$$K = \frac{1}{12} \sum_{t=1}^{12} e^{0.1065 * t} \left( \frac{P}{ETP} \right)$$

Dónde:

$K_2$ = Índice climático de degradación biológica.

$P$ = Precipitación media anual mm.

$ETP$ = Evapotranspiración potencial.

$T$ = Temperatura media anual en °C.

Cuando  $P > ETP$ ,  $P/ETP = 1$  y para  $t < 0$ ,  $t = 0$

### Índice edáfico:

Considera que la disminución de la materia orgánica del suelo depende de la textura del suelo, de la naturaleza de la materia orgánica, del pH, del porcentaje de carbonato de calcio y del contenido de agua en el suelo por arriba de la capacidad de campo.

Para trabajos regionales como el que se realizó en este estudio, el índice edáfico se determinó al evaluar el efecto de la textura y el contenido de carbonato de calcio (Ortiz et al., 1994). La estimación de este índice se obtuvo a partir de las relaciones que se muestran a continuación en la Tabla 8.

**Tabla 8 Factores edáficos asociados a la textura del suelo y al contenido de carbonatos de calcio**

Factor asociado a la textura	Clase textural		
	Gruesa	Media	Fina
	1.5	1.0	0.5
Factor asociado a el contenido de CaCO <sub>3</sub>	Porcentaje de CaCO <sub>3</sub>		
	0	5	15
	1	0.8	0.6

Para este índice, se considerarán la clase textural reportada por INEGI para cada una de las unidades de suelos agrícolas, así como el contenido de carbonato de calcio reportado para estos suelos.

Los resultados se compararon con los obtenidos mediante la fórmula propuesta por el IPCC (2006) en la cual también da por hecho que no existen entradas de materia orgánica en la zona agrícola.

Después de estimar la pérdida de la materia orgánica del suelo con la metodología descrita, considerando los dos modelos generales de circulación atmosférica (HADGEM y el GFDL), para los dos RCP (4.5 y 8.5 Watts/m<sup>2</sup> de forzamiento radiativo) y para los dos horizontes de tiempo de corto y mediano plazo (2015-2039, 2039-2069, respectivamente), se realizó la representación cartográfica de estos valores para los suelos agrícolas de México a escala 1: 250 000 con el uso del ArcGis.

## 3.ACOPIO DE INFORMACIÓN Y CARTOGRAFÍA DIGITAL DE FUENTES OFICIALES.

### 3.1 Evaluación de la degradación de los suelos en México.

La evaluación de la degradación de los suelos debe comprender el análisis e integración de la información sobre la pérdida de suelo por erosión hídrica y por erosión eólica, así como de la degradación química y física de los suelos. La información utilizada como insumo para valorar la condición de los suelos a nivel nacional, así como las fuentes provenientes está descrita en la tabla 9. El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) proporcionó los mapas y las bases de datos de fuentes oficiales.

Tabla 9 Insumos utilizados para evaluar la degradación de los suelos en México

Insumos	Utilizado en	Fuente
Datos de precipitación de las Áreas de Influencia Climática		Gómez et al, 2012
Modelo de Elevación Digital de México 120m		INEGI, 2008
Mapa de Uso de Suelo y Vegetación Serie V	Mapa de Erosión hídrica	INEGI, 2013
Mapa Edafológico Serie II		INEGI, 2015
Fórmulas corregidas para cálculo del factor R		Cortés, 1991
Datos de velocidad media del viento		CLICOM (WMO, 2007)
Mapa de Uso de Suelo y Vegetación serie IV		INEGI, 2008
Imágenes de satélite de temporada seca y temporada húmeda 30 m	Mapa de Erosión eólica	LANDSAT (INEGI, 1995)
Modelo de Elevación Digital de México 120m		INEGI, 2008

<b>Insumos</b>	<b>Utilizado en</b>	<b>Fuente</b>
Mapa de degradación física de suelos por el método GLASOD	Mapa de degradación física	SEMARNAT-CP, 2002
Mapa de degradación química de suelos por el método GLASOD	Mapa de degradación química	SEMARNAT-CP, 2002

## **4. OBTENCIÓN, TRATAMIENTO Y ACOMODO DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO QUE SE UTILIZARON EN LA EVALUACIÓN DE IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS SUELOS.**

### **4.1 Obtención de los escenarios de cambio climático para la evaluación de su impacto en los suelos.**

El INECC proporcionó los modelos generales de circulación atmosférica HADGEM, GDFL, MPI, CNRM y REA<sup>1</sup> bajo los RCP de 4.5 y 8.5 con periodos de tiempo de: corto (2015- 2039), mediano (2039-2069) y largo plazo (2069-2099).

### **4.2 Tratamiento y acomodo de escenarios de cambio climático para la evaluación de su impacto en los suelos.**

Para su uso se verificó que se encontraran en el mismo sistema de referencia que los mapas de los diferentes parámetros que se evaluaron, los que principalmente son productos del INEGI (IRTF92). Por medio de un SIG se montaron los valores de temperaturas y precipitación en los mapas base, generando 28 mapas diferentes por cada escenario de cambio climático considerando los modelos, RCP's y periodos de tiempo contemplado en el conjunto de datos. Los datos de precipitación se ajustaron considerando las razones de cambio obtenidas para cada escenario de cambio climático y con estos valores se estimó la erosividad de la lluvia (R) para el cálculo de la erosión hídrica bajo los escenarios de cambio climático.

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial mensual (ETP) por el método de Penman modificado por Monteith, que es un parámetro requerido para la estimación de la erosión eólica y del Índice de Aridez, se utilizaron los datos de temperatura máxima y mínima obtenidos con los escenarios de cambio climático, así como el ajuste de la humedad relativa estimada a partir del valor de presión de vapor a saturación bajo escenarios de cambio climático asociado a la temperatura media del escenario.

---

<sup>1</sup> El Modelo REA no contempla el periodo de tiempo de mediano plazo

Para la dinámica del carbono orgánico del suelo en las áreas agrícolas del país, a los datos obtenidos de precipitación y temperatura bajo escenarios de cambio climático, se aplicaron el modelo de mineralización del carbono establecido en los lineamientos del IPCC (2006) y el modelo de disminución de la materia orgánica del suelo en el proceso de degradación de tierras (Ortiz et al., 1994).

## 5. DEGRADACIÓN ACTUAL DE SUELOS POR EROSIÓN HÍDRICA

Asociado al factor de erosividad de la lluvia (R) y al relieve complejo expresado en el factor LS, así como a la protección que brinda la cobertura vegetal (C), el 33.12% de la superficie del país está afectada por algún grado de erosión hídrica (Tabla 10). La erosión hídrica potencial estimada considerando que se removiera la cubierta vegetal cubriría el 74% de la superficie del país, lo que indica la importancia de la cubierta vegetal en la protección de los suelos del país.

En la figura 3 se observa la distribución de la erosión hídrica del país, la mayor parte de la superficie afectada por erosión hídrica se concentra en las zonas montañosas con mayor pendiente y los grados extremos en las áreas de estas condiciones donde se ha perdido o degradado la vegetación natural y con precipitaciones medias anuales altas.

Tabla 10 Superficie afectada por erosión hídrica en México

Grados de erosión hídrica	Superficie (miles de hectáreas)	Porcentaje de la superficie
Nula (< 5 ton ha <sup>-1</sup> )	131 032.40	66.88
Ligera (5- 10 ton ha <sup>-1</sup> )	15 091.41	7.70
Moderada (10- 50 ton ha <sup>-1</sup> )	32 654.63	16.67
Severa (50- 200 ton ha <sup>-1</sup> )	13 947.90	7.12
Extrema (> 200 ton ha <sup>-1</sup> )	3 198.46	1.63
Total	195 924.80	100.00

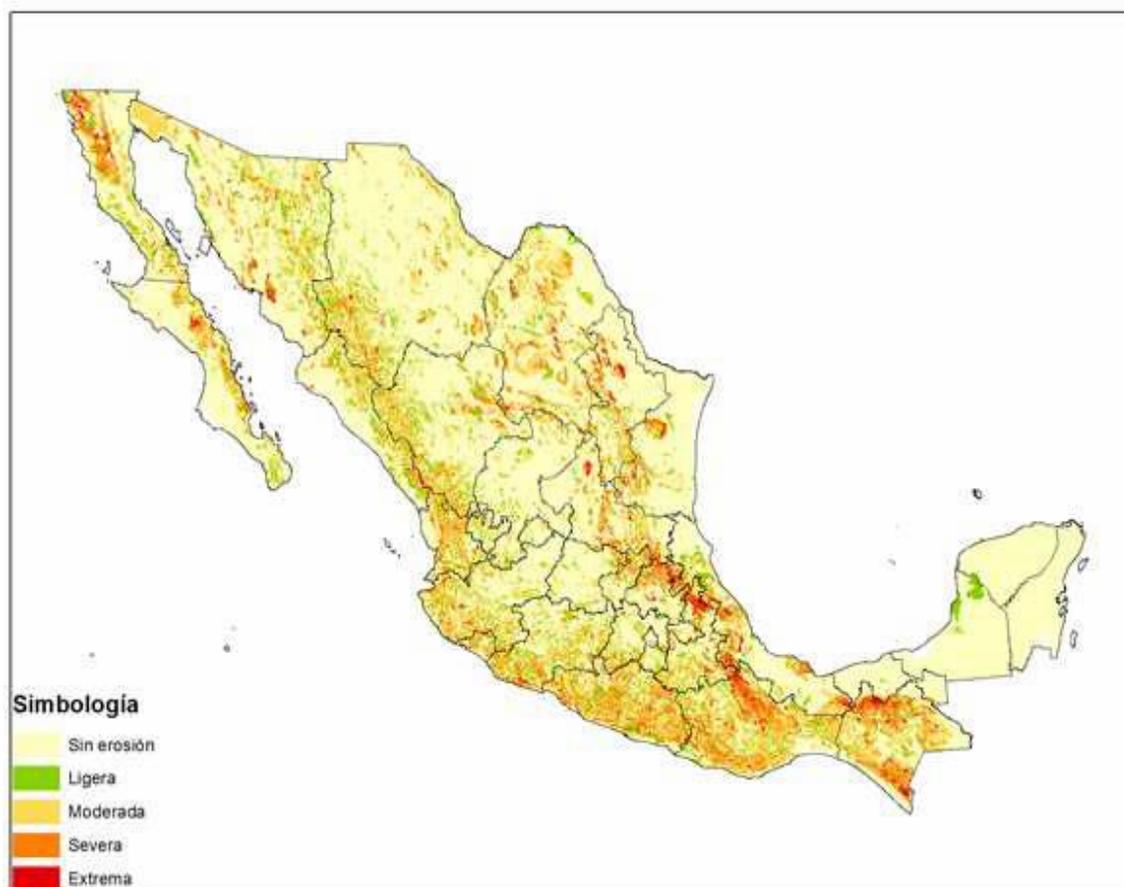


Figura 3 Distribución de la erosión hídrica en la República Mexicana

En la figura 4, se muestra la distribución de los grados de afectación por erosión hídrica a nivel estado, en donde destaca que por extensión, las mayores afectaciones se tienen en Oaxaca con 6 362 159 Has, seguido de Sonora con 5 578 116 Has, Chihuahua con 5 039 926 Has y Guerrero con 4 747 269 Has. Sin embargo los estados con mayor proporción de afectación en su superficie son Guerrero con 75.3%, Oaxaca con 68.7% Colima con 60.3%, Nayarit con 59.7%, Puebla con 56.2% y Chiapas con 55.0%. Los estados prácticamente sin afectación por este proceso son los de la Península de Yucatán, en donde el relieve es casi plano.

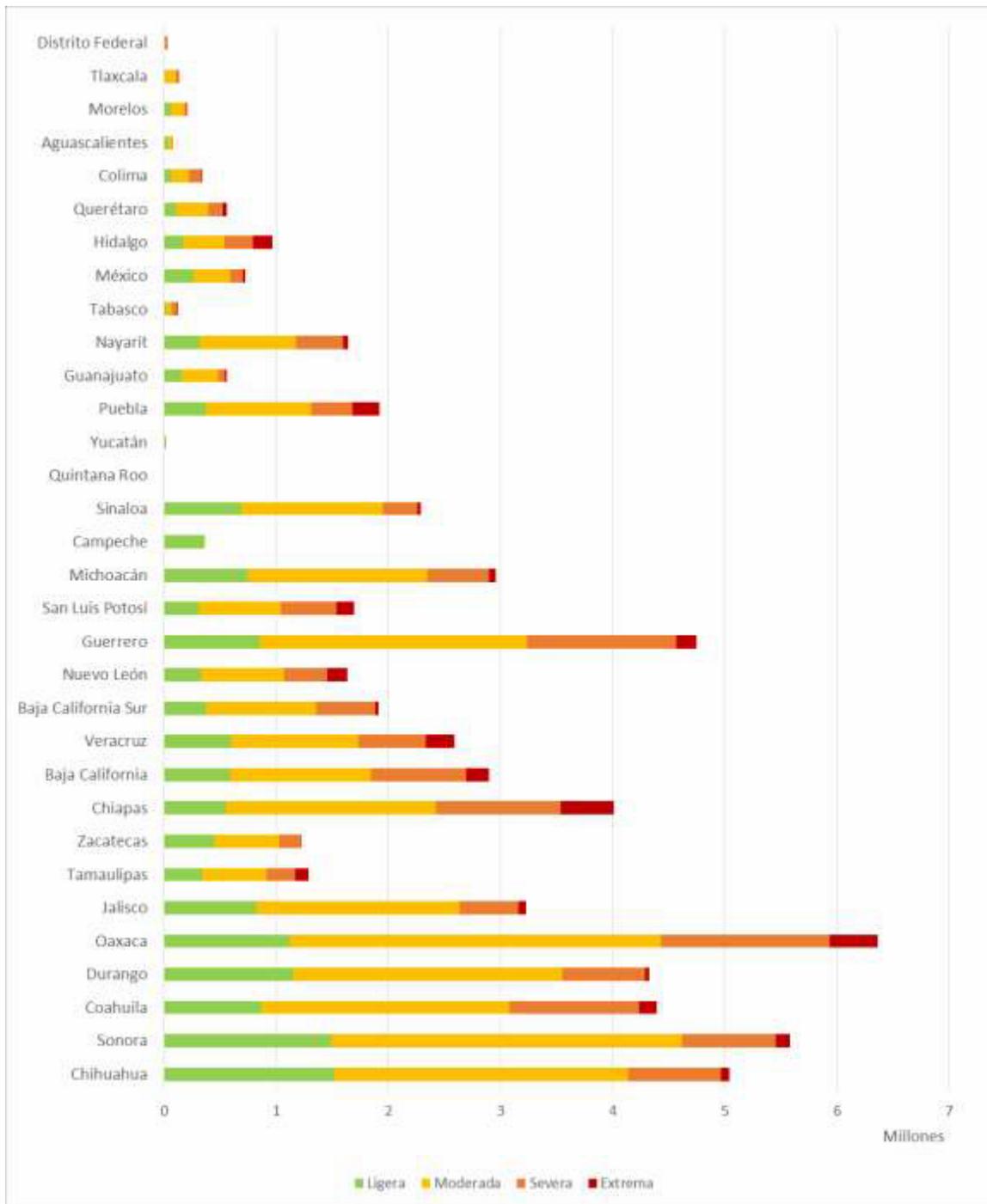


Figura 4 Superficie afectada por erosión hídrica en los estados

## 6. DEGRADACIÓN ACTUAL DE SUELOS POR EROSIÓN EÓLICA

En la tabla 11 se presentan los principales resultados del estudio y su asociación con los tipos climáticos definidos con el Índice de Aridez. El 46.91% de la superficie del país no presenta afectación por erosión eólica (menos de 5 Ton/ha/año), lo cual coincide con las áreas en las zonas montañosas y con alguna cobertura vegetal y de los tipos climáticos comprende casi la totalidad de los climas húmedos y subhúmedos húmedos, cercas del 70% de los subhúmedos secos y 20% de los climas semiáridos y solo el 2% de los climas áridos.

En el rango de erosión eólica ligera (5-10 Ton/ha/año) la superficie afectada es del 9.36% de la superficie del país, la cual se ubica en el 3% de los climas húmedos y 15% de los subhúmedos húmedos, particularmente en los que la precipitación se concentra solo en la mitad caliente del año y la vegetación es del tipo caducifolio y presenta fuertes vientos en la época de secas, este grado de erosión se presenta en el 15% de los climas subhúmedos secos y en el 14% de los semiáridos y el 2% de los áridos. En el rango de erosión eólica moderada (10-50 Ton/ha/año) que es el de mayor proporción en el país, comprende el 34.94% de la superficie del país, la cual se ubica en el 2% de los climas húmedos, el 5% de los subhúmedos húmedos con periodo seco importante a lo largo del año y con vientos fuertes en esta época, en el 17% de los climas subhúmedos secos y en el 58% de los semiáridos y 64% de los climas áridos y 15% de los hiperáridos.

El rango con erosión eólica alta (50-200 Ton/ha/año) comprende el 8.19% de la superficie del país, la cual se ubica en el 7% de las zonas semiáridas del país y el 30% de las zonas áridas, y el 57% de las hiperáridas. El rango de muy alta erosión eólica (más de 200 Ton/ha/año), el 0.6% de la superficie del país, se ubica en el 2% de las zonas áridas y 29% de las hiperáridas.

Tabla 11 Porcentaje de la superficie de México por grado de afectación por erosión eólica en los diferentes tipos climáticos

Tipo Climático	Grado de afectación por erosión eólica					Total
	Sin Erosión <sup>a</sup>	Ligera <sup>b</sup>	Moderada <sup>c</sup>	Alta <sup>d</sup>	Muy Alta <sup>e</sup>	
Hiperárido	0.0	0.0	0.1	0.4	0.2	0.7
Árido	0.4	0.4	12.1	5.6	0.4	18.9
Semiárido	7.3	5.0	20.2	2.3	0.0	34.8
Subhúmedo seco	7.6	1.6	1.9	0.0	0.0	10.9
Subhúmedo húmedo	7.9	1.5	0.5	0.0	0.0	9.9
Húmedo	23.7	1.0	0.1	0.0	0.0	24.8
Total	46.9	9.5	34.9	8.2	0.6	100.0

<sup>a</sup>(< 5 Ton/ha/año), <sup>b</sup>(5-10 Ton/ha/año), <sup>c</sup>(10-50 Ton/ha/año), <sup>d</sup>(50-200 Ton/ha/año), <sup>e</sup>(>200 Ton/ha/año)

En la figura 5 se observa la distribución de la erosión eólica del país, en donde resalta que la afectación más severa se presenta en las zonas más secas como son la zona del delta del río Colorado entre los estados de Baja California y Sonora, así como en las zonas con régimen climático árido de las planicies costeras del pacífico norte que son zonas secas, en donde el viento puede alcanzar grandes velocidades al no presentarse obstáculos naturales como son las zonas de relieve complejo en donde este proceso es menor. También en parte de la Península de Baja California, en zonas con suelos desprotegidos y texturas gruesas. En la figura 6, se muestra la distribución de los grados de afectación por erosión eólica a nivel estado, en donde destaca que por extensión, las mayores afectaciones se tienen en Chihuahua con 17 690 035 Has, seguido de Sonora con 15 341 330 Has, Coahuila con 14 216 353 Has y Baja California con 7 004 756 Has. Sin embargo los estados con mayor proporción de afectación en su superficie son Coahuila con 94.35%, Baja California con 94.17%, Baja California Sur con 93.82%, Sonora con 85.53%, Nuevo León con 83.52% y Zacatecas con 81.05%.

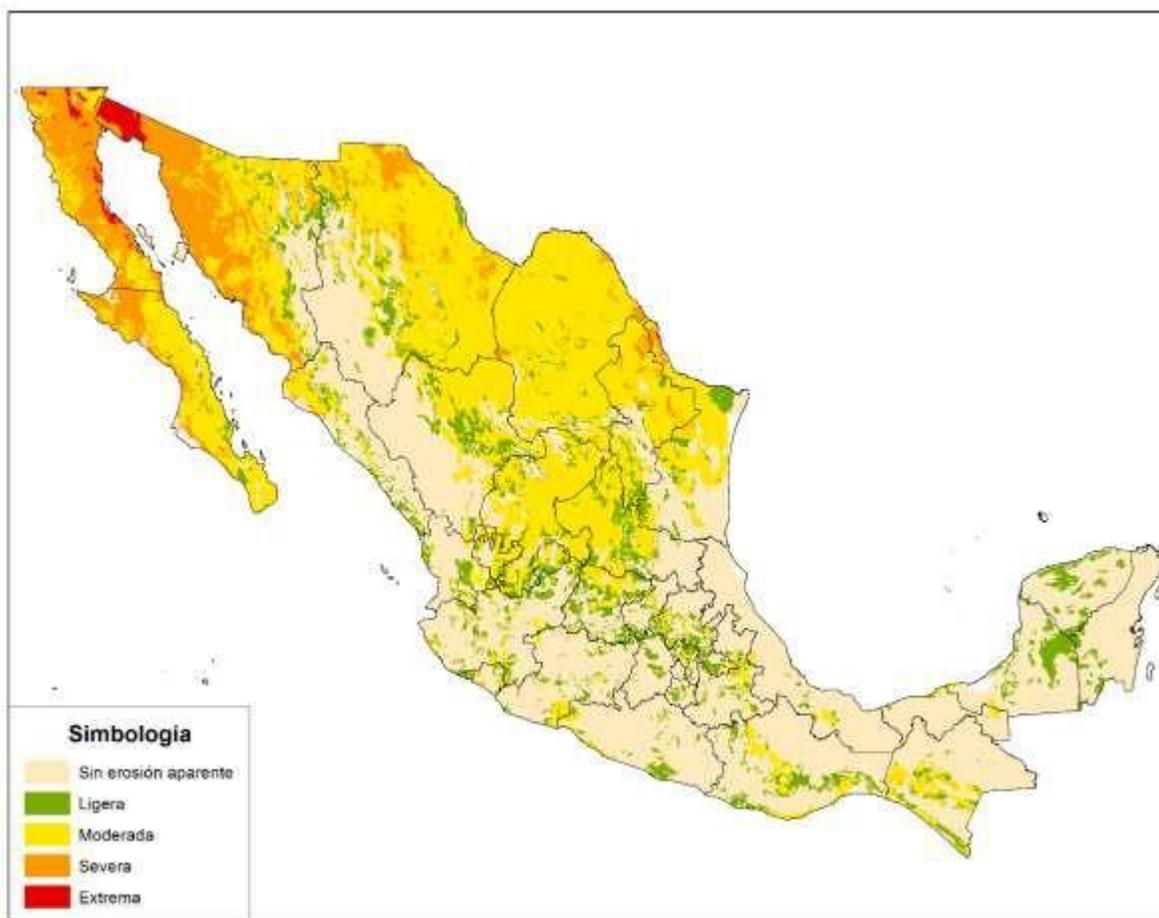


Figura 5 Distribución de la erosión eólica de la República Mexicana

Como se aprecia en la figura 5, estos estados en los que la pérdida del suelo por efecto del viento es muy importante, el clima de su superficie va de hiperárido, árido y semiárido, con escasa vegetación. Los niveles extremos de afectación se presentan en Sonora con 756 237 Has y en Baja California con 404 551 has, en la zona del Delta del Rio Colorado y con clima hiperárido. Los estados con menor afectación por este proceso degradativo son Veracruz con 4.03%, Ciudad de México con 4.93%, Tabasco con 5.43%, Quintana Roo con 7.31%, en el caso de Veracruz, Tabasco y Quintana Roo, el suelo se encuentra la mayor parte del año con humedad suficiente para evitar ser desprendido y transportado por el aire, para la Ciudad de México la mayor proporción de la superficie con déficit hídrico está cubierta por la mancha urbana y en las zonas boscosas el suelo está protegido y/o con humedad la mayor parte del año, lo que limita la pérdida del mismo.

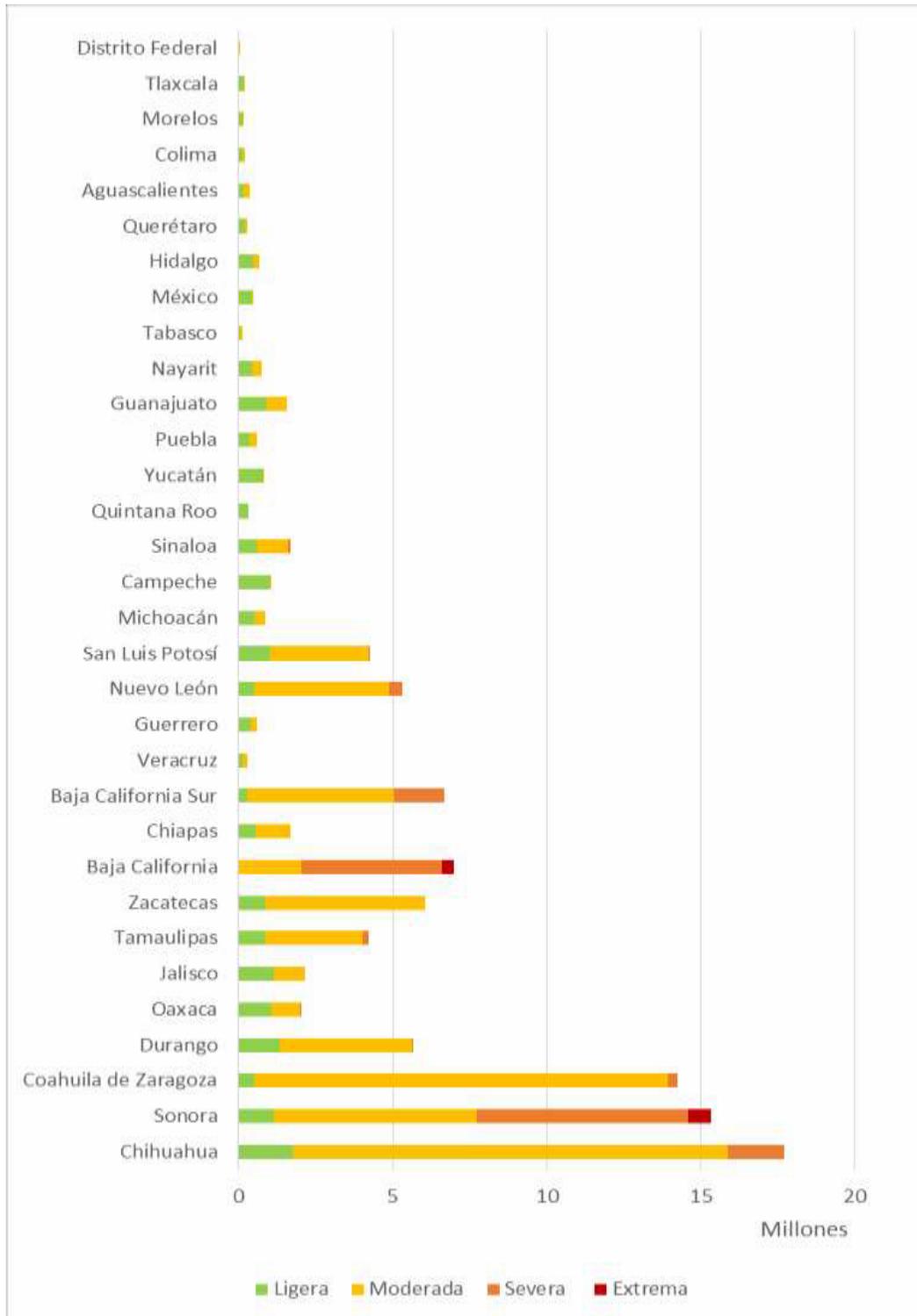


Figura 6 Superficie afectada por Erosión eólica en los estados

## 7. DEGRADACIÓN ACTUAL DE SUELOS POR DEGRADACIÓN FÍSICA

Es importante señalar que los datos que aquí se presentan son los reportados por la evaluación de la degradación de suelos inducida por el hombre elaborada por SEMARNAT-CP (2002), que aunque cuenta con un alto grado de trabajo de campo y se realizó a escala 1:250 000, el procedimiento es cualitativo a partir de la observación general del grado de afectación del terreno. Con base en información de la cartografía de este trabajo, en la tabla 12 se muestra que el 82.2% de la superficie del país, no presenta degradación física. Entre las principales causas de degradación física se identificaron el cambio de uso del suelo para fines agrícolas y el sobrepastoreo y los tipos de degradación física que corresponden a: Anegamiento, Compactación, Disminución de la disponibilidad de agua, encostramiento y Pérdida de función productiva. La superficie del país con estas afectaciones corresponden a 0.03% afectado por anegamiento, 9.4% por compactación, 0.2% por disminución de la disponibilidad de agua, 0.6% por encostramiento, 7.6% por pérdida de la función productiva, con una afectación total de 17.8% de la superficie del país, que corresponde a una superficie de 34 936 500 hectáreas.

Tabla 12 Superficie afectada por degradación física en México

Tipos de degradación física	Superficie (miles de hectáreas)	Porcentaje de la superficie
Sin degradación	416 098.3	82.2
Anegamiento	48.7	0.03
Compactación	18 458.2	9.4
Disminución de la disponibilidad de agua	406.0	0.2
Encostramiento	1 230.1	0.6
Pérdida de la función productiva	14 793.4	7.6
Total	195 924.8	100.0

En la figura 7 se muestra la distribución de los diferentes tipos de afectación por degradación física en México, en donde se aprecia una afectación considerable por compactación en las planicies costeras del Golfo Norte y la Sur, así como en la parte norte de la Península de Yucatán. En la Planicie Costera de Sonora se reporta la afectación por disminución en la disponibilidad de agua y en la Planicie Costera de Sinaloa, se reporta que ocurre encostramiento y sellamiento, mientras que a lo largo de todo el país se reporta la pérdida de la función productiva.

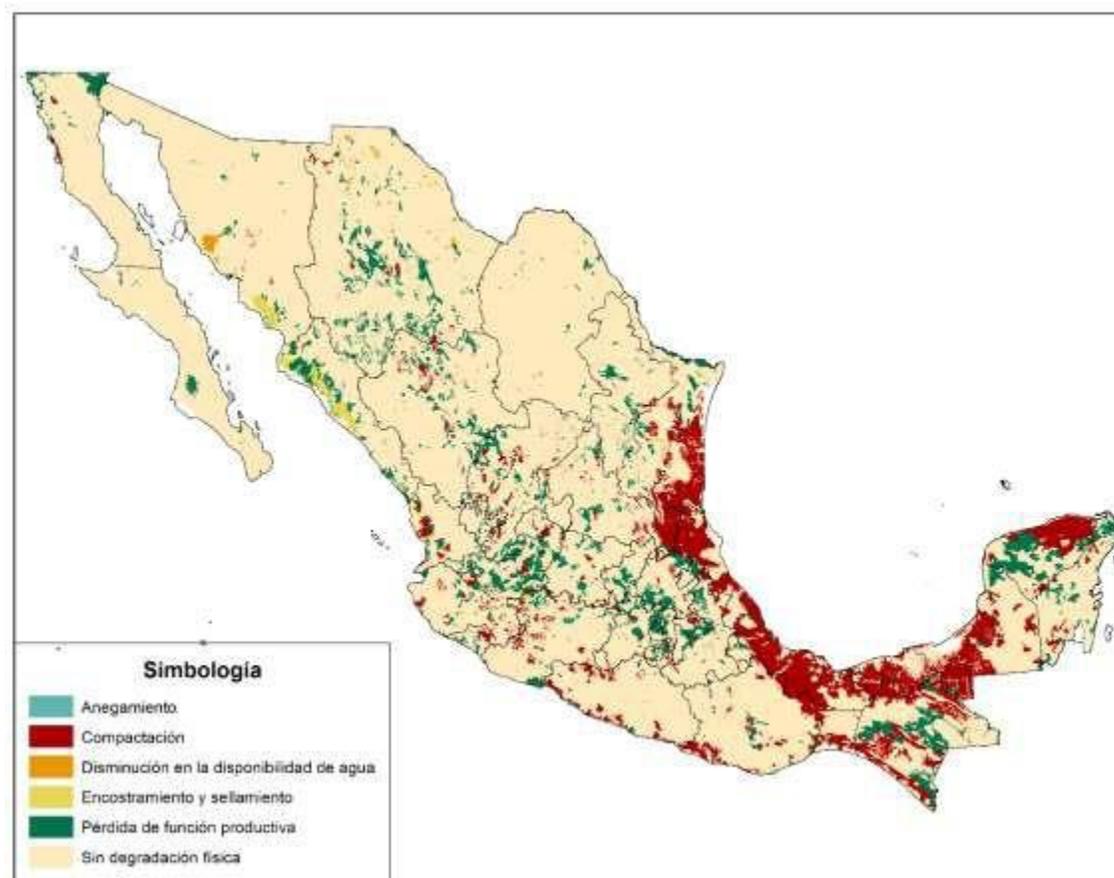


Figura 7 Distribución de la degradación física de suelos (SEMARNAT-CP, 2002)

Los estados mayor superficie afectada son (Figura 8): Veracruz con 4 452 868 Has, Chiapas con 3 299 511 Has, Tamaulipas con 2 624 806 Has, Chihuahua con 2 411 391 Has y Jalisco con 1 904 154 Has. Y los estados con mayor proporción de afectación son: Tabasco con una afectación de 66.8%, Veracruz con 63.4%, Yucatán con 58.4%, Ciudad de México con 49.8% y Tlaxcala con 48.9% (figura 8).

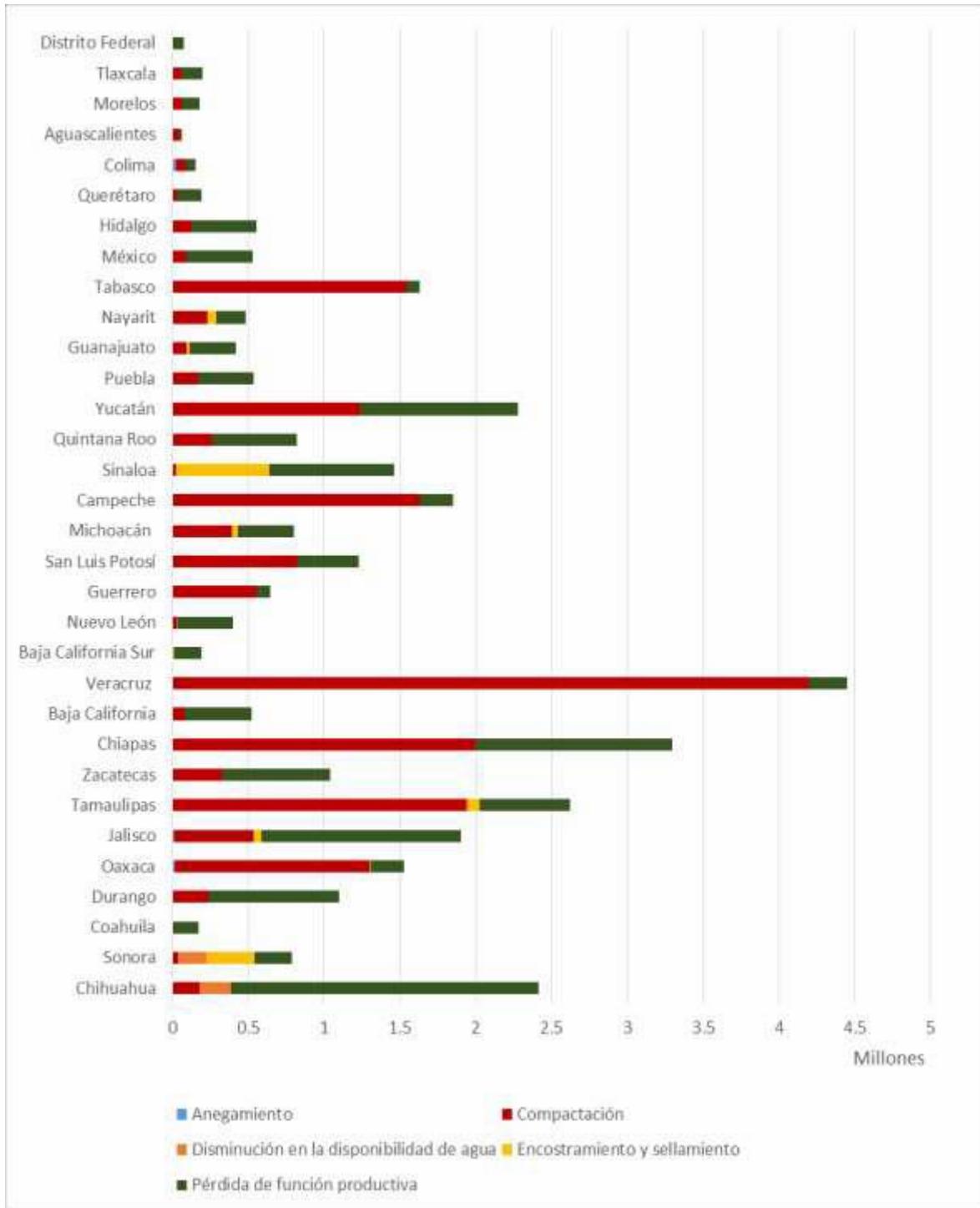


Figura 8 Superficie afectada por degradación física del suelo en los estados.

## 8. DEGRADACIÓN ACTUAL DE SUELOS POR DEGRADACIÓN QUÍMICA

Como se indicó en la degradación actual de suelos por degradación física, los datos que aquí se presentan son los reportados por la evaluación de la degradación de suelos inducida por el hombre elaborada por SEMARNAT-CP (2002), con base en información de la cartografía de este trabajo, en la tabla 13 se muestra que el 79.6% de la superficie del país, no presenta afectación por la degradación química. Los diferentes tipos de degradación química reportados son: Declinación de la fertilidad y reducción de la materia orgánica del suelo con un porcentaje de la superficie del país de 19.3%, la Eutrofización con un 0.1%, la Polución con 0.6% y la Salinización/Alcalinización con 0.4%.

Tabla 13 Superficie afectada por degradación química en México

Tipos de degradación física	Superficie (miles de hectáreas)	Porcentaje de la superficie
Sin degradación	155 880.1	79.6
Declinación de la fertilidad y reducción de la materia orgánica	37 830.0	19.3
Eutrofización	197.7	0.1
Polución	1 238.0	0.6
Salinización/Alcalinización	779.0	0.4
Total	195 924.8	100.0

En la figura 9 se muestra la distribución de los diferentes tipos de afectación por degradación química en México, en donde se aprecia que la afectación por declinación de la fertilidad y reducción de la materia orgánica corresponde principalmente a los suelos agrícolas, lo que se asocia a la falta de incorporación de materiales orgánicos como residuos de cosecha y estiércoles, por lo que están en un proceso continuo de disminución del contenido de materia orgánica y de declinación de la fertilidad. La salinización y/o alcalinización es evidente en las áreas agrícolas de la planicie costera de Sonora y en las zonas de los distritos de riego del norte de Tamaulipas.

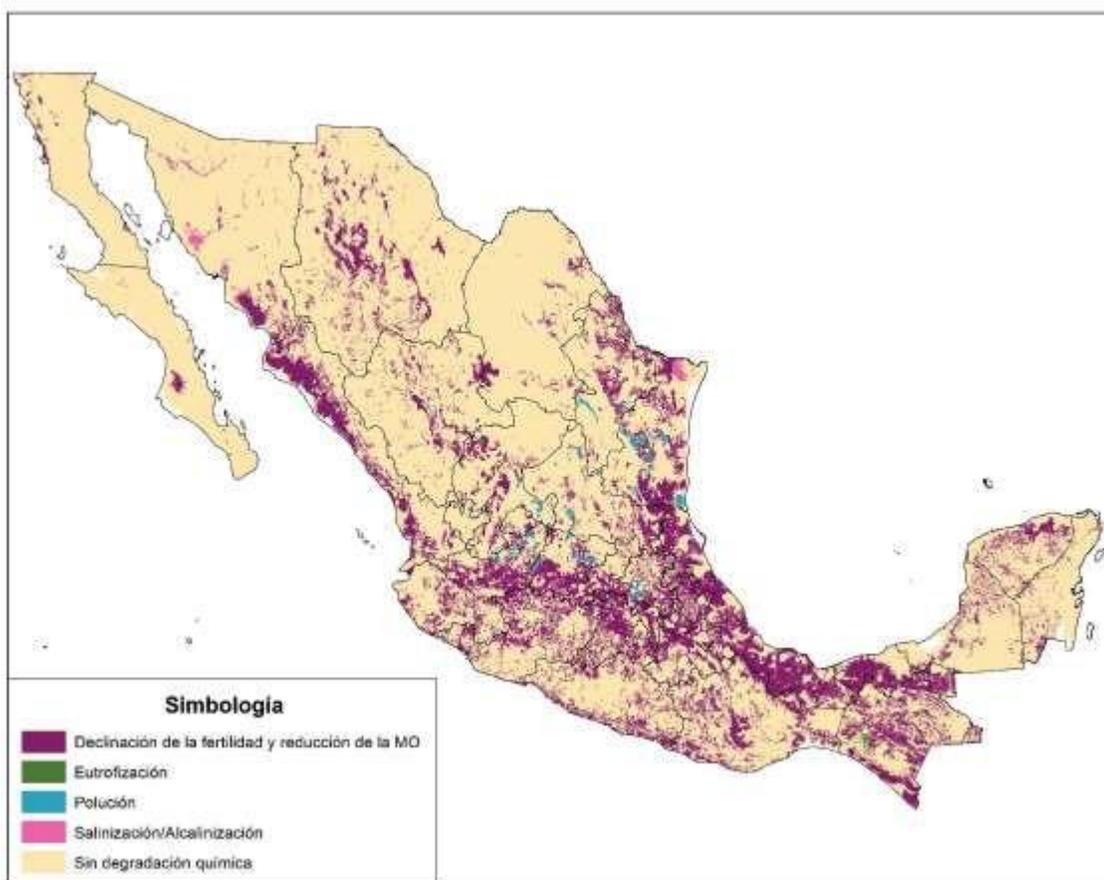


Figura 9 Distribución de la degradación química en México.

Los estados mayor superficie afectada son (Figura 10): Veracruz con 4 307 299 Has, Chiapas con 2 893 677 Has, Tamaulipas con 2 640 341 Has, Chihuahua con 2 553 533 Has,

Oaxaca con 2 485 066 Has y Jalisco con 2 430 918 Has. Y los estados con mayor proporción de afectación son: Veracruz con una afectación del 61.4% de su superficie, Tlaxcala con 60.1%, Morelos con 54.6%, el Estado de México con 53.9% y Tabasco con una afectación de 53.9%.

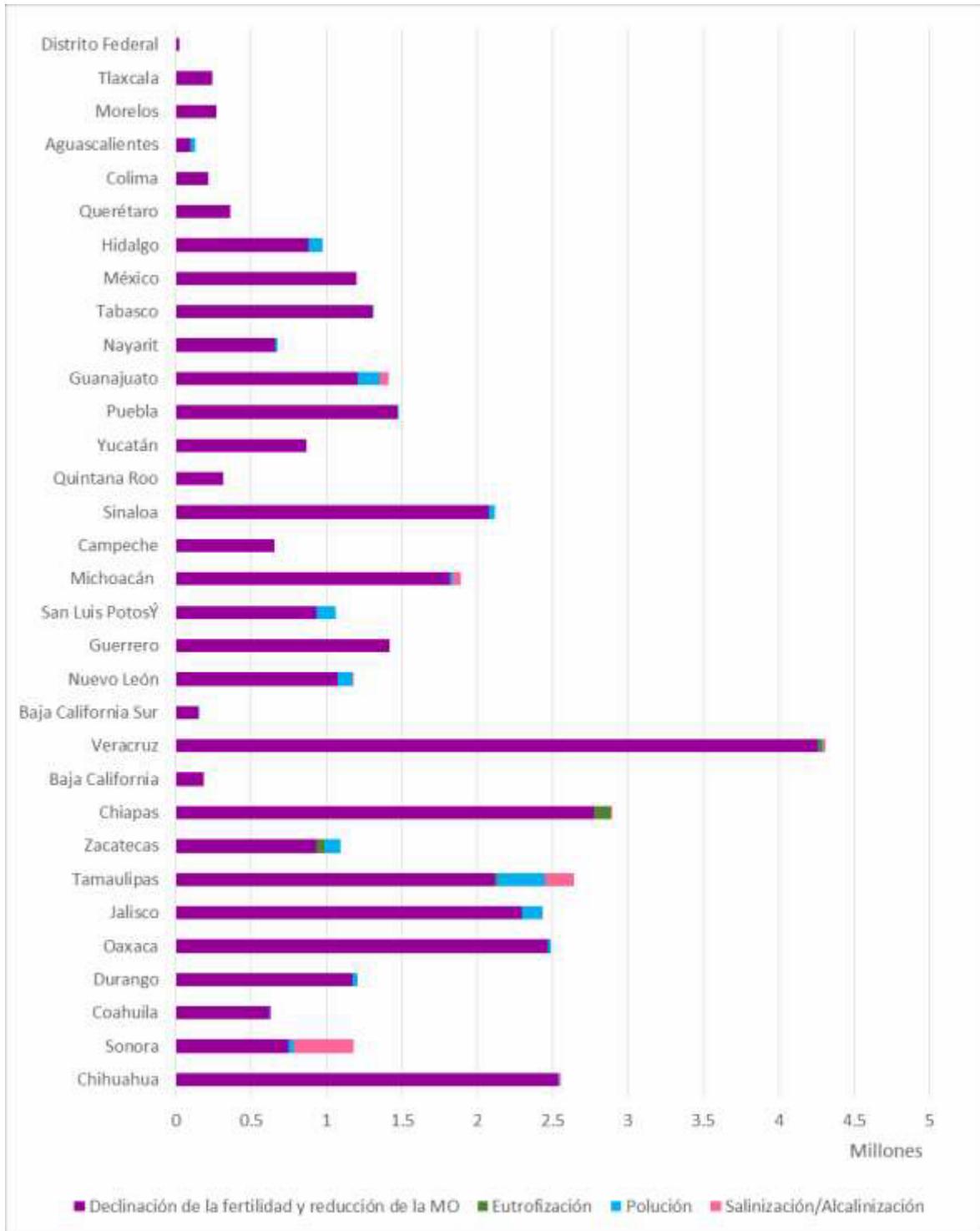


Figura 10 Superficie afectada por degradación química en los estados

## 9. DEGRADACIÓN DE SUELOS POR EROSIÓN HÍDRICA EN CONDICIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO

Es importante resaltar que para la estimación de la erosión hídrica solo se ajustó el factor de erosividad de la lluvia (R), esto tomando como base los cambios en la precipitación media anual calculada con las razones de cambio para los RCP 4.5 y 8.5 y para los escenarios de tiempo a corto, mediano y largo plazo con los modelos HADGEM, GFDL, MPI y el CNRM. El factor de longitud y grado de la pendiente no cambia, sin embargo para el factor asociado al tipo de vegetación y porcentaje de cobertura se consideró el estimado con la vegetación actual, ya que no se contó con información que permitiera hacer los ajustes a este factor como consecuencia del cambio de la vegetación para los diferentes escenarios de cambio climático.

En las tablas 14, 15 y 16 se detalla la superficie y el porcentaje del total nacional por grado de afectación de erosión hídrica, para los escenarios a corto, mediano y largo plazo, respectivamente estimada con los modelos HADGEM, GFDL, MPI y el CNRM, para un RCP de 4.5 Watts/m<sup>2</sup>, estos tomando como referencia el escenario base. En los tres escenarios de tiempo se observa una ligera disminución en la superficie afectada por erosión para todos los modelos generales de circulación atmosférica utilizados. Para los escenarios de corto plazo, la mayor reducción en la superficie afectada por erosión hídrica fue la que se estimó con los modelos GFDL y el MPI, misma que fue de 1.2% de la superficie total del país.

Para el mediano plazo, la mayor reducción de la superficie afectada por la erosión hídrica fue la que se obtuvo en los resultados de los modelos HADGEM y el MPI con una reducción de 1.3% de la superficie total del país. En cambio para el escenario a largo plazo las mayores disminuciones en la superficie afectada por erosión hídrica fueron las obtenidas con el modelo GFDL con un valor de 2.6% de la superficie total nacional, seguido por las obtenidas con MPI, con valores de 1.3% de la superficie total del país. Como se aprecia, el total de la superficie afectada no cambia considerablemente en los tres escenarios de tiempo considerados, esta reducción en la severidad de afectación por erosión hídrica se asocia a que el valor del factor de erosividad de la lluvia en todos los escenarios disminuyó, como consecuencia de una reducción en las precipitaciones que se estiman para los tres escenarios de tiempo y con todos los modelos de cambio climático y como ya se indicó, fue el único factor que se consideró que cambiaría en los escenarios de cambio climático.

Para los diferentes grados de erosión, la clase de ligera también aumentaría la superficie, con un decremento en las clases de afectación moderada, severa y extrema. El incremento de superficie con afectación ligera se estimó para el escenario de tiempo a corto plazo en 0.4% del total de la superficie del país para el modelo HADGEM y de 0.5% para los modelos GFDL, MPI y CNRM, para el escenario a mediano plazo sería de 0.3% para los modelos HADGEM y GFDL y de 0.4% para los modelos MPI y CNRM. Para el escenario a largo plazo el incremento del total de la

superficie nacional sería de 0.3% para el modelo GFDL y de 0.4% para los otros tres modelos.

Tabla 14 Superficie afectada por erosión hídrica en México para el escenario a corto plazo (2015-2039) con diferentes Modelos para un RCP de 4.5 Watts m-2.

Grados de erosión hídrica	Escenario	HADGEM	GFDL	MPI	CNRM
	Base	Superficie en miles de hectáreas y (porcentaje de la superficie)			
Nula ( $< 5 \text{ ton ha}^{-1}$ )	131 032.40 (66.9)	133 092.12 (67.9)	133 466.59 (68.1)	133 334.71 (68.1)	132 178.84 (67.5)
Ligera ( $5- 10 \text{ ton ha}^{-1}$ )	15 091.41 (7.7)	15 880.54 (8.1)	15 996.09 (8.2)	16 228.31 (8.2)	16 159.05 (8.2)
Moderada ( $10- 50 \text{ ton ha}^{-1}$ )	32 654.63 (16.7)	31 173.91 (15.9)	31 295.00 (16.0)	31 001.27 (15.8)	31 535.90 (16.1)
Severa ( $50- 200 \text{ ton ha}^{-1}$ )	13 947.90 (7.1)	12 906.07 (6.6)	12 481.64 (6.4)	12 603.03 (6.4)	13 145.83 (6.7)
Extrema ( $> 200 \text{ ton ha}^{-1}$ )	3 198.46 (1.6)	2 872.27 (1.5)	2 685.69 (1.4)	2 857.60 (1.5)	2 905.29 (1.5)

Tabla 15 Superficie afectada por erosión hídrica en México para el escenario a mediano plazo (2039-2069) con diferentes Modelos para un RCP de 4.5 Watts m-2.

Grados de erosión hídrica	Escenario Base	HADGEM	GFDL	MPI	CNRM
Superficie en miles de hectáreas (porcentaje de la superficie)					
Nula (< 5 ton ha <sup>-1</sup> )	131 032.40 (66.9)	133 572.10 (68.2)	132 821.05 (67.8)	133 693.49 (68.2)	132 627.65 (67.7)
Ligera (5- 10 ton ha <sup>-1</sup> )	15 091.41 (7.7)	15 767.43 (8.0)	15 707.06 (8.0)	15 806.71 (8.1)	15 787.87 (8.1)
Moderada (10- 50 ton ha <sup>-1</sup> )	32 654.63 (16.7)	31 205.67 (15.9)	31 570.38 (16.1)	31 133.54 (15.9)	31 417.15 (16.0)
Severa (50- 200 ton ha <sup>-1</sup> )	13 947.90 (7.1)	12 604.18 (6.4)	12 998.84 (6.6)	12 444.35 (6.4)	13 176.87 (6.7)
Extrema (> 200 ton ha <sup>-1</sup> )	3 198.46 (1.6)	2 775.53 (1.4)	2 827.58 (1.4)	2 846.82 (1.5)	2 915.39 (1.5)

La disminución de la superficie afectada por erosión hídrica moderada para el escenario a corto plazo sería de 0.8%, 0.7%, 0.9% y 0.6% para los modelos HADGEM, GFDL, MPI y CNRM, respectivamente. Para el mediano plazo los números son muy similares, con disminuciones de 0.8%, 0.6%, 0.8% y 0.7%, para los modelos descritos, respectivamente. Para el largo plazo también la disminución va de 1.2% para el modelo GFDL a 0.6% para el modelo HADGEM. Para el grado de afectación de erosión severa la variación es mínima de 0.2% a 0.1% en el escenario de corto y el de mediano. Para el largo plazo se presenta un incremento de 1% con el modelo HADGEM y decrementos en los otros modelos que van de 0.4% con el modelo GFDL y de 0.1% con los modelos MPI y CNRM.

Tabla 16 Superficie afectada por erosión hídrica en México para el escenario a largo plazo (2069-2099) con diferentes Modelos para un RCP de 4.5 Watts m-2.

Grados de erosión hídrica	Escenario	HADGEM	GFDL	MPI	CNRM
	Base	Superficie en miles de hectáreas			
		(porcentaje de la superficie)			
Nula	131 032.40	131 874.69	136 120.54	133 614.60	132 627.65
(< 5 ton ha <sup>-1</sup> )	(66.9)	(67.3)	(69.5)	(68.2)	(67.7)
Ligera	15 091.41	15 880.05	15 620.47	15 843.60	15 787.87
(5- 10 ton ha <sup>-1</sup> )	(7.7)	(8.1)	(8.0)	(8.1)	(8.1)
Moderada	32 654.63	31 517.01	30 456.20	31 000.16	31 417.15
(10- 50 ton ha <sup>-1</sup> )	(16.7)	(16.1)	(15.5)	(15.8)	(16.0)
Severa	13 947.90	13 405.82	11 319.50	12 619.73	13 176.87
(50- 200 ton ha <sup>-1</sup> )	(7.1)	(6.8)	(5.8)	(6.4)	(6.7)
Extrema	3 198.46	3 247.34	2 408.20	2 846.82	2 915.39
(> 200 ton ha <sup>-1</sup> )	(1.6)	(1.7)	(1.2)	(1.5)	(1.5)

En la figura 11 se presentan los detalles de los cambios en proporción de cada una de las clases de afectación por erosión hídrica, para el RCP 4.5 y en los tres escenarios de tiempo y los modelos usados, los cuales ya se señalaron, para la superficie del país sin afectación por erosión hídrica y la clase de afectación ligera, presentan una tendencia de incrementos para los tres escenarios de tiempo y en todos los modelos de cambio climático, así como la clase de afectación extrema con el modelo HADGEM para el escenario de tiempo a largo plazo. En las clases de afectación moderada, severa y extrema presentan una reducción en la proporción de los valores del escenario base, con excepción del escenario a largo plazo con el modelo HADGEM.

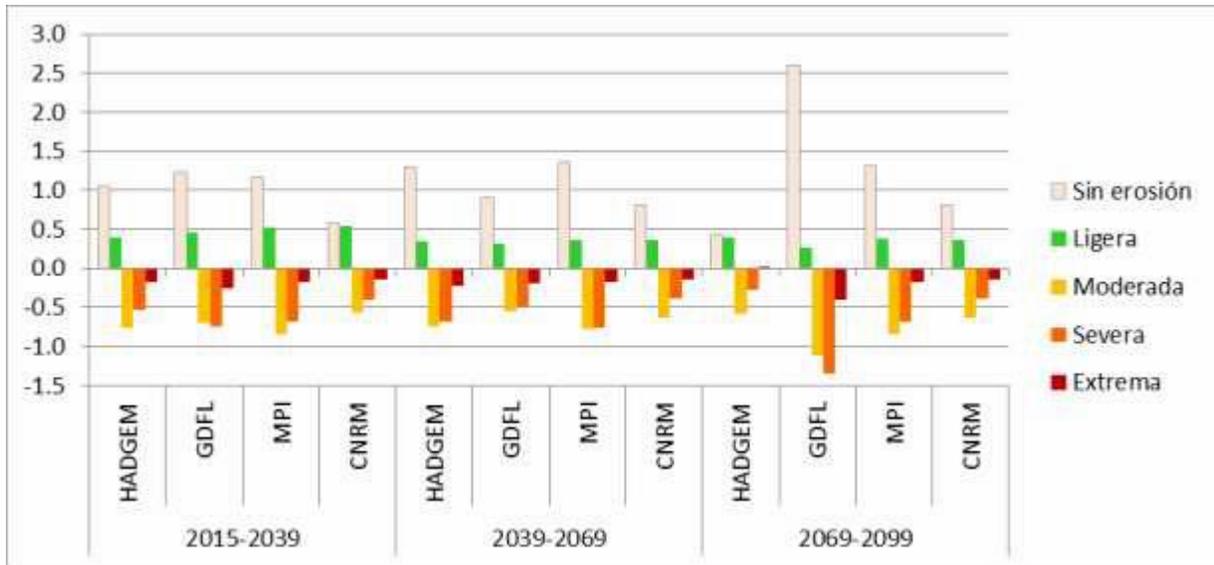


Figura 11 Cambios en la superficie relativa de cada clase de afectación por erosión hídrica para el RCP 4.5 y los escenarios de corto, mediano y largo plazo para los diferentes modelos de cambio climático.

La distribución de los diferentes grados de afectación por erosión hídrica en la República Mexicana, partiendo del escenario base y los escenarios de corto, mediano y largo plazo, para un RCP de 4.5, en la figura 12 se presentan los resultados para el modelo GFDL y en la figura 13 para el modelo HADGEM.

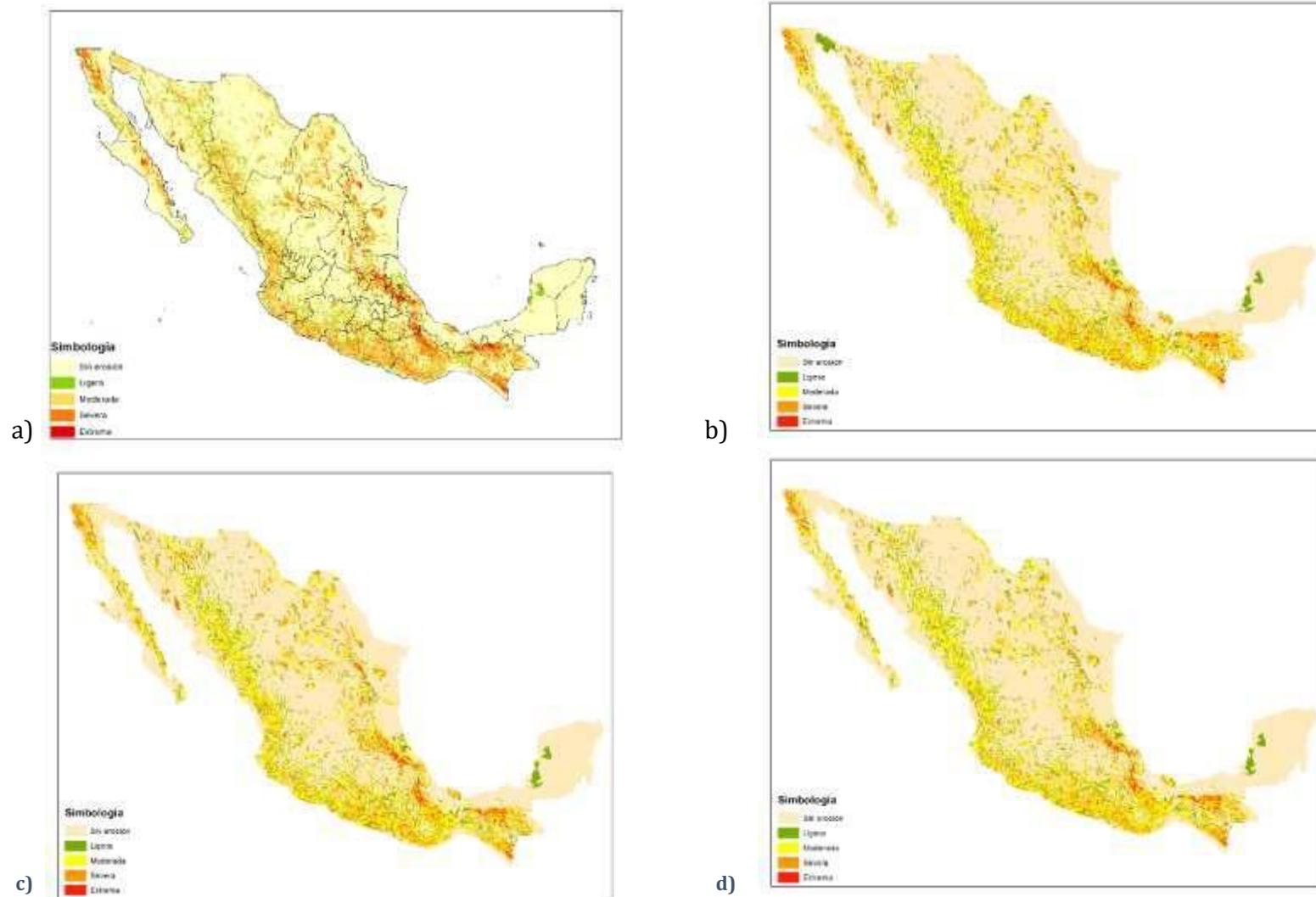


Figura 12 Distribución de los diferentes grados de afectación por erosión hídrica en la República Mexicana para el RCP 4.5 y los escenarios base (a), de corto plazo (b), mediano plazo (c) y largo plazo (d) estimados con el modelo GFDL

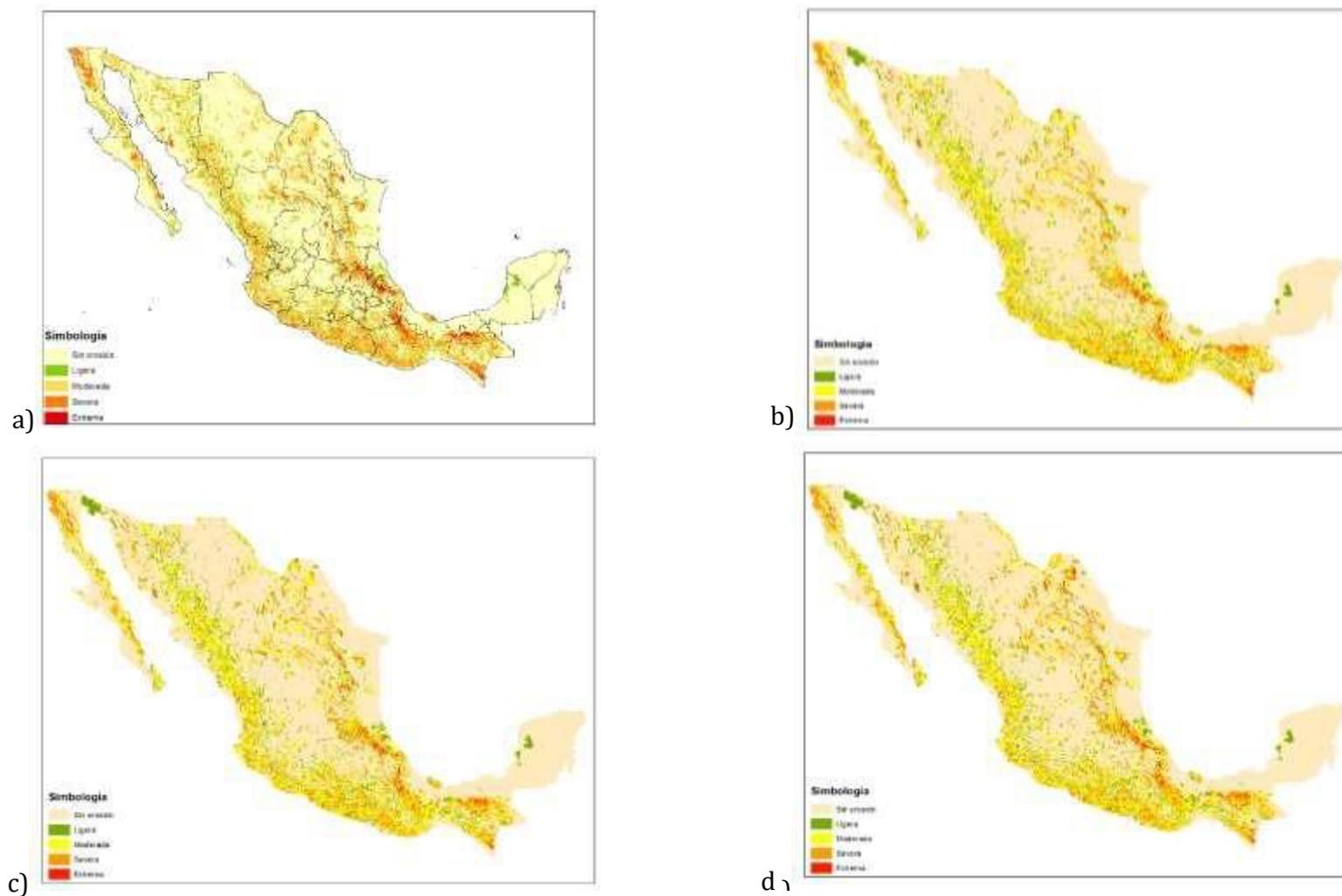


Figura 13 Distribución de los diferentes grados de afectación por erosión hídrica en la República Mexicana para el RCP 4.5 y los escenarios base (a), de corto plazo (b), mediano plazo (c) y largo plazo (d) estimados con el modelo HADGEM

En las tablas 17, 18 y 19 se detalla la superficie y el porcentaje del total nacional por grado de afectación a erosión hídrica, para los escenarios a corto, mediano y largo plazo, respectivamente estimada con los modelos HADGEM, GFDL, MPI y CNRM, para un RCP de  $8.5 \text{ Watts/m}^2$ , tomando como referencia el escenario base. En los tres escenarios de tiempo se observa una ligera disminución en la superficie afectada por erosión para todos los modelos generales de circulación atmosférica utilizados, para el escenario a corto plazo va de 0.2 a 1.7 % del total de la superficie del país, en el de mediano plazo va de 1.1 a 4.9 % del total de la superficie del país y para el largo plazo va de 0.9 a 3.4 % del total del país. En los tres escenarios la mayor disminución en la superficie afectada se obtuvo con el modelo MPI. Al igual que con el RCP de  $4.5 \text{ watts/m}^2$ , la reducción en la severidad de afectación por erosión hídrica se asocia al valor del factor de erosividad de la lluvia que en todos los escenarios disminuyó, como consecuencia de una reducción en las precipitaciones que se estiman para los tres escenarios de tiempo y con todos los modelos de cambio climático.

Para los diferentes grados de erosión, la clase de afectación ligera también aumentaría la superficie en la mayoría de los casos, el incremento de superficie que se estimó para el escenario de tiempo a corto plazo fue de un valor mínimo de 0.1% para el modelo MPI a un valor máximo de 0.7% del total de la superficie del país para el modelo GFDL. Para el escenario de tiempo a mediano plazo sería de 0.3% para el modelo GFDL y el valor máximo de 0.6% para CNRM. Para el escenario a largo plazo se presentan incrementos en porcentajes que van de 0.3% para los modelos HADGEM y GFDL y de 0.5% para el modelo CNRM y un ligero decremento en la superficie con respecto al total del país de 0.2% para el modelo MPI.

Para el grado de afectación moderado, se presenta una disminución de la superficie afectada del total nacional. Para el escenario a corto plazo sería de 0.7%, 0.5%, 0.8% y 0.6% para los modelos HADGEM, GFDL, MPI y CNRM, respectivamente. Para el mediano plazo las disminuciones son del rango de 0.7%, 0.9%, 2.6% y 0.9%, para los modelos descritos, respectivamente. Para el largo plazo también la disminución va de 1.1%, 1.0%, 1.5% y 0.9% para los modelos HADGEM, GFDL, MPI y CNRM, respectivamente.

Para el grado de afectación de erosión severa la variación es de 0.5%, 0.3%, 0.8% y 3% en el escenario de corto plazo para los modelos HADGEM, GFDL, MPI y CNRM, respectivamente. Para el de mediano plazo, 0.6%, 0.8%, 1.9% y 0.5% para los modelos descritos, respectivamente. Para el largo plazo se presenta un disminuciones que van de 0.4% para el modelo CNRM, de 1.0% y de 1.1 % para los modelos GFDL y HADGEM, respectivamente y de 1.5% para el modelo MPLI.

Para el grado de afectación extremo por erosión hídrica, también presenta disminuciones en la superficie afectada del total nacional. En el escenario a corto plazo sería de 0.2%, 0.1%, 0.2% y 0% para los modelos HADGEM, GFDL, MPI y CNRM, respectivamente. Para el mediano plazo las disminuciones son de 0.1%, 0.3%, 0.8% y 0.2%, para los modelos descritos,

respectivamente. Para el largo plazo también la disminución va de 0.1% para los modelos HADGEM y CNRM, de 0.4% para el modelo GFDL y el valor máximo de 0.9% para el modelo MPI.

Tabla 17 Superficie afectada por erosión hídrica en México para el escenario a corto plazo (2015-2039) con diferentes Modelos para un RCP de 8.5 Watts m-2.

Grados de erosión hídrica	Escenario Base	HADGEM	GFDL	MPI	CNRM
	Superficie				
	miles de hectáreas y (porcentaje de la superficie)				
Nula	131 032.40	133 160.35	131 426.75	134 341.87	131 686.57
(< 5 ton ha <sup>-1</sup> )	(66.9)	(68.0)	(67.1)	(68.6)	(67.2)
Ligera	15 091.41	15 761.38	16 393.00	15 248.91	16 159.17
(5- 10 ton ha <sup>-1</sup> )	(7.7)	(8.0)	(8.4)	(7.8)	(8.2)
Moderada	32 654.63	31 270.26	31 808.16	31 133.62	31 625.91
(10- 50 ton ha <sup>-1</sup> )	(16.7)	(16.0)	(16.2)	(15.9)	(16.1)
Severa	13 947.90	12 893.26	13 303.44	12 409.62	13 353.14
(50- 200 ton ha <sup>-1</sup> )	(7.1)	(6.6)	(6.8)	(6.3)	(6.8)
Extrema	3 198.46	2 839.66	2 993.57	2 790.89	3 100.13
(> 200 ton ha <sup>-1</sup> )	(1.6)	(1.4)	(1.5)	(1.4)	(1.6)

Tabla 18 Superficie afectada por erosión hídrica en México para el escenario a mediano plazo (2039-2069) con diferentes Modelos para un RCP de 8.5 Watts m-2.

Grados de erosión hídrica	Escenario Base	HADGEM	GFDL	MPI	CNRM
	Superficie miles de hectáreas y (porcentaje de la superficie)				
Nula	131 032.40	133 267.60	134 301.67	140 605.85	133 181.19
(< 5 ton ha <sup>-1</sup> )	(66.9)	(68.0)	(68.5)	(71.8)	(68.0)
Ligera	15 091.41	15 795.59	15 743.32	15 792.68	16 171.50
(5- 10 ton ha <sup>-1</sup> )	(7.7)	(8.1)	(8.0)	(8.1)	(8.3)
Moderada	32 654.63	31 254.64	31 027.94	27 663.20	30 903.96
(10- 50 ton ha <sup>-1</sup> )	(16.7)	(16.0)	(15.8)	(14.1)	(15.8)
Severa	13 947.90	12 731.17	12 260.59	10 282.25	12 865.95
(50- 200 ton ha <sup>-1</sup> )	(7.1)	(6.5)	(6.3)	(5.2)	(6.6)
Extrema	3 198.46	2 875.92	2 591.38	1 580.94	2 802.32
(> 200 ton ha <sup>-1</sup> )	(1.6)	(1.5)	(1.3)	(0.8)	(1.4)

Tabla 19 Superficie afectada por erosión hídrica en México para el escenario a largo plazo (2069-2099) con diferentes Modelos para un RCP de 8.5 Watts m-2.

Grados de erosión hídrica	Escenario Base	HADGEM	GFDL	MPI	CNRM
	Superficie				
	miles de hectáreas y (porcentaje de la superficie)				
Nula	131 032.40	134 601.62	135 610.24	137 745.02	132 799.31
(< 5 ton ha <sup>-1</sup> )	(66.9)	(68.7)	(69.2)	(70.3)	(67.8)
Ligera	15 091.41	15 761.99	15 705.53	14 771.97	16 126.18
(5- 10 ton ha <sup>-1</sup> )	(7.7)	(8.0)	(8.0)	(7.5)	(8.2)
Moderada	32 654.63	30 478.12	30 687.76	29 871.45	31 016.52
(10- 50 ton ha <sup>-1</sup> )	(16.7)	(15.6)	(15.7)	(15.2)	(15.8)
Severa	13 947.90	12 192.49	11 534.98	11 123.29	13 130.28
(50- 200 ton ha <sup>-1</sup> )	(7.1)	(6.2)	(5.9)	(5.7)	(6.7)
Extrema	3 198.46	2 890.69	2 386.39	2 413.19	2 852.61
(> 200 ton ha <sup>-1</sup> )	(1.6)	(1.5)	(1.2)	(1.2)	(1.5)

En la figura 14 se presentan los detalles de los cambios en proporción de cada una de las clases de afectación por erosión hídrica, para el RCP 8.5 y en los tres escenarios de tiempo y los modelos usados. Se aprecia que las clases sin afectación y las de afectación ligera, presentan una tendencia de incrementos para los tres escenarios de tiempo y en todos los modelos de cambio climático. En cambio, para las clases de afectación moderada, severa y extrema presentan una reducción en la proporción de los valores del escenario base en todos los escenarios y con todos los modelos, con proporciones ligeramente mayores para las clases severa y extrema. Resalta que en las clases de afectación severa y la extrema, en el escenario a mediano plazo y con el modelo MPI presenta una disminución mayor.

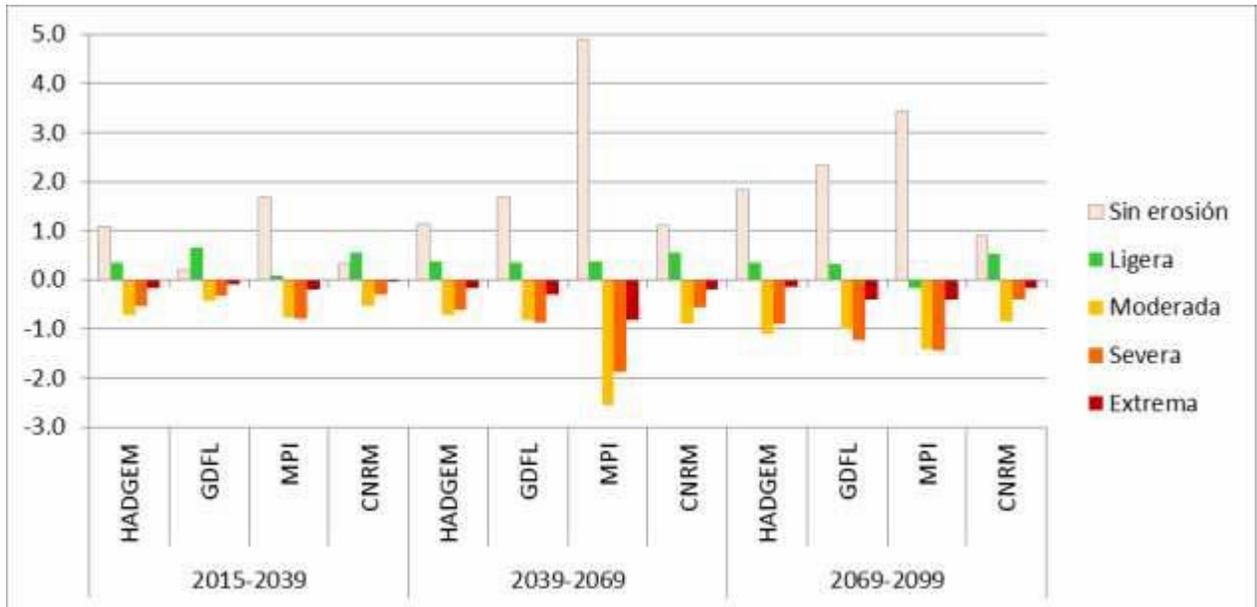


Figura 14 Cambios en la superficie relativa de cada clase de afectación por erosión hídrica para el RCP 8.5 y los escenarios de corto, mediano y largo plazo para los diferentes modelos de cambio climático.

La distribución de los diferentes grados de afectación por erosión hídrica en la República Mexicana, partiendo del escenario base y los escenarios de corto, mediano y largo plazo, para un RCP de 8.5, en la figura 15 se presentan los resultados para el modelo GFDL y en la figura 16 para el modelo HADGEM.

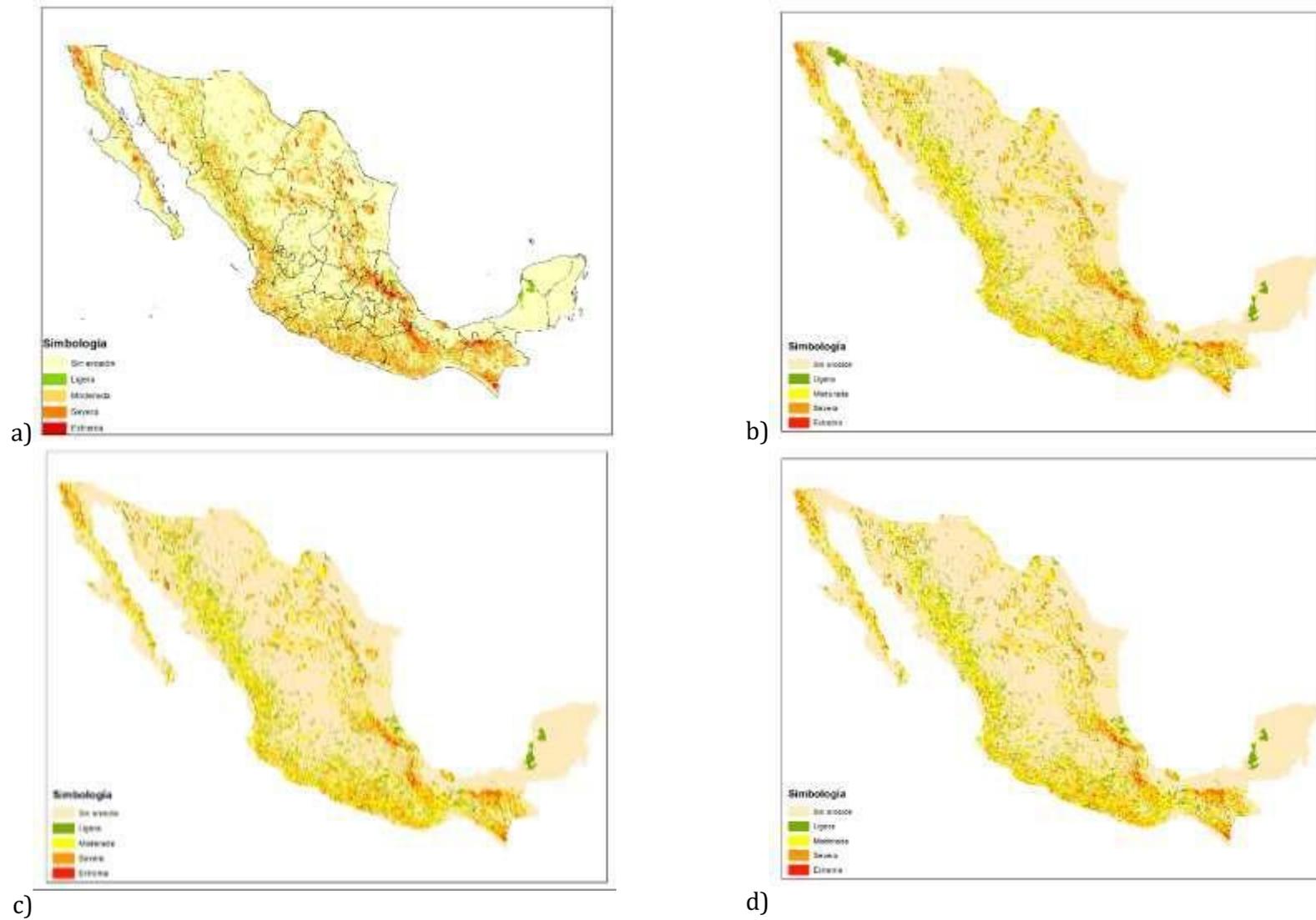


Figura 15 Distribución de los diferentes grados de afectación por erosión hídrica en la República Mexicana para el RCP 8.5 y los escenarios base (a), de corto plazo (b), mediano plazo (c) y largo plazo (d) estimados con el modelo GFDL.

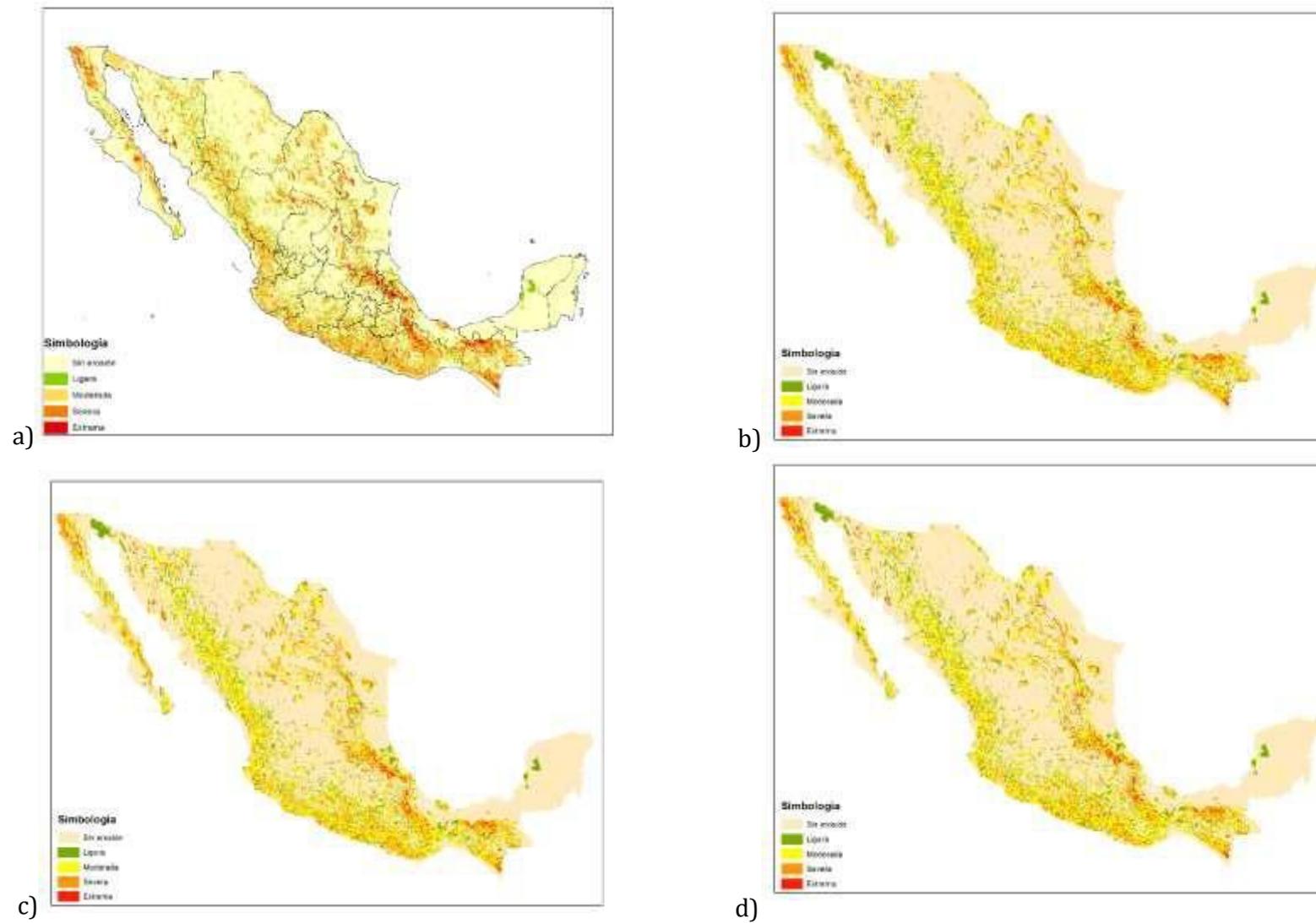


Figura 16 Distribución de los diferentes grados de afectación por erosión hídrica en la República Mexicana para el RCP 8.5 y los escenarios base (a), de corto plazo (b), mediano plazo (c) y largo plazo (d) estimados con el modelo HADGEM.

## 10. RÉGIMEN DE HUMEDAD EN LOS SUELOS DE MÉXICO EVALUADOS A PARTIR DEL ÍNDICE DE ARIDEZ Y SU VARIACIÓN BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO.

El régimen de humedad de los suelos de México se evaluó a partir de un indicador alternativo que es el Índice de Aridez. En la tabla 20 se muestra la superficie del país con los diferentes tipos de climas definidos a través del Índice de Aridez para el escenario base y el escenario a corto plazo (2015-2039) con los modelos de cambio climático del estudio. De los tipos climáticos que comprenden las tierras secas delimitadas con los datos del escenario base, son 122 898 470 hectáreas que representan el 62.72% de la superficie del país, en la figura 17 se muestra la distribución de los diferentes tipos climáticos definidos para el escenario base. Las regiones Hiperáridas representan el 0.04% de la superficie del país y se encuentran en la desembocadura del Río Colorado en la confluencia de los estados de Baja California y Sonora, que es la zona más seca de América del Norte. Las regiones Áridas representan el 18.85% de la superficie nacional y comprenden la mayor parte de la Península de Baja California, la mayor parte de la Planicie Costera de Sonora y valles intermontanos del norte de Sonora, también la porción norte de la Planicie Costera en el estado de Sinaloa. Además de una proporción importante de la Mesa del Norte comprendida por la porción norte, noreste y parte del sureste de Chihuahua, así como la mayor proporción de Coahuila exceptuando las sierras del sureste del estado y las del noreste así como parte de la Planicie Costera del Golfo Norte de este estado. De Durango las zonas áridas comprende la zona del Bolsón de Mapimí en el noreste del estado, una pequeña porción de Nuevo León en la parte sur, así como una pequeña porción de San Luis Potosí en la parte norte del estado, además de la parte norte de Zacatecas.

Las zonas con clima Semiárido comprenden el 32.84% de la superficie nacional y se distribuyen en la mayoría de las regiones del país, abarcando pequeñas porciones de las Sierras de Juárez y San Pedro Mártir en Baja California y en la Sierra de la Laguna en Baja California Sur así como porciones de las partes altas de las sierras del Sistema Bajacaliforniano. Este clima comprende la mayor parte del estado de Sonora, Sinaloa, Chihuahua, Durango, Zacatecas, Nuevo León, parte norte de Tamaulipas, San Luis Potosí, Aguascalientes, Guanajuato, Querétaro. También cubre la mayor proporción de la Depresión del Balsas en el estado de Michoacán y se extiende por parte de la mixteca Poblana y Oaxaqueña y Valles Centrales de este último estado, incluso es el clima de la parte noroeste de Yucatán.

Las zonas con climas subhúmedo seco representan el 10.99% de la superficie del país, se distribuyen a lo largo del país, en las estribaciones de la Sierra Madre Occidental, parte sur de Tamaulipas que comprenden la planicie Costera del Golfo Norte y estribaciones en esa región

de la Sierra Madre Oriental, parte centro norte de la Planicie Costera del Golfo Sur en el Estado de Veracruz, la mayor proporción de la Depresión Central de Chiapas, sur del Istmo de Tehuantepec, así como áreas de transición de los climas semiáridos con los subhúmedos húmedos en las áreas del país donde se tienen estos climas.

Las zonas con climas subhúmedos húmedos cubren el 10.3% de la superficie del país y se ubican en las estribaciones de la Sierra Madre Occidental, la reducida Planicie Costera del Pacífico Sur en los estados de Guerrero y Oaxaca, así como la parte sur de Tamaulipas y parte norte de Veracruz que corresponde a la Planicie Costera del Golfo Norte, cubre además parte de la Península de Yucatán.

Las zonas con climas Húmedos comprenden 19.15% de la superficie del país y se localizan en la mayor parte de la Sierra Madre Occidental exceptuando la parte norte del país en los estados de Sonora y la porción más septentrional de Chihuahua. También se ubican estos climas en la mayor parte de la Sierra Madre del Sur, el Eje Neo volcánico, partes bajas de la Sierra Madre de Chiapas, las estribaciones de la Sierra Madre Oriental desde el estado de Nuevo León hasta su unión con el Eje Neo volcánico, la mayor parte de la Planicie Costera del Golfo Sur, así como la mayor proporción de Campeche en su parte sur, de Quintana Roo en su porción oriental y la parte nororiente y oriental de Yucatán.

El clima muy Húmedo comprende el 6.74% y se ubica en las partes más altas de la Sierra Madre Occidental y del Eje Neo volcánico, de la Sierra Madre Oriental, Sierra Madre del Sur, estribaciones de la Sierra Madre de Chiapas y del sistema montañoso de los Altos de Chiapas, la Sierra Madre de Oaxaca y parte de la Planicie Costera del Golfo Sur en lo que es la parte sur de Veracruz y sur de Tabasco.

Las áreas con clima Perhúmedo representan el 1.1% de la superficie del país y se ubican en la confluencia de la Sierra Madre Oriental con el Eje Neo volcánico, vertiente oriental de la Sierra Madre de Oaxaca, la zona de los Volcanes de los Tuxtlas en Veracruz, la zona de la vertiente norte de los Altos de Chiapas y la zona oriental de la Sierra Madre de Chiapas que se asocian con el volcán Tacaná.

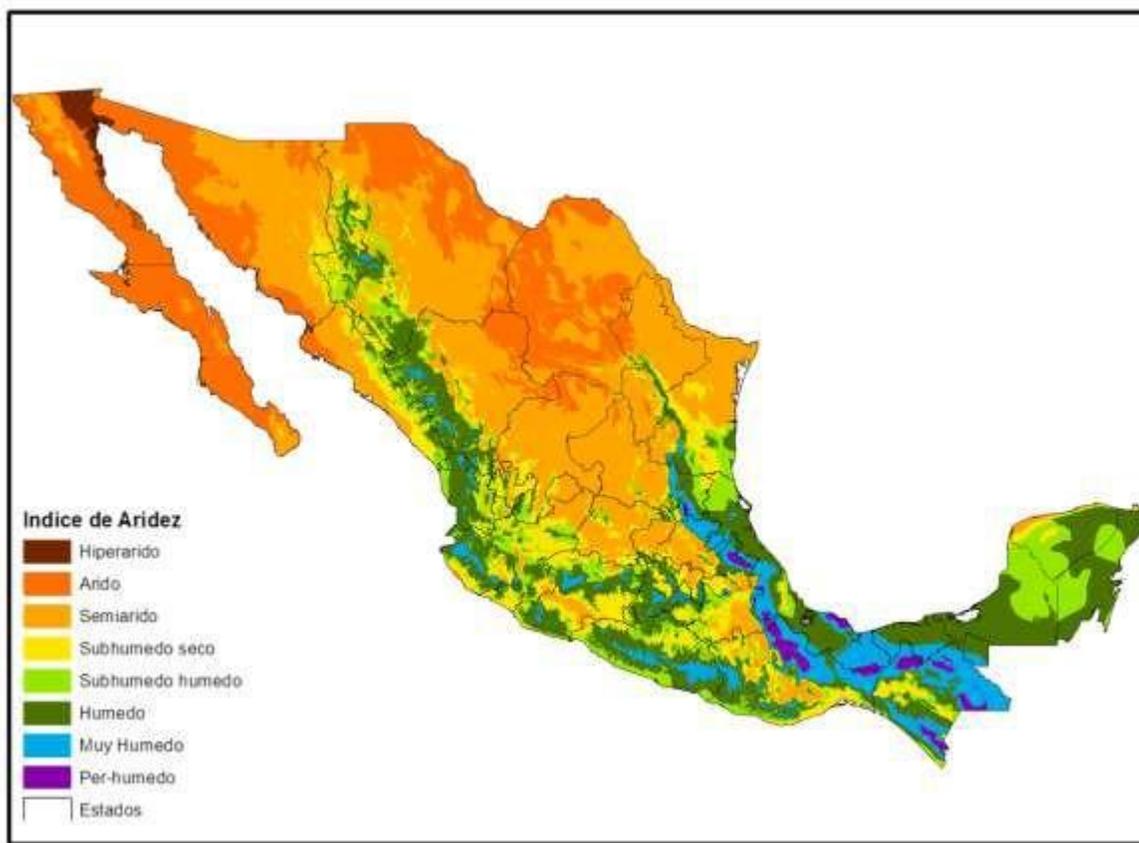


Figura 17 Tipos climáticos definidos por el Índice de Aridez para las condiciones actuales.

Para el RCP de 4.5, se estimaron los cambios en la superficie y distribución de los tipos climáticos determinados por el Índice de Aridez para los tres escenarios de tiempo y con los cuatro modelos que se consideran en el estudio. Para el escenario de corto plazo, en general aumenta la superficie con climas definidos como tierras secas (Tabla 20). El modelo HADGEM estima un mayor incremento con el 71.96%, que representa un incremento de 9.24% del total de la superficie del país. Los modelos GFDL y el MPI estiman un 69.77% y 69.95% de la superficie del país con este tipo de climas, lo que representa un incremento de 7.05% y 7.23%, respectivamente. El menor incremento de los climas secos lo reporta el modelo CNRM con 66.95% de la superficie del país y un incremento de 4.23%.

El clima Hiperárido de 0.04% de la superficie se incrementa su distribución en todos los modelos con valores mayores que el escenario base desde 1.11% a 1.42% de la superficie total del país, esto en los resultados de los modelos CNRM y MPI, respectivamente. Para el clima Árido, presentar incrementos con todos los modelos, cuyos valores van de 0.84% a 8.15% por arriba del escenario actual para los modelos CNRM y GFDL, respectivamente. Para el clima Semiárido, los incrementos con respecto al escenario base para tres modelos, el HADGEM, MPI y CNRM, con valores de 2.28%, 1.31% y de 1.63%, respectivamente y un decremento de 2.37% para el modelo GFDL. En el clima Subhúmedo seco, en todos los modelos se reportan incrementos en la

superficie con respecto al escenario base con valores que van de 0.33% a 3.01% del total de la superficie del país, para los modelos GFDL y HADGEM, respectivamente.

Los climas definidos como tierras no secas, el clima Subhúmedo húmedo presenta una disminución en los cuatro modelos que van de 0.90% a 2.37% del total de la superficie nacional para los modelos MPI y GFDL, respectivamente. La superficie con clima Húmedo, reporta también un decremento en la superficie para los cuatro modelos y van de 0.78% a 5.15% del total de la superficie del país para los modelos CNRM y HADGEM, respectivamente. Para el clima Muy Húmedo, también hay un decremento en los cuatro modelos con valores de 1.28% a 1.41% del total de la superficie del país para los modelos CNRM y GFDL, respectivamente. Para el clima Per Húmedo, también hay una disminución en la superficie en este escenario para los cuatro modelos con valores de 0.75%, 0.80%, 0.81% y 0.81% del total de la superficie del país para los modelos CNRM, MPI, HADGEM y GFDL, respectivamente. Estos cambios se presentan en la figura 18.

Para el escenario de mediano plazo, el incremento de la superficie con climas definidos como tierras secas es mayor que en el de corto plazo (Tabla 21). El modelo MPI estima un mayor incremento con el 74.40%, que representa un incremento de 11.68% del total de la superficie del país. Los modelos HADGEM, GFDL y CNRM estiman un 74.24%, 70.60% y 72.17% de la superficie del país con este tipo de climas, lo que representa un incremento de 11.52%, 7.88% y 9.45%, respectivamente.

El clima Hiperárido se incrementa en todos los modelos con valores mayores que el escenario base desde 1.08% a 1.47% de la superficie del país, esto en los resultados de los modelos MPI y HADGEM, respectivamente. Para el clima Árido, presentar incrementos con todos los modelos, cuyos valores van de 1.56% a 7.05% por arriba del escenario actual para los modelos CNRM y HADGEM, respectivamente. Para el clima Semiárido, los incrementos con respecto al escenario base se presentan incrementos con los cuatro modelos, con valores que van de 0.05% a 4.00% para los modelos HADGEM y CNRM, respectivamente. En el clima Subhúmedo seco, en todos los modelos se reportan incrementos en la superficie con respecto al escenario base con valores que van de 0.75% a 3.32% del total de la superficie del país, para los modelos GFDL y MPI, respectivamente.

Los climas definidos como tierras no secas, el clima Subhúmedo húmedo presenta una disminución en los cuatro modelos que van de 0.99% a 1.68% del total de la superficie nacional para los modelos HADGEM y MPI, respectivamente. La superficie con clima Húmedo, reporta también un decremento en la superficie para los cuatro modelos y van de 3.89% a 7.27% del total de la superficie del país para los modelos GFDL y HADGEM, respectivamente. Para el clima Muy Húmedo, también hay un decremento en los cuatro modelos con valores de 1.86% a 2.31% del total de la superficie del país para los modelos GFDL y HADGEM, respectivamente. Para el clima Per Húmedo, también hay una disminución en la superficie que representarían en este escenario para los cuatro modelos con valores de 0.89% a 0.95% del total de la superficie del país para los modelos GFDL y HADGEM, respectivamente. Estos cambios se presentan también en la figura 18.

Para el escenario de largo plazo, el incremento de la superficie con climas definidos como tierras

secas es mayor que en el de corto plazo (Tabla 22). El modelo HADGEM estima un mayor incremento con el 75.36%, que representa un incremento de 12.64% del total de la superficie del país. Los modelos GFDL, MPI y CNRM estiman un 73.56%, 74.25% y 70.52% de la superficie del país con este tipo de climas, lo que representa un incremento de 10.84%, 11.53% y 7.80%, respectivamente. Para los modelos HADGEM y GFDL hay una tendencia de incremento para los escenarios de tiempo de corto, mediano y largo plazo, para el modelo MPI, no hay una tendencia de incremento entre los escenarios de mediano y largo plazo, sin embargo estos dos si se incrementan la superficie de tierras secas con respecto al de corto plazo.

El clima Hiperárido se incrementa en todos los modelos con valores mayores que el escenario base desde 1.19% a 3.09% de la superficie del país, esto en los resultados de los modelos HADGEM y GFDL, respectivamente. Para el clima Árido, el modelo HADGEM presenta un decremento con respecto a la superficie del escenario base en 3.19% de la superficie nacional, en cambio los otros tres modelos presentan incrementos cuyos valores van de 4.50% a 12.37% por arriba del escenario base para los modelos CNRM y GFDL, respectivamente.

Para el clima Semiárido, los incrementos con respecto al escenario base se presentan en dos modelos, el CNRM y el HADGEM con valores de 1.39% y de 10.02% para los modelos CNRM y HADGEM, respectivamente, en cambio los modelos MPI y GFDL presentan decrementos con valores que van de 1.045% y 4.03%, respectivamente. En el clima Subhúmedo seco, en tres modelos se reportan incrementos en la superficie con respecto al escenario base con valores de 0.59%, 3.47% y 4.59% del total de la superficie del país, para los modelos CNRM, MPI y HADGEM, respectivamente, en cambio para el modelo GFDL se reporta una disminución de 0.58% del total de la superficie del país con respecto al escenario base.

Los climas definidos como tierras no secas, el clima Subhúmedo húmedo presenta una disminución en los cuatro modelos que van de 0.36% a 2.50% del total de la superficie nacional para los modelos MPI y CNRM, respectivamente. La superficie con clima Húmedo, reporta también un decremento en la superficie para los cuatro modelos y van de 2.62% a 7.40% del total de la superficie del país para los modelos MPI y HADGEM y con este mismo valor el GFDL, respectivamente. Para el clima Muy Húmedo, también hay un decremento en los cuatro modelos con valores de 1.82% a 2.59% del total de la superficie del país para los modelos CNRM y HADGEM, respectivamente. Para el clima Per Húmedo, también hay una disminución en la superficie en este escenario para los cuatro modelos con valores de 0.85% a 1.01% del total de la superficie del país para los modelos CNRM y HADGEM, respectivamente. Estos cambios se presentan también en la figura 18.

Tabla 20 Tipos climáticos estimados por el Índice de Aridez en México para el escenario base y a corto plazo (2015-2039) con diferentes Modelos para un RCP de 4.5 Watts m-2

Tipo climático por IA	Escenario	HADGEM	GFDL	MPI	CNRM
	Base	Superficie en miles de hectáreas (porcentaje de la superficie)			
Hiperárido	78.85 (0.04)	2 460.62 (1.26)	2 686.62 (1.37)	2 863.93 (1.46)	2 245.09 (1.15)
Árido	36 933.73 (18.85)	42 296.13 (21.59)	52 910.46 (27.01)	41 522.35 (21.19)	38 587.79 (19.70)
Semiárido	64 345.89 (32.84)	68 803.42 (35.12)	58 918.74 (30.07)	66 911.01 (34.15)	67 532.69 (34.47)
Subhúmedo seco	21 540.00 (10.99)	27 432.12 (14.00)	22 147.64 (11.32)	25 754.02 (13.14)	22 810.36 (11.64)
Subhúmedo húmedo	20 172.12 (10.30)	16 399.30 (8.37)	15 523.54 (7.92)	18 417.63 (9.40)	17 392.50 (8.88)
Húmedo	37 510.17 (19.15)	27 421.07 (14.00)	32 710.66 (16.70)	29 238.80 (14.92)	35 988.61 (18.37)
Muy Húmedo	13 196.17 (6.74)	10 514.05 (5.38)	10 433.13 (5.33)	10 628.85 (5.42)	10 689.48 (5.46)
Per húmedo	2 147.57 (1.10)	568.10 (0.29)	564.00 (0.29)	588.26 (0.30)	678.30 (0.35)

Tabla 21 Tipos climáticos estimados por el Índice de Aridez en México para el escenario a mediano plazo (2039-2069) con diferentes Modelos para un RCP de 4.5 Watts m-2.

Tipo climático por IA	Escenario	HADGEM	GFDL	MPI	CNRM
	Base	Superficie miles de hectáreas y (porcentaje de la superficie)			
Hiperárido	78.85 (0.04)	2 968.05 (1.51)	2 605.12 (1.33)	2 188.00 (1.12)	2 207.15 (1.13)
Árido	36 933.73 (18.85)	50 752.36 (25.90)	43 639.63 (22.27)	47 481.89 (24.23)	39 991.26 (20.41)
Semiárido	64 345.89 (32.84)	64 449.79 (32.90)	69 055.42 (35.25)	68 056.08 (34.74)	72 181.80 (36.84)
Subhúmedo seco	21 540.00 (10.99)	27 291.59 (13.93)	23 017.77 (11.75)	28 048.16 (14.32)	27 014.48 (13.79)
Subhúmedo húmedo	20 172.12 (10.30)	18 238.45 (9.31)	17 760.08 (9.06)	16 889.60 (8.62)	17 328.10 (8.84)
Húmedo	37 510.17 (19.15)	23 262.19 (11.88)	29 896.94 (15.26)	24 066.33 (12.28)	27 301.06 (13.93)
Muy Húmedo	13 196.17 (6.74)	8 676.61 (4.43)	9 553.10 (4.88)	8 896.06 (4.54)	9 525.75 (4.86)
Per húmedo	2 147.57 (1.10)	279.78 (0.14)	396.74 (0.20)	298.67 (0.15)	375.20 (0.19)

Tabla 22 Tipos climáticos estimados por el Índice de Aridez en México para el escenario a largo plazo (2069-2099) con diferentes Modelos para un RCP de 4.5 Watts m-2.

Tipo climático por IA	Escenario	HADGEM	GFDL	MPI	CNRM
	Base	Superficie miles de hectáreas y (porcentaje de la superficie)			
Hiperárido	78.85 (0.04)	2 406.29 (1.23)	6 124.74 (3.13)	2 462.86 (1.26)	2 638.12 (1.35)
Árido	36 933.73 (18.85)	30 724.45 (15.68)	61 162.25 (31.22)	52 368.54 (26.73)	45 751.22 (23.35)
Semiárido	64 345.89 (32.84)	83 981.87 (42.86)	56 441.54 (28.81)	62 300.00 (31.80)	67 074.80 (34.23)
Subhúmedo seco	21 540.00 (10.99)	30 534.68 (15.58)	20 397.61 (10.41)	28 347.19 (14.47)	22 694.60 (11.58)
Subhúmedo húmedo	20 172.12 (10.30)	16 956.79 (8.65)	19 465.80 (9.91)	16 925.22 (8.64)	15 279.38 (7.80)
Húmedo	37 510.17 (19.15)	23 014.16 (11.75)	23 008.02 (11.74)	24 068.79 (12.25)	32 383.04 (16.53)
Muy Húmedo	13 196.17 (6.74)	8 129.77 (4.15)	9 048.73 (4.62)	9 191.67 (4.69)	9 624.89 (4.91)
Per húmedo	2 147.57 (1.10)	176.78 (0.09)	276.11 (0.14)	320.53 (0.16)	478.77 (0.24)

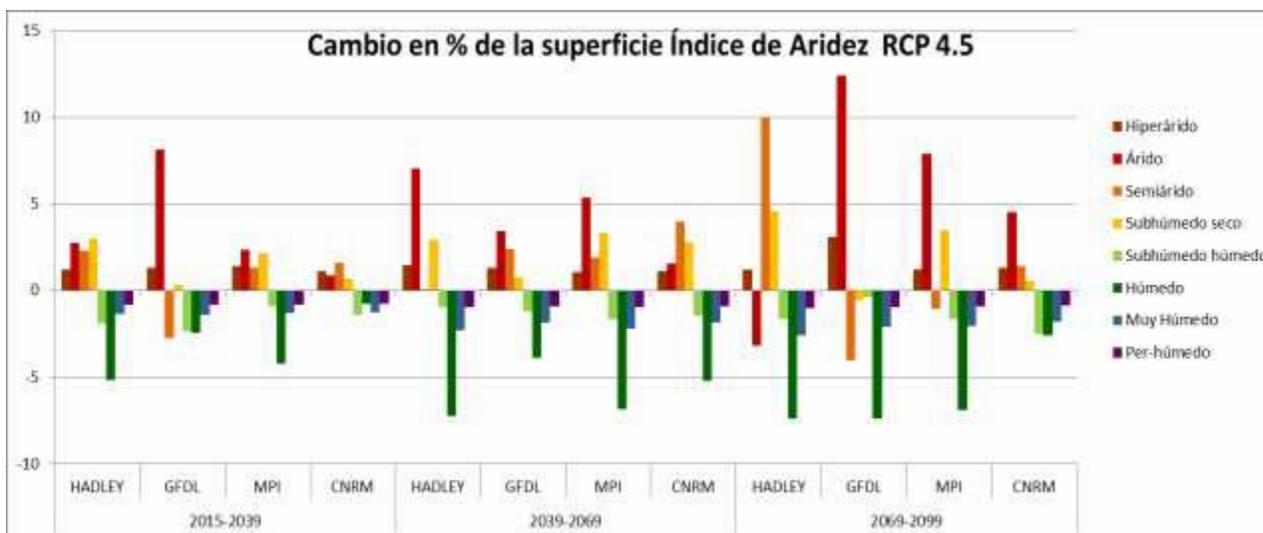


Figura 18 Cambios en la superficie relativa de cada tipo climático para el RCP 4.5 y los escenarios de corto, mediano y largo plazo para los diferentes modelos de cambio climático.

En la figura 19 se muestran los cambios en la geografía del país de los tipos climáticos para el RCP 4.5 y el modelo HADGEM para los escenarios de corto, mediano y largo plazo con respecto al escenario base, que como se indicó, hay un incremento de la proporción de las tierras secas conforme se aumenta el tiempo del escenario.

Para el RCP de 8.5 también se estimaron los cambios en la superficie y distribución de los tipos climáticos determinados por el Índice de Aridez para los tres escenarios de tiempo y con los cuatro modelos que se consideran en el estudio. Para el escenario de corto plazo, en general aumenta la superficie con climas definidos como tierras secas (Tabla 23). El modelo HADGEM estima una superficie de 69.33%, que representa un incremento de 6.61% del total de la superficie del país, pero es menor en 2.63% de la estimación para el RCP 4.5 para este mismo periodo de tiempo.

El modelo GFDL estima una superficie de tierras secas de 68.34% del total del país, que representa un incremento de 5.62% del total de la superficie con respecto al escenario base y es menor en 1.43% de lo estimado para el RCP 4.5 para este escenario de tiempo. El modelo MPI estiman una superficie de tierras secas de 71.15% que representa un incremento de 8.43% del total del país y es mayor en 1.2% que lo estimado para este escenario con el RCP 4.5. El menor incremento de los climas secos lo reporta el modelo CNRM con 65.68% del total de la superficie del país y representa un incremento de 2.96% del total de la superficie del país con respecto al escenario base y es menor en 1.27% del valor estimado para el RCP 4.5.

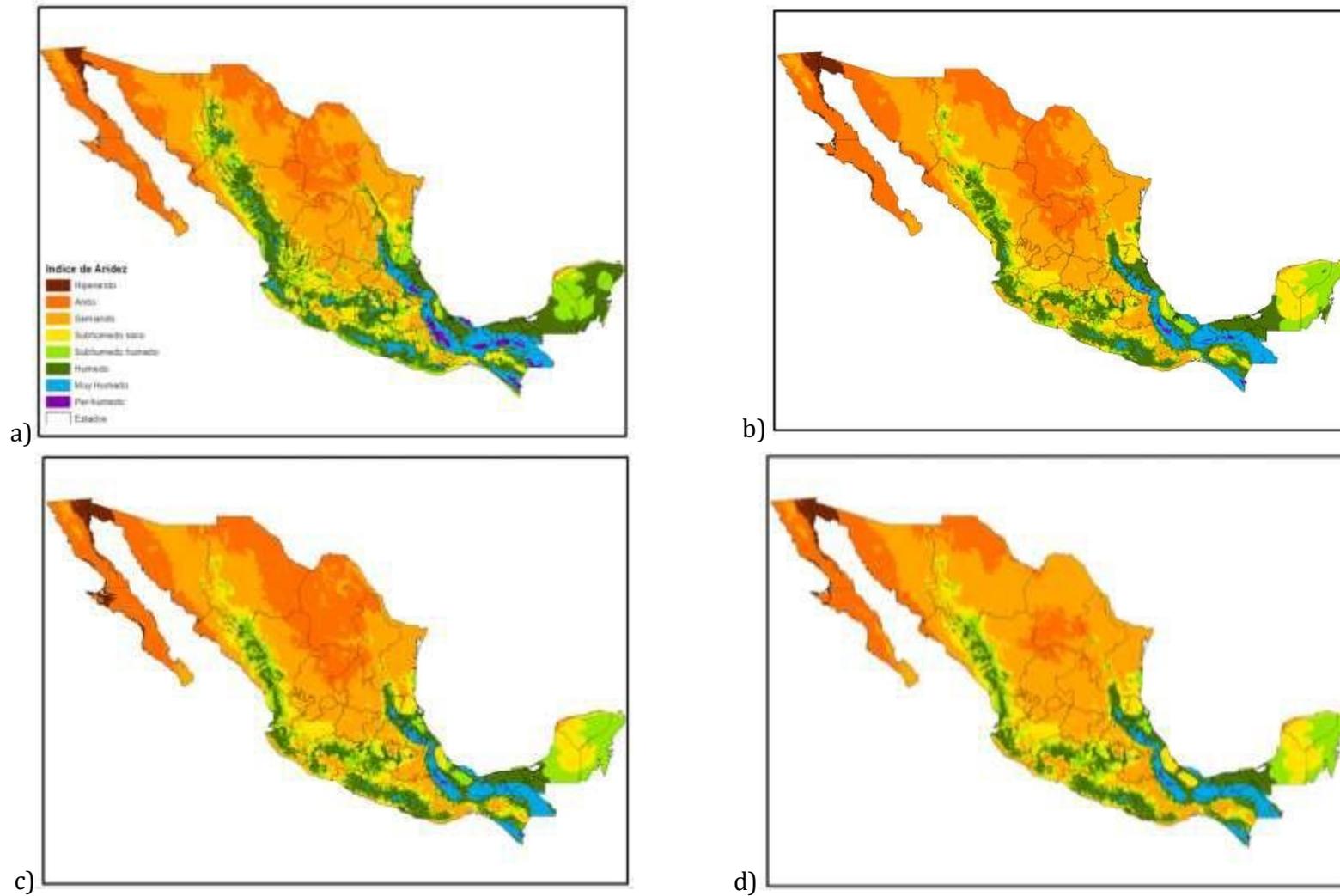


Figura 19 Cambios en la superficie y distribución de cada tipo climático para el RCP 4.5 y los escenarios de corto (b), mediano (c) y largo plazo (d) con respecto al escenario base (a) para el modelo HADGEM..

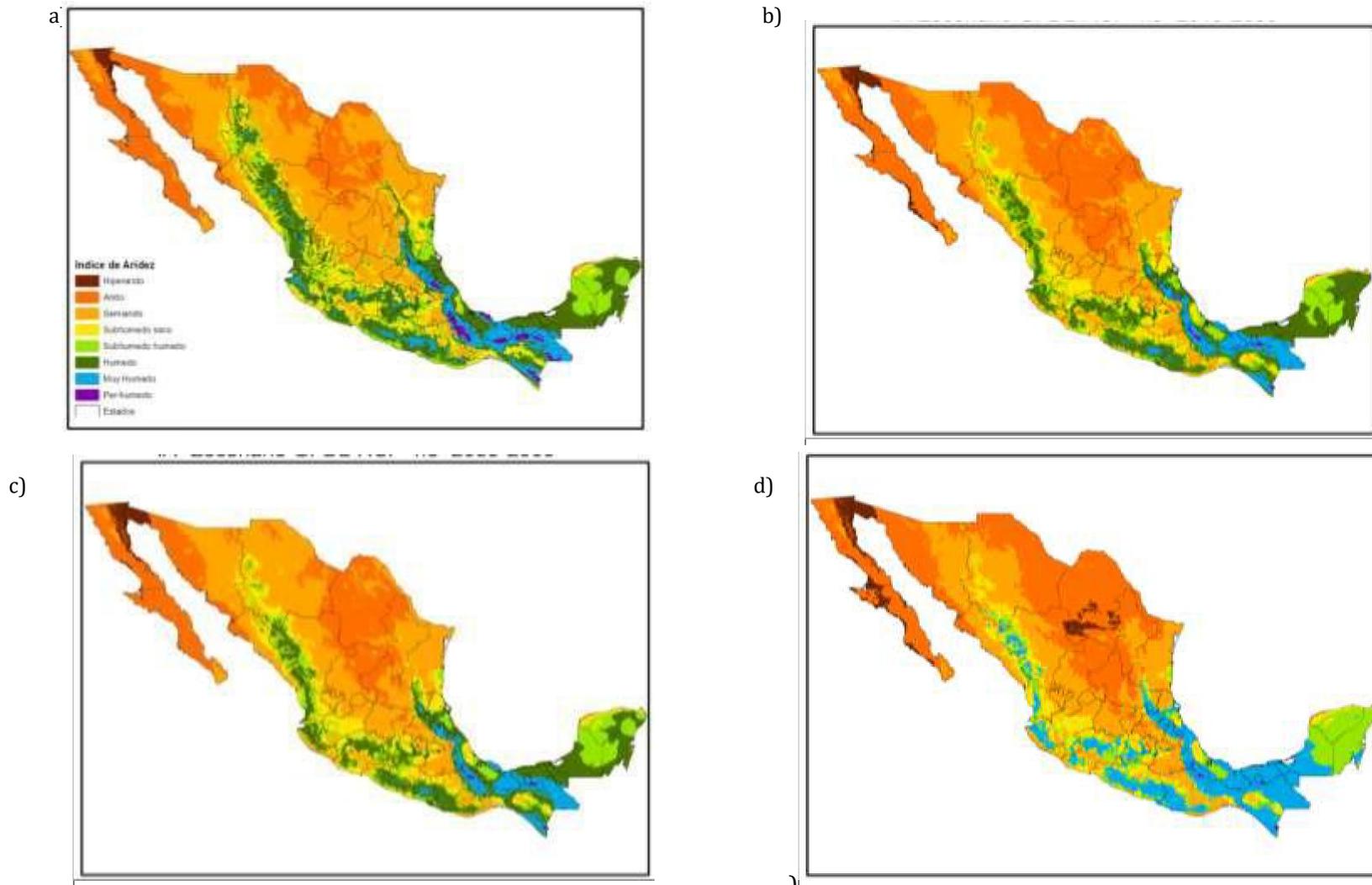


Figura 20 Cambios en la superficie y distribución de cada tipo climático para el RCP 4.5 y los escenarios de corto (b), mediano (c) y largo plazo (d) con respecto al escenario base (a) para el modelo GFDL. .

El clima Hiperárido se incrementa la superficie en todos los modelos con valores mayores que el escenario base desde 0.93% a 2.45% de la superficie del país, esto en los resultados de los modelos GFDL y MPI, respectivamente. Para el clima Árido, presentar incrementos en la superficie del país para dos modelos, el MPI y el HADGEM con valores de 2.45% y 6.28%, respectivamente y decrementos en la superficie para los modelos GFDL y el CNRM con valores de 0.24% y 1.53%, respectivamente. Para el clima Semiárido, los incrementos con respecto al escenario base para tres modelos, el GFDL, MPI y CNRM, con valores de 3.73%, 1.30% y de 3.13%, respectivamente y un decremento de 0.96% para el modelo HADGEM. En el clima Subhúmedo seco, en tres modelos se reportan incrementos en la superficie con respecto al escenario base con valores de 0.19%, 1.18% y 2.21% para los modelos HADGEM, GFDL y MPI, respectivamente y se reporta un decremento en la superficie de 0.10% del total de la superficie del país para el modelo CNRM.

Los climas definidos como tierras no secas, el clima Subhúmedo húmedo presenta una disminución en los cuatro modelos que van de 1.23% a 1.72% del total de la superficie nacional para los modelos MPI y GFDL, respectivamente. La superficie con clima Húmedo, reporta también un decremento en la superficie para los cuatro modelos y van de 0.06% a 5.01% del total de la superficie del país para los modelos CNRM y MPI, respectivamente. Para el clima Muy Húmedo, también hay un decremento en los cuatro modelos con valores de 0.72% a 1.57% del total de la superficie del país para los modelos CNRM y HADGEM, respectivamente. Para el clima Per Húmedo, también hay una disminución en la superficie que representarían en este escenario para los cuatro modelos con valores de 0.66% a 0.82% del total de la superficie del país para los modelos CNRM y HADGEM, respectivamente. Estos cambios se presentan en la figura 20.

Para el escenario de mediano plazo, el incremento de la superficie con climas definidos como tierras secas es mayor que en el de corto plazo para todos los modelos (Tabla 24). El modelo MPI estima un mayor incremento con el 77.86% de la superficie del país que representa un incremento de 15.14% sobre el escenario base y un incremento de 3.46% respecto a este escenario pero con un RCP de 4.5. El modelo HADGEM reporta una superficie de 76.51% del total del país lo que representa un 13.79% con respecto al escenario base y de 2.24% con el estimado para este escenario con el RCP de 4.5. El modelo GFDL estima una superficie de tierras secas de 73.11% del total del país que representa un incremento de 10.39% del total del país estimado con el escenario base y de 2.51% a lo estimado con el RCP 4.5. Para el modelo CNRM la superficie que se estimó como tierras secas es de 71.38% del total del país, lo que representa un incremento de 8.56% con respecto al escenario base y es menor en 0.79% que lo estimado con el RCP de 4.5.

El clima Hiperárido se incrementa en todos los modelos con valores mayores que el escenario base desde 1.04% a 1.39% de la superficie del país, esto en los resultados de los modelos MPI y GFDL, respectivamente. Para el clima Árido, presentar incrementos con todos los modelos, cuyos valores van de 5.24% a 10.84% por arriba del escenario actual para los modelos CNRM y GFDL, respectivamente. Para el clima Semiárido, se estiman incrementos para los modelos

CNRM y HADGEM con valores de 1.75% y 3.37%, respectivamente y decrementos en la superficie con este clima para los modelos GFDL y MPI con valores de 1.69% y 1.11%, respectivamente. En el clima Subhúmedo seco, en tres modelos se reportan incrementos en su superficie, en el CNRM, HADGEM y MPI con valores de 0.51%, 3.65% y 4.81%, respectivamente, el modelo GFDL reporta disminución de la superficie con este clima de 0.16% de la superficie total del país.

Los climas definidos como tierras no secas, el clima Subhúmedo húmedo presenta una disminución en los cuatro modelos que van de 0.02% a 3.50% del total de la superficie nacional para los modelos GFDL y MPI, respectivamente. La superficie con clima Húmedo, reporta también un decremento en la superficie para los cuatro modelos y van de 3.70% a 8.27% del total de la superficie del país para los modelos CNRM y MPI, respectivamente. Para el clima Muy Húmedo, también hay un decremento en los cuatro modelos con valores de 1.89% a 2.62% del total de la superficie del país para los modelos CNRM y HADGEM, respectivamente. Para el clima Per Húmedo, también hay una disminución en la superficie que representarían en este escenario para los cuatro modelos con valores de 0.88% a 1.01% del total de la superficie del país para los modelos CNRM y HADGEM, respectivamente. Estos cambios se presentan también en la figura 20.

Para el escenario de largo plazo, el incremento de la superficie con climas definidos como tierras secas es mayor que en el de corto y mediano plazo (Tabla 25). El modelo HADGEM estima un mayor incremento con el 83.47% de la superficie del país, que representa el 20.75% con respecto al escenario base y de 8.11% del estimado para este escenario de tiempo con el RCP de 4.5. El modelo MPI sigue en el incremento de la superficie con respecto al escenario base con un 82.77% de la superficie del país, misma que representa un incremento de 20.05% y también un incremento de 8.52% con respecto al estimado con el RCP de 4.5. El modelo GFDL reporta una superficie del 79.26% del total del país que representa un incremento de 16.54% respecto al escenario base y de 5.7% al estimado con el RCP de 4.5. El modelo con menor incremento es el CNRM con una superficie de 75.58% del total del país y representa un incremento con el escenario base de 12.86% y de 5.06% respecto al valor estimado con el RCP 4.5. Para todos los modelos hay una tendencia de incremento de la superficie con climas de tierras secas plazo conforme se alarga el tiempo del escenario de cambio climático.

El clima Hiperárido se incrementa en todos los modelos con valores mayores que el escenario base desde 1.17% a 3.01% de la superficie del país, esto en los resultados de los modelos CNRM y GFDL, respectivamente. Para el clima Árido, también se incrementa la superficie para este escenario con respecto a la superficie del escenario base en valores que van de 4.36% a 16.28% de la superficie nacional, para los modelos CNRM y MPI, respectivamente. Para el clima Semiárido, los incrementos con respecto al escenario base se presentan en dos modelos, el CNRM y el HADGEM con valores de 4.92% y de 3.89%, respectivamente, y un decremento en la superficie para los modelos MPI y GFDL con valores que van de 2.51% y 3.13%, respectivamente. En el clima Subhúmedo seco, los cuatro modelos reportan incrementos en la superficie con respecto al escenario base con valores de 2.41% a 5.75% del total de la superficie del país, para los modelos CNRM y HADGEM, respectivamente.

Los climas definidos como tierras no secas, el clima Subhúmedo húmedo presenta una disminución en los cuatro modelos que van de 2.18% a 6.13% del total de la superficie nacional para los modelos CNRM y MPI, respectivamente. La superficie con clima Húmedo, reporta también un decremento en la superficie para los cuatro modelos y van de 7.12% a 9.94% del total de la superficie del país para los modelos CNRM y HADGEM, respectivamente. Para el clima Muy Húmedo, también hay un decremento en los cuatro modelos con valores de 2.54% a 3.83% del total de la superficie del país para los modelos CNRM y HADGEM, respectivamente. Para el clima Per Húmedo, también hay una disminución en la superficie que representarían en este escenario para los cuatro modelos con valores de 0.101% a 1.08% del total de la superficie del país para los modelos CNRM y HADGEM, respectivamente. Estos cambios se presentan también en la figura 20.

Tabla 23 Tipos climáticos estimados por el Índice de Aridez en México para el escenario a corto plazo (2015-2039) con diferentes Modelos para un RCP de 8.5 Watts m-2.

Tipo climático por IA	Escenario	HADGEM	GFDL	MPI	CNRM
	Base	Superficie			
	miles de hectáreas y (porcentaje de la superficie)				
Hiperárido	78.85 (0.04)	2 227.23 (1.10)	1 899.89 (0.97)	4 909.16 (2.51)	2 922.80 (1.49)
Árido	36 933.73 (18.85)	49 231.38 (25.10)	36 460.49 (18.61)	41 735.47 (21.30)	33 940.71 (17.32)
Semiárido	64 345.89 (32.84)	62 473.66 (31.90)	71 678.51 (36.59)	66 890.11 (34.14)	70 480.99 (35.97)
Subhúmedo seco	21 540.00 (10.99)	21 907.36 (11.20)	23 855.62 (12.18)	25 866.37 (13.20)	21 341.38 (10.89)
Subhúmedo húmedo	20 172.12 (10.30)	17 238.70 (8.80)	16 784.81 (8.57)	17 761.82 (9.07)	17 204.14 (8.78)
Húmedo	37 510.17 (19.15)	32 184.15 (16.40)	34 144.60 (17.43)	27 684.62 (14.13)	37 401.33 (19.09)
Muy Húmedo	13 196.17 (6.74)	10 129.55 (5.20)	10 516.39 (5.37)	10 506.33 (5.42)	11 791.25 (6.02)
Per húmedo	2 147.57 (1.10)	532.76 (0.30)	564.50 (0.29)	570.88 (0.29)	852.20 (0.43)

Tabla 24 Tipos climáticos estimados por el Índice de Aridez en México para el escenario a mediano plazo (2039-2069) con diferentes Modelos para un RCP de 8.5 Watts m-2.

Tipo climático por IA	Escenario	HADGEM	GFDL	MPI	CNRM
	Base	Superficie			
		miles de hectáreas y (porcentaje de la superficie)			
Hiperárido	78.85 (0.04)	2 324.01 (1.20)	2 805.11 (1.43)	2 119.89 (1.08)	2 356.29 (1.20)
Árido	36 933.73 (18.85)	47 936.69 (24.50)	58 181.74 (29.70)	57 282.71 (29.24)	47 199.70 (24.09)
Semiárido	64 345.89 (32.84)	70 946.76 (36.20)	61 033.70 (31.15)	62 163.39 (31.73)	67 768.94 (34.59)
Subhúmedo seco	21 540.00 (10.99)	28 690.18 (14.60)	21 218.74 (10.83)	30 973.40 (15.81)	22 529.52 (11.50)
Subhúmedo húmedo	20 172.12 (10.30)	16 011.87 (8.20)	20 137.69 (10.28)	13 313.24 (6.80)	15 900.37 (8.12)
Húmedo	37 510.17 (19.15)	21 795.80 (11.10)	23 227.38 (11.86)	21 307.55 (10.88)	30 255.67 (15.44)
Muy Húmedo	13 196.17 (6.74)	8 057.99 (4.10)	9 076.36 (4.63)	8 557.19 (4.37)	9 498.29 (4.85)
Per húmedo	2 147.57 (1.10)	161.51 (0.10)	244.09 (0.12)	207.44 (0.11)	415.94 (0.21)

Tabla 25 Tipos climáticos estimados por el Índice de Aridez en México para el escenario a largo plazo (2069-2099) con diferentes Modelos para un RCP de 8.5 Watts m-2.

Tipo climático por IA	Escenario	HADGEM	GFDL	MPI	CNRM
	Base	Superficie miles de hectáreas y (porcentaje de la superficie)			
Hiperárido	78.85 (0.04)	3 629.18 (1.90)	5 933.53 (3.05)	4 513.33 (2.30)	2 363.04 (1.21)
Árido	36 933.73 (18.85)	55 149.55 (28.10)	63 922.10 (32.63)	68 8356.00 (35.13)	45 474.33 (23.21)
Semiárido	64 345.89 (32.84)	71 959.29 (36.70)	58 213.30 (29.71)	59 428.85 (30.33)	73 979.10 (37.76)
Subhúmedo seco	21 540.00 (10.99)	32 808.78 (16.70)	27 162.09 (13.86)	29 397.14 (15.00)	26 255.32 (13.40)
Subhúmedo húmedo	20 172.12 (10.30)	8 620.73 (4.40)	13 557.25 (6.92)	8 166.44 (4.17)	15 839.44 (8.11)
Húmedo	37 510.17 (19.15)	18 033.90 (9.20)	19 178.42 (9.79)	19 250.25 (9.83)	23 564.06 (12.03)
Muy Húmedo	13 196.17 (6.74)	5 685.04 (2.90)	7 808.58 (3.99)	6 267.18 (3.20)	8 223.73 (4.20)
Per húmedo	2 147.57 (1.10)	38.33 (0.01)	99.54 (0.05)	65.63 (0.03)	171.79 (0.09)

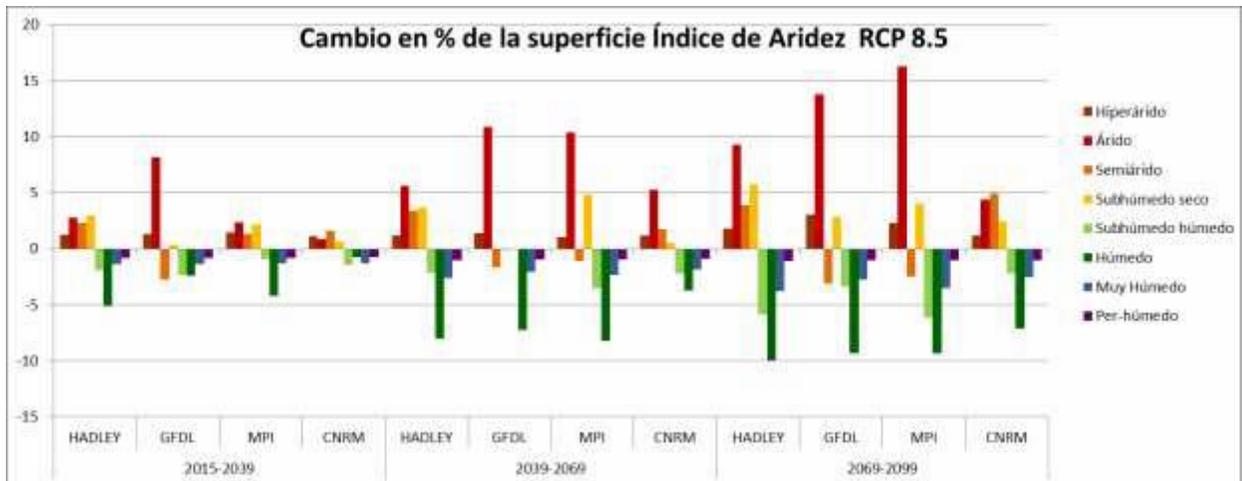


Figura 21 Cambios en la superficie relativa de cada tipo climático para el RCP 8.5 y los escenarios de corto, mediano y largo plazo para los diferentes modelos de cambio climático.

En la figura 22 se muestran los cambios en la geografía del país de los tipos climáticos para el RCP 8.5 y el modelo HADGEM para los escenarios de corto, mediano y largo plazo con respecto al escenario base, que como se indicó, hay un incremento de la proporción de las tierras secas conforme se aumenta el tiempo del escenario y mayor incremento también para los mismos modelos pero con un RCP de 4.5.

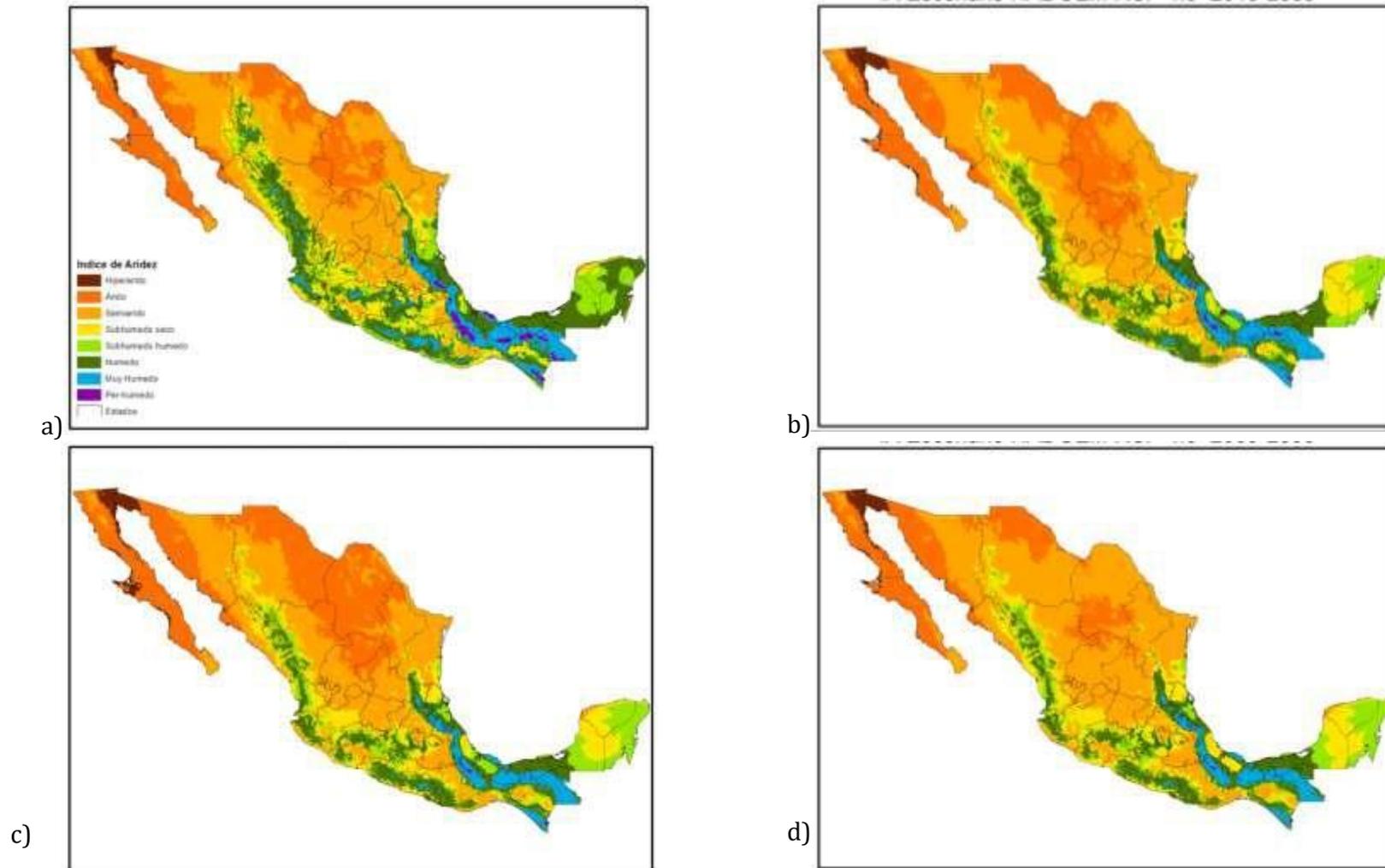


Figura 22 Cambios en la superficie y distribución de cada tipo climático para el RCP 8.5 y los escenarios de corto (b), mediano (c) y largo plazo (d) con respecto al escenario base (a) para el modelo HADGEM..

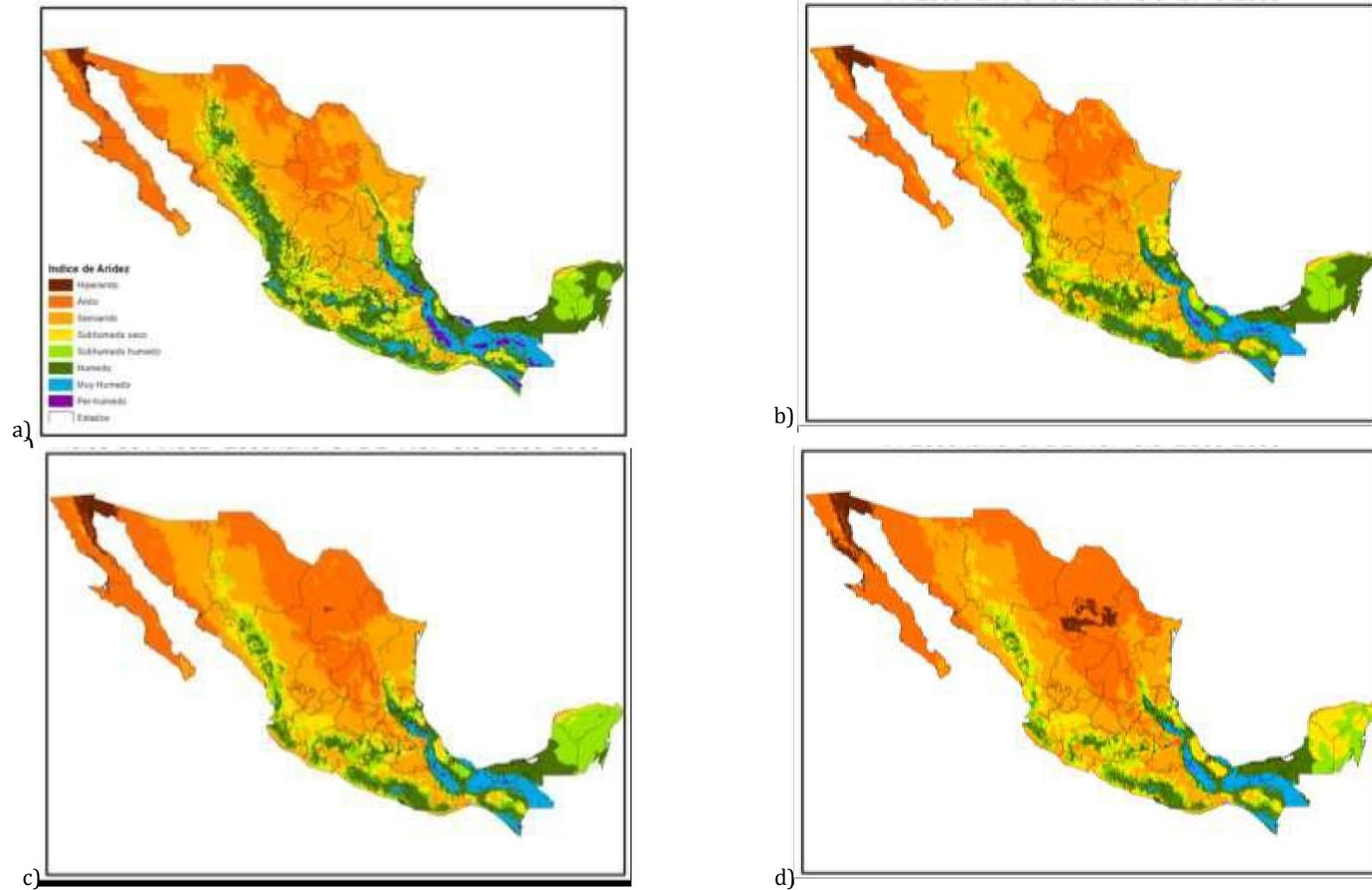


Figura 23 Cambios en la superficie y distribución de cada tipo climático para el RCP 8.5 y los escenarios de corto (b), mediano (c) y largo plazo (d) con respecto al escenario base (a) para el modelo GFDL..

## 11. ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DE CARBONO EN LOS SUELOS DE MÉXICO

El Carbono Orgánico del Suelo (COS) de las áreas agrícolas reportado por el INEGI se muestra su distribución en la figura 24 y la superficie por rango de carbono en el Tabla 26. Los suelos con mayor contenido de Carbono Orgánico se asocian en gran parte a suelos con alto contenido de Alófono del eje Neo volcánico, así como algunas partes del sur de Veracruz y del centro de Tabasco en donde el material parental son zonas de acumulación de residuos orgánicos.

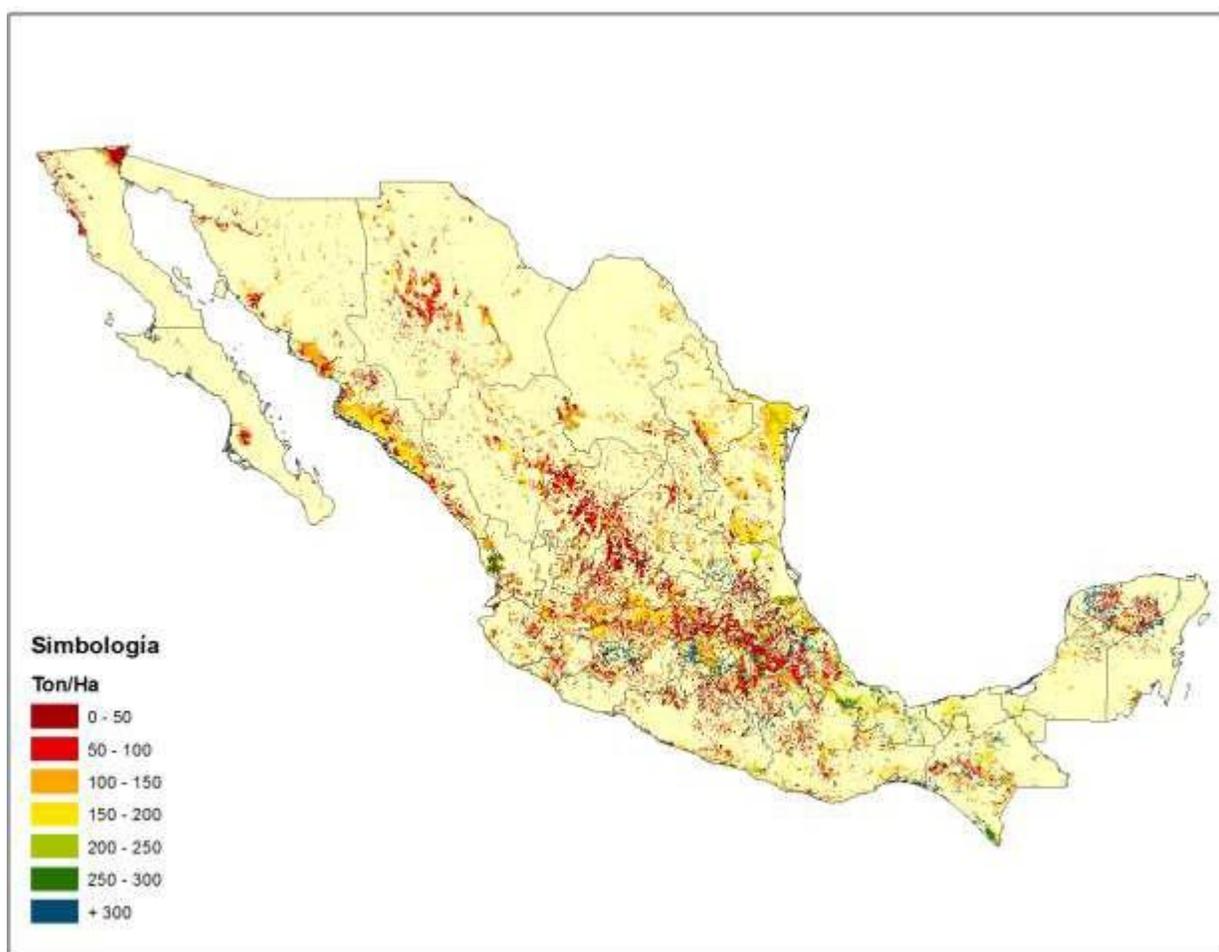


Figura 24 Distribución del Carbono Orgánico del Suelo en los terrenos agrícolas de México.

En la Tabla 26 se presenta la superficie de los terrenos agrícolas por clases de contenido de Carbono Orgánico del Suelo, tanto para las condiciones actuales que se definen como escenario base y para los escenarios de corto y mediano plazo estimados estos últimos contenidos con los lineamientos del IPCC (2007), en donde no se contemplan los RCP's.

En general los suelos agrícolas de México tienen bajos contenidos de COS, esto asociado a que las condiciones de clima y propiedades del suelo no favorecen la acumulación de materia orgánica por la baja producción de biomasa en las regiones de tierras secas, y que las prácticas de manejo han incluido en varias regiones agrícolas del país la quema de residuos de cosecha. El 50% de los suelos agrícolas están catalogados en las clases con menos de 100 toneladas por hectárea de COS y solo el 10% está en las clases de más de 250 toneladas de COS por hectárea.

La estimación de la dinámica del COS en los terrenos agrícolas, en donde se consideró que no hay incorporación de residuos de cosecha o aplicaciones de estiércol o compostas, reporta que la primera fase comprendida en el corto plazo es la de mayor velocidad de mineralización, y en la segunda etapa que comprende el corto plazo de escenarios de cambio climático, la fracción del COS es más estable y difícil de mineralizar (Tabla 26).

Como puede apreciarse, la clase de menor contenido de COS se estima cercana al 50%, con una mayor superficie dentro de este rango de contenido de COS, que para el escenario de tiempo a corto plazo la superficie con menos de 100 toneladas de COS representará el 76.73% de los terrenos agrícolas del país y para el escenario de tiempo a mediano plazo esta clase representará el 88.3% de la superficie agrícola del país.

En la figura 25 se presenta la distribución potencial del carbono orgánico del suelo para los escenarios de tiempo a corto y mediano plazo.

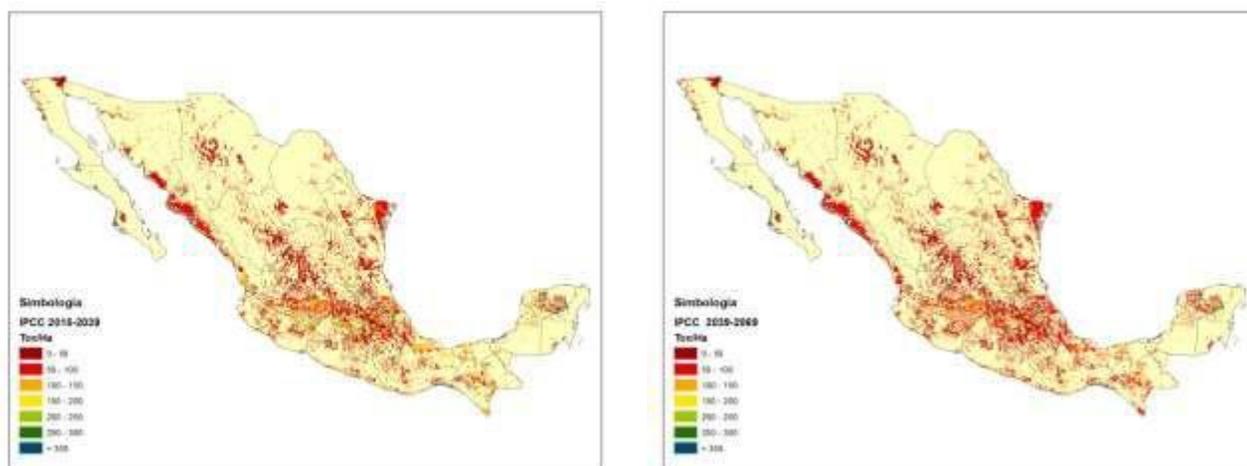


Figura 25 Distribución del Carbono Orgánico del Suelo en los terrenos agrícolas de México en el escenario de tiempo de corto y mediano plazo estimados con los lineamientos del IPCC (2007)

Tabla 26 Contenido de Carbono Orgánico del Suelo de los terrenos agrícolas de México estimado a partir de los lineamientos del IPCC (2007)

Clases por contenido de COS (Ton/Ha)	Condición actual	2015-2039	2039-2069
	Superficie en miles de hectáreas		
	porcentaje del total de suelos agrícolas		
0-50	11 752.68 (36.22)	15 312.92 (47.19)	15 504.09 (47.78)
50-100	4 651.60 (14.34)	9 583.69 (29.54)	13 147.24 (40.52)
100-150	4 479.29 (13.81)	4 578.09 (14.11)	3 449.40 (10.63)
150-200	6 583.14 (20.29)	1 428.29 (4.40)	4.18 (0.01)
200-250	1 686.57 (5.20)	736.66 (2.27)	98.82 (0.30)
250-300	995.94 (3.07)	430.89 (1.33)	237.98 (0.73)
+ 300	2 296.97 (7.08)	375.66 (1.16)	4.48 (0.01)

En la Tabla 27 se presenta la variación del COS de los terrenos agrícolas de México estimado para un RCP de 4.5 para los escenarios de corto y mediano plazo con los modelos GFDL y HADGEM a partir de la mineralización del carbono estimada con el método de Ortiz et al., (1994).

Como puede observarse, la disminución del COS es mayor que la estimada con los lineamientos del IPCC (2007) y tiene un comportamiento lineal, con una disminución continua año con año. Bajo estas circunstancias, la clase de contenido de COS menor de 100 toneladas por hectárea, pasa de 50.56% de la superficie de los terrenos agrícolas a 81.55% al 2039 y a 93.35% al 2069 con el modelo GFDL y a 81.36% al 2039 y a 93.29% con el modelo HADGEM.

La variación al aplicar estos dos modelos de Cambio Climático es relativamente baja entre ellos, asociado a que ambos establecen un incremento de la temperatura y disminución de la precipitación que son los factores fundamentales que definen la mineralización en el método utilizado.

Es importante señalar que la mineralización del COS será mayor a valores más altos de temperatura, disponibilidad de humedad y texturas gruesas del suelo.

En la figura 26 se muestra la distribución del COS en los terrenos agrícolas del país, en donde es evidente que la mayor proporción está en las clases menores de 100 toneladas de COS por hectárea

Tabla 27 Contenido de Carbono Orgánico del Suelo de los terrenos agrícolas de México estimado a partir de la mineralización del Carbono con el método de Ortiz et al., (1994) para un RCP de 4.5 Watts m-2 y escenarios de tiempo de corto y mediano plazo

Clases por contenido	Condición actual	GFDL 2015-2039	GFDL 2039-2069	HADGEM 2015-2039	HADGEM 2039-2069
de COS (Ton/Ha)	Superficie en miles de hectáreas porcentaje del total de suelos agrícolas				
0-50	11 752.68 (36.22)	20 999.73 (64.72)	27 890.65 (85.96)	20 955.09 (64.58)	27 875.57 (85.91)
50-100	4 651.60 (14.34)	5 455.05 (16.81)	2 397.48 (7.39)	5 444.26 (16.78)	2 394.95 (7.38)
100-150	4 479.29 (13.81)	2 520.28 (7.77)	766.75 (2.36)	2 530.38 (7.80)	793.19 (2.44)
150-200	6 583.14 (20.29)	1 687.39 (5.20)	253.10 (0.78)	1 735.38 (5.35)	234.68 (0.72)
200-250	1 686.57 (5.20)	322.81 (0.99)	257.53 (0.79)	315.73 (0.97)	265.48 (0.82)
250-300	995.94 (3.07)	160.02 (0.49)	165.01 (0.51)	165.01 (0.51)	280.63 (0.86)
+ 300	2 296.97 (7.08)	1 300.91 (4.01)	1299.34 (4.00)	1 299.34 (4.00)	601.72 (1.85)

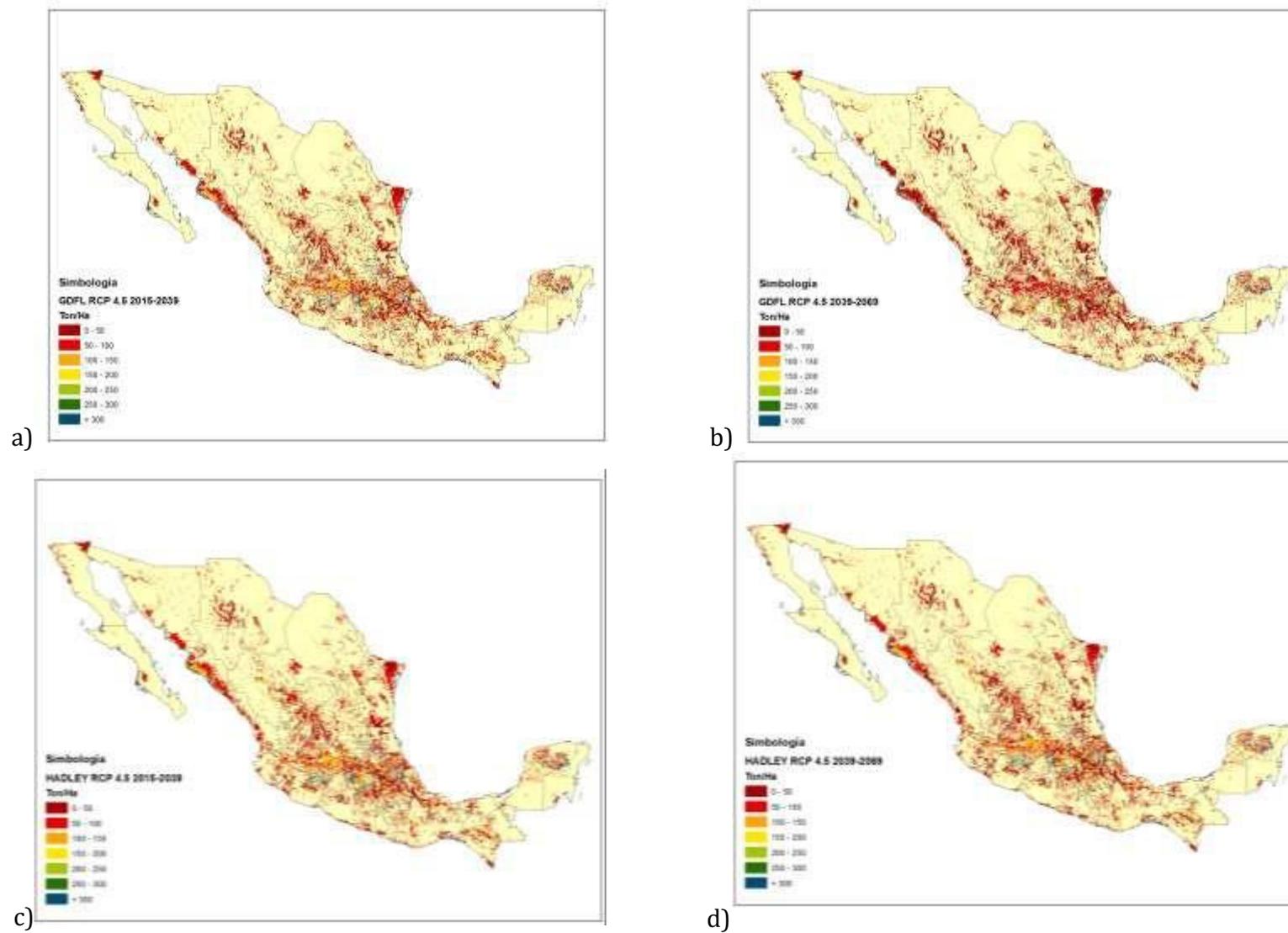


Figura 26 Distribución del Carbono Orgánico del Suelo en los terrenos agrícolas de México en el escenario de tiempo de corto y mediano plazo estimados con el método de mineralización del carbono de Ortiz et al., (1994) para un RCP de 4.5

En la figura 27 se muestra la variación de superficie de los terrenos agrícolas del país para las diferentes clases de contenido de COS bajo los enfoques de mineralización del carbono del IPCC (2007) para el corto y mediano plazo las clases y de la metodología de Ortiz et al., (1994) para estos escenarios de tiempo pero con un RCP de 4.5.

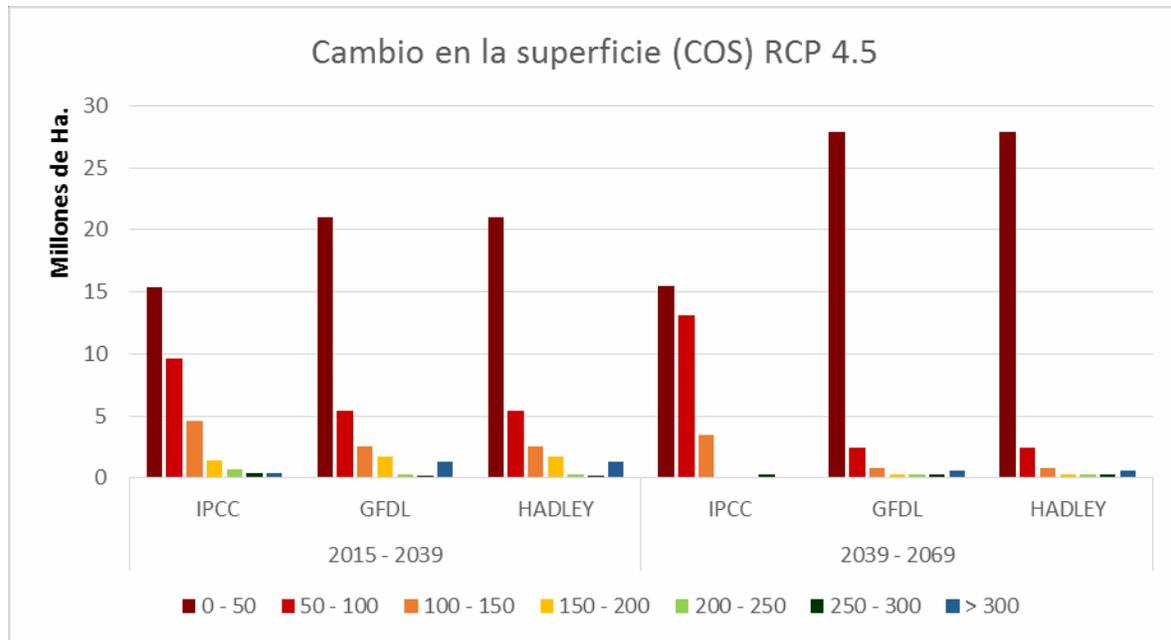


Figura 27 Cambios en el contenido del Carbono Orgánico del Suelo en los terrenos agrícolas de México en el escenario de tiempo de corto y mediano plazo estimados con los lineamientos del IPCC (2007) y el método de mineralización del carbono de Ortiz et al., (1994)

En la Tabla 28 se presenta la variación del COS de los terrenos agrícolas de México estimado para un RCP de 8.5 para los escenarios de corto y mediano plazo con los modelos GFDL y HADGEM a partir de la mineralización del carbono con el método de Ortiz et al., (1994). Como puede observarse, la disminución del COS es similar a la estimada para el RCP de 4.5 y también tiene un comportamiento lineal, con una disminución continua año con año, con mayor tasa de mineralización entre mayor sea la temperatura y la disponibilidad de humedad y esto se intensifica cuando la textura del suelo es gruesa. Bajo estas circunstancias, la clase de contenido de COS menor de 100 toneladas por hectárea, pasa de 50.56% de la superficie de los terrenos agrícolas a 81.72% al 2039 y a 93.59% al 2069 con el modelo GFDL y a 81.54% al 2039 y a 93.20% con el modelo HADGEM. La variación al aplicar estos dos modelos de Cambio Climático es relativamente baja entre ellos, asociado a que ambos establecen un incremento de la temperatura y disminución de la precipitación que son los factores fundamentales que definen la mineralización en el método utilizado. Es importante señalar que para la disminución del COS es más lenta cuanto menor es la cantidad de este en el suelo al haber menor disponibilidad para que sea aprovechado por los microorganismos del suelo.

Tabla 28 Contenido de Carbono Orgánico del Suelo de los terrenos agrícolas de México estimado a partir de la mineralización del Carbono con el método de Ortiz et al., (1994) para un RCP de 8.5 Watts m-2 y escenarios de tiempo de corto y mediano plazo

Clases contenido	por de	Condición actual	GFDL 2015- 2039	GFDL 2039- 2069	HADGEM 2015-2039	HADGEM 2039-2069
COS (Ton/Ha)		Superficie en miles de hectáreas porcentaje del total de suelos agrícolas				
0-50		11 752.68 (36.22)	21 204.53 (65.35)	28 200.29 (86.91)	21 061.08 (64.91)	28 138.08 (86.72)
50-100		4 651.60 (14.34)	5 312.38 (16.37)	2 166.53 (6.68)	5 397.22 (16.63)	2 220.79 (6.84)
100-150		4 479.29 (13.81)	2 870.65 (8.85)	742.43 (2.29)	2 558.75 (7.89)	737.53 (2.27)
150-200		6 583.14 (20.29)	1 300.34 (4.01)	218.21 (0.67)	1 664.78 (5.13)	0.00 (0.00)
200-250		1 686.57 (5.20)	302.04 (0.93)	265.00 (0.82)	305.39 (0.94)	263.51 (0.81)
250-300		995.94 (3.07)	160.95 (0.50)	269.12 (0.83)	170.43 (0.53)	509.07 (1.57)
➤ 300		2 296.97 (7.08)	1 295.31 (3.99)	584.62 (1.80)	1 288.55 (3.97)	577.22 (1.78)

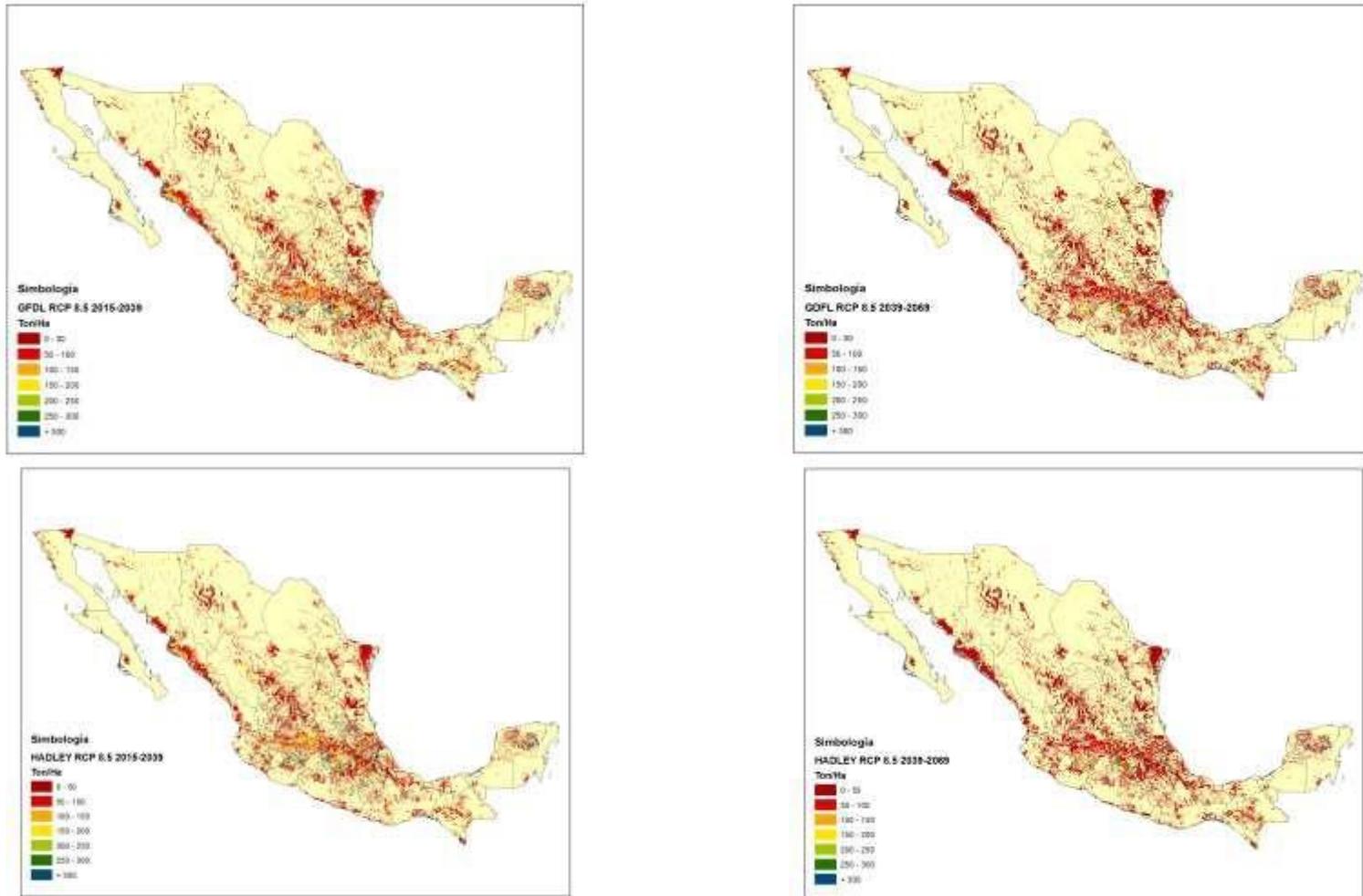


Figura 28 Distribución del Carbono Orgánico del Suelo en los terrenos agrícolas de México en el escenario de tiempo de corto y mediano plazo estimados con el método de mineralización del carbono de Ortiz et al., (1994) para un RCP de 8.5.

En la figura 28 se muestra la distribución del COS en los terrenos agrícolas del país, en donde es evidente que la mayor proporción está en las clases menores de 100 toneladas de COS por hectárea y que la variación es muy similar a la estimada para el RCP de 4.5.

En la figura 29 se muestra la variación de superficie de los terrenos agrícolas del país para las diferentes clases de contenido de COS bajo los enfoques de mineralización del carbono del IPCC (2007) para el corto y mediano plazo las clases y de la metodología de Ortiz et al., (1994) para estos escenarios de tiempo pero con un RCP de 8.5.

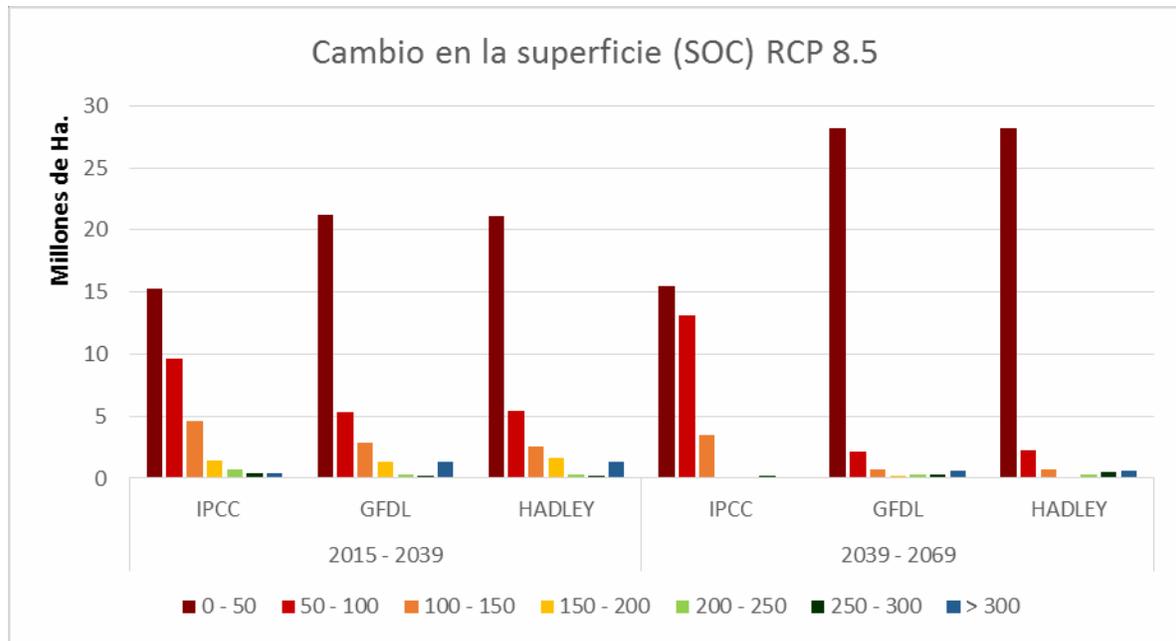


Figura 29 Cambios en el contenido del Carbono Orgánico del Suelo en los terrenos agrícolas de México en el escenario de tiempo de corto y mediano plazo estimados con los lineamientos del IPCC (2007) y el método de mineralización del carbono de Ortiz et al., (1994)

## 12. CONCLUSIONES

**Escenarios de cambio climático del estudio:** Los escenarios de cambio climático para la evaluación de su impacto en los Suelos de México fueron los obtenidos con los modelos generales de circulación atmosférica HADGEM, GDFL, MPI, CNRM bajo los RCP de 4.5 y 8.5 con periodos de tiempo de corto (2015-2039), mediano (2039-2069) y largo plazo (2069- 2099). Para la evaluación del Índice de Aridez se consideró adicionalmente el REA.

**Erosión hídrica actual:** La superficie afectada por erosión hídrica en el país bajo las condiciones estimadas como escenario actual es de 64 892 400 hectáreas que representan el 33.12% de la superficie total del país, de las cuales el 7.70% corresponde al grado ligero, el 16.67% al grado moderado, el 7.12% al grado severo y el 1.63% al grado extremo. La erosión hídrica potencial estimada considerando que se removiera la cubierta vegetal cubriría el 74% de la superficie del país. La distribución de la erosión hídrica del país, la mayor parte se concentra en las zonas montañosas con mayor pendiente y los grados extremos en las áreas de estas condiciones donde se ha perdido o degradado la vegetación natural y con precipitaciones medias anuales altas.

**Erosión hídrica en condiciones de cambio climático:** Para esta estimación solo se ajustó el factor de erosividad de la lluvia (R), a partir de los cambios en la precipitación media anual calculada con las razones de cambio para los RCP 4.5 y 8.5 y para los escenarios de tiempo a corto, mediano y largo plazo con los modelos HADGEM, GFDL, MPI y el CNRM. Para los escenarios de cambio considerando los dos RCP y los tres escenarios de tiempo, se estimó una ligera disminución en la superficie afectada por erosión hídrica para todos los modelos generales de circulación atmosférica utilizados, con reducciones mayores para el modelo MPI (1.2% a 4.9% de la superficie total del país) y menores para el modelo CNRM (0.3% a 1.1% de la superficie total del país), esta reducción en la severidad de afectación por erosión hídrica se asocia a que el valor del factor de erosividad de la lluvia en todos los escenarios disminuyó, como consecuencia de una reducción en las precipitaciones que se estiman para los tres escenarios de tiempo y con todos los modelos de cambio climático.

**Erosión eólica actual:** La superficie afectada por erosión eólica en el país bajo las condiciones estimadas como escenario actual es de 104 036 069 hectáreas que representan el 53.1% de la superficie total del país, de las cuales el 9.1% corresponde al grado ligero, el 34.9% al grado moderado, el 8.2% al grado severo y el 0.6% al grado extremo. Este proceso de degradación se asocia principalmente a tierras secas, con escasa o nula cobertura vegetal y superficies en donde el viento alcanza altas velocidades. El 46.91% de la superficie del país no presenta afectación por erosión eólica (menos de 5 Ton/ha/año), lo cual coincide con las áreas en las zonas montañosas y con alguna cobertura vegetal y de los tipos climáticos comprende casi la totalidad de los climas húmedos y subhúmedos húmedos, cercas del 70% de los subhúmedos secos y 20% de los climas semiáridos y solo el 2% de los climas áridos.

**Degradación física actual:** Los datos reportados por la evaluación de la degradación de suelos inducida por el hombre elaborada por SEMARNAT-CP (2002), el 17.8% de la superficie del país presenta degradación física, que corresponde a 34 936 500 hectáreas. La superficie del país con

este tipo de degradación corresponden a 0.03% afectado por anegamiento, 9.4% por compactación, 0.2% por disminución de la disponibilidad de agua, 0.6% por encostramiento, 7.6% por pérdida de la función productiva.

**Degradación química actual:** Los datos que se presentan son los reportados por la evaluación de la degradación de suelos inducida por el hombre elaborada por SEMARNAT- CP (2002), el 20.4% de la superficie del país presenta afectación por la degradación química, que corresponde a 39 968 659 hectáreas. Los diferentes tipos de degradación química reportados son: Declinación de la fertilidad y reducción de la materia orgánica del suelo con un porcentaje de la superficie del país de 19.3%, la Eutrofización con un 0.1%, la Polución con 0.6% y la Salinización/Alcalinización con 0.4%.

**Régimen de humedad de los suelos bajo condiciones actuales y de cambio climático:** El régimen de humedad de los suelos de México se evaluó a partir de un indicador alternativo que es el Índice de Aridez. De los tipos climáticos que comprenden las tierras secas delimitadas con los datos del escenario base, son 122 898 470 hectáreas que representan el 62.72% de la superficie del país. Las regiones Hiperáridas representan el 0.04% de la superficie del país, las Áridas representan el 18.85%, las Semiáridas comprenden el 32.84% y las zonas con climas Subhúmedo seco representan el 10.99%. Las zonas comprendidas como tierras húmedas, representan el 37.28% con una superficie de 73 040 765 hectáreas. Las regiones con climas Subhúmedos húmedos cubren el 10.3% de la superficie del país, las zonas con climas Húmedos comprenden 19.15%, el clima muy Húmedo comprende el 6.74% y el clima Perhúmedo representan el 1.1%.

Para los escenarios de cambio climático con el RCP de 4.5 para los tres escenarios de tiempo y con los cuatro modelos que se consideran en el estudio reportan lo siguiente: Para el escenario de corto plazo, en general aumenta la superficie con climas definidos como tierras secas. El modelo HADGEM estima un mayor incremento con el 71.96%, que representa un incremento de 9.24% del total de la superficie del país. Los modelos GFDL y el MPI estiman un 69.77% y 69.95% de la superficie del país con este tipo de climas, lo que representa un incremento de 7.05% y 7.23%, respectivamente. El menor incremento de los climas secos lo reporta el modelo CNRM con 66.95% de la superficie del país y un incremento de 4.23%. Para el escenario de mediano plazo, el incremento de la superficie con climas definidos como tierras secas es mayor que en el de corto plazo. El modelo MPI estima un mayor incremento con el 74.40%, que representa un incremento de 11.68% del total de la superficie del país. Los modelos HADGEM, GFDL y CNRM estiman un 74.24%, 70.60% y 72.17% de la superficie del país con este tipo de climas, lo que representa un incremento de 11.52%, 7.88% y 9.45%, respectivamente. Para el escenario de largo plazo, el incremento de la superficie con climas definidos como tierras secas es mayor que en el de corto plazo. El modelo HADGEM estima un mayor incremento con el 75.36%, que representa un incremento de 12.64% del total de la superficie del país. Los modelos GFDL, MPI y CNRM estiman un 73.56%, 74.25% y 70.52% de la superficie del país con este tipo de climas, lo que representa un incremento de 10.84%, 11.53% y 7.80%, respectivamente. Para los modelos HADGEM y GFDL hay una tendencia de incremento para los escenarios de tiempo de corto, mediano y largo plazo, para el modelo MPI, no hay una tendencia de incremento entre los escenarios de mediano y largo plazo, sin embargo estos dos si se

incrementan la superficie de tierras secas con respecto al de corto plazo.

Para el RCP de 8.5 en los tres escenarios de tiempo y con los cuatro modelos que se consideran en el estudio se reporta lo siguiente: Para el escenario de corto plazo, en general aumenta la superficie con climas definidos como tierras secas. El modelo HADGEM estima una superficie de 69.33%, que representa un incremento de 6.61% del total de la superficie del país, pero es menor en 2.63% de la estimación para el RCP 4.5 para este mismo periodo de tiempo. El modelo GFDL estima una superficie de tierras secas de 68.34% del total del país, que representa un incremento de 5.62% del total de la superficie con respecto al escenario base y es menor en 1.43% de lo estimado para el RCP 4.5 para este escenario de tiempo. El modelo MPI estiman una superficie de tierras secas de 71.15% que representa un incremento de 8.43% del total del país y es mayor en 1.2% que lo estimado para este escenario con el RCP 4.5. El menor incremento de los climas secos lo reporta el modelo CNRM con 65.68% del total de la superficie del país y representa un incremento de 2.96% del total de la superficie del país con respecto al escenario base y es menor en 1.27% del valor estimado para el RCP 4.5. Para el escenario de mediano plazo, el incremento de la superficie con climas definidos como tierras secas es mayor que en el de corto plazo para todos los modelos. El modelo MPI estima un mayor incremento con el 77.86% de la superficie del país que representa un incremento de 15.14% sobre el escenario base y un incremento de 3.46% respecto a este escenario pero con un RCP de

4.5. El modelo HADGEM reporta una superficie de 76.51% del total del país lo que representa un 13.79% con respecto al escenario base y de 2.24% con el estimado para este escenario con el RCP de 4.5. El modelo GFDL estima una superficie de tierras secas de 73.11% del total del país que representa un incremento de 10.39% del total del país estimado con el escenario base y de 2.51% a lo estimado con el RCP 4.5. Para el modelo CNRM la superficie que se estimó como tierras secas es de 71.38% del total del país, lo que representa un incremento de 8.56% con respecto al escenario base y es menor en 0.79% que lo estimado con el RCP de 4.5. Para el escenario de largo plazo, el incremento de la superficie con climas definidos como tierras secas es mayor que en el de corto y mediano plazo. El modelo HADGEM estima un mayor incremento con el 83.47% de la superficie del país, que representa el 20.75% con respecto al escenario base y de 8.11% del estimado para este escenario de tiempo con el RCP de 4.5. El modelo MPI sigue en el incremento de la superficie con respecto al escenario base con un 82.77% de la superficie del país, misma que representa un incremento de 20.05% y también un incremento de 8.52% con respecto al estimado con el RCP de 4.5. El modelo GFDL reporta una superficie del 79.26% del total del país que representa un incremento de 16.54% respecto al escenario base y de 5.7% al estimado con el RCP de 4.5. El modelo con menor incremento es el CNRM con una superficie de 75.58% del total del país y representa un incremento con el escenario base de 12.86% y de 5.06% respecto al valor estimado con el RCP 4.5. Para todos los modelos hay una tendencia de incremento de la superficie con climas de tierras secas conforme se alarga el tiempo del escenario de cambio climático.

**Análisis de la dinámica del Carbono Orgánico de los suelos Agrícolas de México:** Las áreas agrícolas reportadas por el INEGI comprenden 32 446 190 hectáreas que representan el 16.56% de la superficie del país. El Carbono Orgánico del Suelo (COS) de las áreas agrícolas

bajo condiciones actuales reportado por el INEGI, el 50.56% de la superficie agrícola tiene de 0 a 100 Ton/Ha de COS, el 34.1% de la superficie agrícola tiene de 100 a 200 Ton/Ha de COS, el 8.27% de la superficie agrícola tiene de 200 a 300 Ton/Ha de COS y solo el 7.08% tiene más de 300 Ton/Ha de COS. En general los suelos agrícolas de México tienen bajos contenidos de COS, esto asociado a que las condiciones de clima y propiedades del suelo no favorecen la acumulación de materia orgánica por la baja producción de biomasa en las regiones de tierras secas, y que las prácticas de manejo han incluido en varias regiones agrícolas del país la quema de residuos de cosecha.

La estimación de los contenidos de COS con los modelos establecidos en los lineamientos del IPCC (2007) para los escenarios de corto y mediano plazo estimados en donde no se contemplan los RCP's, y se consideró que no hay incorporación de residuos de cosecha o aplicaciones de estiércol o compostas, reporta que el corto plazo es la fase de mayor velocidad de mineralización, y en la segunda etapa que comprende el mediano plazo de escenarios de cambio climático, la fracción del COS es más estable y difícil de mineralizar.

Se estima que para el escenario de tiempo a corto plazo la superficie con menos de 100 toneladas de COS representará el 76.73% de los terrenos agrícolas del país y para el escenario de tiempo a mediano plazo esta clase representará el 88.3% de la superficie agrícola del país.

La variación del COS de los terrenos agrícolas de México estimado partir de la mineralización del carbono determinada con el método de Ortiz et al., (1994) para un RCP de 4.5 para los escenarios de corto y mediano plazo con los modelos GFDL y HADGEM, la disminución del COS es mayor que la estimada con los lineamientos del IPCC (2007) y tiene un comportamiento lineal, con una disminución continua año con año. Bajo estas circunstancias, la clase de contenido de COS menor de 100 toneladas por hectárea, pasa de 50.56% de la superficie de los terrenos agrícolas a 81.55% al 2039 y a 93.35% al 2069 con el modelo GFDL y a 81.36% al 2039 y a 93.29% con el modelo HADGEM. La variación del COS de los terrenos agrícolas de México estimado para un RCP de 8.5 estimado con este método, la disminución del COS es similar a la estimada para el RCP de 4.5 y también tiene un comportamiento lineal, con una disminución continua año con año, con mayor tasa de mineralización entre mayor sea la temperatura y la disponibilidad de humedad y esto se intensifica cuando la textura del suelo es gruesa. Bajo estas circunstancias, la clase de contenido de COS menor de 100 toneladas por hectárea, pasa de 50.56% de la superficie de los terrenos agrícolas a 81.72% al 2039 y a 93.59% al 2069 con el modelo GFDL y a 81.54% al 2039 y a 93.20% con el modelo HADGEM.

## 13. BIBLIOGRAFÍA

- Chepil, W. S. 1960. Conversion of relative field erodality to annual soil loss by wind. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 24:143 – 145
- CNULD, 1994, Criterios para generar indicadores de Desertificación. Paris 1994.
- Cooley, S.W. (April 1, 2015). Watershed Delineation Lesson. In [www.GIS4Geomorphology.com](http://www.GIS4Geomorphology.com). Retrieved April 1, 2015, from <http://www.gis4geomorphology.com/watershed>
- Cortés, T. H. G, 1991. Caracterización de la erosividad de la lluvia en México utilizando métodos multivariados. Tesis M. C. Colegio de postgraduados, Montecillos, México
- De Jong, B.H.J. 2001. Uncertainties in estimating the potential for carbon mitigation of forest management. *For. Ecol. Mgmt.* 154:85-104.
- Etheridge, D.M., L.P. Steele, R.L. Langenfelds, R.J. Francey, I.M. Barnola, and V.I. Morgan. 1996. Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO<sub>2</sub> over the last 1000 years from air in Antarctic ice and fern. *J. Geophys. Res.* 101:4115-4128.
- FAO. 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Roma, Italia.
- Figueroa S. B. et al. 1991. Manual de pérdidas de suelo por erosión. CREZAS. C.P. SARH Fisher, G., and G.K. Heilig. 1997. Population momentum and the demand on land and water resources. *Phil. Trans. Royal Soc. (London) Ser. B.* 352:869-889.
- Gómez Díaz J. D., A. I. Monterroso, J. Villegas Flores, 2012, Informe del Proyecto: Actualización de la delimitación de las Zonas Áridas, Semiáridas y subhúmedas secas de México a escala regional. CONACYT-SEMARNAT-UACH.
- Gómez J. D., A. I. Monterroso, J. A. Tinoco, 2008. Actualización de mapa de escenarios climatológicos en la República Mexicana ante el Cambio Climático y Zonificación Agroecológica de 16 especies forestales de interés para la CONAFOR. Reporte de Proyecto de Investigación de fondo sectorial. CONACYT-CONAFOR-Universidad Autónoma Chapingo.
- INEGI, 1995, Mosaico aéreo digital (ortofotos) de México, escala 1:250,000.
- INEGI, 2008, Mapa de Uso de Suelo y Vegetación Serie IV, escala 1:250,000, versión 2007 INEGI, 2015, Mapa edafológico Serie II, versión 2012.
- Gómez, J.D., Monterroso, A.I., Tinoco, J.A., Toledo, M.L., Conde, C. y Gay, C. 2009. Informe del Sector Forestal ante la Cuarta Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático; SEMARNAT-INE, UNAM, UACH, 93 pp.
- INEGI, 2013, Mapa de Uso de Suelo y Vegetación Serie V, escala 1:250,000, versión 2010.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. *Climate Change. The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC 2006.* Cambridge University Press 1<sup>st</sup> edition. 1056 pp.
- Koepf. 1953. Die Temperatur/Zeit-Abhängigkeit der Bodenatmung. *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde* 61: 29-48.
- Oldeman, L. R. (ed.) 1988. Guidelines for General Assessment of the Status of Human – Induced Soil

- Degradation. ISRIC Working Paper and Preprint 88/4.
- Ortiz, S., G. Anaya, W. Berg. 1994. Evaluación, Cartografía y políticas preventivas de la degradación de la tierra. Primera Edición. Comisión Nacional de las Zonas Áridas. Colegio de Postgraduados. Universidad Autónoma Chapingo. México.
- Ortíz-Solorio, C.A. 1987. Elementos de agrometeorología cuantitativa. Con aplicaciones en la República Mexicana. Tercera edición. Departamento de Suelo. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Renard KG, Foster GA, Weesies DK, McCool DK, Yoder DC (1997), Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation, Agriculture Handbook No. 703 (US Department of Agriculture, Washington, DC).
- Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca - FAO, 2007, México: El sector Agropecuario ante el desafío del Cambio Climático, México.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales – Colegio de Postgraduados, 2002. Evaluación de la Degradación de Suelos Causada por el Hombre en la República Mexicana, escala 1:250 000.
- Skidmore, E.L. y Williams, J.R. 1991. Modified EPIC wind erosion modal. pp. 457-469. In Modelling Plant and Soil Systems. Agronomy Monograph No. 31. Ameritan Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.
- Sys, C., Van Ranst, E. and Debaveye, J. 1991. Land evaluation. Part 1 : Principles in land evaluation and crop production calculations. Agricultural Publications no. 7. University of Gent, Belgium.
- Van Lynden, G. W. J. and L. R. Oldeman, 1997. The Assessment of the Human – Induced Soil Degradation in South and Southeast Asia. International Soil Reference and Information Centre. Wageningen, The Netherlands.
- Wischmeier W.H., Smith DD (1978), Predicted rainfall erosion losses: A guide to conservation planning, Agriculture Handbook No. 537 (US Department of Agriculture, Washington, DC)
- Wischmeier, W.H. 1959. A rainfall erosion index for a universal soil loss equation. Soil Sci. Wischmeier, W.H. 1976. Use and misarse of the Universal Soll Loss Equation. J. of Soil and Water Cons. 31(1): 5-9
- WMO, 2007; Base de Datos Climatológica CLICOM, World Meteorological Organization; México.
- Woodruff, N.P., and F.H.Siddoway (1965). A wind erosion equation. Soil Science Society American Process. 29: 602-608.

## ANEXO I EROSIÓN HÍDRICA CON CAMBIO CLIMÁTICO

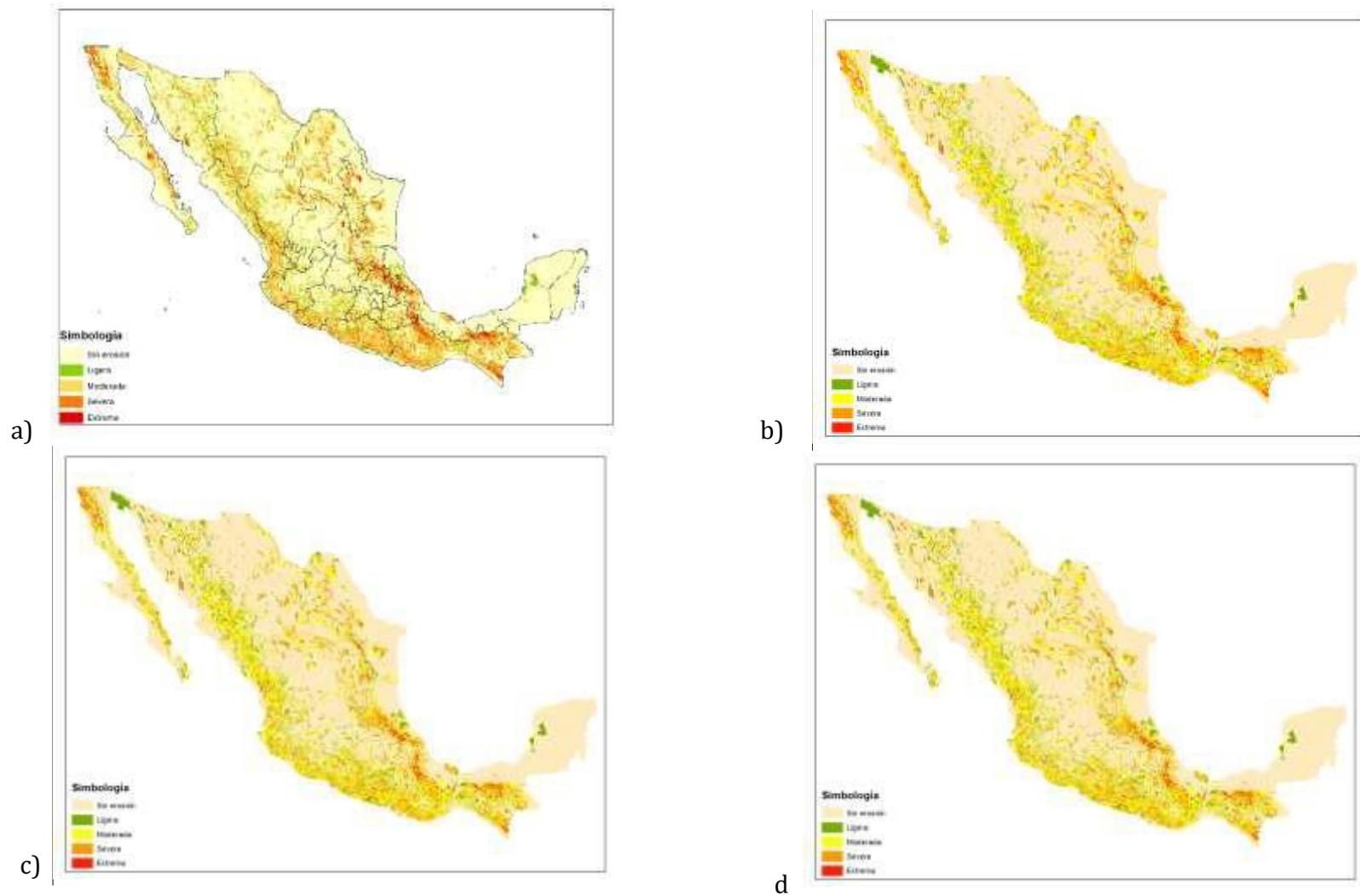


Figura 30 Distribución de los diferentes grados de afectación por erosión hídrica en la República Mexicana para el RCP 4.5 y los escenarios base (a), de corto plazo (b), mediano plazo (c) y largo plazo (d) estimados con el modelo MPI

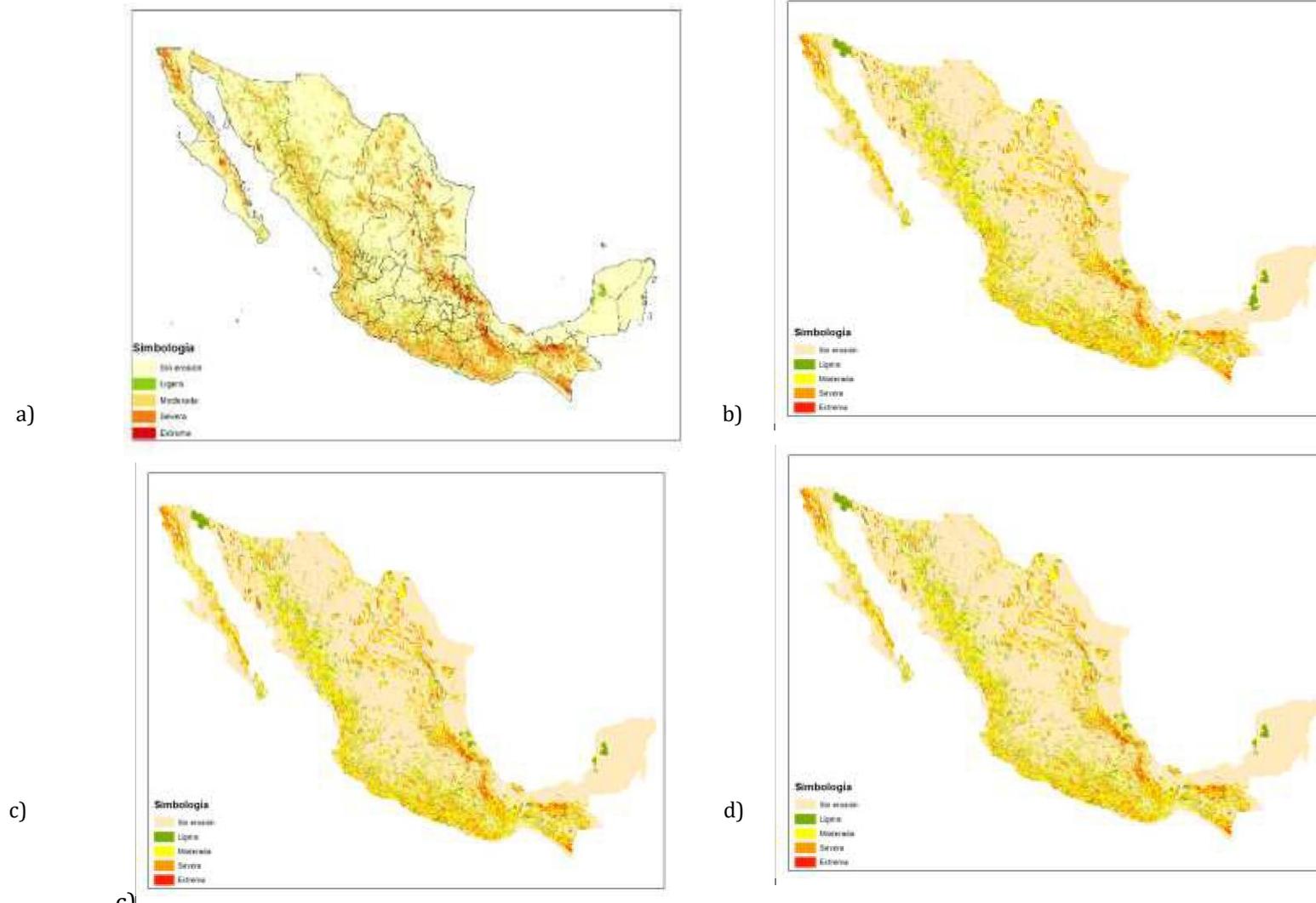


Figura 31 Distribución de los diferentes grados de afectación por erosión hídrica en la República Mexicana para el RCP 4.5 y los escenarios base (a), de corto plazo (b), mediano plazo (c) y largo plazo (d) estimados con el modelo CNRM

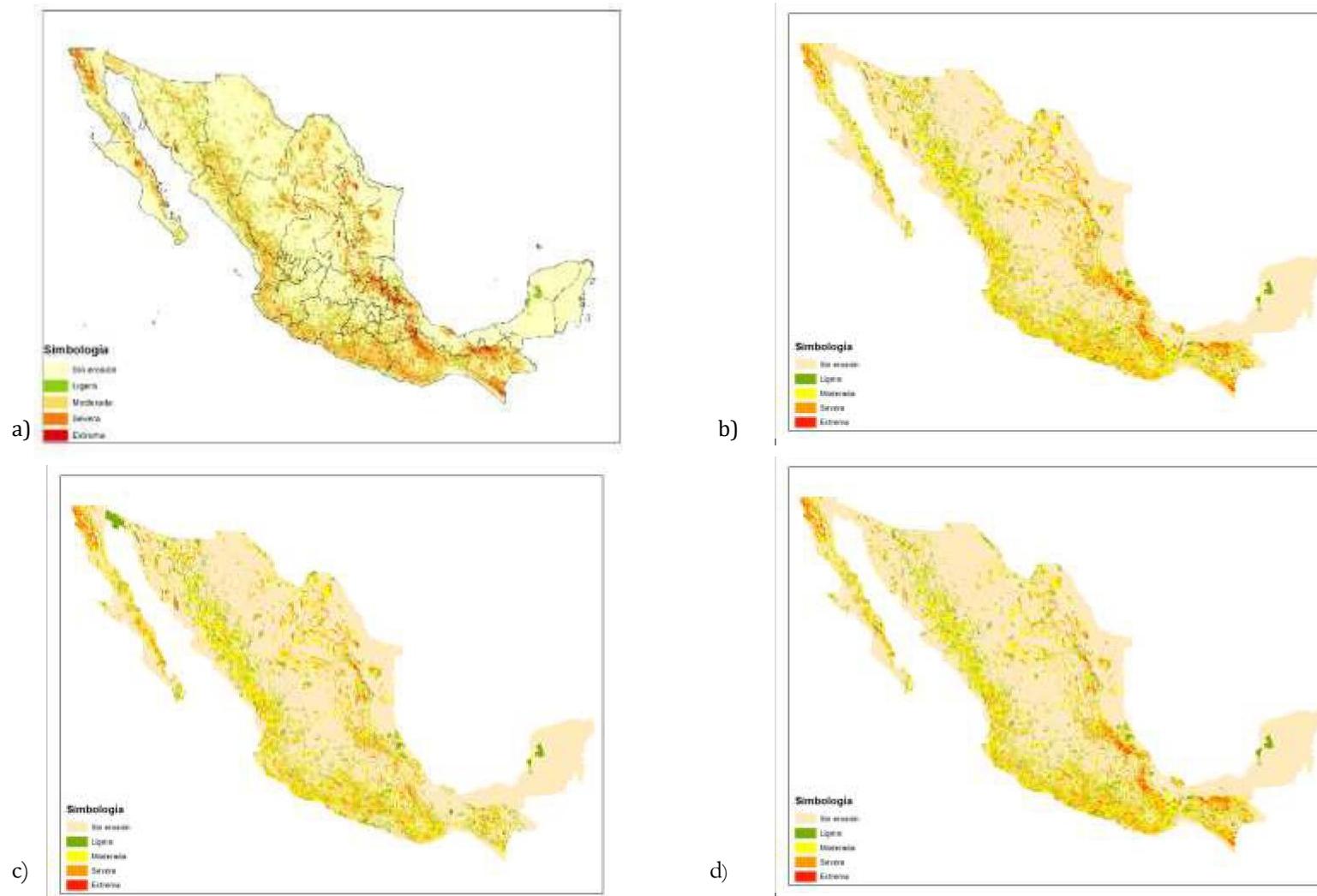


Figura 32 Distribución de los diferentes grados de afectación por erosión hídrica en la República Mexicana para el RCP 8.5 y los escenarios base (a), de corto plazo (b), mediano plazo (c) y largo plazo (d) estimados con el modelo MPI

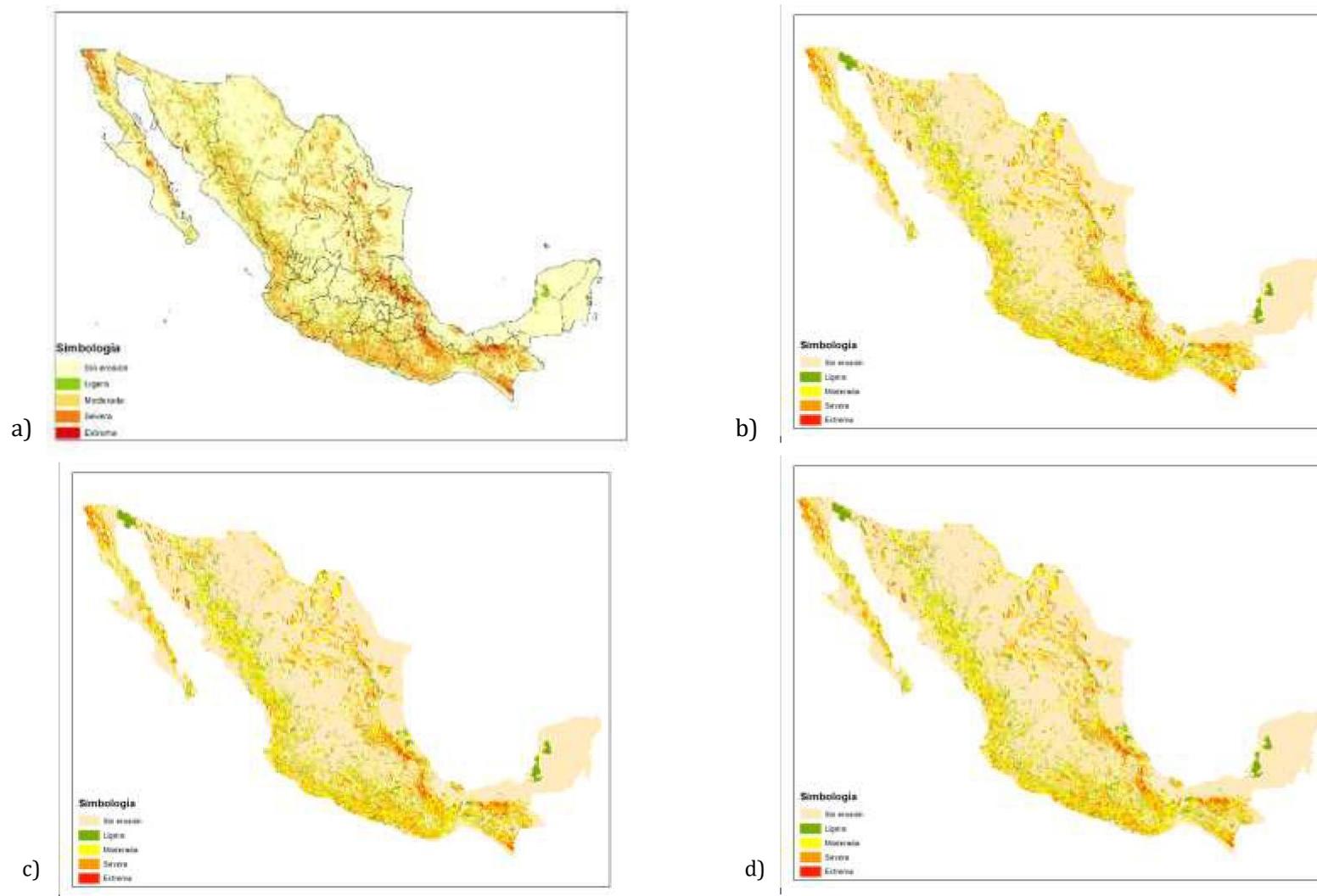


Figura 33 Distribución de los diferentes grados de afectación por erosión hídrica en la República Mexicana para el RCP 8.5 y los escenarios base (a), de corto plazo (b), mediano plazo (c) y largo plazo (d) estimados con el modelo CNRM

## ANEXO II ÍNDICE DE ARIDEZ CON CAMBIO CLIMÁTICO

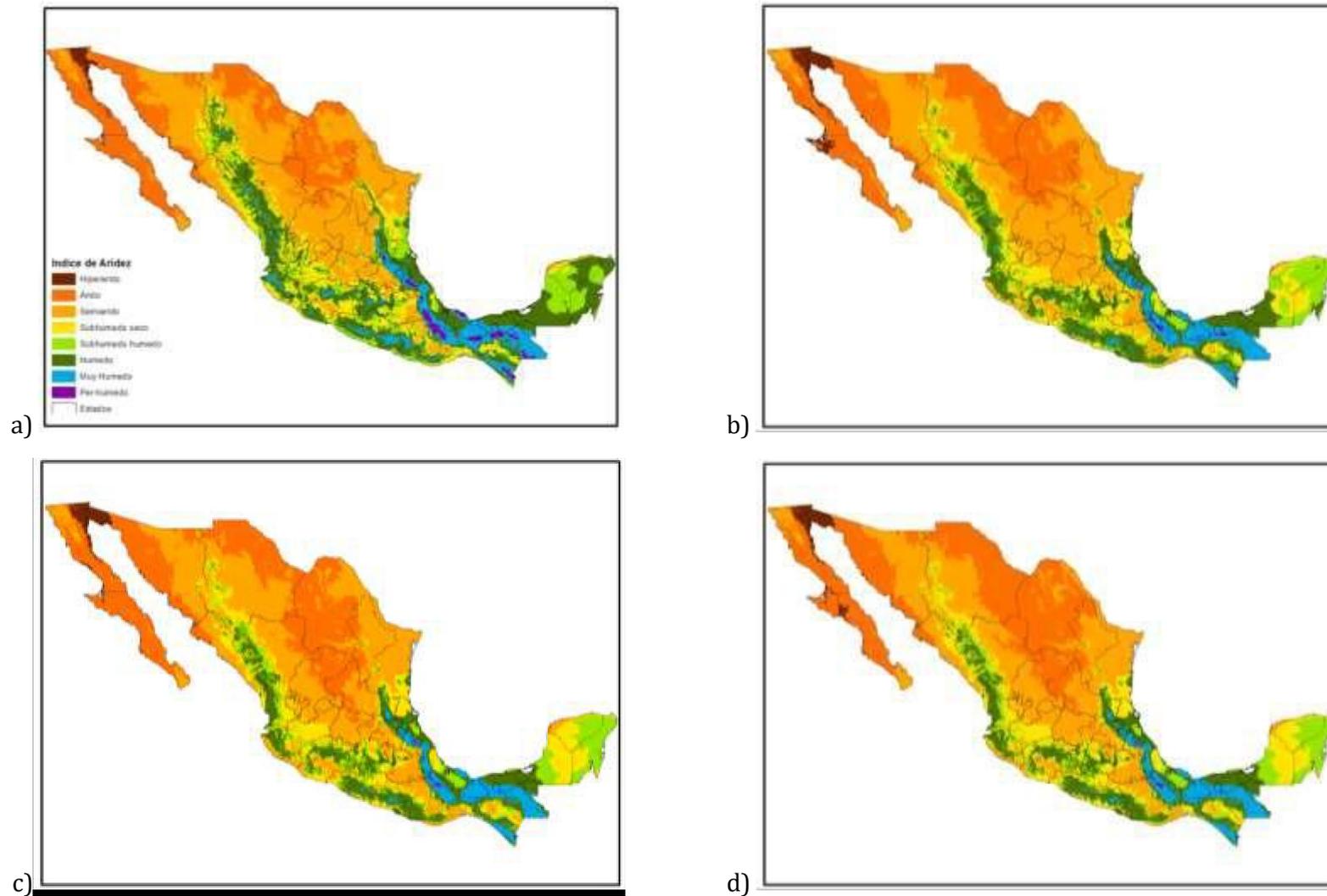


Figura 34 Cambios en la superficie y distribución de cada tipo climático para el RCP 4.5 y los escenarios de corto (b), mediano (c) y largo plazo (d) con respecto al escenario base

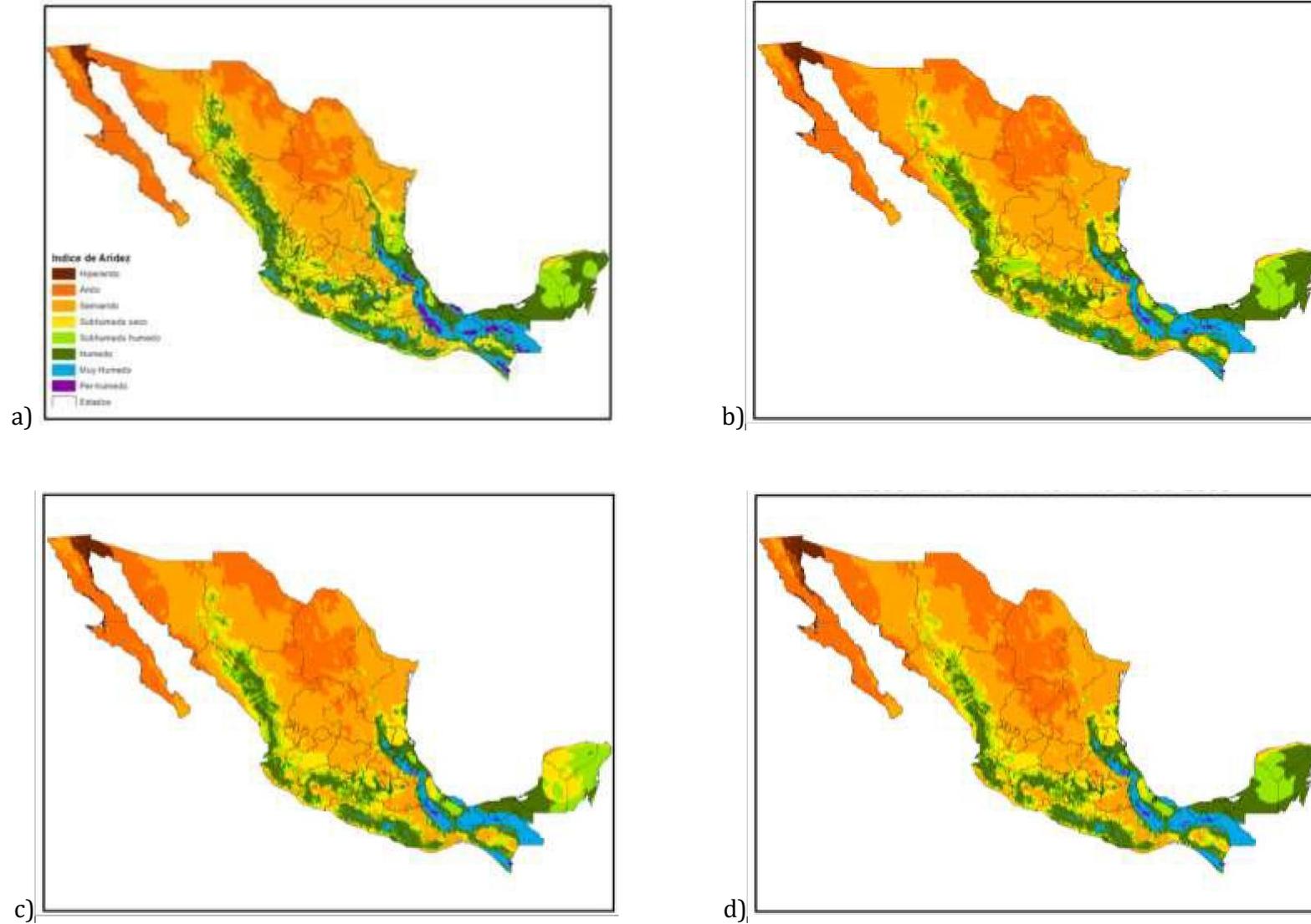


Figura 35 Cambios en la superficie y distribución de cada tipo climático para el RCP 4.5 y los escenarios de corto (b), mediano (c) y largo plazo (d) con respecto al escenario base

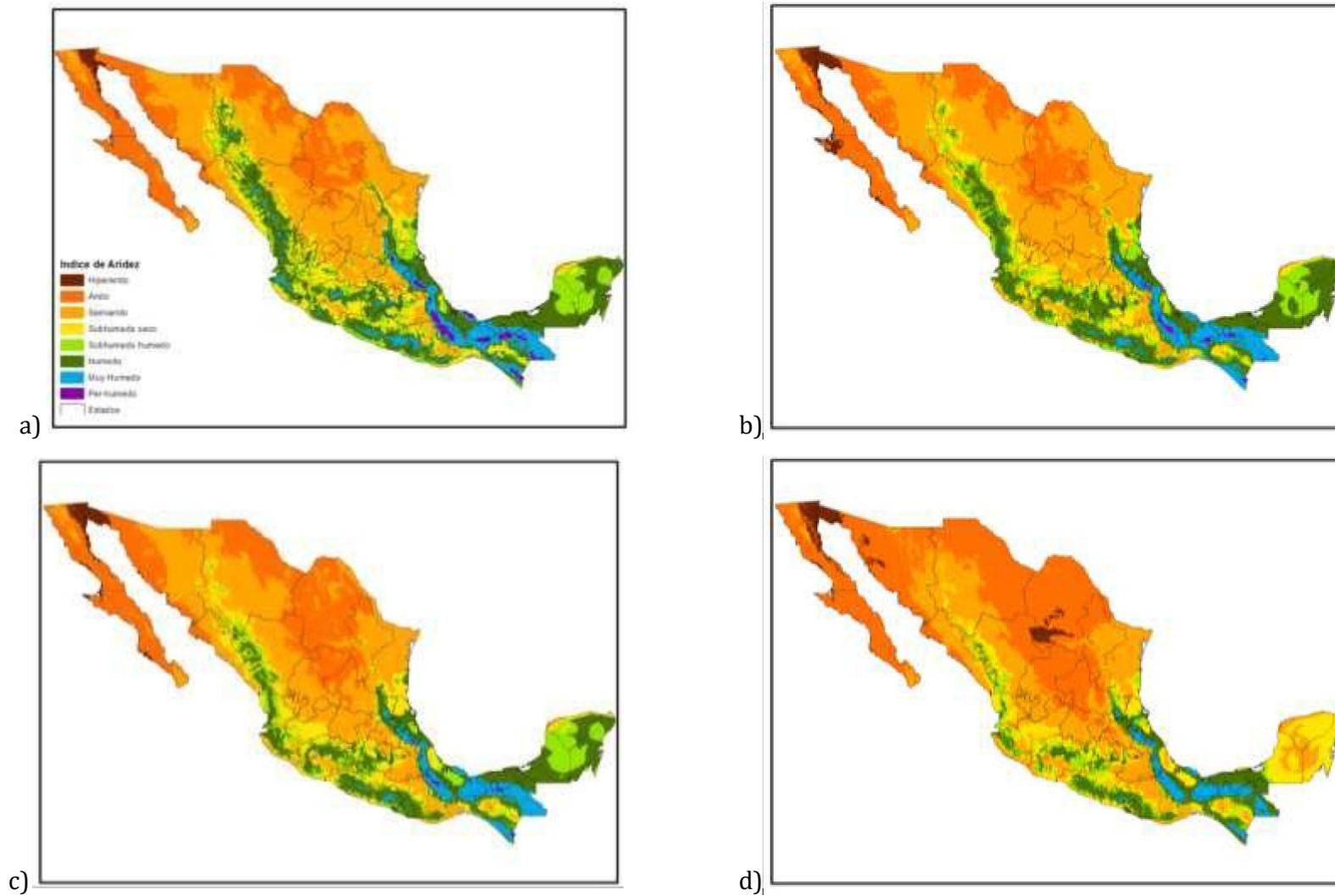


Figura 36 Cambios en la superficie y distribución de cada tipo climático para el RCP 8.5 y los escenarios de corto (b), mediano (c) y largo plazo (d) con respecto al escenario base

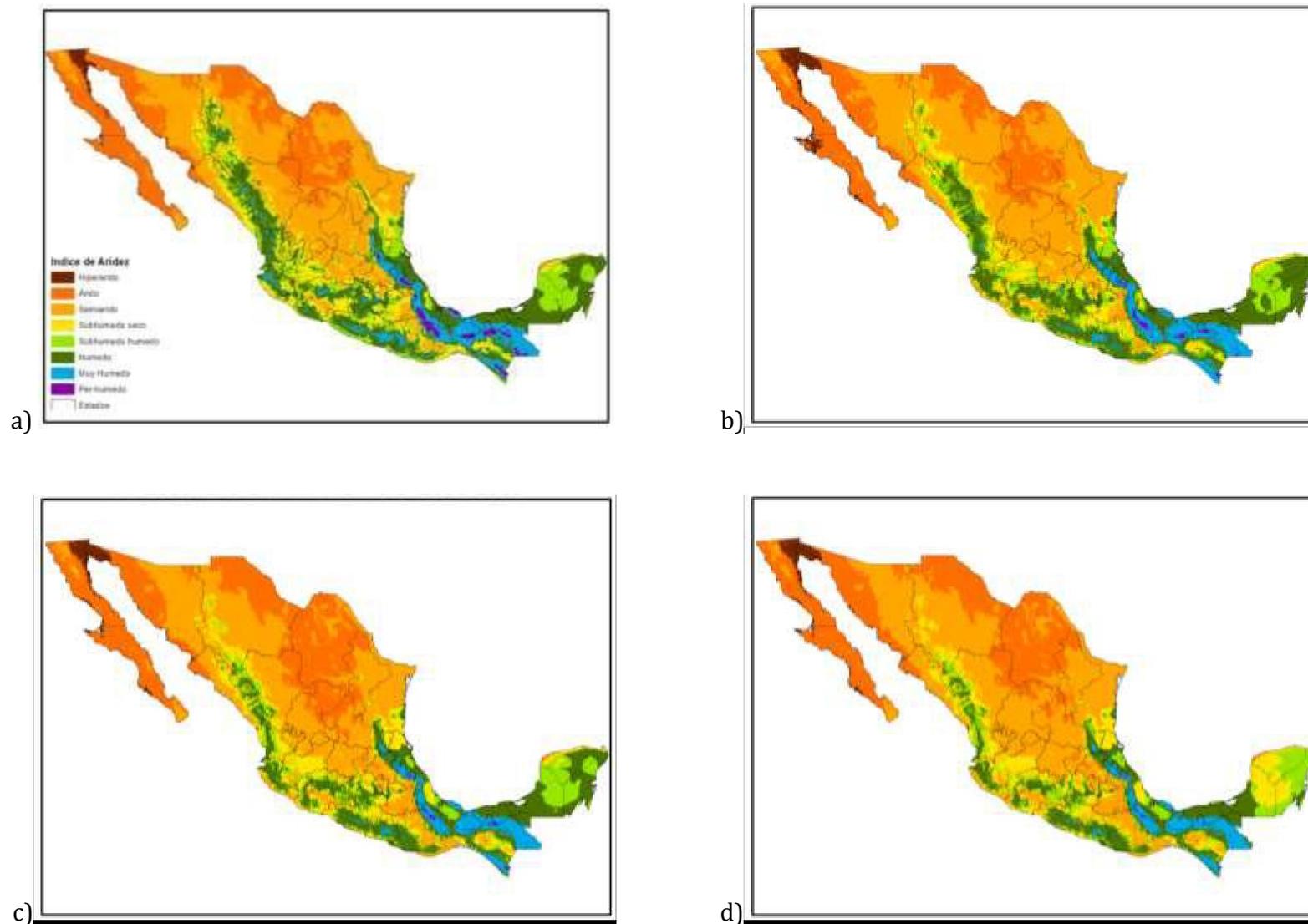


Figura 37 Cambios en la superficie y distribución de cada tipo climático para el RCP 8.5 y los escenarios de corto (b), mediano (c) y largo plazo (d) con respecto al escenario base



Plataforma de colaboración sobre  
**CAMBIO CLIMÁTICO  
Y CRECIMIENTO VERDE**  
entre Canadá y México

Este documento fue desarrollado en el marco de la Plataforma de  
Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y  
México, todos los derechos reservados

Derechos reservados © 2018

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)

Montes Urales 440, Lomas de Chapultepec, Delegación Miguel Hidalgo, CDMX C.P. 11000

[www.mx.undp.org](http://www.mx.undp.org)

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC)

Blvd. Adolfo Ruiz Cortines No. 4209, Colonia Jardines en la Montaña, Delegación Tlalpan, CDMX CP. 14210

[www.gob.mx/inecc](http://www.gob.mx/inecc)



Environment  
Canada

Environnement  
Canada

**SEMARNAT**  
SECRETARÍA DE  
MEDIO AMBIENTE  
Y RECURSOS NATURALES



**INECC**  
INSTITUTO NACIONAL  
DE ECOLOGÍA  
Y CAMBIO CLIMÁTICO



Al servicio  
de las personas  
y las naciones