



Environment  
Canada

Environnement  
Canada

SEMARNAT  
SECRETARÍA DE  
MEDIO AMBIENTE  
Y RECURSOS NATURALES



INECC  
INSTITUTO NACIONAL  
DE ECOSISTEMAS  
Y CAMBIO CLIMÁTICO



IMTA  
INSTITUTO MEXICANO  
DE TECNOLOGÍA  
DEL AGUA



Al servicio  
de las personas  
y las naciones

## Título del Convenio

**“Servicios de consultoría para el análisis de metodologías para la obtención de nuevos escenarios de cambio climático a menor escala, que incluyan métodos estadísticos (Reliability Ensemble Averaging, REA) y métodos dinámicos (Regional Climate Model System, RegCM) para México”.**

## Informe Final

Análisis de Metodologías para la obtención de nuevos escenarios de cambio climático a menor escala, que incluyan métodos estadísticos y métodos dinámicos para México.  
Informe de la parte estadística.

Institución responsable: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)

## Índice

<b>1. Antecedentes</b> .....	3
<b>2. Introducción</b> .....	4
<b>3. Entregable 1a: Enfoque técnico y metodológico para el logro de los productos solicitados</b> .....	7
<b>4. Entregable 1b: Mecanismos de coordinación e intercambio de conocimientos entre el INECC-IMTA generados en el marco de este convenio</b> .....	8
<b>5. Entregable 1c: Cronograma de actividades</b> .....	8
<b>6. Entregable 1d: Necesidades de información que deba ser proporcionada por el INECC u otras instituciones</b> .....	10
<b>7. Entregable 1e: Perfil del grupo de trabajo que colaborará en el marco de este convenio</b> .....	12
<b>8. Entregable 2a: Revisión de métodos para la reducción de escala (estadísticos y dinámicos) de escenarios de cambio climático regionales</b> .....	13
<b>9. Entregable 2b: Análisis de métodos existentes y justificación de selección de métodos de reducción de escala para México</b> .....	16
<b>10. Entregable 3a: Descripción de Metodología Estadística para mejorar la técnica de reducción de escala (metodología de ensamble ponderado, REA) para México.</b> .....	20
<b>11. Entregable 4a: Criterios que permitieron la selección del método REA para extenderlo a modo probabilista.</b> .....	22
<b>12. Entregable 4b: Conversión de la aplicación de un método estadístico en la mejora de la técnica de reducción de un método probabilístico (PDFs).</b> .....	24
<b>13. Entregable 4c: Descripción de las características mejoradas en la definición del criterio de desempeño del REA.</b> .....	25
<b>14. Entregable 4d: Descripción de las mejoras realizadas en el criterio de convergencia del REA.</b> .....	25
<b>15. Entregable 5a: Ventajas y desventajas de la técnica mejorada respecto a la original en la reducción de escala estadística.</b> .....	25
<b>16. Entregable 5b: Estrategia de regionalización para México considerando la reducción de escala estadística.</b> .....	34
<b>17. Entregable 5c: Plan de trabajo a corto plazo para la modelación climática en México.</b> .....	35
<b>18. Entregable 6a: Recomendaciones, hallazgos relevantes y futuras líneas de investigación.</b> .....	36
<b>19. Referencias</b> .....	42

## 1. Antecedentes

El IMTA, como Centro Público de Investigación (CPI), ha desarrollado proyectos de investigación científica y desarrollo tecnológico en diversas áreas del conocimiento relacionadas al sector agua. Cuenta con la Subcoordinación de Hidrometeorología, grupo con especialistas en el área de Meteorología y Climatología, con 20 años de experiencia en temas de investigación científica y desarrollo de herramientas especializadas para describir la dinámica atmosférica y oceánica en torno a México, como parte de las instituciones que participan en la Red Mexicana de Modelación del Clima (con CICESE y CCA-UNAM) coordinadas por el INECC, el IMTA ha realizado la actualización de escenarios de cambio climático para México, ello como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional, generada en 2012. Durante el citado proyecto, se acumuló experiencia en el manejo masivo de bases de datos, conocimiento acerca del desempeño de 14 modelos globales sobre la región mexicana e interpretaciones de los procesos atmosféricos que componen los diversos climas en México. Esto constituyó un cúmulo de lecciones aprendidas de gran valor, las cuales se han divulgado mediante talleres dirigidos a profesionales de diversas áreas del conocimiento, tomadores de decisiones y coordinadores de Planes Estatales de Acción ante el Cambio Climático (PEACC), entre otros actores importantes.

En el marco de la colaboración Canadá-México, el PNUD e INECC promueven la colaboración con instituciones académicas y de investigación, nacionales e internacionales, así como expertos, con la finalidad de generar y difundir los resultados de los trabajos apoyados como insumos de la política ambiental y de cambio climático del país.

Utilizando modelos de circulación general acoplados se generan proyecciones del clima futuro, dada la diversidad de modelos, se han realizado ensambles de éstos. En 2008 y 2012 el IMTA implementó un método estadístico basado en el algoritmo REA (Giorgi y Mearns, 2002) para obtener un ensamble ponderado usando 14 y 23 modelos de circulación general respectivamente, mediante el algoritmo REA que considera dos criterios de fiabilidad: el desempeño del modelo para reproducir el clima actual y la convergencia de los cambios proyectados entre los modelos seleccionados. En 2008, se regionalizaron los datos de precipitación, y temperaturas máxima y mínima de superficie, con los escenarios SRES-A1B y SRES-A2 para el siglo XXI, y se incrementó su resolución espacial a una malla regular de  $0.5 \times 0.5^\circ$  sobre México. Para facilitar el manejo de estos resultados se desarrolló un sistema, Sedepecc (Montero-Martínez et. al., 2013), que contiene las proyecciones generadas en una base de datos y las presenta a través de una interfaz amigable. El análisis de las anomalías proyectadas para el presente siglo en México indica un incremento general en temperatura y un decremento en precipitación. Los resultados indican que el cambio de la temperatura será mayor para el verano que para el invierno, acentuándose para las últimas tres décadas del presente siglo, donde los valores se proyectan por arriba de los  $5^\circ\text{C}$  para algunas regiones del centro del país. En el 2012, se aplicó el método REA a las simulaciones de MCG del CMIP5, asociado al quinto reporte de evaluación, de precipitación, temperatura media, máxima y mínima, bajo tres escenarios de radiación RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5 para dos periodos futuros

2015-2039 y 2075-2099. Para aplicar el método REA se necesitan de observaciones, por lo que se utilizó la base de datos CRU TS3.1 la cual se encuentra en una malla de  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ . Todos los MCG considerados se interpolaron bilinealmente a dicha resolución. En el periodo cercano casi no se observaron diferencias entre las proyecciones con los tres RCPs, mientras que para el futuro lejano elRCP8.5 es el escenario más drástico el cual proyecta incrementos de temperatura hasta de  $5.5^{\circ}\text{C}$  en verano en la planicie central del país, mientras que bajo los escenarios RCP4.5 y RCP6.0 las proyecciones de temperatura son de incrementarse alrededor de  $3^{\circ}\text{C}$  en dicha región. En el caso de la precipitación en la península de Baja California es donde se proyectan mayores decrementos de hasta 30%.

Durante 2014, para fortalecer los resultados generados durante 2012 y 2013, el equipo de trabajo del IMTA generó material didáctico que se divulgará a través de la página WEB del INECC: <http://escenarios.inecc.gob.mx/> y será de utilidad para consultar conceptos, programas internacionales, nacionales y estatales que describa las herramientas y ligas de interés nacionales e internacionales, así como los avances logrados en México en la materia de Cambio Climático en México. Este material será el pilar para implementar un Programa de Capacitación y asesoría en los alcances, limitaciones e interpretación de escenarios de cambio climático actualizados y regionalizados a México para una mejor comprensión del estado del arte en el tema.

## 2. Introducción

Debido tanto a su ubicación geográfica, orografía y los efectos de mares adyacentes, México posee gran variedad de climas, durante verano y otoño, los eventos meteorológicos que le afectan están asociados a la dinámica atmosférica tropical (ondas tropicales, huracanes y sistemas convectivos de mesoescala principalmente), mientras que durante invierno los eventos meteorológicos están asociados a la dinámica extratropical (frentes fríos). La respuesta local asociada a la dinámica atmosférica regional está influenciada además por procesos de baja frecuencia, como oscilaciones estacionales, anuales, interanuales, quinquenales, aportando a la variabilidad y al cambio climático. Estos son elementos de estudio que permiten identificar, diseñar y llevar a cabo acciones de mitigación y adaptación ante los posibles impactos negativos y los relacionados con fenómenos hidrometeorológicos extremos.

Por la diversidad de climas y sus impactos en la sociedad, es importante la construcción de capacidades en México para generar información y conocimiento que permita evaluar los impactos regionales de la atmósfera bajo escenarios de cambio climático. Un mecanismo es la realización de estudios del clima regional mediante la reducción de escala con métodos dinámicos, ello utilizando los modelos globales de mejor desempeño para México, lo cual detonará en más y mejor información tanto para comprender los procesos físicos locales como para evaluar impactos asociados al cambio climático.

Los modelos de circulación general (MCG) son una herramienta útil para contribuir al entendimiento de la circulación global y generar escenarios de cambio climático para las siguientes décadas. La resolución de los MCG es adecuada para describir patrones de

circulación global, pero es insuficiente para describir los procesos locales que puedan ser importantes para México, como los efectos de su orografía abrupta o procesos atmosféricos de menor escala a 100 km, debido a que algunas resoluciones espaciales de modelos globales, son de 280 km, esto impide incluir la configuración orográfica y costera irregular de México (Fig. 2.1), por ello se requiere una reducción de escala, tanto estadística como dinámica, esta última requiere de modelos regionales, que pueden ejecutarse a muy altas resoluciones espaciales (12 km, aproximadamente), simulando la dinámica de la atmósfera en zonas limitadas por las mallas seleccionadas.

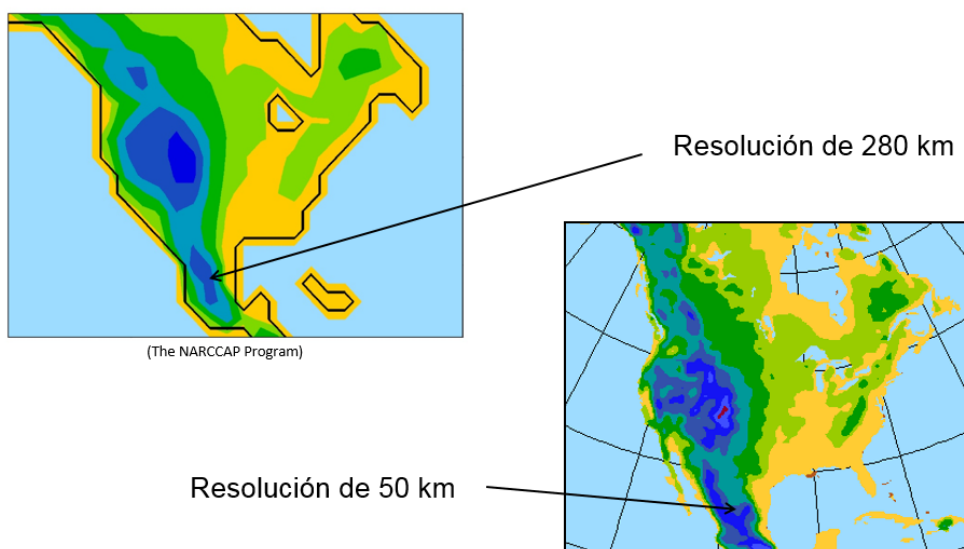


Fig. 2.1 Configuración de la línea de costa y orografía de Norteamérica tanto con modelos globales (resolución de 280 km.), como con modelos regionales (50 km.)

Los modelos de circulación general acoplados permiten proyectar el clima futuro, pero no hay un modelo único, por lo que se recurre a ensambles de varios modelos. En el 2008 y 2012 el IMTA implementó un método estadístico basado en el algoritmo REA (Giorgi y Mearns, 2002) para obtener un ensamble ponderado usando 23 y 15 modelos de circulación general, respectivamente mediante el algoritmo REA que considera dos criterios de fiabilidad: el desempeño del modelo para reproducir el clima actual y la convergencia de los cambios proyectados entre los modelos seleccionados. En el 2008, Se regionalizaron los datos de precipitación, y temperaturas máxima y mínima de superficie, con los escenarios SRES-A1B y SRES-A2 para el siglo XXI, y se incrementó su resolución espacial a una malla regular de  $0.5 \times 0.5^\circ$  sobre México. Para facilitar el manejo de estos resultados se desarrolló un sistema, Sedepecc (Montero-Martínez et.al., 2013), que contiene las proyecciones generadas en una base de datos y las presenta a través de una interfaz amigable. El análisis de las anomalías proyectadas para el presente siglo en México indica un incremento general en temperatura y un decremento en precipitación. Los resultados indican que el cambio de la temperatura será mayor para el verano que para el invierno, acentuándose para las últimas tres décadas del presente siglo, donde los valores se proyectan por arriba de los  $5^\circ\text{C}$  para algunas regiones del

centro del país. En el 2012, se aplicó el método REA a las simulaciones de MCG del CMIP5, asociado al quinto reporte de evaluación, de precipitación, temperatura media, máxima y mínima, bajo tres escenarios de radiación RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5 para dos periodos futuros 2015-2039 y 2075-2099. Para aplicar el método REA se necesitan de observaciones, por lo que se utilizó la base de datos CRU TS3.1 la cual se encuentra en una malla de  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ . Todos los MCG considerados se interpolaron bilinealmente a dicha resolución. En el periodo cercano casi no se observaron diferencias entre las proyecciones con los tres RCPs, mientras que para el futuro lejano el RCP8.5 es el escenario más drástico el cual proyecta incrementos de temperatura hasta de  $5.5^{\circ}\text{C}$  en verano en la planicie central del país, mientras que bajo los escenarios RCP4.5 y RCP6.0 las proyecciones de temperatura son de incrementarse alrededor de  $3^{\circ}\text{C}$  en dicha región. En el caso de la precipitación en la península de Baja California es donde se proyectan mayores decrementos de hasta 30%.

La precipitación es un parámetro importante para los estudios de impacto del cambio climático. Sin embargo, las simulaciones de los MCG son en su mayoría inadecuadas para aplicación directa debido a la limitada representación de la orografía regional y la mala representación de los procesos atmosféricos que afectan México, como las ondas del este, huracanes, frentes fríos, nortes, corrientes en chorro, zona de convergencia intertropical y Monzón de Norteamérica (Fig. 2.2).

Desde hace un par de décadas, se han estado desarrollando técnicas de reducción de escala con de la información de los MCG, las cuales se pueden categorizar de dos formas diferentes: Regionalización estadística y Regionalización dinámica, en este proyecto se revisarán ambas metodologías, analizando su viabilidad.

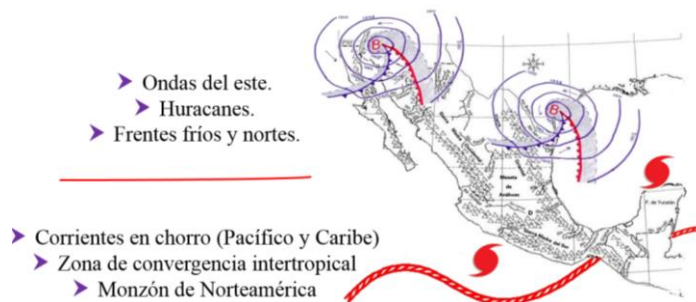


Fig. 2.2 Eventos atmosféricos que afectan el tiempo y el clima de México.

Las técnicas de reducción de escala se analizarán cuidadosamente en este trabajo, utilizando tanto una aproximación numérica como estadística, revisando, analizando y proponiendo experimentos con sustento científico para reproducir de mejor manera los eventos atmosféricos que afectan México.

La regionalización implica la división de un territorio en áreas menores con características comunes y representa una herramienta metodológica básica, los modelos climáticos globales poseen una resolución espacial insuficiente para representar el clima a escala regional. Estos

modelos no pueden reproducir de forma realista procesos atmosféricos de escala espacial similar o inferior al de las celdas en que se discretiza el globo para su resolución numérica. Por ello es necesario utilizar técnicas de regionalización (Giorgi y Mearns, 1991) que aprovechen la información de gran escala de los MCG y la transfieran a la escala regional teniendo en cuenta las características que modulan el clima a esta escala.

Los modelos numéricos han sido aplicados tanto para la predicción del tiempo como del clima, la cual es un área de investigación relativamente nueva (Latif y Barnett, 1996; Latif et al., 2006; Wilby, 2007). Meehl et al., (2009) que incluyen el pronóstico de El Niño Oscilación del Sur (ENOS), como para generar proyecciones de cambio climático futuras.

Por otro lado, las proyecciones de clima a nivel regional generalmente se realizan usando directamente las simulaciones de los MCG o bien realizando algún proceso de reducción de escala de esos resultados con el fin de obtener mayor resolución espacial (en ocasiones también temporal). Los métodos de reducción de escala suelen dividirse en dos: la reducción de escala empírica/estadística (ESD por sus siglas en inglés) y la reducción de escala dinámica.

La ESD es el proceso de desarrollar relaciones matemáticas entre el estado de algunas variables de gran escala espacial y el estado de otras variables que representan la escala local. De esta forma la ESD supone implícitamente una relación dinámica fundamental entre las dos escalas (Mearns et al., 2014). Lo anterior en base en la suposición de que la temperatura del aire o la cantidad de precipitación puedan ser determinados por procesos que se manifiestan a una escala bien descrita por modelos climáticos o regionales (Maraun et al., 2010).

### **3. Entregable 1a: Enfoque técnico y metodológico para el logro de los productos solicitados**

#### *Metodología para regionalización estadística*

Se generará de acuerdo a los requerimientos computacionales y tiempo destinado al proyecto y de acuerdo al cronograma de actividades (página 9 de este documento), se entregará la propuesta metodológica en el mes de mayo de 2016.

- i) Revisión y análisis de métodos estadísticos existentes para reducción de escala.
  - Revisión del estado del arte de las técnicas estadísticas más recientes empleadas a nivel mundial para la regionalización.
  - Revisión detallada del documento “IPCC Expert Meeting on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections” (Stocker, 2010).
- ii) Generación de la propuesta metodológica para la mejora de la versión actual del algoritmo REA implementado para la regionalización de proyecciones climáticas en México. La “mejora” podría incluir totalmente una nueva técnica para realizar regionalización estadística en México.

- iii) Con la nueva versión mejorada, realizar una comparación objetiva de las proyecciones de modelos más recientes del CMIP5 versus las del CMIP3 con la finalidad de entender el rango de variación de las nuevas proyecciones y que tipo de implicaciones potenciales podrían tener para los estudios de adaptación.
- iv) Análisis de ventajas y desventajas de emplear la técnica estadística mejorada en comparación con la versión original.

Puntos críticos en la propuesta de mejora metodológica para regionalización estadística

Transformar al REA “determinista” actual en una técnica “probabilística”.

En el criterio de desempeño del nuevo algoritmo incorporar un nuevo factor de ponderación en relación a evaluar la reproducción de los GCMs de las tendencias observadas de la variable en cuestión para las décadas más recientes de la región de estudio.

Incorporar un factor de “correlación” espacial de las variables de interés.

En el criterio de convergencia incorporar un nuevo factor que pondere más alto a aquellos modelos que hayan reproducido bien las tendencias de las últimas décadas y por lo tanto podrían tener una mayor fiabilidad en las primeras décadas del futuro.

#### **4. Entregable 1b: Mecanismos de coordinación e intercambio de conocimientos entre el INECC-IMTA generados en el marco de este convenio**

- Presentar los avances de este proyecto ante el INECC y expertos en Modelación del Clima y en adaptación para recibir retroalimentación antes de la versión final del nuevo método mejorado.
- Casi al final del proyecto presentar estos avances ante una comunidad de usuarios potenciales de este nuevo producto con la finalidad de incorporar sugerencias antes de la conclusión del proyecto.

#### **5. Entregable 1c: Cronograma de actividades**

Actividad		Productos esperados	Fecha entrega
1	Presentación en taller de arranque del Proyecto	Presentación metodologías. Cronograma de actividades  Acuerdos sobre mecanismos de coordinación e	Enero 2016

Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático - INECC

Periférico Sur 5000, Col. Insurgentes Cuicuilco, Coyoacán, México D.F.



		intercambio de conocimientos.	
2	Revisión y análisis de métodos <u>estadísticos</u> existentes para reducción de escala.	Informe que contenga revisión metodológica de métodos existentes para reducción de escala (estadísticos y dinámicos).	Mayo 2016
	Revisión y análisis de métodos <u>dinámicos</u> existentes para reducción de escala		
4	Diseño de experimento de ensamble ponderado para mejorar métodos <u>estadísticos</u> existentes para reducción de escala	Informe que contenga propuesta metodológica para reducción de escala estadística	Mayo 2016
	Diseño de experimento para mejorar métodos <u>dinámicos</u> existentes para reducción de escala	Informe que contenga propuesta metodológica para reducción de escala dinámica	Octubre 2016
3	Análisis e implementación del <u>método REA</u> para México	Implementación de las metodologías Estadística y Dinámica.	Mayo 2017
	Análisis y aplicación del <u>modelo regional RegCM</u>	Diseño y ejecución de experimentos numéricos y estadísticos. Análisis de resultados a la luz de procesos atmosféricos que afectan México	
4	Presentación de resultados en un foro diseñado para tal fin para personal del INECC entre otros	Informe final y resumen ejecutivo del análisis de metodologías utilizadas.	Julio 2017

## 6. Entregable 1d: Necesidades de información que deba ser proporcionada por el INECC u otras instituciones

### *Descripción general de la regionalización estadística (REA)*

La implementación del REA para México se discute ampliamente en Montero-Martínez y Pérez-López (2008), y Montero-Martínez et al., (2010 y 2013). Para poder comparar los resultados del método REA, utilizamos una aproximación más sencilla para el desarrollo de estimaciones de cambio climático y su rango de incertidumbre asociado (Giorgi y Mearns, 2002; Giorgi y Francisco, 2000). En esta aproximación, tomando como referencia la temperatura  $T$ , el cambio estimado está dado simplemente por el promedio del ensamble de todas las simulaciones de los modelos, esto es,

$$\overline{\Delta T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1, N} \Delta T_i \quad (6.1)$$

Donde  $N$  es el número total de modelos, la sobrebarra indica el promedio del ensamble y la  $\Delta$  indica el cambio simulado por el modelo.

En el método REA, el cambio promedio,  $\tilde{\Delta T}$ , está dado por un promedio pesado de los miembros del ensamble, esto es,

$$\tilde{\Delta T} = \tilde{A}(\Delta T) = \frac{\sum_i R_i \Delta T_i}{\sum_i R_i} \quad (6.2)$$

Donde el operador  $\tilde{A}$  denota el promedio REA y  $R_i$  es un factor de fiabilidad del modelo definido como

$$R_i = \left[ (R_{B,i})^m \times (R_{D,i})^n \right]^{[1/(m \times n)]} = \left\{ \left[ \frac{\varepsilon_T}{\text{abs}(B_{T,i})} \right]^m \left[ \frac{\varepsilon_T}{\text{abs}(D_{T,i})} \right]^n \right\}^{[1/(m \times n)]} \quad (6.3)$$

En la Ec. (6.3),  $R_{B,i}$  es un factor que mide la fiabilidad del modelo como una función del sesgo del modelo ( $B_{T,i}$ ) en simular la temperatura actual, esto es, entre mayor es el sesgo menor es la fiabilidad del modelo. Aquí definiremos sesgo simplemente como la diferencia entre la temperatura media simulada y observada para el período de 1961-1990. Por otro lado,  $R_{D,i}$  es un factor que mide la fiabilidad del modelo en términos de la distancia ( $D_{T,i}$ ) del cambio calculado por un modelo dado del cambio del promedio REA, esto es, entre mayor es la

distancia menor es la fiabilidad del modelo. Por lo tanto, la distancia es una medida del grado de convergencia de un modelo dado con los otros.

Giorgi y Mearns (2002) calcularon la correlación entre los sesgos y las distancias entre modelos para una región y período dado, y encontraron que la correlación era en general pequeña (la mayor parte menor a 0.5 con excepción de algunos casos) y era estadísticamente significativo al 95% de intervalo de confianza solamente para algunos pocos casos regionales. Esto quiere decir que, para la mayoría de los casos, un sesgo grande para un modelo en particular no implica una distancia grande correspondiente y viceversa, esto es, que los principales modelos que se encuentran en la parte más alejada del promedio del ensamble para el clima futuro, no son necesariamente los modelos que muestran un desempeño pobre en cuanto a reproducir las condiciones del clima presente. Lo anterior, no resulta sorprendente en sí mismo tomando en cuenta que a menudo algunos parámetros de modelos son “sintonizados” para reproducir mejor el clima actual pero podrían estar caracterizados por una fuerte sensibilidad a forzamientos climáticos considerables.

La distancia  $D_{T,i}$  se calcula usando un proceso iterativo. Este proceso comienza dando como primera aproximación un valor para  $D_{T,i}$  que es la distancia de cada  $\Delta T_i$  del cambio promedio del ensamble  $\overline{\Delta T}$  de la Ec. (6.1), esto es,  $[D_{T,i}] = [\Delta T_i - \overline{\Delta T}]$  y repetir la iteración. Típicamente, este procedimiento converge rápidamente después de varias iteraciones. Nótese que la distancia del promedio REA es solamente una medida estimada del criterio de convergencia del modelo dado que las condiciones futuras no son conocidas. Esto no implica que el promedio REA represente la respuesta del clima “verdadero” a un escenario de forzamiento dado sino que más bien el promedio REA representa la mejor respuesta estimada.

Los parámetros  $m$  y  $n$  en la Ec. (6.3) se pueden usar para pesar cada criterio. Al igual que en el artículo original de Giorgi y Mearns (2002) aquí supondremos que  $m$  y  $n$  sean iguales a 1, con lo cual le damos el mismo peso a ambos criterios. También,  $R_B$  y  $R_D$  se toman como 1 cuando  $B$  y  $D$  son menores que  $\varepsilon$ , respectivamente. Primordialmente, la Ec. (6.3) muestra que una proyección de un modelo es “fiable” si ambos su sesgo y su distancia del promedio del ensamble se encuentran dentro de la variabilidad natural, de tal forma que  $R_B = R_D = R = 1$ . Por otro lado, si el sesgo y/o la distancia crecen, la fiabilidad de la simulación de un modelo dado decrece. Nótese que para  $R_B$  y  $R_D$  menores que 1, la  $\varepsilon$  se cancela en el operador REA y el factor de fiabilidad efectivamente se reduce al recíproco del producto del sesgo y la distancia.

El parámetro  $\varepsilon$  en la Ec. (6.3) es una medida de la variabilidad natural en 30 años de promedio de la temperatura y precipitación regional. Para calcular  $\varepsilon$ , se calculan las series de tiempo de temperatura y precipitación promedio regional observadas para el siglo XX. Luego se calculan los promedios móviles de 30 años de las series después de desfazar linealmente los datos (para remover las tendencias de escala por siglo) y se estima  $\varepsilon$  como la diferencia entre los valores máximo y mínimo de esos promedios móviles de 30 años.

Por otro lado, la desviación del error cuadrático medio está definida como:

$$\sigma_{\Delta T} = \left[ \frac{\sum R_i (\Delta T_i - \overline{\Delta T})^2}{\sum R_i} \right]^{1/2}$$

Plataforma de Colaboración sobre el Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático - INECC

Periférico Sur 5000, Col. Insurgentes Cuicuilco, Coyoacán, México D.F.

(6.4)

Y el rango de incertidumbre como:

$$\Delta T_+ = \Delta T + \tilde{\delta}_{\Delta T}; \Delta T_- = \Delta T - \tilde{\delta}_{\Delta T} \quad (6.5)$$

Esta versión del algoritmo es la que se ha empleado para la regionalización de las proyecciones climáticas con los resultados del IPCC-AR5 que surgen de los modelos CMIP5 (Cavazos et al., 2013) y para los resultados del IPCC-AR4 (Montero et al., 2013; Montero y Pérez, 2008).

## **7. Entregable 1e: Perfil del grupo de trabajo que colaborará en el marco de este convenio**

### **Líder del equipo de trabajo.**

Dr. José Antonio Salinas Prieto (Física de la Atmósfera).

Experiencia de 18 años en estudios de dinámica atmosférica en los trópicos. (1996 a la fecha).

Experiencia en la actualización de escenarios de cambio climático para México (2012-2014), incluyendo la aplicación del método REA y análisis de desempeño de GCM para México.

Experiencia en la actualización de escenarios para diversas variables atmosféricas para análisis de los potenciales impactos en la infraestructura de CFE. (2014)

Experiencia en la generación de material didáctico de divulgación en el tema de cambio climático (2014)

Experiencia en participación en reuniones nacionales e internacionales científicas en torno a los modelos numéricos globales y su aplicación utilizando diversos escenarios de cambio climático (1998-a la fecha).

Experiencia en la impartición de clases en el posgrado del IMTA y de la UNAM (1998-a la fecha).

### **Especialista.**

Dr. Martín José Montero Martínez.

Experiencia en la actualización de escenarios de cambio climático para México (2008-2012), incluyendo la aplicación del método REA.

Experiencia en la generación de material didáctico de divulgación en el tema de cambio climático.

Experiencia en participación en reuniones nacionales e internacionales científicas en torno a los modelos numéricos globales y su aplicación utilizando diversos escenarios de cambio climático.

Experiencia en la impartición de clases en el posgrado del IMTA.

### **Técnico.**

Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático - INECC

Periférico Sur 5000, Col. Insurgentes Cuicuilco, Coyoacán, México D.F.

M.C. Gabriela Colorado Ruiz.

Experiencia en la actualización de escenarios de cambio climático para México (2008-2012), incluyendo la aplicación del método REA.

Experiencia en la generación de material didáctico de divulgación en el tema de cambio climático.

Experiencia en participación en reuniones nacionales e internacionales científicas en torno a los modelos numéricos globales y su aplicación utilizando diversos escenarios de cambio climático.

Experiencia en la impartición de clases en el posgrado del IMTA.

## **8. Entregable 2a: Revisión de métodos para la reducción de escala (estadísticos y dinámicos) de escenarios de cambio climático regionales**

El conocimiento del clima y su constante cambio es fundamental para el análisis de la vulnerabilidad ante el cambio climático y para determinar nuevas estrategias de adaptación (consultar mapa climático de México en INEGI), por ello se requiere estudios del clima, ya que la atmósfera se caracteriza por su compleja dinámica que responde a los cambios de uso de suelo como resultado de la urbanización y lo que deriva de ello. Los estudios de la vulnerabilidad ante los escenarios de cambio climático se realizan mediante la comparación entre el clima actual y el que potencialmente se presentarían bajo diversos escenarios (Magaña et al., 2003); no obstante, como primer paso deben establecerse bajo qué condiciones la simulación de un modelo numérico o atmosférico se apega de manera realista a las condiciones observadas.

Después de publicarse el Primer Informe del IPCC (en 1990), Liverman y O'Brien (1991) reportaron que, con información de modelos climáticos, el cambio climático podría traer condiciones más cálidas y más secas a México, aunque en ese entonces la mayoría de los GCMs proyectaban que la precipitación aumentaría, ésta no sería capaz de compensar la evapotranspiración potencial. Por lo tanto, la humedad del suelo y la disponibilidad de agua pueden disminuir en gran parte de México. Sin embargo, evaluar los impactos del cambio climático para una región como México es una tarea que conlleva incertidumbres debido a que las proyecciones de los diferentes modelos varían ampliamente, sobre todo para la precipitación, y desempeño de los modelos, en la reproducción del clima observado de México.

Durante el "Estudio País: México", Conde et al. (1994) generaron escenarios climáticos bajo condiciones de 1xCO<sub>2</sub> para tres regiones (Norte, Centro y Sur) para temperatura, precipitación y radiación solar utilizando interpolaciones de las salidas de dos GCM (CCCM y GFDL-R30). Estos escenarios se crearon utilizando el MTC para el periodo base de 1951 a 1980 con una resolución de malla de 2.5° x 2.5°. Bajo condiciones de 2xCO<sub>2</sub>, los resultados que mostraban cambios en la variación anual de temperatura entre +2.4 y +5.4 C para la Zona Norte, +1.6 a +3.6 C para la Zona Centro y de +1.8 a +2.9 C para la Zona Sur. Los cambios en precipitación mostraron gran variabilidad sin una señal futura clara sobre su posible aumento o reducción hacia el futuro.

Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático - INECC

Periférico Sur 5000, Col. Insurgentes Cuicuilco, Coyoacán, México D.F.

Continuando con esta metodología de interpolación de las simulaciones de GCMs, Magaña et al. (1997) actualizaron la regionalización de escenarios climáticos para México generada por Conde et al. (1994), para experimentos numéricos de 1xCO<sub>2</sub> (concentración actual de CO<sub>2</sub>) y 2xCO<sub>2</sub> (duplicación de la concentración actual de CO<sub>2</sub>). Aunque esta metodología de datos interpolados era lo más común hasta ese momento, en este trabajo se discuten las limitaciones del método, como una técnica de reducción de escala y se analiza un nuevo método para relacionar salidas de GCMs con clima regional que podrían utilizar en trabajos futuros.

Las proyecciones regionales de cambio climático para América Central y México (llamada CAM) se resumen en el IPCC-AR4 (IPCC, 2007). Las proyecciones regionales eran obtenidas a partir de la compilación de simulaciones de GCM (conocido como el conjunto de datos multi-modelo; MMD), dividiendo al planeta en diferentes regiones (Giorgi y Francisco, 2000). Uno de éstas regiones es CAM que abarca de 10° a 30°N y las longitudes de 83° a 116°W. El calentamiento en CAM simulado por el MMD bajo el escenario SRES A1B es mayor que el calentamiento medio mundial, tanto en el verano (JJA) como en invierno (DJF) boreales. Por otra parte, el calentamiento medio anual entre 1980 y 1999, y entre 2080 y 2099 varía en la región CAM de 1.8 a 5.0 C (Christensen et al., 2007), con la mitad de los modelos dentro de 2.6 y 3.6 C y una mediana de 3.2 C.

Para Centroamérica, 19 (de 21) GCMs coinciden en la dirección de cambio en la precipitación, y se proyecta una disminución en la precipitación bajo el escenario A1B. La gama completa de proyecciones del IPCC para el área van desde -48% a un 9% de la precipitación media con la mitad de los modelos de entre -16% a -5% (Christensen et al. 2007). En algunas partes del noreste de México y la región de ZCIT en el Pacífico oriental se proyecta un aumento en las precipitaciones de verano. Giorgi (2006) desarrolló un índice Regional de Cambio Climático (RCCI) basado en los cambios proyectados en la media y la variabilidad de la temperatura y la precipitación regional en relación con sus valores globales para 26 regiones continentales del mundo. Este índice comparativo demostró que la CAM es un “punto caliente” potencial, sobre todo debido a una reducción en la precipitación y aumento de su variabilidad en escenarios futuros. Ninguna otra región en los trópicos mostró cambios tan grandes como en América Central.

Prieto et al. (2011) presentaron una aplicación del índice de precipitación estandarizada de 12 meses (SPI, por sus siglas en inglés) como una herramienta para identificar y evaluar la severidad en eventos de sequía en México durante el periodo 1949-2098, bajo el escenario SRES-A2 del IPCC. El análisis indica un incremento en la ocurrencia y severidad de eventos de sequía en México, con una tendencia negativa en los valores proyectados del SPI de 12 meses, concluyendo que las proyecciones de eventos de sequía superan la duración, magnitud y frecuencia de aquellos eventos modelados en la segunda mitad del siglo XX.

Cavazos y Arriaga (2012) mencionan que el escenario A2 muestra las mayores reducciones de las precipitaciones en los últimos 20 años del siglo XXI; una disminución del 30% se proyecta para Baja California, principalmente en invierno y primavera, mientras que la precipitación en la región del monzón podría disminuir en un 20% durante invierno, primavera y verano. Después de 2050, se espera una reducción significativa de precipitación en el noroeste de México y el suroeste de los Estados Unidos al sur de 35°N, y aumentos de temperatura mayores a 2°C.

Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático - INECC

Periférico Sur 5000, Col. Insurgentes Cuicuilco, Coyoacán, México D.F.

De acuerdo al último IPCC-AR5 en México se proyecta un decrecimiento en evaporación sobre la parte continental menor que la desviación estándar de la variabilidad interna (IPCC, 2013).

#### ***- Proyecciones climáticas utilizando reducción de escala estadística***

Posteriormente a la realización del CMIP3 para el IPCC-AR4 (IPCC, 2007), se presentaron diferentes ESD para generar escenarios climáticos regionalizados en México, principalmente temperatura en superficie y precipitación, todos los métodos resultaron ser más refinados que la simple interpolación de datos que era común hasta entonces.

Tomando como base el algoritmo REA (Giorgi y Mearns, 2002), Montero y Pérez (2008) generaron escenarios de cambio climático para temperatura superficial y precipitación del presente siglo para México. Para ello se utilizaron las simulaciones de 23 GCMs forzados con el SRES-A1B (escenario de emisiones medio) y SRES-A2 (escenario de emisiones alto) a una resolución de malla de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  (~50 x 50 km). Los datos observados fueron tomados de Climate Research Unit (CRU TS2.1) y el período base de 1961-1990. El REA considera dos criterios de fiabilidad: el desempeño del modelo en reproducir el clima actual (criterio de desempeño) y la convergencia de los cambios futuros simulados entre modelos (criterio de convergencia). Los resultados para el período 2010-2039 con el A2 muestran cambios en temperatura mínima promedio que oscilan entre 0.5 y 1.5 C para la mayor parte del país y para temperatura máxima entre 1 y 2 C, con valores mayores para verano (Montero et al., 2010). Para precipitación, los cambios proyectados en ese mismo período son entre 0 y -10% para verano (negativo significa decremento) y de 0 a -20% para invierno, con los mayores decrementos en el occidente; solo pequeñas regiones en el norte centro muestran cambios positivos de precipitación. Dichas proyecciones fueron puestas a disposición dentro del “Sistema para la Exhibición de Datos del Ensamble Ponderado de Escenarios de Cambio Climático para México”, mejor conocido como SEDEPECC (Montero et al., 2013).

Utilizando la herramienta de predictibilidad de clima (CPT por sus siglas en inglés) para reducir errores sistemáticos e interpolar a mayor resolución el ensamble de simulaciones de 23 GCMs del CMIP3, Magaña et al. (2012) generaron proyecciones climáticas regionalizadas a 50 x 50 km de temperatura de superficie y precipitación para México. El período base utilizado fue 1971-1999 y también utilizaron los datos de CRU para las correcciones de sesgo de los GCM. Los resultados muestran que los incrementos de temperatura pueden ser mayores en el noroeste que en el noreste del país. Para la precipitación, las proyecciones indican una probabilidad alta de reducción sobre el noroeste de México con valores cercanos a -30% para finales de siglo. Esa potencial combinación de incrementos fuertes en temperatura de superficie y reducciones de precipitación para el noroeste de México podrían agravar la situación ya problemática de disponibilidad de agua para esa zona (Magaña et al., 2012).

Estrada et al. (2012; 2013a,b) discuten a detalle la metodología anterior propuesta por Magaña et al. (2012) cuyos escenarios de cambio climático regionales fueron utilizados dentro de la Cuarta Comunicación Nacional de la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático. Los trabajos de Estrada et al. muestran, en general, que la metodología empleada por Magaña et al. es errónea, debido principalmente a que el método genera valores y patrones espaciales azarosos que reemplazan las señales climáticas producidas por los GCMs, así como

aquellos contenidos en los datos observados de gran escala. De esta forma, concluyen, que los trabajos basados en tales escenarios regionalizados deberían ser revisados.

En el 2012, después de hacer una revisión entre los diferentes métodos de reducción de escala que se habían trabajado en México hasta entonces, el INECC (en ese entonces todavía INE) llevó a cabo una reunión con los principales actores de implementar métodos de reducción de escala estadística en México (IMTA, CICESE y UNAM) en la cual se determinó que el algoritmo REA sería el método a implementar para las nuevas proyecciones climáticas regionalizadas a 50x50 km utilizando el ensamble de GCMs que participaron en el CMIP5. Las proyecciones se realizaron para las variables mensuales de precipitación, temperatura media, máxima y mínima, bajo tres trayectorias de concentración representativas RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5 para dos periodos futuros 2015-2039 y 2075-2099 (Cavazos et al., 2013). La base de datos histórica utilizada fue la de CRU TS3.1 la cual se encuentra a una resolución de 0.5°x0.5°. Todos los GCM considerados se interpolaron bilinealmente a dicha resolución. En el periodo cercano casi no se observaron diferencias entre las proyecciones con los tres RCPs, ya que las concentraciones de CO2 proyectadas bajo estos escenarios son similares en todos los casos en este período, mientras que para el futuro lejano el RCP8.5 es el escenario más drástico el cual proyecta incrementos de temperatura hasta de 5.5 °C en verano en la planicie central del país, mientras que bajo los escenarios RCP4.5 y RCP6.0 las proyecciones de temperatura son de incrementarse alrededor de 3°C en dicha región. En el caso de la precipitación en la península de Baja California es donde se proyectan mayores decrementos de hasta 30%.

## **9. Entregable 2b: Análisis de métodos existentes y justificación de selección de métodos de reducción de escala para México**

*-Revisión del documento “IPCC Expert Meeting on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections” (Stocker et al., 2010).*

La parte más valiosa de este reporte es el “Documento Guía de Buenas Prácticas sobre la Evaluación y Combinación de Proyecciones Múltiples de Modelos Climáticos”. Este documento sintetiza las discusiones y conclusiones de la Reunión de Expertos del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) sobre la evaluación y la combinación de múltiples proyecciones de modelos climáticos, que se celebró en Boulder, EUA los días 25-27 de enero de 2010. Su objetivo es resumir brevemente los métodos utilizados en la evaluación de la calidad y la fiabilidad de las simulaciones de modelos climáticos y de combinar los resultados de múltiples modelos, pretendiendo que fuese una guía para futuros autores principales del IPCC, así como los científicos que utilizan los resultados de los proyectos de intercomparación de modelos. Este documento ofrece recomendaciones de buenas prácticas en el uso de conjuntos de modelos múltiples para la detección y atribución, la evaluación del modelo y las proyecciones climáticas globales, así como las proyecciones regionales pertinentes para los estudios de impacto y adaptación. Se ilustra el potencial y las limitaciones de la combinación de múltiples modelos para aplicaciones seleccionadas. Se recomiendan los criterios para la toma de decisiones en relación con la calidad del modelo y las métricas de desempeño, y la ponderación y promedio de modelos. Sin embargo, este documento no proporciona recomendaciones

Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático - INECC

Periférico Sur 5000, Col. Insurgentes Cuicuilco, Coyoacán, México D.F.



específicas con respecto a las métricas de desempeño a utilizar, ya que esto tendrá que ser decidido en cada aplicación por separado.

La primera sección del documento define conceptos importantes para entender la integración de proyecciones climáticas multi-modelo como son: diagnóstico, métrica de desempeño, métrica de calidad del modelo, índice de calidad del modelo, ensamble y media multi-modelo (ponderada y no-ponderada).

En la sección de antecedentes y métodos se menciona que en comparación con CMIP3, el número de modelos y versiones de modelo se incrementó en CMIP5. También se apunta que la nueva generación de modelos es probable que sea más heterogénea que en anteriores intercomparaciones de modelos, determinando que un promedio simple de modelos es cada vez más difícil de defender y de interpretar. Además, para algunos estudios se puede requerir el uso de los resultados del modelo de fases anteriores del CMIP u otras fuentes no-CMIP. Por otro lado, se apunta que la amplitud (spread) de los modelos rara vez es una medida directa de la incertidumbre, sobre todo porque es poco probable que los modelos sean independientes, pero se reconoce que tal amplitud ayuda a caracterizar dicha incertidumbre. Adicionalmente se menciona que la fiabilidad de las proyecciones podría mejorarse si los modelos son ponderados de acuerdo a un cierto grado de habilidad y si se toman en cuenta sus interdependencias, o si solo se consideran subconjuntos de modelos. En general, la definición de un conjunto de criterios para que un modelo sea “creíble” o acordar una métrica de calidad es por tanto muy difícil.

Otro de los puntos importantes que se tratan es que si todos los modelos deben ser tratados por igual o si se debe llevar a cabo una ponderación basado en su desempeño. Ya hay estudios que comenzaron a explorar el valor de “pesar” los modelos basados en su desempeño medidos por evaluación de procesos, acuerdo con las observaciones actuales, tendencias del clima pasado o actual, con la meta de mejorar la proyección media multi-modelo o de manera más exacta cuantificando incertidumbres. La información de calidad de modelos también ha sido utilizada en estudios multi-modelo de detección y atribución recientes. Algunos estudios ya han apuntado las dificultades en ponderar los modelos y en interpretar la amplitud de modelos en general. Los métodos estadísticos pueden ser una herramienta muy poderosa para el análisis de tal información, pero está el peligro de tener demasiada confianza si los modelos carecen de procesos importantes y si el error del modelo, las incertidumbres en observaciones y la robustez de las suposiciones estadísticas no son evaluadas apropiadamente.

El usuario a menudo necesita incluir también evaluaciones de información climática regional, sin embargo, hay un peligro latente en malinterpretar la información climática, tal como usar una celda de malla simple para representar un punto localmente. Existe por tanto una amplia necesidad de tener una guía general para una comunidad de usuarios de datos de proyecciones climáticas de GCMs multi-modelo más los modelos climáticos regionales, procedimientos de reducción de escala y otros medios para proporcionar información climática para evaluaciones. Las dificultades saltan a la luz cuando se observa que los resultados de modelos regionales son afectados tanto por los modelos globales (forzadores) como por los propios modelos regionales. La relación entre los GCMs conductores y la simulación resultante con RCMs proporciona una oportunidad interesante para nuevas aproximaciones de cuantificar incertidumbres. También se apunta que la reducción de escala empírica-estadística (ESD) es computacionalmente mucho

más económica que los RCMs, y por tanto más práctica para reducción de escala de ensambles grandes y para intervalos de tiempo grandes, aunque ESD sufre de posibles factores de fuera-de-la-muestra.

En la sección tres de este documento del IPCC se proporciona una serie de recomendaciones hacia “mejores prácticas” en “Evaluar y Combinar Proyecciones Climáticas Multi-Modelo” de acuerdo a los participantes de la reunión. La mayor parte de las recomendaciones están basadas en la literatura y la experiencia con GCMs pero se aplican de forma similar a ensambles emergentes de modelos regionales (ej. ENSEMBLES, NARCCAP, CORDEX, etc.). También queda claro que los participantes de la reunión no están en posición de proporcionar una “receta” para evaluar la literatura y los resultados de las simulaciones del CMIP3/CMIP5.

De esta forma se dan recomendaciones para analizar resultados de ensambles; para métricas de evaluación y desempeño del modelo; para selección, promedio y ponderación de modelos; para reproducibilidad (en el sentido de reproducir los resultados encontrados); y para evaluaciones regionales. En la última parte de esta sección se dan consideraciones para el Atlas WGI de Proyecciones Climáticas Globales y Regionales (cuyos resultados finales formaron parte de los resultados reportados en el IPCC-AR5-WGI).

También se discuten dos casos de estudio muy interesantes en forma de “cajas informadoras”. El primer tema se relaciona con ejemplos de proyecciones derivadas del uso de técnicas estadísticas multivariadas complejas las cuales expresan las proyecciones como funciones de densidad de probabilidad. El segundo caso es sobre ejemplos de evaluación de modelos a través de relaciones entre cambios observables actuales y proyectados a futuro.

La elección de la técnica estadística o dinámica a usar depende del nivel de dominio de los conceptos de clima y variabilidad climática regional, los estadísticos y de las técnicas computacionales del grupo hacia el cual se requiere hacer esta transferencia.

Una referencia clave para el estudio de los métodos de reducción de escala empírico-estadísticos (ESD) es el libro “Empirical-Statistical Downscaling” de Benestad et al., (2007). En el pasado ha habido otras excelentes síntesis de este tipo de técnicas (Christensen et al., 2007), sin embargo, desde el punto de vista didáctico se recomienda ampliamente la referencia anterior. La mayor parte de las técnicas mencionadas se describen ampliamente en ese libro.

Los primeros indicios sobre reducción de escala empírica o estadística fueron asentados en el trabajo de Klein (1948) y una síntesis de las primeras técnicas de predicción estadística fue realizada por Klein y Bloom (1987). Técnicas conocidas como MOS (Model Output Statistics) y ‘perfect prog’ (Wilks, 1975) han sido empleadas en el pronóstico numérico del tiempo desde los comienzos de la década de los setenta (Baker, 1982). De esta forma, el hecho de que la reducción de escala es un concepto relativamente nuevo se debe a que se ha aplicado recientemente a las proyecciones climáticas que son producto de las simulaciones de los GCMs, los cuales representan el mejor avance que se tiene en el conocimiento integral del sistema climático global. Uno de los principales aspectos que es preciso señalar es que no hay ni modelo ni técnica “perfecta” que nos permita describir el sistema climático observado en su totalidad.

*- ¿Qué es la reducción de escala y por qué realizarse?*

Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático - INECC

Periférico Sur 5000, Col. Insurgentes Cuicuilco, Coyoacán, México D.F.

Se define la reducción de escala como *el proceso de hacer la conexión entre el estado de una variable representada en un espacio grande* (referido aquí como gran escala) *y el estado de alguna variable representada a una escala más pequeña* (referido aquí como pequeña escala) (Benestad et al., 2007). En el caso particular de la ESD es que se puede ver como un análisis meteorológico/climatológico avanzado de los resultados del modelo.

La variable de gran escala puede ser alguna que represente el patrón de circulación atmosférica (presión a nivel del mar, algún índice de oscilación climática, etc.) mientras que la de escala menor pudiera ser la temperatura o precipitación de un lugar determinado. En cierto sentido el término ‘escala menor’ pudiera ser confuso ya que la expresión más correcta debería ser ‘local’, de hecho, los procesos locales deberían estar asociados con los de gran escala para realizar la reducción de escala. Es importante notar que la variable de gran escala varía de forma lenta y suave en el espacio, lo cual se deja ver en los contornos de correlación suaves expresados en los resultados. Por otro lado, la variable de pequeña escala pudiera ser la lectura del termómetro, barómetro o pluviómetro de una estación, la cual generalmente contendría mayor variación que la de gran escala. Es crucial que la conexión entre la gran escala y la pequeña escala sea real y física y no producto de una posible fluctuación, coincidencia, o artefacto estadístico de los métodos empleados. ESD asume una conexión implícita y fundamental entre las dos escalas.

De esta forma es importante notar si la variable que representa la gran escala usada en el ESD varía de forma lenta y suave, si lo hace, la escala espacial es grande; de otra forma la escala es más pequeña. Así, si la variable local se toma dentro del espacio definido por la gran escala, entonces una parte significativa del espacio necesariamente co-varía (esto es tiene una alta correlación con) con la variable de escala menor.

La esencia del ESD es identificar el comportamiento ‘simultaneo’ de la gran y pequeña escala, y de esta forma se enfoca en la dimensión tiempo. La implicación de una estructura de tiempo similar en diferentes escalas es una alta correlación temporal.

Una segunda razón de realizar la reducción de escala está conectada a un propósito específico, que es el usar los modelos climáticos globales para hacer una inferencia del clima local en un lugar determinado (Benestad et al., 2007).

Como ya se ha mencionado, los GCMs representan una herramienta importante para el estudio del clima; sin embargo, no proporcionan una descripción realista del clima local en general. Por lo tanto, es común reducir la escala de los resultados de los GCMs ya sea a través de un modelo regional de alta resolución anidado (RCM) o a través de reducción de escala empírica/estadística (ESD). Los GCMs no proporcionan una descripción completa del sistema climático real debido a que incluyen ‘parametrizaciones’ que envuelven modelos estadísticos simples dando solo una representación aproximada de procesos de sub-malla. En la actualidad la malla típica de los GCMs de mayor resolución esta alrededor de 100 km.

También es importante notar las principales limitaciones de la reducción de escala estadística sobre todo cuando se aplica a GCMs es que integran la información de escenarios de emisión de gases de efecto invernadero. Los modelos estadísticos están basados en datos históricos y no existe ninguna garantía de que las correlaciones estadísticas que funcionen en el pasado,

tengan que seguir siendo válidas en el futuro. Otro punto a considerar es sobre las incertidumbres asociadas con los resultados de los GCMs y las propias incertidumbres generadas por los métodos estadísticos (Wilby et al., 1997), parte de este problema se debe atribuir a nuestro aún incompleto entendimiento del funcionamiento del sistema climático. Mecanismos importantes que causan variabilidad como ENSO y NAO aún no están comprendidos completamente (Christensen et al., 2007). Debido a la discretización y remalleo de datos, resulta improbable que los GCMs globales simulen los detalles regionales de forma realista (Crane and Hewitson, 1998).

La aplicación de los métodos de reducción de escala puede introducir errores adicionales, a pesar del valor agregado que tienen, sin embargo, los sesgos sistemáticos del modelo también pueden degradar el desempeño de la reducción de escala. La Tabla 1 enlista algunos problemas asociados típicos de varios modelos y sus análisis utilizados en la investigación climática.

GCMs	<p>Pueden tener errores/sesgos sistemáticos.</p> <p>Incapaces de dar en general una descripción realista del clima local.</p> <p>Los procesos descritos por parametrizaciones pueden ser no-estacionarios.</p>
RCMs anidados	<p>Pueden tener errores/sesgos sistemáticos.</p> <p>Requieren de cómputo de alto rendimiento (es caro).</p> <p>Los procesos descritos por parametrizaciones pueden ser no-estacionarios.</p> <p>A menudo no hay una descripción completa del clima local.</p>
ESD – modelos análogos	<p>No pueden extrapolar valores fuera del rango del conjunto de calibración.</p> <p>No toman en cuenta relaciones no-estacionarias entre el clima de gran-escala y de escala local.</p> <p>Necesitan de una muestra de “calibración” grande (a menudo inadecuada para medias mensuales).</p> <p>No aseguran una consistencia en el orden de días consecutivos.</p>
ESD – modelos lineales	<p>Asumen datos distribuidos normalmente.</p> <p>Tienden a reducir la variancia.</p> <p>No toman en cuenta relaciones no-estacionarias entre el clima de gran-escala y de escala local.</p>

Tabla 1. Imbert y Benestad (2005).

## **10. Entregable 3a: Descripción de Metodología Estadística para mejorar la técnica de reducción de escala (metodología de ensamble ponderado, REA) para México.**

La descripción de la metodología del REA ya se discutió ampliamente en la Sección 6 de este informe, y a continuación se enuncia la propuesta de mejora a esta metodología.

### **Propuesta de mejora al algoritmo REA**

Uno de los aspectos de mejora inmediata, es transformar el algoritmo REA a probabilista, esto siguiendo las recomendaciones de Giorgi y Mearns (2003), una vez que los pesos específicos de fiabilidad han sido calculados para cada modelo, la probabilidad de cada uno se define como:

$$P_i = \frac{R_i}{\sum_i R_i} \quad (10.1)$$

Donde  $P_i$  es la contribución de un modelo  $i$  a la probabilidad total de un cambio. De igual forma se puede calcular la probabilidad de que un cambio de temperatura exceda un cierto umbral  $\Delta T_u$  dado por

$$P^{\Delta T > \Delta T_u} = \sum_i P_i; \Delta T_i > \Delta T_u \quad (10.2)$$

Otros aspectos de mejora importantes es seguir las recomendaciones dadas por Xu et al. (2010) en el cual se propone que el error cuadrático medio (Eq. 4) usado en la definición del rango de incertidumbre (Eq. 5) sea reemplazado por:

$$\bar{\delta}_{\Delta T} = \sqrt{\frac{N_{ef}}{N_{ef} - 1}} * \tilde{\delta}_{\Delta T} \quad (10.3)$$

Donde  $N_{ef}$  es el número efectivo de modelos definido como:

$$N_{ef} = 1 / \sum_i P_i^2$$

Para pesos uniformes ( $P_i = 1/N$  para todos los modelos)  $N_{ef} = N$ ; para pesos no uniformes  $N_{ef} < N$ . Esa revisión hace que los rangos de incertidumbre obtenidas de diferentes opciones de ponderación sean más directamente comparables entre ellas.

La otra actualización de fondo propuesta por Xu et al. (2010) se refiere a los pesos de los modelos. Como se vio con anterioridad, en el método REA original el peso de los modelos está dado por el producto de dos factores de fiabilidad que miden el desempeño del modelo y el criterio de convergencia (Eq. 6.3). Sin embargo, esta ecuación tiene sus limitaciones. Por un lado, el criterio de convergencia tiene el potencial de acortar artificialmente las funciones de densidad de probabilidad (PDF) de cambios al promediar los “outliers” de la muestra. Por el otro, el peso de una variable, digamos  $T$ , depende solo del desempeño del modelo en simular el valor medio de la variable, esto es, depende solamente de una variable y métrica a la vez. Xu et

al. (2010) abordan estas limitaciones de la siguiente forma: i) eliminan completamente el factor de fiabilidad que depende del criterio de convergencia; ii) se incluyen múltiples variables y múltiples estadísticas en la definición de los pesos ponderados de fiabilidad. De esta forma se propone que los pesos  $R_i$  ahora se calculen por la ecuación (9) en el artículo de Xiu et al. (2010):

$$R_i = [f_1(\bar{T})]^{m1} * [f_2(T_{var})]^{m2} * [f_3(\bar{P})]^{m3} * [f_4(P_{var})]^{m4} * [f_5(SLP_{corr})]^{m5}$$

donde,

$$f_1(\bar{T}) = \frac{\epsilon_T}{abs(Bias)} ; f_2(T_{var}) = \frac{\epsilon_{STD}}{abs(STD_{model}-STD_{obs})}$$

$$f_3(\bar{P}) = \frac{\epsilon_P}{abs(Bias)} ; f_4(P_{var}) = \frac{\epsilon_{CV}}{abs(CV_{model}-CV_{obs})}$$

$$f_5(SLP_{corr}) = corr(SLP_{model}, SLP_{obs}) \quad (ec. 9, Xiu et al., 2010)$$

La ecuación 9 (Xiu et al., 2010) pone de manifiesto que, de forma general, el peso de un modelo está dado por el producto de cinco factores funcionales. Los factores  $f_1$  y  $f_3$  miden la habilidad del modelo en reproducir la media de temperatura y precipitación, respectivamente, tal y como se calculaba en la versión del REA original. Los factores  $f_2$  y  $f_4$  miden la habilidad del modelo en reproducir la variabilidad interanual observada ( $T_{var}$  o  $P_{var}$ ). La variabilidad es medida por la desviación estándar interanual (STD) para temperatura y por el coeficiente de variación interanual (CV, desviación estándar dividida por la media) para precipitación. Donde la STD y CV son calculadas para cada 20 años del período de análisis. Finalmente, la función  $f_5$  es una medida de la correlación espacial ( $corr$ ) entre los patrones de presión a nivel del mar simulado y observado sobre un área suficientemente amplia que incluya la región de interés (incluyendo puntos tanto en tierra como en océano según sea el caso, ej. México). La idea es que este último factor sea una medida de la habilidad del modelo en reproducir la circulación general atmosférica alrededor de la región de estudio.

En principio, todas estas adecuaciones se realizarán en el actual algoritmo REA con la finalidad de hacerlo tanto probabilístico como más robusto en el cálculo de los factores de fiabilidad que entran en la formulación.

## 11. Entregable 4a: Criterios que permitieron la selección del método REA para extenderlo a modo probabilista.

Para definir los criterios de selección del método propuesto, se considera necesario hacer analizar los siguiente:

El objetivo de la reducción de escala, como tal (sea estadística o dinámica), es resolver la disparidad de escalas espaciales de los modelos climáticos globales (MCGs) y la resolución necesaria para los estudios de impacto.

En las últimas décadas, Gates (1985) notó que la mayoría de los MCGs no incorporan ni proporcionan información a escalas menores de algunos cientos de kilómetros. Sin embargo, el tamaño efectivo o escala del ecosistema en el cual ocurren los impactos climáticos es generalmente mucho menor. De esta forma se enfrenta la problemática de estimar cambios climáticos de escala local basados en información de gran escala proveniente de los MCGs. Carter et al. (1994) también apuntó que un problema en aplicar las proyecciones de MCGs a evaluaciones de impacto regionales es la burda escala espacial de las estimaciones. De la problemática mencionada nace la necesidad de incorporar técnicas de reducción de escala.

Las técnicas de reducción de escala se pueden clasificar de la siguiente forma:

- Simple (Giorgi y Mearns, 1991)
  - Suman cambios climáticos de escala burda a observaciones de mayor resolución (aproximación delta).
  - Más sofisticada, la interpolación de resultados de resolución más burda.
- Estadística
  - Estadísticamente relacionan características del clima de gran escala (p. ej. alturas de 500 mb), predictores, a clima local (p. ej. temperatura mensual, diaria, en un punto), predictandos.
  - Existen varios métodos:
    - Esquemas de clasificación del tiempo atmosférico;
    - Métodos de regresión (regresión múltiple, redes neuronales artificiales, correlación canónica, entre otros);
    - Generadores estocásticos de tiempo atmosférico.
- Dinámica
  - Aplicación de un modelo climático regional usando condiciones de frontera de un modelo climático global.

Los criterios que se utilizaron para seleccionar la metodología estadística propuesta fueron:

- La técnica debe ser generalizada, es decir, que incluya la información no solamente de un solo modelo climático global sino de una variedad de los mismos (o bien todos los disponibles) y de ser posible con sus ensambles asociados. La justificación de esto deriva en que el problema que tienen muchas técnicas de reducción de escala es que se aplican a un solo MCG, de tal manera que tal reducción de escala es “limitada”. Sin embargo, aunque sea replicable la técnica de reducción de escala para cada uno de los MCGs disponibles, existe la necesidad de responder a qué tipo de información final en cuanto a escenarios de cambio climático de mayor resolución deberá ser proporcionada al usuario final.
- La reducción de escala deberá tener congruencia espacio-temporal con la señal proveniente del ensamble de los modelos en cuestión. La justificación radica en que ciertas técnicas de reducción de escala, cuando se implementan, tienden a cambiar de manera drástica la “señal” original proveniente de los MCGs, ya que generalmente se

espera que los campos generados de mayor resolución reproduzcan los campos originales de los GCMs a una resolución más burda.

- Una suposición es que la relación identificada en el período observado base (p.ej. 1961-1990) entre predictor y predictando sigue siendo válida también en el futuro. Esta suposición, característica de los métodos estadísticos, es difícil sostener, ya que como sabemos se espera que el calentamiento global produzca cambios en la variabilidad del clima y entonces ya no necesariamente se seguirán sosteniendo esas correlaciones del pasado. Por lo tanto, esta suposición es una limitación de las técnicas de reducción de escala estadística.

De esta forma, analizando las diversas propiedades de las técnicas de reducción de escala estadística, se propone continuar con una versión mejorada del método REA (Giorgi y Mearns, 2002) a la manera que lo realizó Xu et al., (2010). Esto se debe en gran medida a que Xu et al. (2010) establecen ya un método que incluye probabilidades y por otro lado una de las características principales del método REA es que “integra” las simulaciones disponibles de los MCGs para ofrecer al usuario final las proyecciones de clima en las décadas subsecuentes en escalas menores.

Adicionalmente, la aproximación REA (descrita a detalle en el Informe Técnico 3) es acorde a lo recomendado por la guía para la selección de escenarios regionales:

- **Consistencia con proyecciones globales:** que sean consistentes con el rango de posibles aumentos en T global (e.g., 1.5°C a 6.0°C).
- **Posibilidad física:** cambios deben ser físicamente consistentes entre regiones, escalas y variables.
- **Aplicables a evaluación de impactos:** variables, escalas (temporal y espacial), disponibilidad.
- **Representativos:** deben ser representativos del rango de cambios regionales posibles. Solamente así se puede estimar un rango realista de impactos potenciales.
- **Validez:** qué tan bien un modelo es capaz de reproducir el clima actual (excluir los modelos que lo hacen peor, no escoger el mejor). La selección de modelos no necesariamente se debe basar en los modelos con mejor desempeño, la combinación con otros criterios (representatividad) es importante.

El método REA y en particular su versión actualizada, proporciona un esquema sencillo para evaluar la incertidumbre asociada a la suma de resultados de los ensambles de modelos para producir información de cambio climático a escala regional (Xu et al., 2010).

## **12. Entregable 4b: Conversión de la aplicación de un método estadístico en la mejora de la técnica de reducción de un método probabilístico (PDFs).**



Esta parte ya fue descrita en la Sección 11 de este informe, Entregable 3a.

### **13. Entregable 4c: Descripción de las características mejoradas en la definición del criterio de desempeño del REA.**

Esta parte ya fue descrita en la Sección 11 de este informe, Entregable 3a.

### **14. Entregable 4d: Descripción de las mejoras realizadas en el criterio de convergencia del REA.**

La inclusión del criterio de convergencia se realizó en la versión original del REA, atribuyendo a que se tendría una mayor confiabilidad en las proyecciones del ensamble de modelos si habría una mejor concordancia entre ellos. De esta forma, si algún modelo fuera un típico ‘outlier’, (fuera de rango) su peso específico decaería en la formulación del REA original.

De la misma forma que lo realiza Xu et al. (2010) el criterio de convergencia es eliminado del método REA. La principal razón de esto es que, aunque ha sido ampliamente utilizado por la comunidad de modelación climática, puede causar artificialmente un adelgazamiento de la función de densidad de probabilidades (FDP) del cambio, y con lo cual podría perderse información importante que se encuentren en las “colas” de la FDP.

### **15. Entregable 5a: Ventajas y desventajas de la técnica mejorada respecto a la original en la reducción de escala estadística.**

Para comparar las dos versiones del REA se utilizaron las mismas bases de datos que en el REA del 2012 (Cavazos, *et al.* 2012). El método de Xu, et al. 2010 se basa en la ecuación 15.1, en el presente trabajo se calculó el ensamble tomando las funciones  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  y  $f_4$ .

$$R_i = [f_1(\bar{T})]^{m1} \times [f_2(T_{var})]^{m2} \times [f_3(\bar{P})]^{m3} \times [f_4(P_{var})]^{m4} \times [f_5(SLP_{corr})]^{m5} \quad (\text{Ec. 15.1})$$

Donde,

$$f_1(\bar{T}) = \frac{\varepsilon_T}{|Bias|}; \quad f_2(T_{var}) = \frac{\varepsilon_{STD}}{|STD_{modelo} - STD_{obs}|}; \quad f_3(\bar{P}) = \frac{\varepsilon_p}{|Bias|};$$

$$f_4(P_{var}) = \frac{\varepsilon_{CV}}{|CV_{modelo} - CV_{obs}|}; \quad f_5(SLP_{corr}) = corr(SLP_{modelo}, SLP_{obs})$$

Los factores del  $f_1$  al  $f_4$  se calculan por punto de malla, que en este trabajo es 0.5 por 0.5°, la cual es la resolución de la base de datos CRU. El coeficiente de variabilidad interanual

(CV) se defina como la desviación estándar dividida entre la media. Cada uno de estos factores es una matriz de 12 tiempos, 80 latitudes, 160 longitudes y 14 modelos. Para calcular finalmente el ensamble se aplica la ecuación 2 para calcular el ensamble ponderado. El periodo analizando en el presente reporte es 1971-2000.

$$\hat{T} = \frac{\sum_{i=1}^{14} R_i T_i}{\sum_{i=1}^{14} R_i}$$

Modelos de Circulación General (MCG)		
1. BCC-CSM1-1: Beijing Climate Center, China	6. GISS-E2-R: NASA Goddard Institute for Space Studies, USA	11. MIROC5: Atmosphere and Ocean Res. Inst., Japan
2. CanESM2: Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis	7. HadGEM2-ES: Met Office Hadley (MOHC), UK	12. MRI-CGCM3: Meteorological Res. Inst., Japan
3. CNRM-CM5: Centre National de Recherches Meteorologiques, France	8. INM: Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences	13. MPI-ESM-LR: Max-Planck Institute, Germany
4. CSIRO-MK3-6: Australian Commonwealth Scientific and Industrial Research Org.	9. MIROC-Esm-Chem	14. NorESM1: Norwegian Climate Center
5. IPSL-cm5a-ir: Institut Pierre-Simon Laplace, France	10. MIROC-esm: Japan Agency for Marine-Earth Science & Technol.	

Tabla 1. Modelos de Circulación General utilizados para calcular los ensambles.

Como fue mencionado en reportes anteriores, en este proyecto utilizaremos la nueva aproximación de Xu *et al.* (2010) con la finalidad de “mejorar” el REA en estas limitaciones mencionadas. La técnica como tal ya fue descrita en los informes técnicos parciales 3 y 4 de este proyecto.

### Resultados

En el presente trabajo se busca comparar el desempeño de las dos versiones del REA mencionadas anteriormente y el ensamble simple comparándolas contra la base de datos “observados” de CRU. La comparación de temperatura de superficie para invierno (diciembre, enero y febrero) en el periodo base 1971-2000 se muestra en la Fig. 15.1. Se puede observar claramente una mejor representación de las características de la temperatura para el país con cualquiera de los dos métodos REA en comparación con el desempeño del promedio simple del ensamble. Sin embargo, resulta muy difícil poder discernir cuál de las dos aproximaciones REA realiza un mejor trabajo con respecto a CRU. Ambas aproximaciones (REA) muestran correctamente la zona más fría del norte y la zona más cálida de los trópicos. Ambas

aproximaciones añaden más información de las características regionales de la distribución espacial de la temperatura especialmente en la región del monzón mexicano (noroeste de México) y en Baja California.

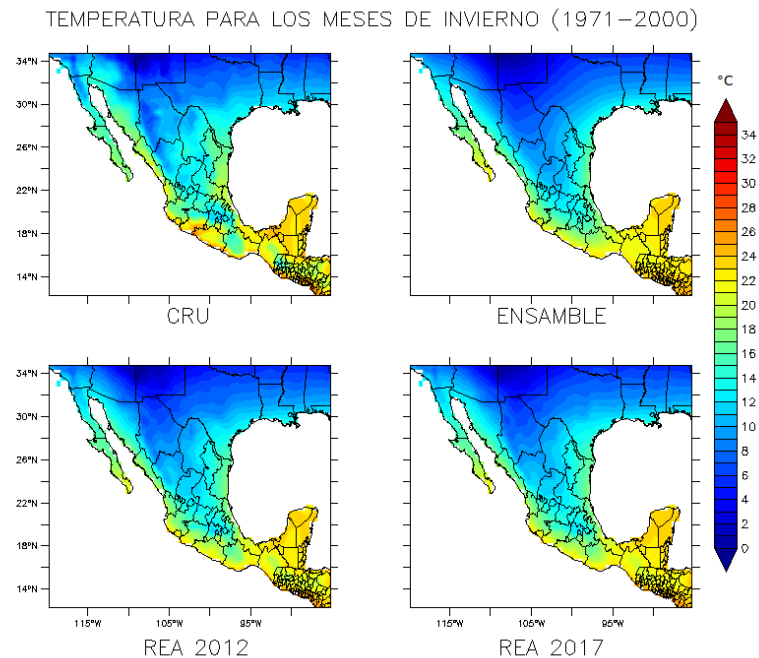


Fig. 15.1. Comparación de la temperatura de superficie media para los meses de invierno (diciembre, enero, febrero) en el periodo 1971-2000 para CRU, el promedio del ensamble de modelos (ENSAMBLE) y las versiones REA 2012 y REA 2017.

Por otro lado, se muestran los resultados para las temperaturas de verano (junio, julio, agosto), en las cuales se vuelve a notar una mucha mejor correspondencia con CRU a nivel regional de las dos aproximaciones REA que la del promedio del ensamble (Fig. 15.2). Esto se nota particularmente en regiones como el centro de Chiapas y la frontera del noroeste de México y el suroeste de EU.

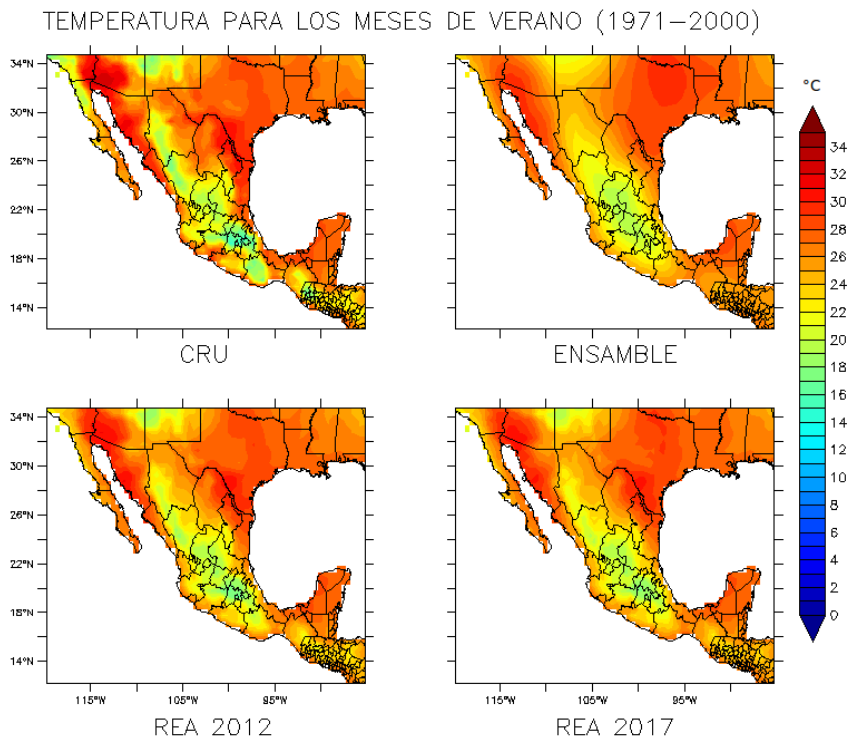


Fig. 15.2. Comparación de la temperatura de superficie media para los meses de verano (junio, julio, agosto) en el periodo 1971-2000 para CRU, el promedio del ensamble de modelos (ENSAMBLE) y las versiones REA 2012 y REA 2017.

En cuanto a la precipitación de invierno (Fig. 15.3), se notan mucho más claras las diferencias entre las tres aproximaciones comparadas contra los datos observados de CRU. Es notable el mejor desempeño del algoritmo REA 2012 en comparación con el nuevo de 2017 y sobre todo con el de peor desempeño que es nuevamente el ensamble simple. En general todos los ensambles (simple y REAs) tienden a sobreestimar la precipitación en la parte norte y centro de México y subestiman las precipitaciones de Tabasco, Chiapas y Guatemala.

Para el caso de la precipitación de verano (Fig. 15.4) el desempeño de las dos aproximaciones REAs no es tan bueno comparado con respecto a CRU, pero si claramente superan la aproximación del ensamble simple. Es notable la mejoría que tienen las aproximaciones REA en representar la lluvia del monzón mexicano, pero definitivamente tienen muchos problemas en la región sureste de México (sur de Veracruz, Oaxaca, Tabasco y Chiapas) y Guatemala donde subestiman claramente la precipitación observada. Es claro que el problema anterior se debe a que en general todos los modelos parecen tener ese sesgo negativo de la precipitación observada en el sureste de México ya que en el ensamble de modelos el problema es todavía más grave.

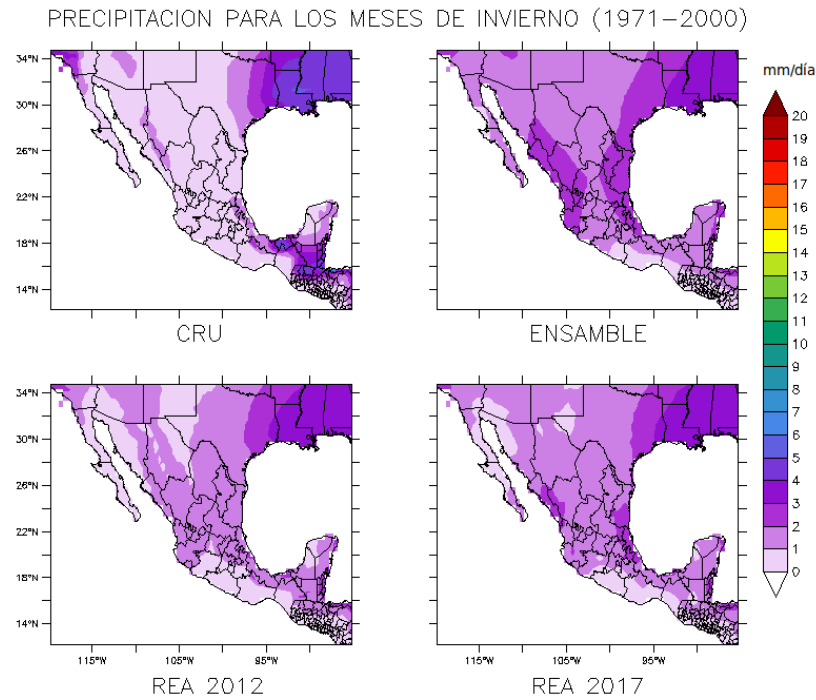


Fig. 15.3. Comparación de la precipitación de superficie media para los meses de invierno (diciembre, enero, febrero) en el periodo 1971-2000 para CRU, el promedio del ensamble de modelos (ENSAMBLE) y las versiones REA 2012 y REA 2017.

Con el fin de cuantificar los diferentes desempeños de cada uno de los 14 MCGs utilizados, el promedio simple del ensamble de esos modelos y las aproximaciones REA 2012 y REA 2017, se generaron diagramas de Taylor para dos regiones de México: norte y sur (Fig. 4). Los diagramas de Taylor muestran el desempeño de cada uno de los modelos y ensambles (simple y REAs) respecto a CRU con los estadísticos siguientes: coeficiente de correlación de Pearson, desviación estándar y error cuadrático medio. Cabe destacar que los diagramas de Taylor son calculados sobre la matriz completa de información ( $nt \times nx \times ny$ ).

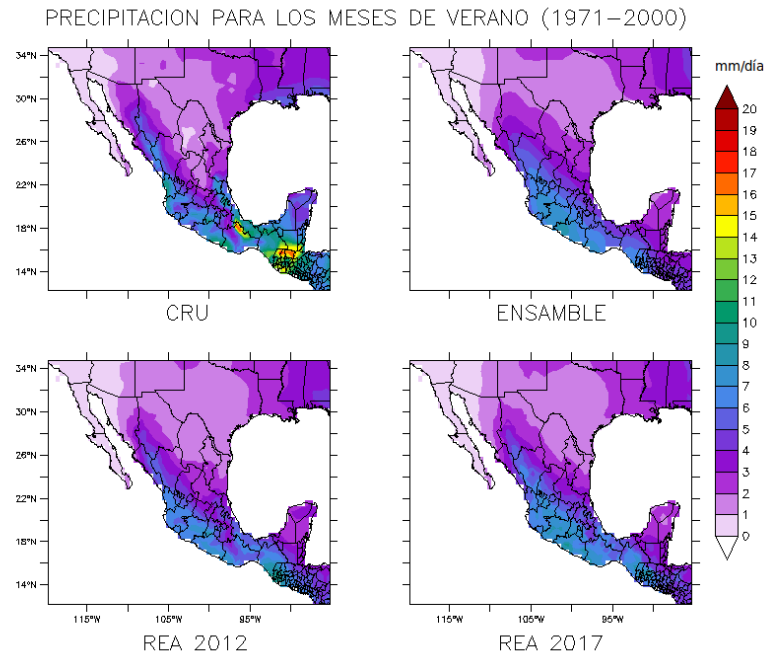


Fig. 15.4. Comparación de la precipitación de superficie media para los meses de verano (junio, julio, agosto) en el periodo 1971-2000 para CRU, el promedio del ensamble de modelos (ENSAMBLE) y las versiones REA 2012 y REA 2017.

Los diagramas de Taylor y los ciclos anuales se realizaron en dos zonas que dividen el país, zona norte y zona sur. La (Fig. 15.5) muestra ambas áreas.

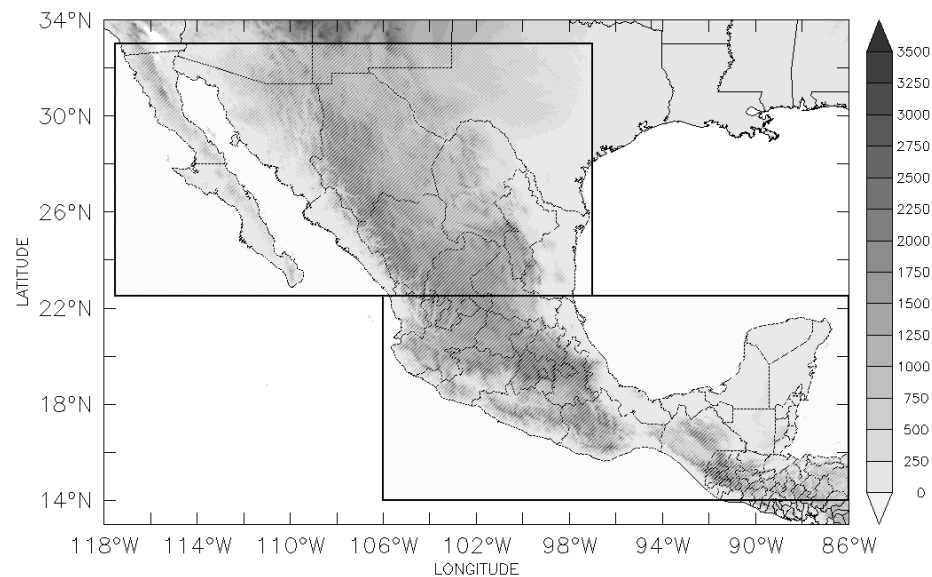


Fig. 15.5. Zonas en las que se divide al país.

De esta forma el diagrama de Taylor para temperatura de superficie en la zona norte del país (Fig. 15.6) muestra lo ya esperado, todos los ensambles (simple y REAs) son mejores que cualquiera de los modelos individuales, y que a su vez los dos REAs superan en desempeño al promedio simple dado que sus puntos están más cerca del punto de datos observados de CRU. También se nota que el REA 2012 es ligeramente mejor que el REA 2017 lo cual se atribuye a lo anteriormente mencionado de que el nuevo factor de fiabilidad de desempeño depende en el nuevo REA de las dos variables (P y T) y no de solo una (en este caso T) como era en el antiguo REA 2012. Sin embargo, en general todos los modelos tienen buena correlación ( $\text{corr} > 0.85$ ) con los datos de CRU.

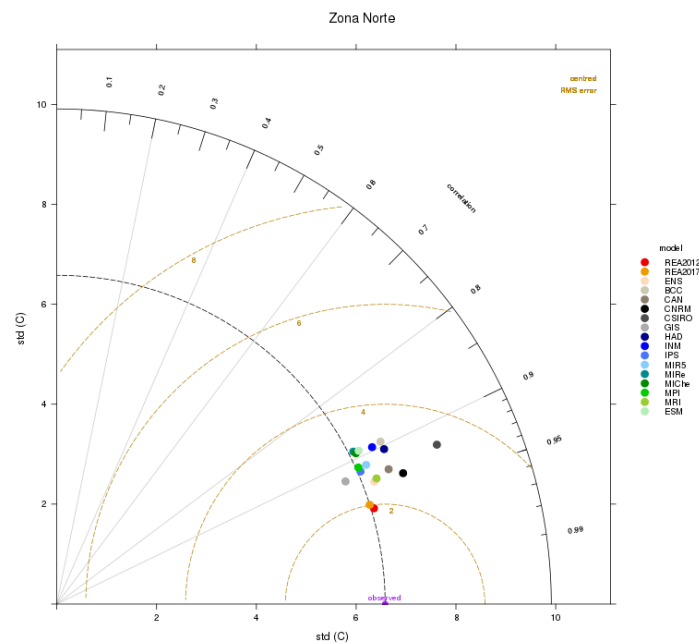


Fig. 15.6. Diagrama de Taylor de temperatura de superficie de los 14 MCG, el ensamble simple (ENS) y ensambles REA2012 y REA2017 versus CRU para la zona norte de México.

Los resultados mostrados en el diagrama de Taylor para temperatura de superficie en la zona sur del país (Fig. 15.7), son significativamente diferentes a los del norte, lo cual pudiera estar relacionado con un mejor desempeño de este tipo de modelos para latitudes medias y no necesariamente para latitudes tropicales. El desempeño de los modelos disminuye, hasta correlaciones cercanas a 0.6 con un crms (error cuadrático medio centrado) de 3.8 °C. En esta región los ensambles REA son los que tienen el mejor desempeño (Corr alrededor de 0.88 y crms de 2 °C).

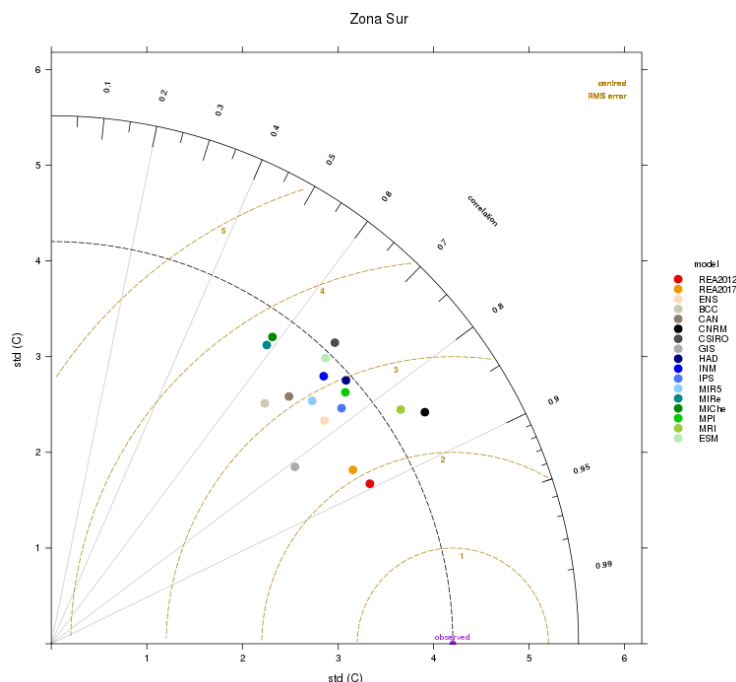


Fig. 15.7. Diagrama de Taylor de temperatura de superficie de los 14 MCG, el ensamble simple (ENS) y ensambles REA2012 y REA2017 versus CRU para la zona sur de México.

Para la precipitación se observa que todos los modelos tienen baja correlación,  $\text{corr} < 0.6$ , con los datos observados en la zona norte (Fig. 15.8). Los modelos con mejor desempeño en esta región son: CNRM ( $\text{corr} = 0.6$ ,  $\text{crms} = 1.3\text{mm/d}$ ) y el MPI ( $\text{corr} = 0.55$ ,  $\text{crms} = 1.5\text{mm/d}$ ). Ambos ensambles REA tienen correlaciones mayores a 0.6, sin embargo, el REA 2012 nuevamente es el que tiene el mejor desempeño, seguido del REA 2017. Es interesante notar que, a diferencia de la temperatura, en la precipitación los tres ensambles se encuentran relativamente cerca y que la dispersión de los modelos es mucho mayor.



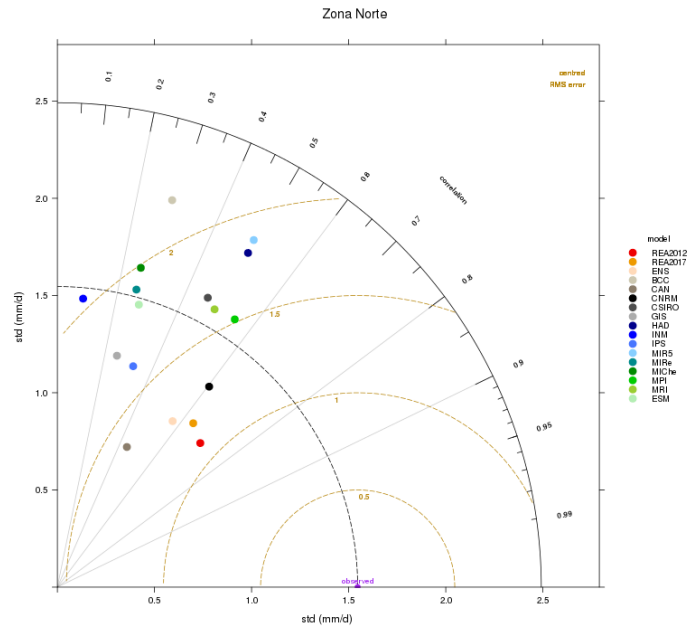


Fig. 15.8. Diagrama de Taylor de precipitación de superficie de los 14 MCG, el ensemble simple (ENS) y ensambles REA2012 y REA2017 versus CRU para la zona norte de México.

En el caso de la precipitación para la región sur, es parecido que, en la zona norte, los modelos tienen baja correlación respecto a las observaciones. Los modelos con mejor desempeño en esta zona son: GISS (corr = 0.58, crms = 3.8mm/d), CNRM (corr=0.56, crms=3.7mm/d) y CSIRO (corr=0.56, crms=4mm/d). EL REA-2012 nuevamente tiene el mejor desempeño (corr=0.71, crms=3.3mm/d), seguido del REA-2017 (corr=0.62, crms=3.5mm/d). El ensemble simple y el REA-2017 tienen desempeño muy similar.

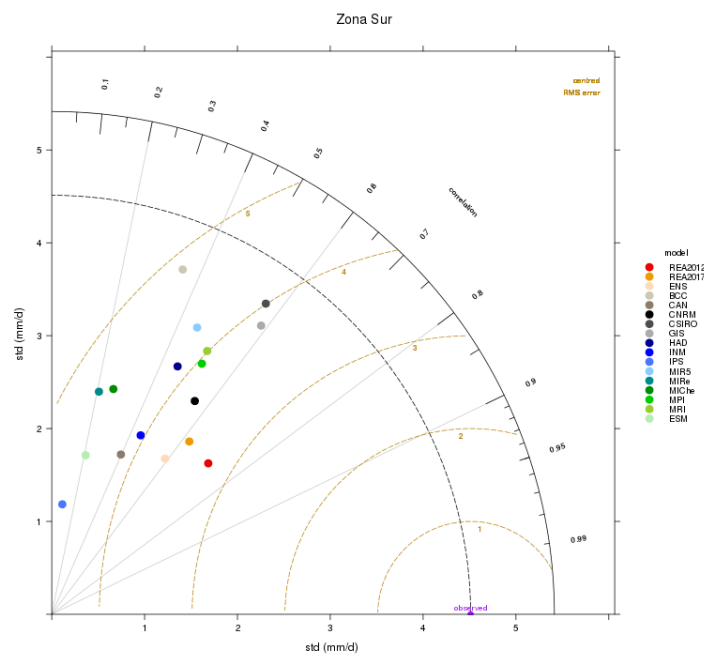


Fig. 15.9. Diagrama de Taylor de precipitación de superficie de los 14 MCG, el ensamble simple (ENS) y ensambles REA2012 y REA2017 versus CRU para la zona sur de México.

## 16. Entregable 5b: Estrategia de regionalización para México considerando la reducción de escala estadística.

Como quedo reportado en el informe anterior (cuarto) de este proyecto, una de las mayores limitaciones de la reducción de escala (estadística y/o dinámica) es que estas metodologías solo se pueden aplicar a un modelo climático global y/o regional a la vez. Lo anterior trae como consecuencia que las proyecciones generadas de tales simulaciones siempre quedan “muy limitadas” en cuanto a representar la incertidumbre total de los modelos climáticos globales.

Siguiendo las recomendaciones reportadas en el Segundo Informe Técnico de este proyecto, sobre el documento “*IPCC Expert Meeting on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections*” (Stocker et al., 2010), donde se menciona que la fiabilidad de las proyecciones podría mejorarse si los modelos son ponderados de acuerdo a un cierto grado de habilidad y si se toman en cuenta sus interdependencias, o si solo se consideran subconjuntos de modelos. En general, la definición de un conjunto de criterios para que un modelo sea “creíble” o acordar una métrica de calidad es por tanto muy difícil.

Otro de los puntos importantes que se tratan es que si todos los modelos deben ser tratados por igual o si se debe llevar a cabo una ponderación basado en su desempeño. Ya hay estudios que comenzaron a explorar el valor de “pesar” o ponderar los modelos basados en su desempeño medidos por evaluación de procesos, de acuerdo con las observaciones actuales, tendencias del clima pasado o actual, con la meta de mejorar la proyección media multi-modelo o de manera más exacta cuantificando incertidumbres. La información de calidad de modelos también ha sido utilizada en estudios multi-modelo de detección y atribución recientes. Algunos estudios ya han apuntado las dificultades en ponderar los modelos y en interpretar la amplitud de modelos en general. Los métodos estadísticos pueden ser una herramienta muy poderosa para el análisis de tal información, pero está el peligro de tener demasiada confianza si los modelos carecen de procesos importantes y si el error del modelo, las incertidumbres en observaciones y la robustez de las suposiciones estadísticas no son evaluadas apropiadamente.

El usuario a menudo necesita incluir evaluaciones de información climática regional, sin embargo, hay un peligro latente en malinterpretar la información climática, tal como usar una celda de malla simple para representar un punto localmente. Existe por tanto una amplia necesidad de contar con una guía general para una comunidad de usuarios de datos de proyecciones climáticas de GCMs multi-modelo más los modelos climáticos regionales, procedimientos de reducción de escala y otros medios para proporcionar información climática para evaluaciones. Las dificultades saltan a la luz cuando se observa que los resultados de modelos regionales son afectados tanto por los modelos globales (forzadores) como por los propios modelos regionales. La relación entre los GCMs conductores y la simulación resultante con RCMs proporciona una oportunidad interesante para nuevas aproximaciones de cuantificar incertidumbres. También se apunta que la reducción de escala empírica-estadística (ESD) es

Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático - INECC

Periférico Sur 5000, Col. Insurgentes Cuicuilco, Coyoacán, México D.F.

computacionalmente mucho más económica que los RCMs, y por tanto más práctica para reducción de escala de ensambles grandes y para intervalos de tiempo grandes, aunque ESD sufre de posibles factores de “fuera-de-la-muestra”.

De esta forma, los criterios que se utilizaron para seleccionar la metodología propuesta en este proyecto desde el punto de vista estadístico fueron:

- La técnica tiene que ser generalizada en el sentido de abarcar la información no solamente de un solo modelo climático global sino de una variedad de los mismos (o bien todos los disponibles) y de ser posible con sus ensambles asociados. La justificación de esto deriva en que el problema que tienen muchas técnicas de reducción de escala es que se aplican a un solo MCG en particular, de tal manera que tal reducción de escala queda “limitada” a ese solo modelo. Sin embargo, aunque se pueda repetir la técnica de reducción de escala para cada uno de los MCGs disponibles, al final de cualquier forma se verá uno en la necesidad de responder a la cuestión de qué tipo de información final en cuanto a escenarios de cambio climático de mayor resolución deberá ser proporcionada al usuario final.
- La reducción de escala final, como tal, deberá tener congruencia espacio-temporal con la señal proveniente del ensamble de modelos en cuestión. La justificación aquí radica en que ciertas técnicas de reducción de escala, cuando se implementan, tienden a cambiar de manera drástica la “señal” original proveniente de los MCGs. Esto es muy difícil de defender o argumentar, ya que generalmente se espera que los campos generados de mayor resolución reproduzcan los campos originales de los GCMs a una resolución más burda.
- Se parte de la suposición: la relación encontrada en el período observado base (p.ej. 1961-1990) entre predictor y predictando sigue siendo válida también en el futuro. Esta suposición, característica de los métodos estadísticos, es muy fuerte y difícil de sostener en la realidad, ya que como sabemos se espera que el calentamiento global produzca cambios en la variabilidad del clima y entonces ya no necesariamente se seguirán sosteniendo esas correlaciones del pasado. Por lo tanto, esta suposición es un hándicap en contra a las técnicas de reducción de escala estadística.

## **17. Entregable 5c: Plan de trabajo a corto plazo para la modelación climática en México.**

El presente trabajo ha dejado de manifiesto que no hay técnicas de reducción de escala ideales, sino más bien se pueden tratar como diferentes perspectivas de ver un futuro climático con alto nivel de variabilidad y/o incertidumbre. En este sentido creemos que es altamente recomendable el que en México vuelva a resurgir la idea del Grupo de Modelación de Clima en México y que estuviera coordinado por el INECC o SEMARNAT. La idea del grupo sería discutir las diferentes ideas de regionalización tanto dinámicas como estadísticas factibles para aplicarse en nuestro territorio nacional. Así también, tratar de lograr un consenso en cuanto que tipo de estrategia se debería usar para dar la información de escenarios climáticos regionalizados a los usuarios finales. Es muy importante tratar de lograr ese consenso en el

Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático - INECC

Periférico Sur 5000, Col. Insurgentes Cuicuilco, Coyoacán, México D.F.

sentido de establecer una serie de medidas desde escenarios de clima, estudios de impacto y vulnerabilidad, y de implementación de medidas de adaptación que sean consistentes en cuanto a los datos utilizados y los métodos físicos y estadísticos con los que se logren los resultados.

## **18. Entregable 6a: Recomendaciones, hallazgos relevantes y futuras líneas de investigación.**

La ventaja de utilizar el método actualizado de Xu, et al. (2010) es que tiene una mayor consistencia estadística, ya que el peso asignado a cada modelo es el mismo para cada variable y periodo. Además de ser más riguroso al agregar en el cálculo del peso la variabilidad de cada variable, junto con su comportamiento medio. Mientras que en el REA-2012, que sigue la metodología propuesta por Giorgi y Mearns (2002), dicho peso cambia dependiendo la variable, el periodo utilizado y el escenario considerado.

Sin embargo, al analizar ambos métodos REA-2012 y REA-2017, el último, al tener su peso dependiendo de ambas variables T y P, su desempeño en general baja (con respecto a CRU), quedando en algunos casos muy cercano al obtenido por el ensamble simple.

De esta forma podemos observar que la nueva técnica REA-2017, proveniente del algoritmo de Xu et al.2010, gana en consistencia estadística a costo de una reducción del desempeño histórico. Estos nuevos pesos son los que se utilizarán para calcular las proyecciones climáticas habiendo eliminado el criterio de convergencia criticado en la aproximación de Giorgi y Mearns (2002).

A continuación se presentan algunos de los resultados más relevantes recientes en el cual se realiza una comparación entre el “REA Original” basado en Giorgi y Mearns (2002) y “REA Xu” basado en Xu et al. (2010), ambas para el RCP8.5 (CMIP5), versus “REA A2” con el escenario SRES-A2 (CMIP3). Las gráficas destacan el valor de cambio de temperatura y precipitación del período futuro 2071-2099 vs período histórico 1971-2000 para las cuatro estaciones del año.

Dado lo anterior, podemos ver que para temperatura de superficie en el invierno (Fig. 18.1) se nota que bajo la nueva metodología mejorada de Xu los extremos de temperaturas altas tienden a elevarse con respecto al REA original, especialmente en el noroeste del país donde se estiman valores cercanos a 5 C de calentamiento para finales de siglo, y ambos son comparativamente mayores que el REA A2 del CMIP3. Para el valor de cambio de precipitación total (mm/día) en invierno (Fig. 18.2) se vuelve a notar que la aproximación mejorada de Xu vuelve a intensificar los extremos, en este caso negativos, de la precipitación con respecto al REA original, especialmente en la región alrededor del estado de Durango, y ambas vuelven a ser comparativamente mayores (aunque en valor absoluto) que con respecto al REA-A2, en ninguno de los casos se observa aumento de precipitación para el futuro.

Para el valor de cambio de temperatura de superficie durante la primavera (Fig. 18.3), esta vez no es tan claro que existan valores mayores de cambio de REA Xu vs REA original para el CMIP5, aunque sí se notan valores de mayor calentamiento extremo cercanos a los seis grados en Chihuahua y Durango. Ambas aproximaciones vuelven a resultar comparativamente mayores que el REA A2 del CMIP3. Para precipitación en primavera (Fig. 18.4) se observa un ligero aumento en el decremento de esta variable para REA Xu respecto de la versión original, pero ahora ambas son menores en valor absoluto que con respecto al REA A2 en especial para el sur y sureste del país. Nuevamente no se proyectan aumentos de precipitación hacia el futuro en ninguno de los casos.

Para la estación clave de verano en temperatura de superficie (Fig. 18.5) se observa nuevamente un incremento considerable en los extremos de temperatura del REA Xu vs REA original especialmente para el noroeste del país donde se alcanza un máximo por arriba de 6 C en el calentamiento para el norte de Sonora. Sin embargo, para el sureste del país (Tabasco y Chiapas) parece ser que el REA original produce los valores más altos de cambio. Ambos resultados son significativamente mayores que el REA-A2 del CMIP3. En cuanto a precipitación (Fig. 18.6), los resultados son interesantísimos ya que por primera vez las tres versiones de resultados muestran valores de aumento en la precipitación, aunque sea de solo 0.5 mm/día para ciertas zonas del norte del país. Nuevamente se nota claramente que los valores de cambio, tanto negativos como positivos, son mayores en la nueva versión del REA Xu y los resultados de las simulaciones del CMIP5 (RCP8.5) son mayores que la del CMIP3 (SRES-A2).

Finalmente para el otoño en el caso de valor de cambio en la temperatura de superficie (Fig.18.7), se vuelven a notar incrementos mayores en la temperatura para el REA Xu mayores a los 6 grados en la zona fronteriza noroeste del país. Para el resto del país no es tan claro que el REA Xu sea mayor que la versión del REA original. Nuevamente, ambas simulaciones del CMIP5 son claramente mayores que la del CMIP3. Para precipitación en otoño (Fig. 18.8), se nota un cambio radical en el patrón de precipitación de las simulaciones del CMIP5 que con respecto al CMIP3. Claramente las zonas de aumento en la precipitación son mayores que donde disminuye para el CMIP5 (las dos figuras superiores) pero para el CMIP3 (figura inferior) prevalece en su gran mayoría la disminución de precipitación. También vuelve a notarse un aumento en los extremos de aumento en la precipitación del REA Xu vs el REA original, especialmente para la zona costera central del Pacífico mexicano con valores de casi +2 mm/día.

Del análisis anterior se concluye fácilmente que las simulaciones del CMIP5 RCP8.5 no son comparables con las del CMIP3 SRES-A2 debido principalmente a que el RCP8.5 es un escenario de emisiones más agresivo que el SRES-A2. Quizás sea más pertinente comparar RCP8.5 vs SRES-A1FI algo que se podría hacer en el futuro cercano.

Por otro lado, y tal y como se esperaba, se demostró una alta correlación espacial entre las dos simulaciones del CMIP5, REA original y REA Xu, con lo cual se ve que la consistencia del método REA aún y cuando se hayan realizado cambios estructurales de fondo en el código. También fue muy interesante observar que el método nuevo (REA Xu) prácticamente en todos los casos incrementa la señal de los extremos que con respecto al REA original. Este resultado es interesante de analizar ya que quiere decir que los análisis de impacto realizados con los resultados de la Quinta Comunicación Nacional también tendrán que ser “extendidos” para tomar en cuenta las proyecciones del nuevo método que en principio resulta ser metodológicamente más robusto que su versión anterior. Estos análisis también se podrían contemplar para realizarse en el futuro cercano.

Por último es importante recalcar que sí es muy necesaria una reunión de expertos en modelación climática, para poder resolver varios de los cuestionamientos y/o ambigüedades que existen al usar estas o cualquier otro tipo de metodologías. Es necesario que este grupo de expertos queden lo más cercano a un acuerdo para poder pasar este tipo de información tan necesaria para los diferentes grupos de estudios de impacto y posterior medidas de adaptación de los diferentes sectores. Esto ayudará a poder utilizar este tipo de información de una forma más homogénea y tratando de reducir los valores de incertidumbre entre las diferentes simulaciones y estudios.

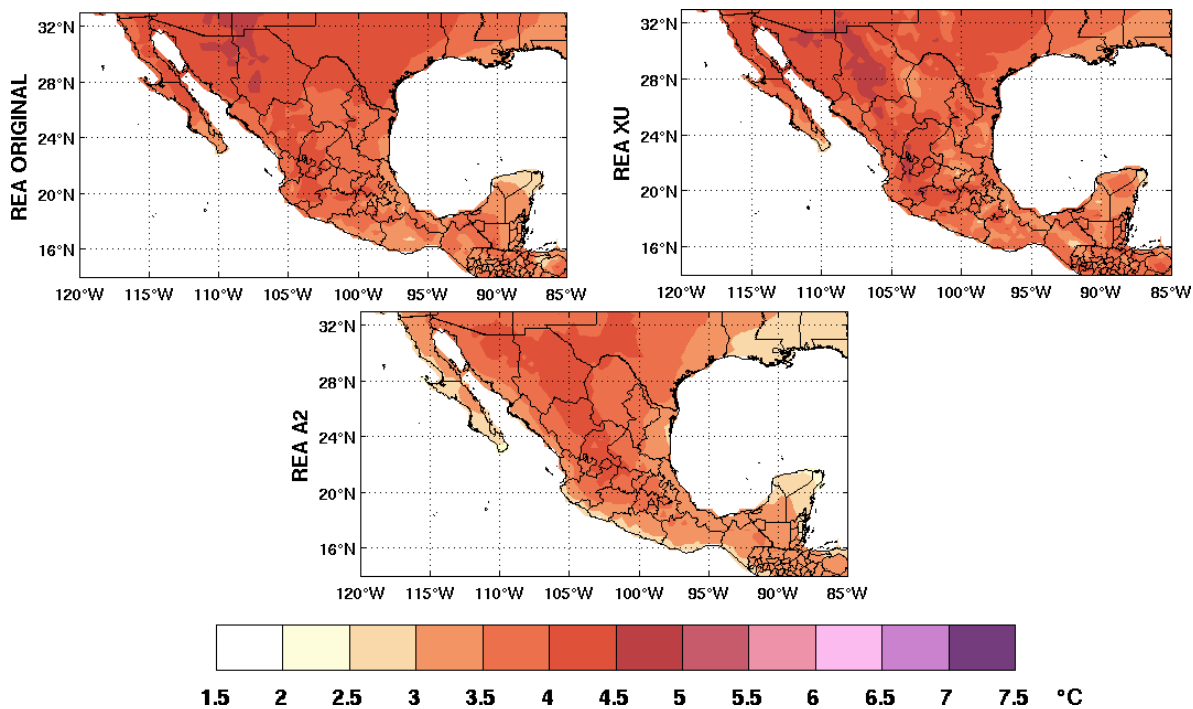


Fig. 18.1. Valor de cambio de temperatura en superficie (C) para INVIERNO entre los períodos 2071-2099 vs 1971-2000, del “REA Original” basado en Giorgi y Mearns (2002), “REA Xu” basado en Xu et al. (2010), ambas para el RCP8.5 (CMIP5), versus “REA A2” con el escenario SRES-A2 (CMIP3).

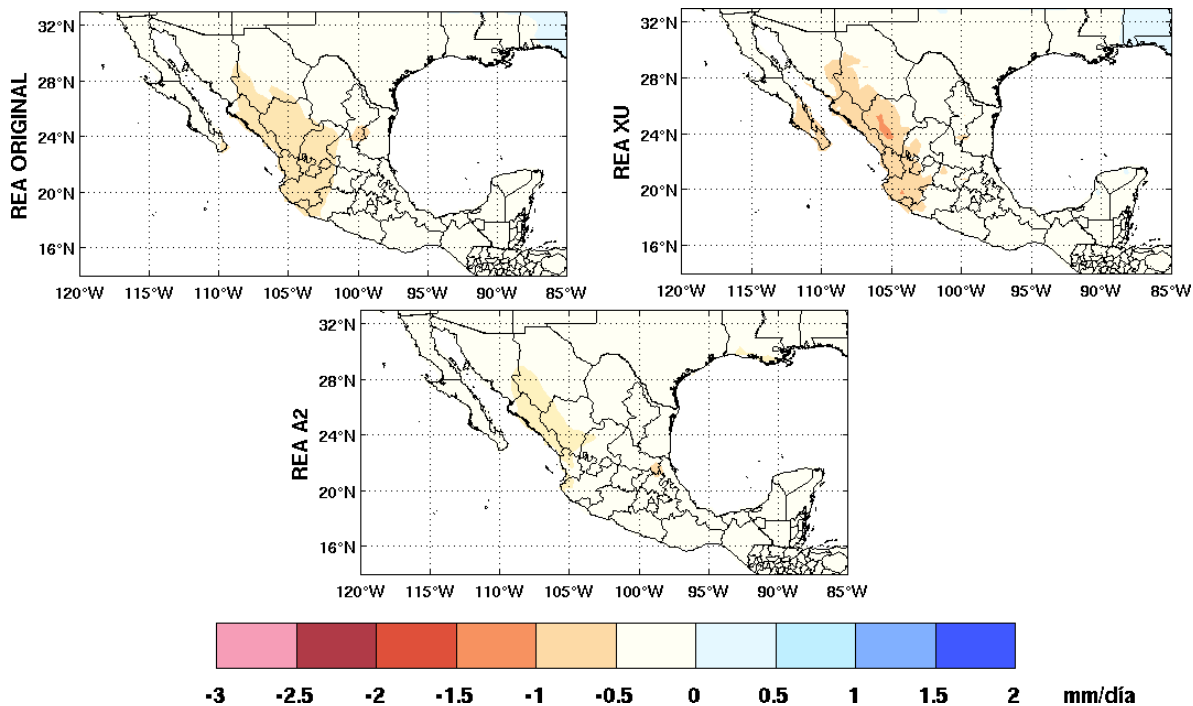


Fig. 18.2. Lo mismo que en la Fig. 18.1 pero para precipitación (mm/día) en INVIERNO.

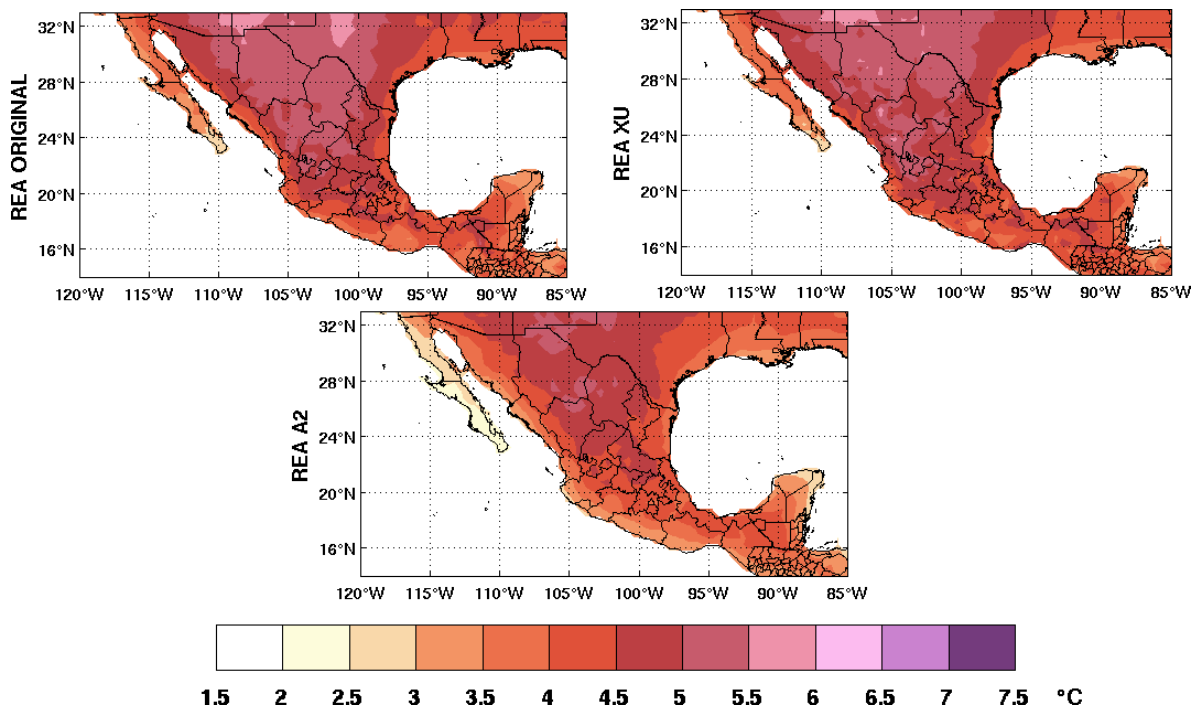


Fig. 18.3. Lo mismo que en la Fig. 18.1 pero para PRIMAVERA (temperatura de superficie).

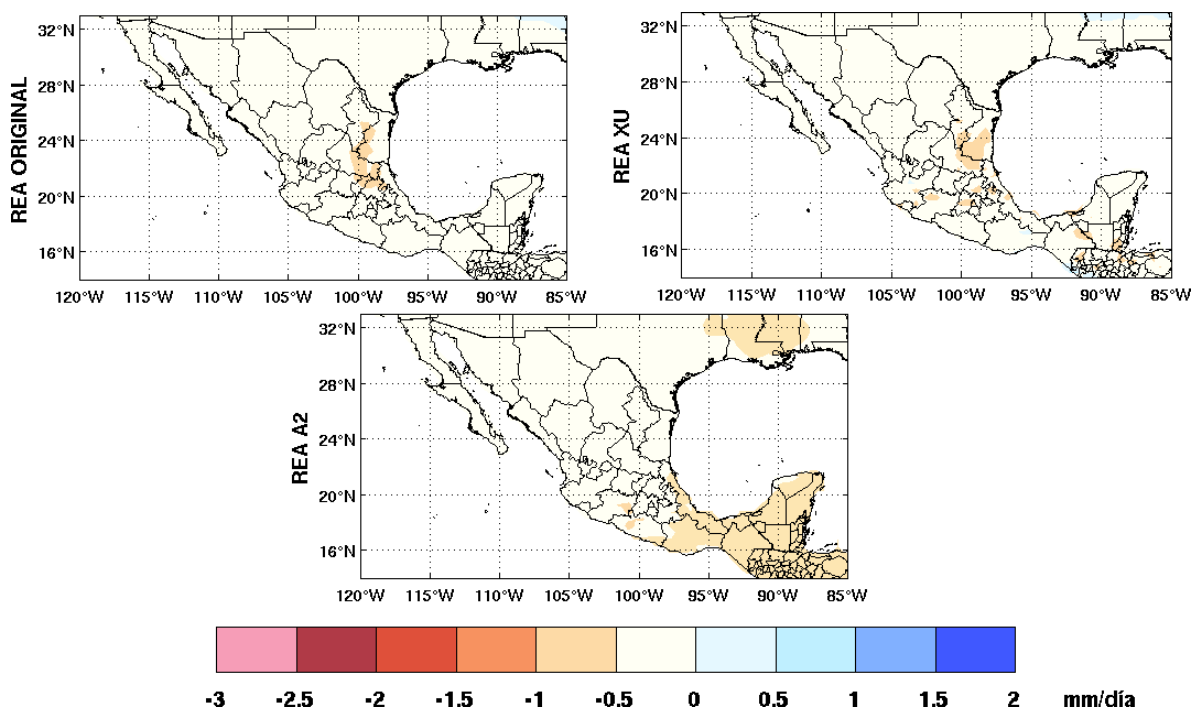


Fig. 18.4. Lo mismo que en la Fig. 18.2 pero para PRIMAVERA (precipitación).

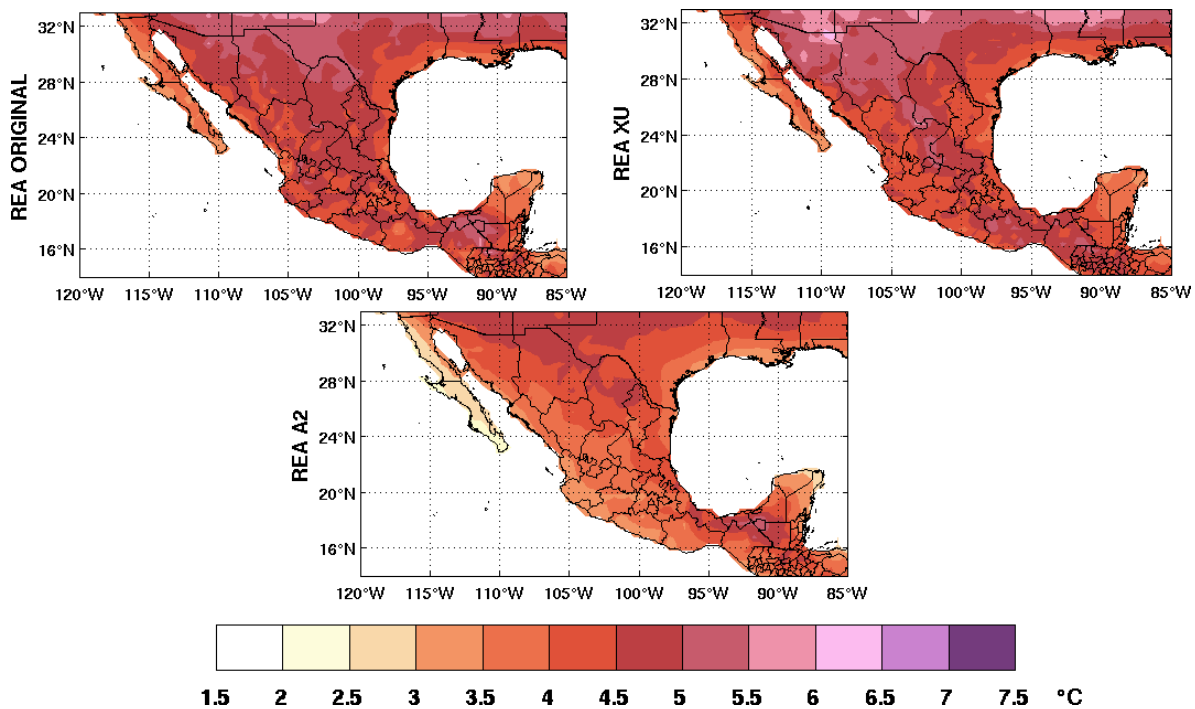


Fig. 18.5. Lo mismo que en la Fig. 18.1 pero para VERANO (temperatura de superficie).

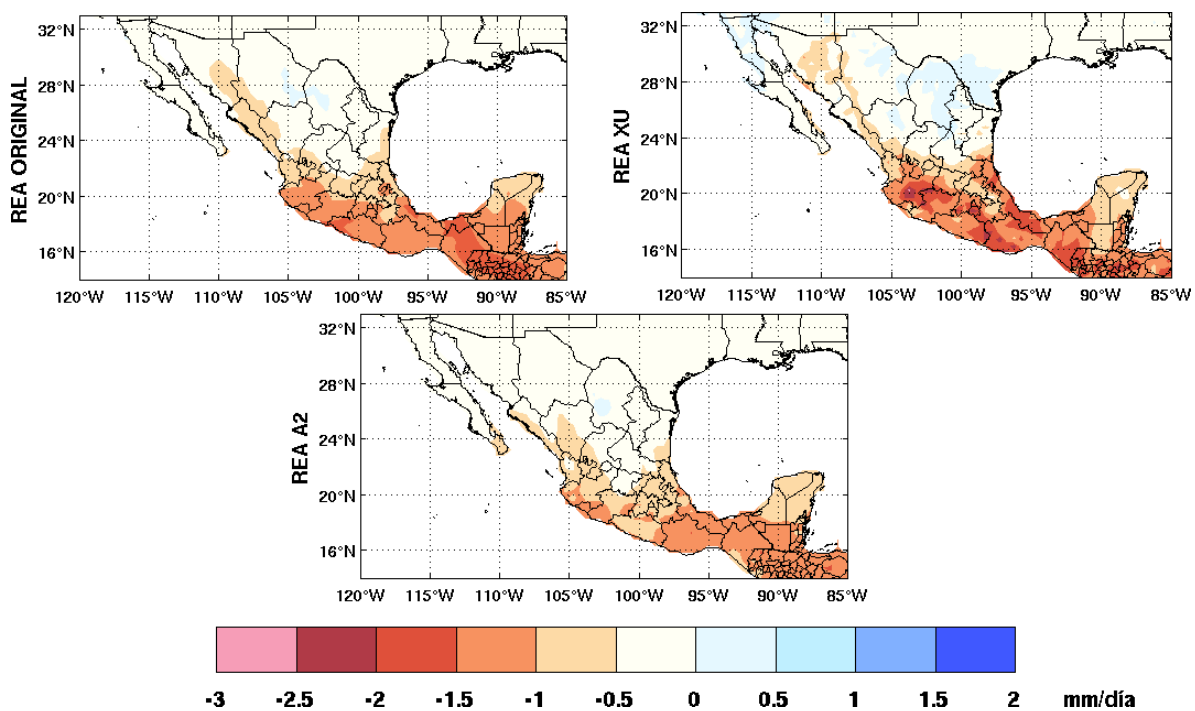


Fig. 18.6. Lo mismo que en la Fig. 18.2 pero para VERANO (precipitación).



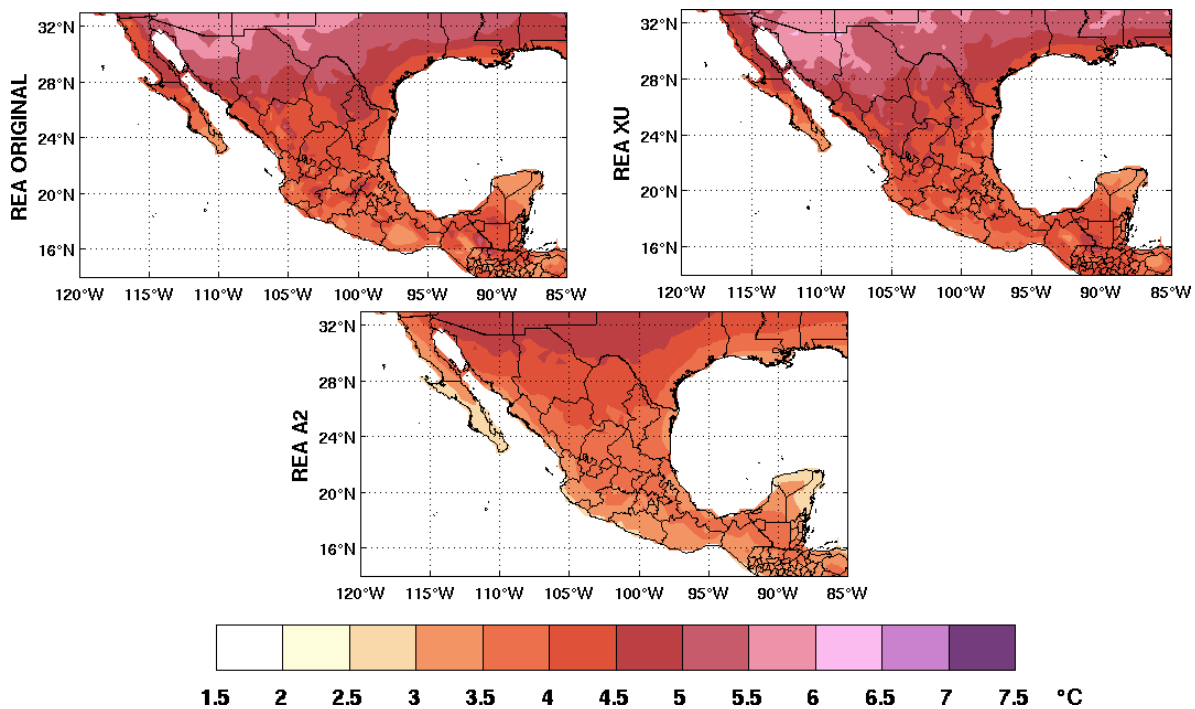


Fig. 18.7. Lo mismo que en la Fig. 18.1 pero para OTOÑO (temperatura de superficie).

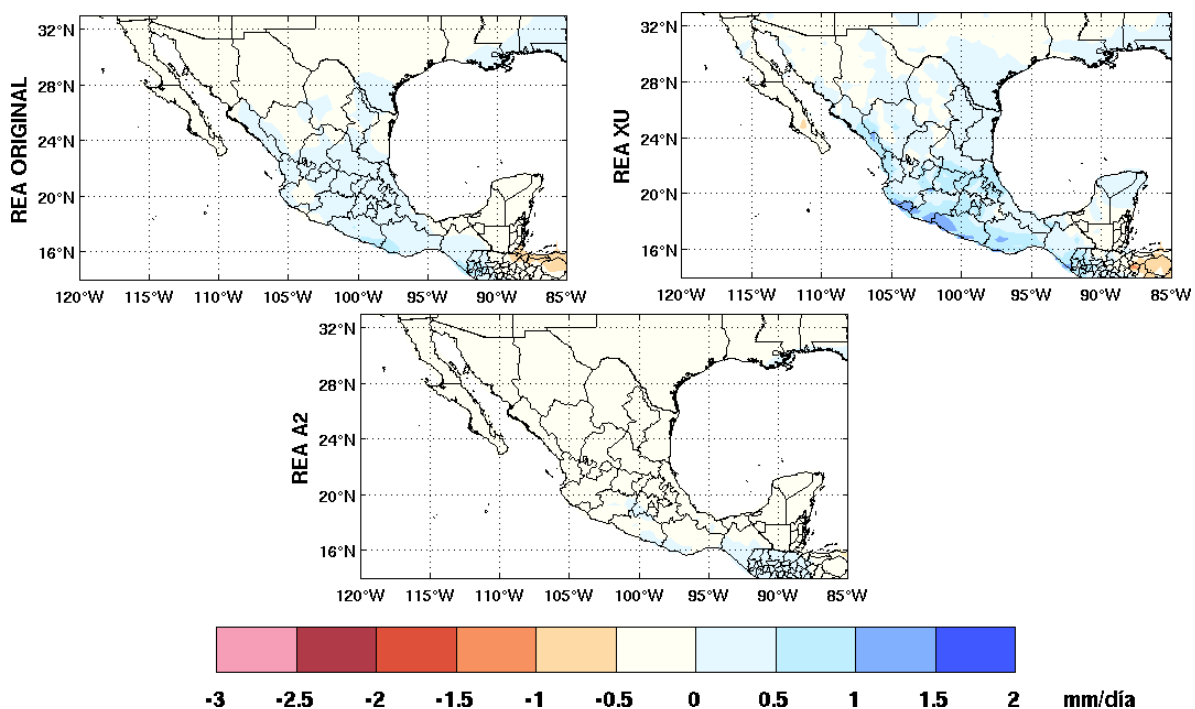


Fig. 18.8. Lo mismo que en la Fig. 18.2 pero para OTOÑO (precipitación).

## 19. Referencias

- Carter, T. R., M. L. Parry, H. Harasawa, and S. Nishioka, 1994: IPCC technical guidelines for assessing climate change impacts and adaptations. University College and Centre for Global Environmental Research Rep. CGER-1015-94, 59 pp.
- Cavazos, T., y Arriaga, S. (2012). Downscaled Climate Change Scenarios for Baja California and the North American Monsoon during the Twenty-First Century. *J. Clim.*, 25, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00425.1.
- Cavazos, T., Salinas, J.A., Martínez, B., Colorado, G., de Grau, P., Prieto, R., Conde, A.C., Quintanar, I., Santana, J.S., Romero, R., Maya, M.E., Rosario de la Cruz, J. G., Ayala, Ma. del R., Carrillo, H., Santiesteban, O., y Bravo, M.E. (2013). Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional, informe final del Proyecto al INECC, 150 pp. Disponible en: <http://escenarios.inecc.gob.mx/index2.htm>
- Christensen, J.H., Carter, T.R., Rummukainen, M., y Amanatidis, G. (2007). Evaluating the performance of regional climate models: the PRUDENCE project. *Clim. Change*, 81,1–6.
- Conde, C., Sánchez, O., y Gay, C. (1994). Escenarios básicos y regionales. Estudio de País: México. En México ante el cambio climático. Primer Taller Estudio de País: México (pp. 39-44). Cuernavaca, Morelos, México.
- Estrada, F., Martínez-López, B., Conde, C., y Gay-García, C. (2012). The new National Climate Change Documents of Mexico: ¿What do the regional climate change scenarios represent? *Clim. Change*, 110: 1029–1046, doi: 10.1007/s10584-011-0100-2.
- Estrada, F., Livezey, R.E., Martínez-López, B., y Gay-García, C. (2013a). Revisiting a flawed downscaling methodology: Comment on Magaña et al. (2012). *Clim. Res.*, 56, 81-90, doi: 10.3354/cr01154.
- Estrada, F., Guerrero, V.M., Gay-García, C., y Martínez-López, B. (2013b). A cautionary note on automated statistical downscaling methods for climate change. *Clim. Change*, 120: 263–276, doi: 10.1007/s10584-013-0791-7.
- Gates, W. L. (1985). The use of general circulation models in the analysis of the ecosystem impacts of climatic change. *Climatic Change*, 7(3), 267-284.
- Giorgi, F. y Mearns, L.O. (1991): Approaches to the simulation of regional climate change: a review. *Rev. Geophys.*, 29, 191-216.
- Giorgi, F., y Francisco, R., (2000). Evaluating uncertainty in the prediction of regional climate change. *Geophys. Res. Lett.*, 27, 1295-1298.
- Giorgi, F., y Mearns, L.O. (2002). Calculation of average, uncertainty range, and reliability of regional climate changes from AOGCM simulations via the Reliability Ensemble Averaging (REA) method. *J. Climate*, 15, pp. 1141-1158.

Giorgi, F., y Mearns, L. O. (2003). Probability of regional climate change based on the Reliability Ensemble Averaging (REA) method. *Geophys. Res. Lett.*, 30(12).

Giorgi, F. (2006). Climate change hot-spots. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L08707, doi:10.1029/2006GL025734.

IPCC (2007). *Climate Change 2007: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by S. Solomon et al., Cambridge Univ. Press, New York.

IPCC, (2010). Meeting Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Expert Meeting on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)].

IPCC, (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

Latif, M., y Barnett, T.P. (1996). Decadal climate variability over the North Pacific and North America: Dynamics and predictability. *J. Clim.*, 9, 2407-2423.

Latif, M., Collins, M., Pohlmann, H., y Keenlyside, N. (2006). A review of predictability studies of Atlantic sector climate on decadal time scales. *J. Clim.*, 19, 5971–5987.

Liverman, D.M., y O'Brien, K.L. (1991). Global warming and climate change in Mexico. *Global Environmental Change*, 1, 351-364, doi:10.1016/0959-3780(91)90002-B.

Magaña, V., Conde, C., Sanchez, O., y Gay, C. (1997). Assessment of current and future regional climate scenarios for Mexico. *Clim. Res.*, 9, 107-114.

Magaña, V.O., Vázquez, J.L., Pérez, J.L., y Pérez, J.B. (2003). Impact of El Niño on precipitation in Mexico, *Geofis. Int.*, 42, 313–330.

Magaña, V.O., Zermeño, D., y Neri, C. (2012). Climate change scenarios and potential impacts on water availability in northern Mexico. *Clim. Res.*, 51, 171–184, doi:10.3354/CR01080.

Maraun, D., Wetterhall, F., Ireson, A.M., Chandler, R.E., Kendon, E.J., Widmann, M., Brienen, S., Rust, H.W., Sauter, T., Themessl, M., Venema, V.K.C., Chun, K.P., Goodess, C.M., Jones R, G., Onof, C., Vrac, M., Thiele-Eich, I. (2010). Precipitation downscaling under climate change: recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Rev. Geophys.*, 48, doi:10.1029/2009rg000314.

Mearns, L.O., Bukovsky, M.S., Pryor, S.C., y Magaña, V. (2014). Downscaling of Climate Information. In G. Ohring (Ed.), *Climate Change in North America* (pp. 201-250), Springer International Publishing Switzerland, doi: 10.1007/978-3-319-03768-4.

Meehl, G.A., Goddard, L., Murphy, J., Stouffer, R.J., Boer, G., Danabasoglu, G., Dixon, K., Giorgetta, M.A., Greene, A., Hawkins, E., Hegerl, G., Karoly, D., Keenlyside, N., Kimoto, M.,

Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático - INECC

Periférico Sur 5000, Col. Insurgentes Cuicuilco, Coyoacán, México D.F.

Kirtman, B., Navarra, A., Pulwarty, R., Smith, D., Stammer, D., Stockdale, T. (2009). Decadal prediction: can it be skillful? *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 90, 1467–1485.

Montero-Martínez, M.J., y Pérez-López, J.L. (2008). Regionalización de proyecciones climáticas en México de precipitación y temperatura en superficie usando el método REA para el siglo XXI. En: Martínez, P., y Aguilar, A. (Eds.), *Efectos del Cambio Climático en los Recursos Hídricos de México*, vol. 2, (pp. 11-21), Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Montero-Martínez, M.J., Martínez-Jiménez, J., Castillo-Pérez, N.I., y Espinoza-Tamarindo, B.E. (2010). Escenarios climáticos en México proyectados para el siglo XXI: precipitación y temperatura máxima y mínima, en *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático*. Eds. P.F. Martínez Austria y C. Patiño Gómez, 162 pp., IMTA, México, pp. 39-63.

Montero-Martínez, M.J., Ojeda-Bustamante, W., Santana-Sepúlveda, J.S., Prieto-González, R., y Lobato-Sánchez, R. (2013). Sistema de consulta de proyecciones regionalizadas de cambio climático para México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 4, 113-128.

Prieto, R., Cortés, V.E., y Montero, M.J. (2011). Variability of the standardized precipitation index over Mexico under the A2 climate change scenario. *Atmósfera*, 24, 243-250.

Stocker, T., Dahe, Q., Plattner, G. K., Tignor, M. & Midgley, P. (2010). IPCC expert meeting on assessing and combining multi model climate projections. Boulder, Colorado, USA 25-27.

Wilby, R. L., & Wigley, T. M. L. (1997). Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations. *Progress in Physical Geography*, 21(4), 530-548.

Wilby, R. (2007). Decadal climate forecasting techniques for adaptation and development planning, 12 October 2007. DFID, London, 54 págs.

Xu, Y., Gao, X., y Giorgi, F. (2010). Upgrades to the reliability ensemble averaging method for producing probabilistic climate-change projections. *Climate Research*, 41(1), 61-81.