



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 del potencial productivo de los suelos de México considerando escenarios de cambio climático

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 del potencial productivo de los suelos de México considerando escenarios de cambio climático*. Proyecto 86487 “Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México”. 129 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 por el apoyo prestado para el buen desarrollo de la Plataforma.

CONTENIDO

Índice de cuadros	5
Índice de figuras	6
1. Introducción	7
2. Marco Teórico.....	8
2.1. Efectos del clima en el suelo	8
2.1.1 Relación entre la temperatura del aire y la temperatura del suelo.....	9
2.2. Impactos del Cambio Climático en el Suelo	10
2.2.1. Impacto en la temperatura del suelo.....	10
2.2.2. Impacto en la humedad del suelo.....	11
2.2.3. Impacto en la estructura del suelo.....	12
2.2.4. Impacto en el pH del suelo.....	13
2.2.5. Impacto en la actividad microbiana del suelo y la respiración del suelo	14
2.2.6. Impacto en los el estado de los nutrientes del suelo.....	15
2.2.7. Impacto en la degradación del suelo y la desertificación.....	16
2.3. Mitigación y adaptación	26
2.3.1. Secuestro de carbono en el suelo para mitigar el cambio climático.....	26
2.3.2. Mitigación y adaptación en México	27
3. Metodología para evaluar los impactos del cambio climático en los suelos de México	29
3.1. Caracterización de los suelos de México.....	29
3.1.1. Suelos.....	29
3.1.2. Distritos de riego 31	
3.1.3. Uso de suelo y vegetación.....	31
3.1.4. Pendiente del terreno.....	31
3.2. Determinación del régimen y balance de humedad del suelo 31	
3.3. Determinación del Balance térmico del suelo.....	32
3.4. Evapotranspiración potencial.....	33
3.5 Productividad Primaria Neta.....	36
3.6. Evaluación del potencial productivo.....	37
3.7. Escenarios de cambio climático contemplados	37
4. Compilación de la información sobre los variables que definen el potencial productivo de los suelos	38
4.1 Características y propiedades de los suelos	38
4.1.1. Profundidad del suelo	38
4.1.2. Textura de los suelos.....	38
4.1.3. Carbono Orgánico del Suelo	39
4.1.4. PH del suelo.....	42
4.1.5 Suelos Salino-Sódicos en México.....	43

4.2	Condiciones hídricas de los distritos de riego en México	45
4.2.1	Condiciones de las fuentes de aguas superficiales en los distritos de riego	45
4.2.2	Condiciones de los Acuíferos en los distritos de riego	46
4.3	Usos de suelo y vegetación en México.....	47
4.3.1	Usos del suelo en México	47
4.3.2	Vegetación en México.....	48
4.4	Pendientes del terreno en México.	50
5.	Variables dinámicas del suelo.....	52
5.1	Régimen de humedad y balance de humedad de los suelos en México	52
5.1.1	Régimen de humedad actual	52
5.1.2	Régimen de humedad bajo escenarios de cambio climático.....	53
5.2	Régimen de temperaturas del Suelo	71
5.2.1	Régimen de temperatura actual.....	71
5.2.2	Régimen de temperatura del suelo bajo escenarios de cambio climático	72
5.3.	Evapotranspiración actual y con cambio climático.	85
5.3.1.	Actual	85
5.3.2.	Bajo escenarios de Cambio Climático	86
5.4.	Productividad Primaria Neta	103
5.4.1.	Productividad Primaria Neta Actual.....	103
5.4.2	Productividad Primaria Neta bajo escenarios de cambio climático.....	104
6.	Literatura citada.....	121

Índice de cuadros

Cuadro 1 Resumen de la respuesta del suelo al clima a diferentes escalas de tiempo	8
Cuadro 2 Superficie y porcentaje de la misma por nivel de Desertificación integrada para las condiciones climáticas actuales y bajo escenarios de cambio climático estimados para el 2050 y escenario socioeconómico A2 con los modelos GFDL y el modelo HADGEM en México.	17
Cuadro 3 Estudios de modelación de erosión y cambio climático a nivel internacional de 1990 a la fecha.	19
Cuadro 4 Estudios de modelación de erosión y cambio climático en México.	20
Cuadro 5 Estimación del contenido de carbono en diferentes escenarios de cambio climático que se tendrán en México utilizando el método del IPCC, 2007.	24
Cuadro 6 Estimación del contenido de carbono en diferentes escenarios de cambio climático que se tendrán en México utilizando los métodos HADGEM y GFDL con un RCP 4.5 Watts/m ² .	24
Cuadro 7 Estimación del contenido de carbono en diferentes escenarios de cambio climático que se tendrán en México utilizando los métodos HADGEM y GFDL con un RCP 8.5 Watts/m ² .	25
Cuadro 8 Clasificación de los suelos por su nivel de salinidad	30
Cuadro 9 Clasificación de los suelos por su nivel de sodicidad	30
Cuadro 10 Compensación a la temperatura del aire para obtener la temperatura del suelo en climas con tipo de lluvia de invierno (Elaborada por Gómez, 2016)	32
Cuadro 11 Compensación a la temperatura del aire para obtener la temperatura del suelo en climas con tipo de lluvia intermedio o de verano (Elaborada por Gómez, 2016)	33
Cuadro 12 Escenarios de cambio climático utilizados en el estudio para los escenarios de tiempo indicados y para RCP indicados en Watts m ⁻²	37
Cuadro 13 Superficie y porcentaje de las clases de profundidad de suelos en México	39
Cuadro 14 Clases texturales predominantes de los suelos en México	40
Cuadro 15 Porcentaje de carbono orgánico en los suelos de México	41
Cuadro 16 Clases de pH que hay en México	42
Cuadro 17 Suelos con problemas salinos, sódicos y salino-sódicos.	43
Cuadro 18 Superficie en Ha. de los distritos de riego por condiciones del agua superficial y los acuíferos en México	45
Cuadro 19 Agua superficial concesionada para el año 2015 a los distritos de riego por condición de las aguas superficiales en México (Millones de m ³)	45
Cuadro 20 Agua subterránea concesionada para el año 2015 a los distritos de riego por condición del acuífero en México (Millones de m ³)	46
Cuadro 21 Superficie de los usos de suelo relacionados con actividades primarias	48
Cuadro 22 Superficie de los usos de suelo donde no hay una presencia importante de vegetación	48
Cuadro 23 Superficie de los tipos de vegetación por vegetación primaria y secundaria	49
Cuadro 24 Clases de pendiente en México clasificado por el método del Soil Survey Manual Staff (1993)	50
Cuadro 25 Régimen de humedad del suelo actual en México	52
Cuadro 26 Régimen de humedad del suelo bajo escenarios de cambio climático RCP 4.5 2016-2039 en México	54
Cuadro 27 Régimen de humedad del suelo bajo escenarios de cambio climático RCP 4.5 2039-2069 en México	57
Cuadro 28 Régimen de humedad del suelo bajo escenarios de cambio climático RCP 4.5 2069-2099 en México	59

Índice de figuras

Figura 1 Relación básica entre la estructura del suelo y rendimiento del cultivo bajo escenarios de cambio climático. Fuente: (Chan, 2011).	13
Figura 2 Diferentes grados de degradación de tierras en México: a Degradación de suelos actual, b Desertificación de suelos actual, c Desertificación de suelos bajo el escenario GDFL A2 al 2050.....	18
Figura 3 Procesos que afectan la dinámica de carbono orgánico del suelo. DOC: carbono orgánico disuelto. (Lal, (2004).....	23
Figura 4 Triángulo de textura del suelo.....	30
Figura 5 Mapa de la profundidad del suelo en rangos (cm).....	39
Figura 6 Mapa de distribución de las clases texturales de los suelos de México.....	40
Figura 7 Distribución del Carbono orgánico del suelo en México.....	41
Figura 8 Mapa de pH del suelo en México.....	42
Figura 9 Suelos salinos (a), sódicos (b) y salino-sódicos (c).....	44
Figura 10 Distritos de riego en México por condición de agua superficial.....	46
Figura 11 Distritos de riego en México por condición de acuíferos.....	47
Figura 12 Mapa de uso de suelo para actividades primarias en México.....	49
Figura 13 Mapa de distribución de la vegetación en México.....	50
Figura 14 Distribución de las clases de pendiente de los suelos en México clasificado según el criterio del Soil Survey Division Staff (1993)	51
Figura 15 Distribución de los Regímenes de humedad actual de los suelos de México.....	53
Figura 16 Regímenes de humedad bajo el escenario RCP 4.5 periodo 2016-2039 para la condición actual y los modelos de cambio climático considerados en el estudio (a) Actual, b) Simbología, c) CNRM, d) GFDL, e) HADGEM y f) MPI).....	55
Figura 17 Regímenes de humedad bajo el escenario RCP 4.5 periodo 2039-2069 para la condición actual y los modelos de cambio climático considerados en el estudio (a) Actual, b) Simbología, c) CNRM, d) GFDL, e) HADGEM y f) MPI).....	58

1. Introducción

Los cambios en las propiedades del suelo, a consecuencia del cambio climático tendrán profundas implicaciones para los ecosistemas y para el potencial productivo de los mismos por la importancia de este recurso y su relación con los otros componentes del medio biofísico. El suelo es considerado como un recurso no renovable que al ser alterado de manera negativa, muchos de sus procesos pueden sufrir afectaciones severas, teniendo repercusiones económicas considerables como consecuencia de la disminución o pérdida de su potencial productivo, por esta razón, los suelos y los procesos que en ellos ocurren, se han convertido cada vez más en un tema de interés a nivel mundial debido a los impactos que sobre estos tendrán el cambio climático (Hatfield, 1990).

Por este motivo el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, en conjunto con el ministerio de Ambiente y Cambio Climático de Canadá, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, establecieron la necesidad de realizar un estudio asociado a este tema a través del proyecto titulado "*Servicios de consultoría para la evaluación del potencial productivo de los suelos de México que considere cambio climático: (Proyecto: 00086487 Plataforma de colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México 2013-2016)*". El presente documento es parte del tercer y último informe parcial de dicho proyecto en donde se da cumplimiento de los siguientes objetivos:

1. Compilar y elaborar una base de datos de las variables y propiedades del suelo que definan el potencial productivo de los suelos de México.
2. Generar algunas variables importantes que determinan la capacidad productiva de los suelos bajo diferentes usos y manejos a partir de información reportada por fuentes oficiales
3. Estimar los impactos del cambio climático en algunas propiedades del suelo asociadas principalmente a balances de humedad y regímenes de temperatura para México
4. Estimar el potencial productivo de los suelos bajo condiciones actuales y con cambio climático para México.

2. Marco Teórico

2.1. Efectos del clima en el suelo

El clima tiene un impacto profundo en el desarrollo de los suelos; los procesos del suelo son influenciados directamente por la temperatura, precipitación y cambios atmosféricos de CO₂, particularmente afectando el régimen de humedad del suelo y el crecimiento de las plantas, e indirectamente por cambios inducidos en el clima y el manejo y uso de las tierras. Los suelos podrían verse afectados en varias de sus propiedades como consecuencia del cambio climático a través de modificaciones en algunas de sus propiedades y la alteración de más de un proceso en el suelo (Rounsevell *et al.*, 1999). Un resumen de esta influencia se presenta en el Cuadro 1.

Cuadro 1 Resumen de la respuesta del suelo al clima a diferentes escalas de tiempo

	Escala de tiempo de respuesta	Procesos del suelo	Influencia climática *	Reversible	Otras influencias *
Contenido de agua en el suelo	Diario	Infiltración, percolación, drenaje, escorrentía	P,T,ET,CO 2	Si	MOS, estructura
Manejo del suelo	Semanal	Infiltración, drenaje, escorrentía, agregación,	P,T,ET,CO 2	Si	Contenido de agua, MOS, estructura
Temperatura del suelo	Diario	Conductividad térmica	P,T,ET,CO 2	Si	Contenido de agua, MOS
Estructura del suelo	Mensual	Congelación-descongelación , expansión-contracción, agregación	P,T,ET,CO 2	Si	Distribución del tamaño de las partícula, contenido de agua, MOS
Degradación	Anual	Salinización, alcalinización, erosión, acidificación	P,T,ET,CO 2	Si Si No	Distribución, contenido de agua, MOS

	Escala de tiempo de respuesta	Procesos del suelo	Influencia climática *	Reversible	Otras influencias *
Contenido de carbono orgánico	Anual/siglos	Respiración, biomasa	P,T,ET,CO 2	Si	Contenido de agua
Contenido de Nitrógeno	Mensual/anual	Mineralización, nitrificación, denitrificación, lixiviación, volatilización	P,T,ET,CO 2	Si	Contenido de agua, MOS
Composición ecológica	Anual	Organismos del suelo	P, T	Si	Poblaciones de organismos del suelo Contenido de agua, MOS
Estado de nutrientes (macro y micro)	Semanal	Mineralización, extracción	P,T,ET,CO 2	Si	Contenido de agua, Contenido de nutrientes MOS
Distribución del tamaño de las partículas	Decada/siglo	Traslocación de arcilla	P,T	No	Contenido de agua
Minerología (arcillas, Fe y Al)	Siglo/milenio	Pedogenesis,	P,T	No	Contenido de agua

* P: precipitación; T: Temperatura; ET: evapotranspiración; MOS materia orgánica del suelo
Fuente: Rounsevell *et al.* (1999).

2.1.1 Relación entre la temperatura del aire y la temperatura del suelo

La temperatura del aire es un buen indicador y consistente para predecir la temperatura del suelo (USDA, 1964). En climas húmedos y donde la temperatura media anual del aire es mayor o igual a 8.33°C y la precipitación está generalmente bien distribuida a lo largo del año, tiene poca pendiente o nula la diferencia de temperatura es de del suelo llega a ser mayor a la del aire en 1.11°C (USDA, 1964). Para los climas fríos en donde la temperatura media anual es de -3.8°C a 0°C, el rango de temperaturas del suelo puede ir de -0.3°C a 4.5°C. En los climas oceánico húmedos fríos los suelos tienen una temperatura mayor en 1.98°C de la temperatura del aire. En climas secos el suelo cambia en rangos de 9°C hasta 12.96°C más cálido que la temperatura del aire, cuando hay riego la temperatura es menor, en un rango de 5.4°C a 2.4°C. (USDA, 1964)

La cobertura del suelo ayuda a que los cambios en la temperatura del suelo no sean extremos. Asimismo, la orientación de la pendiente tiene efecto en la temperatura del suelo, la diferencia entre una pendiente al sur de 20° a 30° y una misma pendiente viendo al norte es 11.52°C mayor en el sur para latitudes medias en donde se tiene la incidencia de la radiación en la cara sur todo el año (USDA, 1964). La altitud es factor importante a considerar ya que, a diferencia del aire, cuya temperatura decrece con la altura a rangos definidos principalmente por las condiciones de humedad del aire, la temperatura del suelo disminuye a rangos menores (Carlson, 1961). El contenido de la materia orgánica del suelo no afecta en la temperatura del suelo. La textura si tiene implicaciones en la temperatura del suelo, Bouyoucos (1916) concluyó que las texturas gruesas son más calientes porque pueden retener menor cantidad de agua para que se evaporen y se enfríen, aunque el efecto es mínimo en la temperatura del suelo. (USDA, 1964)

La temperatura del suelo tiene fluctuaciones temporales, que cambia dependiendo de la latitud del mismo, en los trópicos las fluctuaciones suelen ser muy pequeñas, sin embargo, estas oscilaciones de la temperatura a lo largo del año aumentan conforme aumenta la altitud, asociado principalmente a las diferencias de la nubosidad a lo largo del año que limitan la penetración de la radiación solar y que llegue a la superficie de los suelos. Las temporadas más secas serán también las más cálidas. La diferencia en regiones como Hawaii o Puerto Rico entre la temperatura del verano y la de invierno es menor a 5°C (USDA, 1964), en cambio en los suelos extra tropicales la diferencia en temperatura es mayor a 5°C y con mayor diferencia en el invierno y menor en el verano respecto a la temperatura del aire.

2.2. Impactos del Cambio Climático en el Suelo

2.2.1. Impacto en la temperatura del suelo

La temperatura controla la velocidad de la mayoría de los procesos del suelo, pero sobre todo los biológicos. Los cambios de temperatura del suelo asociado al cambio climático es probable que tengan mayor impacto en las regiones de latitudes altas (Kane *et al.*, 1991), así mismo la altitud también influye en cómo se modificarán la temperatura y la humedad del suelo (Griffiths *et al.*, 2009), se estima que en regiones donde la temperatura media anual es de 5°C los datos sugieren que con un 1°C de aumento en la temperatura, el suelo puede perder el 10% del carbono orgánico del suelo mientras que en regiones con temperatura media de 30°C el mismo incremento en la temperatura el suelo puede perder sólo 3% del carbono orgánico (Krischbaum, 1995).

Jenkinson *et al.* (1991) encontró que la temperatura es el factor limitante para la actividad

microbiana, por lo que la respiración de los ecosistemas incluyendo la descomposición microbiana de la materia orgánica del suelo podría ser más intensa con el calentamiento global, lo que afectaría la producción primaria neta de los sistemas bióticos. Davidson y Janssens (2006) establecieron que la interpretación de gradientes climáticos naturales en experimentos de campo y laboratorio diseñados para la cuantificación de fracciones de carbono a la sensibilidad de diferentes grados de temperatura es altamente dependiente a técnicas de modelos y curvas, tales estudios tienen información valiosa sobre la dinámica de carbono en el suelo, pero no resuelven la respuesta de cuáles serán las existencias esperadas de carbono ante la magnitud de los disturbios climáticos.

2.2.2. Impacto en la humedad del suelo

Los cambios de temperatura asociados al cambio climático impactan directamente en los contenidos de agua en el suelo mediante su influencia en la evapotranspiración (Kirschbaum, 1996). Sin embargo, en cada caso, la dirección y la magnitud del efecto del déficit hídrico del suelo sobre la productividad depende en gran medida del lugar de estudio, la gestión de la tierra y el escenario de cambio climático utilizado (Rounsevell *et al.*, 1999). Porporato *et al.* (2004) utilizaron un modelo estocástico simple para predecir la intensidad y frecuencia de las lluvias bajo un escenario de cambio climático y las consecuencias que esto tendrá en los suelos, determinando pérdidas por evapotranspiración, índices de sequía, escorrentía e infiltración profunda; encontrando que la asimilación del carbono vegetal depende de manera crucial no sólo de la precipitación total durante la temporada de crecimiento, sino también de la ocurrencia y magnitud de los eventos de lluvia, afectando directamente la productividad del suelo.

2.2.3. Impacto en la estructura del suelo

Los cambios en el clima podrían modificar la estructura del suelo a través de su influencia sobre los procesos físicos, principalmente a través de los cambios en los contenidos de materia orgánica del suelo (Carter y Stewart, 1996).

La estructura del suelo determina la salud física del mismo y por lo tanto juega un papel fundamental en el control de la productividad de tierras agrícolas, así como en la prestación in situ y ex situ de servicios de los ecosistemas. Sin embargo, en sistemas agrícolas la estructura del suelo es sensible a disturbios asociados a malas prácticas de manejo (Follett, 1993). Chan (2011) reporta amenazas de deterioro estructural, tanto de carácter directo e indirecto, asociados al incremento en la mineralización de la materia orgánica, lo que aumentaría la cohesión de los suelos, particularmente los de texturas finas y con ello la consistencia en seco sería más dura, esto es particularmente graves para suelos con estas características ubicados en las regiones subtropicales y templadas. La degradación estructural del suelo resultante puede conducir a la reducción de la infiltración del agua en los eventos de lluvia, el aumento de la erosión del suelo y la reducción de la eficiencia del uso del agua, con repercusiones sobre la productividad y el medio ambiente.

Algunos de los cambios adversos en la estructura del suelo ya son evidentes y los consiguientes cambios adversos en la vegetación y la hidrología. El cambio climático puede afectar tres aspectos de la estructura del suelo (forma, estabilidad y resistencia) directa e indirectamente y como lo reporta Chan (2011) y se detalla en la Figura 1.

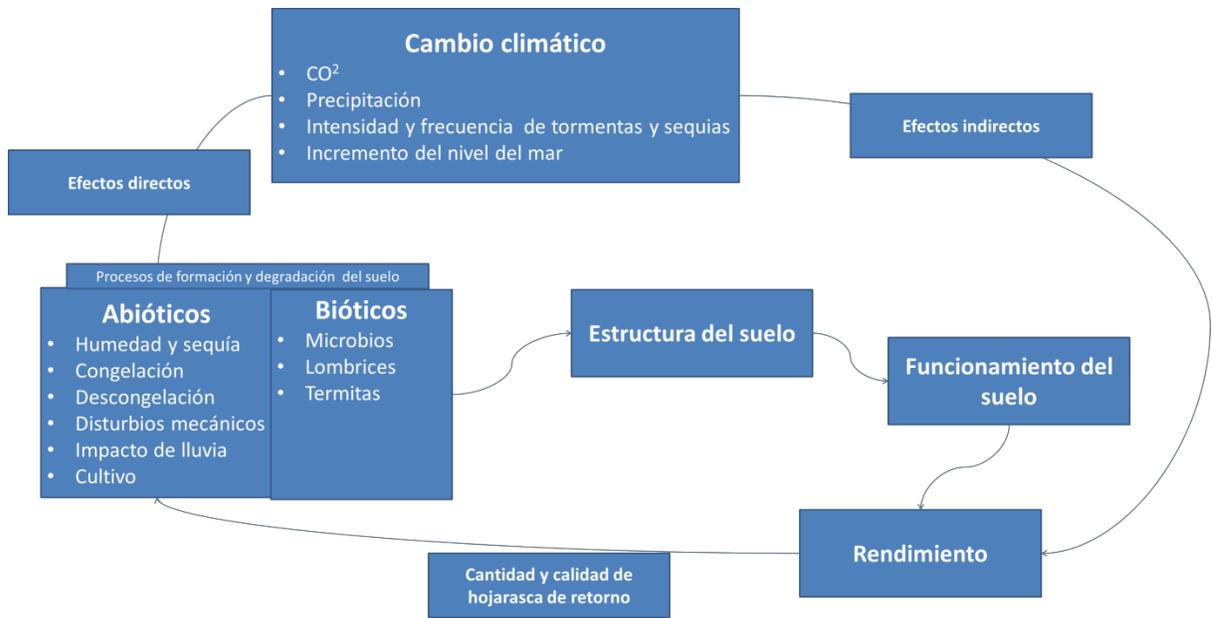


Figura 1 Relación básica entre la estructura del suelo y rendimiento del cultivo bajo escenarios de cambio climático. Fuente: (Chan, 2011).

Con el cambio climático previsto, se espera que los suelos al ser expuestos a condiciones extremas de sequías e inundaciones en un período de tiempo más prolongado, estarán más propensos al deterioro estructural debido a la dispersión de los agregados que se ve agravado por el impacto mecánico de las tormentas intensas que se pueden presentar con más frecuencia e intensidad. Así mismo como consecuencia del cambio climático se prevé que habrá un incremento en el cambio de uso del suelo de tierras forestales a agrícolas, dando lugar al deterioro de la estructura y un incremento de los efectos nocivos asociados a ello. Sin embargo, el impacto real de la estructura bajo el cambio climático predicho dependerá del tipo de suelo y su vulnerabilidad (Chan, 2011).

2.2.4. Impacto en el pH del suelo

Se estima que el cambio climático también tendrá influencia en el pH del suelo debido al aumento o disminución de la precipitación así como por el aumento de las temperaturas. En las áreas donde se dé el aumento de la precipitación se traducirá en una mayor lixiviación de cationes básicos que pueden incrementar la acidificación del suelo, lo que requerirá remediar la acidez intercambiable en los suelos de los sistemas agrícolas. Sin embargo las malas prácticas del encalado o la ausencia del mismo pueden causar una improductividad de los suelos. Una mayor acidificación del suelo también puede surgir debido a una mayor producción de biomasa causada por aumento de la temperatura y el aumento de la presión parcial de CO₂ en el aire (Rengel, 2011).

Los efectos que tendrá el cambio climático en el pH del suelo se traducirá en un desequilibrio del ciclo del Carbono y Nitrógeno debido al aumento o disminución de la biomasa provocado por el incremento de la temperatura y/o precipitación; afectando directamente la producción en los sistemas agrícolas y forestales (Tang y Rengel 2003). En áreas donde se incremente el déficit hídrico, asociado a la disminución de la precipitación y el incremento de la evapotranspiración asociado al aumento de la temperatura, se puede dar un mayor acumulación de sales en la superficie del suelo y con ello un incremento del pH.

2.2.5. Impacto en la actividad microbiana del suelo y la respiración del suelo

Las malas prácticas agrícolas y de riego generan pérdidas de agua y suelo, así como un deterioro en las condiciones físicas y químicas del suelo dentro de las que se incluyen la disminución de la materia orgánica y con ello se afecta negativamente la microbiología del suelo y con ello se reduce la fertilidad natural de los suelos, incrementado su vulnerabilidad. (Brauch y Oswald, 2009). Waldrop y Firestone (2005) realizaron un estudio en California sobre la respuesta de la actividad microbiana en el suelo al cambio climático, encontrando que la composición de la comunidad microbiana y la función son alteradas cuando los microbios están expuestos a cambios extremos en el ambiente, sin embargo estos autores reportan que los estudios que han abordado este tema no han presentado un patrón consistente; pues algunos estudios demuestran que la comunidad microbiana puede cambiar rápidamente en respuesta a cambios en el medio ambiente, pero también hay estudios que mencionan que puede cambiar lentamente o no cambiar. Briones *et al.* (1997) encontró en un estudio realizado en Inglaterra que la microfauna que habita en el suelo cambiará por especies más tolerantes como *A. eiseni*, habrá migraciones a otros micro hábitats o capas como es el caso de *Cognettia*, entrarán en dormancia o se enquistan esperando mejores condiciones para desarrollarse (*Tardigrades*) o se extinguirán (*Cernovitoella*, *Diptera*).

Esto se debe a que la respuesta de los microorganismos al cambio en las dinámicas de carbono resulta de los cambios en las comunidades vegetales. Así mismo la respiración del suelo depende en gran medida de las raíces y de los macro y micro organismos, un pequeño cambio en la respiración del suelo podría igualar o exceder la entrada de CO₂ a la atmósfera vía cambios de uso del suelo y/o la combustión de combustibles fósiles, esto podría exceder o mitigar el incremento atmosférico de CO₂ como consecuencia del cambio climático (Rustad *et al.*, 2000). Según diversos autores se considera que el calentamiento global aumentará la respiración del suelo, liberando más CO₂ a la atmósfera que va a exacerbar aún más el calentamiento global (Schleser 1982; Raich y Schlesinger 1992; Townsend *et al.* 1992; Schimel *et al.* 1994; McGuire *et al.* 1995). La respiración del suelo es un indicador importante para evaluar la salud del mismo. Las grandes emisiones anuales de CO₂ a través de la respiración del suelo, tienen una gran importancia en el ciclo global del Carbono y está regulada por múltiples factores abióticos y bióticos; por lo que una mejor comprensión de sus impactos es fundamental para la predicción de las respuestas de la respiración del suelo al cambio climático ya que las temperaturas elevadas, las precipitaciones extremas, sequías más severas y frecuentes, y el aumento de la deposición de N, influyen de forma variable en la respiración del suelo alterando el ciclo del carbono a través de efectos de retroalimentación (Singh *et al.*, 2011). Sin embargo, existen pocos estudios que traten sobre la respuesta de la respiración del suelo en escenarios de múltiples cambios en el clima mundial; por lo que hay una clara necesidad de desarrollar estudios considerando los enfoques de múltiples factores, junto con adecuadas técnicas de modelación para ayudar a mejorar proyecciones de cambio climático con respuestas complejas de la respiración (Rustad, 2008).

2.2.6. Impacto en los el estado de los nutrientes del suelo

En cuanto al impacto que se tendrá en el estado de nutrientes del suelo Bradbury y Powlson (1994) realizaron un enfoque de modelización para evaluar el impacto del cambio climático en la dinámica del nitrógeno en sistemas de cultivo, en donde encontraron que en el largo plazo las tasas de rotación son propensas a resultar en una disminución de nitrógeno orgánico del suelo, principalmente en los ecosistemas tropicales localizados en los límites con las áreas subtropicales (Ineson *et al.*, 1998). En un estudio experimental realizado por Van-Cleve *et al.* (1990) muestra que de tres tipos de suelos observados aumentando su temperatura durante 1 año a 3°C por arriba de su temperatura normal (Brown earth, Micropodzol, Peaty grey) todos tuvieron pérdidas considerables de nitrógeno aprovechable para las plantas después de 5 meses de duración del experimento que pueden ser resultado de una aceleración en los

procesos de descomposición y los cambios en la actividad de las raíces (Lawrence y Oechel, 1983). El resultado final es que en un principio hay un exceso de provisión de nutrientes de los requerimientos de crecimiento de las plantas y un posterior decremento del nitrógeno aprovechable para las plantas.

El impacto del cambio climático sobre los nutrientes del suelo distintos al nitrógeno, tales como fósforo, potasio, azufre y micro elementos, en gran medida se ha descuidado, esto puede ser debido a la liberación de nutrientes de fuentes distintas a la materia orgánica donde se cree poco probable que cambie significativamente en la escala de tiempo durante el cual se espera que el cambio climático se produzca (Legros *et al.*, 1994). Así mismo las tasas de meteorización dependen, entre otros factores, de la temperatura y la velocidad de percolación del agua, por lo tanto, se verán influidos por el cambio climático. Hay evidencia que sugiere que la mineralogía del Fierro va a cambiar en respuesta a la hidrología como consecuencia de la evolución del paisaje y el cambio climático (Macedo y Bryant, 1987). Por lo que, en climas húmedos, se puede presentar reducción del suelo resultante de anegamiento conduciendo a una mayor ferrólisis (Brinkman, 1990).

2.2.7. Impacto en la degradación del suelo y la desertificación

La degradación de los suelos es consecuencia de las actividades humanas que han alterado los ecosistemas naturales, cuya manifestación es el incremento en las pérdidas de suelo por erosión eólica e hídrica llevándose, al mismo tiempo, la capa más superficial del suelo, alterando su composición química (presencia de sodio y magnesio en el subsuelo) y favoreciendo las inundaciones (Villers y López, 2008).

Actualmente en México existen 177, 642, 000 de hectáreas con algún grado de degradación de tierras, mientras que con algún grado de desertificación hay 115, 894, 600 de hectáreas; bajo el escenario GFDL A2 al 2050 indica que habrá una disminución en las regiones desertificadas de un 5.1% mientras que para el modelo HADGEM habrá un aumento de 3.2% de la superficie nacional. (CONAFOR-UACH, 2013) Cuadro 2 y Figura 2.

Cuadro 2 Superficie y porcentaje de la misma por nivel de Desertificación integrada para las condiciones climáticas actuales y bajo escenarios de cambio climático estimados para el 2050 y escenario socioeconómico A2 con los modelos GFDL y el modelo HADGEM en México.

Tipo de Desertificación dominante	Clima actual (escenario base)		Escenario al 2050 Modelo GFDL-A2		Escenario al 2050 Modelo HADGEM-A2	
	Superficie (miles de ha)	Porcentaje	Superficie (miles de ha)	Porcentaje	Superficie (miles de ha)	Porcentaje
Sin Desertificación aparente	9,581.6	4.9	6,468.7	3.3	10,515.3	5.4
Desertificación ligera	25,922.7	13.2	23,628.0	12.1	27,529.7	14.1
Desertificación moderada	27,231.9	13.9	26,301.7	13.4	28,160.1	14.4
Desertificación severa	50,277.4	25.7	46,950.4	24.0	52,491.1	26.8
Desertificación extrema	12,462.6	6.4	12,217.5	6.2	12,993.6	6.6
Cuerpos de agua	850.2	0.4	834.0	0.4	877.9	0.4
Tierras húmedas	69,598.4	35.5	79,524.6	40.6	63,357.1	32.3
Total	195,924.8	100.0	195,924.8	100.0	195,924.8	100.0

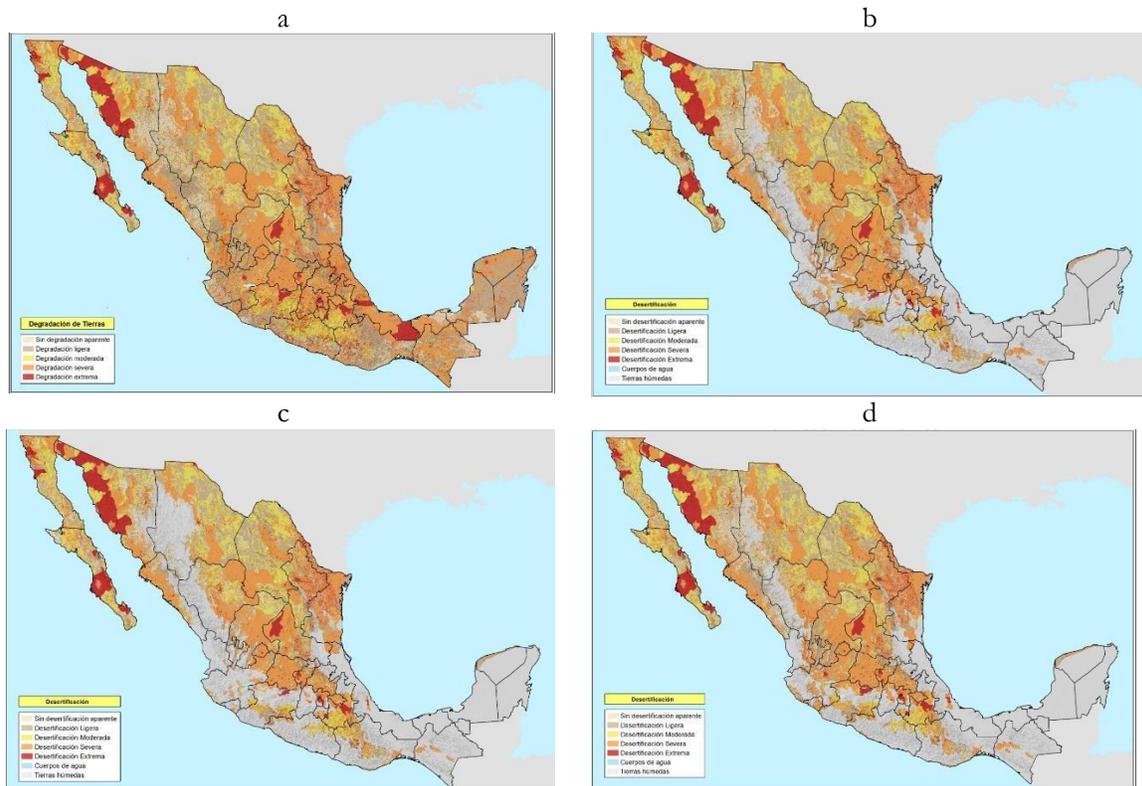


Figura 2 Diferentes grados de degradación de tierras en México: a Degradación de suelos actual, b Desertificación de suelos actual, c Desertificación de suelos bajo el escenario GDFL A2 al 2050.

2.2.7.1. Erosión eólica

Actualmente, CONAFOR-UACH (2013), reporta que el 34.94% del territorio nacional (68,242, 300 Ha.) presenta algún grado de erosión eólica ubicado principalmente en la planicie costera del Pacífico norte en los estados de Sonora y Sinaloa, así como en porciones de la Península de Baja California, en Mesa del Norte y en la planicie costera del Golfo Norte en los estados de Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas, y se espera que con el calentamiento global se incrementen las temperaturas desecando los suelos favoreciendo a un incremento en la erosión eólica (Brauch y Oswald, 2009).

2.2.7.2. Erosión hídrica

Con el calentamiento global se espera que conduzca a un ciclo hidrológico más vigoroso incluyendo mayor cantidad de precipitación total, así como una mayor intensidad en las precipitaciones pero concentradas en determinadas regiones y en otras como consecuencia de la circulación global de los vientos mayor frecuencia y severidad de sequías. Cuando las

precipitaciones aumentan, la escorrentía y la erosión podría incrementar a una tasa mayor: En algunos casos al disminuir la lluvia anual disminuirá también la producción de biomasa que podría conducir a una mayor susceptibilidad de los suelos a ser erodados (Nearing, *et al.*, 2004).

El cambio climático aumentará las tasas de erosión del suelo, sin embargo será muy regionalizado. La mayoría de los estudios sobre erosión del suelo y cambio climático están basados en cambios en las tasas de erosión anual media, con áreas que muestran una respuesta lineal para aumentos de precipitación anual (Favis-Mortlock *et al.*, 1991; Botterweg, 1994). En el Cuadro 2 se muestran algunos estudios sobre erosión del suelo realizados desde 1990 a nivel internacional.

Cuadro 3 Estudios de modelación de erosión y cambio climático a nivel internacional de 1990 a la fecha.

Lugar	Uso de la tierra	Escenario climático	Efecto sobre la erosión	Método	Referencia
USA (estudio nacional)	Ganado	Equilibrio cuatro GCM'S (2 x CO ₂)	Cambio en la media nacional de +2% a 16%	USLE y el inventario nacional de recursos de 1987	Phillips <i>et al.</i> (1993)
	Cultivo		Cambio en la media nacional de -2% a +10%		
	Pastizales		Cambio en la media nacional de -5 a +22%		
Sur de Inglaterra, UK	Cultivo (trigo)	Incremento de la temperatura de +1.5°C a +4.5 °C; cambios de precipitación de 10% a +15% (2 x CO ₂)	Pérdida de suelo medio anual entre 93% y 147% del estimado para el clima base	EPIC	Favis-Mortlock <i>et al.</i> (1991)
Sur de Inglaterra, UK	Cultivo (trigo)	Precipitation +15%	27% de incremento de la erosión hídrica media anual	EPIC	Favis-Mortlock (1994)
Sur de Inglaterra, UK	Cultivo (trigo)	Lo anterior (2 x CO ₂) pero con los siguientes estimadores de precipitación: Bajo Mejor estimador Alto	Tasa de erosión hídrica media (t/ha) cambios de porcentaje: -3.6% +12.3% +30.3%	EPIC	Favis-Mortlock y Boardman (1995)
Sur central de Noruega	Cultivo	Incremento de la temperatura de +2°C a +5°C, y incremento de la precipitación de +5% a 10%	ningún cambio en la pérdida media anual del suelo, cambio anual de +/- 40%	SOIL/CREAMS	Botterweg (1994)

En México el 33.12% del territorio nacional está afectado por algún grado de erosión hídrica, para su modelación con cambio climático sólo se contempló los cambios en precipitación más no los cambios en la cubierta vegetal (INECC-PNUD, 2016). En el cuadro 4 se muestran algunos estudios sobre erosión hídrica que se han realizado en México utilizando los modelos HADGEM, GDFL, MPI y CRNM, en donde se aprecia que ocurriría una disminución de la pérdida del suelo por erosión hídrica asociado a que a nivel país en la mayor parte se presentará una disminución de la precipitación y con ello se reduciría la erosividad de la lluvia, pero no se consideraron los impactos en la cobertura vegetal, que se espera que se reduzca asociado al incremento en el estrés hídrico y con ello la protección del suelo y se aumente la pérdida del suelo por este proceso.

Cuadro 4 Estudios de modelación de erosión y cambio climático en México.

Lugar	RCP Watts/m ²	Escenario climático	Cambio en la media nacional	Método	Referencia
México (estudio nacional)	4.5	2015 – 2039	-1.81% a - 1.813%	RUSLE	INECC- PNUD, 2016
México (estudio nacional)	4.5	2039 – 2069	-2.42% a - 3.92%	RUSLE	INECC- PNUD, 2016
México (estudio nacional)	4.5	2069 – 2099	-1.21% a - 7.83%	RUSLE	INECC- PNUD, 2016
México (estudio nacional)	8.5	2015 – 2039	-0.61% a - 5.14%	RUSLE	INECC- PNUD, 2016
México (estudio nacional)	8.5	2039 – 2069	-3.32% a - 14.80%	RUSLE	INECC- PNUD, 2016
México (estudio nacional)	8.5	2069 – 2099	-2.72% a - 10.27%	RUSLE	INECC- PNUD, 2016

2.2.7.3. Salinidad, alcalinidad y sodicidad de los suelos

Se prevé que en las áreas con aumento de la temperatura y una disminución de las lluvias dará lugar a una mayor pérdida evaporativa y transpirativa consecuentemente el movimiento ascendente del agua en el suelo aumentara, como se ve actualmente en las partes áridas del mundo, y esto dará lugar a un aumento en la acumulación de sales en las capas superiores del suelo. Tales efectos se intensificarán si la calidad del agua de riego que se utiliza en suelos agrícolas es mala.

Asimismo, el cambio climático aumentará la inundación y salinidad a lo largo de las regiones costeras en todo el mundo, a través de la influencia del aumento del nivel del mar (Pezeshki *et al.*, 1990; Brauch y Oswald, 2009).

En México, un estudio realizado por SEMARNAT-CP (2002) indica que 768, 690 hectáreas están afectadas por algún grado de salinidad, alcalinidad o sodicidad, entre las regiones afectadas están: el distrito de riego de Caborca, Sonora donde la intrusión salina ha causado la salinización de suelos que anteriormente servían para cultivo (Zamudio- Gonzalez *et al.*, 2003) o en el Golfo de México por el abatimiento de los mantos freáticos de agua dulce cerca de las costas (Day *et al.*, 2009; Flores *et al.*, 1998). Entre los estados con mayor afectación por la salinización causada por malas prácticas agrícolas están Sinaloa (3.5%), Guanajuato (3.3%) y Tamaulipas (2%). (SEMARNAT-CP, 2002).

2.2.7.4. Acidificación en los suelos

En México existe la posibilidad que al aumentar la intensidad de la precipitación en las regiones del sur, generará mayor potencial de lixiviación en suelos estables estructuralmente y bien drenados. Esto podría incrementar la acidificación del suelo a través de la pérdida de bases. Se ha observado que, si el clima cambia, el volumen de turbas en el uso agrícola se reducirá hasta en un 40%. Algunos suelos de turba están asociados con condiciones de sulfatos ácidos, particularmente en Asia, África, América Latina y partes de Europa del Oeste (Kuntze, 1993).

2.2.7.5 Impacto en la materia orgánica del suelo

Blum (2005) menciona que el cambio climático influye fuertemente en los procesos biológicos del mismo; el aumento o disminución de la precipitación afectará directamente en

la producción de biomasa; un decremento de la precipitación conlleva a menor biomasa por lo tanto se tendrá menor contenido de carbono y menor productividad del suelo; mayor precipitación generará mayor lixiviación y pérdida de nutrientes, con cambios negativos si se da en regiones afectadas por estos procesos. Por otra parte el cambio climático impactará directamente en la calidad de la Materia orgánica del suelo principalmente debido a los efectos de la temperatura y precipitación e indirectamente por cambios de uso de la tierra, según Rounsevell *et al.* (1999) tales cambios pueden afectar directamente a la producción agrícola en los siguientes aspectos:

- Cambio en la disponibilidad de agua para el crecimiento de los cultivos;
- La modificación de la resistencia de la superficie de los suelos a la degradación aumentando así el potencial de ocurrencia de erosión del suelo y los deslizamientos de tierra;
- Mediante la modificación en el flujo de agua generando movimiento de sustancias orgánicas e inorgánicas (xenobióticos y fertilizantes) por medio de la lixiviación llegando a las aguas subterráneas;
- La modificación de la capacidad del suelo para almacenar macro y micro nutrientes requeridos para los cultivos;
- La modificación de la población de microfauna y microflora del suelo presente en la rizosfera;
- La modificación de la cantidad de microbiota del suelo y la capacidad de formar o inmovilizar gases de efecto invernadero (Bouwman 1990; Mosier *et al.*, 1991; Goulding *et al.*, 1995).

Los procesos que afecta la dinámica del carbono orgánico del suelo se muestran en la Figura 3; Las flechas apuntando hacia arriba indican las emisiones de CO₂ a la atmósfera, también puede haber emisión de CH₄ en condiciones anaeróbicas, aunque la mayoría de suelos bien drenados son un sumidero de CH₄ (Lal, 2004).

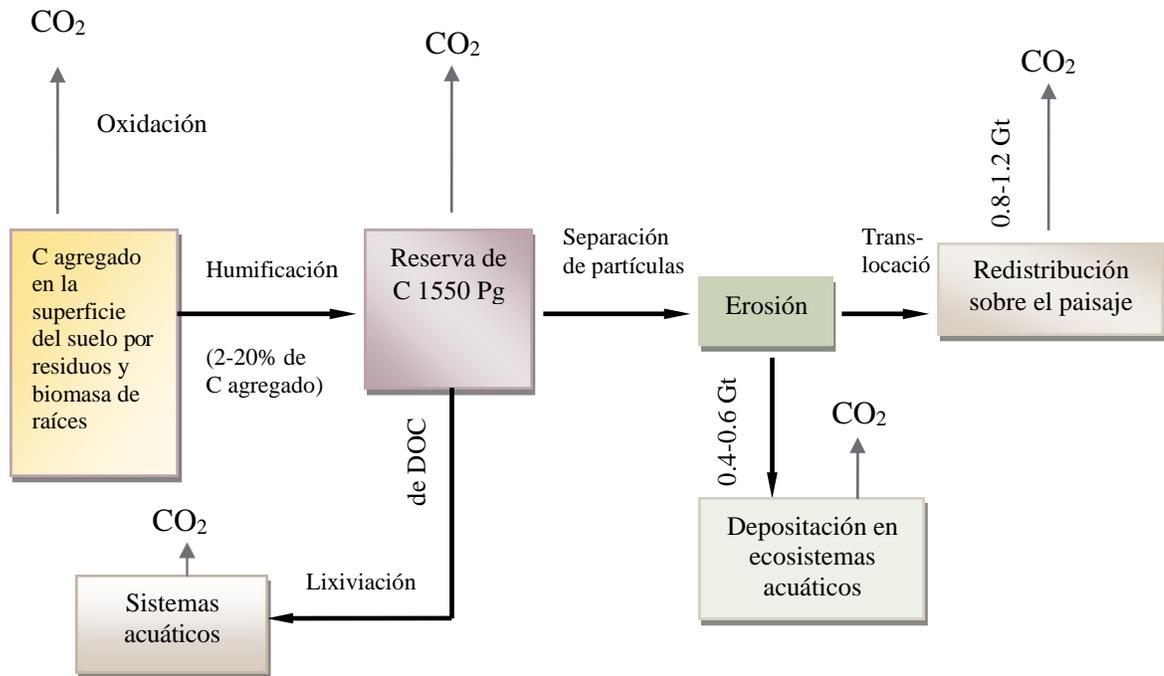


Figura 3 Procesos que afectan la dinámica de carbono orgánico del suelo. DOC: carbono orgánico disuelto. (Lal, (2004).

En cuanto al contenido de carbono en los suelos estudios reportan que disminuye su contenido en todos los escenarios modelados (HadCM3LC y RothC) lo que significa que existe una retroalimentación positiva entre el clima y el ciclo de carbono, pero la magnitud de esta retroalimentación depende de la estructura del modelo de carbono en los suelos. (Jones *et al*, 2005). En suelos tropicales, Berthelot *et al.* (2002) encontró que disminuyen los reservorios de carbono en el suelo en las zonas tropicales debido a la disminución de captura de carbono durante la disminución de la humedad del suelo causadas por el aumento de las temperaturas y con ello mayor estrés hídrico.

En México se prevé una disminución del contenido de carbono orgánico del suelo en los terrenos agrícolas. Actualmente el 36.22% de la superficie del suelo agrícola contiene de 0 a 50 Ton/Ha, 14.34% contiene de 50 a 100 Ton/Ha, 13.81% contiene de 100 a 150 Ton/Ha, 20.29% contiene 150 a 200 Ton/Ha, 5.2% contiene 200 a 250 Ton/Ha, 3.07% contiene de 250 a 300 Ton/Ha y 7.08 % contiene más de 300 Ton/Ha.

En los Cuadros 5-7 se muestran los contenidos de carbono que se tendrán en México bajo diferentes escenarios de cambio climático utilizando diferentes metodologías (Gómez, *et al.*, 2016).

En todos los modelos se prevé una disminución en el contenido de carbono orgánico de los suelos si no se realizan cambios en el manejo de los mismos, por lo que es uno de los problemas más graves que enfrentamos actualmente.

Cuadro 5 Estimación del contenido de carbono en diferentes escenarios de cambio climático que se tendrán en México utilizando el método del IPCC, 2007.

Escenario climático	Método	Contenido de C orgánico en el suelo (Ton/Ha)	Cambio en la media nacional (%)
2015 – 2039	IPCC	0 – 50	+10.97
		50 – 100	+15.20
		100 – 150	+0.30
		150 – 200	-15.86
		200 – 250	-2.93
		250 – 300	-1.74
		+ de 300	-5.92
2039 – 2069	IPCC	0 – 50	11.56
		50 – 100	26.18
		100 – 150	-3.18
		150 – 200	-20.28
		200 – 250	-4.90
		250 – 300	-2.34
		+ de 300	-7.07

Cuadro 6 Estimación del contenido de carbono en diferentes escenarios de cambio climático que se tendrán en México utilizando los métodos HADGEM y GFDL con un RCP 4.5 Watts/m².

Escenario climático	Método	Contenido de C orgánico en el suelo (Ton/Ha)	Cambio en la media nacional por rangos
2015 – 2039	Mineralización	0 – 50	+28.50 a +28.36
		50 – 100	+2.47 a +2.44
		100 – 150	-6.01 a -6.04
		150 – 200	-14.94 a -15.09
		200 – 250	-4.21 a -4.23
		250 – 300	-2.56 a -2.58
		+ de 300	-3.07 a -3.08
2039 – 2069	Mineralización	0 – 50	+49.69 a +49.74
		50 – 100	-6.96 a -6.95
		100 – 150	-11.37 a -11.45
		150 – 200	-19.51 a -19.57
		200 – 250	-4.38 a -4.41
		250 – 300	2.21 a -2.56
		+ de 300	-3.08 a -5.23

Cuadro 7 Estimación del contenido de carbono en diferentes escenarios de cambio climático que se tendrán en México utilizando los métodos HADGEM y GFDL con un RCP 8.5 Watts/m².

Escenario climático	Método	Contenido de C orgánico en el suelo (Ton/Ha)	Cambio en la media nacional por rangos (%)
2015 – 2039	Mineralización	0 – 50	+29.13 a +28.69
		50 – 100	+2.29 a +2.03
		100 – 150	-4.96 a -5.03
		150 – 200	-15.16 a -16.28
		200 – 250	-4.26 a -4.27
		250 – 300	-2.54 a -2.57
		+ de 300	-3.09 a -3.11
2039 – 2069	Mineralización	0 – 50	+50.69 a +50.5
		50 – 100	-7.50 a -7.66
		100 – 150	-11.52 a -11.54
		150 – 200	-19.62 a -20.29
		200 – 250	-4.38 a -4.39
		250 – 300	-1.5 a -2.24
		+ de 300	-5.28 a -5.3

2.2.7.6 Cambios en la productividad de los suelos

Melillo *et al.* (1993) Afirman que el cambio climático puede afectar la Producción Primaria Neta (PPN) de diversas maneras, en regiones secas puede disminuir la PPN por la disminución de la humedad en el suelo o por el incremento en la evapotranspiración; en regiones húmedas, el aumento de nubosidad puede decrecer PPN por la reducción en la disponibilidad de la Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA).

También hay evidencias del aumento en los días de periodo de crecimiento de la vegetación (PECRE), desde los inicios de 1960 a 1995 la duración del PECRE ha aumentado un 20% en Hawái y un 40% en el Ártico (Keeling, 1996). Los aumentos son acompañados por los avances de fase de aproximadamente siete días durante la parte descendente del ciclo, aumentando la asimilación de CO₂ por las plantas, esta idea es apoyada por los datos de satélite que muestran el aumento de crecimiento de las plantas y un alargamiento de la estación de crecimiento activo en el hemisferio norte (Myneni, 1997; Zimov *et al.*, 1999).

2.3. Mitigación y adaptación

2.3.1. Secuestro de carbono en el suelo para mitigar el cambio climático

De acuerdo con Smit *et al.* (2014) la agricultura asociada al cambio de uso de la tierra es la principal fuente de los dos principales gases de efecto invernadero: el metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) y una gran fuente de bióxido de carbono (CO₂). El uso del suelo contribuye con ~ 25% del total global de las emisiones, en donde la producción agrícola con el 10% -14% y el cambio de la cobertura del suelo, incluida la deforestación que contribuye con otro 12% -17%. Sin embargo, esto puede cambiar mejorando el manejo de los suelos ya que se puede reducir estas emisiones mediante el secuestro de carbono en los suelos mediante prácticas de manejo sustentable, con lo que se generaría un aumento de la materia orgánica del suelo, regulación del ciclo del nitrógeno (N), incremento de la biodiversidad del suelo, reducción de la erosión y escorrentía; ayudando a los cultivos y sistemas de pastoreo a enfrentar los impactos del cambio climático (Smith, 2012).

Rounsevell *et al.* (1999) sugieren que la alternativa de adaptación al cambio climático en suelos agrícolas es mediante el cambio de las prácticas de manejo de la tierra, tales como las fechas de siembra y el calendario de aplicación de fertilizantes nitrogenados, así como la introducción de diferentes variedades de cultivos y rotaciones. Así mismo mencionan que el desarrollo de modelos que incorporan mejor la dinámica del suelo y la heterogeneidad y las descripciones de apropiados ciclos biogeoquímicos, sigue siendo un reto para la investigación del cambio climático.

El secuestro de carbono es una de las pocas estrategias que podría aplicarse a gran escala y a bajos costos, de acuerdo a Lal (2004) el potencial global de secuestro de carbono en el suelo utilizando prácticas adecuadas de manejo es de 0.9 ± 3 Pg C/año el cual podría compensar una cuarta parte del incremento anual de CO₂ atmosférico estimado de 3.3 Pg C/año; por lo que el potencial de secuestro de carbono acumulado en el suelo en un periodo de 25-50 años es de 30-60 Pg.

El gobierno francés en conjunto con la Conferencia de las Partes de la ONU de la Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en las negociaciones de Diciembre de 2015, llegaron al acuerdo de incrementar la concentración global de Carbono de suelos agrícolas a 0.4% por año. Esto generaría un aumento de Carbono de 1.2 Pg de Carbono por año (Paustian *et al.*, 2016). Para poder cumplir con este objetivo Paustian *et al.*

(2016) propone implementar una serie de prácticas de mitigación para aumentar el contenido de carbono en los suelos agrícolas, entre las que destacan la reducción de la labranza, la incorporación de biochar, restauración de tierras, rotación de cultivos, manejo de nutrientes, cultivos de cobertera y la agroforestería. Así mismo menciona que para implementar políticas de mitigación para reducir las emisiones se deben tomar en consideración modelos de mecanismos de simulación dinámica y controles de flujo que tomen en consideración variables climáticas y de suelo así como de prácticas de manejo; el uso de imágenes de satélite con mayor resolución y mapas de suelo a escala 1:15 000 a 1:20 000 mejoraría en gran medida las capacidades para modelar las emisiones de gases de efecto invernadero a gran escala. Lal (2004) menciona que el secuestro de carbono es una estrategia para lograr la seguridad alimentaria mediante el mejoramiento de la calidad del suelo; ya que mejora y sustenta la productividad de biomasa agronómica en periodos de 20-50 años.

2.3.2. Mitigación y adaptación en México

Dada la degradación actual de cuencas, acuíferos, ecosistemas y suelos en detrimento a los servicios ecosistémicos, resulta necesario diseñar apoyos y estímulos fiscales nuevos para productores y propietarios, con fines específicos de restauración ecológica y mejoramiento ambiental, como ocurre en otros países (OCDE, 2008) enfocado a los siguientes aspectos:

- Lograr la deforestación cero a la brevedad posible para que los sistemas naturales y humanos en el territorio rural no sigan perdiendo resiliencia y capacidad de adaptación.
- Recuperar la funcionalidad ecológica de paisajes al fomentar la conectividad entre remanentes de vegetación natural, para reactivar servicios ecosistémicos, como la medida más eficaz y económica de conservar la biodiversidad, al posibilitar el reacomodo territorial de especies en respuesta adaptativa al cambio climático (CICC, 2010a; 2010b). En este punto, específicamente se considera:
 - Restaurar la vegetación de galería para restablecer la conectividad a lo largo del gradiente climático y altitudinal (“pisos ecológicos”) de las cuencas.
 - Fomentar la regeneración natural de zonas de deforestación reciente para revertir la fragmentación de ecosistemas.
 - Crear corredores biológicos “a la medida” para ciertas especies y para ciertos hábitats, de acuerdo con las prioridades del Análisis Gap. (CONABIO-CONANP, 2008).
 - Fomentar cercas vivas y “rompevientos” en los límites entre parcelas y

predios, plantar árboles de sombra al interior de éstos y reforestar tierras marginales, abandonadas o sub-utilizadas.

- Restaurar ecosistemas vinculados a la funcionalidad hidrológica, para aumentar servicios ecosistémicos de infiltración, conducción, drenaje y almacenamiento de agua, amortiguar desastres naturales (inundaciones y sequías entre otros) y aumentar la prestación de estos servicios ecosistémicos y con ello la resiliencia de los socio-ecosistemas.
- Reconvertir tierras de baja productividad agropecuaria, a sistemas agroforestales, silvopastoriles, agro-silvo-pastoriles, cultivo de perennes, o cubierta forestal.
- Fomentar la reconversión agropecuaria a cultivos, razas de ganado y sistemas de producción más acordes con las condiciones cambiantes del clima, incluyendo la agricultura orgánica, los policultivos, la agricultura de conservación, la reforestación, las plantaciones forestales y una ganadería que permite la recuperación vegetal de los agostaderos (Savory, 2005; CICC, 2010a; 2010b).

3. Metodología para evaluar los impactos del cambio climático en los suelos de México

Una vez realizada la compilación de las metodologías más usadas para la evaluación de los impactos del cambio climático en suelos agrícolas en México, se analizaron cada una de ellas y se determinaron aquellas que por las condiciones de México o por la información que se posee son las más adecuadas para su aplicación en este estudio. Para los suelos se evaluará la condición actual de sus propiedades fundamentales como son textura, contenido de materia orgánica, espesor, afectaciones por sales y/o sodio, pH, capacidad de retención de agua y afectación por procesos erosivos. Así mismo se determinaran variables climáticas, el régimen y balance de humedad, el balance térmico, degradación de los suelos, dinámica del carbono y el potencial productivo.

3.1. Caracterización de los suelos de México

3.1.1. Suelos

Para obtener la variable profundidad del suelo se utilizó el criterio de experto para interpretar la clasificación de suelos del INEGI (2008) que permite identificar si los suelos son someros o profundos e inclusive el rango de profundidad de los mismos, para pH, Textura, Carbono Orgánico y Salinidad/Sodicidad se aplicó el modelo de Kriging ordinario semivariograma esférico con un pixel de 30 m, cada variable tiene sus peculiaridades y se explican a continuación.

La variable pH dentro de la base de datos de suelos del INEGI (2008) tiene muchos valores sin datos, así que se hizo una limpieza de la base de datos verificado que fuera congruente con la clasificación de los suelos y se aplicó el modelo de Kriging. En textura se tenían dentro de las bases de datos el porcentaje de arcilla, arena y limo se aplicó el modelo de Kriging, posteriormente, se interseccionaron y se clasificó por medio del triángulo de las texturas de suelo para obtener la textura más detalladas del suelo a diferencia de la cartografía que solo indica si son gruesas, medias o finas. (Figura 8) En el porcentaje de Carbono Orgánico del Suelo se limpió la base de datos y se aplicó en modelo de Kriging y se agrupó en clases.

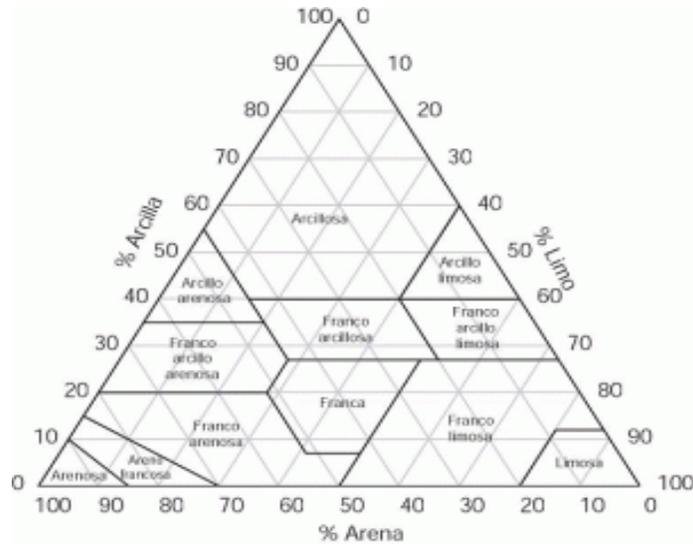


Figura 4 Triángulo de textura del suelo

En la Salinidad/Sodicidad del suelo se limpió la base de datos se aplicó el método Kriging y se comparó el resultado con las características obtenidas por medio de la nomenclatura de las unidades y subunidades del suelo y donde no había congruencia se ajustó al nombre del tipo de suelo. Por último, se clasificó por medio de los siguientes criterios. (Cuadro 8 y 9)

Cuadro 8 Clasificación de los suelos por su nivel de salinidad

Clasificación	Rangos de salinidad (Conductividad eléctrica mmhos/cm)
No salinos	0 – 4
Ligeramente salinos	4 – 6
Moderadamente salino	6 – 8
Fuertemente salino	8 – 16
Extremadamente salino	+ 16

Cuadro 9 Clasificación de los suelos por su nivel de sodicidad

Clasificación	Rangos de Sodicidad (Porcentaje de Saturación de Sodio)
No sódico	0 – 15
Ligeramente sódico	15 – 20
Moderadamente sódico	20 – 25
Fuertemente sódico	25 – 30
Extremadamente sódico	+ 30

3.1.2 Distritos de riego

Se obtuvo la capa de los distritos de riego en la página de la CONABIO (2008), para obtener la cantidad de agua concesionada, tanto superficial como subterránea, se obtuvo de los datos abiertos proporcionados en la página web de la CONAGUA (2016). Se unió la base de datos de los distritos de riego a la información obtenida de CONAGUA para tener un mayor detalle.

3.1.3 Uso de suelo y vegetación

Se utilizó el mapa de Usos de Suelo y Vegetación serie V, y se limpió toda la base de datos de toda la información no necesarios para este estudio, manteniendo la información de tipo de agricultura (temporal, de humedad, riego) y tipo de vegetación (primaria, secundaria, inducida).

3.1.4 Pendiente del terreno

Del Modelo de Elevación Digital a 120 m del INEGI se realizó un Fill para rellenar los pequeños huecos de información que normalmente tiene, posteriormente se proyectó a Sistema de Proyección UTM del INEGI (IRTF 92). Por medio del comando Slope se obtuvo la pendiente que después fue clasificada y convertida a formato shapefile.

3.2. Determinación del régimen y balance de humedad del suelo

Para determinar el régimen de humedad se utilizó el modelo de Newhall propuesto por el Soil Survey Staff (2014) ya que tiene la ventaja de ser programado y se tiene pueden clasificar varios suelos a la vez. En cuanto al balance de humedad del suelo, para estimar la evapotranspiración potencial en México se utilizará la metodología de Penman modificada por Monteith. Así mismo se calculó la Capacidad de Almacenamiento de Agua (CAP) por medio del método de Dunne y Leopold (1978) con el ajuste de Monterroso y Gómez (2003) así como el almacenamiento del agua por el suelo (AL), las demasías de agua (DA) y déficit de humedad (DE). Tanto el régimen como el balance de humedad se evaluarán con condiciones actuales así como con los escenarios de cambio climático propuestos.

3.3. Determinación del Balance térmico del suelo

Debido a que el modelo Newhall no arroja valores precisos de la temperatura del suelo, sino una gráfica general, se determinó que, para el régimen de temperatura del suelo, se determinó a partir de los suelos por clima, pendiente, cobertura vegetal y por medio de criterio de experto se definió la diferencia entre la temperatura media anual del aire y del suelo en cada caso, y posteriormente se clasificó para obtener su régimen de temperatura. En este apartado se determinó el estado actual y con los escenarios de cambio climático el balance térmico del suelo. En los cuadros 8 y 9 se muestra la compensación para la obtención de la temperatura media del suelo a partir de la temperatura media del aire.

Cuadro 10 Compensación a la temperatura del aire para obtener la temperatura del suelo en climas con tipo de lluvia de invierno (Elaborada por Gómez, 2016)

Índice de Aridez	Oscilación de la temperatura del aire	Tipo de lluvia de invierno											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Hiperárido	0-5	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.1	1.2	1.1	1.0	1.0	0.9	0.8
	5-7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9
	7-14	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0
	+14	1.0	1.1	1.2	1.3	1.5	1.6	1.8	1.7	1.5	1.3	1.2	1.1
Árido	0-5	0.6	0.7	0.9	1.0	1.1	1.1	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7
	5-7	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8
	7-14	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9
	+14	0.9	1.0	1.1	1.2	1.4	1.6	1.8	1.7	1.4	1.2	1.1	1.0
Semiárido	0-5	0.5	0.6	0.7	0.9	1.0	1.1	1.2	1.1	1.0	0.8	0.7	0.6
	5-7	0.6	0.7	0.8	1.0	1.1	1.2	1.3	1.2	1.0	0.9	0.8	0.7
	7-14	0.7	0.8	1.0	1.2	1.3	1.4	1.5	1.4	1.3	1.1	0.9	0.8
	+14	0.8	0.9	1.1	1.2	1.5	1.6	1.8	1.7	1.5	1.2	1.0	0.9
Subhúmedo seco	0-5	0.4	0.5	0.6	0.9	1.0	1.1	1.2	1.1	1.0	0.8	0.7	0.5
	5-7	0.5	0.6	0.7	1.0	1.1	1.2	1.3	1.2	1.0	0.8	0.7	0.6
	7-14	0.6	0.7	0.9	1.1	1.3	1.4	1.5	1.4	1.3	1.1	0.9	0.7
	+14	0.7	0.8	0.9	1.2	1.5	1.6	1.8	1.7	1.5	1.2	1.0	0.8

Cuadro 11 Compensación a la temperatura del aire para obtener la temperatura del suelo en climas con tipo de lluvia intermedio o de verano (Elaborada por Gómez, 2016)

Índice de Aridez	Oscilación de la temperatura del aire	Tipo de lluvia de verano o intermedio											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Hiperárido	0-5	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.1	1.2	1.1	1.0	1.0	0.9	0.8
	5-7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9
	7-14	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0
	+14	1.0	1.1	1.2	1.3	1.5	1.6	1.8	1.7	1.5	1.3	1.2	1.1
Árido	0-5	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.8
	5-7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1	1.0	0.9
	7-14	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.3	1.4	1.3	1.3	1.2	1.1	1.0
	+14	1.0	1.1	1.2	1.3	1.5	1.5	1.7	1.6	1.5	1.3	1.2	1.1
Semiárido	0-5	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	0.9	0.8
	5-7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9
	7-14	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.1	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0
	+14	1.0	1.1	1.2	1.3	1.5	1.2	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0
Subhúmedo seco	0-5	0.7	0.8	0.9	1.0	0.9	0.6	0.6	0.6	0.6	0.9	0.8	0.8
	5-7	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	0.7	0.7	0.7	0.7	0.9	0.9	0.9
	7-14	0.9	1.0	1.1	1.2	1.0	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	1.0	1.0
	+14	1.0	1.1	1.2	1.3	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0
Subhúmedo húmedo	0-5	0.5	0.6	0.7	0.8	0.5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4
	5-7	0.6	0.7	0.7	0.8	0.5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4
	7-14	0.6	0.7	0.8	0.9	0.5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4
	+14	0.7	0.7	0.8	1.0	0.6	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4	0.5
Húmedo	0-5	0.2	0.3	0.4	0.4	0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	0.0	0.2
	5-7	0.2	0.3	0.5	0.6	0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	0.0	0.2
	7-14	0.3	0.4	0.5	0.6	0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	0.0	0.2
	+14	0.3	0.4	0.6	0.6	0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	0.0	0.2
Muy húmedo	0-5	0.0	0.0	0.1	0.2	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	0.0
	5-7	0.0	0.0	0.2	0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	0.0
	7-14	0.0	0.1	0.2	0.4	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	0.0
	+14	0.0	0.2	0.3	0.4	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	0.0
Per-húmedo	0-5	0.0	0.0	0.1	0.2	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	0.0
	5-7	0.0	0.0	0.2	0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	0.0
	7-14	0.0	0.1	0.2	0.4	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	0.0
	+14	0.0	0.2	0.3	0.4	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	0.0

3.4. Evapotranspiración potencial

Para determinar el balance de humedad se utilizó la precipitación mensual (P), y la que se estimó la ETP con el método de Penman modificado por Monteith (Sys *et al.*, 1991) en el cual se estima por medio de un modelo físico la evapotranspiración potencial diaria sobre la superficie de agua libre y poco profunda expresada en milímetros por día (ET_o) y para la estimación de la evapotranspiración potencial mensual (ETP), se multiplicó este parámetro

por el número de días del mes. La fórmula consta de un término de radiación y de un término aerodinámico, y se expresa como:

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

Donde:

ET_o = evapotranspiración sobre superficie agua libre (mm/día); k = coeficiente de conversión de energía por unidad de superficie en 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 ET_o . Se calcula por medio de la expresión:

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

Δ = 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 ($^{\circ}C$).

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

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; λv = calor de vaporización del agua que se calcula con la siguiente fórmula:

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

$1-W$ = 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.

Rn = radiación neta, diferencia entre la radiación neta entrante y la saliente:

$$Rn = (1-\alpha) - Rb$$

$(1-a) R$ = fracción no reflejada

a = albedo (0.23 – 0.25) de la radiación solar; R se calcula con la siguiente ecuación:

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

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); Rb = radiación térmica perdida que se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Rb = Rbo \left(a \left(\frac{R}{Rbo} \right) + b \right)$$

Donde:

$a = 1.2$ para zonas áridas o 1.0 en zonas húmedas; $b = -0.2$ para zonas áridas o 0 en zonas húmedas; R = radiación solar (calculada anteriormente).

Rbo = 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:

$$Rbo = \epsilon \sigma T^4$$

El valor de emisividad ϵ de la ecuación se estima mediante la expresión:

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

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

Donde:

$a_1 = 0.39$; $b_1 = -0.05$; $e(Ti) = e^0(Ti) \text{ HRi}/100$; $\sigma = 11.71*10.8$ (constante de Stefan – Boltzmann); T = temperatura del aire en grados Kelvin ($Tk = 273 + T^\circ\text{C}$).

R_{s_0} = 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:

$$U_2 = U_z \left(\frac{2}{z}\right)^{0.2}$$

$e^0 - e$ = 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:

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

3.5 Productividad Primaria Neta

Dentro del balance de humedad realizado por medio del modelo Newhall se generaron los insumos necesarios para obtener la Productividad Primaria Neta (PPN), siendo la evapotranspiración real (ETR). Para obtener el ETR se calculó el déficit de humedad, utilizando la siguiente ecuación:

$$DEF_i = (P - ETP)_i - \Delta A_i$$

Dónde:

- DEF: Déficit de humedad
- P: Precipitación
- ETP: Evapotranspiración potencial
- ΔA : Cambios en el almacenamiento

$$ETR = ETP - DEF$$

Evapotranspiración real es el resultado de la evapotranspiración potencial menos el déficit de humedad. Su unidad es mm/año.

$$\text{Log}_{10}NPP = (1.66 * \text{Log}_{10}RET) - 1.66$$

La productividad primaria neta se expresa en gMS/m²/año.

3.6. Evaluación del potencial productivo

Obtenido la Productividad Primaria Neta se evaluó el potencial productivo por medio de la intersección de la primera junto con las características del suelo, uso del suelo y vegetación o la vegetación potencial en el caso de tenerla, la pendiente, y la superficie de los distritos de riego del país.

3.7. Escenarios de cambio climático contemplados

Los escenarios para modelar los efectos en las condiciones del suelo en los terrenos agrícolas bajo el efecto del cambio climático son los que se muestran en el cuadro 12.

Cuadro 12 Escenarios de cambio climático utilizados en el estudio para los escenarios de tiempo indicados y para RCP indicados en Watts m²

Escenario/RCP	2015-2039	2045-2069	2075-2099
HADGEM	4.5	4.5	4.5
	8.5	8.5	8.5
GFDL	4.5	4.5	4.5
	8.5	8.5	8.5
MPI	4.5	4.5	4.5
	8.5	8.5	8.5
CNRM	4.5	4.5	4.5
	8.5	8.5	8.5

4. Compilación de la información sobre los variables que definen el potencial productivo de los suelos

Dentro de las variables que influyen en el potencial productivo se pueden dividir en aquellas son estáticas, las que no cambian con el paso del tiempo, tales como la pendiente o aquellas que es muy difícil su modelación, como el Uso de Suelo , y dinámicas, como la humedad del suelo y la temperatura del suelo, estas dos variables influyen en otras características del suelo provocando cambios considerables en los mismos como se detalló en el Marco Teórico, teniendo en cuenta que existe una clara evidencia de un Cambio Climático (IPCC, 2014), la humedad y temperatura de los suelos se modificarán, por tal motivo, los cambios en las condiciones de los suelos afectarán la productividad del mismo aunque aún no se tiene una idea de la magnitud en la afectación.

4.1 Características y propiedades de los suelos

4.1.1. Profundidad del suelo

Los datos de profundidad del suelo se presentan en 5 clases suelos: menores a 10 cm, de 10 a 30cm, de 30 a 50cm, de 50 a 100 cm y suelos mayores a 100 cm. En el cuadro 9 se puede observar que existe una mayor proporción de los suelos de entre 10 a 30 cm que sumados con los suelos menores a 10 cm de profundidad se tiene que el 49.31% de la superficie del país tiene limitantes para el desarrollo adecuado de las raíces de las plantas, que requieren mínimamente 30 cm de suelo de profundidad. En el Cuadro 13 se detalla la superficie del país por clase de espesor y su porcentaje y en la Figura 5 su distribución.

4.1.2. Textura de los suelos

En el Cuadro 14 se muestra las clases de texturas de suelos presentes en el país a escala 1:250,000. El 90.57% de la superficie de país tiene suelos francos quiere decir que tiene condiciones favorables para el cultivo y tienen buenas condiciones físicas y químicas de estos. En la Figura 6 se muestra su distribución en el país.

Cuadro 13 Superficie y porcentaje de las clases de profundidad de suelos en México

<i>Profundidad</i>	<i>Área (Ha)</i>	<i>Porcentaje (%)</i>
Menor de 10	33'363,626.94	17.26
10 a 30	61'965,606.84	32.05
30 a 50	25'249,623.96	13.06
50 a 100	33'445,102.95	17.30
Mayor de 100	38'095,384.81	19.70
Agua	1'231,608.37	0.64
Total general	193'350,953.90	100.00

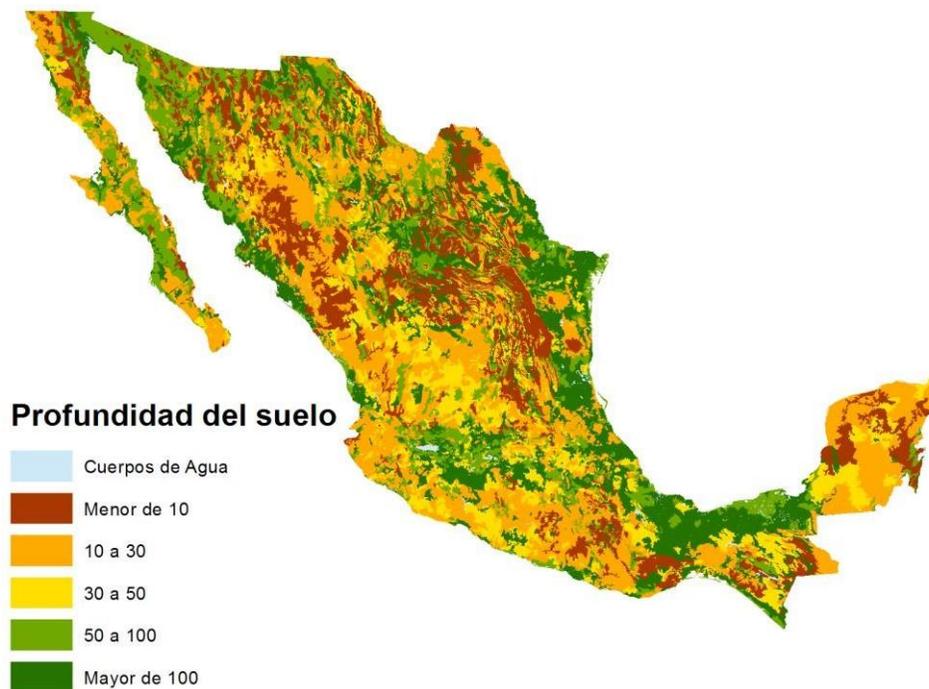


Figura 5 Mapa de la profundidad del suelo en rangos (cm)

4.1.3. Carbono Orgánico del Suelo

Se clasificó el carbono orgánico del suelo (COS) en 8 clases de acuerdo al porcentaje en los suelos, obteniendo los resultados descritos en el cuadro 15. Se puede observar que el 81.91% tiene menos de 2.5% de carbono orgánico en los suelos. En la figura 7 se muestra la distribución de las clases por contenido de COS.

Cuadro 14 Clases texturales predominantes de los suelos en México

<i>Textura</i>	<i>Área (Ha)</i>	<i>Porcentaje (%)</i>
Arena	181,837.75	0.09%
Arena francosa	1'456,352.04	0.75%
Franco	9'619,103.48	4.97%
Franco arcillosa	55'272,028.89	28.59%
Franco arenosa	41'593,331.02	21.51%
Franco arcillo arenosa	68'176,979.27	35.26%
Franco arcillo limosa	465,611.82	0.24%
Arcilla	16'279,450.70	8.42%
Arcilla arenosa	306,258.90	0.16%
Total general	193'350,953.90	100.00%

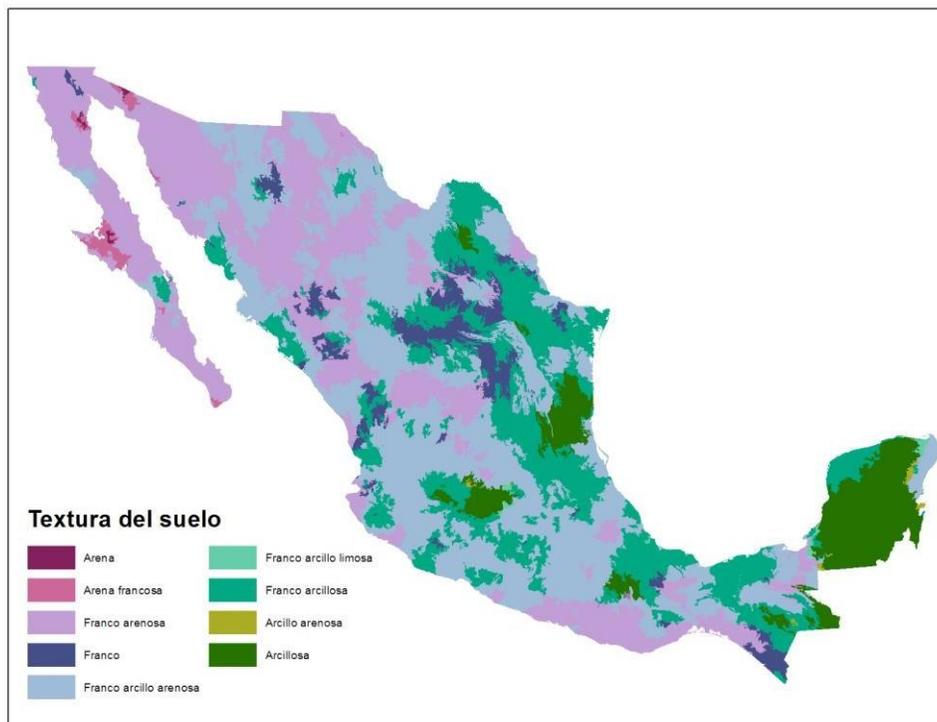


Figura 6 Mapa de distribución de las clases texturales de los suelos de México

Cuadro 15 Porcentaje de carbono orgánico en los suelos de México

<i>Carbono orgánico (%)</i>	<i>Área (Ha)</i>	<i>Porcentaje (%)</i>
0.2 – 0.5	18'505,864.02	9.57%
0.5 – 1	37'241,705.82	19.26%
1 – 1.5	35'302,524.48	18.26%
1.5 – 2	26'333,181.24	13.62%
2 – 2.5	40'995,000.81	21.20%
2.5 – 3	15'492,877.28	8.01%
3 – 3.5	12'155,776.62	6.29%
> 3.5	7'324,023.59	3.79%
Total general	193'350,953.90	100.00%

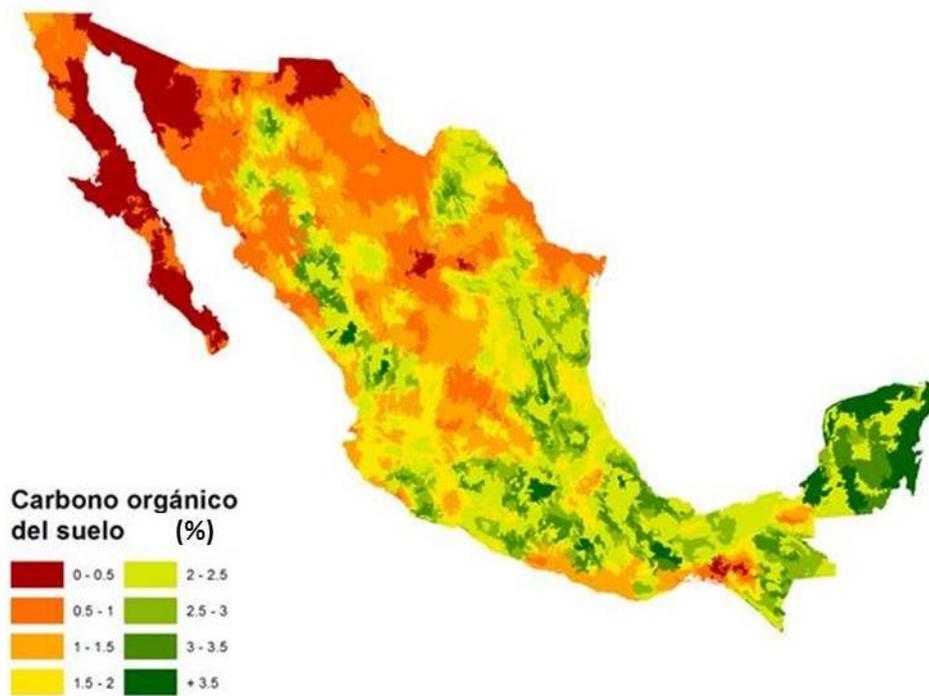


Figura 7 Distribución del Carbono orgánico del suelo en México

4.1.4. PH del suelo

Se determinaron 8 clases de pH que van de 4.5 a 8.5 en el mapa realizado a escala 1:250,000 en donde los suelos con valores de 6.5 a 7.5 representan el 37.89% de la superficie del país. Los suelos con pH por arriba de 7.5 cubren el 30.66% de la superficie del país. Mientras que el 4.25% de la superficie del país son suelos ácidos (Cuadro 16).

Cuadro 16 Clases de pH que hay en México

Clases de pH	Área (Ha)	Porcentaje (%)
4.5 – 5	345,177.62	0.18
5 – 5.5	7'871,456.29	4.07
5.5 – 6	22'751,890.85	11.77
6 – 6.5	29'827,053.92	15.43
6.5 – 7	19'458,992.53	10.06
7 – 7.5	53'816,023.98	27.83
7.5 – 8	50'485,663.33	26.11
8 – 8.5	8'794,695.34	4.55
Total general	193'350,953.90	100.00

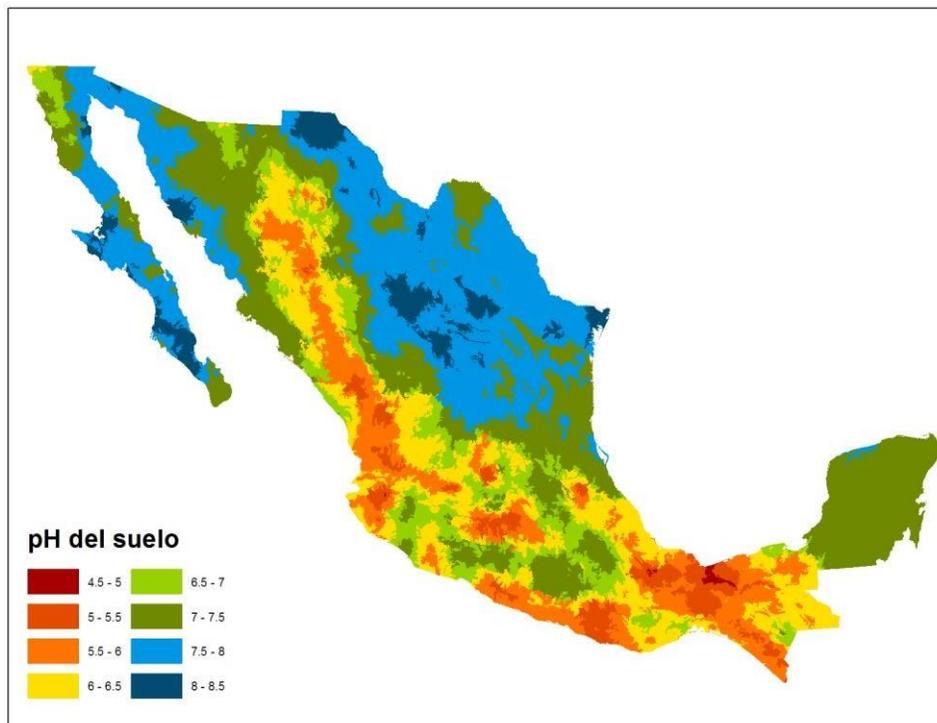


Figura 8 Mapa de pH del suelo en México

Como se puede apreciar en la figura 8 los suelos ácidos se concentran en las regiones húmedas del país mientras que los suelos alcalinos se concentran en los suelos de tierras secas.

4.1.5 Suelos Salino-Sódicos en México

En el Cuadro 17 se muestra la superficie y el porcentaje del país afectado por sales y/o sodio, en donde el 76.51% de la superficie del país no tiene problemas de sales ni de sodio y el 23.49% de la superficie tiene algún problema de sales y/o sodio, en donde el 2.35% de estos suelos tienen problemas extremos de sales (+ 16 mmohs/cm) y/o sodio (+ 30 PSI).

En la Figura 9 se muestra la distribución en el país de los suelos afectados por sales y/o sodio en México.

Cuadro 17 Suelos con problemas salinos, sódicos y salino-sódicos.

<i>Clases de pH</i>	<i>Área (Ha)</i>	<i>Porcentaje (%)</i>	<i>Clases de pH</i>	<i>Área (Ha)</i>	<i>Porcentaje (%)</i>
Sin sales ni sodio	147'924,995.40	76.51	Moderadamente salino – sódico	18.78	0.00
Ligeramente sódico	794,993.16	0.41	Fuertemente sódico moderadamente salino.	8,099.74	0.00
Fuertemente sódico	185,935.46	0.10	Fuertemente salino	2'644,139.28	1.37
Extremadamente sódico	116,296.74	0.06	Fuertemente salino ligeramente sódico	539,653.01	0.28
Ligeramente salino	6'382,930.42	3.30	Fuertemente salino moderadamente sódico	6,526.01	0.00
Ligeramente salino-sódico	1'438,885.58	0.74	Fuertemente salino-sódico	142,908.34	0.07
Moderadamente sódico ligeramente salino	89,114.67	0.05	Fuertemente salino extremadamente sódico	196,494.33	0.10
Fuertemente sódico ligeramente salino	20,958.68	0.01	Extremadamente salino	2'898,152.19	1.50
Extremadamente sódico ligeramente salino	27,151.36	0.01	Extremadamente salino ligeramente sódico	1'208,057.63	0.62
Moderadamente salino	26'476,491.42	13.69	Extremadamente salino moderadamente sódico	46,695.27	0.02
Moderadamente salino ligeramente sódico	1'803,131.32	0.93	Extremadamente salino fuertemente sódico	399,325.04	0.21
Total general	193'350,953.90	100.00%			

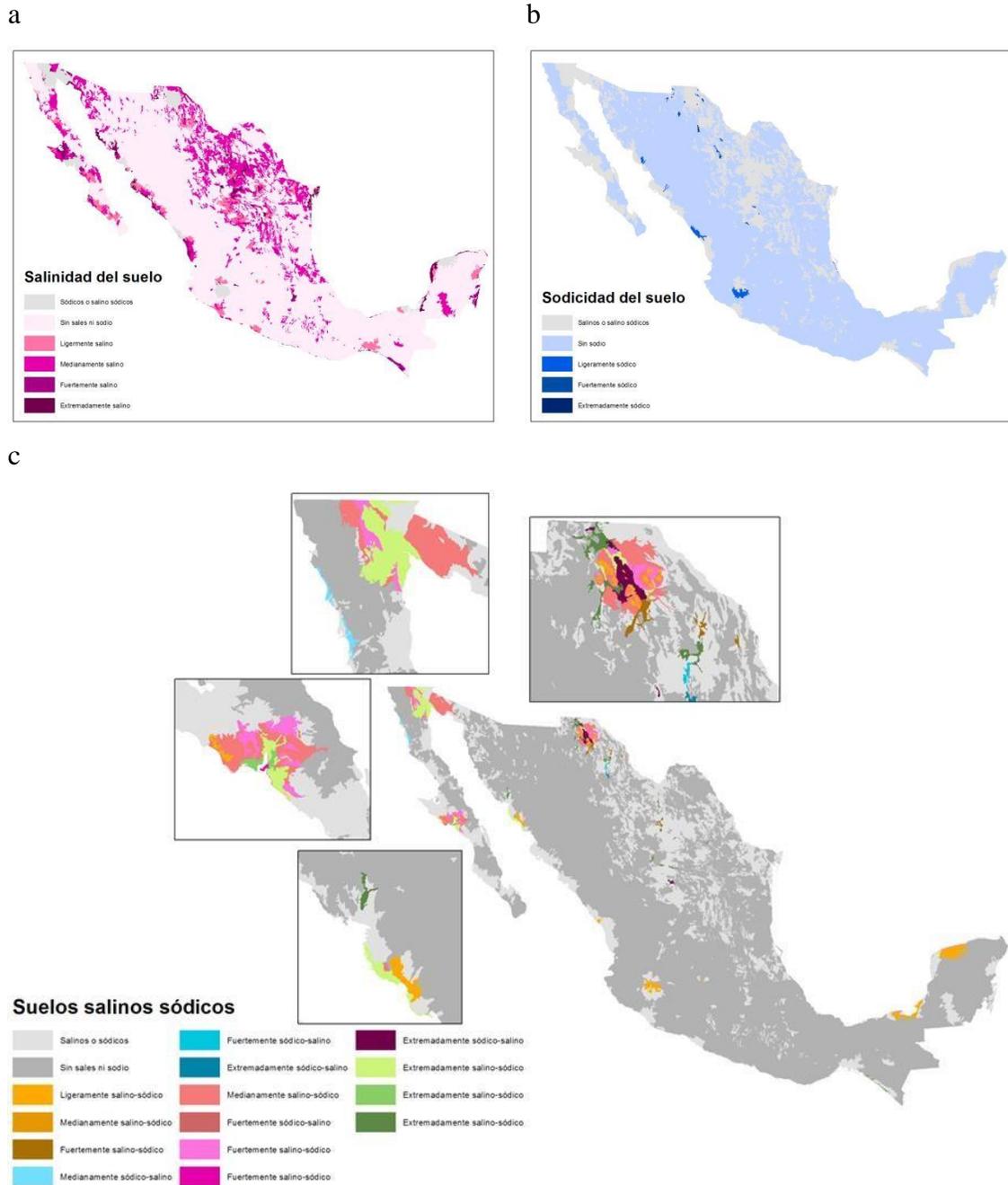


Figura 9 Suelos salinos (a), sódicos (b) y salino-sódicos (c).

La gran parte de los suelos salinos se encuentran en las regiones áridas del país, también en muchas costas debido a una posible intrusión salina a sus acuíferos contaminando de sales el suelo.

4.2 Condiciones hídricas de los distritos de riego en México

La superficie de riego con declaración de acuíferos sobreexplotados es del 35.04%, mientras que la superficie de riego con déficit de agua superficial para su uso es del 27.35%, de éstos, el 16.06% de la superficie total está sobreexplotado y con un déficit de agua superficial por lo que es altamente probable que estos distritos estén en riesgo de agotar su fuente de agua rápidamente (Cuadro 18).

Cuadro 18 Superficie en Ha. de los distritos de riego por condiciones del agua superficial y los acuíferos en México

<i>Condiciones Acuíferos</i>				
<i>Condiciones Agua sup</i>	<i>Sin Dato</i>	<i>Sobreexplotado</i>	<i>Subexplotado</i>	<i>Total general</i>
Déficit		866,272.01	608,698.78	1'474,970.79
Disponibilidad	94,837.73	1'021,578.81	1'947,464.46	3'063,880.99
Sin escorrentía		1,425.90	852,226.95	853,652.84
Total general	94,837.73	1'889,276.71	3'408,390.19	5'392,504.62

4.2.1 Condiciones de las fuentes de aguas superficiales en los distritos de riego

El agua superficial concesionada para uso agrícola el año 2015 es de 13, 599.86 millones de m³, de estos 657.26 millones de m³ (4.83%) fueron concesionados en regiones consideradas como de déficit de agua superficial. (CONAGUA, 2016) (Cuadro 19).

Cuadro 19 Agua superficial concesionada para el año 2015 a los distritos de riego por condición de las aguas superficiales en México (Millones de m³)

	<i>Condición de las aguas superficiales</i>			<i>Total</i>
	<i>Déficit</i>	<i>Disponibilidad</i>	<i>Sin escorrentía</i>	
Agua superficial concesionada	657.26	11,447.75	1,494.85	13,599.86

La gran mayoría de los distritos de riego con déficit de agua superficial se localizan en la zona centro del país, también en las regiones áridas (Figura 10).



Figura 10 Distritos de riego en México por condición de agua superficial

4.2.2 Condiciones de los Acuíferos en los distritos de riego

El agua subterránea concesionada para uso agrícola el año 2015 es de 16, 544.71 millones de m^3 , de estos 9,641.41 millones de m^3 (58.28%) fueron concesionados en regiones consideradas como sobreexplotado. (CONAGUA, 2016) (Cuadro 20)

Cuadro 20 Agua subterránea concesionada para el año 2015 a los distritos de riego por condición del acuífero en México (Millones de m^3)

Agua de acuífero concesionada	Condición del acuífero			Total general
	Sin Dato	SOBREEXPLOTADO	SUBEXPLOTADO	
	342.59	9,641.41	6,560.71	16,544.71

La gran mayoría de los distritos de riego con sobreexplotación de acuíferos se localizan en la zona centro del país, también en las regiones áridas. La principal región con este problema es la Comarca Lagunera mientras que Sinaloa, donde se realiza mayor cantidad de agricultura mecanizada del país) no presenta problemas de disponibilidad de agua subterránea (Figura 11).

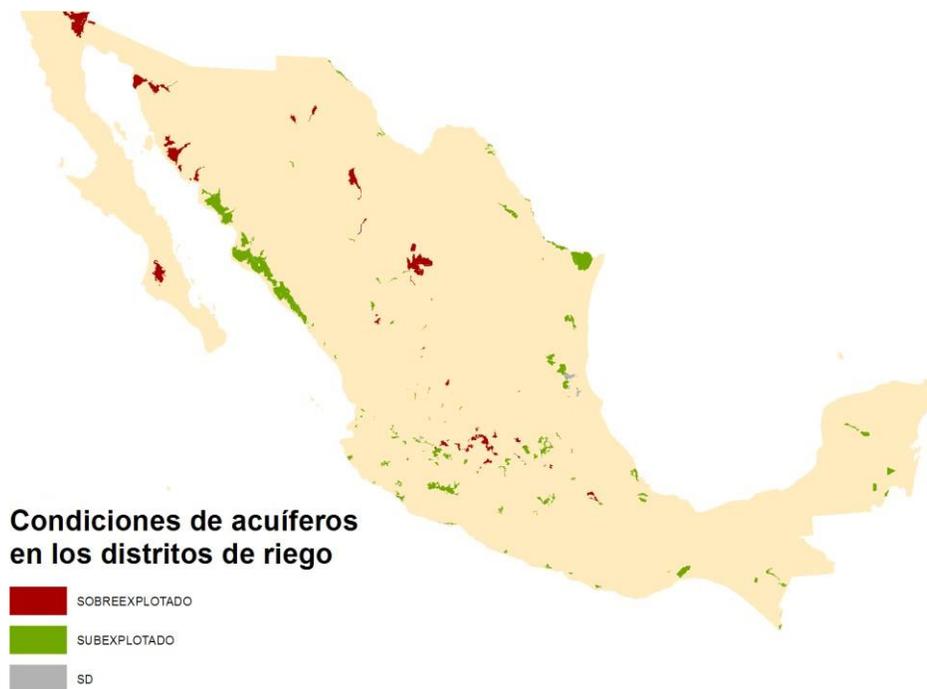


Figura 11 Distritos de riego en México por condición de acuíferos

4.3 Usos de suelo y vegetación en México

4.3.1 Usos del suelo en México

El uso de suelo con actividades primarias que más superficie ocupa en México es la agricultura de temporal con un 57.26%, siguiendo la agricultura de riego con el 25.85% y la vegetación inducida con el 16.05%. (Cuadro 21). Las zonas urbanas son las regiones sin cobertura vegetal más extendida (42.67% de las áreas sin vegetación en México), seguido de sin vegetación aparente con el 32.22% y los asentamientos humanos (zonas con poca población, rancherías, pueblos, etc.) con 23.74%. (Cuadro 22). En la Figura 12 se muestra la distribución de los suelos con usos para actividades primarias relacionadas con agricultura.

Cuadro 21 Superficie de los usos de suelo relacionados con actividades primarias

Usos del suelo	Superficie en Ha.
Acuícola	103,618.56
Agricultura de humedad	166,570.55
Agricultura de riego	10'074,673.98
Agricultura de temporal	22'316,172.92
Bosque cultivado	59,545.64
Vegetación inducida*	6'254,956.18
Total general	38'975,537.82

* V. inducida: Bosque inducido: Pastizal inducido, Palmar inducido, Sabanoide

Cuadro 22 Superficie de los usos de suelo donde no hay una presencia importante de vegetación

Sin vegetación	Superficie en Ha.
Asentamientos humanos	650,490.98
Desprovisto de vegetación	37,569.86
Sin vegetación aparente	882,905.60
Zona urbana	1'169,045.45
Total general	2'740,011.89

4.3.2 Vegetación en México

De las 137'189,006.40 Ha de vegetación en México, que cubren el 70.3% de la superficie del país, solo el 66.99% de vegetación se caracteriza como primaria y 33.01% como vegetación secundaria. El tipo de vegetación con mayor superficie es el Matorral Xerófilo con el 29.06% de la superficie del país asociado a las zonas secas, el bosque de coníferas cubre el 8.6%, el de Selva Caducifolia el 8.48% seguido del bosque de encino con el 7.94% (Cuadro 23). En la Figura 13 se muestra la distribución de los tipos de vegetación primaria y secundaria de México.

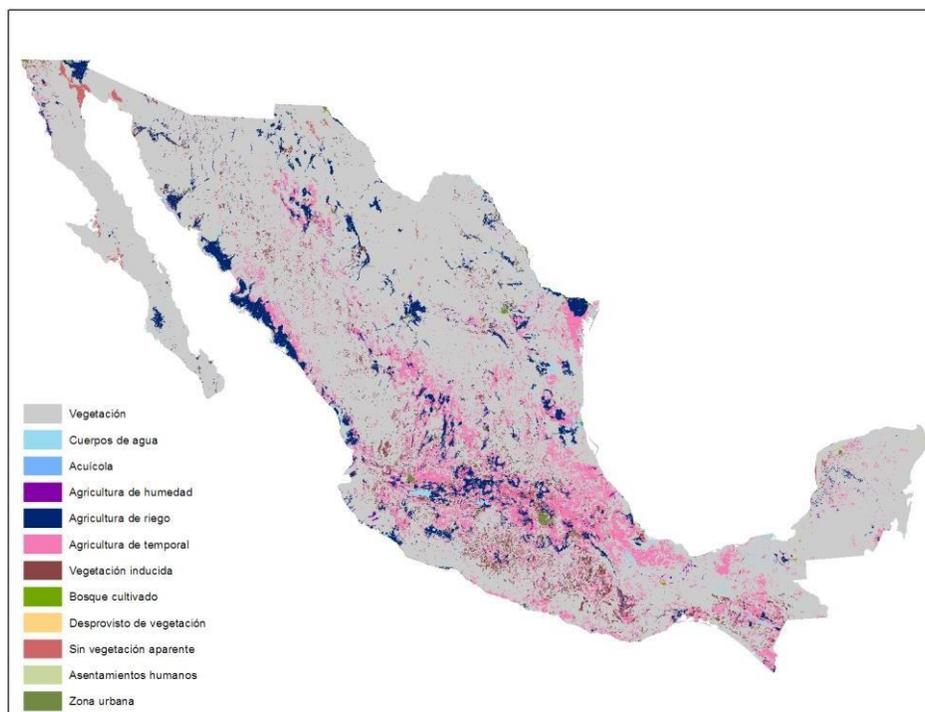


Figura 12 Mapa de uso de suelo para actividades primarias en México

Cuadro 23 Superficie de los tipos de vegetación por vegetación primaria y secundaria

Vegetación	Primaria	Secundaria	Total
Bosque de coníferas	10'768,093.22	6'003,913.76	16'772,006.97
Bosque de encino	9'571,639.29	5'923,570.09	15'495,209.38
Bosque Mesófilo de Montaña	847,566.84	1'005,525.04	1'853,091.88
Otros tipos de vegetación*	334,572.60	55,220.87	389,793.46
Matorral xerófilo*	49'739,148.98	6'957,018.14	56'696,167.12
Pastizal	7'933,071.86	3'887,040.46	11'820,112.32
Selva caducifolia	7'344,394.71	9'198,132.83	16'542,527.54
Selva espinosa	768,799.96	1'100,235.90	1'869,035.87
Selva perennifolia	2'900,417.14	6'202,224.19	9'102,641.34
Selva subcaducifolia	422,314.53	3'803,573.03	4'225,887.55
Vegetación hidrófila*	1'277,829.88	1'144,703.12	2'422,533.00
Total general	91'907,849.00	45'281,157.42	137'189,006.40

* M. xerófilo árido: Matorral crasicuale, M. desértico micrófilo, M. desértico rosetófilo, M. rosetófilo costero, V. de desiertos arenosos, V. halófila, V. gipsófila, M. espinoso tamaulipeco, M. de coníferas, Mezquital xerófilo, Chaparral, M. sarcocraule, M. sacro-crasicaule, Matorral submontano, M. sacro-crasicaule de neblina, M. subtropical; |Otros tipos de vegetación incluyen: Mezquital (otros tipos), Palmar natural, V. de dunas costeras; |V. hidrófila: Bosque de galería, Peten, Selva de galería, Manglar; |V. hidrófila 2: Popal, Vegetación de galería, Vegetación halófila (hidrófila), Tula

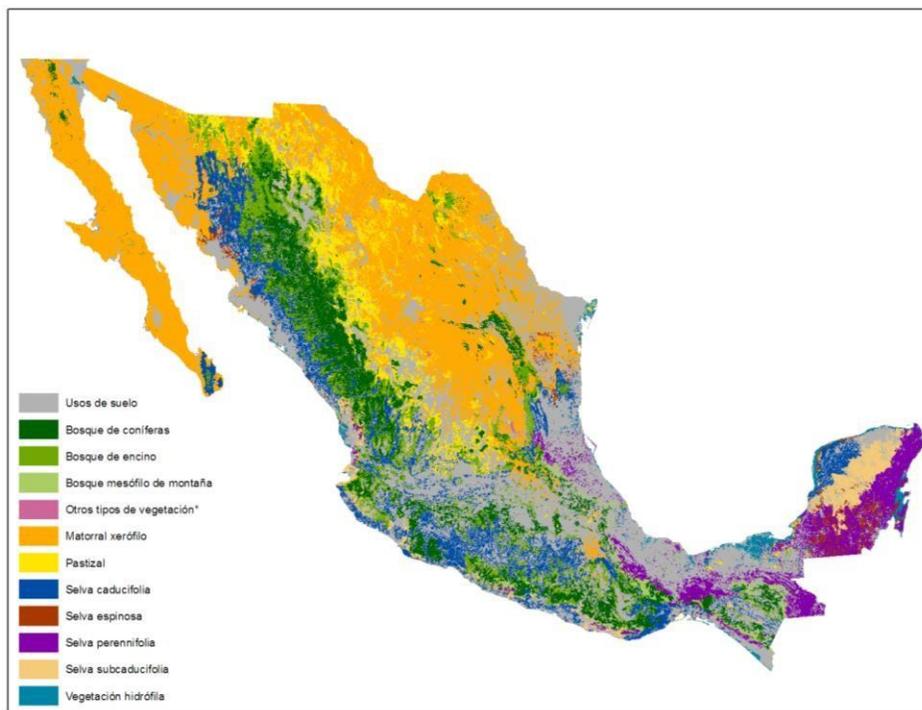


Figura 13 Mapa de distribución de la vegetación en México

4.4 Pendientes del terreno en México.

La mayor superficie de nuestro país tiene pendientes de 0° a 3° con el 45.01%, mientras que la superficie de pendientes de 30° es de 7.69% (Cuadro 24). En la Figura 14 se muestra la distribución de las diferentes clases de pendientes del país.

Cuadro 24 Clases de pendiente en México clasificado por el método del Soil Survey Manual Staff (1993)

<i>Pendientes</i>	<i>Área (Ha)</i>	<i>% de la superficie</i>
0 – 3	87'823,132.47	45.01%
3 – 8	33'983,935.99	17.42%
8 – 15	24'991,427.70	12.81%
15 – 30	33'303,215.28	17.07%
30 – 60	14'793,950.02	7.58%
+ 60	218,080.61	0.11%
Total general	195'113,742.10	100.00%



Figura 14 Distribución de las clases de pendiente de los suelos en México clasificado según el criterio del Soil Survey Division Staff (1993)

5. Variables dinámicas del suelo

5.1 Régimen de humedad y balance de humedad de los suelos en México

5.1.1 Régimen de humedad actual

El régimen de humedad Ústico es el que tiene mayor superficie en el país (42.89%), seguido por el régimen Arídico con un 35.62% y el Údico con un 20.21% de la superficie del país (Cuadro 25). En la Figura 15 se muestra la distribución de los regímenes de humedad de los suelos actual en el país.

Cuadro 25 Régimen de humedad del suelo actual en México

Régimen de humedad	Miles de ha	Porcentaje
Arídico		
Arídico extremo	47,592.7	24.29
Arídico típico	13,543.1	6.91
Arídico débil	8,647.8	4.41
Subtotal Arídico	69,783.7	35.62
Xérico		
Xérico seco	1,302.3	0.66
Xérico típico	137.1	0.07
Total Xérico	1,439.3	0.73
Ústico		
Tropústico arídico	5,954.1	3.04
Tropústico típico	21,123.2	10.78
Tropústico údico	43,460.4	22.18
Tempústico típico	10,070.3	5.14
Tempustico húmedo	3,433.6	1.75
Total Ústico	84,041.6	42.89
Údico		
Tropúdico seco	15,021.9	7.67
Tempúdico seco	3,206.3	1.64
Údico Típico	21,374.0	10.91
Total Údico	39,602.1	20.21
Total Perúdico	1,058.0	0.54

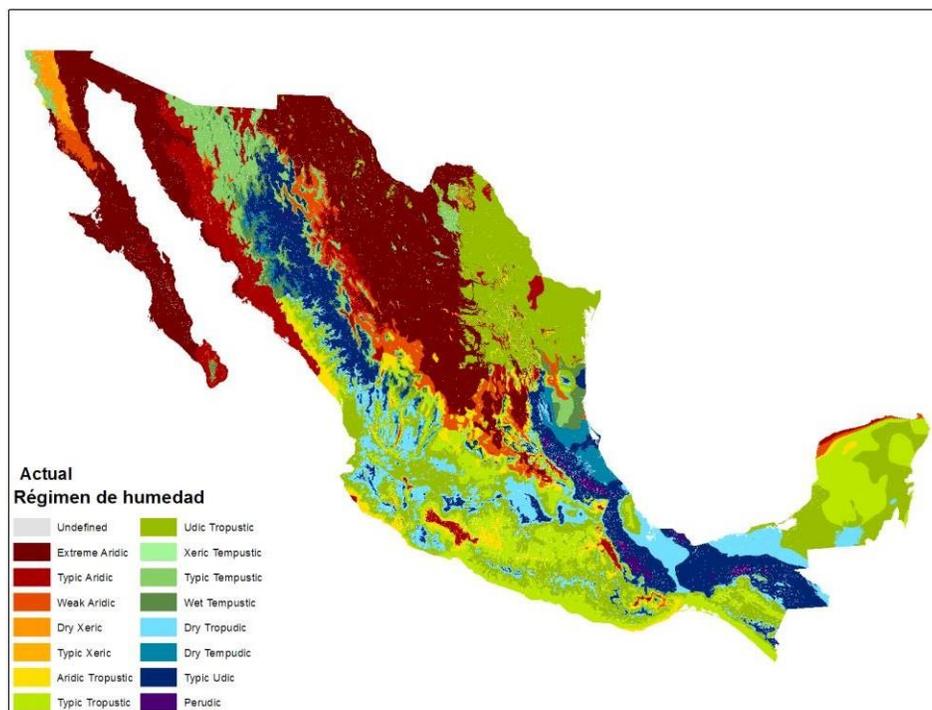


Figura 15 Distribución de los Regímenes de humedad actual de los suelos de México

5.1.2 Régimen de humedad bajo escenarios de cambio climático

En el cuadro 26 para el RCP 4.5 y el escenario de tiempo del 2016 – 2039 se puede observar un aumento en el régimen arídico en un rango de 5.54% a 9.99% y dentro del régimen arídico, el sub régimen Arídico típico en un rango de aumento de 17.74% a 21.02 del total de la superficie. Para el régimen Xerico se presenta una disminución al pasar de 0.73% a proporciones de 0.47 a 0.71%. Para el régimen Ustico la variación es de disminución en los modelos CNRM, HADGEM y el MPI y un ligero incremento para el modelo GFDL. El régimen Udico presenta disminución en todos los modelos considerados.

La Figura 16 muestra la distribución de los regímenes de humedad bajo condiciones actuales y escenarios de cambio climático para el escenario de tiempo a corto plazo y un RCP de 4.5 Watts/ m².

Cuadro 26 Régimen de humedad del suelo bajo escenarios de cambio climático RCP 4.5 2016-2039 en México

Régimen de humedad	Actual	CNRM	GFDL	HADGEM	MPI
Árido					
	47,592.7	16,446.4	17,357.8	20,848.4	26,649.1
Árido extremo	(24.29)	(8.39)	(8.86)	(10.64)	(13.60)
Árido típico	13,543.1	52,814.3	50,411.8	54,724.4	48,300.7
Subtotal Árido					
	(6.91)	(26.96)	(25.73)	(27.93)	(24.65)
Árido débil	8,647.8	11,379.8	13,848.1	13,795.8	10,072.1
	(4.41)	(5.81)	(7.07)	(7.04)	(5.14)
Subtotal Árido	69,783.7	80,640.5	81,617.7	89,368.5	85,021.9
	(35.62)	(41.16)	(41.66)	(45.61)	(43.40)
Xérico					
Xérico seco	1,302.3	1,285.0	878.7	838.3	935.4
	(0.66)	(0.66)	(0.45)	(0.43)	(0.48)
Xérico típico	137.1	100.6	89.3	76.3	210.8
	(0.07)	(0.05)	(0.05)	(0.04)	(0.11)
Total Xérico	1,439.3	1,385.6	968.1	914.6	1,146.2
	(0.73)	(0.71)	(0.49)	(0.47)	(0.59)
Ústico					
Tropústico árido	5,954.1	5,032.7	5,975.9	8,964.5	5,057.5
	(3.04)	(2.57)	(3.05)	(4.58)	(2.58)
Tropústico típico	21,123.2	21,720.7	26,716.5	31,811.3	29,831.5
	(10.78)	(11.09)	(13.64)	(16.24)	(15.23)
Tropústico údico	43,460.4	28,736.9	25,756.3	15,595.2	21,900.1
	(22.18)	(14.67)	(13.15)	(7.96)	(11.18)
Tempústico típico	10,070.3	15,763.9	20,475.4	19,381.0	14,451.9
	(5.14)	(8.05)	(10.45)	(9.89)	(7.38)
Tempustico xérico	0.00	0.00	0.1	0.00	0.00
	(0.00)	(0.00)	(0.00)	(0.00)	(0.00)
Tempustico húmedo	3,433.6	9,343.8	7,811.9	8,148.9	6,814.8
	(1.75)	(4.77)	(3.99)	(4.16)	(3.48)
Total Ústico	84,041.6	80,597.9	86,736.2	83,900.9	78,055.9
	(42.89)	(41.14)	(44.27)	(42.82)	(39.84)
Údico					
Tropúdico seco	15,021.9	11,447.8	9,898.0	8,695.9	11,486.4
	(7.67)	(5.84)	(5.05)	(4.44)	(5.86)
Tempúdico seco	3,206.3	7,906.1	5,350.7	6,063.4	5,517.7
	(1.64)	(4.04)	(2.73)	(3.09)	(2.82)
Údico Típico	21,374.0	13,613.8	11,097.6	6,789.2	6,814.8
	(10.91)	(6.95)	(5.66)	(3.47)	(3.48)
Total Údico	39,602.1	32,967.8	26,346.2	21,548.4	23,818.9
	(20.21)	(16.83)	(13.45)	(11.00)	(12.16)
Total Perúdíco	1,058.0	333.1	256.6	192.4	283.0
	(0.54)	(0.17)	(0.13)	(0.10)	(0.14)

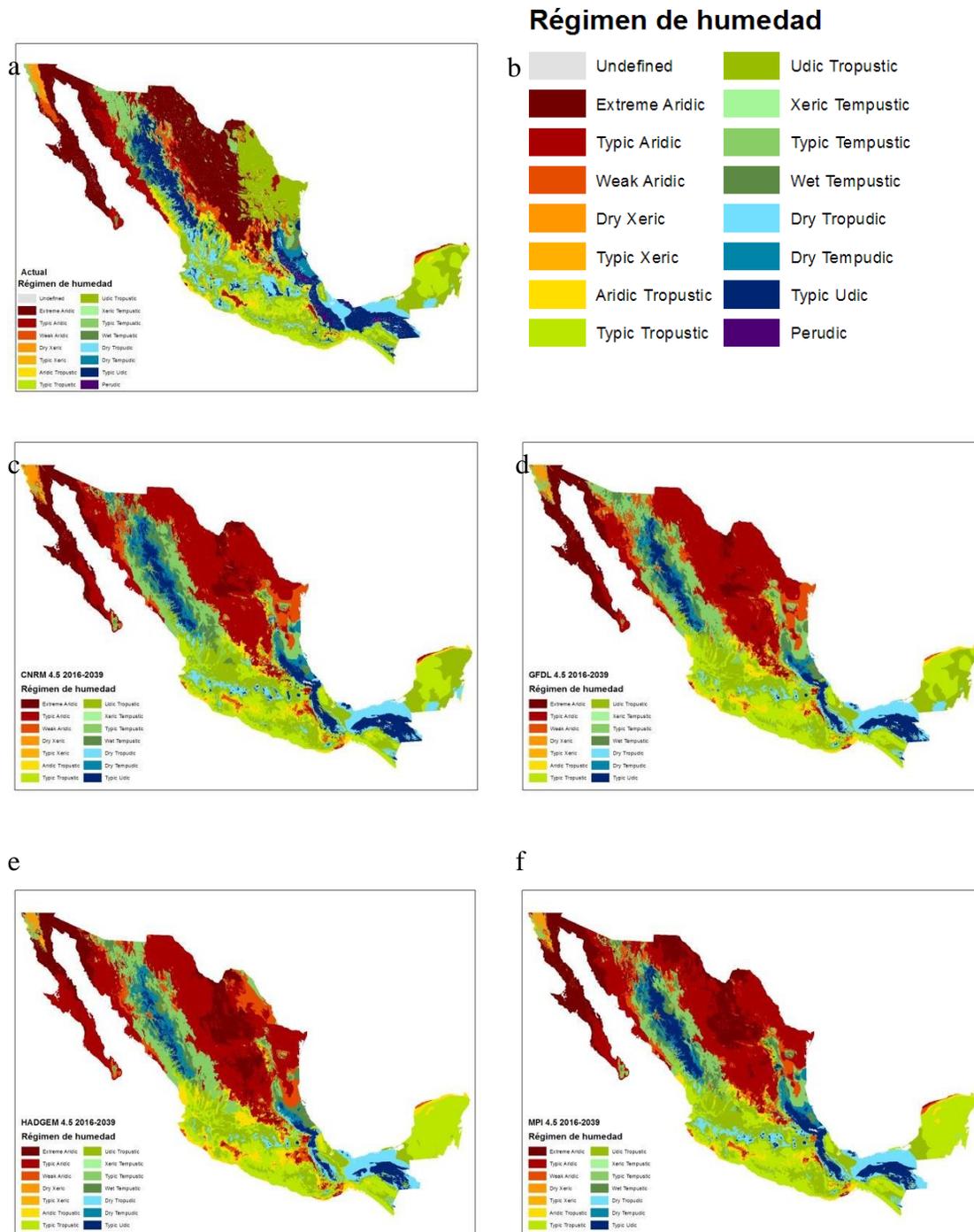


Figura 16 Regímenes de humedad bajo el escenario RCP 4.5 periodo 2016-2039 para la condición actual y los modelos de cambio climático considerados en el estudio (a) Actual, b) Simbología, c) CNRM, d) GFDL, e) HADGEM y f) MPI).

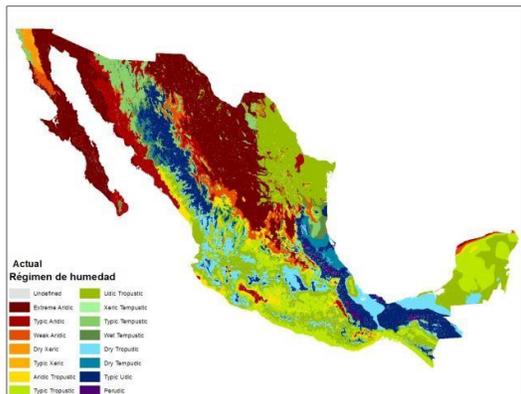
En el cuadro 27 se presentan la estimación de la superficie del país para los regímenes de humedad del suelo para el RCP 4.5 y escenario de tiempo de 2039 – 2069 en donde se observa un aumento en el régimen arídico en un rango de 5.70% a 10.14% y dentro del régimen arídico, el sub régimen Arídico típico en un rango de aumento de 18.65% a 21.27%. El régimen Xerico presenta una disminución en todos los modelos considerados, para el régimen Ustico hay incrementos ligeros para los modelos CNRM y el GFDL y disminuciones ligeras para los modelos HADGEM y el MPI. Para el régimen Udico la disminución es pronunciada con valores cercanos al 7% de la superficie total del país.

En la Figura 17 se muestra la distribución de los regímenes de humedad del país para el escenario de tiempo a mediano plazo y el RCP de 4.5

Cuadro 27 Régimen de humedad del suelo bajo escenarios de cambio climático RCP 4.5 2039-2069 en México

Régimen de humedad	Actual	CNRM	GFDL	HADGEM	MPI
Árido					
	47,592.7	22,365.7	22,365.7	23,534.1	26,000.9
Árido extremo	(24.29)	(11.42)	(11.42)	(12.01)	(13.27)
Árido típico	13,543.1	50,086.1	50,086.1	55,219.1	52,375.8
	(6.91)	(25.56)	(25.56)	(28.18)	(26.73)
Árido débil	8,647.8	8,609.5	8,609.5	10,905.6	10,746.5
	(4.41)	(4.39)	(4.39)	(45.76)	(5.46)
Subtotal Árido	69,783.7	81,061.2	81,061.2	89,658.8	89,123.3
	(35.62)	(41.32)	(41.37)	(45.76)	(45.49)
Xérico					
	1,302.3	891.3	891.3	823.4	964.9
Xérico seco	(0.66)	(0.45)	(0.45)	(0.42)	(0.49)
Xérico típico	137.1	104.5	104.5	103.5	137.8
	(0.07)	(0.05)	(0.05)	(0.05)	(0.07)
Total Xérico	1,439.3	995.8	995.8	926.9	1,102.6
	(0.73)	(0.51)	(0.51)	(0.47)	(0.56)
Ústico					
	5,954.1	6,561.0	6,561.0	9,733.7	13,858.6
Tropústico árido	(3.04)	(3.35)	(3.35)	(4.97)	(7.07)
Tropústico típico	21,123.2	29,996.8	29,996.8	27,882.4	25,819.7
	(10.78)	(15.31)	(15.31)	(14.23)	(13.18)
Tropústico údico	43,460.4	18,976.8	18,976.8	17,914.7	19,479.9
	(22.18)	(9.69)	(9.69)	(9.14)	(9.94)
Tempústico típico	10,070.3	21,475.5	21,475.5	15,975.0	14,726.9
	(5.14)	(10.96)	(10.96)	(8.15)	(7.52)
Tempústico húmedo	3,433.6	9,685.2	9,685.2	6,324.7	7,725.6
	(1.75)	(4.94)	(4.94)	(3.54)	(3.94)
Total Ústico	84,041.6	86,695.3	86,695.3	77,830.4	81,610.6
	(42.89)	(44.25)	(44.25)	(39.72)	(41.65)
Údico					
	15,021.9	9,271.2	9,271.2	11,130.7	8,750.6
Tropúdico seco	(7.67)	(4.73)	(4.73)	(5.68)	(4.47)
Tempúdico seco	3,206.3	6,590.7	6,590.7	6,927.6	4,710.0
	(1.64)	(3.36)	(3.36)	(3.54)	(2.40)
Údico Típico	21,374.0	11,083.5	11,083.5	9,224.5	10,425.0
	(10.91)	(13.75)	(5.66)	(4.71)	(5.32)
Régimen de humedad	Actual	CNRM	GFDL	HADGEM	MPI
Total Údico	39,602.1	26,945.4	26,945.4	27,282.8	23,885.5
	(20.21)	(13.75)	(13.75)	(13.93)	(12.19)
Total Perúdico	1,058.0	227.0	227.0	225.9	202.7
	(0.54)	(0.12)	(0.12)	(0.12)	(0.10)

a)

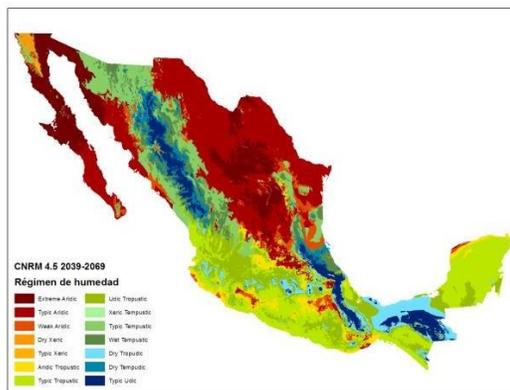


b)

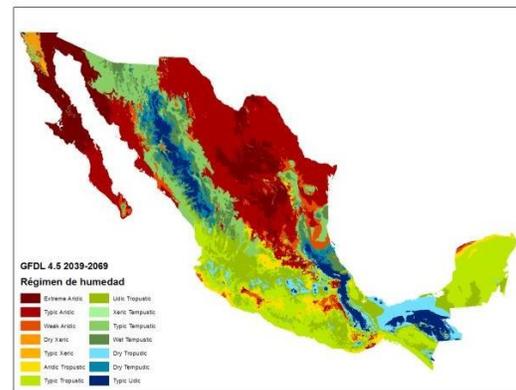
Régimen de humedad



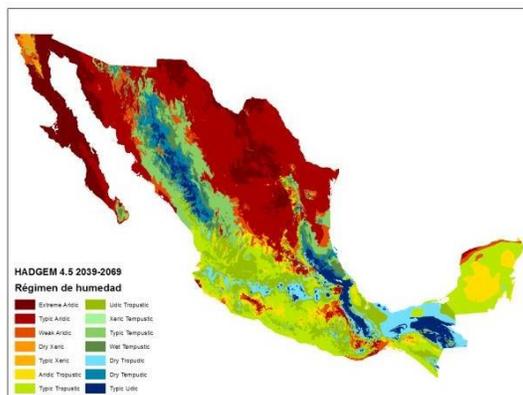
c)



d)



e)



f)

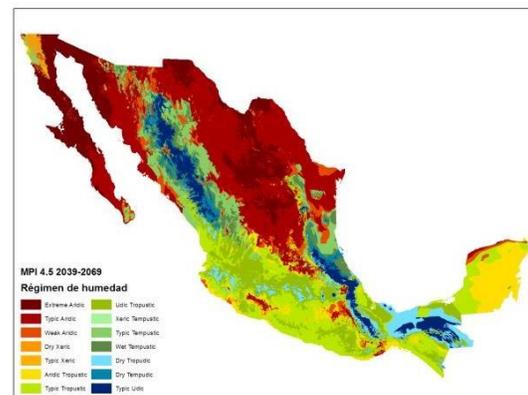


Figura 17 Regímenes de humedad bajo el escenario RCP 4.5 periodo 2039-2069 para la condición actual y los modelos de cambio climático considerados en el estudio (a) Actual, b) Simbología, c) CNRM, d) GFDL, e) HADGEM y f) MPI).

En el cuadro 28 se muestra la superficie de los regímenes de humedad del suelo para el RCP 4.5 y el escenario de tiempo de 2069 – 2099. Se observa un aumento en el régimen arídico en un rango de 8.43% a 9.51% y dentro del régimen arídico, el sub régimen Arídico típico en un rango de aumento de 15.8% a 22.61%. Para el régimen Xerico hay una disminución de la superficie para los modelos CNRM, GFDL y el HADGEM y un ligero incremento para el MPI. Para el régimen Ustico la variación es mínima en todos los modelos y para el régimen Udico la disminución es de entre el 7 al 9% de la superficie total del país.

La Figura 18 muestra la distribución de los regímenes de humedad del suelo en el país para el escenario a largo plazo y el RCP de 4.5

Régimen de humedad	Actual	CNRM Árido	GFDL	HADGEM	MPI
	47,592.70	17,041.30	17,041.30	12,606.50	29,321.90
Árido extremo	-24.29	-8.7	-8.7	-6.43	-14.97
Árido típico	13,543.10	57,843.30	57,843.30	53,564.70	44,484.80
	-6.91	-29.52	-29.52	-27.34	-22.71
Árido débil	8,647.80	11,638.30	11,638.30	20,134.80	14,609.60
	-4.41	-5.94	-5.94	-10.28	-7.46
Subtotal Árido	69,783.70	86,523.00	86,523.00	86,306.00	88,416.30
	-35.62	-44.16	-44.16	-44.05	-45.13
Xérico					
	1,302.30	777.5	777.5	842.2	1,341.20
Xérico seco	-0.66	-0.4	-0.4	-0.43	-0.68
Xérico típico	137.1	96.8	96.8	87.5	161.7
	-0.07	-0.05	-0.05	-0.04	-0.08
Total Xérico	1,439.30	874.3	874.3	929.7	1,502.90
	-0.73	-0.45	-0.45	-0.47	-0.77
Ústico					
	5,954.10	5,696.70	5,696.70	10,446.60	13,271.30
Tropústico árido	-3.04	-2.91	-2.91	-5.33	-6.77
Tropústico típico	21,123.20	27,799.90	27,799.90	26,613.60	26,554.90
	-10.78	-14.19	-14.19	-13.58	-13.55
Tropústico údico	43,460.40	24,719.90	24,719.90	17,614.90	19,491.60
	-22.18	-12.62	-12.62	-8.99	-9.95
Tempústico típico	10,070.30	16,944.20	16,944.20	19,000.90	14,436.20
	-5.14	-8.65	-8.65	-9.7	-7.37
Tempústico xérico	0	0	0	56	0
	0	0	0	-0.03	0
Tempústico húmedo	3,433.60	8,592.90	8,592.90	9,044.40	8,649.40
	-1.75	-4.39	-4.39	-4.62	-4.41
Total Ústico	84,041.60	83,753.60	83,753.60	82,776.40	82,403.30
	-42.89	-42.75	-42.75	-42.25	-42.06
Údico					
	15,021.90	9,000.10	9,000.10	10,220.00	8,784.60
Tropúdico seco	-7.67	-4.59	-4.59	-5.22	-4.48
Tempúdico seco	3,206.30	6,019.00	6,019.00	7,549.00	6,116.20
	-1.64	-3.07	-3.07	-3.85	-3.12
Údico Típico	21,374.00	9,516.80	9,516.80	7,949.70	8,477.20
	-10.91	-4.86	-4.86	-4.06	-4.33
Total Údico	39,602.10	24,535.90	24,535.90	25,715.60	23,378.00
	-20.21	-12.52	-12.52	-13.13	-11.93
Total Perúdico	1,058.00	238.1	238.1	197	202.7
	-0.54	0.12)	0.12)	-0.1	-0.1

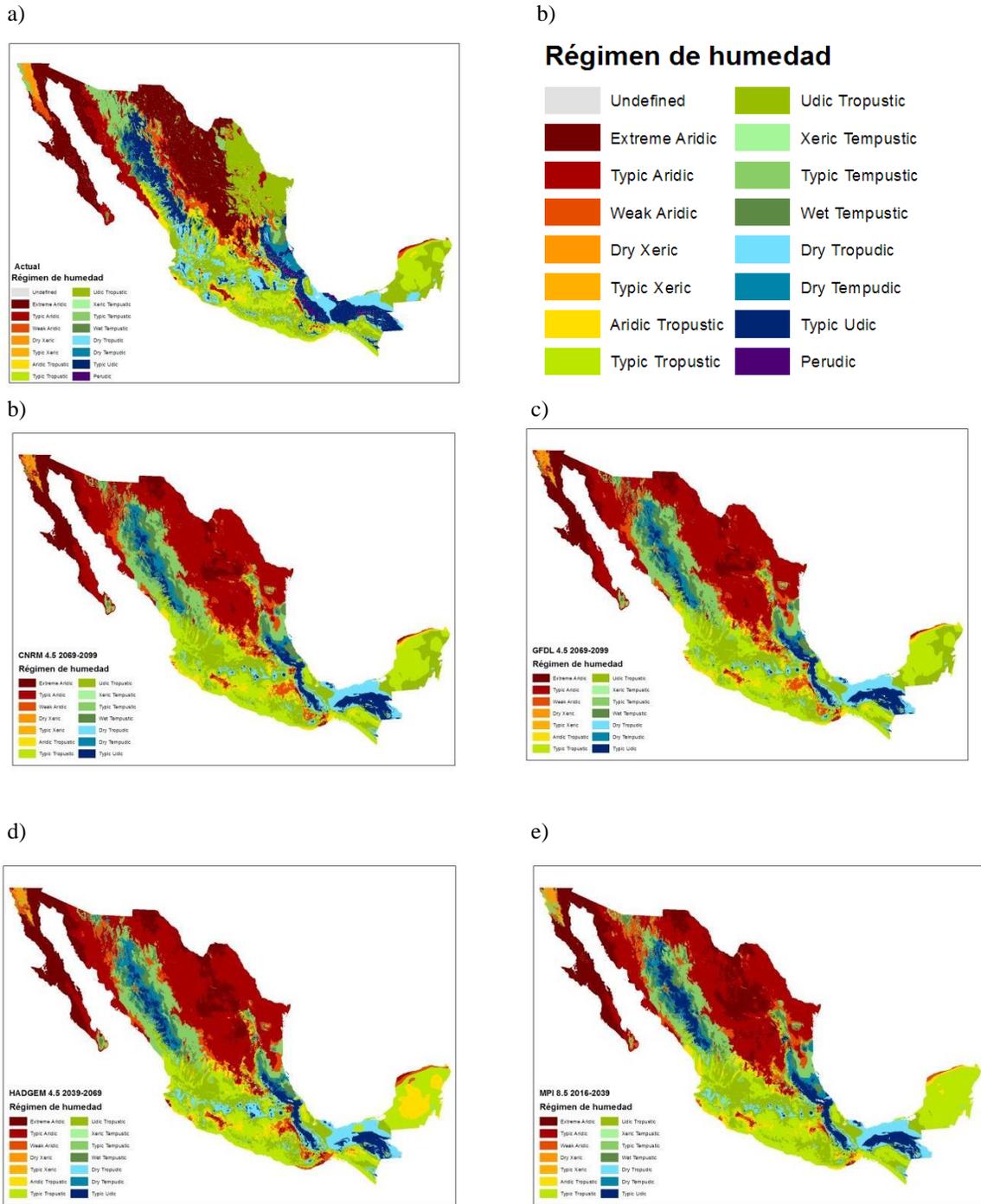


Figura 18 Regímenes de humedad bajo el escenario RCP 4.5 periodo 2069-2099 para la condición actual y los modelos de cambio climático considerados en el estudio (a) Actual, b) Simbología, c) CNRM, d) GFDL, e) HADGEM y f) MPI).

En el cuadro 29 se muestra la superficie de los diferentes regímenes de humedad del suelo para el RCP 8.5 y el escenario de tiempo 2016 – 2039. Se observa un aumento en el régimen arídico en un rango de 5.70% a 10.14% y dentro del régimen arídico, el sub régimen Arídico típico en un rango de aumento de 18.65% a 21.27% del total de la superficie del país. Para el régimen Xerico hay una pequeña disminución en el modelo CNRM y mayor para los modelos HADGEM y el MPI, no así para el modelo GFDL que presenta un ligero incremento en la superficie. Para el régimen Ustico se presenta un incremento en la superficie cercana al 6% del total del país para el modelo CNRM, del 3% para el GFDL y un decremento cercano al 5% para el modelo HADGEM y del 1% para el MPI. Para el régimen Udico se estimó un decremento del 16% para el modelo CNRM, de 5% para el GFDL, del 6% para el MPI y menor a 3% para el HADGEM.

En la Figura 19 se presenta la distribución de los regímenes de humedad del suelo para el escenario a corto plazo para el RCP de 8.5 Watts/m².

Cuadro 29 Régimen de humedad del suelo bajo escenarios de cambio climático RCP 8.5 2016-2039 en México

Régimen de humedad	Actual	CNRM	GFDL	HADGEM	MPI
Árido					
Árido extremo	47,592.70	29,340.20	11,516.10	22,607.00	27,071.70
	-24.29	-14.98	-5.88	-11.54	-13.82
Árido típico	13,543.10	31,348.10	45,158.40	50,982.30	47,762.50
	-6.91	-16	-23.05	-26.02	-24.38
Árido débil	8,647.80	14,093.10	17,544.10	13,825.90	10,735.40
	-4.41	-7.19	-8.95	-7.06	-5.48
Subtotal Árido	69,783.70	74,781.40	74,218.60	87,415.10	85,569.60
	-35.62	-38.17	-37.88	-44.62	-43.67
Xérico					
Xérico seco	1,302.30	1,287.50	1,347.60	837.4	908.7
	-0.66	-0.66	-0.69	-0.43	-0.46
Xérico típico	137.1	107	142.2	174	119.5
	-0.07	-0.05	-0.07	-0.09	-0.06
Subtotal Xérico	1,439.30	1,394.60	1,489.80	1,011.40	1,028.30
	-0.73	-0.71	-0.76	-0.52	-0.52
Ústico					
Tropústico arídico	5,954.10	8,946.40	4,824.20	4,635.40	5,655.80
	-3.04	-4.57	-2.46	-2.37	-2.89
Tropústico típico	21,123.20	41,705.20	30,025.80	29,159.20	33,107.80
	-10.78	-21.29	-15.33	-14.88	-16.9
Tropústico údico	43,460.40	14,188.50	21,765.30	18,175.00	21,099.3.
	-22.18	-7.24	-11.11	-9.28	-10.77
Tempústico típico	10,070.30	22,739.80	20,560.00	15,387.50	14,914.00
	-5.14	-11.91	-10.49	-7.85	-7.61
Tempustico húmedo	3,433.60	7,878.00	12,968.40	6,493.50	6,464.70
	-1.75	-4.02	-6.62	-3.31	-3.3
Total Ústico	84,041.60	95,457.80	90,143.50	73,896.80	81,241.70
	-42.89	-48.72	-46.01	-37.72	-41.47
Údico					
Tropúdico seco	15,021.90	9,914.90	9,852.00	12,980.70	9,593.10
	-7.67	-5.06	-5.03	-6.63	-4.9
Tempúdico seco	3,206.30	5,961.90	6,362.40	5,998.30	5,724.70
	-1.64	-3.04	-3.25	-3.06	-2.92
Údico Típico	21,374.00	8,142.10	13583.2	14,338.50	12,503.30
	-10.91	-4.16	-6.93	-7.32	-6.38
Total Údico	39,602.10	8,142.10	29,797.60	33,317.40	27,821.20
	-20.21	-4.16	-15.21	-17.01	-14.2
Total Perúdico	1,058.00	272.1	275.2	284.1	264.1
	-0.54	-0.14	-0.14	-0.14	-0.13

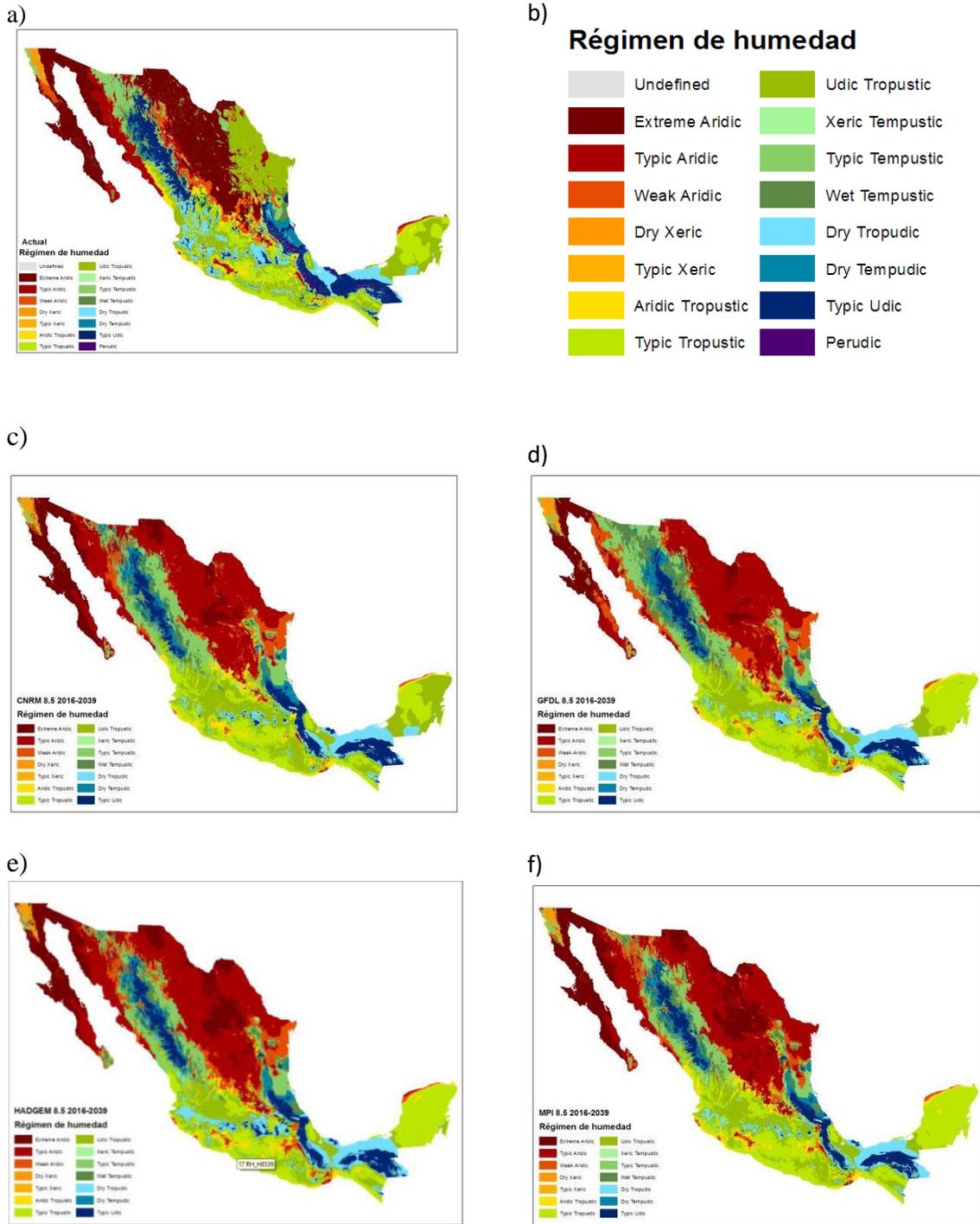


Figura 19 Regímenes de humedad bajo el escenario RCP 8.5 periodo 2016-2039 para la condición actual y los modelos de cambio climático considerados en el estudio (a) Actual, b) Simbología, c) CNRM, d) GFDL, e) HADGEM y f) MPI).

En el cuadro 30 se muestra la superficie y proporción de los regímenes de humedad el suelo para el RCP 8.5 y el escenario de tiempo de 2039 – 2069. Se observa un aumento en el régimen arídico en un rango de 8.81% a 12.49% y dentro del régimen arídico, el sub régimen Arídico típico en un rango de aumento de 21.02% a 24.85% del total de la superficie del país. Para el régimen Xerico en todos los modelos se presentó una disminución en la superficie de 0.16 a 0.30. Para el régimen Ústico para los modelos CNRM y GFDL la variación fue mínima, para el modelo HADGEM la disminución fue de 3.85% del total de la superficie del país, pero para el modelo MPI, ya disminución fue de 39.77%. Para el régimen Údico se presenta una disminución generalizada en los modelos con valores que van de 7.72 a 9.21 % en los modelos CNRM, GFDL y el HADGEM y para el MPI la disminución es muy pronunciada con 16.91% del total del país.

Cuadro 30 Régimen de humedad del suelo bajo escenarios de cambio climático RCP 8.5 2039-2069 en México

Régimen de humedad	Actual	CNRM	GFDL	HADGEM	MPI
Árido					
	47,592.70	17,954.80	20,848.40	19,375.30	26,024.90
Árido extremo	-24.29	-9.16	-10.64	-9.89	-13.3
Árido típico	13,543.10	56,207.10	54,724.40	62,223.50	54,763.20
	-6.91	-28.69	-27.93	-31.76	-27.95
Árido débil	8,647.80	12,891.50	13,795.80	12,327.20	13,422.50
	-4.41	-6.58	-7.04	-6.29	-6.85
Subtotal Árido	69,783.70	87,053.40	89,368.50	93,926.00	94,250.60
	-35.62	-44.43	-45.61	-47.94	-48.11
Xérico					
	1,302.30	913	838.3	755.8	972.6
Xérico seco	-0.66	-0.47	-0.43	-0.39	-0.5
Xérico típico	137.1	84.8	76.3	84.9	135.7
	-0.07	-0.04	-0.04	-0.04	-0.07
	1,439.30	997.8	914.6	840.7	1,108.30
Subtotal Xérico	-0.73	-0.51	-0.47	-0.43	-0.57
Ústico					
	5,954.10	8,646.80	8,964.50	16,556.60	16,514.50
Tropústico árido	-3.04	-4.41	-4.58	-8.45	-8.43
Tropústico típico	21,123.20	32,006.20	31,811.30	23,748.20	27,916.90
	-10.78	-16.34	-16.24	-12.12	-14.25
Tropústico údico	43,460.40	19,866.70	15,595.20	15,427.90	16,365.50
	-22.18	-10.14	-7.96	-7.87	-8.35
Tempústico típico	10,070.30	17,600.60	19,381.00	15,106.00	14,112.60
	-5.14	-8.98	-9.89	-7.71	-7.2
Tempustico húmedo	3,433.60	7,448.60	8,148.90	5,647.10	0
	-1.75	-3.8	-4.16	-2.88	0
	84,041.60	85,568.90	83,900.90	76,485.70	6,121.00
Subtotal Ústico	-42.89	-43.67	-42.82	-39.04	-3.12
Údico					
	15,021.90	8,174.90	8,695.90	9,986.00	7,946.20
Tropúdico seco	-7.67	-4.17	-4.44	-5.1	-4.06
Tempúdico seco	3,206.30	5,308.60	6,063.40	6,379.60	4,929.50
	-1.64	-2.71	-3.09	-3.26	-2.52
Údico Típico	21,374.00	8,590.30	6,789.20	8,097.60	6,464.40
	-10.91	-4.38	-3.47	-4.13	-3.3
	39,602.10	22,073.80	21,548.40	24,463.20	19,340.10
Subtotal Údico	-20.21	-11.27	-11	-12.49	-9.87
	1,058.00	230.9	192.4	209.2	0
Subtotal Perúdico	-0.54	-0.12	-0.1	-0.11	0

En la figura 20 se presenta la distribución de los regímenes de humedad del suelo para el escenario de tiempo a mediano plazo y un RCP de 8.5 Watts/m².

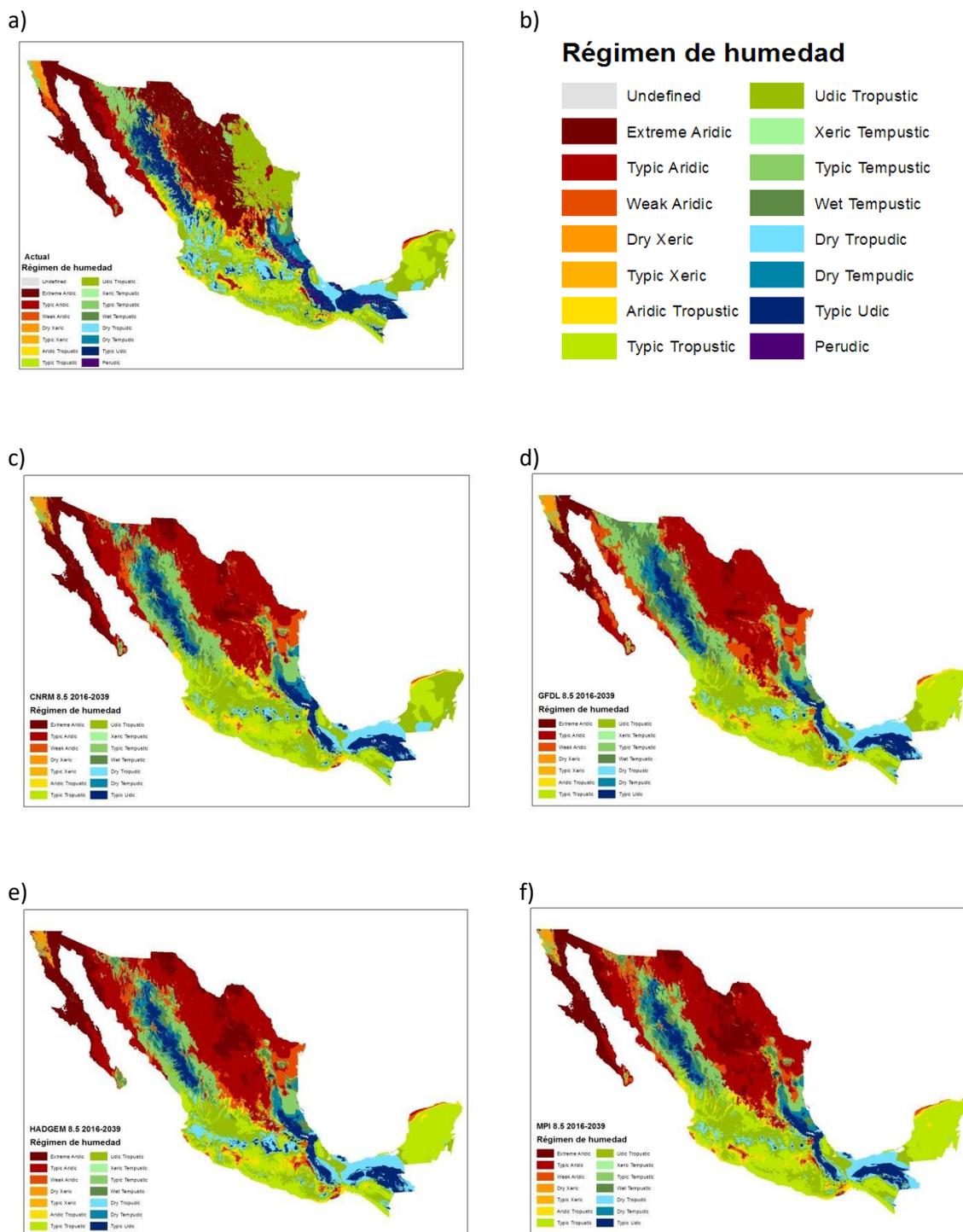


Figura 20 Regímenes de humedad bajo el escenario RCP 8.5 periodo 2039-2069 para la condición actual y los modelos de cambio climático considerados en el estudio (a) Actual, b) Simbología, c) CNRM, d) GFDL, e) HADGEM y f) MPI).

En el cuadro 31 se muestra la superficie y proporción de los regímenes de humedad el suelo para el RCP 8.5 y el escenario de tiempo de 2069 – 2099. Se observa un aumento en el régimen arídico en un rango de 11.62% a 24.18% y dentro del régimen arídico, el sub régimen Arídico típico en un rango de aumento de 17.37% a 30.26%. Para el régimen Xerico en todos los modelos se presentó una disminución en la superficie de 0.16 a 0.31.

Para el régimen Ustico para los modelos CNRM, GFDL y MPI la variación fue mínima, para el modelo HADGEM la disminución fue de 10.77% del total de la superficie del país. Para el régimen Udico se presenta una disminución generalizada en los modelos con valores que van de 10.34 a 12.68 % del total del país.

Cuadro 31 Régimen de humedad del suelo bajo escenarios de cambio climático RCP 8.5 y escenario de tiempo 2069- 2099 en México

Régimen de humedad	Actual	CNRM	GFDL	HADGEM	MPI
Árido					
	47,592.70	10,774.40	25,037.60	20,168.90	26,024.90
Árido extremo	-24.29	-5.5	-12.78	-10.29	13.3
	13,543.10	65,728.80	47,569.40	72,823.20	54,763.20
Árido típico	-6.91	-33.55	-24.28	-37.17	-27.95
	8,647.80	16,568.70	19,952.00	24,170.10	13,422.50
Árido débil	-4.41	-8.46	-10.18	-12.34	-6.85
Subtotal Árido	69,783.70	93,071.90	92,559.00	117,162.20	94,250.60
	-35.62	-47.5	-47.24	-59.8	-48.11
Xérico					
	1,302.30	878.3	768	824.8	972.6
Xérico seco	-0.66	-0.45	-0.39	-0.42	-0.5
	137.1	89.3	64	66.6	135.7
Xérico típico	-0.07	-0.05	-0.03	-0.03	-0.07
	1,439.30	967.6	832.1	891.4	1,108.30
Total Xérico	-0.73	-0.49	-0.42	-0.45	-0.57
Ústico					
	5,954.10	15,910.80	17,567.40	14,731.70	16,514.50
Tropústico árido	-3.04	-8.12	-8.97	-7.52	-8.43
	21,123.20	28,678.00	24,446.80	22,948.00	27,916.90
Tropústico típico	-10.78	-14.64	-12.48	-11.71	-14.25
	43,460.40	16,428.20	10,469.50	11,766.20	16,365.50
Tropústico údico	-22.18	-8.38	-5.34	-6.01	-8.35
	10,070.30	17,882.10	22,916.10	9,057.50	14,112.60
Tempústico típico	-5.14	-9.13	-11.7	-4.62	-7.2
	0	0	0	27.2	0
Tempústico xérico	0	0	0	-0.01	0
	3,433.60	6,842.80	200.1	4,394.40	6,121.00
Tempustico húmedo	-1.75	-3.49	-0.1	-2.24	-3.12
Total Ústico	84,041.60	85,741.90	84,872.20	62,924.90	81,030.50
	-42.89	-43.76	-43.32	-32.12	-41.36
Údico					
	15,021.90	7,289.80	7,407.90	7,674.80	7,946.20
Tropúdico seco	-7.67	-3.72	-3.78	-3.92	-4.06
	3,206.30	3,293.10	5,601.60	4,030.90	4,929.50
Tempúdico seco	-1.64	-1.68	-2.86	-2.06	-2.52
	21,374.00	5,365.50	4,460.30	3,048.20	6,464.40
Údico Típico	-10.91	-2.74	-2.28	-1.56	-3.3
Total Údico	39,602.10	158,948.40	17,469.80	14,753.80	19,340.10
	-20.21	-8.14	-8.92	-7.53	-9.87
	1,058.00	195	191.8	192.5	195.3
Total Perúdico	-0.54	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1

En la figura 21 se presenta la distribución de los regímenes de humedad del suelo para el escenario de tiempo a largo plazo y un RCP de 8.5 Watts/m².

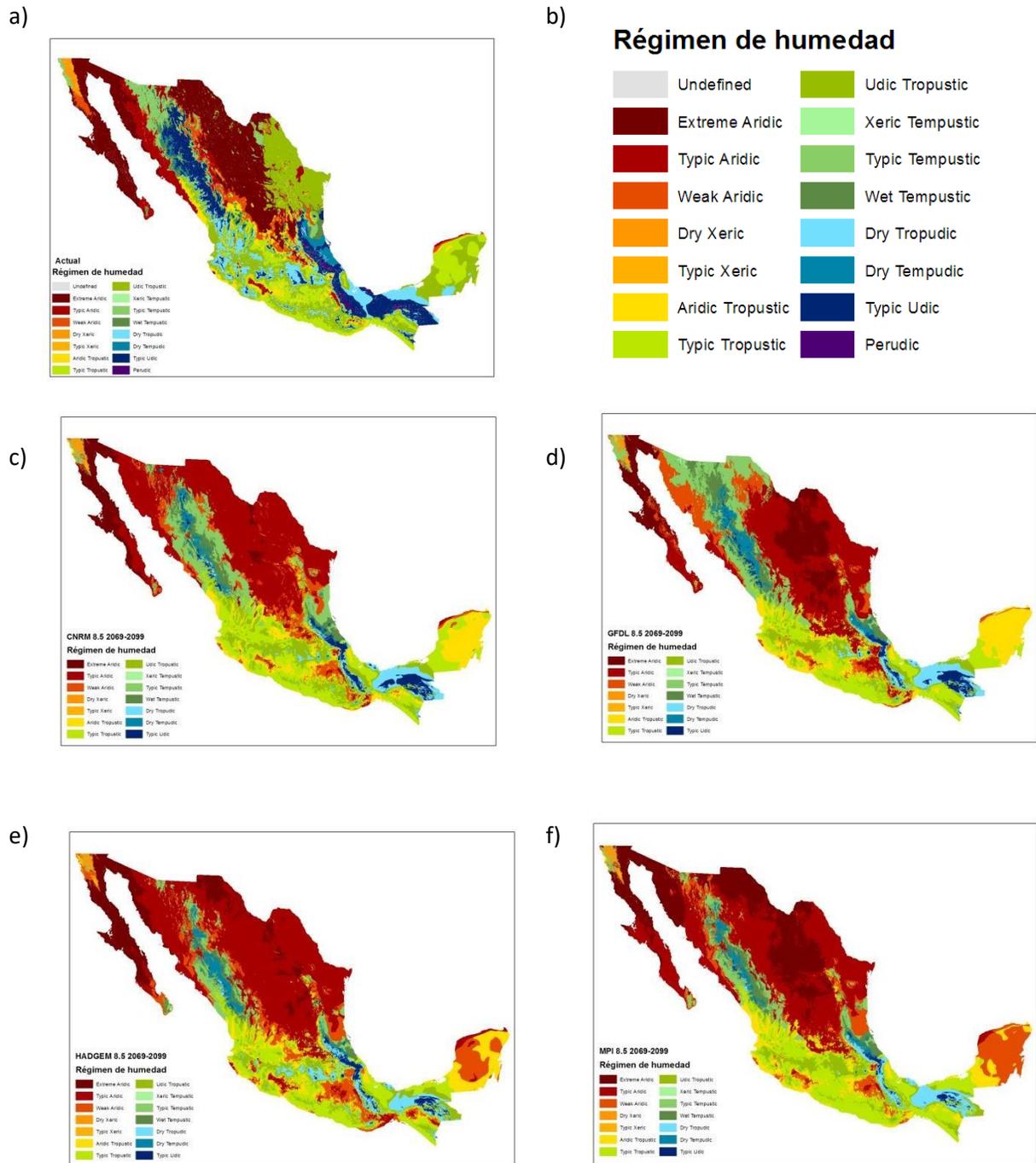


Figura 21 Regímenes de humedad bajo el escenario RCP 8.5 periodo 2069-2099 para la condición actual y los modelos de cambio climático considerados en el estudio (a) Actual, b) Simbología, c) CNRM, d) GFDL, e) HADGEM y f) MPI).

5.2 Régimen de temperaturas del Suelo

5.2.1 Régimen de temperatura actual

Aunque en México se estima que se presentan todos los regímenes de temperatura del suelo, es el régimen de temperatura Térmico el que tiene mayor superficie en el país (44.37%), seguido por el régimen Hipertérmico con un 40.52% y el Mésico con un 6.47% de la superficie del país (Cuadro 32). En la Figura 22 se muestra la distribución de los regímenes de temperatura del suelo actuales.

Cuadro 32 Superficie y proporción del Régimen de Temperatura de los suelos actual en México

Régimen de temperatura	Superficie (Ha)	Porcentaje
Pergélico	2,125.07	0.00%
Cryico	83,213.57	0.04%
Frigido	45,490.31	0.02%
Mésico	12'494,548.69	6.47%
Isomésico	2'444,733.93	1.27%
Isotérmico	6'481,811.69	3.35%
Térmico	85'731,905.41	44.37%
Isohipertérmico	7'631,279.55	3.95%
Hipertérmico	78'289,443.82	40.52%
Total general	193'204,552.00	100.00%

5.2.2 Régimen de temperatura del suelo bajo escenarios de cambio climático

En el cuadro 33 se presentan la superficie y proporción de los regímenes de temperatura del suelo para el RCP 4.5 Watts/m² para el escenario de tiempo de 2016 – 2039. Se observa que los valores estimados para el escenario de cambio climático con los diferentes modelos no presentan grandes diferencias con los actuales. En el régimen térmico la superficie actual es de 44.37% del país y los rangos con cambio climático van de 40.95% a 45.00%. En la Figura 23 se muestra la distribución de los regímenes de temperatura del suelo bajo el escenario de cambio climático a corto plazo y con el RCP de 4.5.

Cuadro 33 Los regímenes de temperatura bajo el escenario de cambio climático RCP 4.5 del 2016 – 2039.

Régimen de temperatura	Actual	CNRM	GFDL	HADGEM	MPI
Pergélico	2,125.07 (0.00)	328.82 (0.00)	125.07 (0.00)	125.07 (0.00)	2,125.00 (0.00)
Cryico	83,213.57 (0.04)	93,596.75 (0.05)	78,138.76 (0.04)	56,300.98 (0.03)	80,370.57 (0.04)
Frigido	45,490.31 (0.02)	206.18 (0.00)	32,236.81 (0.02)	0.00 (0.00)	35,736.63 (0.02)
Mésico	12'494,548.69 (6.47)	9'190,731.74 (4.76)	12'126,500.6 (6.28)	10'151,691.0 (5.26)	12'121,602.00 (6.28)
Isomésico	2'444,733.93 (1.27)	1'461,047.44 (0.76)	2'261,253.76 (1.17)	1'137,920.26 (0.59)	2'363,934.32 (1.22)
Isotérmico	6'481,811.69 (3.35)	6'427,627.99 (3.33)	6'594,325.8 (3.41)	5'275,560.97 (2.74)	6'561,766.63 (3.40)
Térmico	85'731,905.41 (44.37)	79'108,100.70 (40.95)	85'556,882.2 (44.29)	86'794,174.3 (45.00)	85'677,696.7 (44.36)
Isohipertérmico	7'631,279.55 (3.95)	16'257,341.00 (8.41)	7'539,087.78 (3.90)	15'191,028.5 (7.88)	7'470,769.02 (3.87)
Hipertérmico	78'289,443.82 (40.52)	80'665,476.50 (41.75)	78'967,048.1 (40.88)	74'250,642.4 (38.5)	78'843,205.8 (40.82)

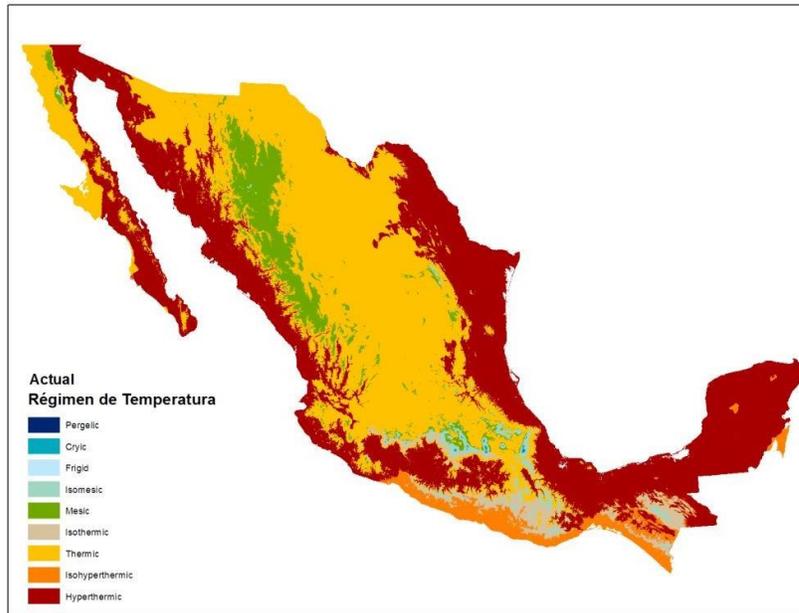
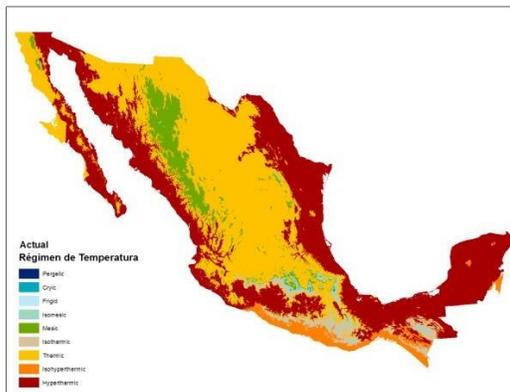


Figura 22 Regímenes de temperatura del suelo Actual

a



b

Régimen de Temperatura



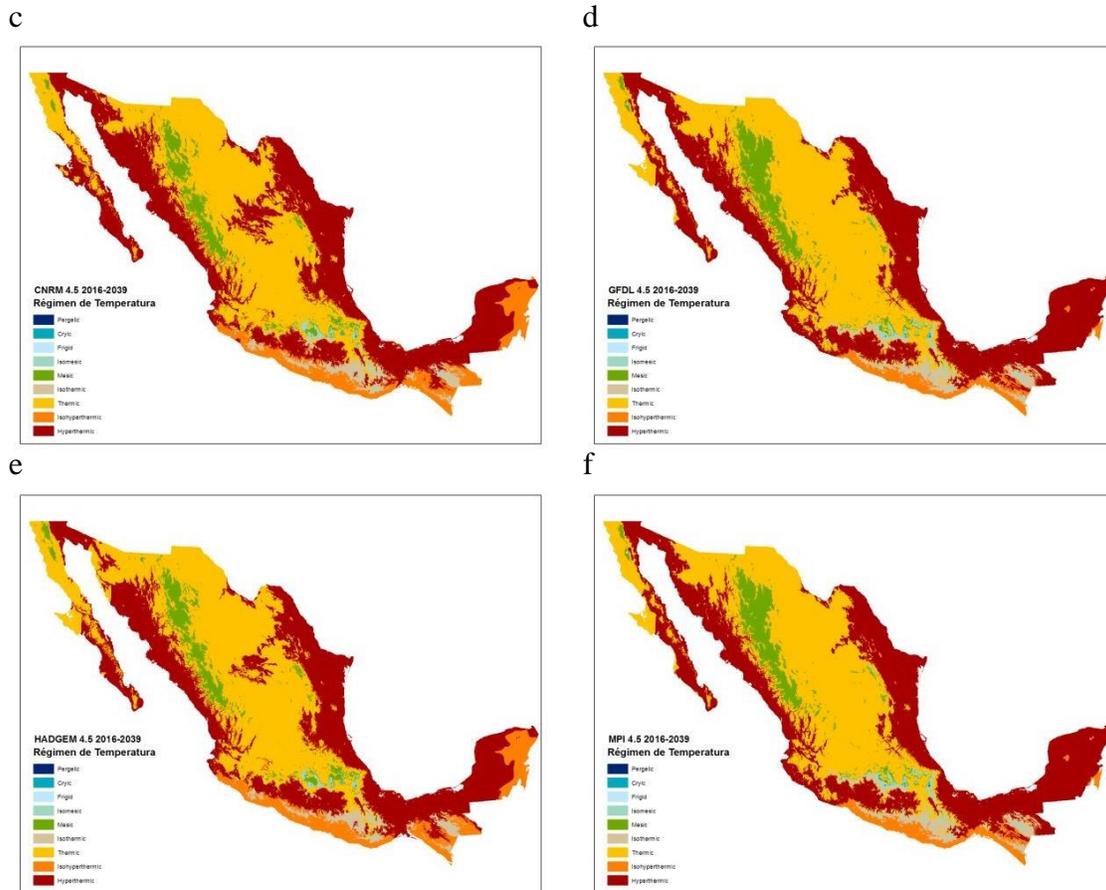


Figura 23 Regímenes de temperatura bajo el escenario RCP 4.5 periodo 2016-2039 para la condición actual y los modelos de cambio climático considerados en el estudio (a) Actual, b) Simbología, c) CNRM, d) GFDL, e) HADGEM y f) MPI).

En el cuadro 34 se reportan los regímenes térmicos del suelo para el RCP 4.5 y el escenario de tiempo de 2039 – 2069. Se observa que los cambios de la superficie de los diferentes regímenes térmicos del suelo estimados con los diferentes modelos no difieren considerablemente de los valores actuales, en el régimen térmico la superficie actual es de 44.37% del país y los rangos con cambio climático van de 36.85% a 44.27%, sin embargo, se observa incrementos en la superficie con régimen hipertérmico.

Cuadro 34 Los regímenes de temperatura bajo el escenario de cambio climático para un RCP 4.5 del y escenario de tiempo de 2039 – 2069.

Régimen de temperatura	Actual	CNRM	GFDL	HADGEM	MPI
Pergélico	2,125.07 0.00%	2,125.07 0	2,125.07 0	0 0	2,125.07 0
Cryico	83,213.57 -0.04%	55,740.62 -0.03	76,447.56 -0.04	31,584.02 -0.02	78,089.08 -0.04
Frigido	45,490.31 -0.02%	206.18 0	35,731.03 -0.02	0 0	52,737.36 -0.03
Mésico	12'494,548.69 -6.47%	5'408,916.6 -2.8	12'124,038.7 -6.28	50'67,894.51 -2.63	13'886,961.7 -7.19
Isomésico	2'444,733.93 -1.27%	1'368,704.42 -0.71	2'232,357.18 -1.16	880,110.04 -0.46	3'037,048.52 -1.57
Isotérmico	6'481,811.69 -3.35%	5'985,856.02 -3.1	6'594,614.65 -3.41	4'976,416.77 -2.58	9'474,755.95 -4.91
Térmico	85'731,905.41 -44.37%	71'196,676.8 -36.85	85'505,090.3 -44.27	74'314,337.5 -38.59	83'893,617.4 -43.43
Isohipertérmico	7'631,279.55 -3.95%	16'224,839.9 -8.4	7'539,087.78 -3.9	18223003 -9.46	20'576,036.2 -10.65
Hipertérmico	78'289,443.82 -40.52%	92'963,092.6 -48.12	86'587,193.8 -44.83	89'059,021.3 -46.28	62'156,227.6 -32.18

La Figura 24 se muestran la distribución de los regímenes de temperatura del suelos para el escenario de cambio climático para un RCP de 4.5 Watts/m² y un horizonte de tiempo a mediano plazo.

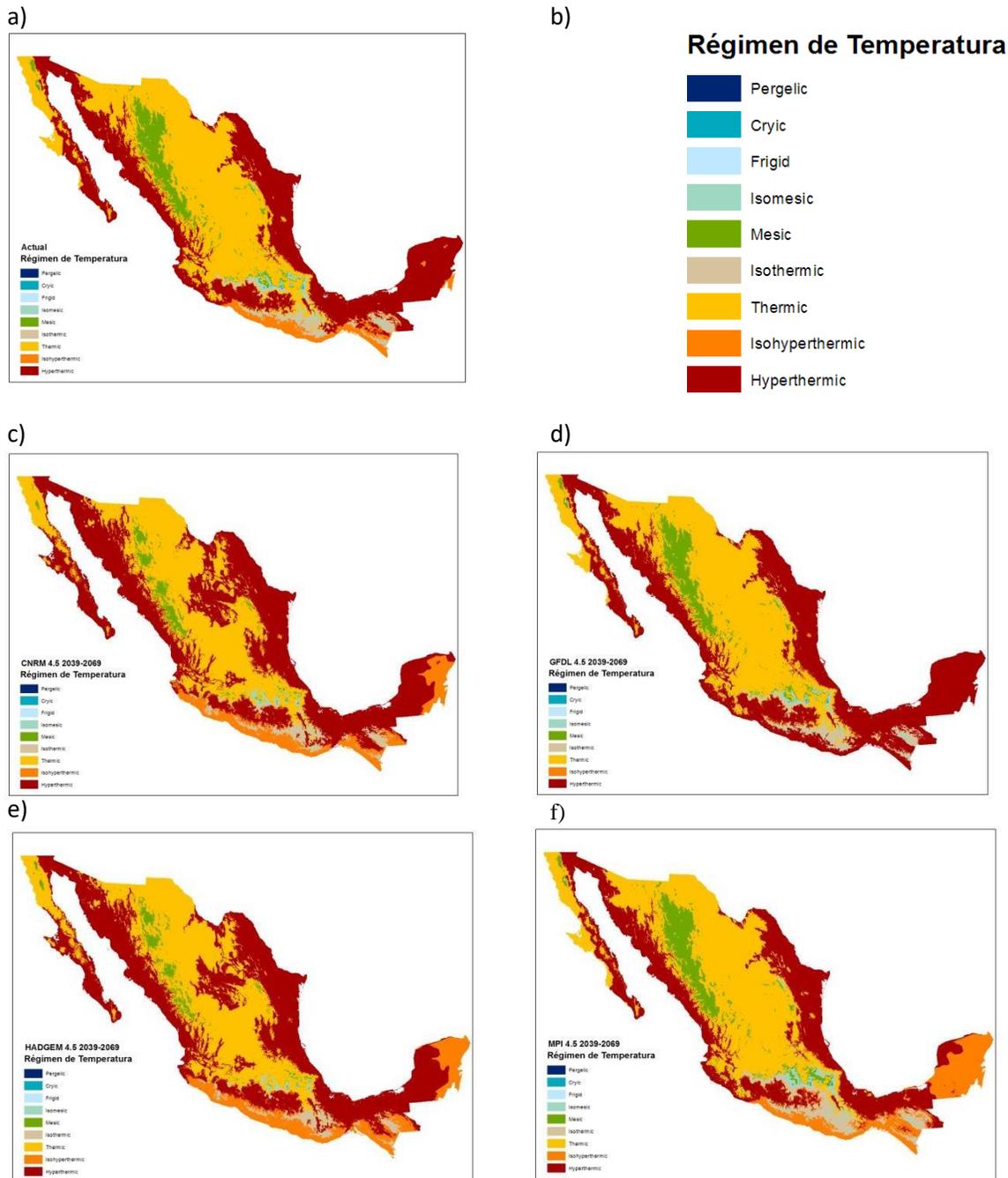


Figura 24 Regímenes de temperatura bajo el escenario RCP 4.5 periodo 2039-2069 para la condición actual y los modelos de cambio climático considerados en el estudio (a) Actual, b) Simbología, c) CNRM, d) GFDL, e) HADGEM y f) MPI).

En el cuadro 35 para el RCP 4.5 2069 – 2099 se puede observar que los valores actuales de la superficie están dentro de los rangos de los escenarios con cambio climático, por ejemplo: en el régimen térmico la superficie actual es de 44.37% del país y los rangos con cambio climático van de 28.26% a 44.73%, sin embargo, se observa cambios en la superficie con régimen hipertérmico que va de -2.15 a 19.25%.

Cuadro 35 Los regímenes de temperatura bajo el escenario de cambio climático RCP 4.5 del 2069 – 2099.

Régimen de temperatura	Actual	CNRM	GFDL	HADGEM	MPI
Pergélico	2,125.07 (0.00%)	2,125.07 (0.00)	2,125.07 (0.00)	0.00 (0.00)	2,125.07 (0.00)
Cryico	83,213.57 (0.04%)	78,162.84 (0.04)	105,222.76 (0.03)	26,196.62 (0.01)	77,970.52 (0.04)
Frigido	45,490.31 (0.02%)	51,662.84 (0.03)	29,944.42 (0.02)	0.00 (0.00)	32,818.47 (0.02)
Mésico	12'494,548.69 (6.47%)	13'362,815.7 (6.92)	11'982,692.3 (6.20)	1'583,180.69 (0.82)	12'116,369.6 (6.27)
Isoméxico	2'444,733.93 (1.27%)	2'294,825.24 (1.19)	2'213,461.66 (1.15)	510,596.18 (0.26)	2'206,428.33 (1.14)
Isotérmico	6'481,811.69 (3.35%)	6'340,550.41 (3.28)	7'501,244.00 (3.88)	3'619,256.41 (1.87)	6'448,135.87 (3.34)
Térmico	85'731,905.41 (44.37%)	86'402,647.0 (44.73)	84'691,384.1 (43.85)	54'584,289.6 (28.26)	85'608,421.5 (44.32)
Isohipertérmico	7'631,279.55 (3.95%)	10'511,065.9 (5.44)	8'179,434.84 (4.23)	17'377,806.7 (9.00)	7'151,322.27 (3.70)
Hipertérmico	78'289,443.82 (40.52%)	74'113,368.5 (38.37)	78'452,079.9 (40.62)	115'456,310.00 (59.77)	79'514,007.2 (41.17)

La Figura 25 se muestran la distribución de los regímenes de temperatura del suelos para el escenario de cambio climático para un RCP de 4.5 Watts/m2 y un horizonte de tiempo a largo plazo.

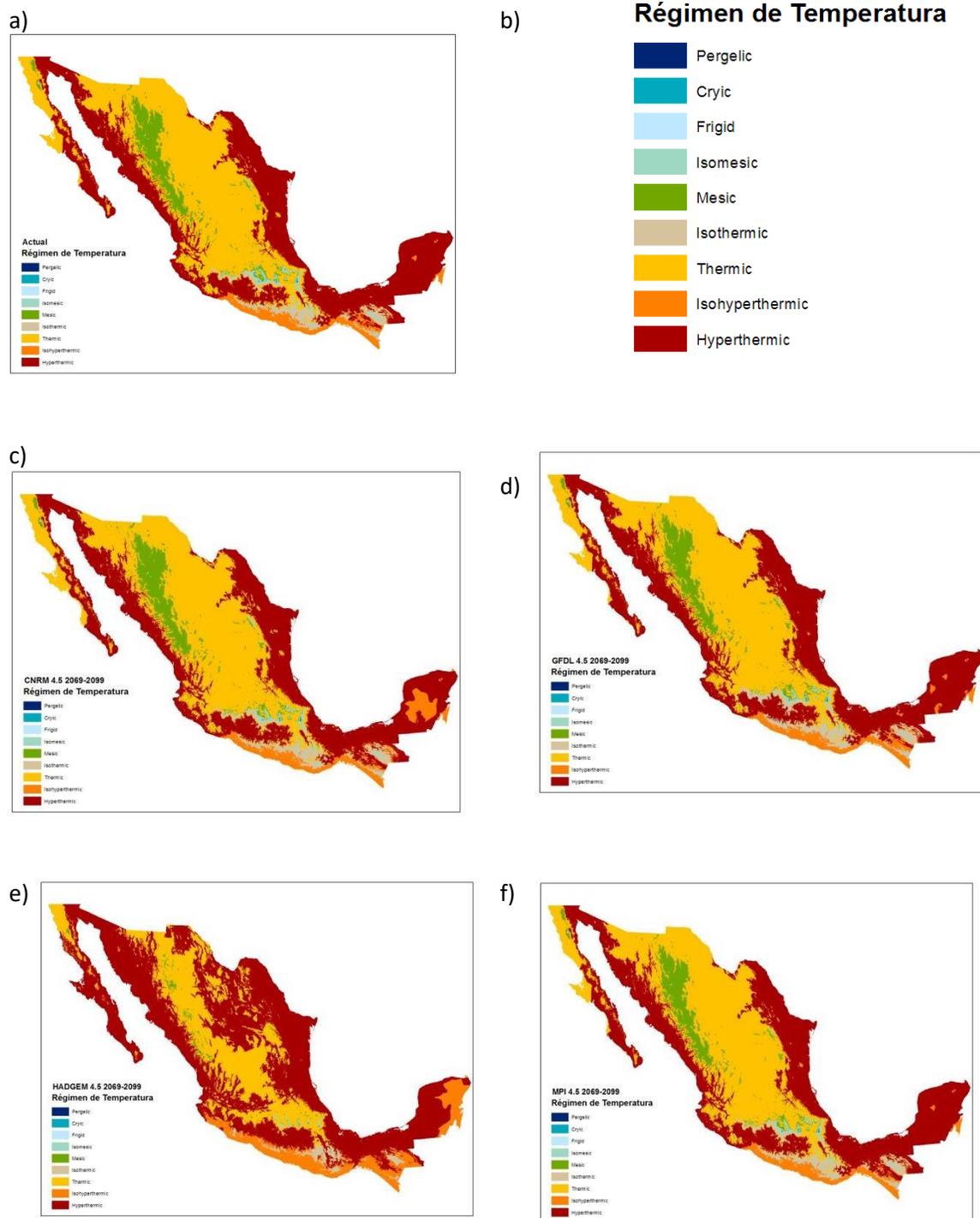


Figura 25 Regímenes de temperatura bajo el escenario RCP 4.5 periodo 2069-2099 para la condición actual y los modelos de cambio climático considerados en el estudio (a) Actual, b) Simbología, c) CNRM, d) GFDL, e) HADGEM y f) MPI).

En el cuadro 36 se reporta la superficie y proporciones de los diferentes regímenes térmicos del suelo para el RCP 8.5 y el escenario de tiempo de 2016 – 2039 al igual que en los escenarios de RCP de 4.5 en general se observa que la superficie de los rangos de los escenarios con cambio climático presentan pocas variaciones con respecto a la condición actual. El régimen térmico la superficie actual es de 44.37% del país y los rangos con cambio climático van de 37.73% a 44.50%, sin embargo, para el régimen hipertérmico en los modelos CNRM y GFDL hay poca variación con respecto al actual, pero para el modelo HADGEM se incrementa en 3.05% y para el MPI en 6.56% del total de la superficie del país.

Cuadro 36 Los regímenes de temperatura bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5 del 2016 – 2039.

Régimen de temperatura	Actual	CNRM	GFDL	HADGEM	MPI
Pergélico	2,125.07 (0.00%)	2,125.07 (0.00)	2,125.07 (0.00)	125.07 (0.00)	2,125.07 (0.00)
Cryico	83,213.57 (0.04%)	81,564.93 (0.04)	80,938.23 (0.04)	54,571.35 (0.03)	80,353.45 (0.04)
Frigido	45,490.31 (0.02%)	36,050.78 (0.02)	36,336.05 (0.02)	0.00 (0.00)	52,817.99 (0.03)
Mésico	12'494,548.69 (6.47%)	12'315,059.7 (6.37)	12'175,774.7 (6.30)	5'881,549.88 (3.05)	13'919,213.1 (7.21)
Isoméxico	2'444,733.93 (1.27%)	2'441,332.10 (1.27)	2'302,559.64 (1.19)	823,129.64 (0.43)	3'145,473.43 (1.65)
Isotérmico	6'481,811.69 (3.35%)	6'775,763.33 (3.51)	6'620,039.87 (3.43)	4'590,453.63 (2.38)	9'501,041.55 (4.92)
Térmico	85'731,905.41 (44.37%)	85'454,074.1 (44.23)	85'695,994.5 (44.37)	72'654,639.7 (37.73)	84'017,293.3 (43.50)
Isohipertérmico	7'631,279.55 (3.95%)	7'546,370.94 (3.91)	7'527,116.96 (3.90)	13'584,166.5 (7.05)	20'294,644.4 (10.51)
Hipertérmico	78'289,443.82 (40.52%)	78'539,770.5 (40.65)	78'716,704.2 (40.75)	94'963,731.4 (49.32)	62'144,626.8 (32.17)

En la Figura 26 se muestra la distribución de los regímenes de temperatura del suelo para este escenario de cambio climático en cada uno de los modelos del estudio.

En el cuadro 37 se reporta la superficie y proporción de los regímenes de temperatura del suelo para el RCP 8.5 y el escenario de tiempo de 2039 – 2069. El régimen mesico presenta muy poca variación para los modelos CNRM, GFDL y MPI, pero para el modelo HADGEM presenta una disminución de 6.17%. El régimen térmico la superficie actual es de 44.37% del país y los rangos con cambio climático para los modelo CNRM, GFDL y MPI la variación es mínima, pero también para el modelo HADGEM se presenta una disminución de 19.26% del total de la superficie del país. Para el régimen hipertérmico en los modelos CNRM, GFDL y MPI no presenta variaciones considerables pero en el modelo HADGEM el incremento es de 22.36% de la superficie total del país.

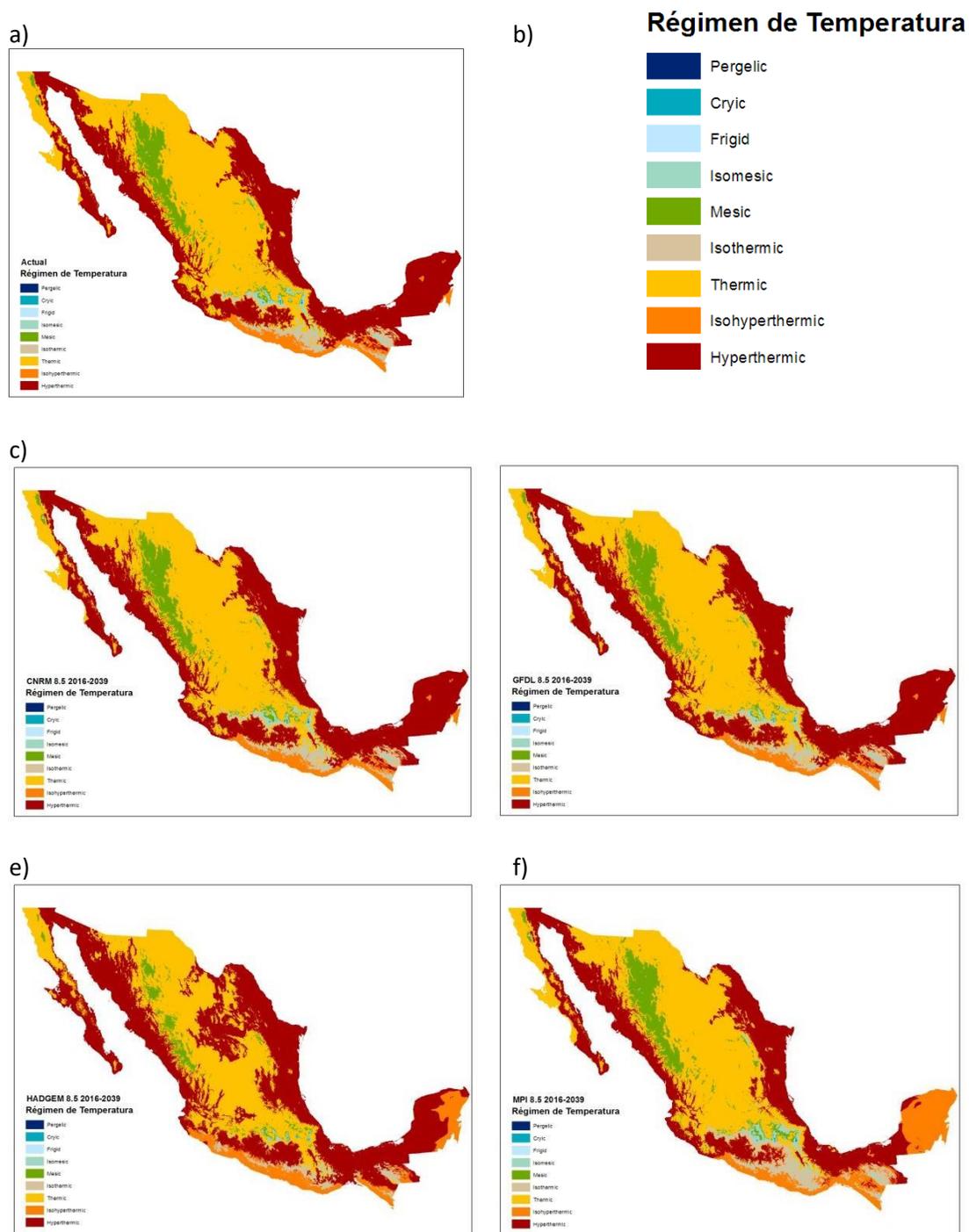


Figura 26 Regímenes de temperatura bajo el escenario RCP 8.5 periodo 2016-2039 para la condición actual y los modelos de cambio climático considerados en el estudio (a) Actual, b) Simbología, c) CNRM, d) GFDL, e) HADGEM y f) MPI).

Cuadro 37 Los regímenes de temperatura bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5 del 2039 – 2069.

Régimen de temperatura	Actual	CNRM	GFDL	HADGEM	MPI
Pergélico	2,125.07 (0.00%)	2,125.07 (0.00)	2,125.07 (0.00)	0.00 (0.00)	2,125.07 (0.00)
Cryico	83,213.57 (0.04%)	76,880.40 (0.04)	75,733.81 (0.04)	20,264.79 (0.01)	76,435.14 (0.04)
Frigido	45,490.31 (0.02%)	31,794.60 (0.02)	31,912.24 (0.02)	0.00 (0.00)	29,794.06 (0.02)
Mésico	12'494,548.69 (6.47%)	12'084,431.0 (6.26)	12'059,477.3 (6.04)	867,017.28 (0.45)	12'036,725.0 (6.23)
Isomésico	2'444,733.93 (1.27%)	2'253,338.62 (1.17)	2'155,154.42 (1.12)	586,735.46 (0.30)	2'201,510.21 (1.14)
Isotérmico	6'481,811.69 (3.35%)	6'518,538.6 (3.37)	6'543,123.00 (3.39)	3'733,120.67 (1.94)	6'392,351.21 (3.31)
Térmico	85'731,905.41 (44.37%)	85'595,425.4 (44.31)	85'427,198.8 (44.23)	48'350,054.8 (25.11)	85'875,823.6 (44.30)
Isohipertérmico	7'631,279.55 (3.95%)	7'211,877.55 (3.73)	7'473,120.11 (3.87)	17'925,413.3 (9.31)	7'119,673.95 (3.69)
Hipertérmico	78'289,443.82 (40.52%)	79'383,182.1 (41.10)	79'389,744.3 (41.10)	121'069,761.00 (62.88)	79'723,150.9 (41.27)

En la figura 27 se presenta la distribución de los regímenes de temperatura del suelo para el escenario de cambio climático descrito.

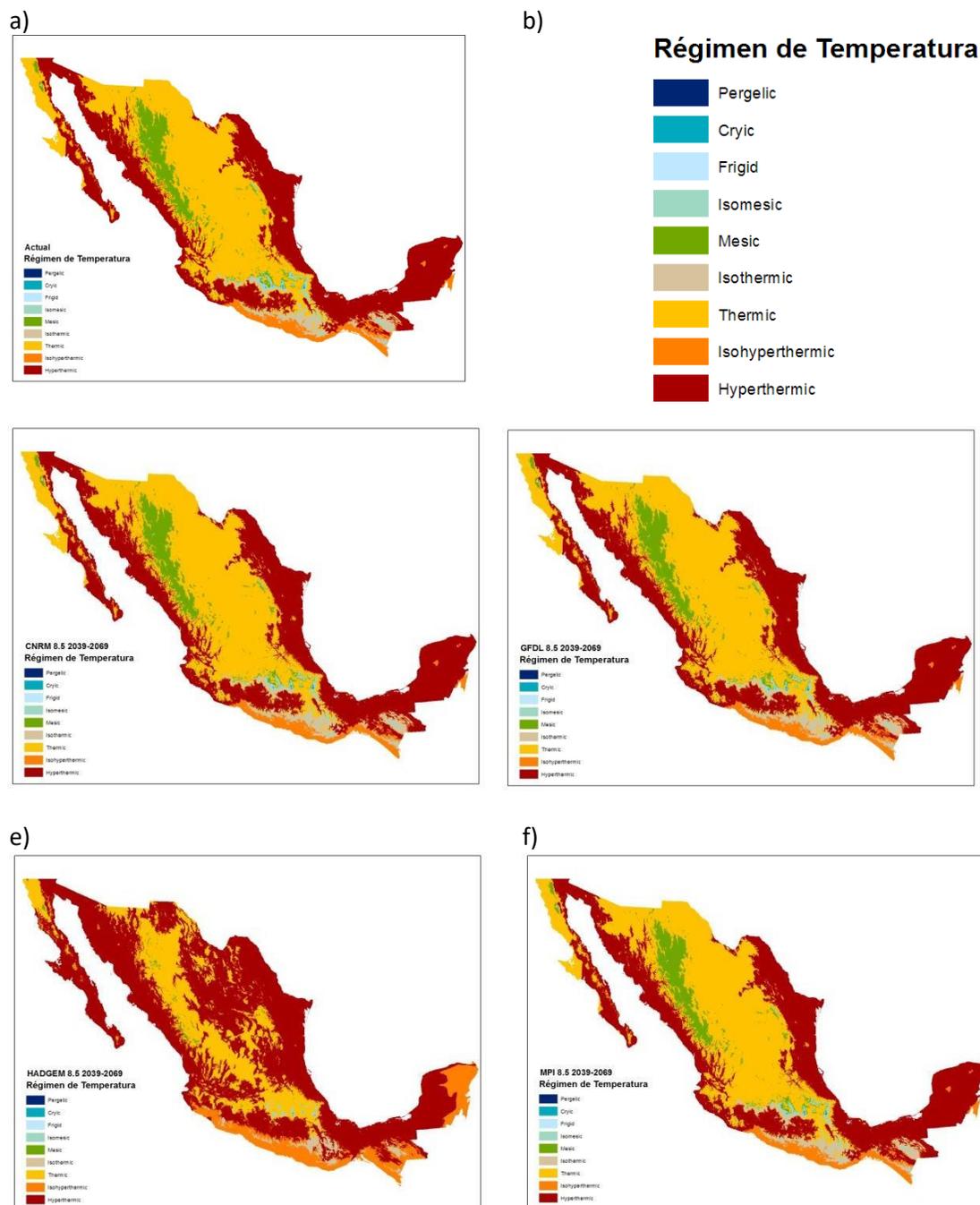


Figura 27 Regímenes de temperatura bajo el escenario RCP 8.5 periodo 2039-2069 para la condición actual y los modelos de cambio climático considerados en el estudio (a) Actual, b) Simbología, c) CNRM, d) GFDL, e) HADGEM y f) MPI).

En el cuadro 38 se reporta la superficie y la proporción de los regímenes de temperatura del suelo para el RCP 8.5 y escenario de tiempo 2069 – 2099. Se observa para los diferentes regímenes de temperatura comportamiento similares que en el anterior escenario de cambio climático, en donde las variaciones son menores para los modelos CNRM, GFDL y MPI y para el HADGEM hay disminuciones considerables para los regímenes Mesico, Térmico y aumentos en los regímenes Hipertérmicos.

Cuadro 38 Los regímenes de temperatura bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5 del 2069 – 2099.

Régimen de temperatura	Actual	CNRM	GFDL	HADGEM	MPI
Pergélico	2,125.07 0.00%	2125.07 0	2,125.07 0	0 0	2,125.07 0
Cryico	83,213.57 -0.04%	83,351.79 -0.04	75,869.75 -0.04	17,165.18 -0.01	75,605.02 -0.04
Frigido	45,490.31 -0.02%	42,596.38 -0.02	36,014.77 -0.02	0 0	20,954.40 -0.01
Mésico	12'494,548.69 -6.47%	12'195,476.4 -6.31	11'924,865.7 -6.17	824,520.40 -0.43	12'017,463.5 -6.22
Isoméxico	2'444,733.93 -1.27%	2'437,791.84 -1.26	2'246,006.22 -1.16	475,816.21 -0.25	2'058,655.59 -1.07
Isotérmico	6'481,811.69 -3.35%	6'693,813.56 -3.47	6'295,449.2 -3.26	3'133,227.68 -1.63	6'316,004.28 -3.27
Térmico	85'731,905.41 -44.37%	85'418,829.4 -44.22	85'661,152.6 -44.35	48'342,515.5 -25.11	85'571,407.5 -44.3
Isohipertérmico	7'631,279.55 -3.95%	7'476,787.72 -3.87	7'178,331.78 -3.72	11'176,394.7 -5.8	6'992,679.95 -3.62
Hipertérmico	78'289,443.82 -40.52%	78'806,867.7 -40.8	79'737,399.9 -41.28	128'582,329.0 -66.78	80'102,280.1 -41.47

En la Figura 28 se muestra la distribución de los regímenes térmicos del suelo para el escenario de cambio climático considerado.

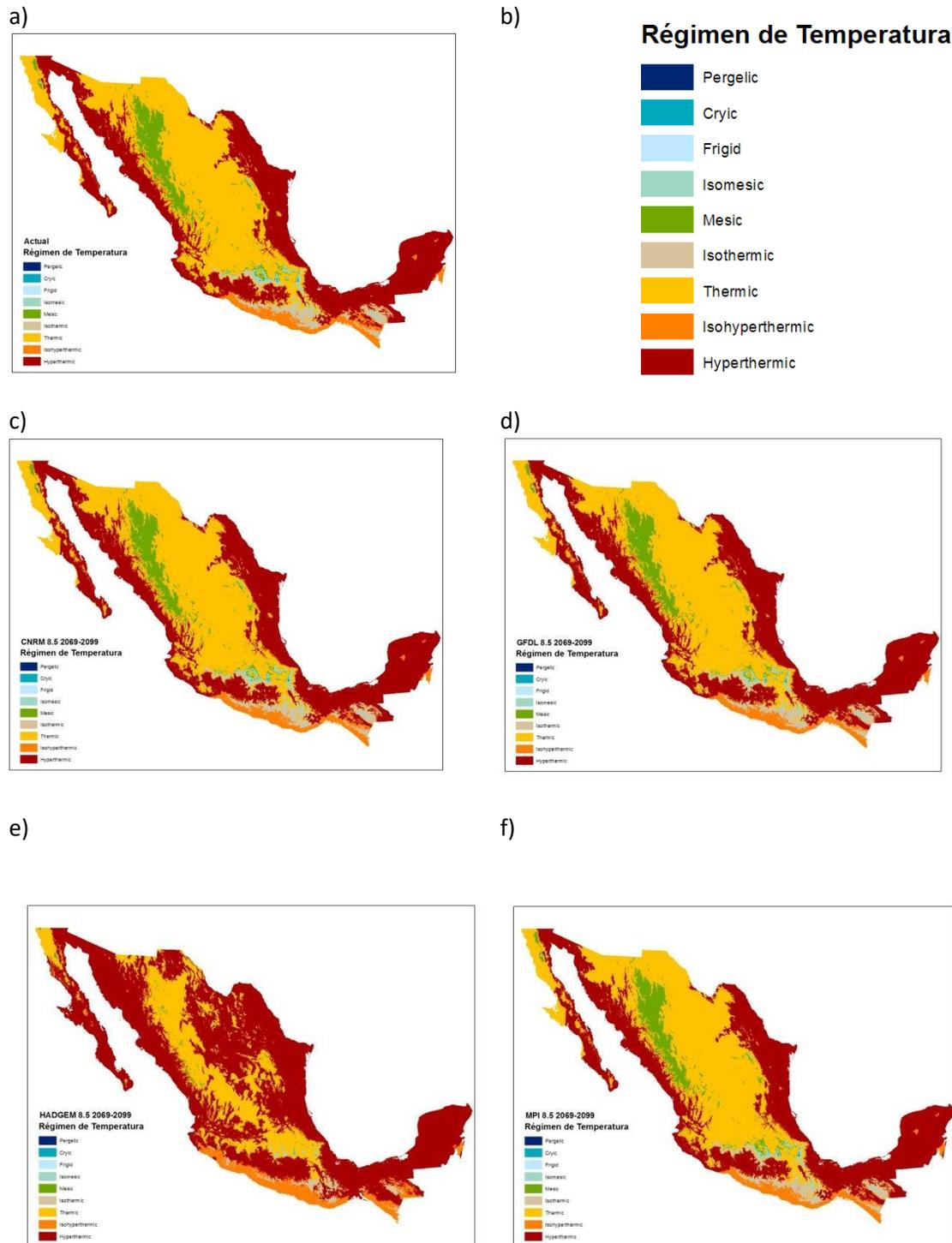


Figura 28 Regímenes de temperatura bajo el escenario RCP 8.5 periodo 2069-2099 para la condición actual y los modelos de cambio climático considerados en el estudio (a) Actual, b) Simbología, c) CNRM, d) GFDL, e) HADGEM y f) MPI).

5.3. Evapotranspiración actual y con cambio climático.

5.3.1. Actual

La Evapotranspiración presentada en el país va de los 400 a los 2,200 mm; teniendo en cuenta que el rango de 1,400-1,600 se presenta en el 40.24% de la superficie del país. Sólo el 3.79 % del territorio presenta una evapotranspiración mayor a 1,800 mm y un 4.09% para una evapotranspiración menor de 1,000 mm anuales.

Cuadro 39 Rangos de ETP actual en México

Rangos de ETP	Actual	Porcentaje
400-600	8,086.61	0.00
600-800	219,938.51	0.11
800-1000	7'810,946.82	3.98
1000-1200	22'778,175.25	11.60
1200-1400	51'459,182.83	26.20
1400-1600	79'047,558.52	40.24
1600-1800	27'667,405.34	14.08
1800-2000	6'889,625.97	3.51
2000-2200	556,580.07	0.28
2200-2400	0.00	0.00
2400-2600	0.00	0.00
Total	196'437,500.00	100.00

Como se puede observar que en las regiones donde se encuentran en las zonas altas del país. Entre las regiones con mayor ETP se encuentran las planicies costeras de Sinaloa y Sonora y el Delta del Río Colorado. (Figura 29)

5.3.2. Bajo escenarios de Cambio Climático

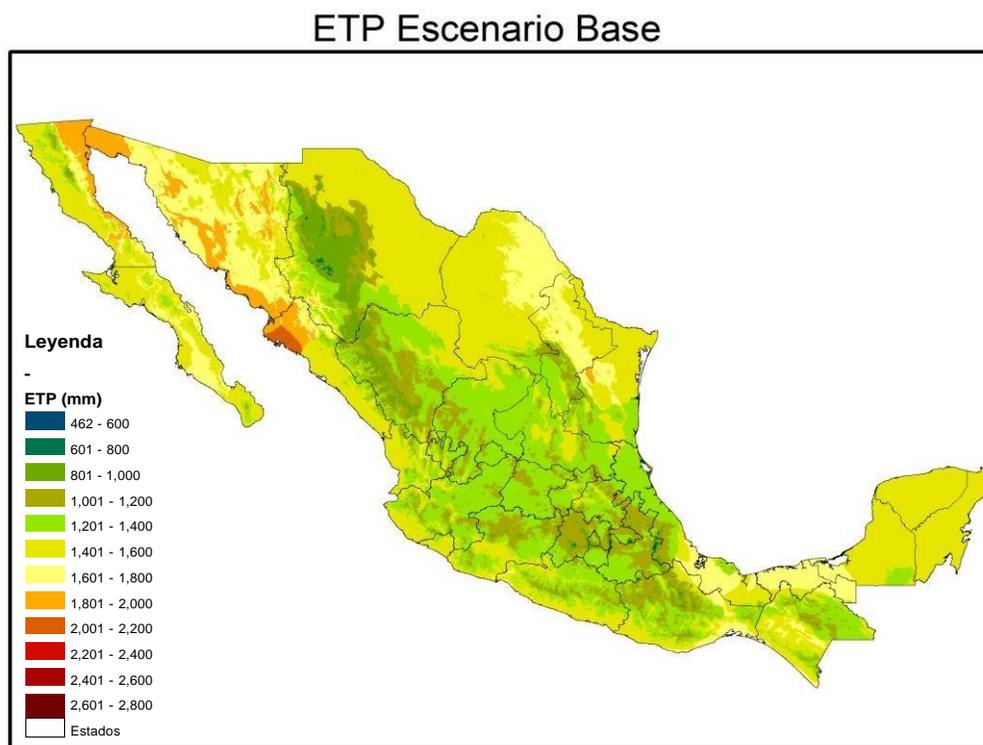


Figura 29 Mapa de distribución de la Evapotranspiración Actual (mm) en México

Para el análisis de los cambios en la ETP bajo escenarios de cambio climático se tomaron también clases de rangos de 200 mm para su comparación con el escenario base. En las figura 30, 31 y 32 se muestra la distribución de las clases de ETP estimadas para el escenario de cambio climático para un RCP de 4.5 Watts/m² y los escenarios de tiempo a corto, mediano y largo plazo, respectivamente.

Para el escenario en corto plazo RCP 4.5 se observa que si existe una tendencia de aumento en la superficie con ETP mayor a los 1,400 mm todos los modelos en base a la totalidad de la superficie del país, los incrementos con respecto al escenario actual que presentan los modelo son de 10.62%, 20.03%, 16.46% y 14.61% del total de la superficie del país para los modelos CNRM, GFDL, HADGEM y MPI, respectivamente (Cuadro 40).

De manera espacial los aumentos se concentran en la zona de Sinaloa y Sonora, para los modelos HADGEM y GFDL también se concentra un aumento considerable Nuevo León y Tamaulipas. (Figura 30)

Cuadro 40 Rangos de ETP actual y con cambio climático escenario RCP 4.5 2015-2039

Rangos de ETP	Actual	CNRM	GFDL	HADGEM	MPI
400-600	8,086.61 (0.00)	470.80 (0.00)	470.80 (0.00)	470.80 (0.00)	0.00 (0.00)
600-800	219,938.51 (0.11)	672.86 (0.00)	7.34 (0.00)	78.73 (0.00)	375.17 (0.00)
800-1000	7'810,946.82 (3.98)	436,737.61 (0.22)	60,514.76 (0.03)	117,600.82 (0.06)	238,077.97 (0.12)
1000-1200	22'778,175.25 (11.60)	16,813,957.43 (8.56)	8'897,166.53 (4.53)	11'439,581.88 (5.82)	12'587,122.60 (6.41)
1200-1400	51'459,182.83 (26.20)	44'187,222.98 (22.49)	33'975,777.07 (17.30)	38'391,712.09 (19.54)	40'748,933.84 (20.74)
1400-1600	79'047,558.52 (40.24)	85'164,165.85 (43.35)	83'394,251.31 (42.45)	85'833,619.67 (43.70)	87'884,020.83 (44.74)
1600-1800	27'667,406.40 (14.08)	40'223,343.53 (20.48)	51'800,005.06 (26.37)	47'565,658.52 (24.21)	44'239,775.46 (22.52)
1800-2000	6'889,625.97 (3.51)	7'684,664.20 (3.91)	15'226,523.58 (7.75)	10'104,586.23 (5.14)	8'669,861.95 (4.41)
2000-2200	556,580.07 (0.28)	1'926,264.74 (0.98)	2'527,512.09 (1.29)	2'428,929.11 (1.24)	1'726,768.17 (0.88)
2200-2400	0.00 (0.00)	19,643.75 (0.01)	555,271.47 (0.28)	555,271.47 (0.28)	341,702.62 (0.17)
2400-2600	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)

Para el escenario a mediano plazo RCP 4.5 se observa que si existe una tendencia de aumento en la superficie con ETP mayor a los 1,400 mm todos los modelos, los cambios que presentan los modelo son de 22.31%, 26.98%, 25.25% y 23.66% del total de la superficie del país para los modelos CNRM, GFDL, HADGEM y MPI, respectivamente (Cuadro 41), incrementos que son mayores a los del escenario a corto plazo.

De manera espacial los aumentos se concentran en la zona de Sinaloa y Sonora, para los modelos HADGEM y GFDL también se concentra un aumento considerable Nuevo León y Tamaulipas. (Figura 31)

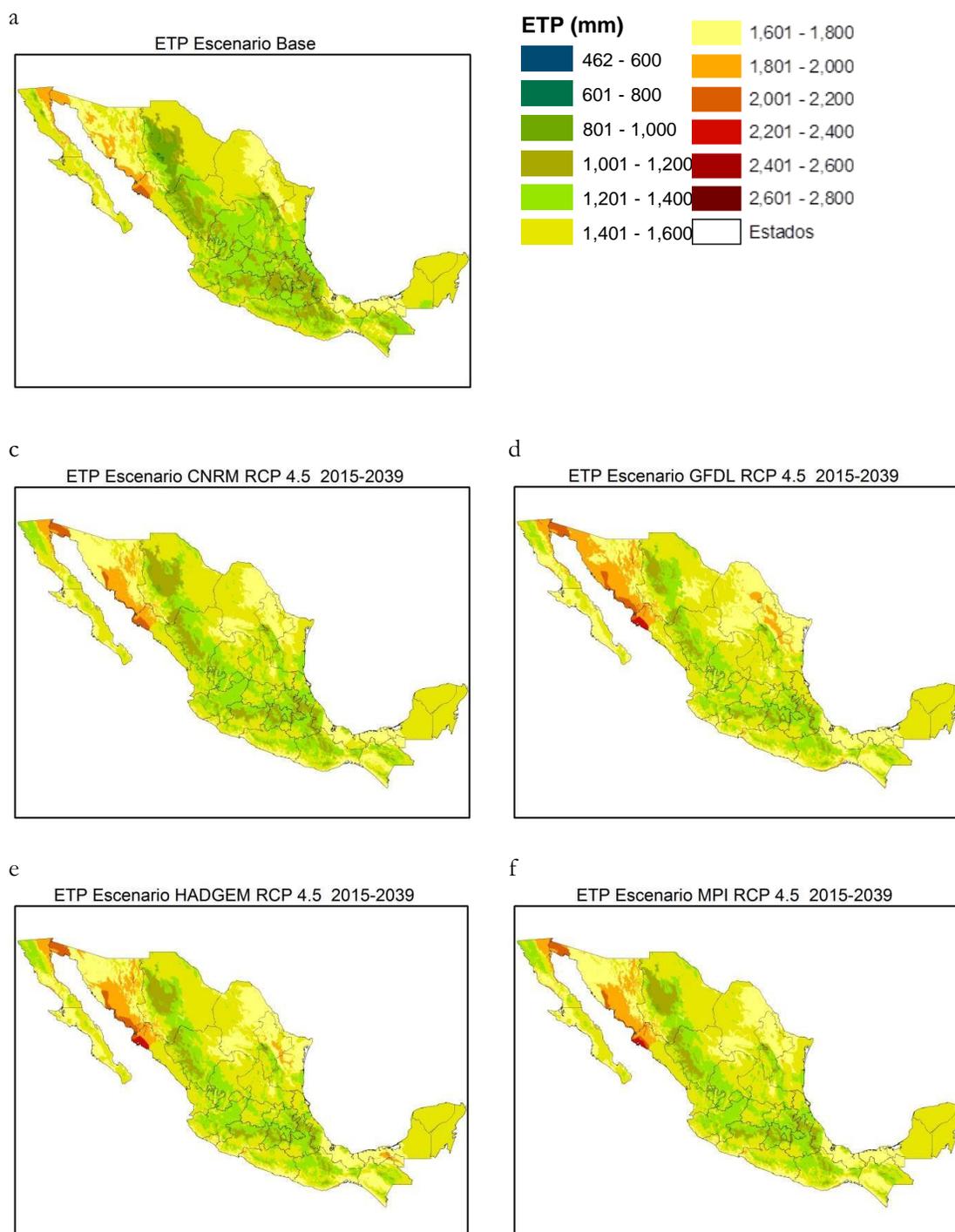


Figura 30 Evapotranspiración bajo el escenario RCP 4.5 periodo 2016-2039 para la condición actual y los modelos de cambio climático considerados en el estudio (a) Actual, b) Simbología, c) CNRM, d) GFDL, e) HADGEM y f) MPI).

Cuadro 41 Rangos de ETP actual y con cambio climático escenario RCP 4.5 2039-2069

Rangos de ETP	Actual	CNRM	GFDL	HADGEM	MPI
400-600	8,086.61	470.8	470.8	470.8	0
	0	0	0	0	0
600-800	219,938.51	7.34	0	0	470.8
	-0.11	0	0	0	0
800-1000	7'810,946.82	43,565.76	14,438.03	30,480.54	30,480.54
	-3.98	-0.02	-0.01	-0.02	-0.02
1000-1200	22'778,175.25	6'941,025.81	2'777,870.26	2'969,046.12	6'154,973.06
	-11.6	-3.53	-1.41	-2.02	-3.13
1200-1400	51'459,182.83	31'477,142.40	26'469,802.01	28'681,708.67	29'632,873.06
	-26.2	-16.02	-13.47	-14.6	-15.09
1400-1600	79'047,558.52	81'148,517.90	60'856,409.99	66'689,492.02	81'381,174.66
	-40.24	-41.31	-30.98	-33.95	-41.43
1600-1800	27'667,406.40	54'960,004.90	71'820,494.94	64'987,345.47	53'701,049.49
	-14.08	-27.98	-36.56	-33.08	-27.34
1800-2000	6'889,625.97	17'205,009.20	27'607,623.54	26'345,694.62	22'188,188.55
	-3.51	-8.76	-14.05	-13.41	-11.3
2000-2200	556,580.07	4'106,289.99	4'942,693.84	5'140,861.77	2'790,178.47
	-0.28	-2.09	-2.52	-2.62	-1.42
2200-2400	0	555,465.98	1'917,705.44	592,399.97	555,271.47
	0	-0.28	-0.98	-0.3	-0.28
2400-2600	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0

Para el escenario a largo plazo RCP 4.5 se observa un mayor incremento en la superficie con ETP mayor a los 1,400 mm para todos los modelos, los cambios que presentan para cada modelo son: 22.5%, 29.96%, 28.59% y 24.86% del total de la superficie del país para los modelos CNRM, GFDL, HADGEM y MPI, respectivamente (Cuadro 42)

De manera espacial los aumentos se concentran en la zona de Sinaloa y Sonora, para los modelos HADGEM y GFDL también se concentra un aumento considerable Nuevo León y Tamaulipas. (Figura 32)

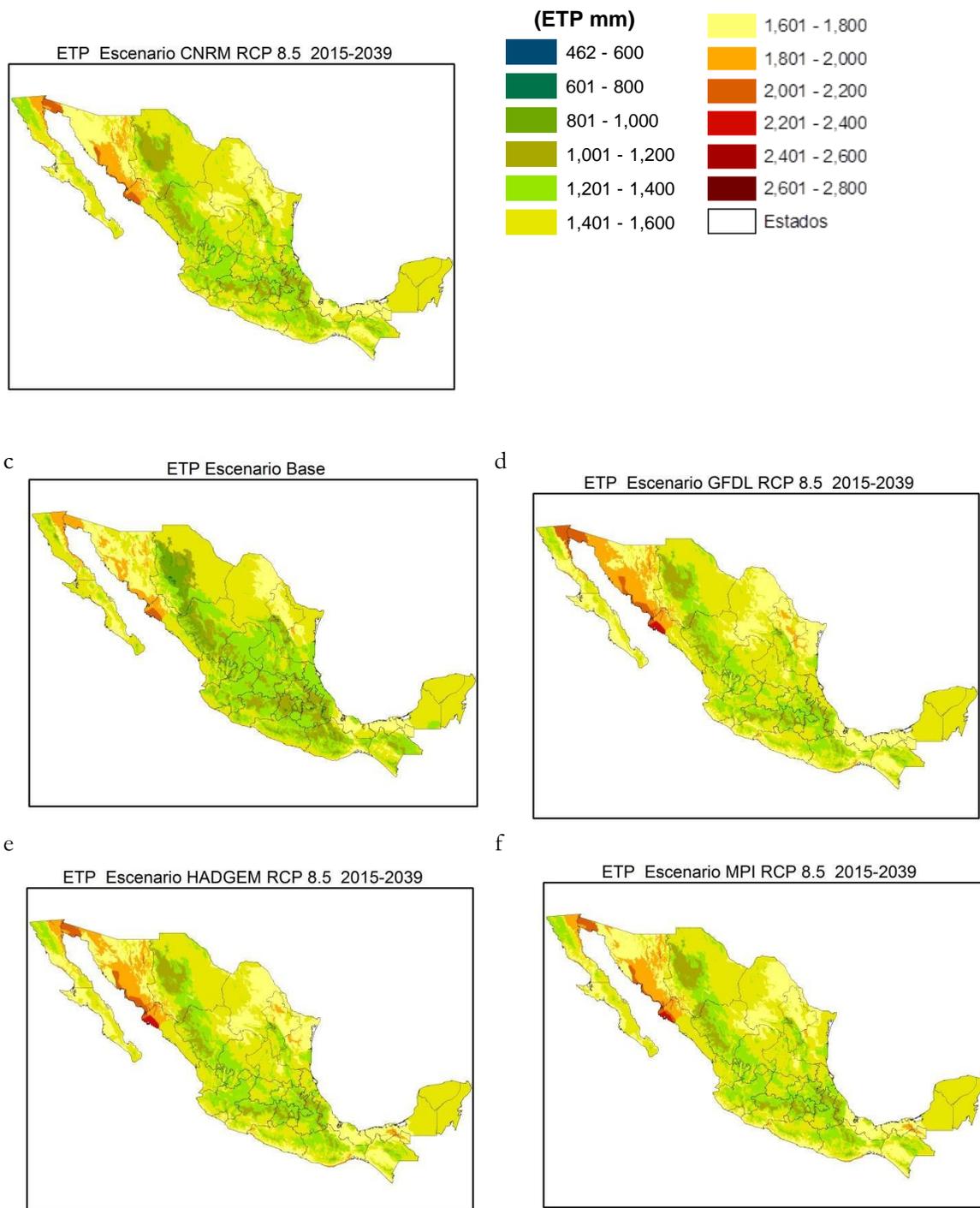


Figura 31 Evapotranspiración bajo el escenario RCP 4.5 periodo 2039-2069 para la condición actual y los modelos de cambio climático considerados en el estudio (a) Actual, b) Simbología, c) CNRM, d) GFDL, e) HADGEM y f) MPI).

Cuadro 42 Rangos de ETP actual y con cambio climático escenario RCP 4.5 2069-2099

Rangos de ETP	Actual	CNRM	GFDL	HADGEM	MPI
400-600	8,086.61 0	0 0	0 0	471 0	0 0
600-800	219,938.51 -0.11	7.03 0	0 0	0 0	0 0
800-1000	7'810,946.82 -3.98	42,083.24 -0.02	5,825.48 0	10,017..03 -0.01	32,927.10 -0.02
1000-1200	22'778,175.25 -11.6	6'918,322.25 -3.52	1'308,993.45 -0.67	1'742,744.29 -0.89	4'549,187.02 -2.32
1200-1400	51'459,182.83 -26.2	31'120,507.30 -15.84	22'093,778.75 -11.25	24'358,508.40 -12.4	28'863,043.63 -14.69
1400-1600	79'047,558.52 -40.24	80'819,990.10 -41.14	55'304,682.85 -28.15	58'590,318.83 -29.83	78'166,659.30 -39.79
1600-1800	27'667,406.40 -14.08	55'107,769.80 -28.05	74'242,204.10 -37.79	72'275,719.48 -36.79	57'849,345.88 -29.45
1800-2000	6'889,625.97 -3.51	17'581,906.50 -8.95	34'287,784.83 -17.45	31'376,361.66 -15.97	22'114,750.23 -11.26
2000-2200	556,580.07 -0.28	4'282,752.43 -2.18	7'022,351.57 -3.57	6'092,405.64 -3.1	4'305,548.69 -2.19
2200-2400	0 0	55,465.97 -0.29	2'171,887.22 -1.11	1'990,971.37 -1.01	555,465.97 -0.28
2400-2600	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0

En las figuras 33, 34 y 35 se muestra para un RCP de 8.5 y los escenarios de tiempo de corto, mediano y largo plazo, respectivamente.

Para el escenario a corto plazo RCP 8.5 se observa también una tendencia de aumento en la superficie con ETP mayor a los 1,400 mm para todos los modelos, los cambios que presentan cada modelo son: 11.63%, 19.05%, 16.88%, 16.17% del total de la superficie del país para los modelos CNRM, GFDL, HADGEM y MPI, respectivamente, estos valores son iguales para el modelo GFDL y ligeramente mayores para los otros modelos a los del RCP 4.5 para este mismo escenario de tiempo (Cuadro 43)

De manera espacial los aumentos se concentran en la zona de Sinaloa y Sonora, para los modelos HADGEM y GFDL también se concentra un aumento considerable Nuevo León y Tamaulipas. (Figura 33)

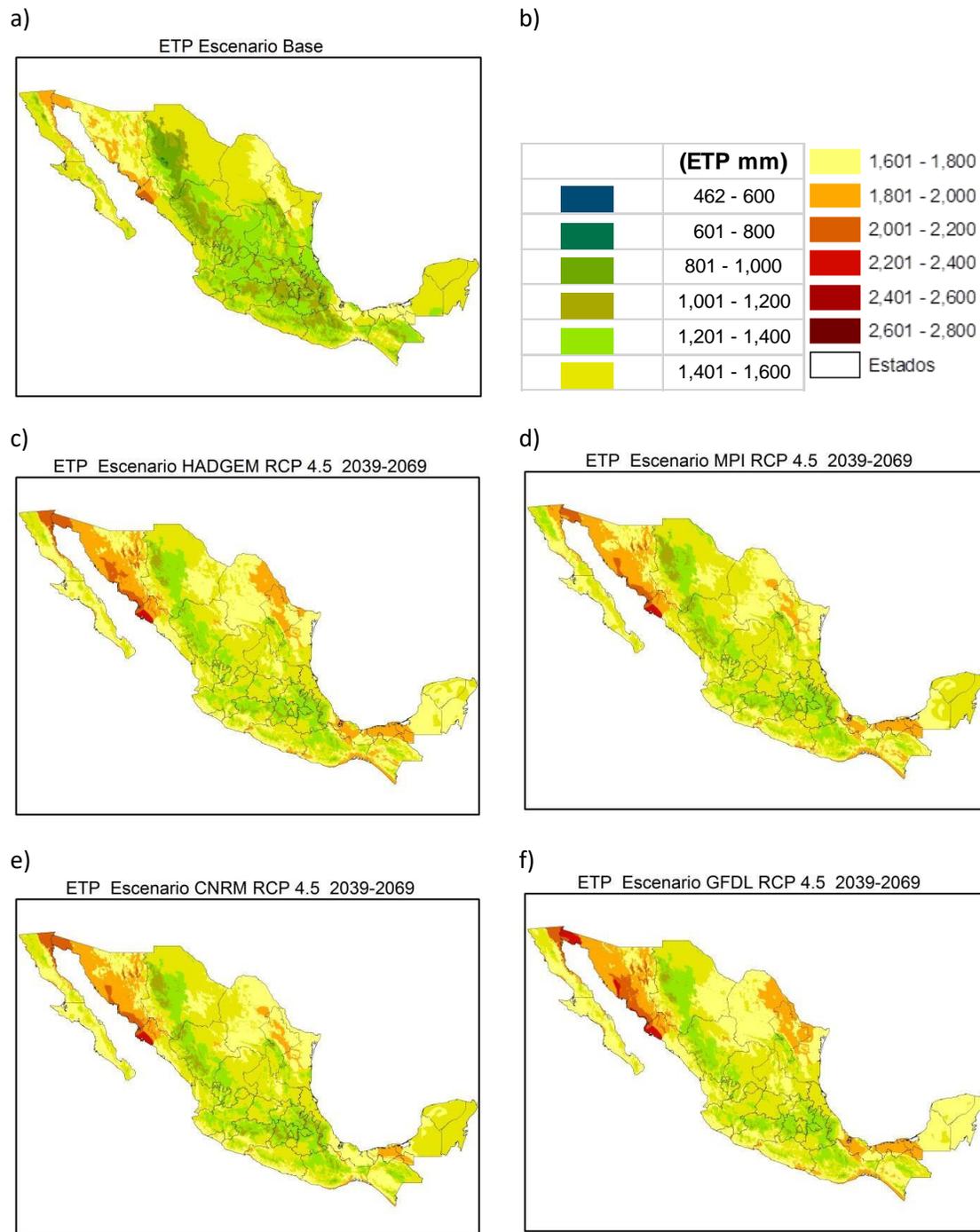


Figura 32 Evapotranspiración bajo el escenario RCP 4.5 periodo 2069-2099 para la condición actual y los modelos de cambio climático considerados en el estudio (a) Actual, b) Simbología, c) CNRM, d) GFDL, e) HADGEM y f) MPI).

Cuadro 43 Rangos de ETP actual y con cambio climático escenario RCP 8.5 2015-2039

Rangos de ETP	Actual	CNRM	GFDL	HADGEM	MPI
400-600	8,086.61 0	463.07 0	463.07 0	46 0	0 0
600-800	219,938.51 -0.11	661.81 0	7.22 0	77.44 0	153.54 0
800-1000	7'810,946.82 -3.98	401,515.93 -0.21	71,201.15 -0.04	82,771.99 -0.04	134,821.03 -0.07
1000-1200	22'778,175.25 -11.6	15'695,567.77 -8.12	10'027,345.03 -5.19	10'592,299.31 -5.48	11'405,925.37 -5.9
1200-1400	51'459,182.83 -26.2	42'353,846.95 -21.92	34'022,514.24 -17.61	37'095,532.21 -19.2	38'134,629.72 -19.74
1400-1600	79'047,558.52 -40.24	85'657,023.82 -44.33	84'072,211.44 -43.51	84'260,790.66 -43.61	87'956,250.71 -45.52
1600-1800	27'667,406.40 -14.08	39'340,531.98 -20.36	48'258,250.69 -24.98	46'515,093.10 -24.07	43'421,595.32 -22.47
1800-2000	6'889,625.97 -3.51	78'571,157.37 -4.07	12'574,623.65 -6.51	11'692,200.11 -6.05	9'738,941.04 -5.04
2000-2200	556,580.07 -0.28	1'902,767.98 -0.98	3'636,759.18 -1.88	2'424,147.76 -1.25	2'081,128.20 -1.08
2200-2400	0 0	0 0	546,146.92 -0.28	463.07 0	336,087.57 -0.17
2400-2600	0 0	0 0	0 0	77.44 0	0 0

Para el escenario a mediano plazo RCP 8.5 se observa también una tendencia de aumento en la superficie con ETP mayor a los 1,400 mm para todos los modelos, los cambios que presentan cada modelo son: 23.4%, 31.27%, 30.01%, 28.49% del total de la superficie del país para los modelos CNRM, GFDL, HADGEM y MPI, respectivamente, estos valores son y ligeramente mayores para el modelo CNRM y con mayor diferencia para los otros modelos a los del RCP 4.5 para este mismo escenario de tiempo (Cuadro 44)

De manera espacial los aumentos se concentran en la zona de Sinaloa y Sonora, para los modelos HADGEM y GFDL también se concentra un aumento considerable Nuevo León y Tamaulipas. (Figura 34)

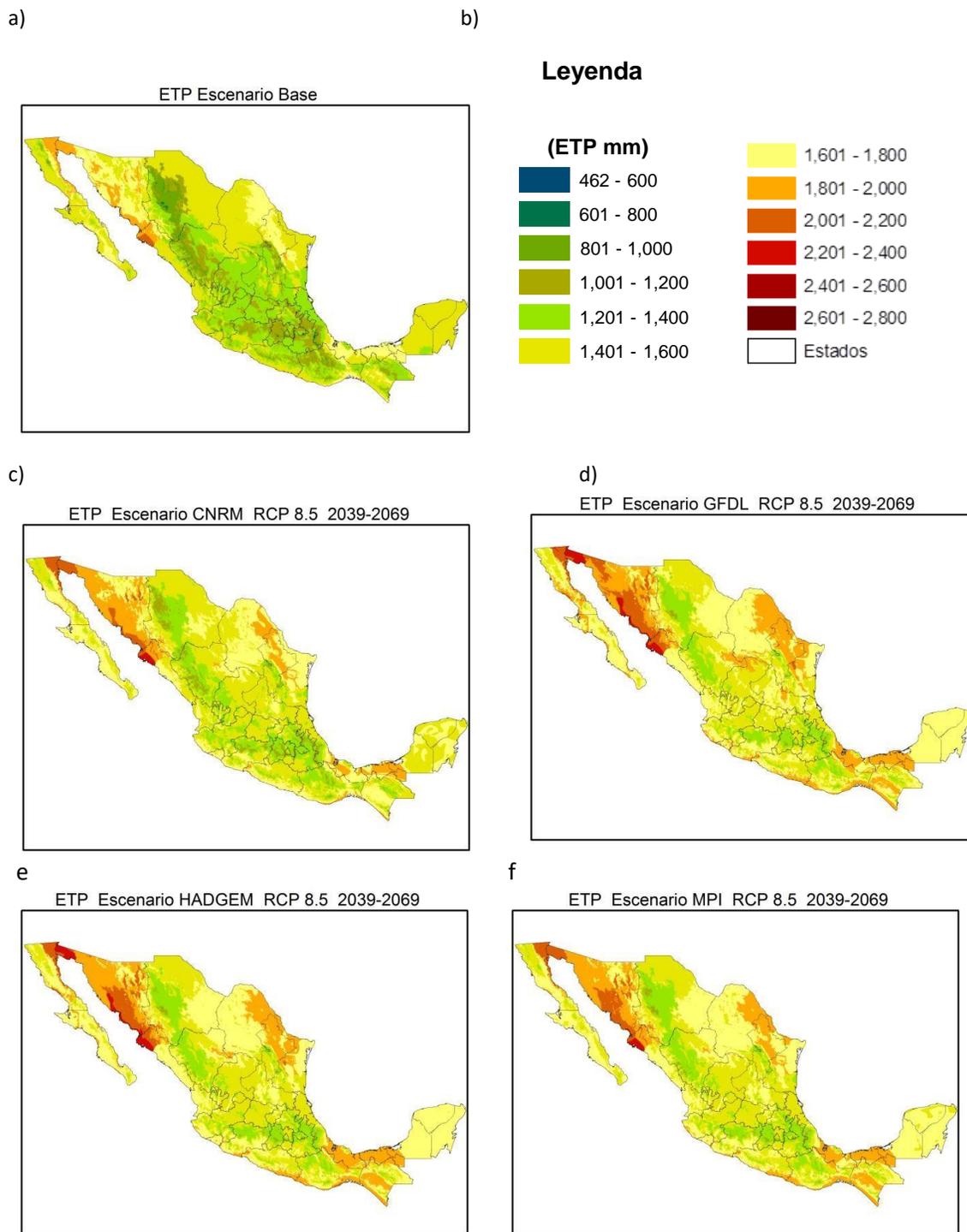


Figura 33 Evapotranspiración bajo el escenario RCP 8.5 periodo 2016-2039 para la condición actual y los modelos de cambio climático considerados en el estudio (a) Actual, b) Simbología, c) CNRM, d) GFDL, e) HADGEM y f) MPI).

Cuadro 44 Rangos de ETP actual y con cambio climático escenario RCP 8.5 2039-2069

Rangos de ETP	Actual	CNRM	GFDL	HADGEM	MPI
400-600	8,086.61 (0.00)	470.80 (0.00)	470.80 (0.00)	470.80 (0.00)	0.00 (0.00)
600-800	219,938.51 (0.11)	7.34 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)
800-1000	7'810,946.82 (3.98)	38,504.05 (0.02)	3,746.18 (0.00)	9,158.33 (0.00)	10,528.25 (0.00)
1000-1200	22'778,175.25 (11.60)	6'029,104.53 (3.07)	912,521.42 (0.46)	1'278,231.48 (0.65)	1'856,348.49 (0.95)
1200-1400	51'459,182.83 (26.20)	30'849,929.60 (15.70)	19'952,743.15 (10.16)	22'086,775.01 (11.24)	24'474,500.06 (12.46)
1400-1600	79'047,558.52 (40.24)	76'902,381.57 (39.15)	53'669,947.16 (27.32)	57'367,090.58 (29.20)	61'202,894.72 (31.16)
1600-1800	27'667,406.40 (14.08)	57'088,692.70 (29.06)	75'579,478.67 (38.48)	73'737,722.78 (37.54)	72'743,573.86 (37.03)
1800-2000	6'889,625.97 (3.51)	20'836,591.31 (10.91)	35'502,793.76 (18.07)	32'762,795.42 (16.68)	28'964,998.92 (14.75)
2000-2200	556,580.07 (0.28)	4'136,339.70 (2.11)	8'533,894.82 (4.34)	6'894,071.32 (3.51)	6'592,265.99 (3.36)
2200-2400	0.00 (0.00)	555,474.74 (0.28)	2'281,912.27 (1.17)	2'301,193.07 (1.17)	592,407.43 (0.30)
2400-2600	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)

Para el escenario a largo plazo RCP 8.5 se observa también una tendencia de aumento en la superficie con ETP mayor a los 1,400 mm para todos los modelos, los cambios que presentan cada modelo son: 31.64%, 27.05%, 26.97%, 25.19% del total de la superficie del país para los modelos CNRM, GFDL, HADGEM y MPI, respectivamente, estos valores son mayores para los otros modelos a los del RCP 4.5 para este mismo escenario de tiempo, presentándose la mayor diferencia para el modelo CNRM (Cuadro 45)

De manera espacial los aumentos se concentran en la zona de Sinaloa y Sonora, para los modelos HADGEM y GFDL también se concentra un aumento considerable Nuevo León y Tamaulipas. (Figura 35)

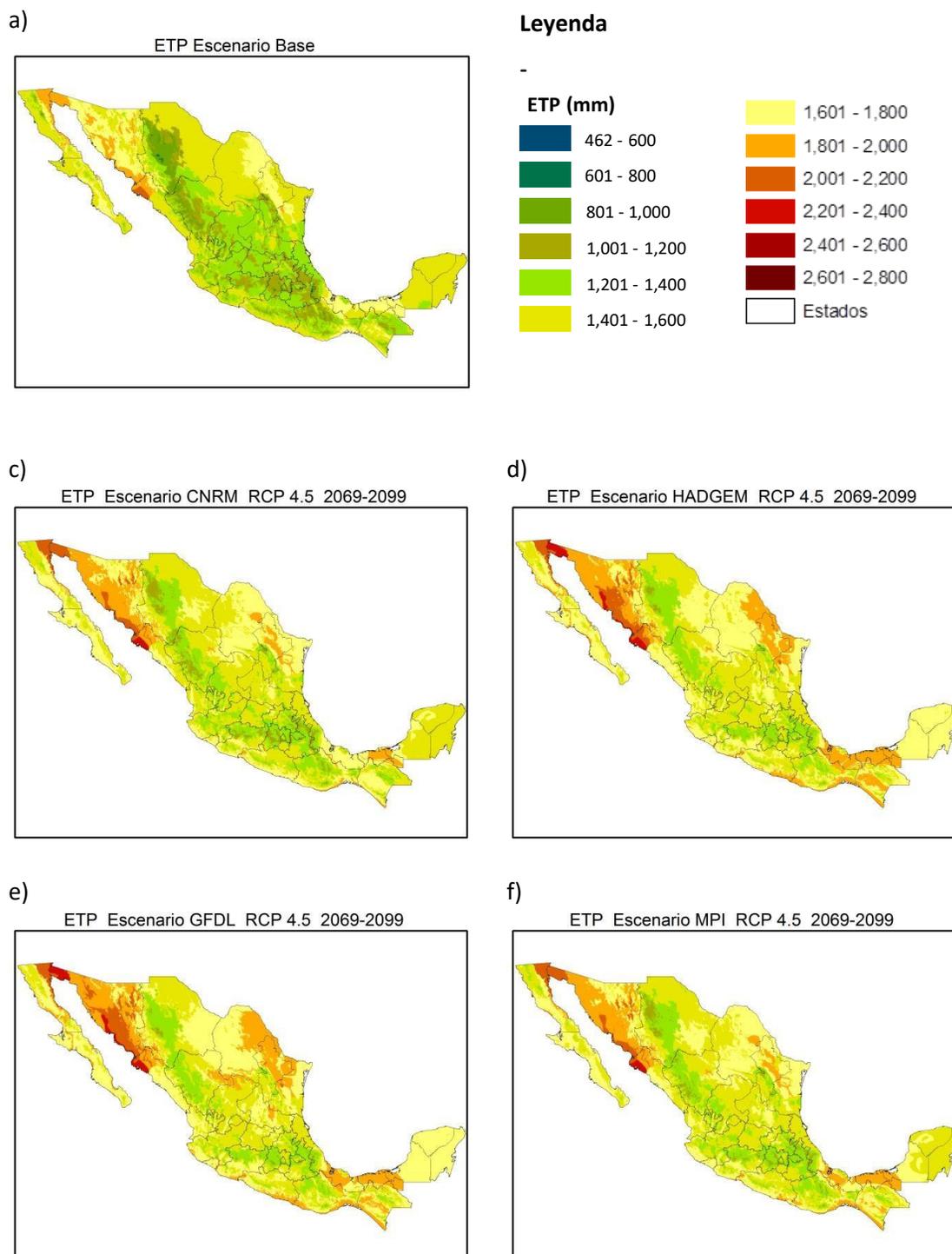


Figura 34 Evapotranspiración bajo el escenario RCP 8.5 periodo 2039-2069 para la condición actual y los modelos de cambio climático considerados en el estudio (a) Actual, b) Simbología, c) CNRM, d) GFDL, e) HADGEM y f) MPI).

Cuadro 45 Rangos de ETP actual y con cambio climático escenario RCP 8.5 2069-2099

Rangos de ETP	Actual	CNRM	GFDL	HADGEM	MPI
400-600	8,086.61 (0.00)	0.00 (0.00)	17,907.65 (0.01)	17,907.65 (0.01)	17,907.65 (0.01)
600-800	219,938.51 (0.11)	0.00 (0.00)	1,943.11 (0.00)	2,807.03 (0.00)	3,120.27 (0.00)
800-1000	7'810,946.82 (3.98)	4,705.12 (0.00)	136,647.85 (0.07)	128,858.80 (0.07)	269,453.37 (0.14)
1000-1200	22'778,175.25 (11.60)	897,327.22 (0.46)	6'733,118.93 (3.43)	6'381,648.19 (3.25)	8'886,294.41 (4.52)
1200-1400	51'459,182.83 (26.20)	19'248,107.15 (9.80)	22'250,445.44 (11.33)	22'773,813.59 (11.59)	23'637,260.97 (12.03)
1400-1600	79'047,558.52 (40.24)	49'150,939.64 (25.02)	44'052,103.22 (22.43)	49'859,921.13 (25.38)	57'785,471.82 (29.42)
1600-1800	27'667,405.34 (14.08)	77'624,383.17 (39.52)	79'518,977.68 (40.48)	76'550,711.77 (38.97)	71'266,116.50 (36.28)
1800-2000	6'889,625.97 (3.51)	37'256,750.64 (18.97)	29'467,668.13 (15.00)	29'041,358.09 (14.78)	26'368,369.75 (13.42)
2000-2200	556,580.07 (0.28)	8'177,947.10 (4.16)	11'829,013.22 (6.02)	9'501,526.42 (4.84)	7'639,150.80 (3.89)
2200-2400	0.00 (0.00)	4'076,896.72 (2.08)	2'088,082.56 (1.06)	1'624,224.80 (0.83)	564,853.40 (0.29)
2400-2600	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	341,587.94 (0.17)	555,189.64 (0.28)	0.00 (0.00)

En la Figura 36 se presenta gráficamente las diferencias entre la superficie del país con los valores estimados de ETP para el escenario actual y los diferentes modelos para los RCP de 4.5 y de 8.5 Watts/m² y el horizonte de tiempo cercano.

Se observa un aumento de la superficie con valores mayores de ETP con una disminución de los valores menores. La clase de menos de 1000 mm anuales de 7'544,095 has a 175,093 ha. en promedio de todos los modelos en relación al escenario base, lo cual representa una disminución de -3.75% del total de la superficie del país.

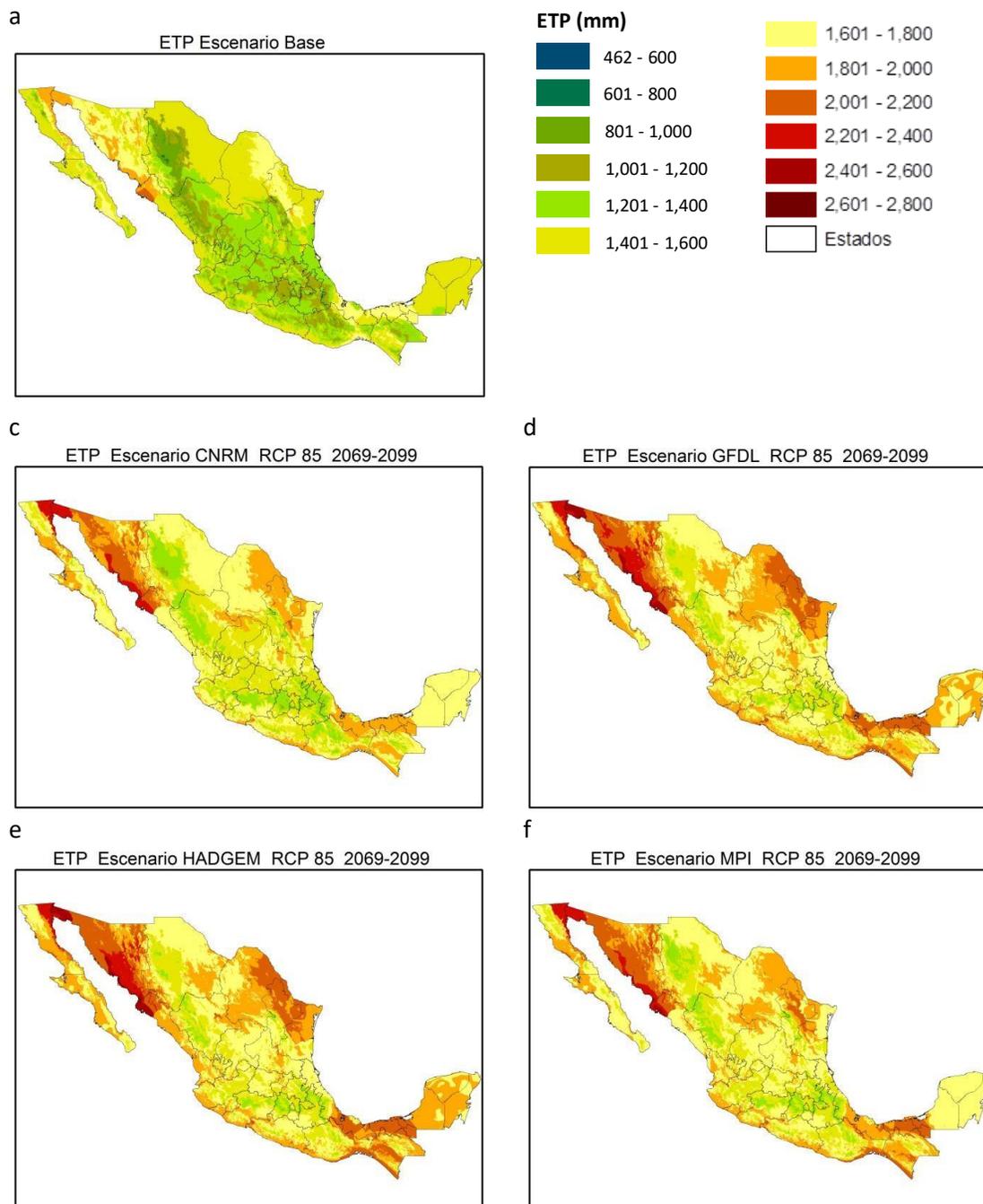


Figura 35 Evapotranspiración bajo el escenario RCP 8.5 periodo 2069-2099 para la condición actual y los modelos de cambio climático considerados en el estudio (a) Actual, b) Simbología, c) CNRM, d) GFDL, e) HADGEM y f) MPI).

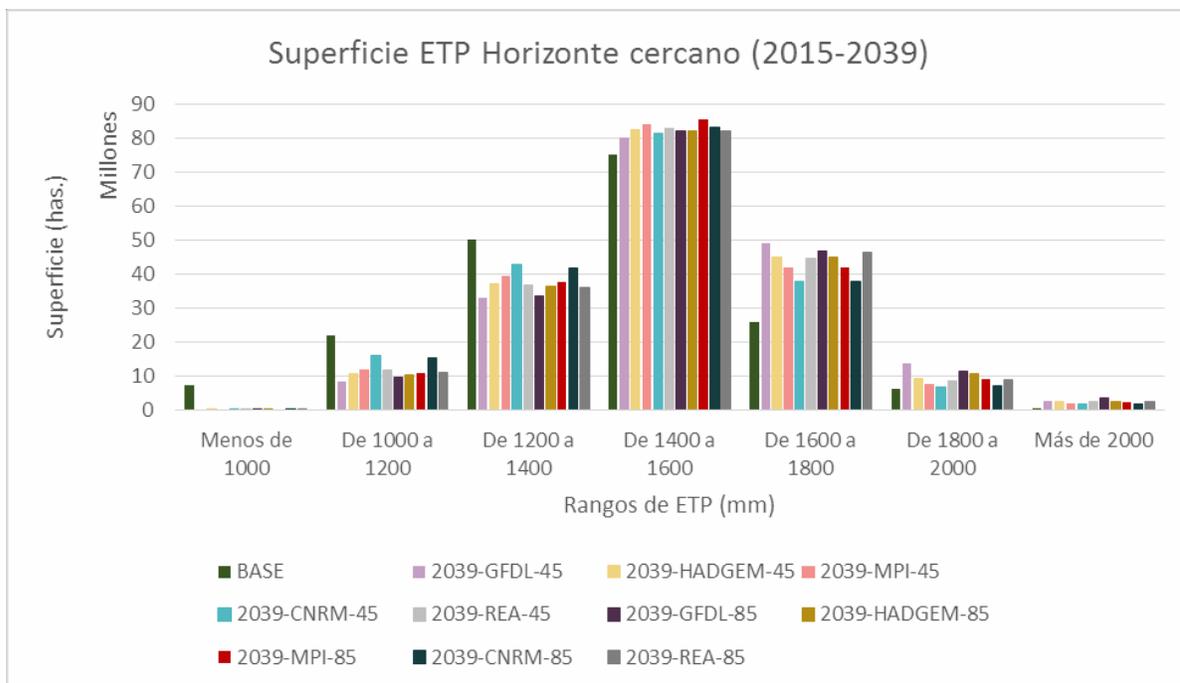


Figura 36 Superficie de los rangos de evapotranspiración potencial para el escenario de Cambio climático horizonte cercano y los RCP de 4.5 y 8.5 Watts/m² para cada uno de los modelos de cambio climático del estudio

En un escenario RCP 4.5 el modelo HADGEM pronostica un aumento de la clase 1400 a 1600 mm del 3.46% del total de la superficie del país, mientras que el modelo CNRM es menor el aumento con 3.11 % que es casi similar al anterior. Dentro del RCP 8.5 el modelo MPI reporta un aumento de 5.28% del total de la superficie del país para una ETP de 1400 a 1600 mm, mientras que el modelo CNRM es de nuevo el que presenta ligeramente valores menores pero aun similares al anterior con 2.97%.. El rango de 1200 a 1400 mm de ETP también presenta reducción en la proporción de la superficie del país., La clase de más de 2000 mm de ETP en el modelo HADGEM reporta un aumento de en promedio de 1.24 % en comparación con el mismo rango del escenario base. En un escenario RCP de 4.5, el modelo GFDL pronostica el mayor aumento con 1.29 %, mientras que el modelo CNRM pronostica el menor con 0.7 %. En la Figura 38 se presenta gráficamente las diferencias entre la superficie del país con los valores estimados de ETP para el escenario actual y los diferentes modelos para los RCP de 4.5 y de 8.5 Watts/m² y el horizonte a mediano plazo.

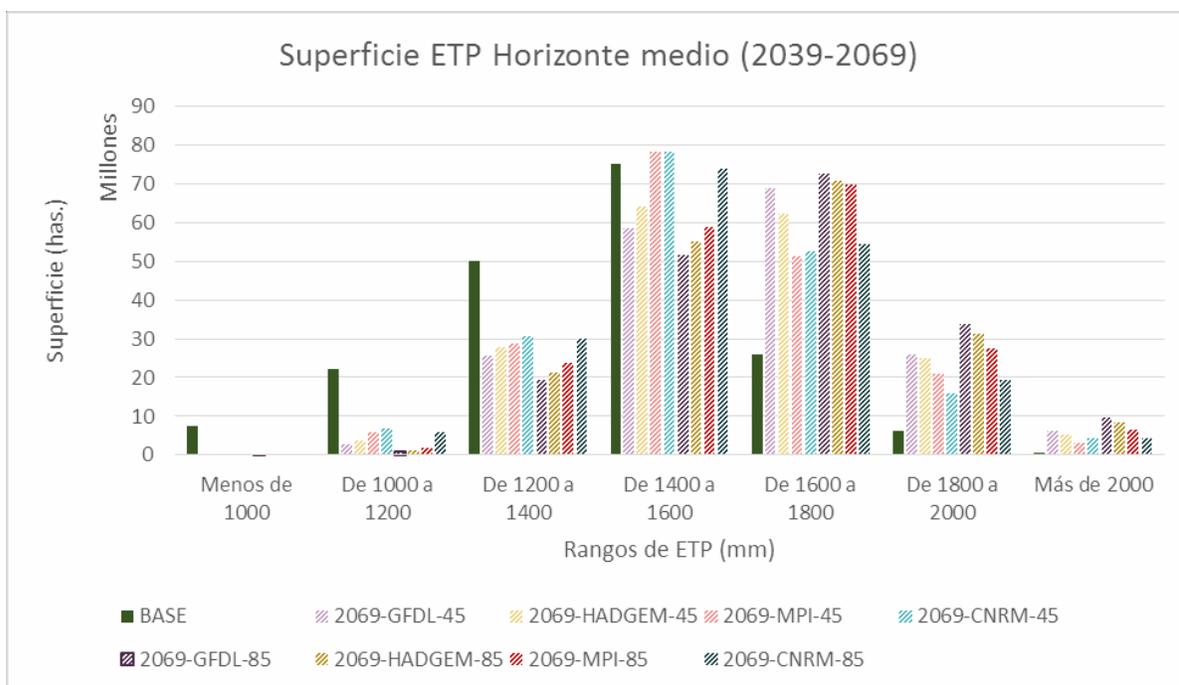


Figura 37 Superficie de los rangos de evapotranspiración potencial para el escenario de Cambio climático horizonte a mediano plazo y los RCP de 4.5 y 8.5 Watts/m² para cada uno de los modelos de cambio climático del estudio

El comportamiento es similar al horizonte cercano, pero con mayor incremento en las clases con ETP alta y consecuentemente una mayor disminución del porcentaje del país con valores menores. En la clase con valores de menos de 1000 mm de ETP disminuye - 4.07% en promedio. Tanto para el RCP 4.5 como 8.5 el modelo GFDL reporta la mayor disminución, mientras que el CNRM pronostica la menor reducción. Al igual que en el corto plazo, la clase de 1200 a 1400 mm presenta un disminución considerable en la superficie del total del país (-22.67% de la superficie nacional). La clase de 1400 a 1600 mm de ETP presenta disminuciones para unos modelos y RCP en comparación con el escenario base, y en otros es casi similar. El modelo GFDL reporta la mayor disminución en ambos RCP 4.5 y 8.5, con -12.12% y -17.81 % respectivamente.

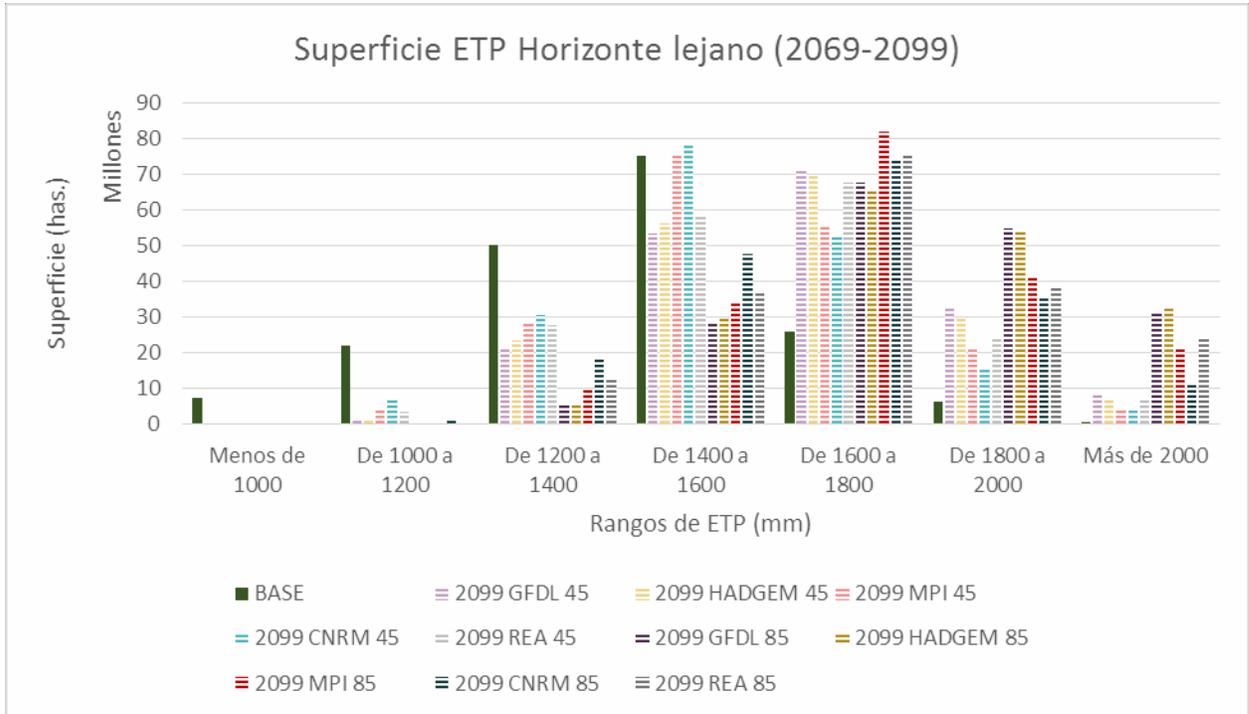


Figura 38 Superficie de los rangos de evapotranspiración potencial para el escenario de Cambio climático horizonte a mediano plazo y los RCP de 4.5 y 8.5 Watts/m² para cada uno de los modelos de cambio climático del estudio

El rango de más de 2000 mm en una concentración RCP de 4.5, el modelo GFDL pronostica el mayor aumento con +6.80% en relación al escenario base. No obstante, el modelo MPI proyecta sólo un +3.90 % de cambio. En la Figura 39 se presenta gráficamente las diferencias entre la superficie del país con los valores estimados de ETP para el escenario actual y los diferentes modelos para los RCP de 4.5 y de 8.5 Watts/m² y el horizonte a largo plazo.

El caso del horizonte lejano la proporción de la superficie del país con valores mayores aumenta. En el caso del rango de menos de 1000 mm de ETP, prácticamente en todos los escenarios y modelos desaparece, para los modelos GFDL y HADGEM la disminución es de -0.20%, para el MPI es de -0.13%. Lo mismo sucede para el rango de 1000 a 1200 mm y la de 1200 a 1400 mm disminuye más en el RCP de 8.5. El rango de 1400 a 1600 mm proyecta un 33.68 % de disminución en promedio, 20 % más que el horizonte medio y 43% más que el horizonte cercano.

A partir del rango de 1600 a 1800 mm de ETP se estiman mayor proporción de la superficie del país, con aumentos más altos para el RCP de 8.5. Los rangos con mayores incrementos con respecto al escenario base son los de 1800 a 2000 mm y los mayores a 2000 mm, en donde en este último aumenta drásticamente. En un RCP de 4.5, el modelo GFDL proyecta un aumento de +12.29% a diferencia del MPI que arroja un +8.44 %. Con un RCP 8.5 el modelo GFDL pronostica el mayor incremento con +10.9 %, mientras que el modelo

CNRM pronostica sólo un +6.08 % de cambio. Teniendo de rango de aumento entre +10.9% a +6.08%.

En la figura 40 se muestra la comparación entre la línea de tendencia del comportamiento de la ETP entre el escenario base y los escenarios de cambio climático para los RCP de 4.5 y 8.5 para todos los horizontes de tiempo y se expresa con la línea roja el promedio de todos los modelos y todos los escenarios de RCP y horizontes de tiempo. La línea de tendencia fue generada bajo el método de media móvil. Se observa claramente un aumento mayor de la superficie del país con mayores valores de ETP para el RCP de 8.5 Watts/m² que corresponde al segundo grupo de líneas con valores mayores de ETP.

La línea de tendencia del escenario base tiene un pico de superficie en el rango de 1400 a 1600 mm, mientras que el pico de superficie en el caso de los modelos de cambio climático se presenta en el rango de 1600 a 1800 mm. Además, el valor máximo de ETP base es de 2128.54 mm, mientras que el máximo en el peor escenario de cambio climático alcanza los 2559.66 mm, es decir, una diferencia de 431 mm de ETP. El valor mínimo en el escenario base fue de 461.5 mm, mientras que en el peor escenario de cambio climático apenas llega a los 947.45. es decir, reporta una diferencia de 485.95 mm. Esto denota un evidente “corrimiento” generalizado de la ETP en los diferentes escenarios de cambio climático.

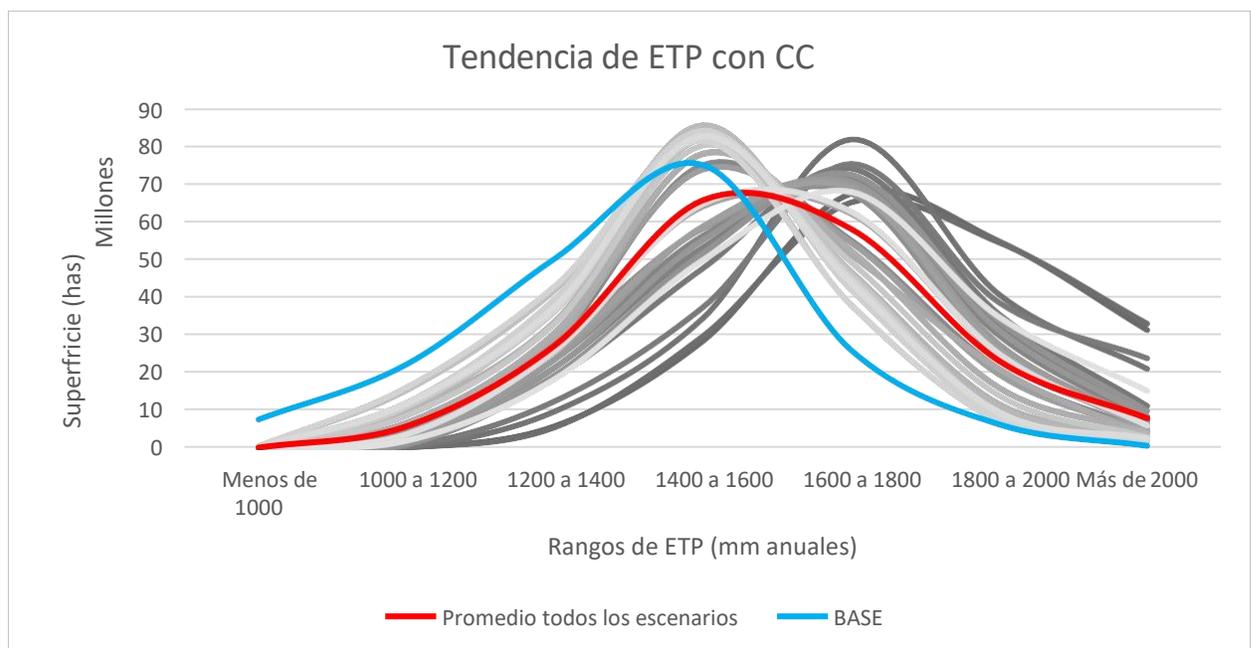


Figura 39 Tendencia del ETP en superficie del país para todos los escenarios de cambio climático (RCP de 4.5 y de 8.5 para los horizontes de tiempo de corto, mediano y largo plazo)

5.4. Productividad Primaria Neta

5.4.1. Productividad Primaria Neta Actual

En el Cuadro 46 se presenta la superficie y proporción del país de las diferentes clases de Productividad Primaria Neta (PPN) expresada en (kg*MS/Ha/año). El 51.53% de la superficie del país presenta una PPN menor a los 1000 (kg*MS/Ha/año) y la proporción para los valores de 1000 a 2000 (kg*MS/Ha/año) es de 18.9% y para valores de PPN mayores a 2000 (kg*MS/Ha/año) es el 29.58% restante. En la Figura 40 se muestra la distribución de la Productividad Primaria Neta en el país para las condiciones actuales.

Cuadro 46 Superficie y proporción del total del país de los rangos de Productividad Primaria Neta (kg*MS/Ha/año) para las condiciones actuales.

PPN (kgMS/Ha/año)	Superficie (Ha)	%
0-100	4'914,668	2.54%
100-200	24'937,417	12.91%
200-300	5'079,700	2.63%
300-400	23'612,867	12.22%
400-500	1'372,728	0.71%
500-1000	39'649,963	20.52%
1000-1500	19'686,107	10.19%
1500-2000	16'830,518	8.71%
2000-2500	21'661,201	11.21%
2500-5000	35'463,897	18.36%
5000-7500	0	0.00%
7500-10000	0	0.00%
10000-12500	0	0.00%
12500-15000	49.58	0.00%

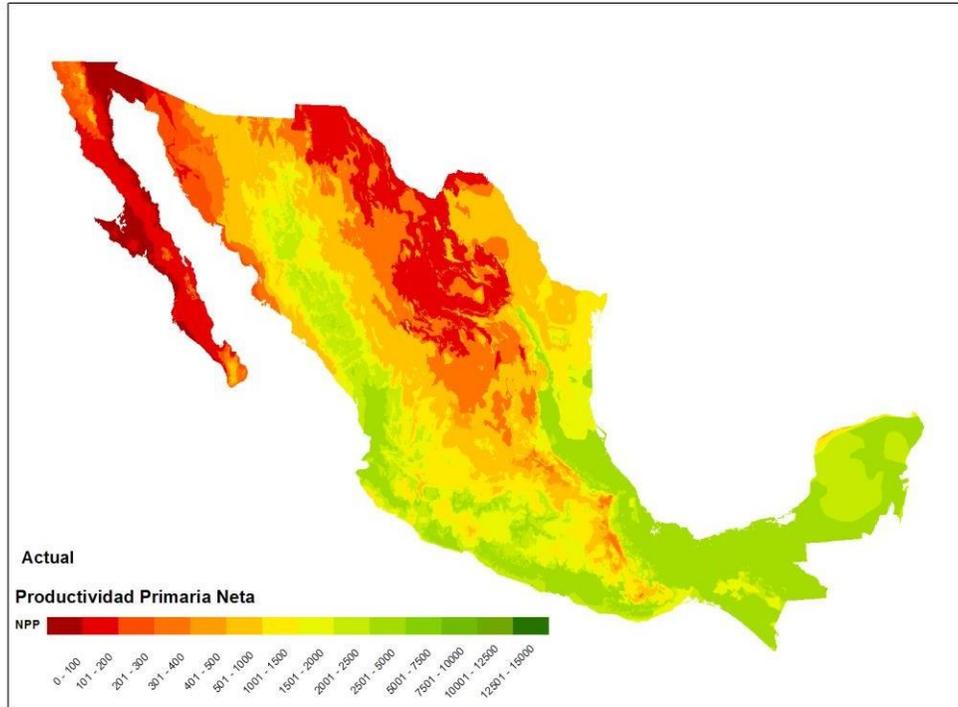


Figura 40 Mapa de Productividad Primaria Neta (kg*MS/Ha/año) de México para las condiciones actuales

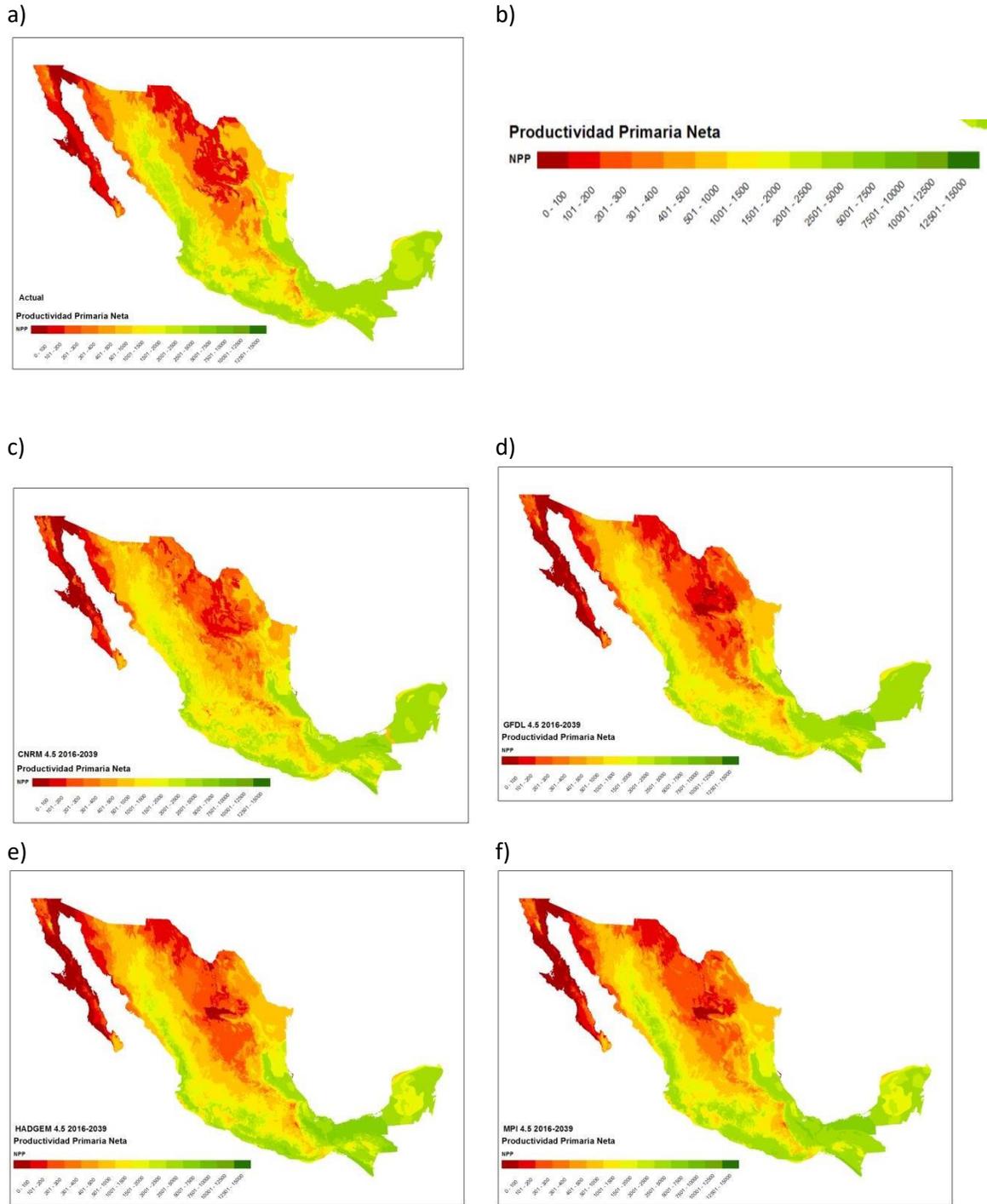
5.4.2 Productividad Primaria Neta bajo escenarios de cambio climático

En las Figuras 41, 42 y 43 se muestra la distribución de la PPN para el escenario base y una RCP de 4.5 Watts/m² para los horizontes de tiempo a corto, mediano y largo plazo, respectivamente.

Cuadro 47 Superficie y proporción del total del país de los rangos de Productividad Primaria Neta (kg*MS/Ha/año) para las condiciones con cambio climático.

Rangos de PPN	Actual	CNRM	GFDL	HADGEM	MPI
0-100	4'996,789.03	43'484,188.76	13'246,100.45	11'306,174.08	10'723,008.81
	-2.54	-22.14	-6.74	-5.76	-5.46
100-200	25'354,103.33	14'345,941.72	19'127,516.55	12'773,381.49	14'356,090.45
	-12.91	-7.3	-9.74	-6.5	-7.31
200-300	5'164,578.59	15'036,625.86	32'091,973.37	24'791,613.55	32'389,284.44
	-2.63	-7.65	-16.34	-12.62	-16.49
300-400	24'007,420.88	12'633,787.55	12'058,006.39	13'275,032.74	15'512,108.91
	-12.22	-6.43	-6.14	-6.76	-7.9
400-500	1'395,665.28	5'466,234.59	8'182,153.21	12'146,840.49	9'515,020.46
	-0.71	-2.78	-4.17	-6.18	-4.84
500-1000	40'312,485.08	26'288,534.91	34'764,753.25	37'131,289.41	35'182,798.49*
	-20.52	-13.38	-17.7	-18.9	-17.91
1000-1500	20'015,047.35	21'534,320.19	25'811,360.32	23'671,499.42	18'747,947.50
	-10.19	-10.96	-13.14	-12.05	-9.54
1500-2000	17'111,743.70	15'149,163.36	16'254,717.69	20'362,729.15	20'029,031.55
	-8.71	-7.71	-8.27	-10.37	-10.22
2000-2500	22'023,143.57	13'622,623.66	8'481,128.77	10'246,928.45	13'911,843.64
	-11.21	-6.93	-4.32	-5.2	-7.08
2500-5000	36'056,473.62	27'501,136.31	22'823,419.12	22'309,744.79	21'318,915.65
	-18.36	-14	-11.62	-11.36	-10.85
5000-7500	0	1'405,266.76	3'596,843.06	8'422,737.79	4'711,450.79
	0	-0.72	-1.83	-4.29	-2.4
7500-10000	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
10000-12500	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
12500-15000	49.58	0	0	0	0
	0	0	0	0	0

Figura 41 Productividad Primaria Neta bajo el escenario RCP 4.5 periodo 2016-2039 para la condición actual y los modelos de cambio climático considerados en el estudio (a) Actual, b) Simbología, c) CNRM, d) GFDL, e) HADGEM y f) MPI).



Para el escenario a corto plazo RCP 4.5 se observa una clara disminución en la productividad bajo los diferentes escenarios teniendo que para el modelo HADGEM se presenta un aumento en la superficie de +6.81% en una productividad primaria neta menor a 500

kg*MS/Ha/año, el modelo GFDL presenta un aumento en la superficie de +12.12% en una productividad primaria neta menor a 500 kg*MS/Ha/año, el modelo MPI presenta un aumento en la superficie de +10.99% en una productividad primaria neta menor a 500 kg*MS/Ha/año, el modelo CNRM presenta un aumento en la superficie de +15.29% en una productividad primaria neta menor a 500 kg*MS/Ha/año.

Cuadro 48 Superficie y proporción del total del país de los rangos de Productividad Primaria Neta (kg*MS/Ha/año) para las condiciones con cambio climático.

Rangos de PPN	Actual	CNRM	GFDL	HADGEM	MPI
0-100	4'996,789.03	43'968,440.23	12'083,556.70	11'231,638.67	11'547,474.77
	-2.54	-22.38	-6.15	-5.72	-5.88
100-200	25'354,103.33	14'002,729.59	9'765,963.82	19'068,649.59	13'946,510.02
	-12.91	-7.13	-4.97	-9.71	-7.1
200-300	5'164,578.59	12'094,927.72	31'388,221.48	23'484,636.32	27'160,300.46
	-2.63	-6.16	-15.98	-11.96	-13.83
300-400	24'007,420.88	12'193,154.97	19'132,685.71	14'289,172.62	15'410,301.80
	-12.22	-6.21	-9.74	-7.27	-7.84
400-500	1'395,665.28	8'224,949.08	8'886,604.01	10'714,243.41	9'767,025.93
	-0.71	-4.19	-4.52	-5.45	-4.97
500-1000	40'312,485.08	27'292,085.98	37'423,227.42	35'569,068.35	34'657,113.29
	-20.52	-13.89	-19.05	-18.11	-17.64
1000-1500	20'015,047.35	18'016,168.97	24'751,017.65	26'142,5169.49	18'976,091.92
	-10.19	-9.17	-12.6	-13.31	-9.66
1500-2000	17'111,743.70	15'751,057.35	18'114,996.59	19'186,608.10	20'617,076.83
	-8.71	-8.02	-9.22	-9.77	-10.5
2000-2500	22'023,143.57	13'167,420.39	9'342,621.49	11'970,093.65	14'787,082..89
	-11.21	-6.7	-4.76	-6.09	-7.53
2500-5000	36'056,473.62	25'228,067.69	19'005,222.53	18'575,990.06	24'072,037.25
	-18.36	-12.84	-9.67	-9.46	-12.25
5000-7500	0	6'493,736.04	6'543,854.83	6'157,780.56	5'496,956.35
	0	-3.31	-3.33	-3.13	-2.8
7500-10000	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
10000-12500	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
12500-15000	49.584	0	0	0	0
	0	0	0	0	0

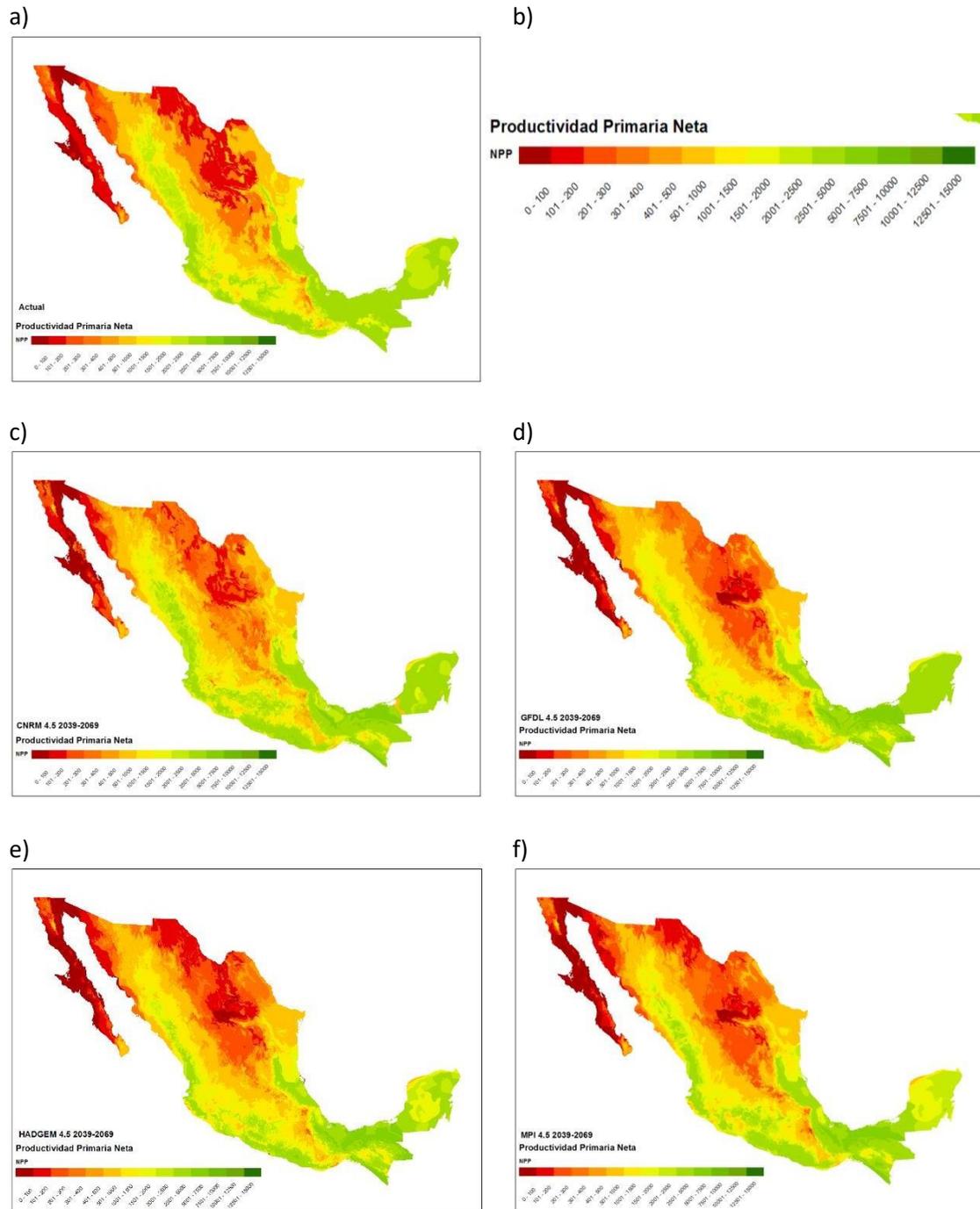


Figura 42 Productividad Primaria Neta bajo el escenario RCP 4.5 periodo 2039-2069 en orden son: a) Actual, b) Simbología, c) CNRM, d) GFDL, e) HADGEM y f) MPI.

Cuadro 49 Superficie y proporción del total del país de los rangos de Productividad Primaria Neta (kg*MS/Ha/año) para las condiciones con cambio climático.

Rangos de PPN	Actual	CNRM	GFDL	HADGEM	MPI
0-100	4'996,789.03 (2.54)	8'592,090.42 (4.37)	20'912,895.13 (10.65)	7864466.89 (4.00)	11'309,063.85 (5.76)
100-200	25'354,103.33 (12.91)	13'097,117.81 (6.67)	27'883,064.88 (14.19)	7839948.53 (3.99)	18'125,631.42 (9.25)
200-300	5'164,578.59 (2.63)	32'038,322.37 (16.31)	28'674,309.76 (14.60)	12045298.02 (6.13)	28'170,483.55 (14.34)
300-400	24'007,420.88 (12.22)	19'449,673.60 (9.90)	10'118,044.27 (5.15)	19248219.31 (9.80)	12'814,538.08 (6.52)
400-500	1'395,665.28 (0.71)	9'449,673.60 (4.81)	5'875,489.33 (2.99)	12436779.13 (6.33)	10'482,217.96 (5.34)
500-1000	40'312,485.08 (20.52)	35'866,683.17 (18.26)	31'475,636.32 (16.02)	45000846.32 (22.91)	33'098,480.37 (16.85)
1000-1500	20'015,047.35 (10.19)	28'188,220.82 (14.35)	23'230,374.45 (11.83)	21958658.44 (11.18)	18'416,649.41 (9.38)
1500-2000	17'111,743.70 (8.71)	16'589,199.69 (8.45)	15'597,147.32 (7.94)	19575757.28 (9.97)	19'348,030.42 (9.85)
2000-2500	22'023,143.57 (11.21)	10'604,669.75 (5.40)	8'036,080.87 (4.09)	13571003.88 (6.91)	15'754,320.01 (8.02)
2500-5000	36'056,473.62 (18.36)	19'118,825.39 (9.73)	16'519,003.09 (8.41)	30078658.83 (15.31)	23'342,611.17 (11.88)
5000-7500	0.00 (0.00)	3'390,009.60 (1.73)	8'115,926.05 (4.13)	6821441.41 (3.47)	5'575,376.76 (2.84)
7500-10000	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)
10000-12500	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)
12500-15000	49.584 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)

Lo que significa que habrá una reducción considerable de la productividad primaria neta en diversas zonas del país. Teniendo un rango de aumento de la superficie de +6.81 a +15.51% en las clases con una productividad menor a 500 kg*MS/Ha/año. (Cuadro 50) Para el escenario a mediano plazo RCP 4.5 se observa una clara disminución en la productividad bajo los diferentes escenarios teniendo que para el modelo HADGEM se presenta un aumento en la superficie de +9.10% en una productividad primaria neta menor a 500 kg*MS/Ha/año, el modelo GFDL presenta un aumento en la superficie de +10.35% en una productividad primaria neta menor a 500 kg*MS/Ha/año, el modelo MPI presenta un aumento en la superficie de +8.61% en una productividad primaria neta menor a 500 kg*MS/Ha/año, el modelo CNRM presenta un aumento en la superficie de +15.06% en una productividad primaria neta menor a 500 kg*MS/Ha/año (Cuadro 51)

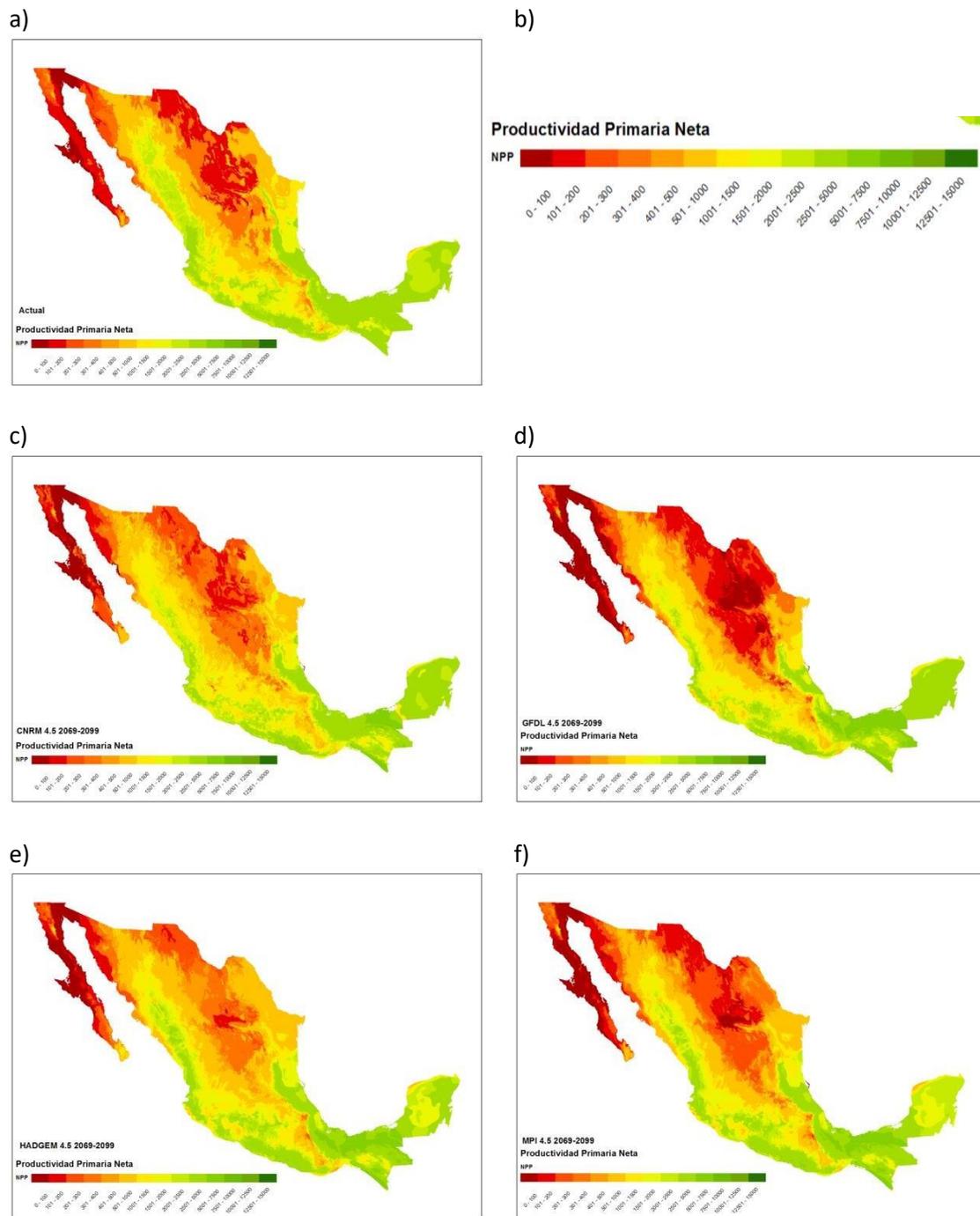


Figura 43 Productividad Primaria Neta bajo el escenario RCP 4.5 periodo 2069-2099 para la condición actual y los modelos de cambio climático considerados en el estudio (a) Actual, b) Simbología, c) CNRM, d) GFDL, e) HADGEM y f) MPI).

Para el escenario a largo plazo RCP 4.5 se observa una clara disminución en la productividad bajo los diferentes escenarios teniendo que para el modelo HADGEM se presenta una disminución en la superficie de -6.89% en una productividad primaria neta menor a 500 kg*MS/Ha/año, el modelo GFDL presenta un aumento en la superficie de +16.57% en una productividad primaria neta menor a 500 kg*MS/Ha/año, el modelo MPI presenta un aumento en la superficie de +10.20% en una productividad primaria neta menor a 500 kg*MS/Ha/año, el modelo CNRM presenta un aumento en la superficie de +11.05% en una productividad primaria neta menor a 500 kg*MS/Ha/año (Cuadro 52)

En las Figuras 44, 45 y 46 se muestra la distribución de la PPN para el escenario base y una RCP de 8.5 Watts/m² para los horizontes de tiempo a corto, mediano y largo plazo, respectivamente.

Para el escenario a corto plazo RCP 8.5 se observa una clara disminución en la productividad bajo los diferentes escenarios teniendo que para el modelo HADGEM se presenta un aumento en la superficie de +12.89% en una productividad primaria neta menor a 500 kg*MS/Ha/año, el modelo GFDL presenta un aumento en la superficie de +8.93% en una productividad primaria neta menor a 500 kg*MS/Ha/año, el modelo MPI presenta un aumento en la superficie de +10.12% en una productividad primaria neta menor a 500 kg*MS/Ha/año, el modelo CNRM presenta un aumento en la superficie de +12.77% en una productividad primaria neta menor a 500 kg*MS/Ha/año (Cuadro 53)

Cuadro 50 Superficie y proporción del total del país de los rangos de Productividad Primaria Neta (kg*MS/Ha/año) para las condiciones con cambio climático.

Rangos de PPN	Actual	CNRM	GFDL	HADGEM	MPI
0-100	4'996,789.03 (2.54)	8'232,478.06 (4.19)	8'778,253.31 (4.47)	9'857,427.75 (5.02)	12'462,102.63 (6.34)
100-200	25'354,103.33 (12.91)	13'849,920.22 (7.05)	10'978,255.41 (5.59)	19'013,461.39 (9.68)	13'953,327.79 (7.10)
200-300	5'164,578.59 (2.63)	34'682,915.78 (17.66)	29'875,920.22 (15.21)	33'932,458.73 (17.27)	31'579,654.33 (16.08)
300-400	24'007,420.88 (12.22)	16'380,498.30 (8.34)	17'809,649.72 (9.07)	12'593,950.78 (6.41)	12'748,584.64 (6.49)
400-500	1'395,665.28 (0.71)	12'749,110.32 (6.49)	11'004,967.58 (5.60)	10'836,245.78 (5.52)	10'057,506.11 (5.12)
500-1000	40'312,485.08 (20.52)	35'079,221.46 (17.86)	37'405,286.29 (19.04)	34'681,297.41 (17.66)	34'343,570.51 (17.48)
1000-1500	20'015,047.35 (10.19)	32'648,271.19 (16.62)	27'602,692.97 (14.05)	19'167,135.63 (9.76)	18'483,083.35 (9.41)
1500-2000	17'111,743.70 (8.71)	16'102,483.24 (8.20)	18'215,579.19 (9.27)	16'053,973.10 (8.17)	19'798,817.26 (10.08)
2000-2500	22'023,143.57 (11.21)	11'248,798.19 (5.73))	11'905,062.63 (6.06)	14'478,821.37 (7.37)	12'911,403.83 (6.57)
2500-5000	36'056,473.62 (18.36)	15'411,056.49 (7.85)	19'217,244.11 (9.78)	21'000,570.12 (10.69)	25'215,809.85 (12.84)
5000-7500	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	3'597,487.48 (1.83)	4'824,242.74 (2.46)	4'884,225.32 (2.49)
7500-10000	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)
10000-12500	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)
12500-15000	49.584 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)

Para el escenario a mediano plazo RCP 8.5 se observa una clara disminución en la productividad bajo los diferentes escenarios teniendo que para el modelo HADGEM se presenta un aumento en la superficie de +6.98% en una productividad primaria neta menor a 500 kg*MS/Ha/año, el modelo GFDL presenta un aumento en la superficie de +11.97% en una productividad primaria neta menor a 500 kg*MS/Ha/año, el modelo MPI presenta un aumento en la superficie de +10.81% en una productividad primaria neta menor a 500 kg*MS/Ha/año, el modelo CNRM presenta un aumento en la superficie de +1.67% en una productividad primaria neta menor a 500 kg*MS/Ha/año (Cuadro 54)

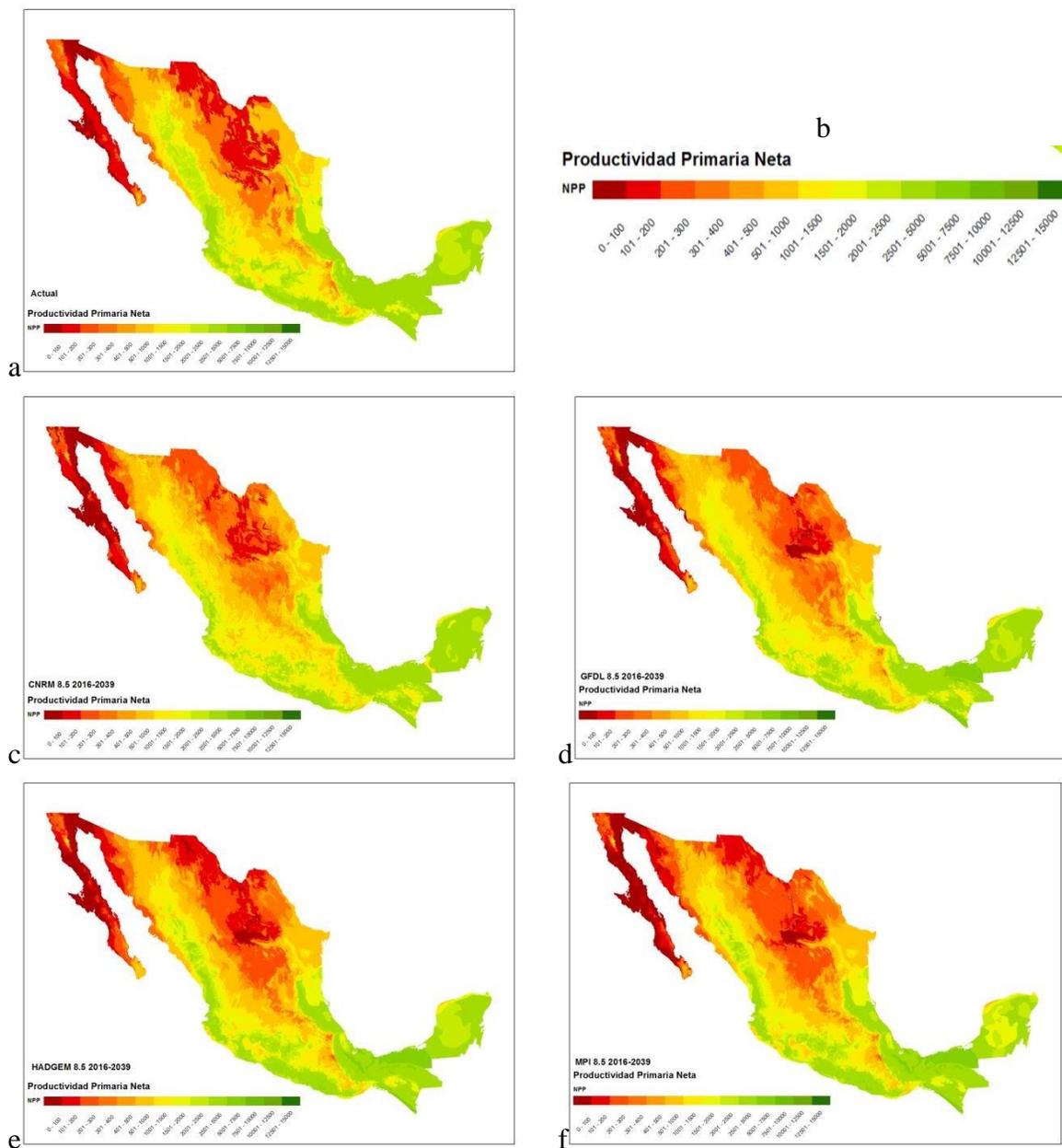


Figura 44 Productividad Primaria Neta bajo el escenario RCP 8.5 periodo 2016-2039 para la condición actual y los modelos de cambio climático considerados en el estudio (a) Actual, b) Simbología, c) CNRM, d) GFDL, e) HADGEM y f) MPI).

Cuadro 51 Superficie y proporción del total del país de los rangos de Productividad Primaria Neta (kg*MS/Ha/año) para las condiciones con cambio climático.

Rangos de PPN	Actual	CNRM	GFDL	HADGEM	MPI
0-100	4'996,789.03 -2.54	7'978,475.74 -4.06	13'021,140.09 -6.63	9'800,067.35 -4.99	9'451,185.66 -4.81
100-200	25'354,103.33 -12.91	15'485,103.15 -7.88	20'760,482.18 -10.57	14'172,212.61 -7.21	22'707,864.23 -11.56
200-300	5'164,578.59 -2.63	30'951,944.52 -15.76	29'157,169.59 -14.84	23'772,555.52 -12.1	25'457,911.67 -12.96
300-400	24'007,420.88 -12.22	18'461,218.86 -9.4	13'099,127.99 -6.67	14'188,123.92 -7.22	14'329,190.97 -7.29
400-500	1'395,665.28 -0.71	9'787,217.27 -4.98	8'396,165.20 -4.27	12'703,251.94 -6.47	10'222,153.18 -5.2
500-1000	40'312,485.08 -20.52	36'682,421.61 -18.67	33'572,415.07 -17.09	37'668,112.94 -19.18	30'814,075.30 -15.69
1000-1500	20'015,047.35 -10.19	27'382,421.61 -17.09	23'631,664.10 -12.03	25'322,298.92 -12.89	18'890,531.69 -9.62
1500-2000	17'111,743.70 -8.71	15'133,297.50 -7.7	15'313,962.01 -7.8	18'177,958.91 -9.25	19'484,716.70 -9.92
2000-2500	22'023,143.57 -11.21	10'624,442.60 -5.41	9'396,832.22 -4.78	12'327,266.95 -6.28	13'995,320.54 -7.12
2500-5000	36'056,473.62 -18.36	19'897,767.57 -10.13	21'846,333.84 -11.12	20'747,523.43 -10.56	23'821,115.55 -12.13
5000-7500	0 0	4'000,752.92 -2.04	8'242,679.22 -4.2	7'558,603.61 -3.85	7'263,906.01 -3.7
7500-	0	0	0	0	0
10000	0	0	0	0	0
10000-	0	0	0	0	0
12500	0	0	0	0	0
12500-	49.584	0	0	0	0
15000	0	0	0	0	0

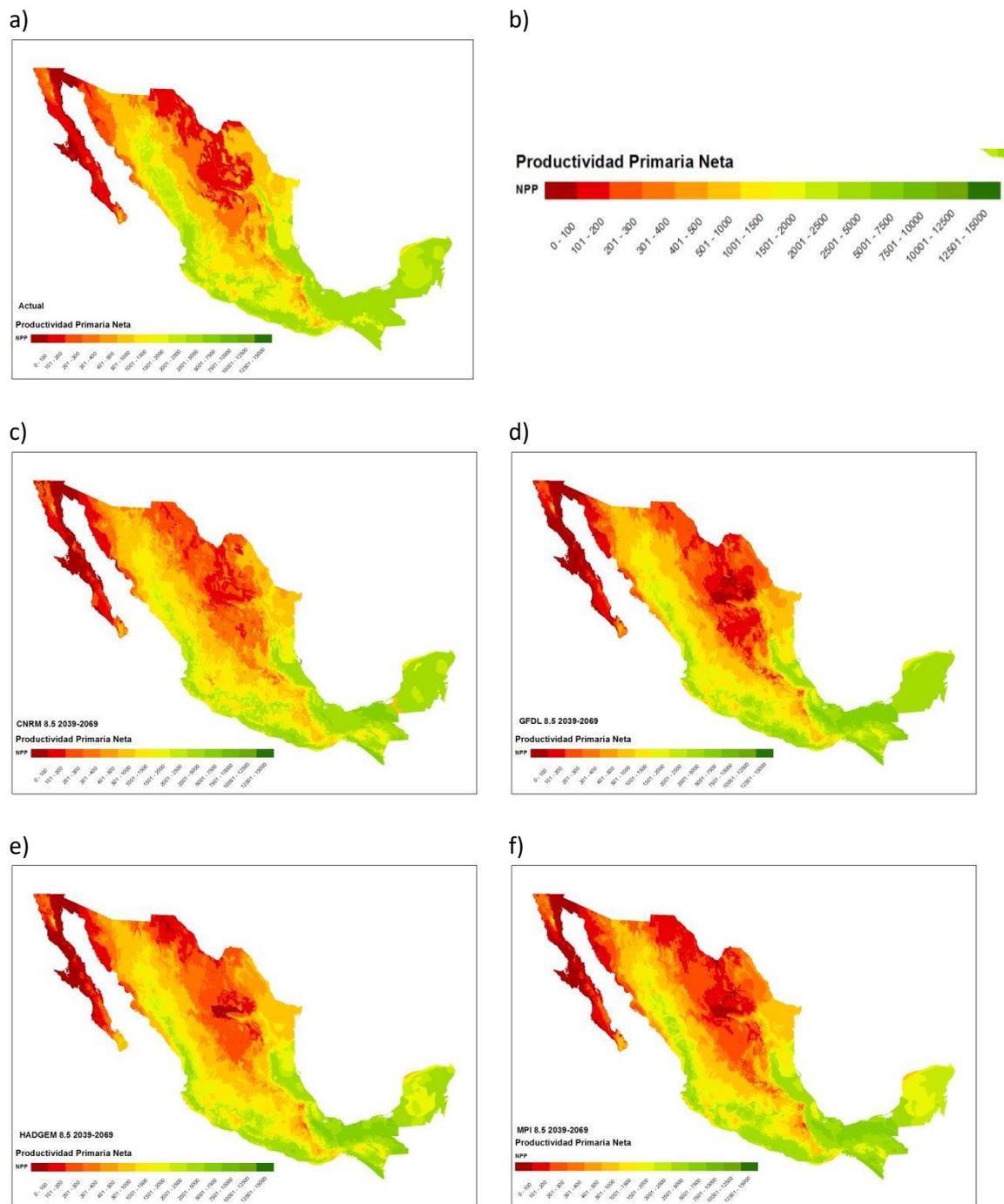


Figura 45 Productividad Primaria Neta bajo el escenario RCP 8.5 periodo 2039-2069 para la condición actual y los modelos de cambio climático considerados en el estudio (a) Actual, b) Simbología, c) CNRM, d) GFDL, e) HADGEM y f) MPI).

Cuadro 52 Superficie y proporción del total del país de los rangos de Productividad Primaria Neta (kg*MS/Ha/año) para las condiciones con cambio climático.

Rangos de PPN	Actual	CNRM	GFDL	HADGEM	MPI
0-100	4'996,789.03	7'730,357.65	19'870,289.94	11'565,188.76	26'270,98.47
	-2.54	-3.94	-10.12	-5.86	-13.37
100-200	25'354,103.33	14'176,395.36	24'397,711.28	14'731,540.31	28'563,008.95
	-12.91	-7.22	-12.42	-7.5	-14.54
200-300	5'164,578.59	28'654,788.58	29'189,460.26	19'229,908.95	23'664,019.78
	-2.63	-14.59	-14.86	-9.78	-12.05
300-400	24'007,420.88	21'083,970.21	12'746,452.60	10'908,167.71	23'664,019.78
	-12.22	-10.73	-14.86	-5.55	-12.05
400-500	1'395,665.28	13'333,871.37	7'552,859.12	11'303,411.09	13'100,904.37
	-0.71	-6.79	-3.84	-5.75	-6.67
500-1000	40'312,485.08	36'998,958.96	30'793,928.54	39'224,917.02	7'723,518.71
	-20.52	-18.83	-15.68	-19.97	-3.93
1000-1500	20'015,047.35	26,089,312.31	19'484,788.53	20'752,998.38	25'623,158.35
	-10.19	-13.28	-9.92	-10.56	-9.35
1500-2000	17'111,743.70	15'718,069.19	16'896,405.93	19'996,219.64	18'357,158.35
	-8.71	-8	-9.92	-10.18	-9.35
2000-2500	22'023,143.57	11'333,549.20	8'334,401.28	13'536,563.92	21'559,761.07
	-11.21	-5.77	-4.24	-6.89	-10.98
2500-5000	36'056,473.62	13'295,978.75	16'763,714.90	26'089,592.01	8'110,506.08
	-18.36	-6.77	-8.53	-13.28	-4.13
5000-7500	0	7'978,497.43	10'359,959.55	9'105,197.89	15'144,856.35
	0	-4.06	-5.27	-4.64	-7.71
7500-10000	0	0	0	2,794.79	8'320,510.01
	0	0	0	0	-4.24
10000-12500	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
12500-15000	49.584	0	0	0	0.00)
	0	0	0	0	0

Para el escenario a largo plazo RCP 8.5 se observa una clara disminución en la productividad bajo los diferentes escenarios teniendo que para el modelo HADGEM se presenta un aumento en la superficie de +3.43% en una productividad primaria neta menor a 500 kg*MS/Ha/año, el modelo GFDL presenta un aumento en la superficie de +25.09% en una productividad primaria neta menor a 500 kg*MS/Ha/año, el modelo MPI presenta un aumento en la superficie de +27.67% en una productividad primaria neta menor a 500 kg*MS/Ha/año, el modelo CNRM presenta un aumento en la superficie de +12.26% en una productividad primaria neta menor a 500 kg*MS/Ha/año (Cuadro 55)

En las Figuras 47 y 48 se muestra gráficamente la superficie en millones de hectáreas de las diferentes clases de PPN para el horizonte lejano y RCP de 4.5 y 8.5, respectivamente. Se puede observar en ambas graficas el aumento que existe especialmente en el modelo MPI +3.22% y +10.83%, respectivamente para el rango de 0 a 100 kg*MS/Ha/año.

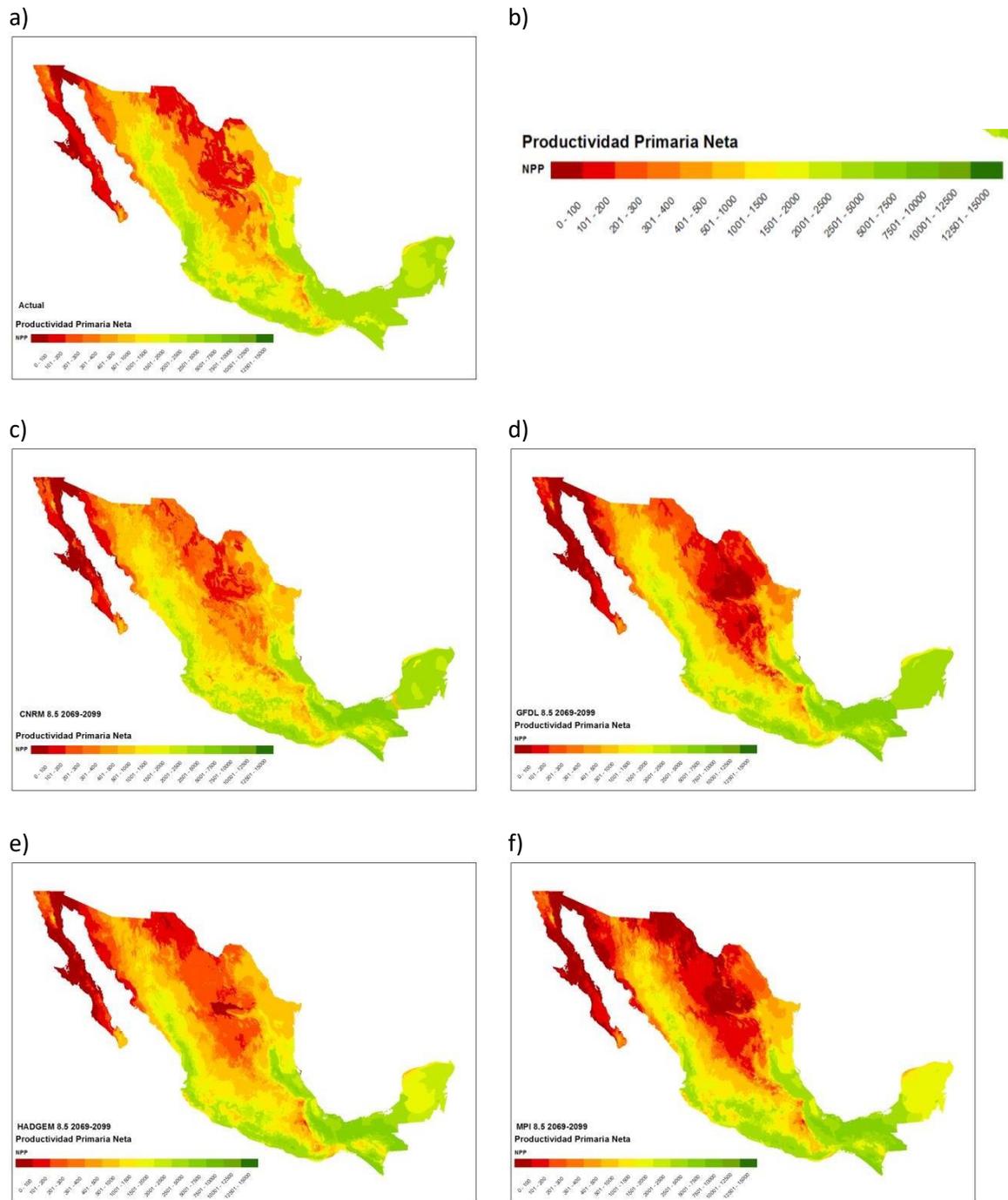


Figura 46 Productividad Primaria Neta bajo el escenario RCP 8.5 periodo 2069-2099 para la condición actual y los modelos de cambio climático considerados en el estudio (a) Actual, b) Simbología, c) CNRM, d) GFDL, e) HADGEM y f) MPI).

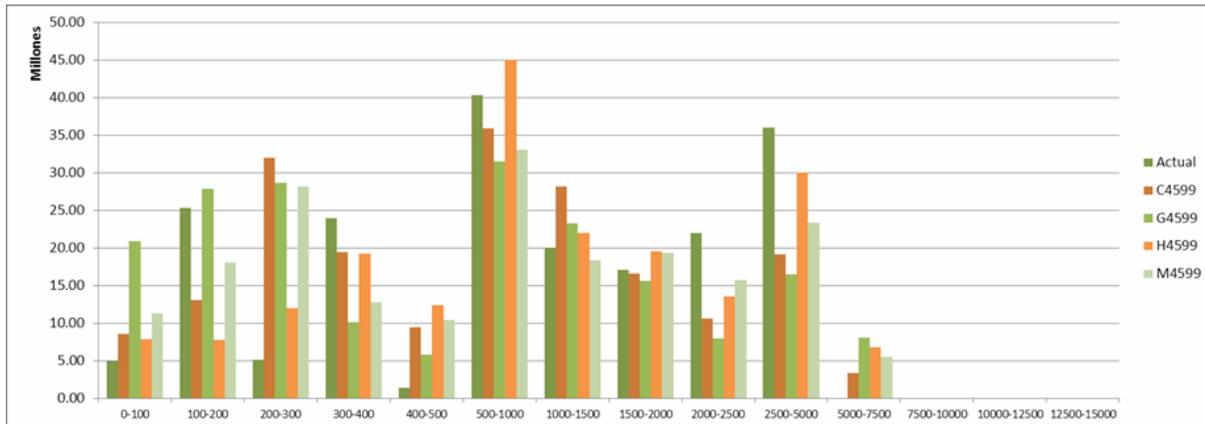


Figura 47 Productividad Primaria Neta actual y con escenarios de cambio climático RCP 4.5 2069 -2099

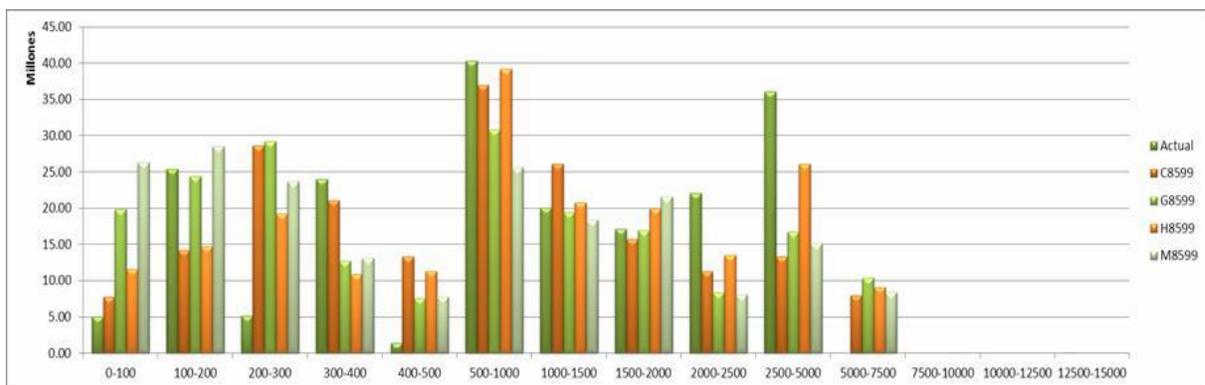


Figura 48 Productividad Primaria Neta actual y con escenarios de cambio climático RCP 8.5 2069 -2099

Mientras que en las clases con mayor productividad se proyectó disminuciones más drásticas tal como las presenta el modelo GFDL con -5.81% y -6.97%, respectivamente para la clase 2000 a 2500 kg*MS/Ha/año.

En la figura 49 se muestra gráficamente los cambios en la superficie de la PPN con los escenarios de cambio climático a largo plazo para los RCP de 4.5 y 8.5 para los modelos considerados, así como para el escenario base en donde es notoria la disminución considerable de superficie en los rangos de Productividad Primaria Neta de 500 a 1000 hasta 5000 a 7500 en la superficie. Se puede observar la línea azul (actual) en contraste con la línea roja (promedio de todos los escenarios de cambio climático).

En el rango de 200 a 300 kg*MS/Ha/año la línea roja tiene un gran salto en la superficie (de menos de 10 millones de Ha a casi 30 millones de Ha). En cambio, el rango 2,500 a 3,000 kg*MS/Ha/año cambia la superficie de casi 40 millones de Ha. a 20 millones de Ha. Se puede decir que en todos los escenarios se muestra una disminución considerable en la productividad primaria neta de muchas partes del país. Esto se puede explicar a que la

disminución en la precipitación y al aumento en la evapotranspiración evitando que las plantas y los árboles produzcan al mismo nivel que lo hacen en el escenario actual.

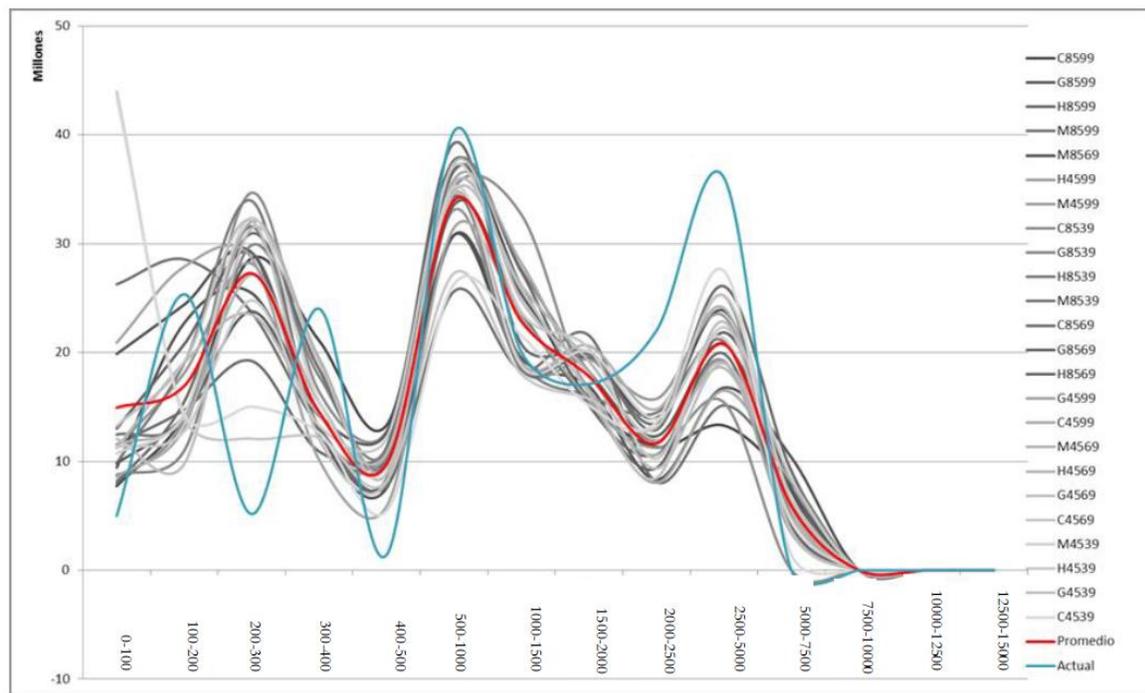


Figura 49 Superficie para las clases de Productividad Primaria Neta (PPN) (kg*MS/Ha/año) para el horizonte a largo plazo y los RCP de 4.5 y 8.5 para los cuatro modelos del estudio.

6. Literatura citada

- Akihiko, I., et al., 2006, Absorption of Photosynthetically Active Radiation, Dry-matter Production, and Light-use Efficiency of Terrestrial Vegetation: A Global Model Simulation, H. Kawahata and Y. Awaya (Eds.)-Global Climate Change and Response of Carbon Cycle in the Equatorial Pacific and Indian Oceans and Adjacent Landmasses, Elsevier Oceanography Series 73, pp. 335-355
- Asrar, G. et al., 1984, Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agricult. J.* 76, 300–306.
- Berthelot M., Friedlingstein P., & Ciais P. 2002. Global response of the terrestrial biosphere to CO₂ and climate change using a coupled climate-carbon cycle model. *Global Biogeochemical Cycles*. 16. 31(1):31-15.
- Blum W. E.H. 2005. Soils and Climate Change. *Soils & Sediments*. 5:67-68. Doi: <http://dx.doi.org/10.0165/jss2005.02.006>.
- Boege E., & Chan G. 2008. El patrimonio biocultural de los pueblos indígenas de México: hacia la conservación in situ de la biodiversidad y agrobiodiversidad en los territorios indígenas. Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Botterweg P. 1994. Modelling the effects of Climate Change on Runoff and erosion in Central Southern Norway, in Rickson, R.J. (ed.), *Conserving Soil Resources: European Perspective*. First Int. Con. Euro. Soc. Soil Conserv., p. 273-285.
- Bouwman, A.F. 1990. Soils and the greenhouse Effect. John Wiley and Sons (eds.), Chichester.
- Bradbury N.J. and Powlson D.S. 1994. The potential Impact of Global Environmental Change on Nitrogen Dynamics in Arable Systems. In *Soil Responses to Climate Change*. NATO ASI. Series 23. Springer-Verlag, Heidelberg, p. 137-154.
- Brauch H. G. & O. Ú. 2009. Diagnosis: Desertification, Land Degradation and Drought. In *Securitizing Ground Grounding Security* (pp. 12-17). Bonn-Madrid: UNCCD.
- Brinkman R. 1990. Resilience Against Climate Change?. Soil minerals, Transformations and Surface Properties: Eh and pH'. In *Soils on a Warmer Earth*. Elsevier (eds.) Scharpensell, H.W., Schomaker, M. and Ayoub, A.). p. 51-60.
- Budyko M.I. 1974. *Climate and life*. Academia Press. New York. 508 p.
- Carlson T. N., et al, 1997, On the Relation between NDVI, Fractional Vegetation Cover and Leaf Area Index, *Remote Sensing Environment*, 62:241-252.
- Carter M.R. and Stewart B.A. 1996. *Structure and organic matter storage in agricultural soils*. CRC Press.
- Castillo A.M., Nikolskii G. I., Ortiz S. C.A., Vaquera H.H., Gustavo Cruz B.G. Mejía S.E. y González H.A. 2007. Alteración de la fertilidad del suelo por el cambio climático y su efecto en la productividad agrícola. *Interciencia*. 32(6):368-376.
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). 2010. *La Economía del Cambio Climático en América Latina y el Caribe - Síntesis*. Santiago, Chile.

- Chan K.Y. 2011. Climate Change on Soil Structure and Soil Health: Impacts and Adaptation. In. B.P. Singh et al. (eds.). *Soil Health and Climate Change*. *Soil Biology* 29. pp 49-69. DOI 10.1007/978-3-642-20256-8_3.
- Chepil, W. S. 1960. Conversion of relative field erodality to annual soil by wind. *Soil sci. Soc. Am. Proc.* 24: 143-145.
- CONAFOR-UACH. 2013. Línea Base Nacional de Degradación de Tierras y Desertificación. Informe final. Zapopan, Jalisco: Comisión Nacional Forestal y Universidad Autónoma Chapingo.
- Contreras B.A., G.I. Nikolskii, N.L. Aceves, R.R. Arteaga, M.M. Escalona, R.D. Fernández. 2002. Pronóstico del cambio en algunas propiedades de los suelos agrícolas al modificarse las condiciones microclimáticas. *Agrociencia*. 36:267-277. Davidson A.E y Janssens A. I. 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*. 440: 165-173. doi: 10.1038/nature04514.
- Day J., Yanez-Arancibia A., Cowan J., Day R., Twilley R., & Rybczyk J. 2009. Chapter 14 Global climate change impacts on coastal ecosystems in the Gulf of Mexico: Considerations for integrated coastal management. In J. Day, & A. Yanez (eds). *The Gulf of Mexico Ecosystem-based Management*. Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies . College Station, TX: TX A & M University Press.
- De la Rosa D. 2008. Evaluación Agro-ecológica de suelos para un desarrollo rural sostenible. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 404p.
- De la Torre, A., P. Fajnzylber y J. Nash. 2009. *Low Carbon, High Growth: Latin American Responses to Climate Change An Overview*. Washington, D.C.: Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento/Banco Mundial.
- Delgado G., Gay C., Imaz M., & Martínez M. 2010. México frente al cambio climático. Retos y oportunidades. México. UNAM/SEMARNAT.
- Delgado R. 2011. Cambio climático y pobreza, retos de las ciudades periféricas a principios del siglo XXI. In R. Pichs, *Cambio climático enfoques desde el Sur*. Habana/Panamá: Instituto Cubano del Libro Editorial de Ciencias Sociales/ Ruth Casa Editorial.
- Dunne, T. y Leopold, L. 1978. *Water in Environmental Planning*. Ed. W. H. Freeman. USA.
- FAO. 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos; Roma, Italia.
- FAO. 1994. Erosión de suelos en América Latina; "El Proyecto GLASOD-SOTER", Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe Santiago, Chile.
- Favis-Mortlock D. 1994. Modelling Soil Erosion on UK Agricultural Land Under a Changed Climate. In Rounsevell, M.D.A. y Loveland, P.J. (eds.). *Soil Resonnes to Climate Change*. Springer-Verlag. Berlin, Germany .p. 211-215.
- Favis-Mortlock D., Evans R., Boardman J. and Harris T.M. 1991. Climate Change winter wheat yield and soil erosion on the English South Downs. *Agric. Syst.* 37:415-433.
- Flores M. E., Campos E. J., Chávez S. R., & Castro G. J. 1998. Saltwater intrusion of the Costa de Hermosillo Aquifer Sonora, Mexico: ANumerical Simulation. *Geofisica Internacional*, 37(3):133-151.

- Follett RF. 1993. Global climate change, U.S. agriculture, and carbon dioxide. *J Prod Agric.* 6:181–190.
- Gómez-Díaz, J., & Monterroso-Rivas, A. I. 2012. Actualización de la delimitación de las zonas áridas, semiáridas y sub-húmedas secas de México a escala regional. Reporte final de proyecto de investigación Fondo SEMARNAT-CONACYT. Texcoco, México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Goulding K.W.T., Hütsch B.W., Webster C.P., Willison T.W. and Powlson D.S. 1995. The Effect of Agriculture on Methane Oxidisation in soil. *Philosop. Trans. Roy.Soc. London A.* 351: 313-325.
- Griffiths R., Madritch M., & Swanson A. 2009. The effects of topography on forest soil characteristics in the Oregon Cascade Mountains (USA): Implications for the effects of climate change on soil properties. *Forest Ecology and Management*, 257:1-7.
- Gutierrez M. E. y T. Espinoza. 2010. Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático: Diagnóstico inicial, avances, vacíos y potenciales líneas de acción en Mesoamérica. *Notas Técnicas IDB-TN-144*. Washington, D.C.: Banco Interamericano de Desarrollo.
- Hughes L. 2000. Biological consequences of global warming: is the signal already. *TREE*, 15(2):56-61.
- INECC-PNUD. 2016. Evaluación de impactos del cambio climático sobre los suelos de México. México, D.F. INECC-PNUD. En proceso.
- Ineson P., Benham D., Poskitt J., Harrison A., Taylor K., & Woods C. 1998. Effects of climate change on nitrogen dynamics in uplands soils. 2. A soil warming study. *Global Change Biology*. 4:153-161.
- 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 1st edition. 1056 pp.
- Jarauta E. y Porta J. 1990. Un nuevo modelo simulativo para la estimación del régimen de humedad de los suelos. I Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería. SEMNI. 491-497 pp.
- Jenkinson, D. S. *et al.* 1991. Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to global warming. *Nature*. 351:304–306.
- Jones C., McConnell C., Coleman K., Cox P., Falloon P., Jenkinson D., & Powlson D. 2005. Global climate change and soil carbon stocks; predictions from contrasting models for the turnover of organic carbon in soil. *Global Change Biology*. 11:154- 166.
- Kane D.L., Hinzman L.D. y Zarling J.P. 1991. Thermal response of the active layer to climatic warming in a Permafrost Environment. *Cold Regions Sci. Technol.* 19:111-122.
- Keeling, C. 1996. Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO₂ measurements. *Nature*. 382:146-149.
- Kirschbaum. 1996. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage. *Soil Biol. Biochem.* 27: 753–760.
- Koepf. 1953. Die Temperatur/Zeit-Abhängigkeit der Bodenatmung. *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde* 61: 29-48.

- Krischbaum M. 1995. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage. *Soil Biology Biochemistry*, 27(6):753-760.
- Kuntze H. 1993. Bogs as Sinks and Sources of C and N. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*. 69: 277-280.
- Lal R. 2004. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science*. 304(5677):1623-1627.
- Lal R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*. 123:1-22.
- Lawrence W., & Oechel W. 1983. Effects of soil temperature on the carbon exchange of taiga seedings. I. Root respiration. *Canadian Journal of Forest Research*, 13:840- 849.
- Leal A., Millan G., Mendez J., & Servin J. 2008. Evaluación de la afectación de la calidad del agua en cuerpos de agua superficiales y subterráneos por efecto de la variabilidad y el cambio climático. México, D.F.: INE-SEMARNAT-IMTA.
- Legros J.P., Loveland P.J. and Rounsevell M.D.A. 1994. Soils and Climate Change. Where Next?. in Rounsevell M.D.A. and Loveland P.J. (eds.). *Soil Responses to Climate Change*. NATO ASI series 23. Springer-Verlag, Heidelberg. p. 257-266.
- Macedo J. and Bryant R.B. 1987. Morphology, Mineralogy and Genesis of Hydrosequence of Oxisols in Brazil. *Soil Sci.Soc. Amer. J.* 57:690-698.
- McGuire AD, Melillo JM, Kicklighter DW y Joyce LA. 1995. Equilibrium responses of soil carbon to climate change: Empirical and process-based estimates. *J. Biogeogr.* 22:785–796.
- Melillo M., McGuire A., Kicklighter D., Moore B., Vorosmarty J., & Schloss A. 1993. Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*. 363:234-240.
- Mendelsohn R., A. F. Días Ávila y N. Seo. 2007. Proyecto: Incorporación del Cambio Climático a las Estrategias de Desarrollo Rural. Síntesis de los Resultados en América Latina. Montevideo, Uruguay: Programa Cooperativo para el Desarrollo Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur.
- Monterroso A.I. y J.D. Gómez. 2003. Escenarios climatológicos de la República Mexicana ante el cambio climático. Comisión Nacional de las Zonas Áridas- Universidad Autónoma Chapingo. 170 pp.
- Monterroso R.A., Gómez D.J., Lluch C.S, Cobo P.M., Sáenz R.C., Pérez E.R., Martínez C.C., Márquez R.C., Baca M.J. 2015. Sistemas de producción de alimentos y seguridad alimentaria. In Gay G.C., Cos G.A y Peña L.T. (eds). *Reporte Mexicano de Cambio Climático GRUPO II Impactos, vulnerabilidad y adaptación*. Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F. p. 97-121.
- Myneni R. E. 1997. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981–1991. *Nature*, 386:698-701.
- Myneni, R.B. et al., 1995, The interpretation of spectral vegetation indexes. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 33, 481–486.
- Nearing M., Pruski F., & O'Neal M. 2004. Expected climate change impacts on soil erosion rates: A review. *Journal of Soil and Water Conservation* 59(1): 43-50.
- Nemani, R.R. and Running, S.W., 1997, Land cover characterization using multitemporal red, NIR and thermal IR data from NOAA/AVHRR. *Ecol. Appl.* 7, 79–90.
- Nemani, R.R. et al., 2003, Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science* 300, 1560–1563.

- Newton P.C.D., R. Andre C., G.R. Edwards y P.A. Niklaus. 2007. Agroecosystems in a changing climate. CRC Taylor & Francis. New York. 364 p.
- Nikolskii G.I., Bakhlaeva O., Contreras A. And Ordaz V. 2001 Assesment of changes in soil properties as dependent on hydrotermic conditions of plowlands (by the example of Mexico). *Eurasian Soil Science*. 35(10):1031-1036.
- Nikolskii Y.U.N., Castillo-Álvarez M., Bakhlaeva O.S., Román-Calleros X.A. and Maslov B.S. 2006. The influence of the possible global climate change on the properties of Mexican soils. *Eurasian Soil Science*. 39(11):1164-1169.
- OCDE. 2008. An OECD Framework for Effective and Efficient Environmental Policies. Meeting of the Environment Policy Committee (EPOC) at Ministerial Level, 28-29. Paris: Organization for Economic Co-operation and Development.
- Ortiz R. 2012. El cambio climático y la producción agrícola. Banco interamericano de Desarrollo. Unidad de Salvaguardias Ambientales.ESG-TN-383.
- Ortiz, M. M., Anaya, M. y J. W. Estrada-Berg. 1994. Evaluación, cartografía y políticas preventivas de la degradación de la tierra. Colegio de Posgraduados- Universidad Autónoma Chapingo y Comisión Nacional de Zonas Áridas. 161 pp
- Paruelo, J.M. et al., 2001, Current distribution of ecosystem functional types in temperate South America. *Ecosystems* 4, 683–698.
- Paustian K, Lehmann J, Ogle S, Reay D, Roberstson R y Smith P. 2016.Climate-smart soils. *Nature*.532: 49-57. doi:10.1038/nature17174.
- Pegov S.A. Y Jomyakov P. 1991. Modelación del desarrollo de los sistemas ecológicos. San Petersburgo, Rusia: Ed. Gidrometeoizdat. 223 pp.
- Pezeshki S.R. De Laune R.D. and Patrick W.H. 1990. Flooding and Saltwater Intrusion: Potential Effects on Survival and Productivity of Wetland Forests Along the US Gulf coast. *Forest Ecol. and Manag.* 33(34):287-301.
- Phillips D. L., White D. and Johnson B. 1993. Implications of Climate Change Scenarios for Soil Erosion Potential in the USA. *Land Degrad. Rehab.* 4:61-72.
- Porporato A, Daly E and Rodriguez-Iturbe I. 2004. Soil Water Balance and Ecosystem Response to Climate Change. *The American Naturalist*.164(5):625-632.
- Raich JW y Schlesinger WH. 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus* 44: 81–89.
- Rengel Z. 2011. Soil pH, Soil Health and Climate Change. In. B.P. Singh *et al.* (eds.). Soil Health and Climate Change. *Soil Biology* 29. pp 69-87. DOI 10.1007/978-3-642-20256-8_3.
- Roerick, G.J. et al., 2003, Assessment of climate impact on vegetation dynamics by using remote sensing. *Phys. Chem. Earth* 28, 103–109.
- Romero L. 2010. Water in Mexico City: what will climate change bring to its history of water-related hazards and vulnerabilities? *Environvenment and Urbanization*, 22: 157-178.
- Romero-Lankao P., Smith J., Davidson D., Diffenbaugh N., Kinney P., Kirshen P., & Villers R. 2014. North America. In C. Field, & V. Barros. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. pp. 1439-1498. Geneva: IPCC/ WMO/ UNEP.
- Rounsevell M.D.A., Evans S.P. and Bullock P. 1999. Climate Change and Agricultural soils: Impacts and adaptation. *Climatic Change*. 43:683-709.

- Ruiz G.P. 2015. Diseño de tecnologías agroforestales con mayor potencial de fijación de carbono en Ajuchitlán, Morelos. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Chapingo.
- Running, S.W., 1990, Estimating primary productivity by combining remote sensing with ecosystem simulation. In *Remote Sensing of Biosphere Functioning* (Hobbs, R.J. and Mooney, H.A., eds), pp. 65–86, Springer-Verlag.
- Rustad L. E., Huntington G. T. y Boone D.R. 2000. Controls on soil respiration: Implications for climate change. *Biogeochemistry*. 48: 1-6.
- Rustad LE. 2008. The response of terrestrial ecosystems to global climate change: towards an integrated approach. *Sci Total Environ* 404:222–235.
- Sadourny R. 2005. ¿Se ha vuelto loco el clima?. Madrid: Akal.
- SAGARPA. 2012. El sector agropecuario ante el desafío del cambio climático. México, DF.
- Schimel DS, Braswell BH, Holland BA, McKeown R, Ojima DS, Painter TH, Parton WJ y Townsend AR. 1994. Climatic, edaphic, and biotic controls over the storage and turnover of carbon in soils. *Global Biogeochem. Cycles*. 8: 279–293.
- Schleser GH. 1982. The response of CO₂ evolution from soils to global temperature changes. *Z. Naturforsch.* 37: 287–291
- Sellers, P.J. et al., 1992, Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration. III. A reanalysis using improved leaf models and a new canopy integration scheme. *Remote Sens. Environ.* 42, 187–216.
- SEMANAT-CP. 2002. Evaluación de la Degradación de Suelos Causada por el Hombre en la República Mexicana, escala 1:250 000.
- Singh B. P., Courcelles V. R. and Adams M. A. 2011. Soil Respiration in Future Global Change Scenarios. In B.P. Singh *et al.* (eds.). *Soil Health and Climate Change*. *Soil Biology* 29. pp 131-155. DOI 10.1007/978-3-642-20256-8_3.
- Skidmore E.L. y Williams J.R. 1991. Modified EPIC wind erosion model. pp. 457-469. In *Modeling Plant and Soil Systems*. *Agronomy Monograph No. 31*. Ameritan Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.
- Smith K., Woodward A., Campbell-Lendrum D., Chadee D., Yasushi H., & Liu Q. 2014. Human Health Impacts Adaptation and Co-Benefits. In C. Field, & V. Barros, *Climate Change 2014: Impacts, Adptation, and Vulnerability*. pp. 1439-1498. Geneva: IPCC/ WMO/ UNEP.
- Smith, P. 2012. Soils and climate change. *Curr. Opin. Environ. Sust.* 4:539-544.
- Smith, P. *et al.* 2014. Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). In *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change., by Edenhofer O *et al.*, Cambridge Univ. Press, pp. 813-922.
- Soriano, A. and Paruelo, J.M., 1992, Biozones: vegetation units defined by functional characters identifiable with the aid of satellite sensor images. *Glob. Ecol. Biogeogr. Lett.* 2, 82–89.
- Steduto P. et al. 2009. Concepts and Applications of AquaCrop: The FAO Crop Water Productivity Model. In Cao W., White JW, Wang E. (eds). *Crop Modeling and Decision Support*. Tsinghua University Press, Beijing. Springer Dordrecht Heidelberg London New York. p. 175-192.

- Sys C., E. Van Ranst and J. Debaveye. 1991. Land Evaluation Part I. Principles in Land Evaluation and crop production calculations. International Training Centre for Post-graduate Soil Scientists, University of Ghent. Belgium. 274 pp.
- Tang C, Rengel Z. 2003. Role of plant cation/anion uptake ratio in soil acidification. In: Rengel Z (ed) Handbook of soil acidity. Marcel Dekker, New York, pp 57–81.
- Terrazas M.L., Nikilskii G.I. Herrera G.S.H., Castillo A.M. y Exebio G.A.A. 2010. Efecto de alteración de fertilidad del suelo en vulnerabilidad de frijol y trigo bajo riego al cambio climático. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 1(1):87-107.
- Tetumo G.J., Nikolskii G.I., Ortiz C.S., Tijerina L.C., Y Arteaga R.R. 2001. Evaluación del impacto del riego sobre algunas propiedades de suelos a través del índice hidrotérmico. *Agrociencia*. 35(2):137-147.
- Thorntwaite, C.W., and J.R. Mather. 1955. The water balance; Laboratory of Climatology, Publication N°. 8 Centerton, NJ.
- Topete J.P.A., Ruiz C.J.A., Ron P.J., González E.D.R. Ramírez O. y Durán P. N. 2014. Utilizando el modelo Newhall para representar el impacto real del cambio climático en la humedad de suelo en Jalisco, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 10: 1859-1870.
- Torres B.E, Cortes B.J., Sáenz J.M., Exebio G.A., Santos H.A., Delgadillo P. 2003. Evaluación de la degradación de los suelos en la cuenca El Josefino, Jesús María, Jalisco. *Terra Latinoamerica*. 21 (1):117-126.
- Townsend AR, Vitousek PM & Holland EA. 1992. Tropical soils could dominate the shortterm carbon cycle feedbacks to increased global temperatures. *Climatic Change* 22: 293–303.
- Tubiello F. N., J.-F. Soussana y S. M. Howden. 2007. Crop and pasture response to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104: 19686–90.
- Van Cleve K. Oechel, W., & Hom, J. 1990. Response of black spruce (*Picea mariana*) ecosystems to soil temperature modification in interior Alaska. *Canadian Journal of Forestal Research*, 20:1530-1535.
- 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.
- Villers L., & Lopez J. 2008. Consecuencias ambientales derivadas de la ocupación y el uso del territorio. In J. Degadillo-Macías, Política territorial en México. Hacia un modelo de desarrollo basado en el territorio. México: UNAM/Plaza y Valdéz Editores.
- Waldrop M.P y Firestone M.K. 2006. Response of Microbial Community Composition and Function to Soil Climate Change. *Microbial Ecology*. 52:716-724.
- Wang, J. et al., 2003, Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA. *Int. J. Remote Sens.* 24, 2345–2364.
- Wischmeier W.H. 1959. A rainfall erosion index for a universal soil loss equation. *Soil Sci.*
- 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).
- Woodruff N.P and F.H. Siddoway. 1965. A wind erosion equation. *Soil Sci. Am. Proc.* 29(5): 602-608.

- Yoshio, A., et al., 2006, Terrestrial Net Primary Production (NPP) Estimation Using NOAA Satellite Imagery: Inter-annual Changes between 1982 and 1999, H. Kawahata and Y. Awaya (Eds.)-Global Climate Change and Response of Carbon Cycle in the Equatorial Pacific and Indian Oceans and Adjacent Landmasses, Elsevier Oceanography Series 73, pp. 361-378
- Yu, F.F. et al., 2003, Response of seasonal vegetation development to climatic variations in eastern central Asia. *Remote Sens. Environ.* 87, 42–54.
- Zamudio-Gonzalez B., Lopez-Perez L., Alcantar-Gonzalez G., Gonzalez-Eguiarte D., Ruiz-Corral J., & Castellanos J. 2003. Delimitación de áreas salinas en el distrito de riego de Caborca, Sonora, México. *Terra Latinoamericana.* 91-97.
- Zhang, J.Y. et al., 2003, New evidence for effects of land cover in China on summer climate. *Chin. Sci. Bull.* 48, 401–405.
- Zhang, J.Y. et al., 2003, The influence of vegetation cover on summer precipitation in China: a statistical analysis of NDVI and climate data. *Adv. Atmos. Sci.* 20, 1002– 1006.
- Zhao, T.T. and Schwartz, M.D., 2003, Examining the onset of spring in Wisconsin. *Climat. Res.* 24, 59–70.
- Zhou, L. et al., 2003, Relation between interannual variations in satellite measures of northern forest greenness and climate between 1982 and 1999. *J. Geophys. Res.* 108. doi: 10.1029/2002JD002510.
- Zimov S., Davidov S., Zimova G., Davidova A., Chapin III F., Chapin M. & Reynolds J. 1999. Contribution of Disturbance to Increasing Seasonal Amplitude of atmospheric CO₂. *Science.* 284:1973-1976.



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

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



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