



INFORME FINAL
16 de noviembre de 2012

**PARTICIPACIÓN DEL IMTA EN EL DESARROLLO DEL PROYECTO DE
ACTUALIZACIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA MÉXICO
COMO PARTE DE LOS PRODUCTOS DE LA QUINTA COMUNICACIÓN
NACIONAL.**

**Dr. José Antonio Salinas Prieto*.
M.C Gabriela Colorado Ruiz.
Dr. Ricardo Prieto González.
Eugenia Maya Magaña.
José Guadalupe Rosario de La Cruz.
Heriberto Carrillo Tlazazanatza.
María del Rosario Ayala Enríquez.
Maricela Hernández Acevedo.**

Contenido

a. Resumen Ejecutivo.....	3
b. Executive Summary	4
c. Introducción	6
Objetivos de las Etapas	9
e. Alcances y Consideraciones.....	10
f. Metodología.....	11
g. Resultados	17
1. <i>Aplicación del REA</i>	24
1.1 <i>Anomalías espaciales de las proyecciones futuras</i>	31
1.2 Comparación de AR4 con AR5	38
2. Revisión del proyecto NARCCAP.....	42
2.1 Acceso a datos de NARCCAP.....	49
2.2 Evaluación de NARCCAP	50
3. Organización del Taller: Regionalización dinámica de escenarios de cambio climático utilizando el modelo WRF.	59
4. Página WEB de consulta de resultados.....	63
i. Próximos Pasos	86
j. Bibliografía	86
k. Anexo 1: Actividades Detalladas.....	87
Bases de datos utilizados	99

a. Resumen Ejecutivo

Uno de los proyectos que se realizaron como parte de la Quinta Comunicación se refiere a la actualización de escenarios de cambio climático para México a partir de información de los modelos de circulación global (MCG), que será considerada en el Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC).

Instituciones que participan en la Red Mexicana de Modelación del Clima que coordina el INE, llevaron a cabo estudios específicos para evaluar los MCG y producir los nuevos escenarios de cambio climático para México. Las instituciones participantes son: El Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) de la Universidad Nacional Autónoma de México y el Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

En la primera etapa se descargaron las salidas de 15 Modelos de Circulación General (MCG) del Proyecto de Inter-comparación de Modelos Acoplados, fase 5 (CMIP5, por sus siglas en inglés). Se obtuvieron los datos que estaban disponibles de los siglos XX y XXI de por lo menos 8 variables atmosféricas (Tabla 1); para este proyecto, se cortaron tres ventanas temporales para evaluar las proyecciones de cambio climático: un periodo histórico durante el siglo XX y dos periodos futuros del siglo XXI para tres escenarios de emisiones de gases de efecto de invernadero. La obtención de datos fue dividida entre El CICESE, el IMTA y el CCA de acuerdo a los términos de referencia del presente proyecto.

Se descargaron 8 de las siguientes variables atmosféricas superficiales de los MCG para los tres periodos y escenarios de emisiones: temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura promedio, precipitación, presión superficial, humedad relativa, humedad específica y las componentes de viento zonal y meridional. Los periodos considerados son: el histórico de 1961 a 2000 y para los escenarios de emisiones de gases de efecto de invernadero (RCP45, RCP60 y RCP85) dos periodos del siglo XXI, de 2015 a 2039 y de 2075 a 2099. La ventana espacial a analizar es de 0 a 40N y de 140W a 60W. Las salidas de los MCG se interpolaron bilinealmente (usando una rutina de cdo) considerando como base la malla de datos observados de precipitación y temperatura del Climatic Research Unit CRU (50 km X 50 km), de la Universidad de East Anglia.

Para la segunda etapa se analizó el desempeño de los modelos de circulación global (MCG), que serán considerados en el Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) realizado por las instituciones participantes de la Red Mexicana de Modelación del Clima que coordina el INE: CICESE, IMTA y el CCA- UNAM.

En la segunda etapa se aplicó análisis estadísticos (métricas) para evaluar el desempeño de los 15 Modelos de Circulación General (MCG) del Proyecto de Inter-comparación de Modelos Acoplados, fase 5 (CMIP5, por sus siglas en inglés). Se

analizaron las siguientes variables atmosféricas superficiales de los MGC para el período histórico (1961 a 2000): temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura promedio y precipitación, ello comparándolas con las observaciones denominadas CRU. Las métricas aplicadas son: error cuadrático medio, error medio absoluto, desviación estándar y correlación en tiempo. Los análisis se realizaron para cuatro sub regiones representadas en las mallas denominadas: noroeste, noreste, sur y sureste, cubriendo con ello la totalidad de México.

Durante la tercera etapa del proyecto se aplicó una metodología de ensamble ponderado utilizando el método REA (Reliability Ensemble Averaging), estimando con ello el grado de fiabilidad de cada uno de los 15 modelos globales utilizados en este proyecto. Con estos resultados, se realizaron comparaciones de las regionalizaciones utilizando los modelos del Cuarto Reporte de Actividades del IPCC y del Quinto (aplicado en esta tercera etapa), identificando las limitaciones de modelos en la reproducción de procesos físicos que aporten variabilidad al clima regional, identificando posibles errores de modelos en la reproducción de procesos físicos evaluando las formas de reducir la incertidumbre.

En el proceso de ejecución del proyecto se documentaron las lecciones aprendidas, identificando los pasos a seguir en la adquisición y mejora de herramientas de análisis, así como la comprensión de los alcances y limitaciones de los modelos globales.

Se analizó y documentó la metodología aplicada del proyecto NARCCAP, identificando métodos de regionalización, fundamentos y aplicación en Norteamérica para obtener capacidad de reproducción de escenarios regionales y su impacto en México. Se aplicó un diagnóstico del desempeño de las regionalizaciones dinámicas con el modelo WRF mediante las métricas: desviación estándar, error cuadrático medio, error medio absoluto y correlación en tiempo para dos regiones mexicanas.

Se diseñó y generó un portal WEB de resultados. Se elaboró un catálogo de productos, los cuales estarán accesibles a través del portal WEB simplificado a resultados masivos, el cual se instalará en un servidor del INE.

Se participó en reuniones de trabajo, organizadas por el INE para presentar avances y obtener retroalimentación para el desarrollo del proyecto.

Se organizó el taller: Regionalización dinámica de escenarios de cambio climáticos utilizando el modelo WRF, a cargo de los Dres. Robert Oglesby y Clint Rowe, Investigadores de la Universidad de Nebraska-Lincoln, el cual fue ofrecido en las instalaciones del IMTA, con una participación de 20 asistentes.

b. Executive Summary

One of the projects develop as part of the Fifth National Communication refers to the update of climate change scenarios for Mexico based on information of the Global

Circulation Models (GCM), which will be included in the Fifth Assessment Report (AR5) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

The Institutions involved in the Mexican Climate Modeling network (coordinated by INE), will carry out specific activities to evaluate the GCMs and to produce the new climate change scenarios for Mexico. The participating institutions are: the Center for Scientific Research and Higher Education at Ensenada (CICESE), the Mexican Institute of Water Technology (IMTA), the Center for Atmospheric Sciences (CCA) of the National Autonomous University of Mexico, and the National Weather Service (SMN).

In the first stage of the project was to download monthly output from 15 GCMs of the Coupled Model Intercomparison Project phase 5 (CMIP5). The available data of eight atmospheric variables (Table 1) was downloaded for the XX and XXI centuries; for this project, three temporal windows were saved for the assessment of the climate change scenarios: a historical period during the 20th century, and two periods of the 21st century for three emissions scenarios. The data collection was divided between CICESE, IMTA and CCA according to the terms of reference of this project.

The eight surface atmospheric variables downloaded for each of the GCMs and emissions scenarios are: maximum, minimum, and mean temperature, precipitation, surface pressure, relative humidity, specific humidity, and zonal and meridional wind components. The temporal windows to be evaluated are the historical period from 1961 to 2000, and 2015-2039 and 2075-2099 for the climate change scenarios RCP45, RCP60 and RCP85. The geographical window to analyze is from the equator to 40N and from 140W to 60W. The GCM outputs were interpolated on a regular geographical grid with 0.5 degree horizontal resolution using a bilinear interpolation from the cdo routines; this grid matches the observed gridded precipitation and temperature dataset of the Climatic Research Unit (CRU) of the University of East Anglia.

In the second stage we present results derived from the assess of the global circulation models (GCMS) that will be considered in the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) made by the participating institutions of the Mexican Network of climate modeling that coordinates the INE: CICESE, IMTA and CCA- UNAM.

We applied statistical analysis (metrics) to evaluate the performance of the 15 General Circulation Models (GCMS) of the inter-comparison of coupled models, phase 5 (CMIP5, for its acronym in English). The following atmospheric surface variables were analyzed from the historical period (1961 to 2000): maximum temperature, minimum temperature, mean temperature and precipitation, using the CRU data base observations. The metrics applied are: root mean squared error, mean absolute error, standard deviation and correlation in time. The analyzes were performed for four sub-regions represented in the mesh called: northwest, northeast, south and southeast, covering the whole of Mexico.

In the third stage, the method called Reliability Ensemble Averaging (REA) was applied, evaluating the grade of reliability of each of the 15 global models used in this project.

With these results, we made comparisons between the models used in the Fourth Assessment Report (AR4) and the models used in the Fifth Assessment Report (AR5), identifying the models limitations to reproduce the regional climate variability, analyzing possible models errors and evaluating the methods of reduction the uncertainties.

During the execution of the project we documented the learned lessons, identifying the future steps to continue in the acquisition and development of analysis tools, as well as the comprehension of the scopes and limitations of the global models.

It was analyzed and documented the methodology applied in the NARCCAP project, identifying methods of regionalization and fundamentals to obtain capacity of reproduction in Mexico.

There was applied a diagnosis of the performance of the dynamic regionalization with the model WRF using the metric: standard deviation, root mean square error, mean absolute error and time correlation for two Mexican regions.

It was designed and generated a WEB page where a catalog of products can be consulted dynamically, which will be installed in a INE server.

We participated in the meetings organized by INE to present partial results and to obtain feedback for the development of the project.

The workshop: Dynamic regionalization of climatic change scenarios using the model WRF was organized by IMTA and CICESE and was taught by Dr. Robert Oglesby and Clinton Rowe, researchers of the University of Nebraska-Lincoln, which was offered in the IMTA buildings, with 20 assistants.

c. Introducción

El sistema climático terrestre recibe energía solar como forzante primario, la interacción de la atmósfera con los océanos, continentes y hielos polares genera las condiciones climáticas que conocemos, producto de procesos dinámicos (movimientos de masas atmosféricas y oceánicas) y energéticos, como reflexión, absorción y emisión dentro en la atmósfera y el océano. El efecto invernadero en la atmósfera ha permitido adquirir las condiciones propicias para la vida en el planeta desde su formación. Sin la presencia de los gases de invernadero como el vapor de agua y el CO₂, la temperatura media de la superficie terrestre sería significativamente menor y por ende no existirían las condiciones de vida actuales.

El balance energético que se ha mantenido parcialmente en equilibrio durante miles o millones de años podría estar alterándose debido a que la concentración de CO₂ atmosférico ha aumentado rápidamente en las últimas décadas en comparación con los niveles en épocas preindustriales. Una de las alteraciones principales es el incremento de la concentración de “gases de efecto de invernadero” los cuales retienen parte de la

energía saliente de onda larga en la atmósfera, aportando con ello incrementos en la temperatura atmosférica y del sistema climático terrestre en general.

La relación entre clima y sociedad es estrecha, por lo que es importante considerarla en materia de planeación y operación de infraestructura y desarrollo social. El diseño e implementación de políticas públicas sobre cambio climático en México han sido desarrollados por acciones gubernamentales, como los Programas Estatales de Acción ante el Cambio Climático (PEACC), siendo el INE y algunos centros de investigación las dependencias asesoras de los gobiernos estatales, generando escenarios regionales y bases de datos para los estados que los han solicitado. Los PEACC toman en cuenta los escenarios de cambio climático, el desarrollo social y económico y las condiciones ambientales a nivel estatal para poder evaluar los impactos esperados del cambio climático regional y ser capaces de proponer estrategias de adaptación y reducción de la vulnerabilidad actual y futura.

El presente proyecto tiene como objetivo principal participar en la actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional; información que también será de gran utilidad para los PEACCs. La actualización se llevó a cabo con base en la información de los MCG y será considerada para el Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático.

Instituciones que participan en la Red Mexicana de Modelación del Clima que coordina el INE, llevaron a cabo estudios específicos para realizar las actividades y obtener los productos de dicho proyecto. Las instituciones participantes son: El Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) de la Universidad Nacional Autónoma de México y el Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

La actualización de escenarios de cambio climático que se realizó en este proyecto está basada en la información de los modelos de circulación general utilizados en el experimento CMIP5, sin embargo, el análisis del desempeño de estos modelos numéricos es una actividad fundamental para establecer sus alcances y limitaciones de forma sistemática, para el caso de la estimación de las condiciones del clima futuro bajo ciertos escenarios de cambio climático, el desempeño de estos modelos para períodos históricos brinda elementos para establecer las limitaciones de esta herramienta en la reproducción de procesos atmosféricos de impacto sobre México.

Diversas instituciones internacionales han generado modelos de circulación general, el proyecto científico CMIP5 compara 15 de estos modelos para identificar los mecanismos que son o no son reproducidos adecuadamente por estos modelos, analizando la predecibilidad del clima. Las instituciones que participan en la Red Mexicana de Modelación del Clima que coordina el INE: El Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Estas instituciones, en forma coordinada aplicaron las métricas: error cuadrático medio, desviación estándar, correlación en tiempo y error media absoluto tomando como referencia la base de datos observada denominada CRU, ello para analizar el desempeño de los 16 modelos participantes en CMIP5.

En las primeras dos etapas de este proyecto, se evaluó el desempeño de 15 modelos de circulación general (MCG) participantes en el CMIP5 mediante métricas para el período histórico de 1961 a 2000 en las variables: precipitación y temperatura (media, máxima y mínima), comparando los resultados con los datos históricos de la base de datos CRU. De acuerdo a este desempeño, se aplicó para la tercera etapa un ensamble ponderado con el método REA (Reliability Ensemble Averaging), estimando con ello el grado de fiabilidad de cada modelo.

De igual forma que en las etapas anteriores, los resultados serán utilizados por grupos de trabajo cuyas investigaciones contribuirán al desarrollo del conocimiento del estado actual y futuro de la vulnerabilidad de diversos sectores y ecosistemas, así como a la creación de líneas estratégicas para la adaptación al cambio climático en México, los conocimientos y lecciones aprendidas se transmiten mediante talleres organizados por el INE y la página WEB de consulta de resultados, la cual quedará instalada en el INE.

Estas actividades forman parte de la actualización de escenarios de cambio climático para México basada en la información de los MCG y será considerada para el Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático.

La generación de escenarios de cambio climático se ha realizado utilizando diversos modelos globales del Proyecto de Intercomparación de Modelos (CMIP, por sus siglas en inglés), como los de la fase 3 (CMIP3) que se usaron en el Cuarto Reporte del IPCC (AR4) y los de la fase 5 (CMIP5) que se usarán en el Quinto Reporte del IPCC (AR5). En esta última etapa del proyecto se comparó el desempeño de los modelos del CMIP3 y CMIP5 mediante el método REA y se identificaron las mejoras obtenidas.

Los Modelos de Circulación General (MCG) acoplados son herramientas poderosas que toman en cuenta un complejo grupo de procesos, basados en leyes físicas. Con estas herramientas se realizan simulaciones de cambio climático. En el CMIP5 los MCG generaron escenarios con diferentes forzamientos de radiación futura de 4.5 a 8.5 Watts/m² (RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5), con lo cuales se generan proyecciones de cambio climático (Murphy, et al., 2004). El IPCC mediante el CMIP5 publicó simulaciones de MCG de varios institutos internacionales, con los cuales se elaborará parte el AR5. Ante el amplio rango de MCG disponibles los usuarios se enfrentan a la problemática de qué modelo o modelos usar, y el cómo manejar la gran cantidad de información.

Se organizó un taller de regionalización dinámica con el modelo WRF con duración de cuatro días en instalaciones del IMTA, invitando a dos investigadores de la Universidad de Nebraska a ofrecer el estado del arte en el tema.

La ejecución de todas las etapas del proyecto brindó oportunidades de estudiar el estado del arte en temas como actualización de escenarios de cambio climático, dinámica atmosférica local y regional, así como los avances en el desarrollo de modelos globales, y los alcances y limitaciones tanto de la regionalización estadística como dinámica, ya que se revisó el proyecto NARCCAP (Programa de evaluación de cambio climático regional de Norteamérica, por sus siglas en inglés) identificando sus aciertos y sus desventajas.

Objetivos de las Etapas

Etapas 1

Descargar datos de los MCG que correspondieron a cada institución y uniformizar las salidas para usos futuros

Etapas 2

Evaluar el desempeño de los 15 modelos participantes en CMIP5 mediante la aplicación de métricas para el período histórico de 1961 a 2000 en las variables: precipitación, y temperatura media comparando los resultados con la base los datos históricos denominada CRU.

Etapas 3

Calcular un ensamble ponderado de 15 MCG del CMIP5 utilizando el método REA.

Realizar comparaciones de las regionalizaciones utilizando los modelos del Cuarto Reporte de Actividades del IPCC y del Quinto (AR4 y AR5 respectivamente).

Documentar las lecciones aprendidas, identificando los pasos a seguir en la adquisición y mejora de herramientas de análisis, así como la comprensión de los alcances y limitaciones de los modelos globales.

Analizar y documentar la metodología aplicada del proyecto NARCCAP, para obtener capacidad de reproducción de escenarios regionales en México, identificando alcances y limitaciones.

Discutir los índices climáticos a aplicarse y distribuirlos en la página WEB de resultados.

Realizar catálogo de productos distribuibles mediante un portal WEB de consulta dinámica de resultados, el cual se instalará en un servidor del INE.

Participar en reuniones de trabajo, organizadas por el INE para presentar avances y obtener retroalimentación para el desarrollo del proyecto.

Organización del taller: Regionalización dinámica de escenarios de cambio climáticos utilizando el modelo WRF.

e. Alcances y Consideraciones

Las ciencias atmosféricas han desarrollado conocimientos y herramientas de análisis como los MCG, los cuales simulan la dinámica atmosférica global y estiman los posibles cambios del clima en las décadas futuras. Estas herramientas, aplicadas en forma acoplada con modelos de océano, son indispensables en la generación de escenarios climáticos futuros. Los grandes centros de pronóstico del clima mundiales se han coordinado para aportar información y conocimiento sustentado para la mejor toma de decisiones de amplios sectores gubernamentales internacionales, nacionales, estatales y municipales.

Para responder a las interrogantes científicas derivadas del Cuarto Informe del IPCC (2007), bajo el patrocinio del programa de investigación del clima mundial (WCRP, por sus siglas en inglés), se generó el proyecto científico llamado CMIP5 (Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados, fase 5, por sus siglas en inglés), dichos resultados fueron producidos por centros internacionales de modelación del clima y coordinado por CMIP5. Este proyecto realizó un conjunto de experimentos numéricos para estudiar la predecibilidad del clima, explorando los alcances y limitaciones de los modelos para reproducirlo a escalas decadales; se determinaron los factores por los cuales ante forzamientos similares las realizaciones de los modelos produjeron respuestas bastante diferentes, lo que significa que aún hay una gran incertidumbre (Taylor et al., 2011). El CMIP5 aportará algunas respuestas científicas a la problemática del cambio climático y sus resultados se publicarán en el Quinto Informe del IPCC, aproximadamente en el segundo semestre de 2013.

Las salidas de los nuevos modelos del CMIP5 se utilizaron en el presente proyecto para hacer una actualización de la evaluación del impacto del cambio climático en México. En las nuevas simulaciones generadas por los MCG del CMIP5 se cambiaron los escenarios de emisiones B1 (bajas emisiones), A2 (altas emisiones), etc. por los nuevos escenarios RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.0, que se refieren al posible aumento global de energía radiativa en Watts/m²; por ejemplo, RCP8.0 es el escenario más extremo que supone un aumento de 8 W/m² debido al aumento de gases de efecto de invernadero. Para mayor información sobre estos nuevos escenarios de emisiones revisar Moss et al. (2010)

Por otra parte, el Programa Internacional de Evaluación Regional de Cambio Climático en Norteamérica (NARCCAP, por sus siglas en inglés) generó información de escenarios en alta resolución espacial, derivados del CMIP3, con la finalidad de conocer con mayor detalle la incertidumbre de las proyecciones regionales asociadas al cambio climático en Norteamérica. Con dicha información se generaron escenarios de cambio climático y su impacto mediante modelos dinámicos regionales aplicando un conjunto de modelos de circulación atmósfera-océano, los cuales abarcan la mayor parte de Canadá, Estados Unidos y parte de México. Las simulaciones de NARCCAP se aplicaron únicamente al escenario A2, uno de los de mayor emisión, para un período histórico (1971-2000) y uno del siglo XXI (2041-2070).

La información actualizada de los escenarios de cambio climático que se generó en el presente proyecto será un producto para la Quinta Comunicación Nacional que, a partir

del segundo semestre de 2012, será utilizada en evaluaciones de impacto, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático a nivel nacional, local y sectorial. Por otra parte, en este proyecto se fortalecieron las capacidades técnicas nacionales en cuanto al manejo de información para la generación de escenarios, su correcta interpretación y aplicación. Es de suma importancia que los resultados y las proyecciones de cambio climático sean utilizados por otros grupos de trabajo que contribuirán en el concomitamiento del estado actual y futuro de la vulnerabilidad en diversos sistemas y también en la creación de líneas estratégicas para la adaptación que serán retomadas en la Quinta Comunicación Nacional ante la Comunidad Marco de las Naciones Unidas ante el Cambio Climático (CMNUCC).

La evaluación del desempeño de modelos participantes en CMIP5 realizada en la etapa 2 sentó las bases para realizar la regionalización estadística con el método REA, el cual se reportará en la siguiente etapa del proyecto, ya que uno de los criterios a utilizar en REA es el criterio de desempeño, estimando con ello el grado de fiabilidad de cada modelo.

Estos resultados serán utilizados por otros grupos de trabajo que contribuirán en el concomitamiento del estado actual y futuro de la vulnerabilidad en diversos sistemas y también en la creación de líneas estratégicas para la adaptación en México.

En la etapa tres concluyó el proyecto, los resultados relevantes se colocaron en una página WEB, tendrán acceso desde el portal del INE y se sintetizan en una presentación entregada al INE, además de los talleres organizados por el INE en el transcurso del proyecto.

Destacan como lecciones aprendidas la importancia de alcanzar la autosuficiencia en la generación de resultados, como la regionalización dinámica de los escenarios de cambio climático, continuar con la construcción de capacidades tanto individuales como institucionales y la importancia de trabajar en equipos de trabajo con objetivos de mayor alcance y en forma coordinada.

Los resultados de los alcances y limitaciones de los escenarios de cambio climático generados con modelos globales serán utilizados por grupos de trabajo de diversas áreas del conocimiento que aporten elementos de estudios de la vulnerabilidad en diversos sistemas y también en la creación de líneas estratégicas para la adaptación en México.

f. Metodología

El CICESE, el IMTA y el CCA descargaron los datos mensuales de los MCG que les correspondían, de acuerdo a los términos de referencia del proyecto, según su disponibilidad en los diferentes centros globales de datos del CMIP5, como por ejemplo el *British Atmospheric Data Center* (BADC) en Gran Bretaña: <http://badc.nerc.ac.uk/browse/badc/cmip5/data>.

La lista de variables que se descargaron se muestra en la Tabla 1, así como sus nombres y unidades de acuerdo al CMIP5. También se indican los periodos y la ventana espacial que se van a analizar en el proyecto. Todas las variables se cortaron de acuerdo a los periodos y ventana espacial propuestos en la Tabla 1. Se interpolaron bilinealmente a medio grado (aproximadamente 50 km x 50 km) utilizando el paquete de herramientas para manipular datos climáticos “cdo” disponible en <https://code.zmaw.de/projects/cdo/wiki/Cdo#Documentation>. La malla de los datos interpolados es la misma que la de los datos observados del CRU, los cuales serán utilizados en el proceso de verificación/validación de los MCG. Además, se cambió el calendario de “365 días” que tenían varios modelos por el “calendario estándar” para que los archivos también sean transparentes en diferentes plataformas, como GrADS. Por último, se transformaron las unidades de algunas variables para dejarlas en unidades más comunes: (1) la precipitación en kg/m2/s se cambió a mm/día multiplicando las salidas de los modelos por 86,400; (2) la temperatura se cambió de °K a °C, restando 273.15 a los datos originales; y (3) la presión se dividió entre 100 para transformar los Pascales (Pa) a milibares (mb).

Tabla 1. Variables con sus nombres y unidades originales en paréntesis y algunas variables con las nuevas unidades, así como los experimentos y ventana espacial a analizar en el proyecto.

Variables Originales (nombre; unidad)	T _{máx} (tasmax; °K), T _{mín} (tasmin; °K), T _{prom} (tas; °K), Precip (pr; kg/m2/s), P _{sup} (psl; pa), HR _{sup} (hurs; %), HumEsp _{sup} (huss) y U y V _{sup} (was, vas; m/s)		
Variables con nueva unidad	T _{máx} (tasmax; °C), T _{mín} (tasmin; °C), T _{prom} (tas; °C), Precip (pr; mm/d), P _{sup} (psl; mb)		
Experimentos	Histórico	Escenarios Futuros	
Periodos	1961-2000	2015-2039	
		2075-2099	
Ventana Espacial	Lat: 0 a 40 N	Lon: -140 a -60 W	

El desempeño de los modelos se estimó en la etapa dos mediante las métricas: error cuadrático medio, error medio absoluto, desviación estándar y correlación en tiempo, sus expresiones son:

Error cuadrático medio (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(\phi_{sim} - \phi_{obs})^2}{N}}$$

Error medio absoluto (MAE):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\phi_{sim} - \phi_{obs}|$$

Desviación estándar (STD):

$$STD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}}$$

Correlación:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

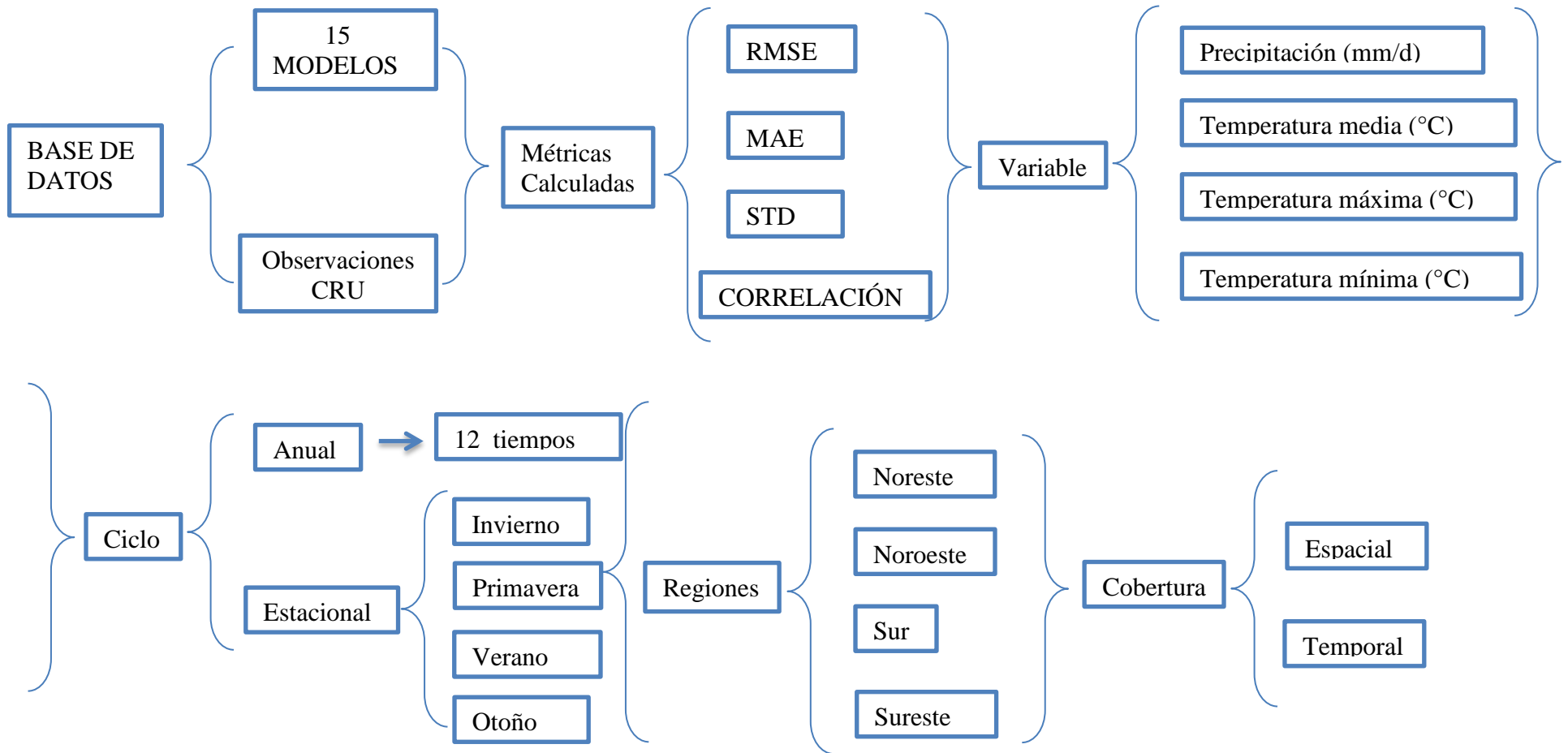
Estas métricas brindan elementos de evaluación a los modelos en tiempo y en espacio. La distribución de esta evaluación por institución se desarrolló según la Tabla 1, donde CICESE evaluó 4 modelos, IMTA 6 modelos y CCA-UNAM 5 modelos.

Tabla 1. Modelos a evaluar el desempeño para el período histórico 1961-2000 por institución.

(a) CICESE		(b) IMTA		(c) CCA-UNAM	
Modelo (MCG)		Modelo (MCG)		Modelo (MCG)	
MIROC-ESM-CHEM		IPSL-CM5a-1r		MPI-ESM-LR	
MRI-CGCM3		CNRM-CM5		GFDL-CM3	
CanESM2		NASA-GISS (GISS-E2-R)		MIROC5	
CSIRO-MK3-6-0		INM		MIROC-ESM	
		NCC-NorESM1			
		BCC-csm1-1		HADGEM2-ES	

El diagrama de flujo de los procesos desarrollados durante esta etapa se muestra en la Tabla 2, los análisis se aplicaron para estimar tanto la reproducción del ciclo anual como del estacional.

Tabla 2. Diagrama de flujo. Cálculo del desempeño de modelos globales para el período histórico 1961-2000.



Para aplicar las métricas mencionadas, la malla de los datos interpolados es la misma que la de los datos observados del CRU (0.5° x 0.5°), las unidades utilizadas son: precipitación en mm/día y temperatura en °C. De éste análisis se deriva un catálogo de resultados gráficos: número de mapas y gráficos unidimensionales:

Mapas con cobertura nacional:

1. Ciclo anual: 16 modelos x 4 métricas x 4 variables x 12 tiempos = 3072 mapas
2. Ciclo estacional: 16 modelos x 4 métricas x 4 variables x 4 estaciones =1024 mapas

Gráficas unidimensionales:

1. Ensamble de 16 modelos x 4 métricas x 4 variable = 16 gráficas espaguetis.

Mapas con cobertura regional:

1. Ciclo anual: 16 modelos x 4 métricas x 4 variables x 12 tiempos x 4 regiones = 12300 mapas
2. Ciclo estacional: 16 modelos x 4 métricas x 4 variables x 4 estaciones x 4 regiones = 4096 mapas

Gráficas unidimensionales:

1. Ensamble de 16 modelos x 4 métricas x 4 variables x 4 regiones=64 gráficas espaguetis.

(REA; ver Tabla 1), para tres escenarios de radiación: RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5. Los MCG fueron previamente recortados para México, utilizándose las variables precipitación, temperatura media, mínima y máxima. El método REA requiere datos observados, para lo cual se utilizó la base de la Unidad de Investigación Climática (CRU) versión TS 3.10, recortada para México.

Tabla 1. Modelos del CMIP5 utilizados para el desarrollo de los escenarios de cambio climático mediante el ensamble ponderado del método REA.

Modelos de Circulación General (MCG)		
1. Max-Plank Institute (MPI-ESM-LR)	6. Beijing Climate Center (BCC-CSM1-1)	12. Met Office Hadley (MOHC)
2. Institute for Numerical Mathematics (INM)	7. Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL-cm5a-Ir)	13. Meteorological Research Institute (MRI-CGCM3)
3. Norwegian Climate Center (NorESM1)	8. NASA Goddard Institute for Space Studies (GISS-E2-R)	14. Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL-CM3)

4. Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis (CanESM2)	9 y 10. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC-esm-chem y MIROC-esm)	15. Australian Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO-MK3-6)
5. Centre National de Recherches Meteorologiques (CNRM-CM5)	11. Atmosphere and Ocean Research Institute (MIROC5)	

El método REA

Este método de ensamble ponderado fue propuesto y desarrollado por Giorgi y Mearns (2001) con el objetivo de dar mayor peso a los MCG que contengan los errores y sesgos más pequeños en comparación con los las variables observadas. Se calculó un ensamble ponderado de la anomalía de los 15 modelos de la Tabla 1, mediante la ecuación 1; por ejemplo para la anomalía de temperatura (ΔT):

$$\overline{\Delta T} = \tilde{A}(\Delta T) = \frac{\sum_i R_i \Delta T_i}{\sum_i R_i} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde R_i es el peso de cada modelo (i) por punto de malla, definido por el producto de dos criterios: el de tendencia ($R_{B,i}$) y el de convergencia ($R_{D,i}$), donde los parámetros m y n pueden ser usados para darle más peso a un criterio que a otro:

$$R_i = \left[(R_{B,i})^m \times (R_{D,i})^n \right]^{1/(m+n)} \quad \text{Ecuación 2}$$

El **criterio de tendencia** se refiere a qué tan diferente es el modelo “i” respecto a los datos observados, en el periodo 1961-2000. Por lo tanto entre menor sea la diferencia de las dos bases de datos, mayor es la confiabilidad de tal modelo. Para lo cual se requiere tener datos históricos de los modelos a utilizar. Este factor se da por la ecuación:

$$R_{B,i} = \left[\frac{\varepsilon}{|B_i|} \right]^m \quad \text{Ecuación 3.}$$

El **criterio de convergencia** es la distancia del modelo “i” respecto al resto de los modelos, es decir, del promedio REA. Este criterio es un método iterativo, en el que, en la primera iteración se toma en cuenta el promedio simple para calcular la distancia $[D_{i1}] = [\Delta T_i - \overline{\Delta T}_i]$, la cual se usa en las ecuaciones 1 y 2. Con lo anterior se recalcula la distancia de cada modelo (iteración 2) con el promedio REA $[D_{i2}] = [\Delta T_i - \overline{\Delta T}_i]$, y así sucesivamente. El proceso iterativo se termina cuando se alcanza el criterio de convergencia (que en este caso se consideró cuando $[D_{in} - D_{in-1}] \leq 0.01$). Entre menor sea la distancia del modelo “i” mayor será el valor de éste criterio.

$$R_{D,i} = \left[\frac{\varepsilon}{|D_i|} \right]^n \quad \text{Ecuación 4.}$$

En las ecuaciones 3 y 4 aparece el parámetro ε , el cual es una medida de la variabilidad natural. Para calcular esta variabilidad se eliminó la tendencia del periodo 1945-2005 y se calculó el promedio móvil de 30 años. Finalmente ε se definió como la diferencia entre el los valores máximos y mínimos de este promedio.

Para estimar el rango de incertidumbre del ensamble promedio del REA, se calculó la raíz cuadrática media de la diferencia de los cambios, dado por:

$$\bar{\delta}_{\Delta T} = \left[\frac{\sum_i R_i \left(\Delta T_i - \overline{\Delta T} \right)^2}{\sum_i R_i} \right]^{1/2}$$

Por lo tanto los límites superior e inferior de la incertidumbre están definidos por:

$$\Delta T_+ = \overline{\Delta T} + \bar{\delta}_{\Delta T}$$

$$\Delta T_- = \overline{\Delta T} - \bar{\delta}_{\Delta T}$$

Se discutieron lo índices climáticos de temperatura y precipitación adecuados para aplicarse a este estudio. CICESE y CCA-UNAM los calcularon y el IMTA recibió estos resultados y los colocó en la página WEB. Los resultados de este análisis se presentan en el informe final integrado de las tres instituciones.

g. Resultados

Algunos MGC tienen varias corridas (runs, por su nombre en inglés; r1, r2, etc. en la Tabla 2) del mismo experimento (histórico o escenario RCP), y diferentes experimentos de escenarios de gases de efecto de invernadero, como se muestra en la Tabla 2. En todos los casos, se descargó la última versión atmosférica a escala mensual disponible de las corridas (“*mon, atmos, Amon, latest*”). El INE solicitó 3 escenarios de gases de efecto de invernadero, el RCP45, RCP60 y RCP85; sin embargo, no siempre estuvieron disponibles los tres escenarios.

En la Tabla 2 se listan los experimentos y corridas disponibles y que se descargaron para los modelos correspondientes al CICESE, IMTA y CCA, respectivamente. Todas las variables se cortaron en tiempo y en espacio, se interpolaron bilinealmente y se

cambiaron las unidades de algunas variables, como lo indica la Tabla 1, y como se describe en la metodología.

Tabla 2. Características de los modelos que va a analizar (a) el CICESE, (b) el IMTA y (c) el CCA-UNAM; las variables son las que se muestran en la Tabla 1.

(a) CICESE

Modelo (MCG)	Experimento	Frecuencia	Corridas	Variables
MIROC-ESM-CHEM	Histórico	Mensual	r1i1p1	Todas
	RCP45, RCP60	Mensual	r1	Todas
MRI-CGCM3	Histórico	Mensual	r1, r2, r3, r4, r5	Todas
	RCP45, RCP85	Mensual	r1	Todas
CanESM2	Histórico	Mensual	r1, r2, r3, r4, r5	Todas
	RCP45, RCP85	Mensual	r1, r2, r3, r4, r5	Todas
CSIRO-MK3-6-0	Histórico	Mensual	r10, r1, r2, r3	Todas
	RCP45	Mensual	r10, r1, r2, r3	Todas

(b) IMTA

Modelo (MCG)	Experimento	Frecuencia	Corridas	Variables
IPSL-CM5a-Ir	Histórico	Mensual	r1, r2, r3, r4, r5	Todas
	RCP45, RCP85	Mensual	r1, r2, r3, r4	Todas
	RCP60	Mensual	r1	Todas
CNRM-CM5	Histórico	Mensual	r1, r2, r3, r4, r5, r6, r7, r8, r9, r10	Todas
	RCP45	Mensual	r1	Todas
	RCP85	Mensual	r1, r2, r4, r6, r10	Todas
NASA-GISS (GISS-E2-R)	Histórico	Mensual	r1, r2, r3, r4, r5, r6	Todas
	RCP45	Mensual	r1, r2, r3, r4, r5	Todas
	RCP60, RCP85	Mensual	r1	Todas
INM	Histórico	Mensual	r1	Todas
	RCP45, RCP85	Mensual	r1	Todas
NCC-NorESMI	Histórico	Mensual	r1, r2, r3	Todas
	RCP45, RCP60, RCP85	Mensual	r1	Todas
BCC-csm1-1	Histórico	Mensual	r1, r2, r3	Todas
	RCP45, RCP60, RCP85	Mensual	r1	Todas

(c) CCA-UNAM

Modelo (MCG)	Experimento	Frecuencia	Corridas	Variables
MPI-ESM-LR	Histórico	Mensual	r1, r2, r3	Todas
	RCP26, RCP45, RCP85	Mensual	r1, r2, r3	Todas
GFDL-CM3	Histórico	Mensual	r1	Todas
	RCP26, RCP60, RCP85	Mensual	r1	Todas
MIROC5	Histórico	Mensual	r1	Todas
	RCP26, RCP45, RCP60, RCP85	Mensual	r1	Todas
MIROC-ESM	Histórico	Mensual	r1	Todas
	RCP26, RCP45, RCP60, RCP85	Mensual	r1	Todas
HADGEM2-ES	Histórico	Mensual	r1	Todas
	RCP26, RCP45	Mensual	r1	Todas
	RCP60	Mensual	r1, r2, r3, r4	Todas
	RCP85	Mensual	r2	Todas

Dada la gran cantidad de resultados obtenidos en las etapas, se presenta una síntesis de lo identificado como relevante, la totalidad de resultados se encuentran en formato digital y se hace la entrega al INE. Una forma de evaluación de los modelos es la reproducción de patrones espaciales anual media del período histórico 1961 a 2000, para ello se calculó el ensamble de los 6 modelos que evaluó el IMTA (Fig. 1) tanto para la precipitación como la temperatura media. Estas variables también se promediaron para los datos del CRU, los cuales sólo se registran sobre continente, donde se observa que anualmente se registra mayor precipitación en la zona tropical, esto es, al sur de 20°N hasta el Ecuador, siendo

claro el efecto orográfico tanto de la sierra madre oriental como de la occidental (Fig. 1 panel superior izquierdo), la mayor precipitación se registra en la cuenca del Golfo de México, donde se acumulan los efectos tanto de eventos tropicales como ondas del este, huracanes y sistemas convectivos de mesoescala, así como extra tropicales como frentes fríos y el estado de Chiapas, donde los efectos tropicales son mayoritarios y resaltados por su abrupta orografía. En general, el ensamble de los 6 modelos subestima la precipitación en todas las regiones respecto a las observaciones (Fig. 1 panel inferior izquierdo), no obstante reproduce adecuadamente la zona de convergencia intertropical y el efecto orográfico, siendo cualitativa la reproducción de la distribución de precipitación, no así cuantitativamente, ya que los efectos acumulados de la alta incidencia de eventos meteorológicos no están bien representados en la ecuaciones que integran numéricamente estos modelos.

Para el caso de la temperatura superficial, las observaciones de CRU describen una distribución espacial que es influenciada tanto por la latitud, esto es, en latitudes mayores (EU), la temperatura es menor, así como por efectos orográficos, siendo las zonas elevadas donde la temperatura es menor (Fig. 1 panel superior derecho). Por otra parte, el ensamble de los modelos muestra claramente un gradiente meridional (de sur a norte) de la temperatura superficial, reproduciendo también el efecto del continente americano, sobre todo en la porción correspondiente a México (de 10°N a 31°N). En estados como Chihuahua, norte de Durango y de Zacatecas se observan las temperaturas medias menores del país, como en el caso de la precipitación, a excepción de la península de Yucatán, la temperatura media superficial es subestimada por los modelos. En general, los modelos reproducen los efectos tanto de latitud como de altitud, aunque subestiman ambas variables. La forma de estimar cuantitativamente el desempeño de los modelos es mediante las métricas.

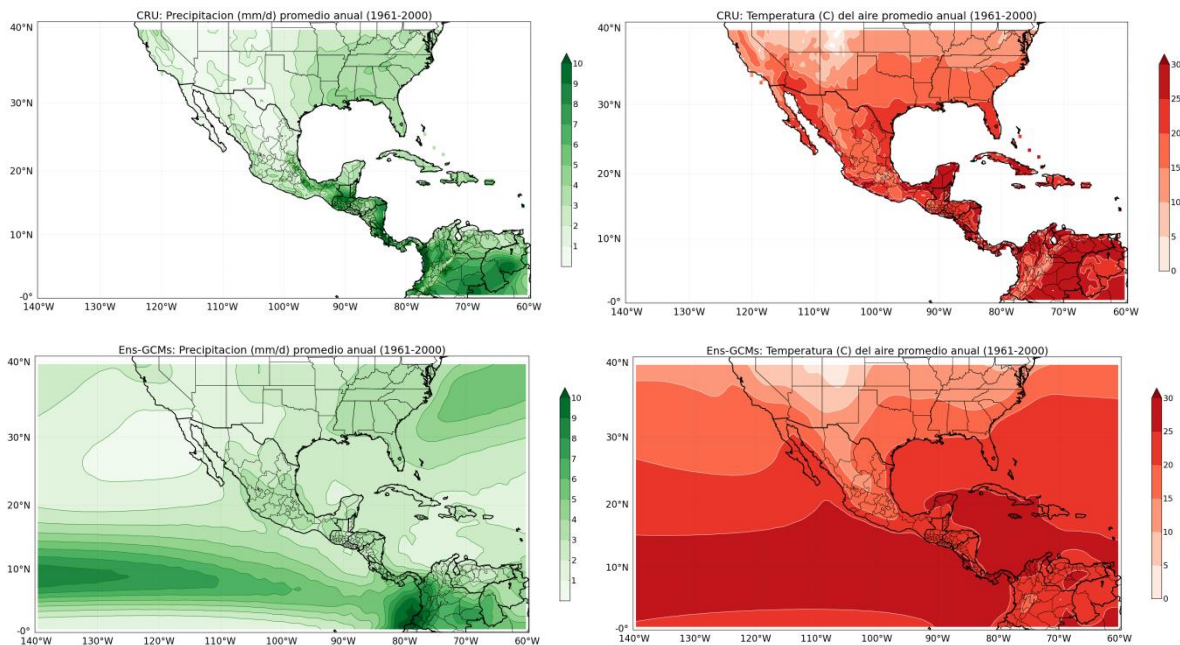


Figura 1. Precipitación media del período histórico 1961 a 2000 (paneles derechos) y temperatura superficial para el mismo período (paneles izquierdos). Las observaciones

corresponden a los paneles superiores y los ensambles de modelos a los inferiores.

Por la ubicación geográfica y abrupta orografía de México, las porciones sur y sureste son afectadas por eventos atmosféricos tropicales durante el verano y el otoño, mientras que las porciones noreste y noroeste por eventos atmosféricos extra tropicales durante el invierno y finalmente, la vertiente del Golfo de México tanto en invierno como en verano y otoño. Considerando lo anterior, la evaluación del desempeño de los modelos se dividió en 4 zonas geográficas: región noroeste, noreste, sur y sureste (Fig. 2). En el presente reporte, como ejemplo se analizan dos zonas contrastantes, la región noroeste, para captar parte de la señal del monzón y procesos de altas latitudes y la región sureste, la cual es afectada por diversos fenómenos tropicales, como las ondas del este y huracanes.

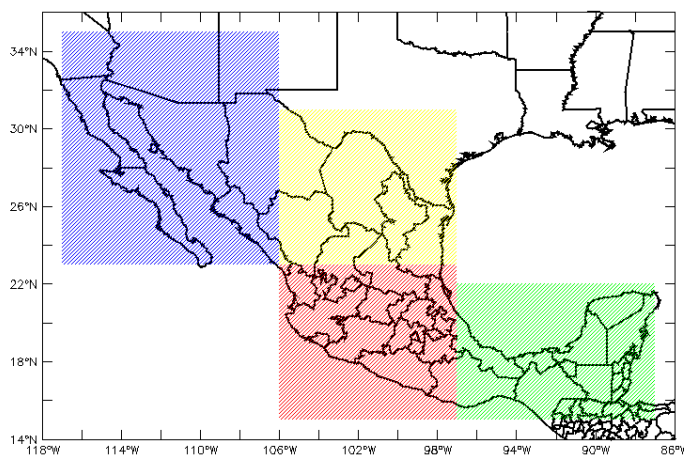


Figura 2. Regiones a usar para realizar comparaciones entre modelos y modelos con observaciones (CRU).

Región Noroeste

El ciclo anual de la precipitación para el período histórico tanto de los modelos como de las observaciones (CRU) se muestra en la Fig. 3a, donde su distribución temporal alcanza un único máximo entre julio y agosto, como ocurre en el ciclo anual del monzón, este patrón temporal es reproducido mejor por el modelo IPSL-CM5A-LR (Institut Pierre Simon Laplace de Francia), no obstante sobre estima la precipitación en la región. El resto de los modelos reproducen los máximos en meses diferentes a los observados, este desempeño se cuantifica en la desviación estándar y la correlación en tiempo, mostrados en el siguiente grupo de gráficas (diagramas de Taylor). El ensamble registra el máximo en septiembre, ya que la mayoría de los modelos no reproducen el máximo en los meses de julio a agosto. Para el caso de la temperatura, todos los modelos reproducen un máximo único entre mayo y septiembre, en concordancia con las observaciones, con un mínimo de dispersión entre todos ellos (Fig. 3b).

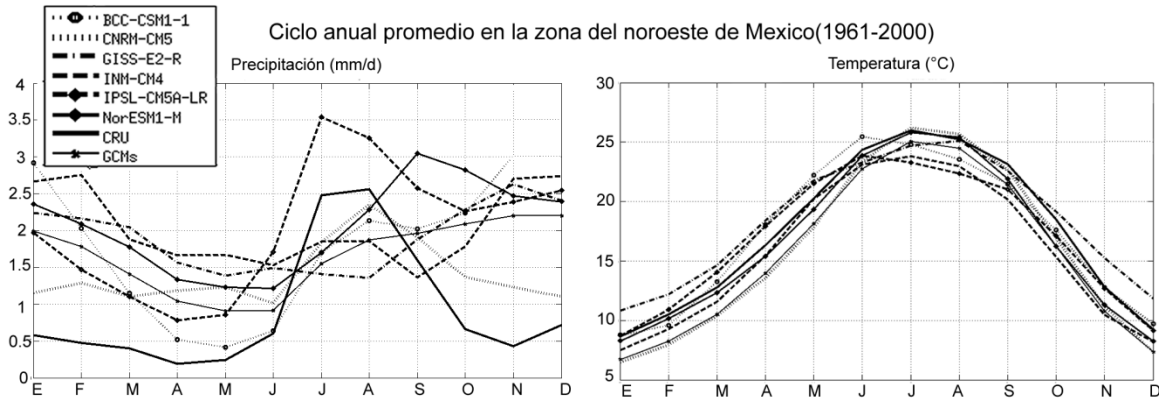


Figura 3. Ciclo anual de (a) precipitación y (b) temperatura de la región noroeste.

Para complementar el análisis del ciclo anual de la Fig. 3 se utilizó una representación gráfica llamada diagrama de Taylor, el cual compara los modelos con las observaciones, del CRU. En los ejes “x” e “y” se coloca la desviación estándar de las observaciones, la línea roja la representa (Fig. 4). En el eje curvilíneo se muestra la correlación, que varía de 0 (parte superior izquierda) a 1 (parte inferior derecha), es de esperarse que el modelo se localice más cercano al eje x es el que tiene mayor correlación con los datos del CRU, mientras que el modelo con menor correlación se encontrara más cerca del eje y, el CRU se encuentra cerca del eje x, lo que indica que mantiene correlación 1 consigo mismo. El diagrama de Taylor para la región del noroeste del ciclo anual para la precipitación se observa en la Fig. 4a, así como la temperatura superficial en la Fig. 4b. Como se observó en la Fig. 3b, los modelos tienen una mayor similitud con el CRU en la temperatura que con la precipitación, ello debido a que esta última variable es parametrizada en los modelos mediante esquemas empíricos y es generada por procesos físicos que no están adecuadamente representados en los modelos. Así, para el caso de la precipitación todos los modelos presentan correlaciones menores a 0.4, el modelo con mayor correlación es el CNRM, aunque con una variabilidad menor que la malla del CRU, seguido por el modelo IPSL a pesar de que éste tiende a sobre estimar la precipitación principalmente en invierno (Fig. 3). El modelo con menor correlación (cercana a 0) es el GISS E2-R, de la NASA.

Para el caso de la temperatura en general se observa una buena correlación entre los modelos y el CRU (mayor de 0.95), es concordancia con la Fig. 3b, los modelos con mayor correlación son el CNRM-CM5 y el IPSL-CM5A-LR, aunque el modelo NorESM-M también posee una alta correlación y una desviación estándar similar a los datos del CRU. En la Fig. 3 se observa que este último modelo es casi idéntico a los datos del CRU excepto en otoño e invierno donde describe temperaturas menores a las observaciones CRU.

Se destaca que el modelo GISS-E2-R en la variable precipitación posee la menor correlación con las observaciones, no obstante en la temperatura presenta buena correlación con el CRU, aunque con menor variabilidad.

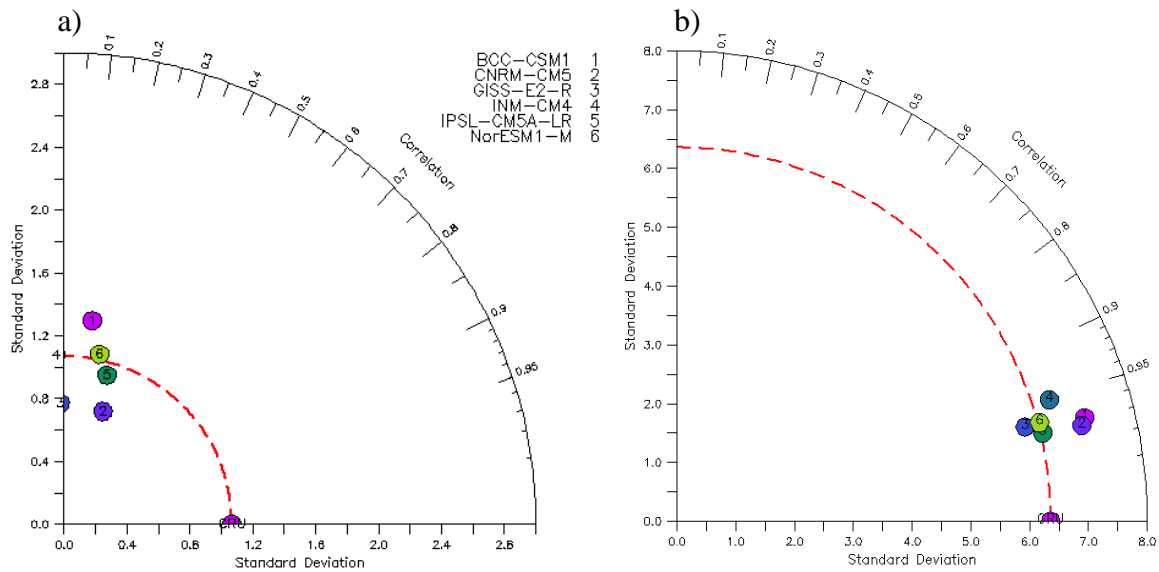


Figura 4. Diagrama de Taylor para la región noroeste de las variables a) precipitación y b) temperatura para los seis modelos evaluados por el IMTA.

Región sureste.

En esta región, el ciclo anual de la precipitación para el período histórico tanto de los modelos como de las observaciones (CRU) se sintetiza en la Fig. 5a, donde su característica principal es una distribución bimodal, esto es, posee dos valores máximos relativos, el primero en junio y el segundo en septiembre, con un mínimo relativo en agosto, conocido como la sequía intraestival. Esta distribución bimodal es reproducida por los modelos BCC-CSM1 y CNRM5-CM5, sin embargo estos modelos subestiman la precipitación en la región. El modelo GISS-E2-R cuantitativamente reproduce la precipitación observada, no obstante no presenta la distribución bimodal mencionada. Por otra parte, tanto el ensamble como el modelo INM-CM4 minimizan estos máximos, manteniendo el valor mínimo de la sequía intraestival, mientras que los modelos IPSL-CM5A-LR y NorESM1-M, no reproducen ni cualitativa ni cuantitativamente la precipitación, suavizando el ciclo anual observándose únicamente un máximo relativo. Es de resaltar los contrastes del desempeño del modelo IPSL-CM5A-LR en la región noroeste vs, la región sureste, mientras que en el primer caso (región del monzón) es el que mejor reproduce la distribución temporal, en la región sureste es el de peor desempeño cuantitativa y cualitativamente, lo que nos hace reflexionar la importancia de regionalizar la evaluación del desempeño en un país como México, con tanta variabilidad espacial y temporal asociada a procesos físicos de origen y escalas diversas. Para el caso de la temperatura, en la región sureste se observa también una distribución bimodal, pero con máximos relativos en mayo (antes de la temporada de precipitación en la región) y en septiembre (Fig. 5b), la cual puede estar asociada a la distribución temporal de precipitación descrita en la Fig. 5a mediante el siguiente mecanismo: cuando se incrementa la precipitación en el sureste, esto es, de mayo a junio, la nubosidad persistente en esta época del año inhibe la llegada de radiación a la superficie, disminuyendo con ello la temperatura media superficial (de mayo a julio: Fig. 5b), en septiembre, al alcanzar el segundo máximo en precipitación contribuye a la disminución

de temperatura nuevamente, esta vez asociado al ciclo anual cuando de octubre a enero continúa la disminución de temperatura por la estación de invierno (llegada de frentes fríos a la región). A diferencia de la distribución de temperatura para la región noroeste (con mínima dispersión), en el sureste existe una gran dispersión entre los modelos, posiblemente por la diversidad de eventos que afectan la región como frentes fríos, ondas del este y huracanes.

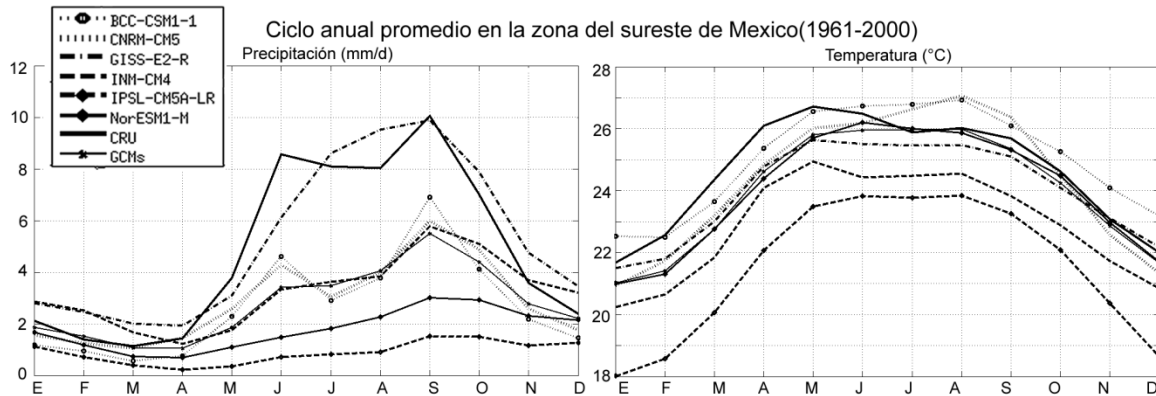


Figura 5. Igual que la figura 3, pero para el sureste.

En el diagrama de Taylor para la precipitación y temperatura de la región sureste (Fig. 6), se refleja la mayor dispersión entre modelos discutida en el párrafo anterior, esto tanto en la temperatura como en precipitación, siendo mayor en ésta última variable. Respecto a la precipitación (Fig. 6a) en la región sureste, las correlaciones entre los modelos y el CRU son mayores que en la región noroeste (de 0.7 a 0.3). El modelo que mayor correlación posee, no obstante menor variabilidad, similar al CRU es el GISS-E2-R. Esto en contraste a lo estimado para la región noroeste, donde este modelo posee una correlación cercana a cero. El segundo modelo mejor correlacionado con CRU es el CNRM-CM5 aunque con una variabilidad menor que los datos observados, que si lo complementamos con la figura 5 se observa que este tiende a subestimar la precipitación en general aunque también detecta la sequía intraestival.

Los modelos con menor correlación y con una muy baja variabilidad en el ciclo anual son el IPSL-CM5A-LR y el NorESM1-M. En el caso de la temperatura (Fig. 6b) el NorESM1-M, nuevamente tiene una buena correlación con los datos del CRU y con una variabilidad similar al CRU, aunque en el invierno y primavera tiende a simular temperaturas menores que lo observado (Fig. 5). Es importante destacar que aunque el modelo IPSL-CM5A-LR tiene una buena correlación (0.85) con el CRU, su variabilidad es considerablemente mayor que éstos, por lo que en este caso es el modelo con desempeño insatisfactorio para esta zona, ya que tiende a subestimar durante todo el ciclo anual la temperatura hasta cerca de 4°C en invierno (Fig. 5).

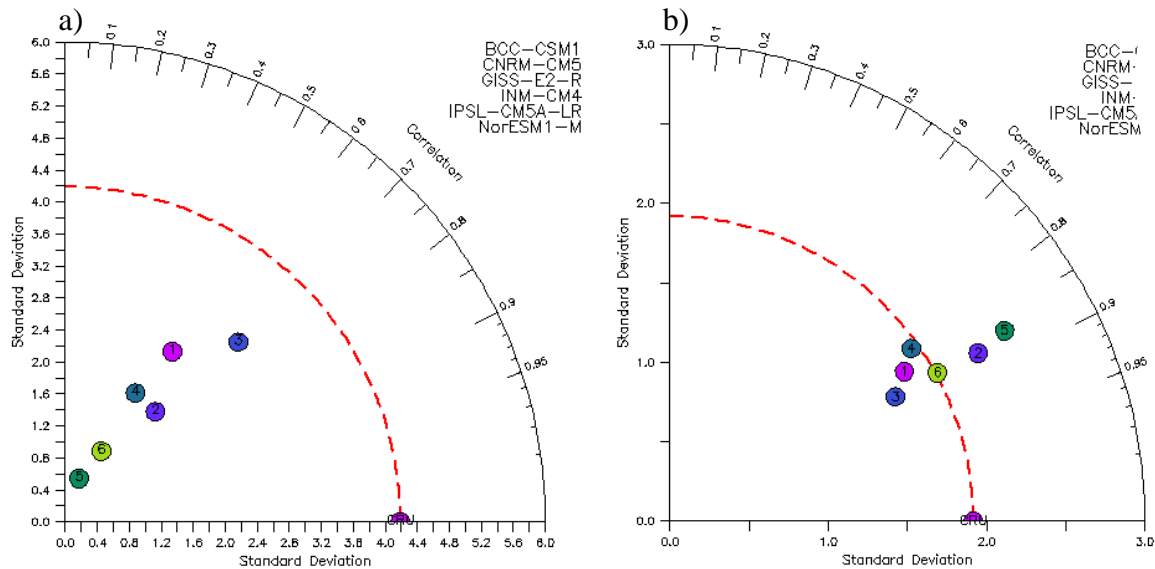


Figura 6. Igual que la figura 4 pero para la región sureste.

El cálculo de errores (diferencias con las observaciones) se sintetiza mediante el error medio absoluto, el cual es promediado espacialmente por región para cada modelo (Tabla 3). En general, para precipitación, los 6 modelos tienen su mejor desempeño en las regiones noroeste y noreste (transición trópico-extratropical), mientras que para sur y sureste este desempeño disminuye, siendo menos capaces de reproducir la precipitación tropical de México. En el caso de la temperatura se invierte este índice de desempeño: para la malla del noroeste el desempeño es menor que para el sureste, con valores intermedios para la malla del sur.

Tabla 3 Error medio absoluto (MAE) de los modelos evaluados por el IMTA y su ensamble para las cuatro regiones.

Modelo	Precipitación anual (mm/d)				Temperatura anual (°C)			
	Noroeste	Noreste	Centro/Sur	Sureste	Noroeste	Noreste	Centro/Sur	Sureste
Ens_GCMs	1.0	1.3	1.6	2.4	2.8	3.1	2.8	1.8
BCC-CSM1-1	1.2	2.2	2.9	2.6	3.0	3.1	2.7	1.8
CNRM-CM5	0.6	1.0	1.6	2.5	2.5	3.0	3.3	1.6
GISS-E2-R	1.5	1.3	1.9	2.3	2.3	2.2	2.1	0.2
INM-CM4	0.9	1.3	1.9	2.5	4.6	4.4	4.1	2.7
IPSL-CM5A	1.0	1.2	2.1	4.0	3.2	3.2	2.6	2.0
NorESM1-M	1.3	1.9	2.2	3.4	2.5	3.3	3.4	2.0

1. Aplicación del REA

Dada la incertidumbre asociada a los modelos globales, no es recomendable utilizar únicamente uno de ellos para estudios de impacto regional, por ello Giorgi y Mearns

(2001) recomiendan para generar las proyecciones utilizar información colectiva de un ensamble de simulaciones de MCG, esto para minimizar los errores individuales. Por ejemplo, en el AR4 del IPCC (2007) se utilizó el promedio aritmético de los modelos, el cual le asigna el mismo peso a todos, incluso aquellos que tienen un desempeño bajo en la región de interés, considerando el desempeño diferenciado por región de cada modelo. En el IPCC (2007) se documenta que este método ayuda a cancelar algunos errores. Sin embargo, Giorgi y Mearns (2001) consideran que es mejor darle un peso ponderado a los modelos. Por lo tanto, en este proyecto se calculó el promedio ponderado utilizando el método de “Fiabilidad del Ensamble ponderado” (REA, por sus siglas en inglés) desarrollado por Giorgi y Mearns (2001), en el cual se le asigna un peso a cada modelo con base a dos criterios, 1) de tendencia (diferencia con las observaciones) y 2) de convergencia (diferencia entre simulaciones).

Para validar los resultados del REA, se utilizaron la base del CRU y el promedio simple (PS) de los 15 MCG en la climatología de 1961-2000. Dada la gran variabilidad espacial en México, para facilitar dicha comparación se calcularon promedios sobre 4 grandes regiones de México: noroeste (NO), noreste (NE), sureste (SE) y sur (s). Para este reporte se seleccionaron dos regiones sur y noreste (en rojo y azul de la Figura 2). Esta validación se hizo con las variables de precipitación, temperatura media, mínima y máxima.

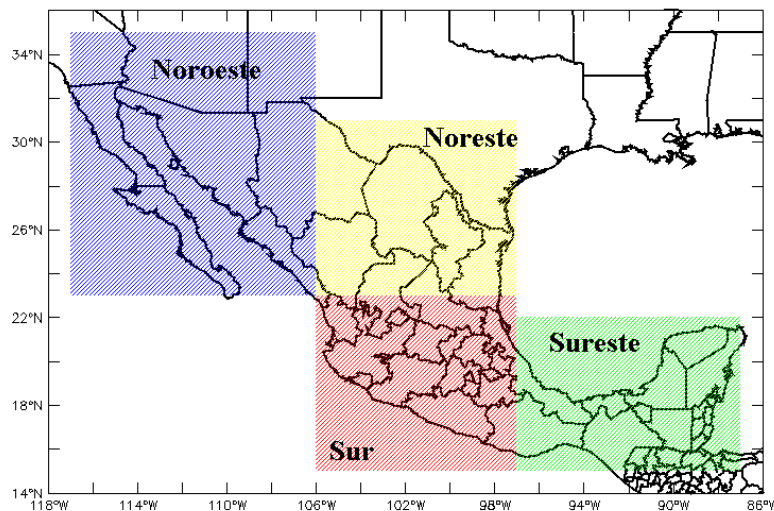


Figura 2. Zonas consideradas para la validación del REA. En amarillo región noreste y en verde región sur.

En la Figura 3 se muestra la climatología de 1961-2000 para la región noreste y las 4 variables consideradas. En el caso de **precipitación**, se observa que el REA (línea negra) es considerablemente mejor que el PS (línea roja) comparado con el CRU (línea azul), a lo largo de todo el ciclo. Sin embargo, en invierno el REA simula valores hasta 0.5 mm/d más que el CRU, mientras que en verano no observa la sequía intraestival. No obstante sus valores son muy cercanos al CRU en los meses de abril, mayo, junio, agosto, septiembre y octubre. Las líneas negras perpendiculares dan la incertidumbre del REA, la

cual para la precipitación en invierno es menor que en verano, donde la incertidumbre en julio es hasta de ± 0.7 mm/d.

Respecto a la **temperatura media** tanto el promedio simple como el REA tienen una muy buena correlación con el CRU. Sin embargo los valores del REA son más cercanos a los arrojados por el CRU, aunque ligeramente más cálidas. Un comportamiento semejante se presenta en la **Temperatura máxima**, siendo nuevamente el REA el más cercano al CRU. En el caso de la **temperatura mínima** ambos promedios son casi idénticos a los valores del CRU. En las tres temperaturas la incertidumbre del REA es ligeramente mayor (± 2 , ± 4 y $\pm 3^\circ\text{C}$ respectivamente) en invierno que en verano.

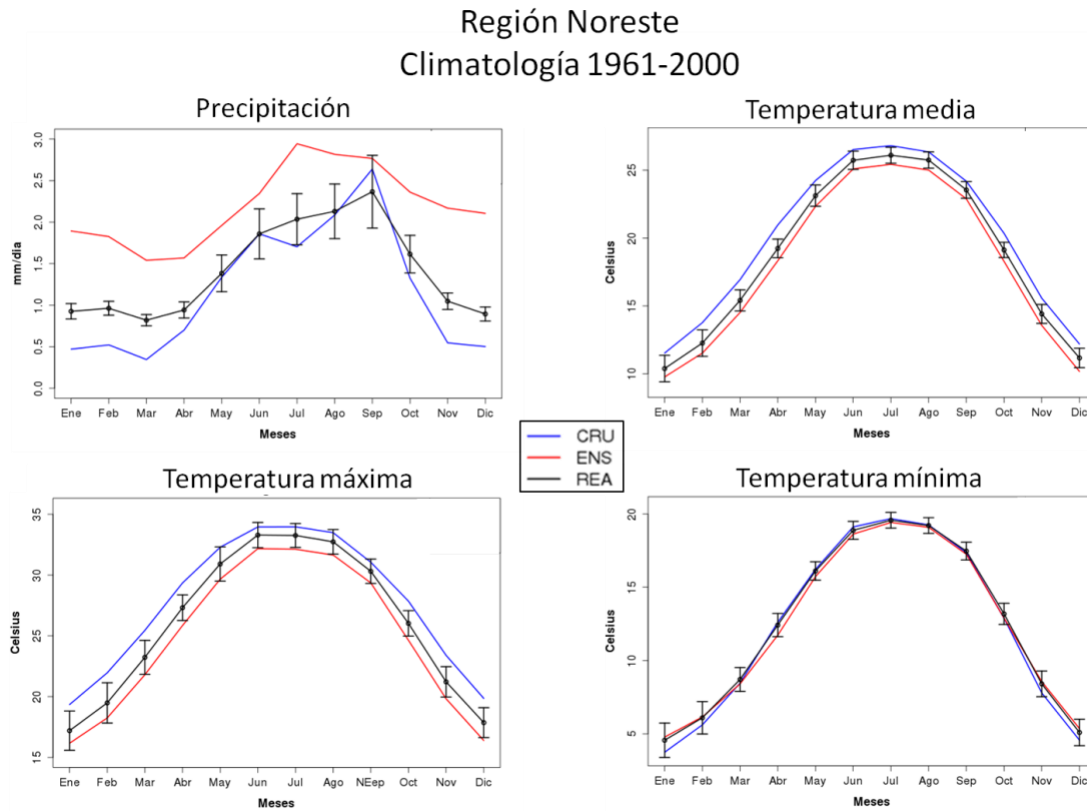


Figura 3. Región noreste de México para las variables de precipitación, temperatura media, mínima y máxima.

Después de analizar el ciclo anual en la región noreste, para obtener mayor información se calcularon promedios anuales tanto para el REA como para el CRU, en el periodo histórico 1961-2000 y en las proyecciones futuras (2015-2039 y 2075-2099) para los tres RCPs (Figura 4). Donde se observa que en el caso de la **precipitación** la variabilidad interanual del REA es menor que la del CRU, no obstante la reproduce razonablemente bien, ya que el REA proviene de un promedio de MCG y por ello no se espera que sean idénticas. En las proyecciones futuras para el periodo 2015-2039 la precipitación decrece en promedio (de los tres escenarios, ya que son muy parecidos) 0.2 mm/d promedio anual. Mientras que en el periodo de

2075-2099 hay más discrepancias entre los escenarios, siendo el más “drástico” el RCP8.5, con una disminución promedio de la precipitación de 0.3 mm/d, promedio anual. Mientras que el RCP45 simula valores muy semejantes que el anterior. En la siguiente sección se muestra una discusión a detalle.

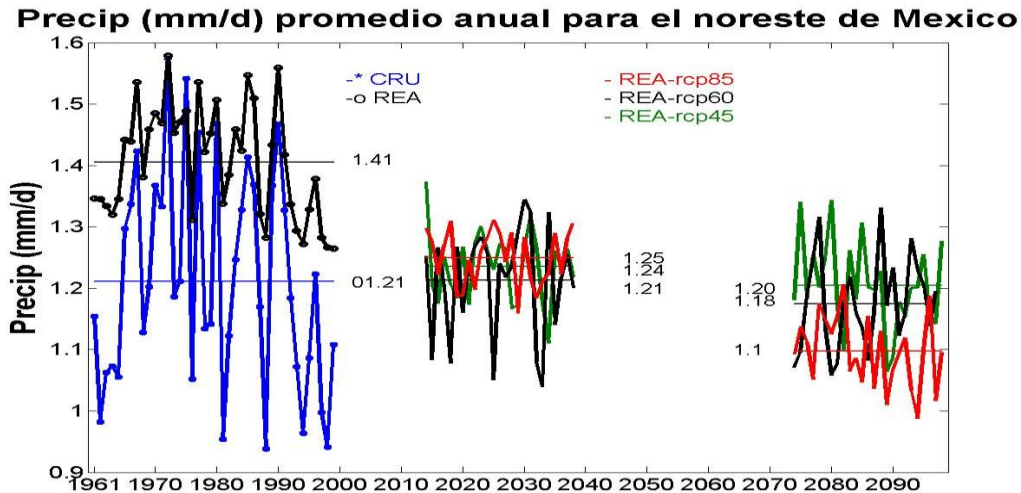


Figura 4. Promedios anuales de precipitación para la región noreste de México del CRU y del REA durante el periodo observado (1961-2000) y las proyecciones futuras bajo 3 escenarios de emisiones (RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5) para los periodos 2015-2039 y 2075-2099.

En el caso de la **temperatura máxima**, a pesar de que en el ciclo anual el REA es similar al del CRU, en la variabilidad interanual cuantitativamente el REA es 1.5°C en promedio más frío que CRU en el periodo histórico (Figura 5a). En cuanto a las proyecciones futuras para el periodo 2015-2039, todos los escenarios de RCPs son similares, con una tendencia a incrementarse esta variable cerca de 1 °C. En el caso del periodo 2075-2099 la discrepancia entre los escenarios es mayor, siendo el más drástico el RCP8.5, proyectando un incremento de la temperatura promedio anual de 3.5°C y además con una tendencia marcada a que siga este comportamiento. En cambio el escenario menos drástico es el RCP4.5 con una proyección de +1.5°C, además sin tendencia a que continúe este incremento.

La correlación entre la variabilidad anual del CRU y el REA para la temperatura mínima es alta, simulando el REA tan solo 0.4 °C en promedio más (5b), como era previsible al observar el comportamiento de estas bases de datos en su ciclo anual. En las proyecciones futuras cercanas, al igual que con las variables anteriores los tres escenarios son similares, mostrando una clara tendencia a incrementarse la temperatura mínima. Mientras que en el futuro lejano (2075-2099) ya se observa una separación entre las proyecciones de cada escenario, siendo el más extremo el RCP8.5, con un incremento de casi 5°C para la temperatura mínima y además que seguirá con esta tendencia. Mientras que los escenarios RCP6.0 y RCP4.5 aunque sí proyectan un incremento de aproximadamente de 3 a 4°C, muestran una tendencia a que se quedará oscilando alrededor de ese valor.

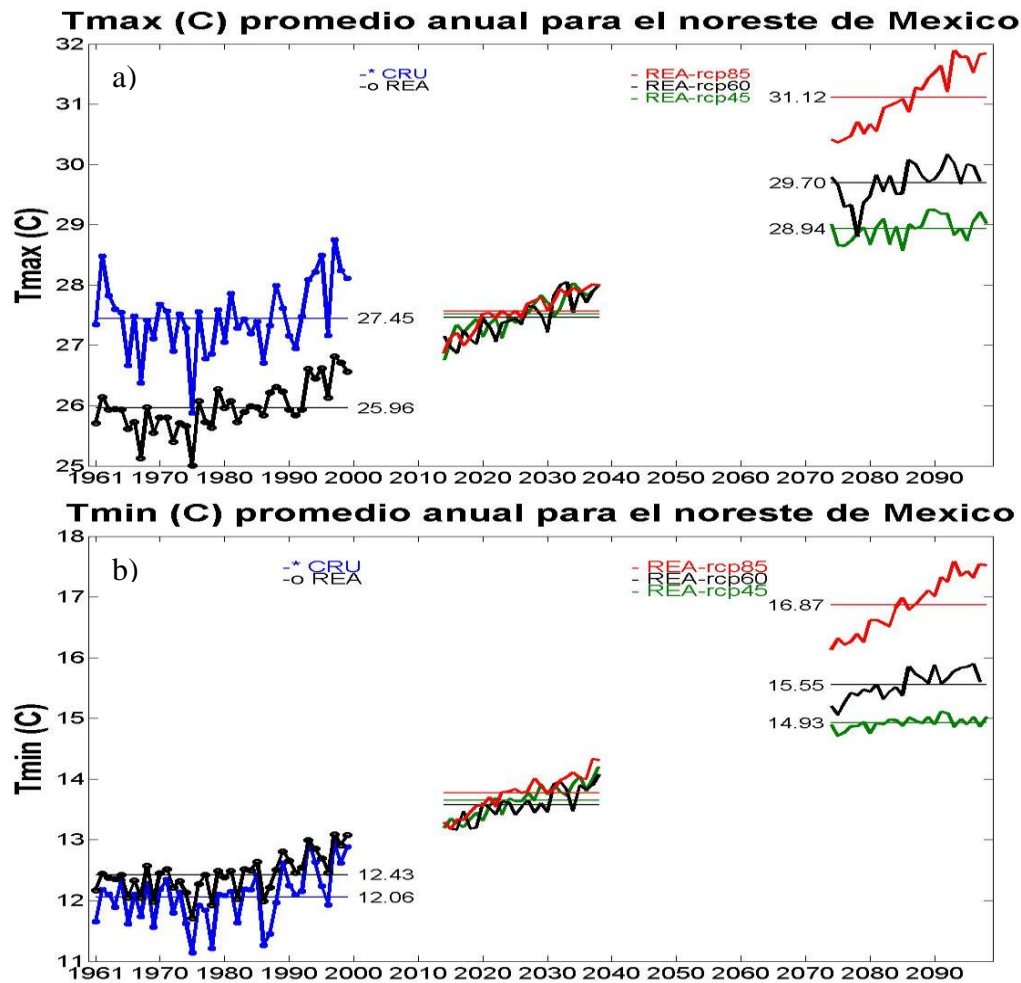


Figura 5. Igual que la Figura 4 pero para la a) temperatura máxima y b) temperatura mínima.

En la Figura 6 se muestra la comparación del ciclo anual del REA con el CRU y el promedio simple (PS), para la **región sur** para las mismas variables. En la **precipitación**, nuevamente en invierno es mejorada la simulación de esta variable por el REA, ya que el PS tiende a sobrestimar (~2mm/d, diciembre), sin embargo el REA también sobrestima, aunque en menor medida (~0.6mm/d, diciembre). En verano, el REA subestima la precipitación, mientras que el PS, tiene valores más cercanos al CRU. Además la incertidumbre del REA en esta estación del año es considerablemente alta.

Respecto a la **temperatura media**, los valores de CRU se encuentran entre el PS y el REA, siendo el REA el que simula las temperaturas más frías y el PS las más cálidas. Por lo tanto en este caso no se observa un patrón claro para decidir el mejor ensamble. Para el caso de la **temperatura máxima**, los dos ensambles son similares desde agosto hasta diciembre, subestimando esta variable. Mientras que en la primavera (marzo-junio) el REA se acerca más a los valores del CRU, aunque aún subestimando la temperatura. La incertidumbre del REA es casi de 1° para todos los meses. En cambio,

para la **temperatura mínima** el PS, posee valores mayores tanto respecto al CRU como al REA, cercano a 2°C, teniendo el REA un desempeño mejor en esta variable, con una incertidumbre aproximada de 1.5°C.

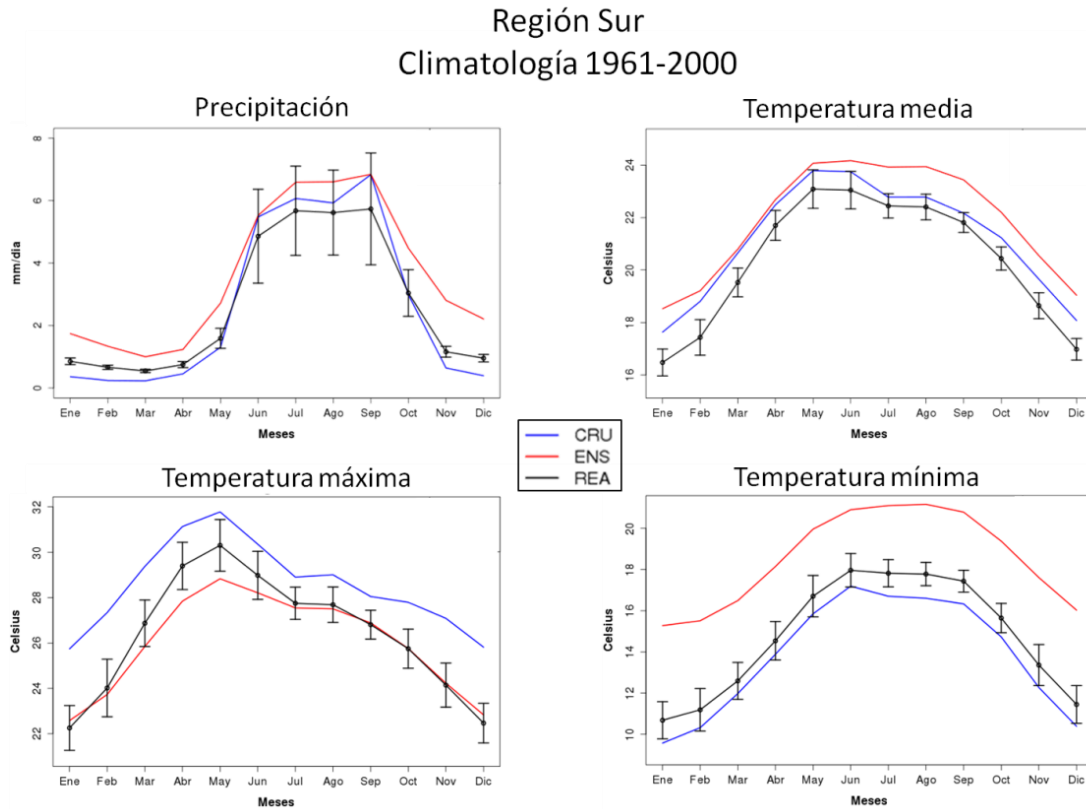


Figura 6. Igual que la Figura 3 pero para la región sur.

La variabilidad interanual histórica y su proyección futura de la **precipitación** para los tres escenarios en el sur del país, se muestra en la Figura 7. Donde se observa que la variabilidad simulada por el REA tiene buena correlación con los datos del CRU, aunque con una intensidad mucho menor, no obstante en promedio poseen el mismo valor, pero claramente la desviación estándar (variabilidad interanual) del REA es menor que la observada en el CRU. Al ver el ciclo anual (Figura 6) se puede considerar que estacionalmente el REA es bueno para estimar la precipitación de la región sur de México, sin embargo tiene problemas con la variabilidad interanual. En cuanto a las proyecciones futuras se observa que la precipitación podría disminuir aproximadamente 0.15 mm/d en promedio al año, para el futuro cercano. Mientras que en el futuro lejano son mayores las discrepancias entre lo calculado por cada escenario, como era de esperarse; el RCP8.5 proyecta que la precipitación podría disminuir aproximadamente hasta 0.4 mm/d en promedio al año.

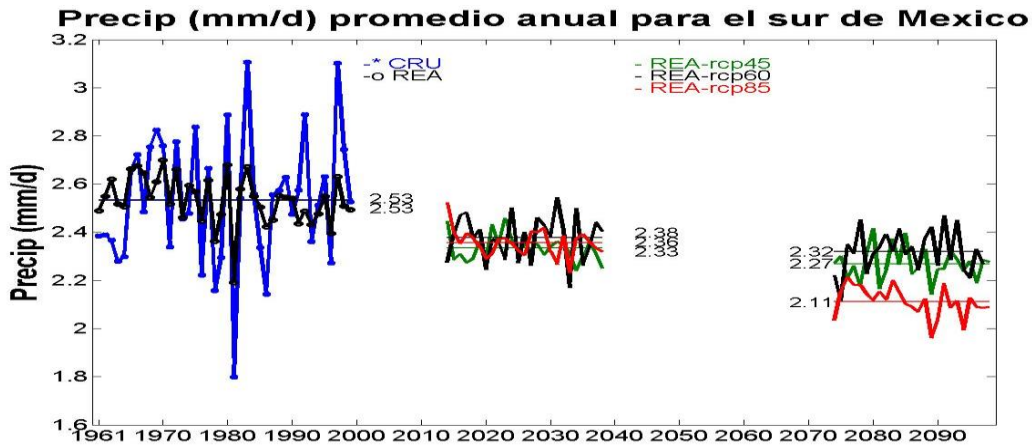


Figura 7. Promedios anuales de precipitación durante el periodo observado (1961-2000) para el CRU y el ensamble del REA para la región noreste de México, y las proyecciones bajo 3 escenarios de emisiones para los periodos 2015-2039 y 2075-2099.

Por otro lado, la variabilidad interanual, pasada y futura de las temperaturas extremas (máxima y mínima) para el sur de México se observa en la Figura 8. Como en el noreste de México, la **temperatura máxima** estimada por el REA es en promedio 2°C aproximadamente más frías que el CRU, lo que concuerda con lo observado en el ciclo anual, donde el REA está por debajo de los valores del CRU durante todo el año (Figura 8a). Las proyecciones futuras de la temperatura en el periodo 2015-2039 muestran una tendencia marcada en los tres escenarios a incrementarse aproximadamente 1°C. Para el periodo 2075-2099 se observa que el RCP8.5 se incrementa notoriamente respecto al resto de los escenarios, dando incrementos hasta de más de 5°C, mientras que el RCP6.0 y el RCP4.5 tienen anomalías aproximadas de 3 °C.

En el caso de la **temperatura mínima** el REA estima temperaturas más cálidas (~0.7 °C) que el CRU, lo cual no es tan drástico ya que además la variabilidad interanual se observa cualitativamente razonable (Figura 8b). Similar a la variable anterior, los tres escenarios proyectan una tendencia a incrementarse la temperatura mínima para el periodo cercano de casi 1°C. Mientras que en el futuro lejano nuevamente el escenario RCP8.5 se incrementa notoriamente del resto de los escenarios, con una tendencia clara a que continúe el incremento, en cambio el RCP6.0 y RCP4.5, aunque también proyectan aumento en la temperatura mínima la tendencia con que ésta lo hace es mucho menor.

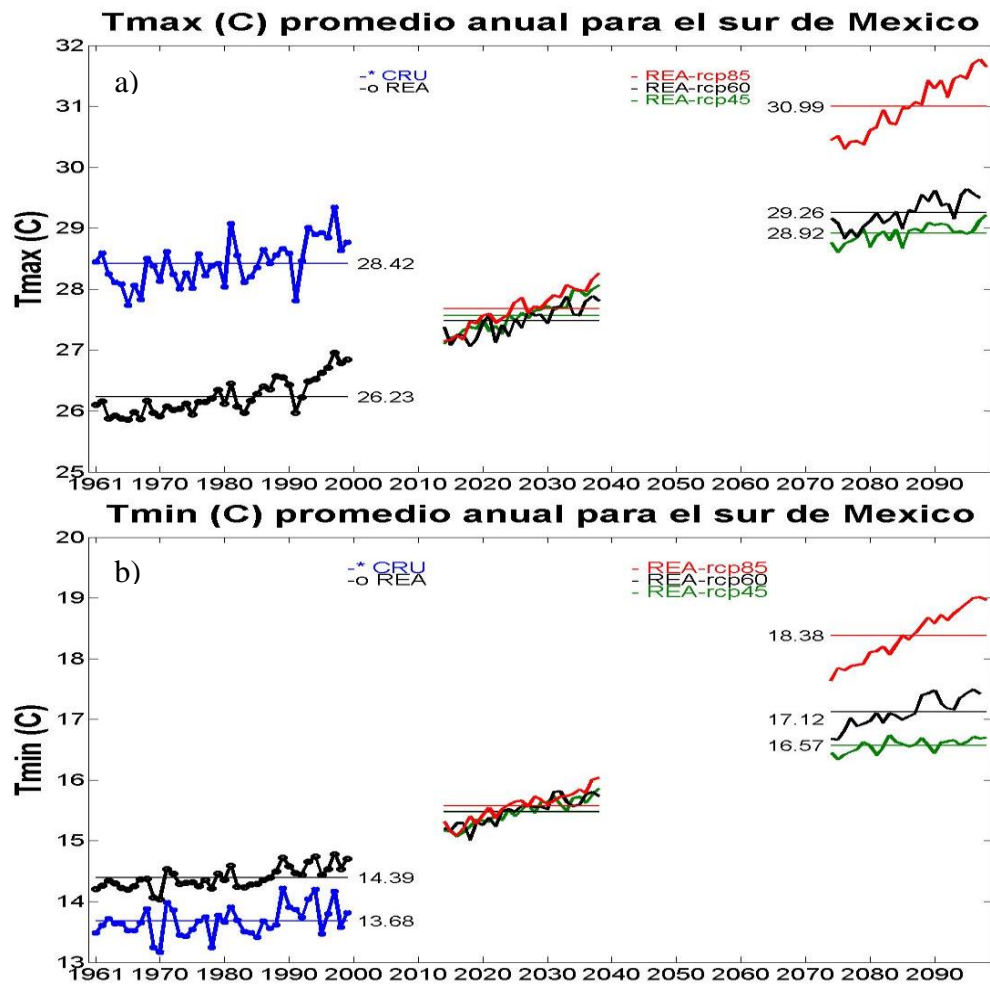


Figura 8. Igual que la Figura anterior pero para la a) temperatura máxima y b) temperatura mínima.

1.1 Anomalías espaciales de las proyecciones futuras

Con la finalidad de conocer el impacto que tendrá el cambio climático debido a emisiones es importante conocer el valor proyectado del cambio de una variable y de si ésta se incrementa o decrece. Además, de los escenarios temporales mostrados en las figuras anteriores, también se calcularon anomalías respecto a los datos históricos generados del REA, validados en la sección anterior, para tres escenarios: RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5. Estas anomalías se muestran para dos estaciones del año (invierno y verano) climatológicas de dos periodos: 2015-2039, contrastando con el resto de las estaciones para el período 2075-2099. La información completa puede apreciarse en la página WEB de resultados.

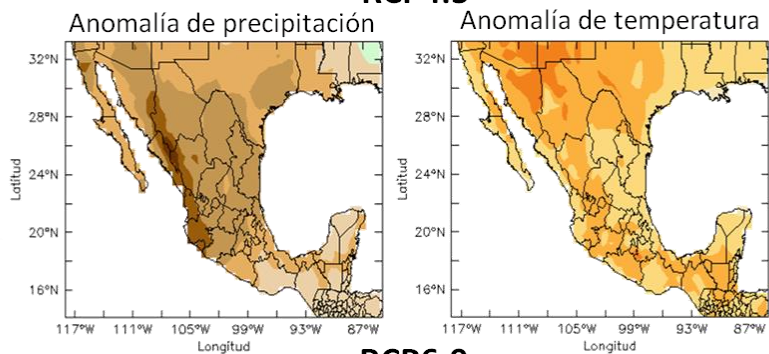
Para el **invierno** climático del futuro cercano (2015-2039) se observa que la tendencia de las proyecciones de **precipitación** es a disminuir para todos los escenarios y de

temperatura a aumentar (Figura 9). En las fronteras de Chihuahua, Sinaloa, Durango, y Nayarit la precipitación podría disminuir de hasta -0.4 mm/d en invierno, en lo cual coinciden los tres escenarios. Mientras que para el resto de la República Mexicana la proyección es que disminuya aproximadamente de 0 a 0.3 mm/d en esta estación. En el caso de la **temperatura**, los escenarios difieren más entre sí, siendo el RCP8.5 el escenario que proyecta las temperaturas más altas, con valores de 1.4 a 1.6 para parte de Sonora, Chihuahua y en el centro del país (DF y Morelos). En cambio el escenario RCP6.0 proyecta incrementos menores a 1°C. Cabe resaltar, que por ser un futuro cercano es de esperarse que aún no haya muchas discrepancias entre los escenarios, ya que todos inician con las mismas condiciones iniciales, sino que éstas aparecen conforme avanza el tiempo.

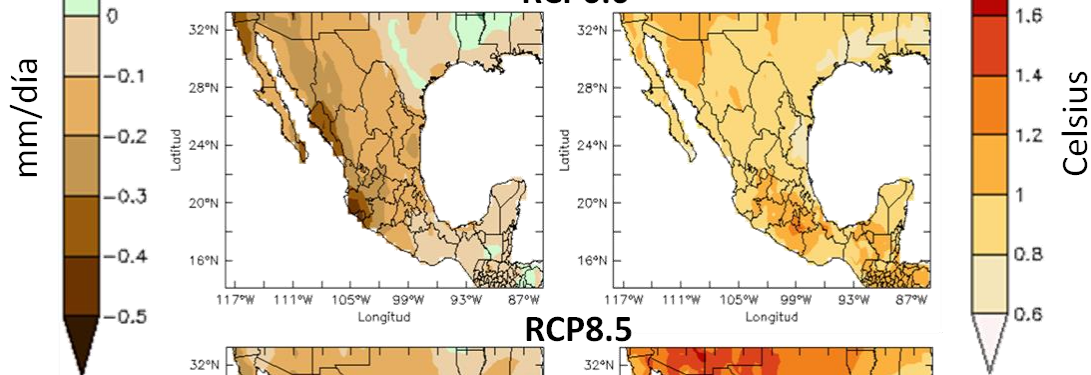
En el **verano** las proyecciones tanto de precipitación como de temperatura son mayores que para el invierno, ya que las anomalías se mantienen con el mismo signo pero con valores mayores (Figura 10). Sin embargo, hay mayores diferencias entre los tres escenarios utilizados. Para la precipitación el escenario que proyecta una disminución mayor es el RCP4.5, siendo el sur del país la región más afectada (>-0.4 mm/d). El escenario que simula una disminución menor es el RCP6.0, el cual tiene su máximo en Veracruz con disminución mayor a -0.4 mm/d, mientras que en el resto del país este valor es menor a 0.3mm/d, en promedio para todo el verano. Para la meseta central y el norte del país, los tres escenarios proyectan una disminución de precipitación de 0 a -0.3. Respecto a la temperatura los tres escenarios proyectan que el mayor incremento de esta variable para el **verano** será en los estados de la frontera con Estados Unidos y en Tabasco ($\Delta T > 1.4$). Mientras que en el resto del país el incremento promedio proyectado por los tres escenarios varía de 0.8 a 1.4°C.

Invierno (2015-2039)

RCP4.5



RCP6.0



RCP8.5

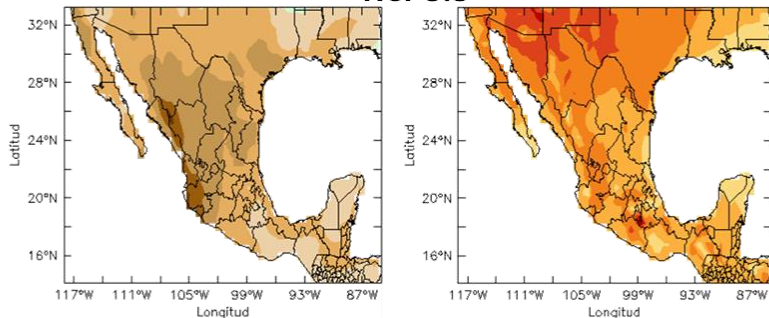


Figura 9. Anomalías de precipitación (lado izquierdo) y temperatura media (lado derecho) para toda la República Mexicana en invierno climatológico (DEF) de 2015-2039.

Verano (2015-2039) RCP4.5

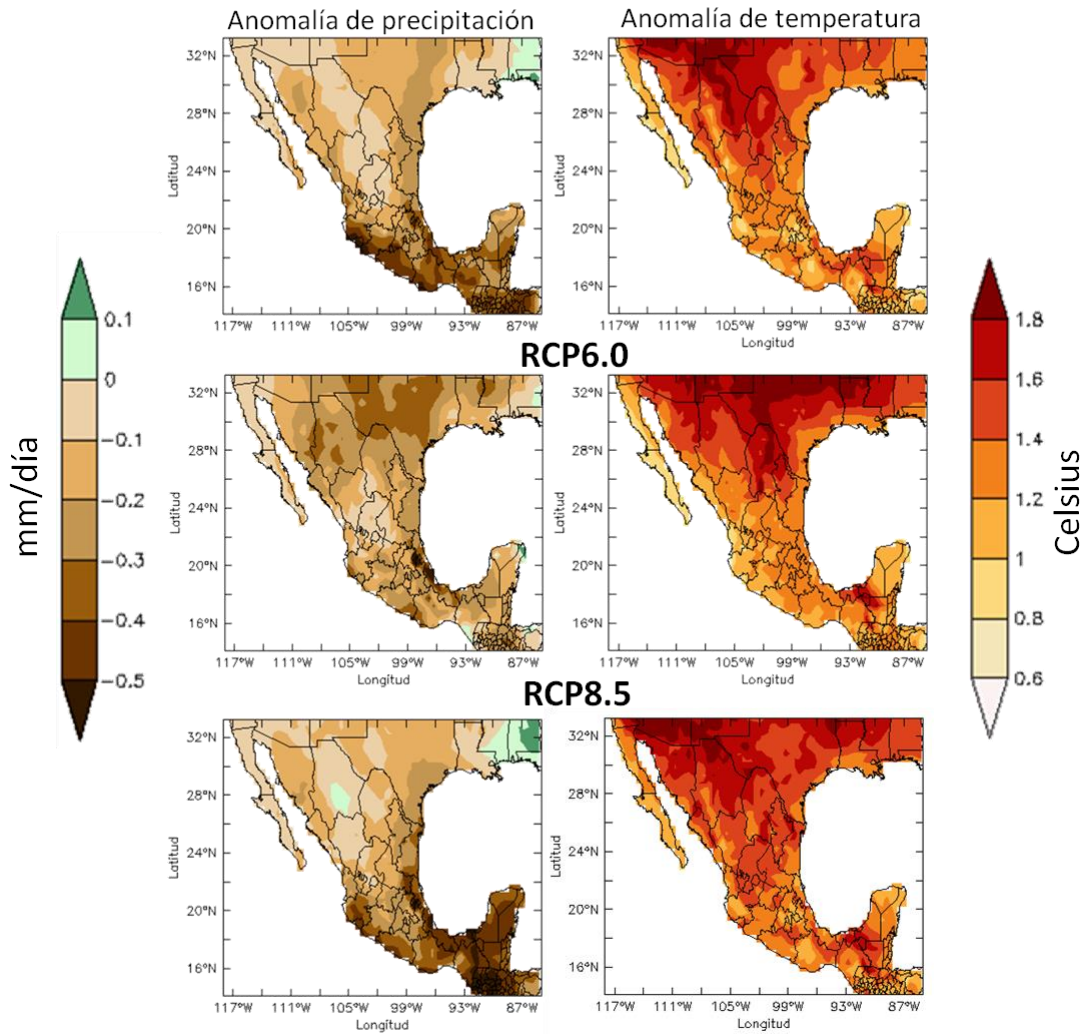


Figura 10. Igual que la Figura pasada pero para el verano climatológico (JJA)

Para el invierno climático de 2075-2099, las diferencias son mayores entre un RCP y el otro, como se esperaba (Fig. 11). El escenario RCP4.5 proyecta las anomalías de precipitación y temperatura menores, de 0 a -0.6 mm/d y <2.5 °C, respectivamente. En cuanto al escenario RCP6.0, sus proyecciones son intermedias, proyectando una disminución de la precipitación en los estados de Jalisco, Nayarit, Sinaloa y Sonora, de -0.4 a -0.7mm/d, mientras que en la temperatura la zona con mayor incremento en su valor son Chihuahua y Sonora (de 3 a 3.7°C). Mientras que, el escenario RCP8.5 es el más extremo con proyecciones de anomalías de precipitación menores a -0.7mm/d en la frontera de Sinaloa, Chihuahua y Durango, y para temperatura con anomalías de 4 a 5 °C en el norte del país. La zona con valores de anomalías bajos es la Península de Yucatán, donde en a temperatura se proyecta un incremento de temperatura de 2 a 2.5°C y en la precipitación con anomalías muy bajas de 0 a 0.1 mm/d.

Invierno (2075-2099)

RCP4.5

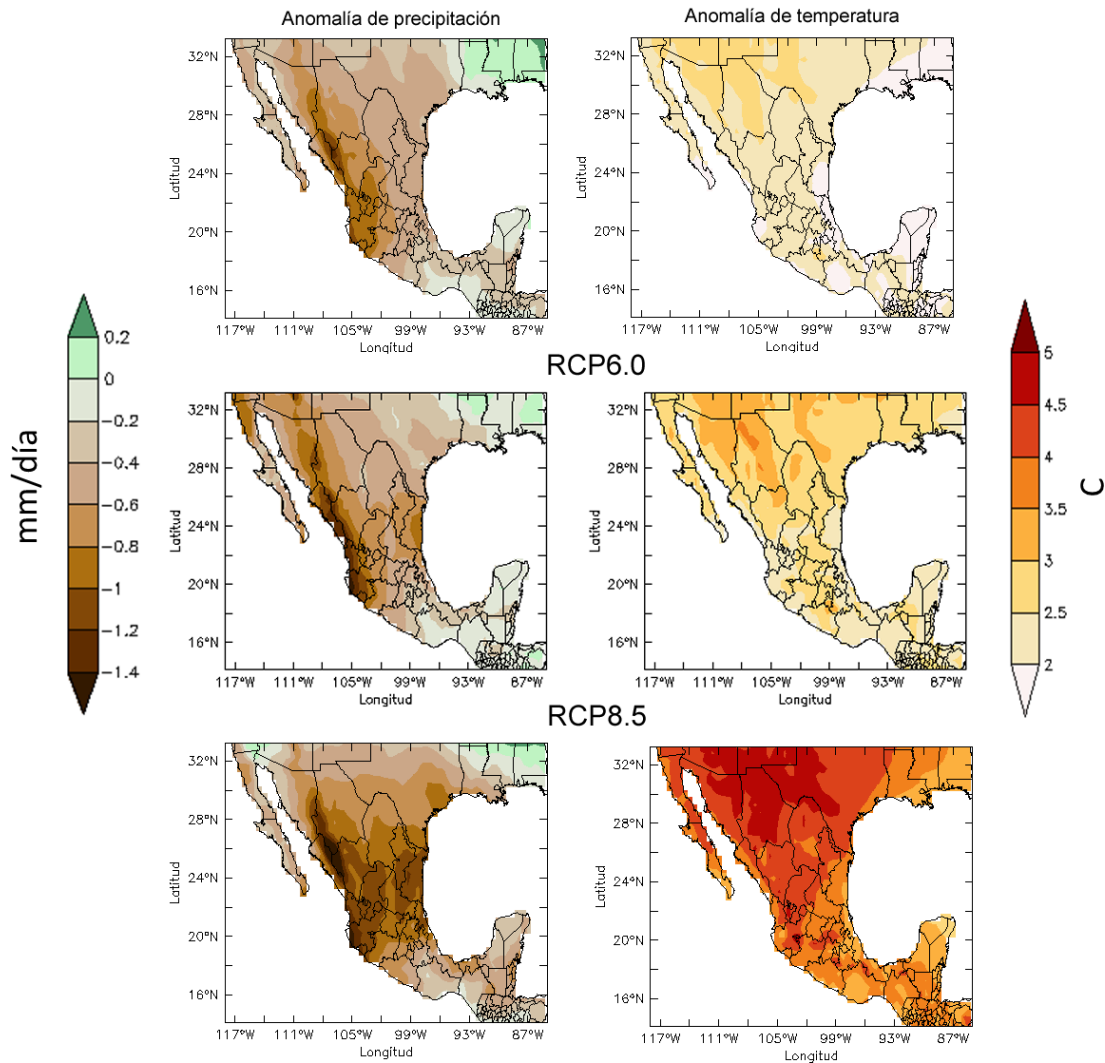


Figura 11. Anomalías de precipitación (lado izquierdo) y temperatura media (lado derecho) para toda la República Mexicana en invierno climatológico de 2075-2099.

En el caso del verano en el periodo de 2075-2099, nuevamente se observa como el escenario RCP8.5 se separa de los otros dos, con anomalías de temperatura mayores a 5°C en casi toda la República, excepto las Penínsulas de Baja California y Yucatán. (Fig. 13) Respecto a la precipitación en la región sur proyecta que tendrá una disminución mayor a 1.4mm/d en promedio, principalmente en los estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca, Chiapas, Tabasco y Veracruz. En la precipitación el escenario RCP4.5 y el RCP6.0 tienen proyecciones similares, con anomalías de -0.4 a -1 mm/d en el sur del país y regiones montañosas. Sin embargo en la meseta central y Península de Baja California, las anomalías de precipitación son de -0.2 a +0.2 mm/d para los tres escenarios. En el caso de la temperatura el RCP6.0 simula anomalías mayores al RCP4.5, principalmente en Durango, Chihuahua y Coahuila (de 3.5 a 5 °C), para el resto del país los valores varían de 2 a 3.5 en promedio para ambos escenarios.

Primavera (2075-2099)

RCP4.5

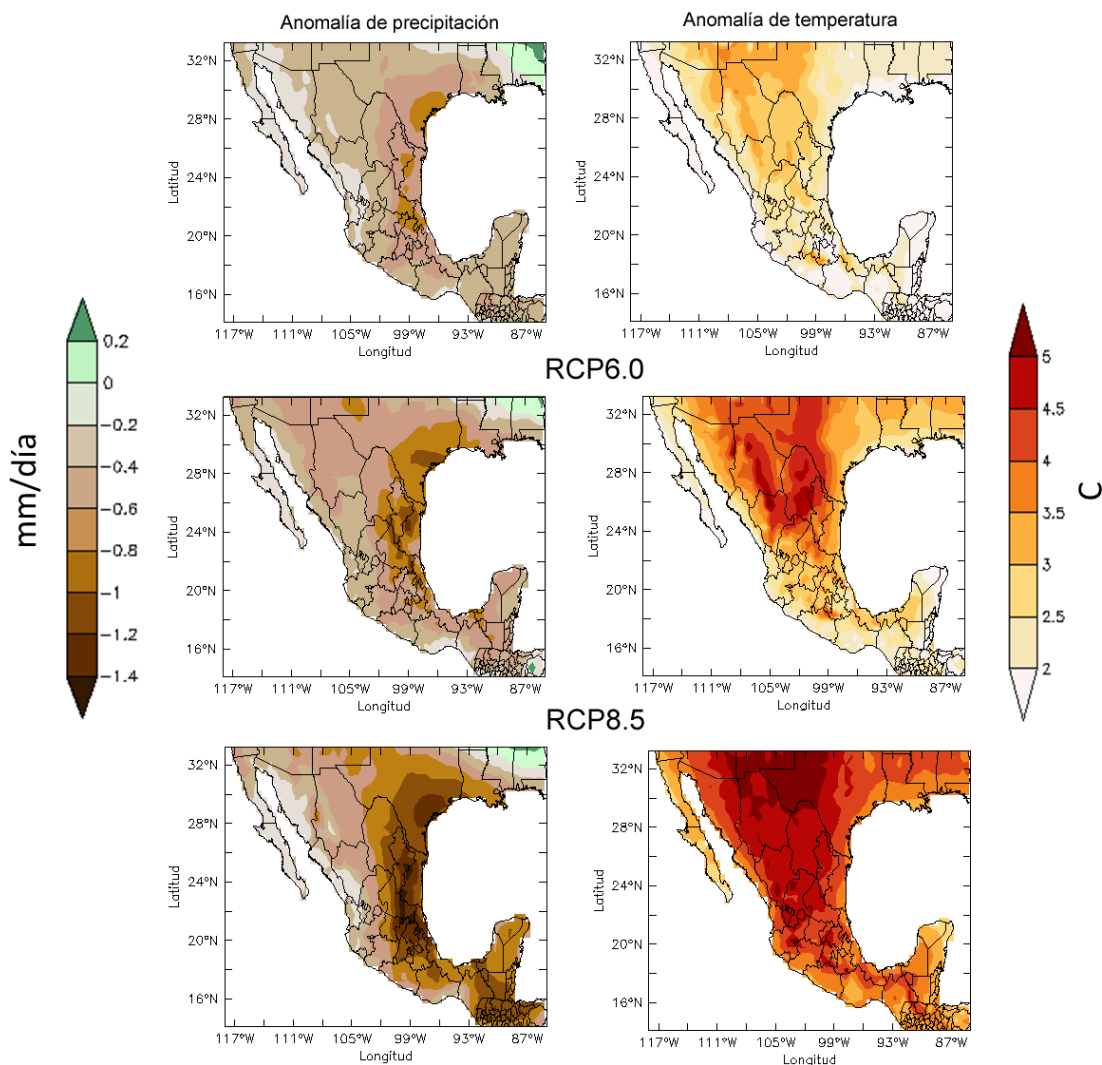


Figura 12. Anomalías de precipitación (lado izquierdo) y temperatura media (lado derecho) para toda la República Mexicana en invierno climatológico de 2075-2099.

Verano (2075-2099)

RCP4.5

Anomalia de precipitación

Anomalia de temperatura

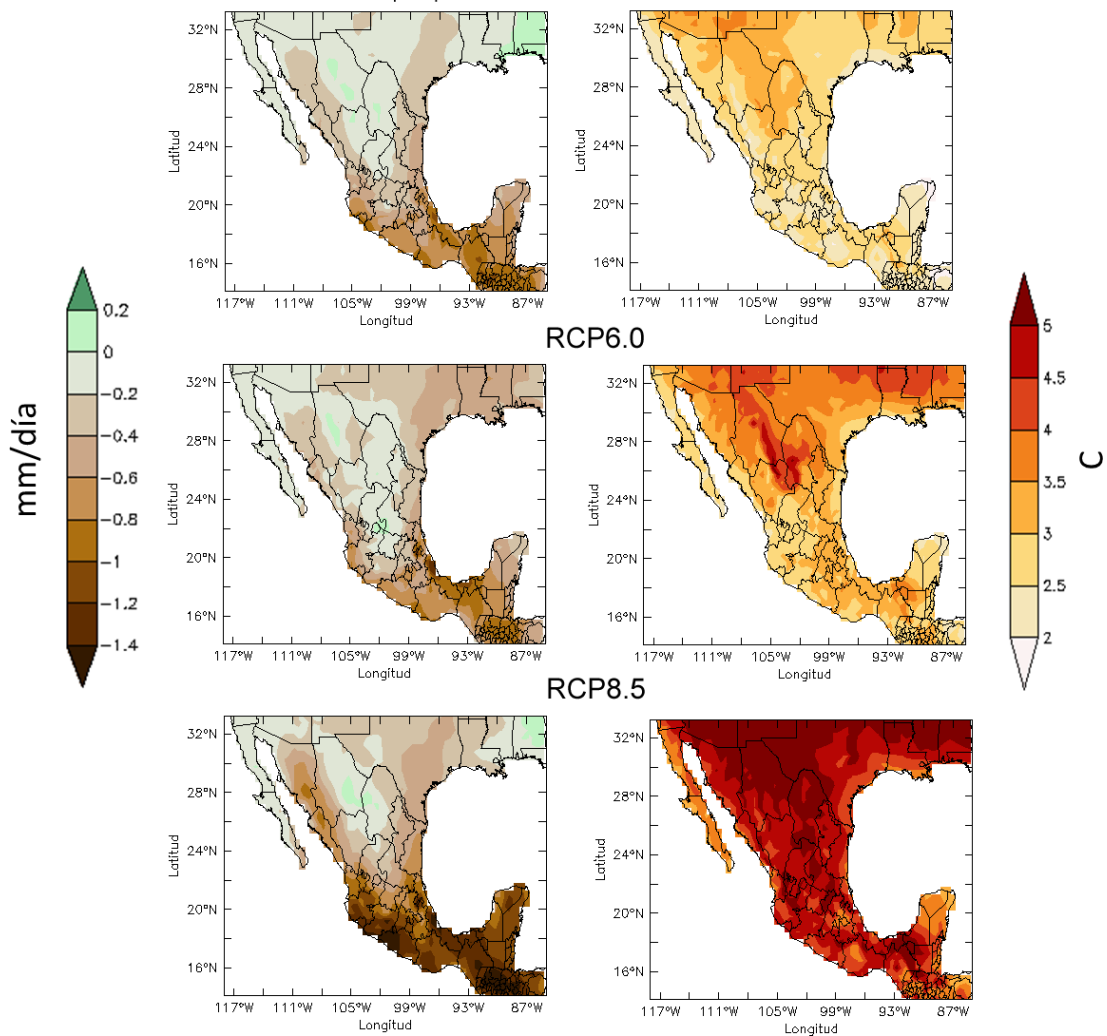


Figura 13. Igual que la Figura anterior pero para el verano

Otoño (2075-2099)

RCP4.5

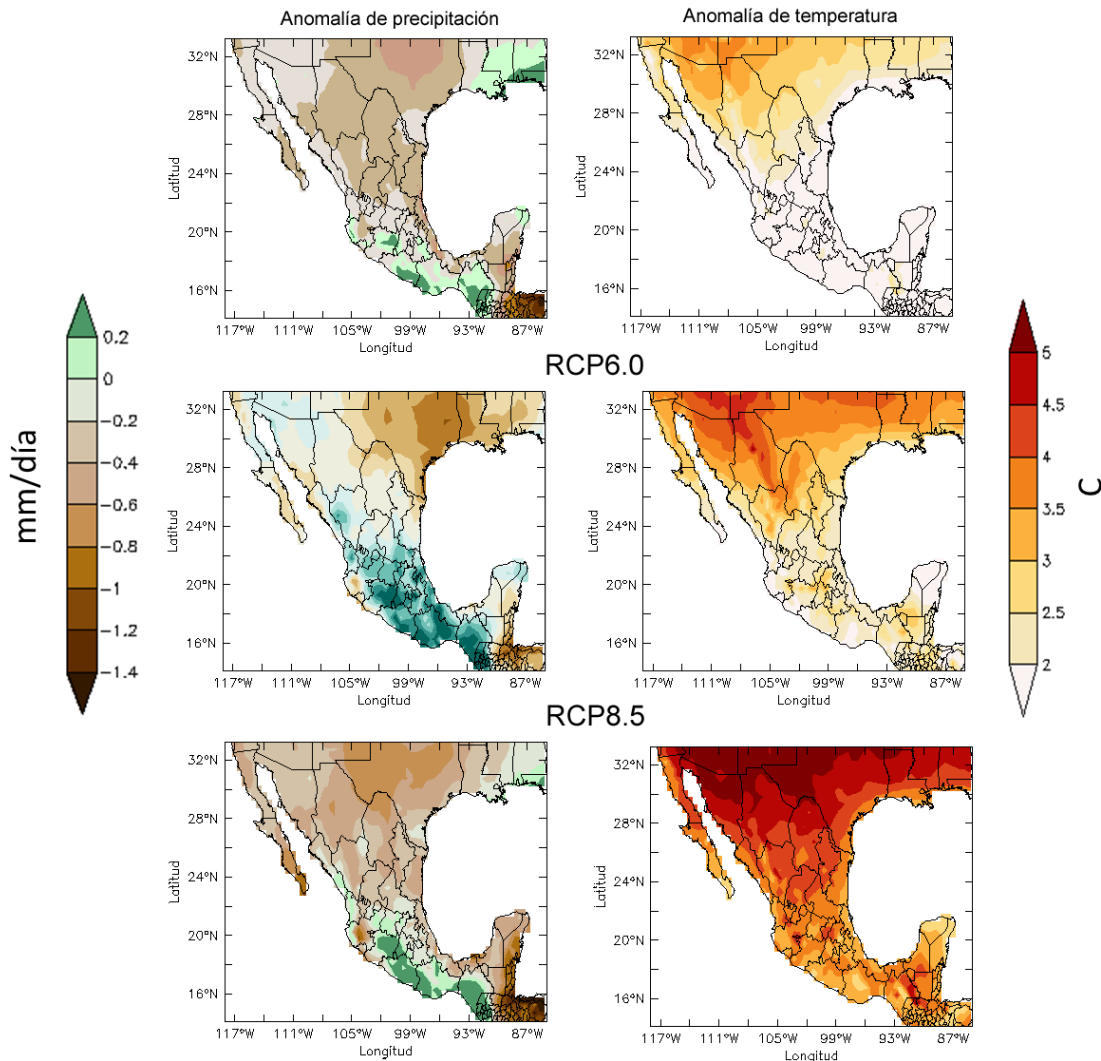


Figura 14. Igual que la Figura anterior pero para el otoño

1.2 Comparación de AR4 con AR5

Montero y Pérez (2008) generaron un ensamble REA para las simulaciones del AR4 (CMIP3), para dos escenarios de emisiones: A2 y A1B. En ese REA se utilizaron las simulaciones de 22 MCG. En esta sección se comparan esos escenarios con los RCP's 4.5, 6.0 y 8.5 del presente proyecto, para las anomalías de temperatura y precipitación en la climatología del periodo 2075-2098. Se seleccionó este periodo debido a que en el 2015-2039 por ser un futuro cercano, no se aprecian diferencias considerables entre los escenarios.

En la Figura 15 se observa la anomalía de precipitación proyectada para el verano de los cinco escenarios (RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5, A1B y A2) para toda la República; cabe mencionar que los escenarios A1B (emisiones intermedias) y A2 (altas emisiones de

gases de efecto de invernadero) son aproximadamente comparables a los escenarios RCP6.0 y RCP8.5, respectivamente. En la Península de Baja California y meseta central del país, los cinco escenarios proyectan cambios relativamente pequeños (entre 0 y -0.2 mm/d). Sin embargo en el sur del país todos los escenarios proyectan una disminución en la precipitación, siendo el RCP8.5 el que proyecta la mayor anomalía (<-1.4mm/d) en toda la región, A2 también simula anomalías negativas (de -0.8 a -1.4 mm/d). Sin embargo el RCP8.5 proyecta disminución para la zona del monzón mexicano (de -0.6 a -1 mm/d).

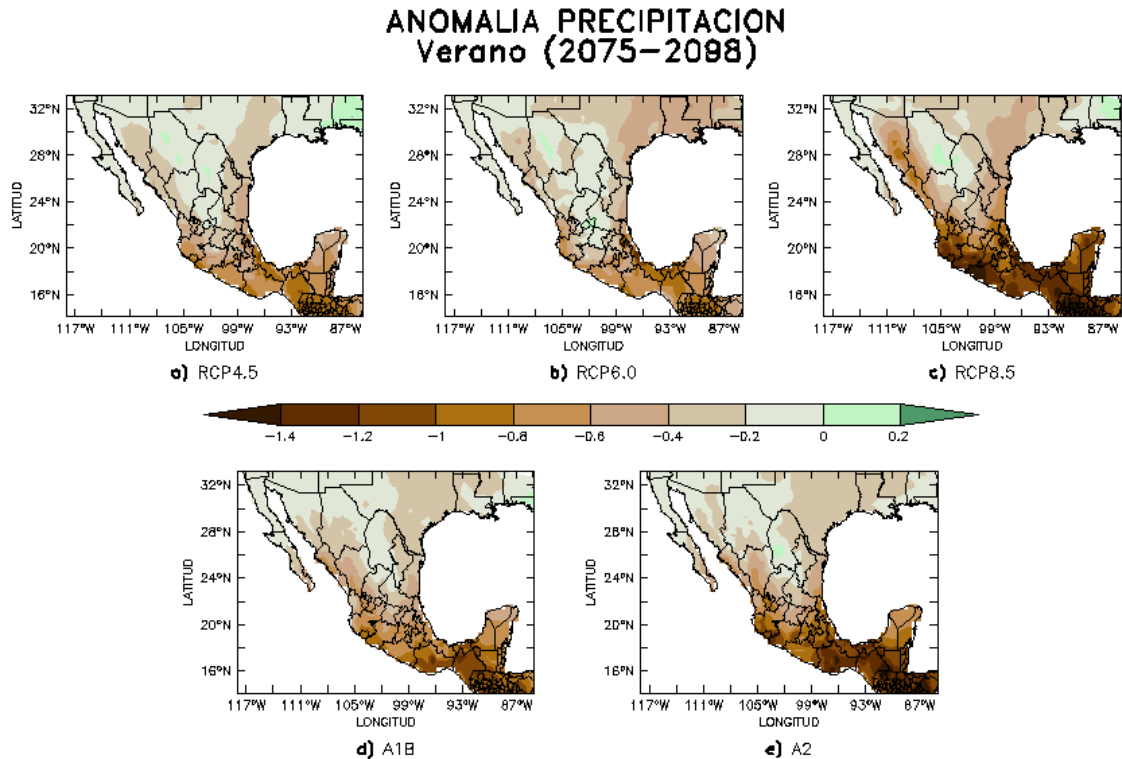


Figura 15. Proyección de precipitación para el verano climatológico del periodo 2075-2098 para a) RCP4.5, b) RCP6.0, c) RCP8.5, d) A1B y e) A2.

En el caso de la anomalía de temperatura en el verano climatológico (2075-2098) se observa un claro patrón entre los escenarios, donde el escenario RCP4.5 es el que proyecta anomalías “bajas” (< 3.5°C) en comparación con el RCP8.5 (>4°C) (Fig. 16). En este caso se observa que el escenario A1B proyecta anomalías entre las proyectadas por el RCP4.5 y el RCP6.0, mientras que el A2 se encuentra entre el RCP6.0 y el RCP8.5, aunque más cercano a este último. Sin embargo el RCP8.5 es el escenario con anomalías mayores a 4.5°C para todo el país. Todos los escenarios excepto el RCP8.5, simulan anomalías menores a 3°C en la Península de Baja California, posiblemente por el efecto modulante de la Corriente fría de California.

ANOMALIA TEMPERATURA MEDIA Verano (2075-2098)

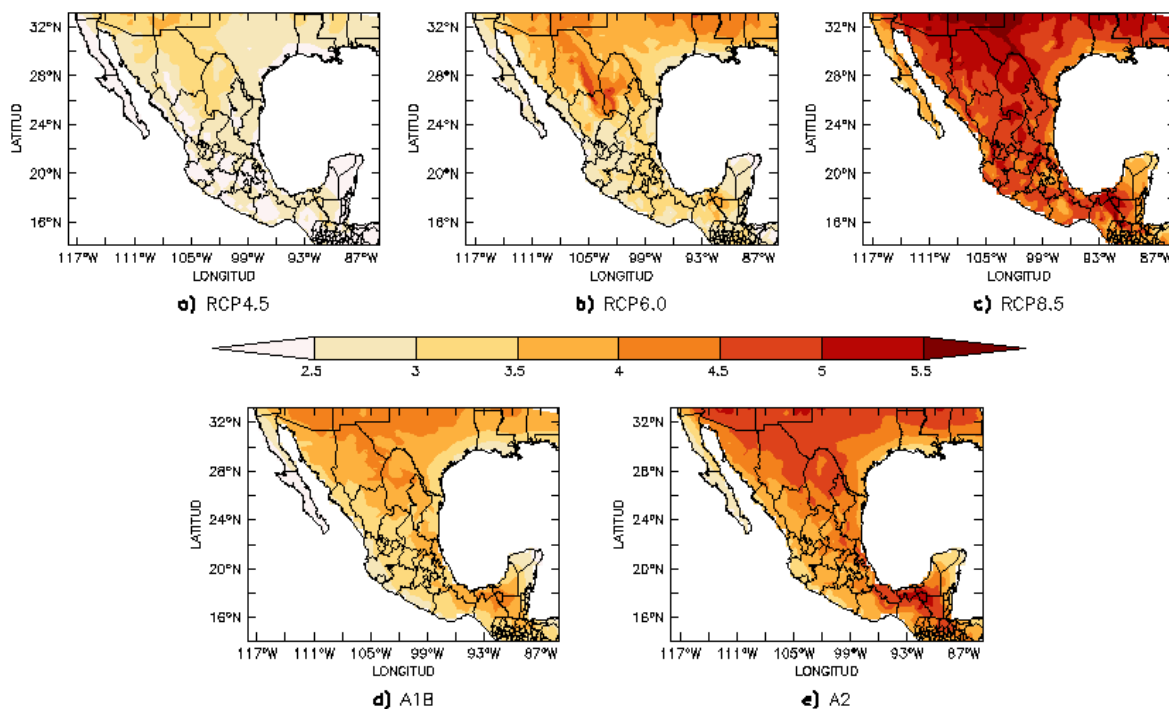


Figura 16. Proyección de temperatura para el verano climatológico del periodo 2075-2098 para a) RCP4.5, b) RCP6.0, c) RCP8.5, d) A1B y e) A2.

En la Figura 17 se muestran las anomalías de precipitación climatológicas para la región NE para el periodo 2075-2098, de 2 escenarios del CMIP3 (A1B y A2) con tres del AR5 (RCP 4.5, 6.0 y 8.5), no se aprecia un claro patrón que caracterice los escenarios, lo que también se observa en la Figura 13. Sin embargo se aprecia que el escenario RCP8.5 es más extremo que el resto, con una proyección de hasta 0.5 mm/d menos en febrero y un aumento de 0.7 mm/d en septiembre. En este mes los escenarios del CMIP3 son los que estiman el mayor déficit de precipitación en septiembre octubre y diciembre.

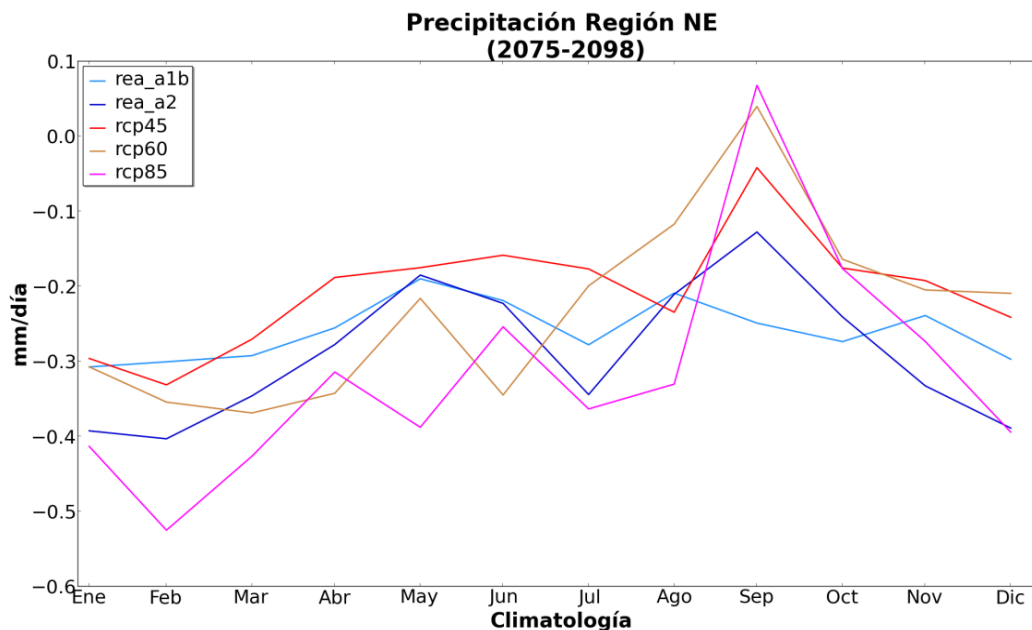


Figura 17. Anomalías de precipitación proyectadas por los escenarios A1B, A2, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5, para la región NE de México. Anomalías con respecto a 1961-2000.

Los contrastes entre los escenarios son más claros en las anomalías de temperatura (Figura 18), que en los de precipitación. En los escenarios RCPs se observa que el escenario más drástico es el RCP8.5 y el menos radiativo (RCP4.5) que muestra las menores anomalías, como era de esperarse. Los escenarios A1B y A2, se encuentran entre las anomalías proyectadas del RCP6.0 y el RCP8.5. Es decir, que este último proyecta un incremento de temperatura incluso mayor al escenario A2, que en el CMIP3 era considerado como el más drástico.

En esta comparación resalta que los nuevos escenarios (RCPs) en el caso de la temperatura poseen menos dispersión entre sí, siendo el RCP4.5 el que tiene proyecciones de incremento de temperatura menores, y el RCP8.5 el más drástico. Para el caso de precipitación a pesar de que no se observó un patrón consistente, si se aprecia que el escenario RCP8.5 posee los valores más extremos, ya sea de incremento o decremento de la precipitación. No obstante se resalta que el REA que se está manejando para este informe utiliza 15 modelos, mientras que el REA del CMIP3 considera 22.

En resumen, tanto los modelos del CMIP3 como los del CMIP5 proyectan un calentamiento generalizado en México, con diferentes grados de intensidad (desde 1 hasta 5°C) según el periodo, el escenario y región, pero en general el escenario A2 y el RCP8.5 son los que proyectan mayores cambios. Los cambios en la precipitación proyectados para el siglo XXI también son consistentes en ambos grupos de modelos, mostrando las mayores reducciones en el sur y sureste Mexicano.

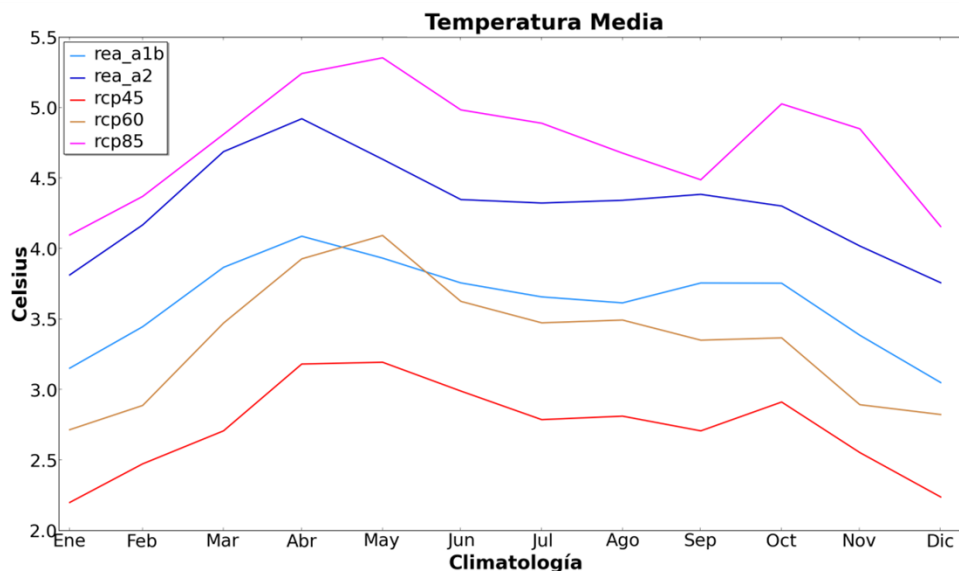


Figura 18. Anomalías de precipitación de los escenarios A1B, A2, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5, para la región NE de México.

2. Revisión del proyecto NARCCAP

El NARCCAP (Programa de evaluación de cambio climático regional de Norteamérica, por sus siglas en inglés) es un programa internacional que atiende las necesidades de generar escenarios de cambio climático a altas resoluciones para Canadá, Estados Unidos y el norte de México. Este programa utiliza modelos regionales de clima acoplados a modelos globales para estimar las incertidumbres en las proyecciones regionales del clima futuro y generar escenarios de cambio climático. Los patrocinadores de este experimento son: Fundación Nacional para la Ciencia (NSF, por sus siglas en inglés), el Departamento de Energía (DOE), la administración nacional de océano y atmósfera (NOAA), y el consorcio Canadiense OURANOS.

Este programa incluye los modelos regionales del programa europeo PRUDENCE: modelos HadRM3 y RegCM, el modelo regional Canadiense (CRCM) y el modelo espectral regional de NCEP llamado RSM, además del modelo MM5 y WRF. Los modelos globales son HadCM3, (National Center for Atmospheric Research (NCAR)), el modelo CCSM, (CGCM3 y GFDL).

Los modelos regionales se forzaron con modelos globales acoplados a modelos oceánicos sobre la región de estudio, esto para el escenario de emisiones A2 tanto para el período histórico de 1971-2000 como para el siglo 21: 2041-2070. El desempeño de los modelos fue evaluado utilizando los datos de Reanálisis II del período 1979-2004, con una resolución de 50 Km.

El programa incluye dos experimentos con modelos globales en “cortes en tiempo”, como en los modelos regionales, estos experimentos son ejecutados utilizando las condiciones históricas de 1969-2000 y las condiciones de futuro 2039-2070.

En el experimento de “cortes en tiempo”, la componente atmosférica de los modelos globales se ejecuta sin el acoplamiento con los modelos oceánicos, a cambio de ello, se utilizan las condiciones de frontera sobre el océano y el hielo para el período histórico observado, mientras que para el período futuro para los escenarios de cambio climático, estas condiciones se generan con perturbaciones basadas en resultados de simulaciones de alta resolución de los modelos acoplados.

Al eliminar el acoplamiento a los modelos de océano, se disminuyen los requerimientos computacionales permitiendo con ello que sea posible una mayor resolución espacial: 50 Km. la misma que los modelos regionales. Se le llama “cortes en tiempo” porque simula únicamente dos períodos de tiempo: uno en el presente y otro en el futuro, omitiendo el período intermedio.

El primer “corte en tiempo” utilizó el modelo AM2.1, el cual es la componente atmosférica del modelo global GFDL, mientras que el segundo corte utilizó el modelo de NCAR CAM3, el cual es la componente atmosférica del modelo global CCSM

Es importante incluir las propiedades del tipo de uso de suelo y la orografía a alta resolución que afectan la dinámica atmosférica local, ya que poseen una variabilidad espacial de menor escala. Adicionalmente, las bases de datos de uso de suelo han incrementado su resolución espacial, lo que debe incluirse para mejorar las simulaciones numéricas a escala regional, las aportaciones de una reducción de escala se observa en la Fig. 19

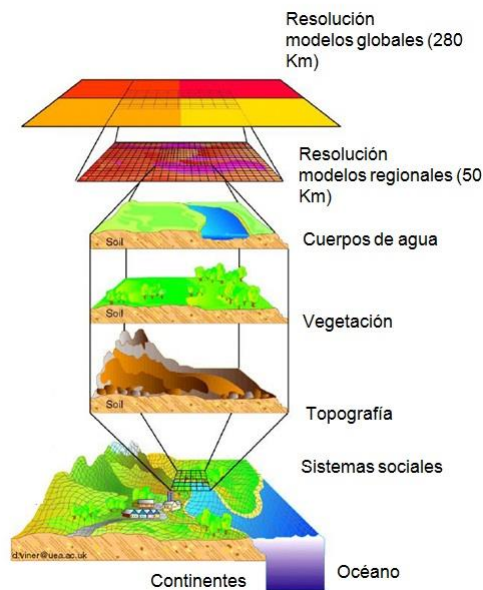


Figura 19. Esquema de la información local aportada por el aumento de resolución espacial de uso de suelo.

Una de las herramientas para incorporar los procesos de escalas menores es la reducción de escala dinámica, ello mediante modelos numéricos regionales anidados en modelos globales, como se realizó en el experimento NARCCAP. (Fig. 20)

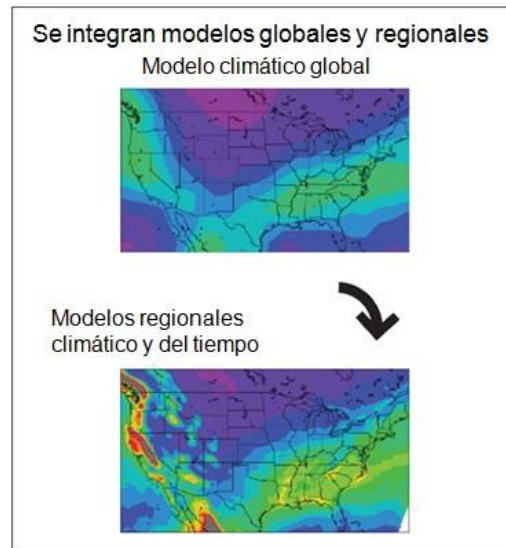


Figura 20 Integración de capacidades de modelos globales y regionales

Utilizando una resolución de $2.5^\circ(\text{lat}) \times 3.75^\circ(\text{lon})$, $\sim 280 \text{ km}$, como la del modelo Hadley Centre (HadCM3), la morfología costera sería observada como en la Fig. 21, donde la península de Baja California no existiría y el detalle de las costas mexicanas se eliminaría.

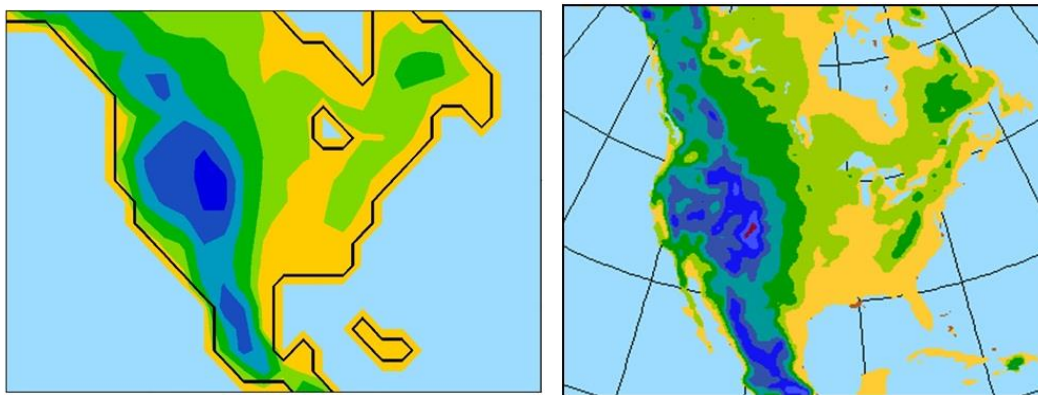


Figura 21. Configuración costera con resolución de 280 Km (izquierda) y con 50 Km (derecha).

La resolución de los modelos globales es adecuada para describir eventos de gran escala, de más de 500 Km, sin embargo, los eventos de menor escala no son reproducidos con estas resoluciones, ello se logra con anidamientos de modelos regionales en modelos globales (Figura 22).

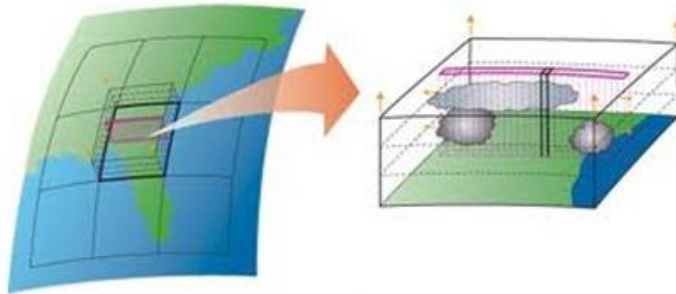


Figura 22. Incorporación de procesos de menor escala mediante anidamientos de modelos regionales en modelo globales.

Los modelos globales no reproducen fenómenos de menor escala para determinar la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos como ondas del este, huracanes, frentes fríos, los cuales impactan en la precipitación y temperatura, entre otros (Figura 23).



Figura 23. Eventos meteorológicos de menor escala.

Los modelos regionales reproducen los procesos locales basados en la física conocida para representar sus interacciones (Figura 24)

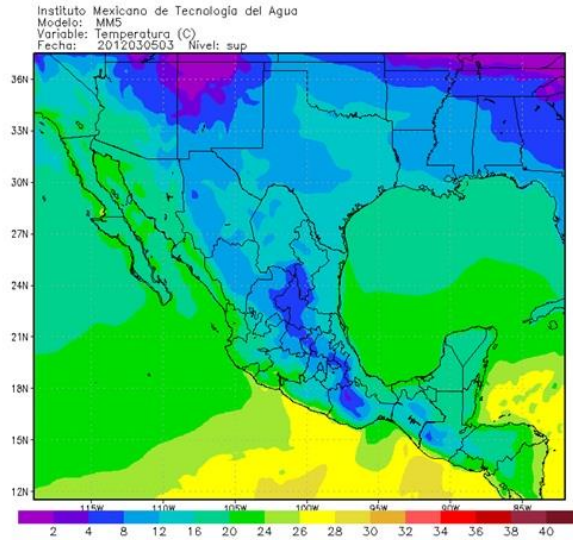


Figura 24. Temperatura a escala fina simulada por el MM5.

Objetivos de NARCCAP

- Calcular incertidumbres de las proyecciones tanto en modelos globales como en regionales.
- Generar escenarios de alta resolución espacial para evaluar impactos regionales.
- Evaluar el desempeño de modelos regionales sobre Norteamérica.
- Evaluar la compatibilidad de la física contenida entre los modelos anidados y los globales.

La comunidad NARCCAP está constituida por tres grupos de usuarios:

- Reducción de escala dinámica y estadística
- Análisis regional de resultados
- Escenarios para estudios de impacto regional

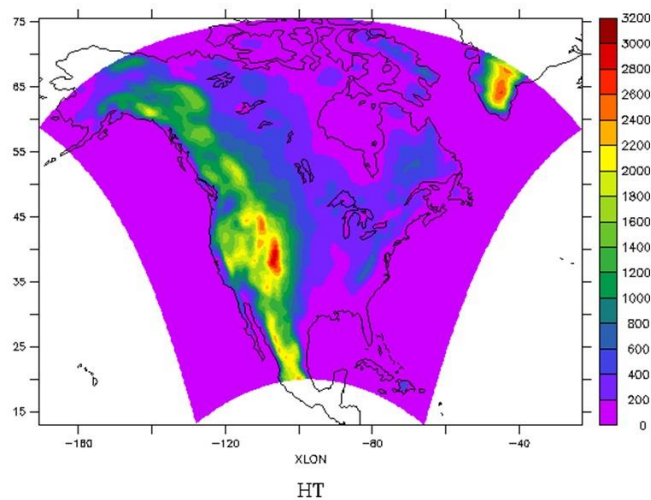


Figura 25. Región de estudio de NARCCAP

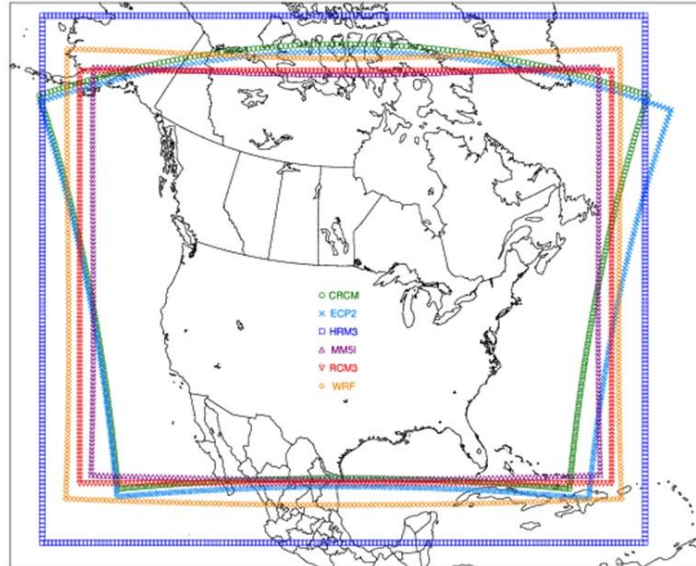


Figura 26. Dominio de los modelos regionales de NARCCAP

El modelo HadCM3 tiene una resolución de 280 km, para aumentar la resolución a 50 km, se requiere $(280/50)^3 = 175$ veces el poder de cómputo original, la solución aplicada es utilizar la resolución más fina únicamente sobre las regiones de interés. Los modelos regionales resaltan regiones con masas continentales irregulares, topografía compleja, líneas de costa complejas, tipos de suelo heterogéneos (Figura 27)

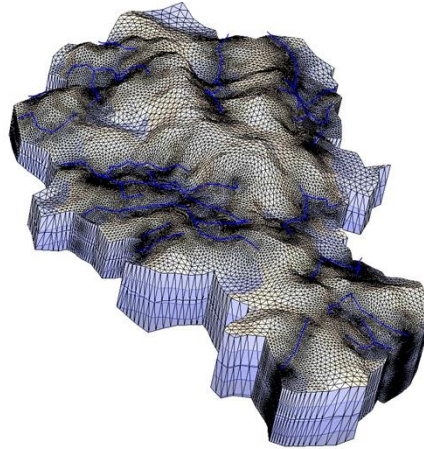


Figura 27. Topografía representada en una malla de alta resolución.

Los cuatro modelos globales utilizados y su uso para inicializar 6 modelos regionales se observa en la Figura 28, donde se aprecia la combinación de éstos tanto para períodos históricos como a futuro.

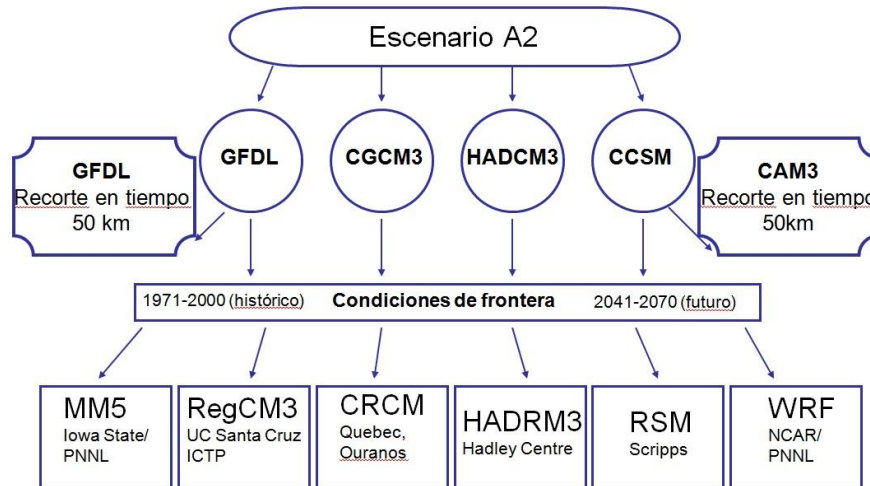


Figura 28. Modelos globales (centro) y regionales (abajo) utilizados en NARCCAP.

Los cortes de tiempo en los modelos globales se hicieron conforme a la Figura 29, donde éstos se ejecutaron a una resolución de 50 Km igual que los modelos regionales para conocer las mejoras al anidar los modelos.

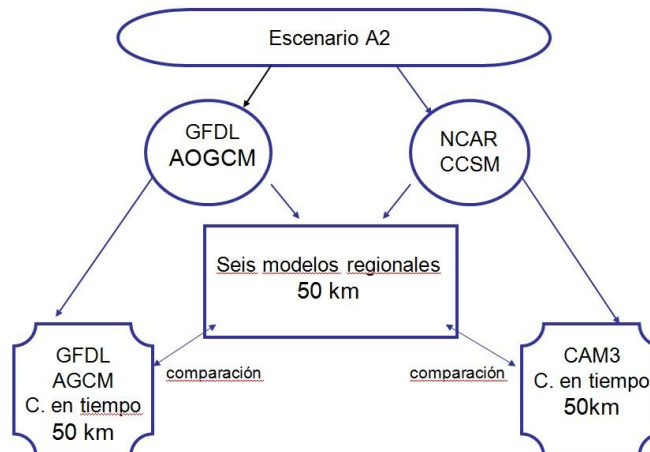


Figura 29. Cortes de tiempo de modelos globales.

Los acoplamientos entre modelos regionales y globales se hicieron de acuerdo a la Figura 30, donde se aprecian dos fases, la primera utilizando la base de datos reanalizados del NCEP y en la segunda fase se incorporan los modelos globales para forzar los modelos regionales.

	Fase I	Fase II			
	NCEP	GFDL	CGCM3	HADCM3	CCSM
CRCM	X		1		2
ECPC	X	1		2	
HRM3	X	2		1	
MMSI	X			2	1
RCM3	X	1	2		
WRFP	X		2		1
CT*		X			X

*corte en tiempo

Figura 30. Acoplamiento de modelos regionales con globales

2.1 Acceso a datos de NARCCAP.

Los resultados del proyecto NARCCAP son del dominio público y están accesibles en la página WEB: www.narccap.ucar.edu, donde el usuario se registra y elige las bases de datos que requiere (Fig. 32)

Figura 32. Menú inicial de la página de registro de NARCCAP.

Acceso a las bases de datos de NARCCAP

Earth System Grid
 Home Search Data Account About Conta

Download: NARCCAP mm5i ccsm-current Table 2

Wget Script
Unix/Linux systems only
 Download a Wget shell script that you can run from the command line.
 For the Wget script to work properly, you will first need to obtain a MyProxy certificate. Please use the MyProxyLogin link below to get your MyProxy certificate. [Download help...](#)
[Launch MyProxyLogin](#) via Java Web Start.
[Learn more about Wget...](#)

DML Script
Java enabled systems only
 Download a script that you can run with the DataMover-Lite (DML) file transfer tool on Java enabled systems.
[Launch DataMover-Lite](#) via Java Web Start.
[Learn more about DataMover-Lite...](#)

Individual Files
 Download individual files from this collection.
 Files can be selected by variable or selected individually.

Figura 33. Menú de selección de macros para descargar datos.

2.2 Evaluación de NARCCAP

A continuación se muestran algunos análisis de regionalizaciones dinámicas realizadas en el experimento NARCCAP, dado que una de las limitaciones para usuarios en México es que abarca solamente la parte norte de México (Figura 25), se utilizaron solamente las dos regiones del norte (Figura 34) previamente analizadas en el desempeño de los modelos globales participantes en CMIP5.

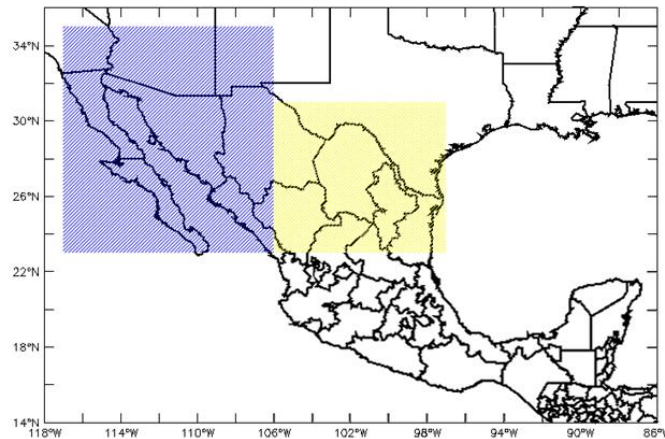


Figura 34. Regiones seleccionadas para comparar resultados de NARCCAP con observaciones (CRU).

De las simulaciones numéricas realizadas con el modelo WRF se utilizó un período de 4 años (1996-1999), considerando que su resolución temporal es de una hora, se tiene un total de $24 \times 365 \times 4 = 35,040$ registros por variable por nivel para este período. Para realizar las comparaciones con las observaciones de CRU, se calcularon promedios mensuales para reproducir el ciclo anual. Estos cálculos se realizaron tanto para la precipitación,

como para la temperatura media, máxima y mínima en ambas regiones del norte. En el caso de la precipitación, en el ciclo anual en el noreste se observa una distribución bimodal (Figura 35), con máximos en junio y agosto y un mínimo relativo en julio, esta distribución temporal no es reproducida por ninguna combinación de modelos regionales forzados con globales, sin embargo, cuantitativamente, la combinación de los modelos WRF-CGCM3, sobre todo, de agosto a noviembre, la combinación WRF-CCSM y WRF-NCEP subestiman y sobre-estiman la precipitación respectivamente entre mayo y octubre, período de mayor precipitación en la región.

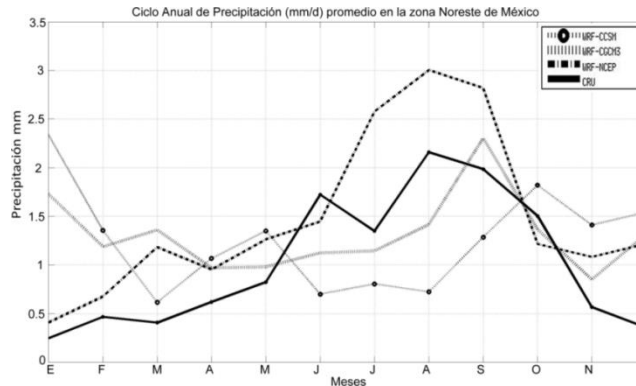


Figura 35. Ciclo anual de precipitación en la región noreste utilizando regionalización dinámica con el modelo WRF forzado con CCSM, CGCM3 y NCEP.

Por otra parte, la temperatura máxima, para la misma región del noreste es subestimada por las tres combinaciones de modelos, siendo similar en todos los casos la distribución temporal, con máximos entre mayo y agosto (Figura 36). La fuerte subestimación en la temperatura máxima ha sido persistente tanto en los modelos del CMIP3 como en CMIP5 en todo México, y por lo visto, los modelos regionales no pueden mejorar este sesgo (Figura 34).

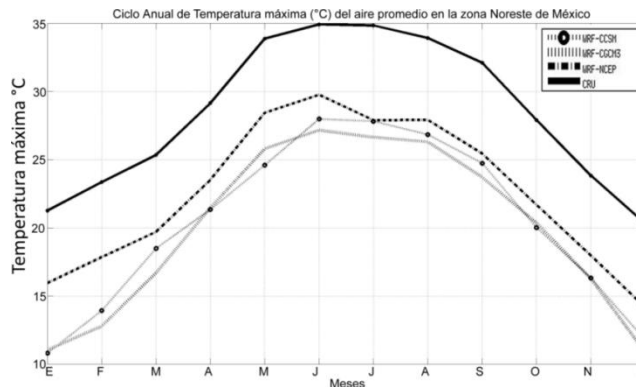


Figura 36. Igual que Fig. 35 pero para temperatura máxima.

Para la temperatura mínima, existe menos dispersión entre las combinaciones de modelos (Figura 37), mostrando de igual forma una distribución unimodal, con máximos entre junio y agosto, siendo WRF-CGCM3 los modelos que más se aproximan a las observaciones.

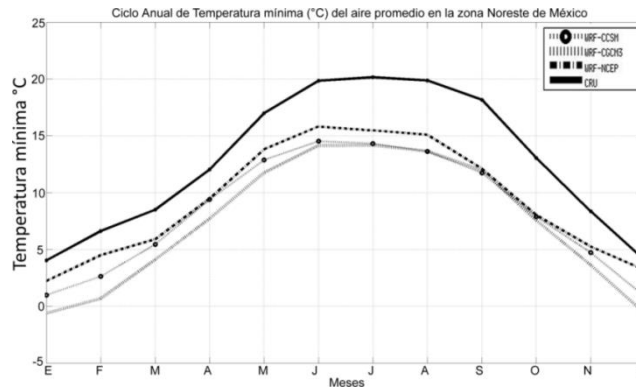


Figura 37. Igual que Fig. 35 para temperatura mínima.

Para la temperatura media (Figura 38) en la misma región se mantiene el desempeño de las combinaciones de modelos, con todas las combinaciones de modelos subestimando esta variable.

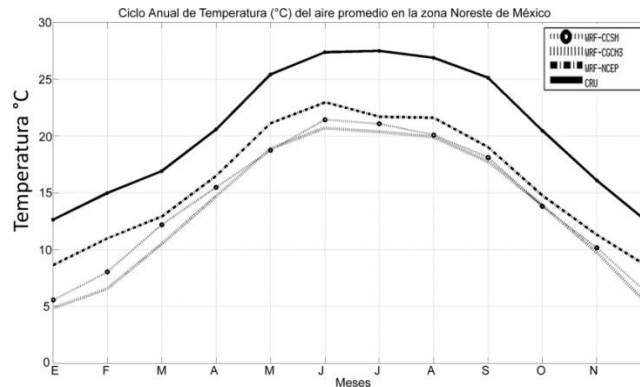


Figura 38. Igual que Fig. 35 para temperatura media.

Para la región noroeste, la distribución temporal de precipitación alcanza un único máximo entre julio y agosto (Figura 39), comportamiento típico del ciclo anual del monzón, sin embargo, ninguna de las tres combinaciones de modelos se aproxima ni cualitativa ni cuantitativamente a las observaciones, en todos los casos subestiman la precipitación, observándose que los modelos globales de CMIP5 poseen mejor desempeño que los de CMIP3 regionalizados dinámicamente con WRF (en comparación con la Fig. 5 del segundo informe del presente proyecto), esto puede deberse a que los efectos estacionales del monzón son una suma de procesos de escalas regionales y locales cuyos efectos no son capturados por los modelos globales que están forzando al modelo regional WRF, el cual tampoco es capaz de generarlos a escala fina. La subestimación en la precipitación puede deberse a que los modelos globales están demasiado fríos (Figuras 40-42), lo cual podría generar un retraso en el monzón, como lo sugerido por Cavazos y Arriaga-Ramirez (2012).

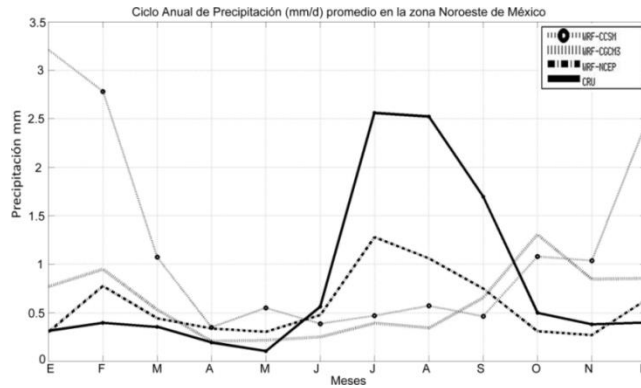


Figura 39. Ciclo anual de precipitación en la región noroeste utilizando regionalización dinámica con el modelo WRF forzado con modelos globales.

En cuanto a la temperatura media para la misma región noroeste, el ciclo anual muestra un máximo único entre mayo y septiembre, este máximo es reproducido cualitativamente por todas las combinaciones de modelos (Figura 40), sin embargo son subestimadas en todas las combinaciones de modelos, para el invierno (diciembre a marzo) la combinación de modelos WRF-CCSM sobre-estima la precipitación, representando el peor desempeño de todas las combinaciones.

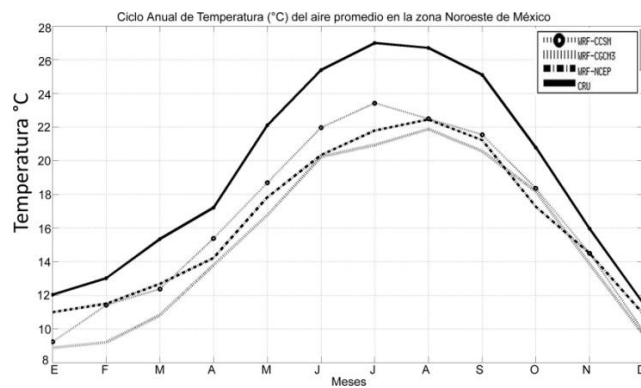


Figura 40. Igual que Fig. 39 para temperatura máxima.

Por otra parte, la temperatura mínima en el noroeste es mejor reproducida por el modelo WRF en todas sus combinaciones con modelos globales (Figura 41), aunque también subestiman en los meses de mayores valores (agosto a octubre).

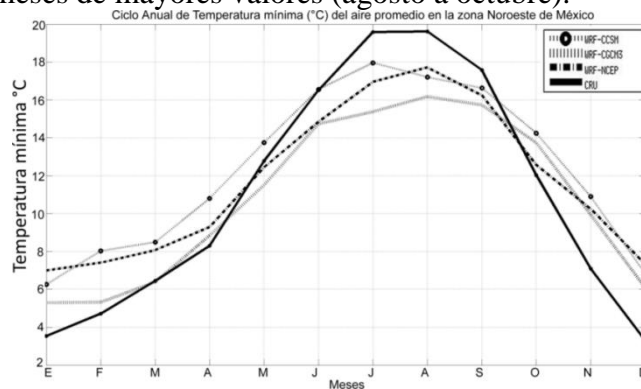


Figura 41. Igual que Fig. 39 para temperatura mínima.

Finalmente, para la temperatura media en el noroeste, los modelos la subestiman de igual forma (Figura 42), no obstante reproducen cualitativamente la distribución unimodal observada.

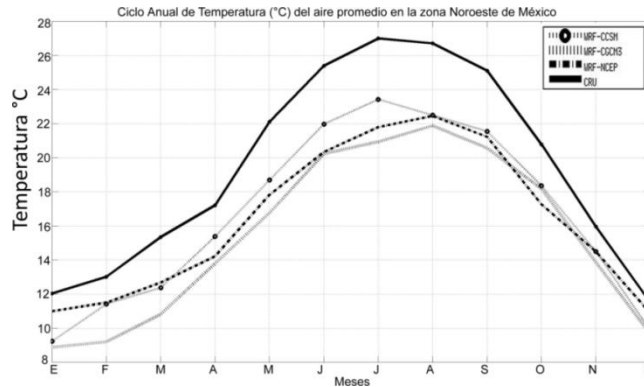


Figura 42. Igual que Fig. 39 pero para temperatura media.

Los errores de la reducción de escala aplicada en NARCCAP para las dos zonas del norte de México se estimaron utilizando las mismas métricas aplicadas en el segundo reporte (desviación estándar: std, error cuadrático medio: RMSE, error medio absoluto: MAE y correlación en tiempo: r), esto se calculó a cada una de las combinaciones de modelos global-regional. Para el noroeste se observa que la combinación con mayor variabilidad es WRF-CCSM (barra azul) y la menor para WRF-NCEP, las observaciones poseen una desviación estándar que está numéricamente entre ambas (Fig. 43). Respecto al error cuadrático medio, el menor valor lo tiene WRF-NCEP y el mayor WRF-CCSM, esta relación se refleja en el error medio absoluto y la correlación, que es mayor con WRF-NCEP. Para el noreste a pesar de que la desviación estándar de WRF-NCEP es mayor, se conserva cualitativamente el desempeño relativo de las tres combinaciones de modelos, siendo en ambas regiones, la combinación de los modelos WRF-NCEP la de mejor desempeño.

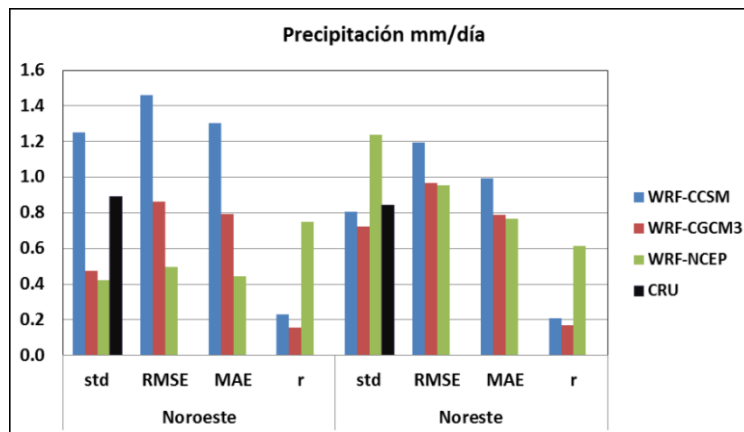


Figura 43. Errores calculados mediante métricas entre simulaciones regionalizadas y observaciones.

Para la temperatura máxima, media y mínima se mantiene la misma relación entre el desempeño de los modelos y las observaciones (Figs. 44 a 46), los menores errores se mantienen en la combinación WRF-NCEP, como en precipitación, aunque en esta variable el desempeño del resto de las combinaciones son mejores, acercándose al valor de la correlación siendo muy similares en los tres casos.

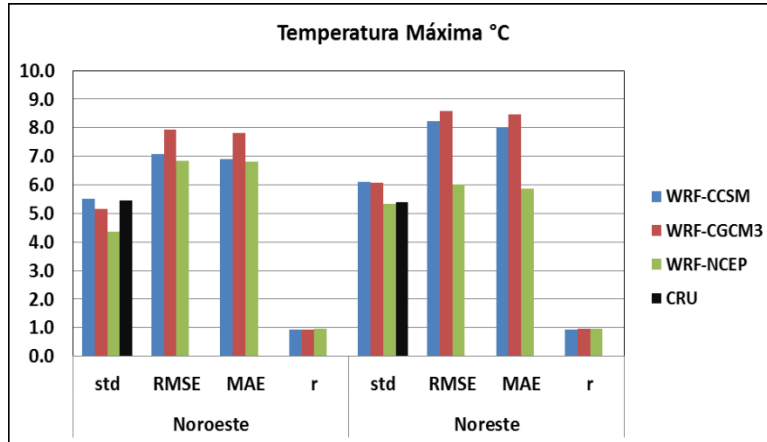


Figura 44. Igual que para Fig. 43 para temperatura máxima.

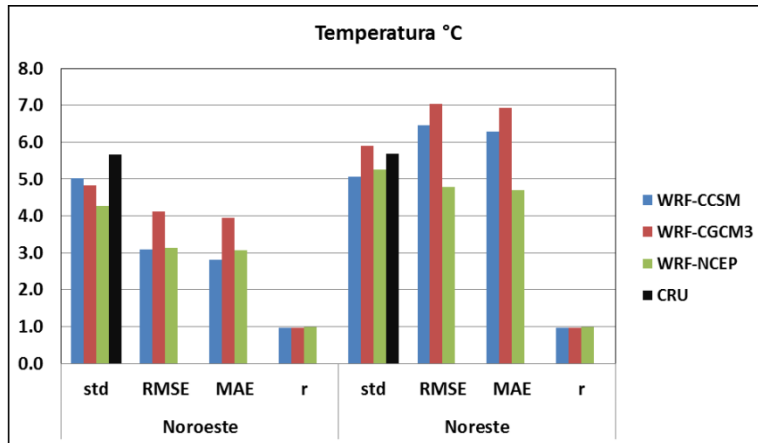


Figura 45. Igual que para Fig. 43 para temperatura media.

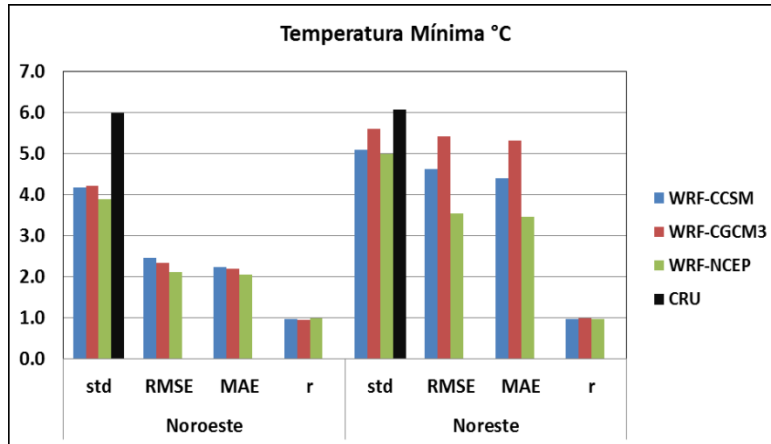


Figura 46. Igual que para Fig. 43 para temperatura mínima.

Respecto a lo que espera en el futuro con el escenario A2 en la temperatura media para la región de NARCCAP con el modelo global CCSM, en la Figura 47 se presenta la diferencia del período a futuro 2041-2070 respecto el período histórico 1971-2000, notándose que tanto para el verano como el invierno todos los valores sobre la región son positivos, sobre México se observan regiones con valores positivos en el futuro cercanas a 2.5°C y en verano de 2 a 2.5°C, únicamente se observa una diferencia de cero en una pequeña región sobre el Pacífico del Este.

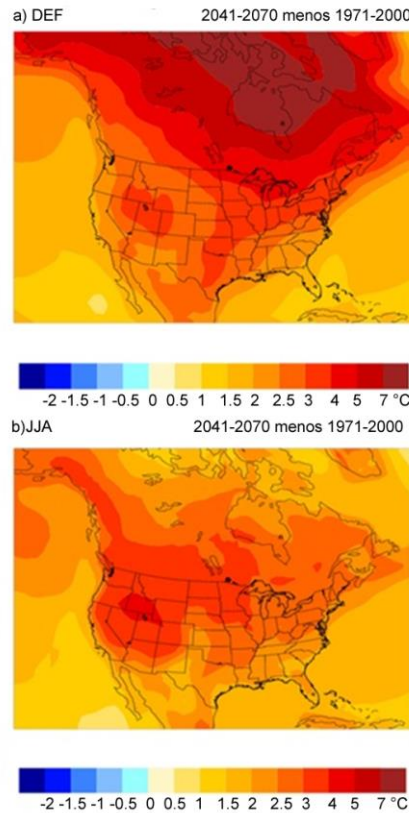


Figura 47. Cambio estacional de la temperatura media estimado con el modelo CCSM, a) Invierno: DEF, b) Verano: JJA

Para estimar los efectos de la regionalización dinámica utilizando la combinación de modelo MM5 forzado con CCSM, se calculó la diferencia entre el período 2041-2070 respecto al período histórico 1971-2000. Se observan temperaturas más cálidas en el futuro pero menores que las estimadas con el modelo CCSM sin regionalizar, de menor intensidad en verano, mientras que para el invierno en la porción sureste de la región se estima menor calentamiento respecto al período histórico (comparar Figura 47b con Figura 48b).

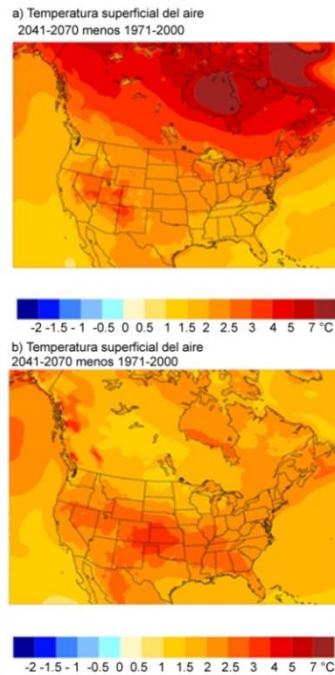


Figura 48. Cambio estacional de la temperatura media estimado con el modelo MM5 forzado con el modelo CCSM, a) DEF, b) JJA.

Para el caso de la precipitación invernal, el modelo CCSM estima menor cantidad para el período 2041-2070 respecto al período 1971-2000 para la zona de México y sur de EU, (Figura 49) mientras que para verano se estima mayor precipitación que respecto al período histórico indicado.

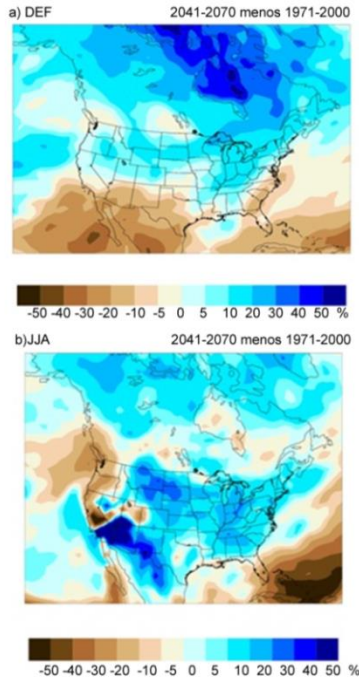


Figura 49. Cambio estacional de la precipitación media proyectada por el modelo CCSM, a) DEF, b) JJA

Utilizando resultados de la regionalización con el modelo WRF forzado con el modelo CGCM3, tanto para el invierno como el verano se estima una menor precipitación sobre el territorio mexicano desde el 30% hasta el 50% en regiones del noroeste mexicano, sobre todo la zona del monzón de Norteamérica. Este último resultado (Figura 50b) está contrapuesto con lo que se estima sin regionalizar dinámicamente (Figura 49b), donde se estima mayor precipitación de verano en la zona mexicana. Este es un ejemplo, en donde la regionalización puede cambiar drásticamente los resultados del modelo con el cual fue forzado.

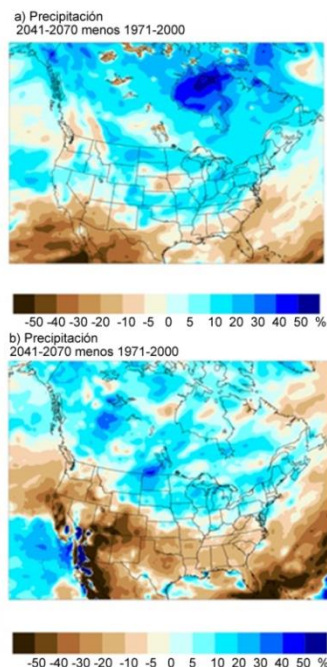


Figura 50. Cambio estacional de precipitación media estimado con el modelo WRF forzado con el modelo CGCM3, a) DEF, b) JJA.

3. Organización del Taller: Regionalización dinámica de escenarios de cambio climático utilizando el modelo WRF.

En las instalaciones del IMTA (Centro de Capacitación) del 24 al 27 de septiembre 2012 se llevó a cabo un curso-taller para usuarios del modelo WRF consistente en simular numéricamente la dinámica regional utilizando escenarios de cambio climático derivados del experimento de intercomparación llamado CMIP5.

Instructores: Dr. Robert Oglesby (Universidad de Nebraska, Lincoln)

Dr. Clinton Rowe (Universidad de Nebraska, Lincoln)

Número de participantes: 24.

Objetivos del taller

Ofrecer a los participantes una introducción a:

- 1) La configuración y ejecución del modelo regional WRF para hacer reducciones de escala a partir de simulaciones de escenarios de cambio climático derivada de información de los modelos de circulación general.
- 2) El procesamiento y análisis de resultados de la reducción de escala dinámica en regiones específicas.
- 3) El uso de resultados conjuntamente con la evaluación de impactos (IAM, por sus siglas en inglés) y otras herramientas para entender y establecer medidas de adaptación en la región de estudio.

Metas del taller

Ofrecer un entrenamiento práctico en el uso de modelos climáticos regionales para reducir la escala dinámica a las proyecciones de cambio climático para México.

Descripción del taller

Los modelos de circulación general (MCG) son la mejor herramienta con que se cuenta en la actualidad para entender y generar escenarios de cambio climático para las siguientes décadas. Debido a la gran cantidad de cálculos que se deben hacer en cada punto de malla, se requieren computadoras de alto rendimiento para ejecutar modelos adecuadamente, a pesar de ello, los modelos globales tienen una resolución burda, de aproximadamente 150 km. Esta resolución es útil 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 de 100 km. Para describir estos procesos, se han desarrollado herramientas para la reducción de escala, basadas tanto en métodos estadísticos, como dinámicos, estos últimos se utilizan en modelos numéricos y serán abordados en este taller.

La reducción de escala dinámica requiere de modelos climáticos regionales, los cuales pueden ejecutarse a muy altas resoluciones espaciales (12 km, aproximadamente), simulando la dinámica del clima regional en zonas limitadas por las mallas seleccionadas. Dado que el clima posee una naturaleza global, estos modelos regionales deben forzarse con condiciones iniciales y de frontera provenientes de modelos globales. A pesar de que los modelos globales puedan representar el clima de siglos, los regionales solamente pueden simular algunos años.

En este taller se utilizó el modelo regional WRF (Weather Research and Forecasting), ya que es el más utilizado y mejor documentado del mundo. Los participantes experimentaron con la configuración de este modelo para generar los dominios de interés, balanceando resoluciones con el tamaño de la malla generada. Se mostró cómo generar simulaciones de control forzadas con observaciones (datos de Reanálisis de NCEP) para evaluar el desempeño del modelo en la región seleccionada para el clima presente. El participante obtuvo herramientas para seleccionar simulaciones derivadas de modelos globales para forzar el modelo regional bajo escenarios de cambio climático de su interés, ejecutar el modelo y tareas cruciales del procesamiento y análisis de los voluminosos archivos generados con el modelo WRF.

El taller se basó en entrenamientos prácticos del uso de modelos, análisis e interpretación de resultados, particularmente en el uso de los nuevos resultados derivados de los modelos del CMIP5 que serán utilizados en el AR5 del IPCC. Además, se analizaron las herramientas para el análisis de los resultados del modelo WRF mediante ejemplos reales.

La componente práctica se complementó con clases teóricas que brindaron elementos de ciencia básica y técnicos tanto de los modelos como de la dinámica del clima.

Índice temático del taller.

1. Descripción de los modelos climáticos regionales y globales.
2. Selección de dominios y configuración de ejecuciones de control para reproducir el clima regional actual.
3. Desarrollo de simulaciones bajo escenarios de cambio climático:
 - a) Selección del modelo global.
 - b) Determinación del período de tiempo de interés.
 - c) Simulaciones de control y experimentales y comparaciones.
4. Procesamiento y análisis de simulaciones regionales
5. Uso de simulaciones regionales para evaluación de impactos.

Alcances

Al completar el taller, los participantes adquirieron habilidades para:

1. Entender cómo configurar y ejecutar el modelo WRF para el dominio seleccionado.
2. Analizar y procesar las simulaciones regionales.
3. Integrar los resultados de simulaciones regionales con la evaluación de impactos



Figura 51. El instructor define los alcances y limitaciones del taller.



Figura 52. Participantes del taller y trabajo en equipos.



Figura 53. Analizando resultados y trabajo en equipos.

Justificación e importancia del taller.

Por sus resoluciones espaciales, los modelos numéricos globales no describen adecuadamente el clima regional actual o el asociado a diferentes escenarios de cambio climático, siendo además fundamental incluir procesos atmosféricos locales, esto se logra con las reducciones de escala dinámica utilizando modelos climáticos regionales. Para Norteamérica. El proyecto NARCCAP regionalizó dinámicamente escenarios de cambio climático, pero tiene dos desventajas para México: la primera es que el dominio no incluye el sur y sureste de México y la segunda es que solamente se utilizó el escenario A2, existiendo más y nuevos escenarios, siendo ambas limitantes para que sea de utilidad en México. Además, algunos de los MCG utilizados para forzar los modelos regionales no son los más adecuados para simular los mecanismos sinópticos y estacionales que afectan a México, como el monzón.

De ello se desprende claramente la necesidad de construir capacidades en México para realizar regionalizaciones de acuerdo a necesidades locales, seleccionar regiones, escenarios, modelos, configuraciones, etc., que detonarán en más y mejor información para evaluar impactos.

La información (datos de modelos globales forzados bajo diferentes escenarios y programas para correr el modelo WRF, así como el modelo WRF) quedó almacenado en el equipo de cómputo de alto rendimiento del IMTA, donde podrán reproducirse los ejercicios realizados durante el taller, no obstante este ejercicio requiere de una planeación del uso del equipo de alto rendimiento, ya que se requiere de gran capacidad de poder de cómputo y de almacenamiento masivo de información.

Síntesis de la discusión final entre todos los participantes.

Al concluir el taller se abrió una discusión final con duración aproximada de dos horas, donde se abordó el tema de la capacidad de cómputo insuficiente para México y de la necesidad de optimizar los recursos disponibles, se propuso elaborar una “pregunta clave” como la incertidumbre inherente al uso de modelos numéricos y su aplicación a

estudios de cambio climático, se sugirió además elaborar un diagnóstico de las fortalezas y debilidades en cuanto a la capacidad de realizar un gran proyecto de regionalización dinámica tanto enfocado a cambio climático como conocer mejor la dinámica atmosférica local intentando reducir las incertidumbres asociada a los modelos.

Se habló también de orientar los experimentos numéricos a evaluar la capacidad de reproducción de eventos atmosféricos conocidos y de alto impacto, como la migración estacional de la zona de convergencia intertropical, el Niño, las ondas del este, los huracanes, los frentes fríos y sus nortes asociados, sequías, etc.

Se abordó la pobre contribución que tuvo NARCCAP para la región mexicana, siendo importante un diseño de experimento orientado a México aprovechando el avance en ciencia y tecnología, como el modelo WRF, excelentemente documentado, en México hay varios grupos usuarios de este modelo y debe aprovecharse.

Se habló de la posibilidad de realizar un segundo taller en 2013, dándole seguimiento a los avances que puedan lograr los participantes para entonces, remarcando las habilidades del modelo WRF y sus debilidades para reproducir la dinámica atmosférica sobre México. Se mencionó que una de las debilidades mayores en México es la falta de recursos humanos tanto en actividades científicas como operativas y se invitó a los representantes de las universidades en este taller (UNAM, U de G, UV, CICESE) a involucrarse con su alumnos, acercándolos a este tipo de proyectos para entrenamientos específicos. Los instructores resaltaron la motivación identificada en este grupo y los invitó a aprovecharlo en proyectos futuros. Se mencionó explorar la posibilidad de utilizar a REDESClim, la Red Mexicana de Modelación del Clima y al INE como promotores de relaciones inter-institucionales para lograr este proyecto de regionalización dinámica buscando opciones de financiamiento tanto nacional como internacional. Se acordó explorar la escritura de un borrador de propuesta de proyecto de regionalización dinámica identificando opciones de financiamiento.

4. Página WEB de consulta de resultados

Los resultados relevantes del proyecto se podrán consultar en una página WEB dinámica, la cual está organizada de la siguiente manera: encabezado, menú principal, y submenús. El encabezado contiene los logos de las 6 instituciones que participaron en este proyecto: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, México (PNUD), Instituto Nacional de Ecología (INE), Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE), Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA).

En la sección baja del encabezado se encuentra el menú principal que contiene: inicio, métricas, escenarios, índices extremos, enlaces de interés y contacto (Figura 61). Dentro de cada módulo existen diferentes tipos de información, como documentación técnica de las bases de datos utilizadas, algunos cálculos para medir el desempeño de los modelos o

descarga de gráficos y datos. En las secciones siguientes se describirá cada uno de los módulos mostrados en la Figura 54 con mayor detalle.

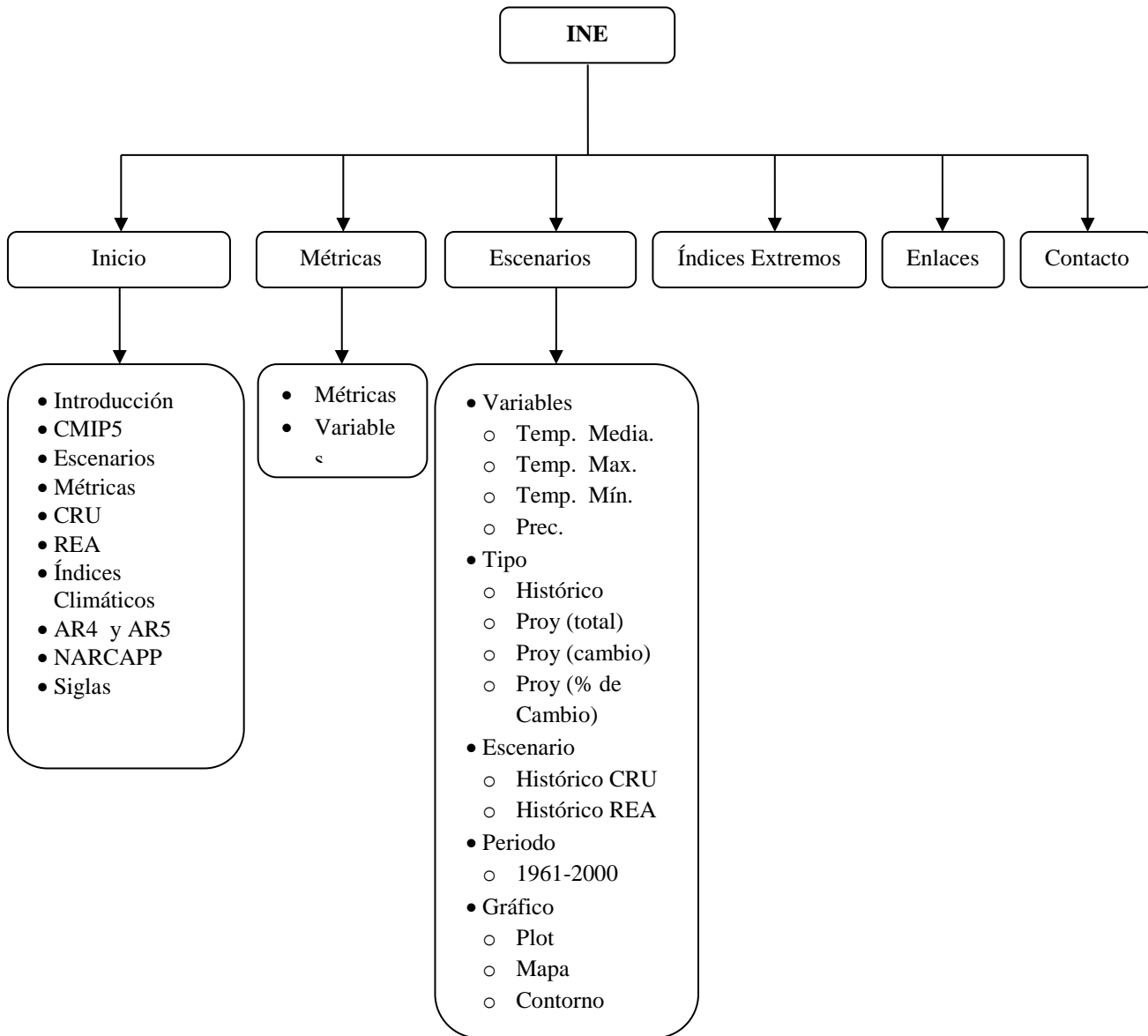


Figura 54. Esquematización de la página web

Inicio

En este apartado aparece información general referente al proyecto. En la parte izquierda se encuentra un submenú del cual se pueden seleccionar tópicos referentes a la página y en la sección derecha son descritos brevemente (Figura 55).

Los temas y submenús disponibles son los siguientes:

- Introducción
- CMIP5
- Escenarios
 - Conceptos
 - Escenarios de emisiones
 - Modelos de Circulación General
- Métricas
 - Diagramas de Taylor
 - Errores
 - Ciclo Anual
- CRU
- REA
- Índice Climático
- AR4 y AR5
- NARCAPP
- Siglas

The screenshot shows the main page of a website. At the top, there is a header with logos for SEMARNAT, PNUD, CICESE, IMTA, and UNAM. Below the header is a navigation menu with the following items: Inicio, Métricas, Escenarios, Indices Extremos, Enlaces de Interés, and Contacto. The 'Inicio' menu is currently selected. On the left side, there is a sub-menu titled 'Información General' with the following items: Introducción, CMIP5, Escenarios, Métricas, CRU, REA, Índice Climático, AR4 y AR5, NARCAPP, and Siglas. The main content area displays the title 'Actualización de escenarios de cambio climático para México' and two paragraphs of text. The first paragraph states that the institutions forming the Mexican Climate Modeling Network (CICESE, IMTA, CCA-UNAM) coordinated the National Institute of Ecology (INE) and funded by the United Nations Development Programme (PNUD), updated the climate change scenarios for Mexico using information from the General Circulation Models (GCMs) participating in the CMIP5 experiment (Phase 5 Intercomparison Project). The second paragraph states that this information is dynamically displayed on this website and will be part of the products of the Fifth National Communication considered for the Fifth Intergovernmental Panel on Climate Change Assessment Report.

Figura 55. Página principal; Menú 'inicio' –submenú Información general

Métricas

En esta sección se puede acceder a los resultados del desempeño de 15 MCG participantes del CMIP5 y el promedio ponderado de éstos (REA) mediante la aplicación de métricas para el período histórico de 1961 a 2000 en las variables: precipitación, temperatura, máxima y mínima, comparando los resultados con los datos históricos del CRU.

Por la ubicación geográfica y la abrupta orografía de México, los fenómenos meteorológicos que impactan al norte o sur del país son diferentes, así como sus efectos. Debido a lo mencionado anteriormente se calcularon las métricas en cuatro zonas: Noreste, Noroeste, Sur y Sureste. Las gráficas de las métricas a consultar en la página son: Diagramas de Taylor, ciclo anual y errores.

La sección de métricas se encuentra organizada en base al diagrama de la Figura 56; Dicho diagrama fue utilizado para elaborar la interfaz gráfica (Figura 55). En la cual se pueden seleccionar las métricas, las variables y las zonas, las dos primeras mediante “cajas de selección” y las últimas (previamente dibujadas en el mapa) mediante un clic sobre la imagen.

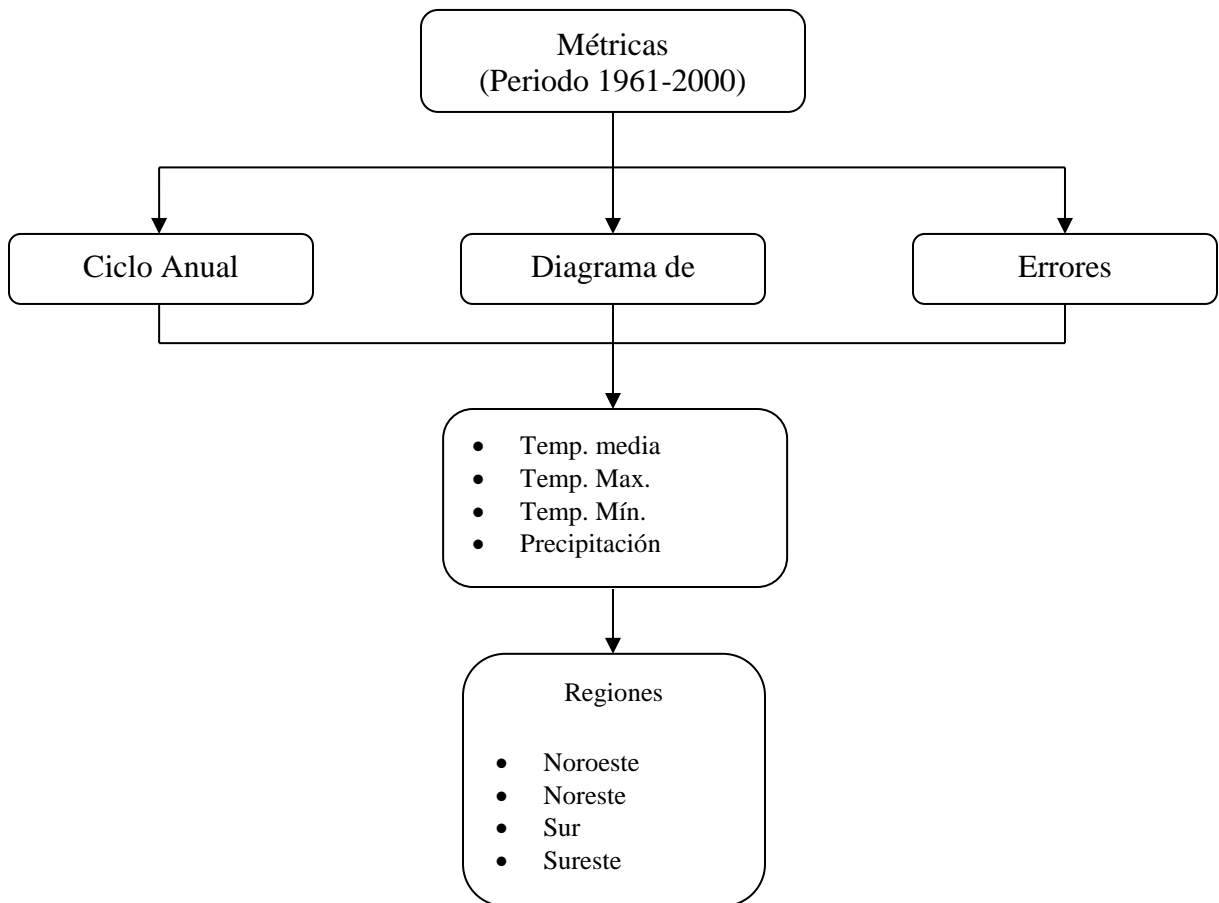


Figura 56. Diagrama estructural de métricas



Figura 57. Áreas de evaluación de las métricas

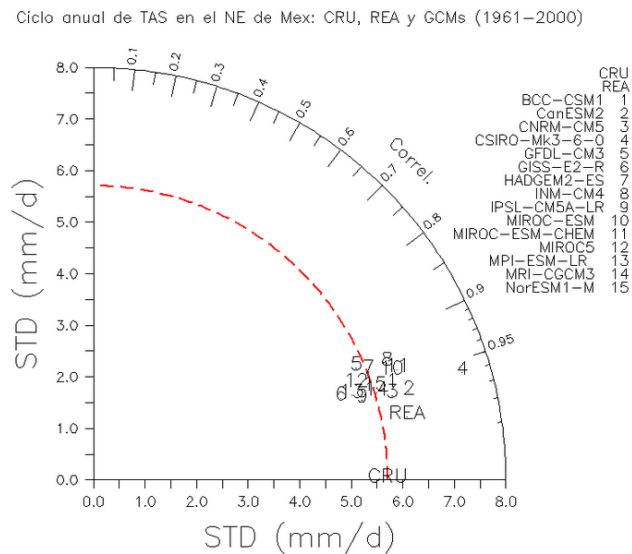


Figura 58. Ejemplo de Diagrama de Taylor para la variable de temperatura media en el periodo de 1961-2000 para la zona noroeste de México

En las Figuras 58, 59 y 60 se muestran ejemplos de los gráficos que se pueden descargar (elaborados previamente) para cada métrica y variable.

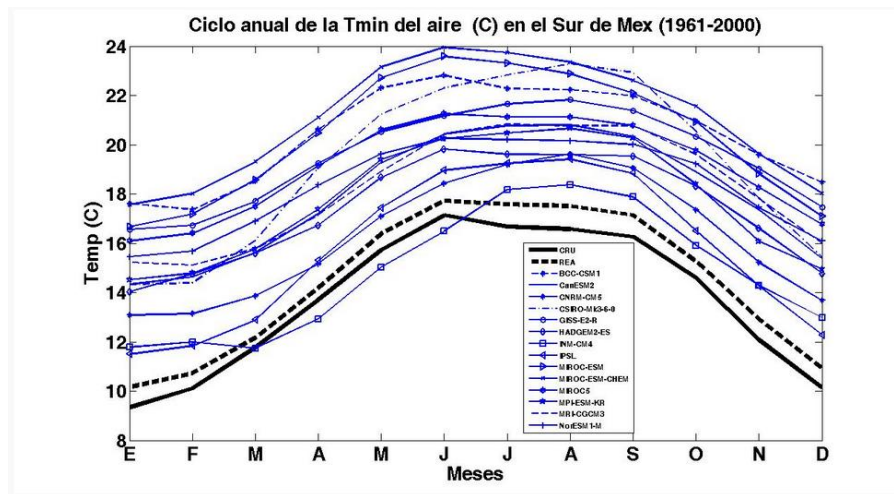


Figura 59. Ejemplo de ciclo anual para la variable de temperatura mínima en el periodo de 1961-2000 para la zona sur de México

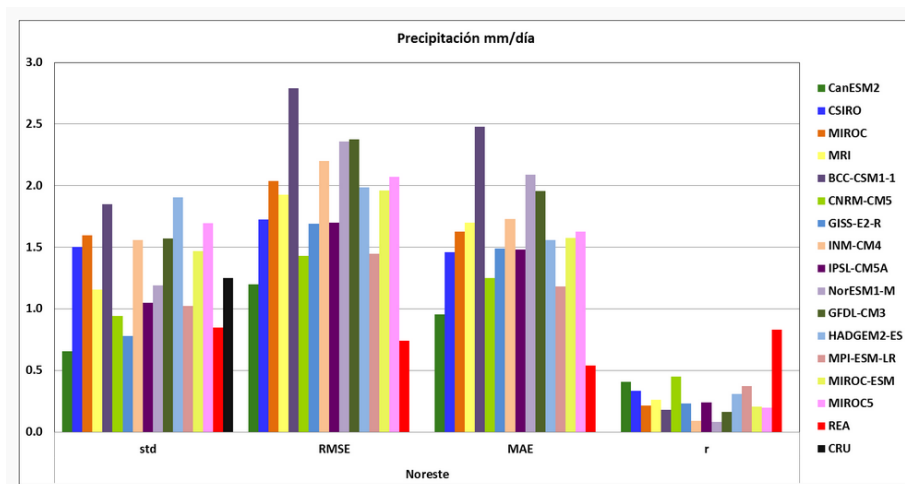


Figura 60. Ejemplo de Errores para la variable de precipitación para la zona noreste de México

Escenarios

En esta sección se encuentran los datos generados por el método REA para cuatro variables (Temperatura media, temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación) en simulaciones históricas (1961-2000) y proyecciones futuras (2015-2039 y 2075-2099) en tres escenarios de forzamientos de radiación: RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5. Las proyecciones se pueden visualizar de tres modos cambio (o anomalía), total (histórico + cambio) y porcentaje de cambio.

La consulta en este módulo se realiza en tres secciones: 1) Consulta, donde se seleccionan de las variables, el escenario y el periodo, 2) las opciones de gráfico, si se quiere una gráfica lineal (plot) o un mapa (con colores o contornos) y 3) selección de la zona (coordenadas), donde el usuario puede agregar las coordenadas, o en su caso, trazar el área en el mapa (con ayuda de mouse). La estructura del módulo de escenarios se muestra en la Figura 61 y en la Figura 70 las opciones de gráfico (complemento de la Figura 68).

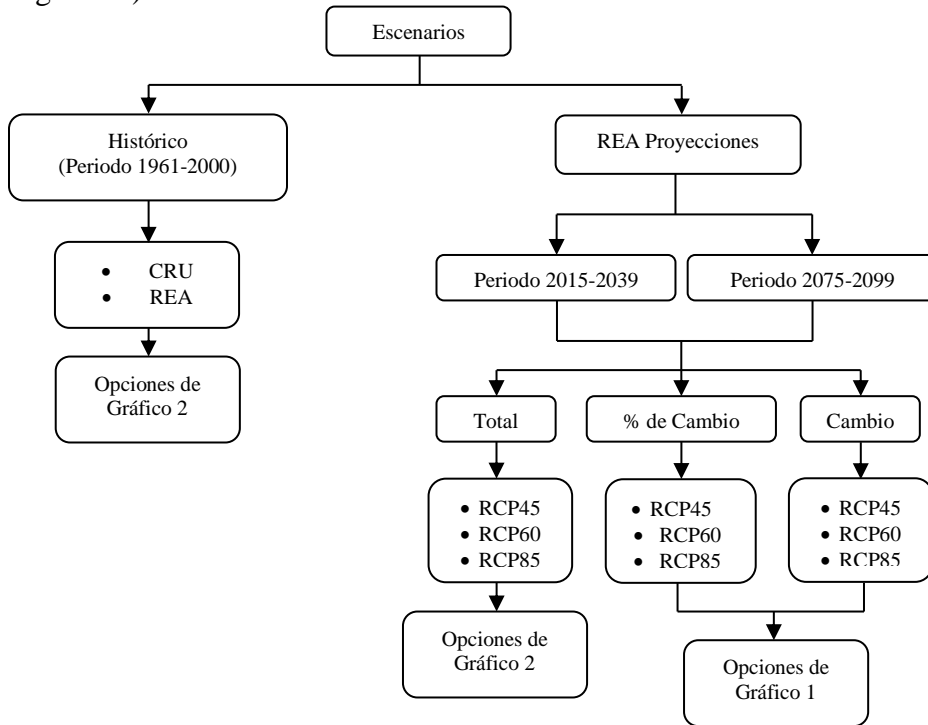


Figura 61. Esquematzación y funcionamiento del módulo de ‘escenarios’.

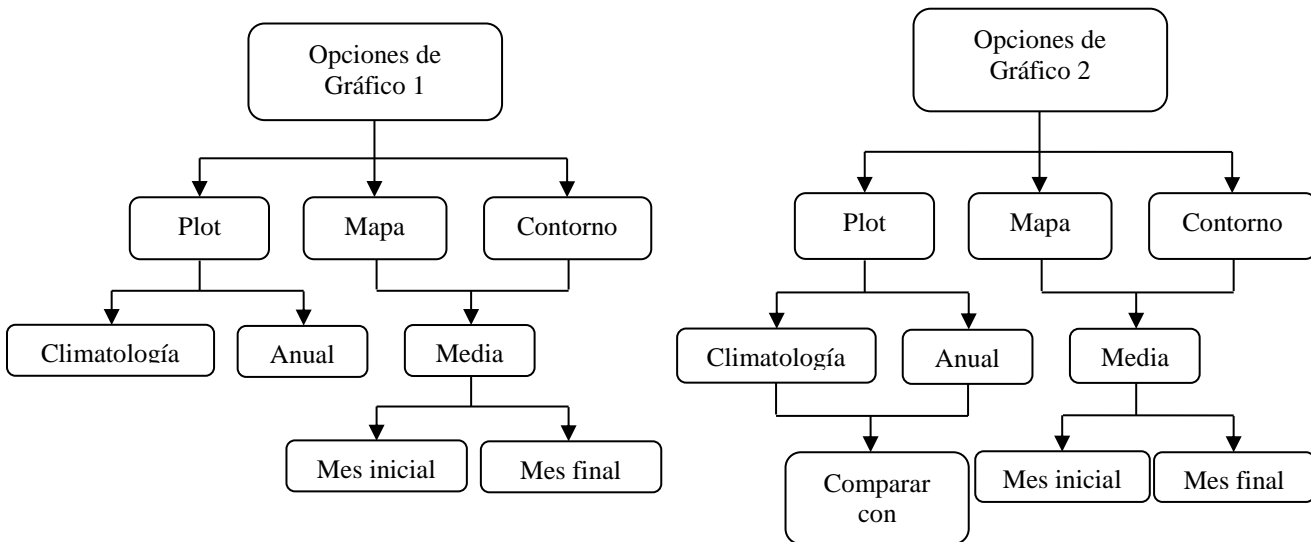


Figura 62. Opciones de gráfico (complemento de la Figura 61).

La interfaz gráfica del módulo de escenarios se muestra en la Figura 63. Este módulo se encuentra basado en los diagramas mostrados en las Figuras 61 y 62.



Figura 63. Módulo de escenarios.

Índices extremos

La sección de índices climáticos permite consultar e identificar cambios en la frecuencia, intensidad y en los umbrales de los eventos extremos, los cuales son importantes para la sociedad humana y los diferentes ecosistemas ya que pueden presentarse fuera de los rangos de adaptabilidad habitual y producir un fuerte impacto en diferentes sectores.

Los índices disponibles en la página web son los listados en la Tabla 3. Los índices se calcularon primero para el REA y el CRU del periodo histórico (1961-2000). Posteriormente se hicieron los mismos cálculos para las proyecciones climáticas con la finalidad de cuantificar los cambios entre el pasado y futuro.

Tabla 3. Índices utilizados para cuantificar los cambios en los extremos tanto de temperatura como de precipitación. Los índices calculados son: número de meses extremos y umbrales de percentiles extremos.

Índices extremos		
Variable	Índice	Rango
Temperatura	Núm. de meses de verano	$T_{max} \geq 25^{\circ}\text{C}$
	Núm. de meses tropicales	$T_{max} \geq 30^{\circ}\text{C}$
	Núm. de meses extra cálidos	$T_{max} \geq 35^{\circ}\text{C}$
	Núm. de noches tropicales	$T_{min} \geq 25^{\circ}\text{C}$
	Núm. de meses con heladas	$T_{min} \leq 10^{\circ}\text{C}$
	Umbral de P10 ($^{\circ}\text{C}$)	10% de años más fríos
	Umbral de P90 ($^{\circ}\text{C}$)	10% de años más cálidos
Precipitación	Umbral de P10 (mm/d)	10% de años más secos
	Umbral de P90 (mm/d)	10% de años más húmedos

La interfaz gráfica del módulo de índices se muestra en la Figura 64, donde en la parte izquierda se encuentran “cajas de selección” para escoger el tipo de escenario, variable e índice. En la sección derecha aparecen las opciones a elegir.

Índices extremos			
Variable	Índice	Rango	
Temperatura	Núm. de meses de verano	Tmax > 25°C	
	Núm. de meses tropicales	Tmax > 30°C	
	Núm. de meses extra cálidos	Tmax > 35°C	
	Núm. De noches tropicales	Tmin > 25°C	
	Núm. de meses con heladas	Tmin < 10°C	
		P10	10% de años más fríos
Precipitación		P90	10% de años más cálidos
		P10	10% de años más secos
		P90	10% de años más húmedos

Figura 64. Módulo ‘Índices extremos’

Enlaces de Interés

En el módulo ‘enlaces de interés’ se encuentran además de las instituciones involucradas para la elaboración de este proyecto, otros sitios de crucial interés en el ámbito de cambio climático, como la página del CMIP5, del IPCC entre otras.



Figura 65. Módulo de ‘Enlaces de interés’

Contacto

El módulo ‘contacto’ fue diseñado para mostrar datos de las personas participantes del proyecto. Por razones de seguridad sólo son mostrados: el nombre, dirección electrónica y nombre del instituto que representa cada persona.



Figura 66. Módulo ‘contacto’

A continuación se detallan las características sobresalientes de la interfaz de usuario de la página WEB, así como su arquitectura, el flujo de información de la misma y su la relación entre sus componentes.

Arquitectura

Desde el punto de vista de la interfaz al usuario, se diseñó un sistema que se muestra en la Figura 67, y cuyos componentes se describen a continuación.

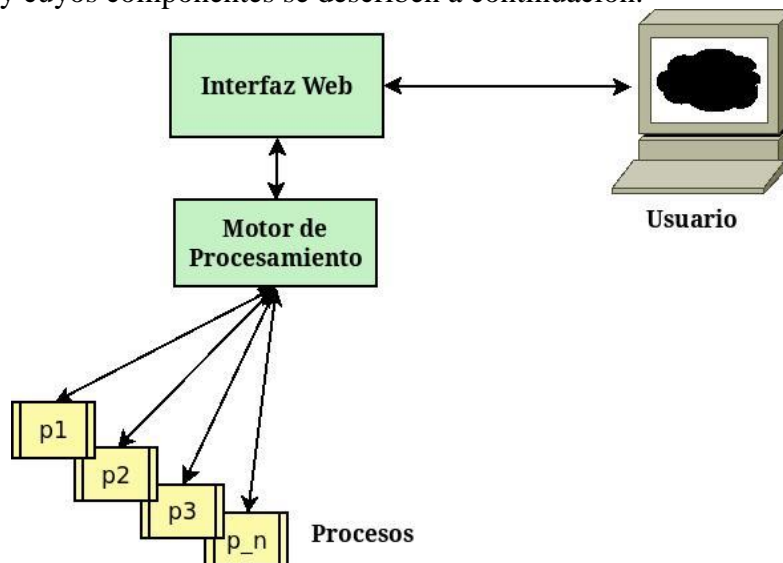


Figura 67. Arquitectura de la interfaz de consulta.

El usuario típico de la aplicación es uno que cuenta con un navegador Web que tenga acceso a la dirección IP en la que se instalará el sistema. El sistema se podrá instalar localmente en una Intranet o en una computadora personal, para su uso privado, o bien podrá instalarse en un servidor Internet, para su uso público.

Interfaz Web

La interfaz *Web* posee elementos gráficos y de texto que le permiten al usuario formular una consulta (o *jquery*, si se usa la terminología de las bases de datos). La apariencia del sitio en alguno de los momentos de la interacción es como se muestra en la Figura 68.



Figura 68. Apariencia de la interfaz *Web*.

La formulación de la consulta, la hace el usuario por medio de su interacción con la interfaz. Esto es, la selección de elementos en los menús, la especificación de algún área en un mapa, el oprimir algún botón, etc., todo ello constituye la construcción o formulación de una consulta.

La interfaz *Web* verifica la integridad de la consulta y de traducirla a un conjunto de variables y términos que son recogidos por el motor de procesamiento, de donde se obtiene una salida que le es presentada al usuario, como respuesta a su consulta y que puede consistir de gráficos, tablas, textos, etc.

El motor de procesamiento es la parte del sistema que se encarga de ejecutar las acciones necesarias para satisfacer la consulta del usuario. Para cumplir con eso, el motor tiene que invocar la ejecución de procesos especializados que consultan y manipulan los datos provenientes de las fuentes de información generadas a lo largo del presente proyecto.

Una vez ejecutados los procesos necesarios, el motor integra como su salida la respuesta que finalmente le será presentada al usuario por medio de la interfaz *Web*. La Figura 69 muestra una salida típica del sistema.

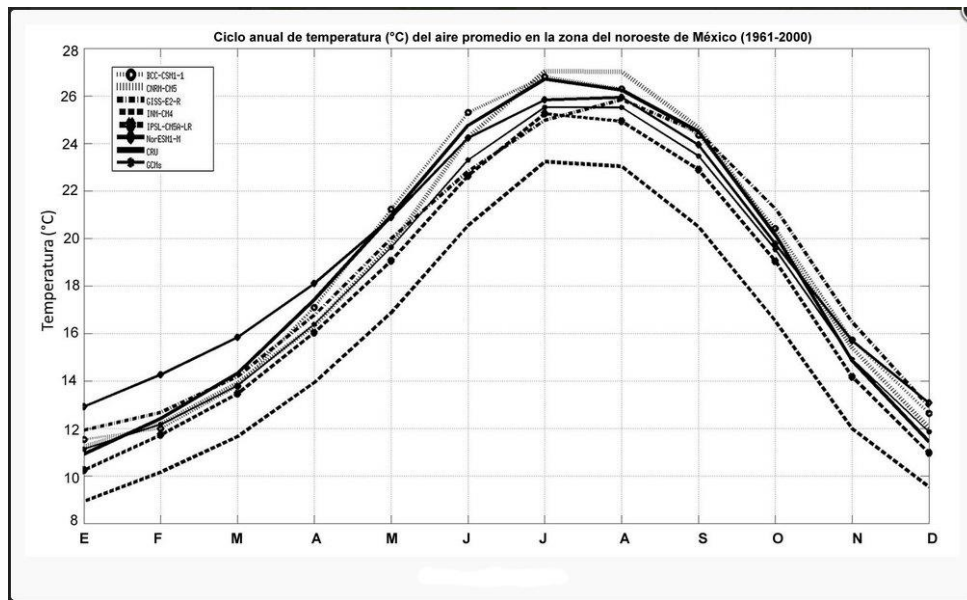


Figura 69. Ejemplo de respuesta a una consulta del usuario.

Los procesos pertenecen a un conjunto de programas, que en la Fig. 67 se han etiquetado como p_1 , p_2 , p_3 ,... p_n , que se encargan de consultar la información de las distintas fuentes elaboradas a lo largo de este proyecto y de transformar esa información en una respuesta que satisfaga la consulta del usuario. El sistema se ha planteado de una manera versátil, de tal forma que los procesos pueden estar escritos en distintos lenguajes de programación tales como grads, python, php, etc.

La interfaz al usuario se ha desarrollado como un sitio *Web*; esto es, como un conjunto de páginas *Web* que le brindan al usuario la posibilidad de introducir sus consultas y de visualizar y/o recuperar la información correspondiente a las respuestas a esas consultas. La descripción de la estructura y la funcionalidad de tal sitio se desarrolla en las siguientes secciones, y para ello se utilizará la herramienta gráfica de los mapas conceptuales desarrollados por el *Institute for Human & Machine Cognition*¹.

Los mapas conceptuales son grafos que consisten básicamente de dos elementos, a saber: nodos y aristas dirigidas. Tanto los nodos como las aristas van etiquetados y estas últimas además pueden ser múltiples, es decir, pueden tener varios orígenes y varios destinos. En la presente descripción, además del valor semántico de las etiquetas, se atribuirá de significado a todo elemento gráfico o visual, tales como la forma de los nodos, los colores empleados, los colores y tipografía de los textos, etc., esos significados están relacionados con la disposición de los elementos gráficos en el sitio *Web*, así como de las

¹ <http://cmap.ihmc.us>

acciones que se ejecutan al interactuar, el usuario, con dichos elementos. Para explicar la simbología utilizada nos serviremos de una sección completa de la interfaz, a saber, la correspondiente a Escenarios, cuyo mapa conceptual se muestra en la Figura 56, se incluye un resumen de la principal simbología utilizada.

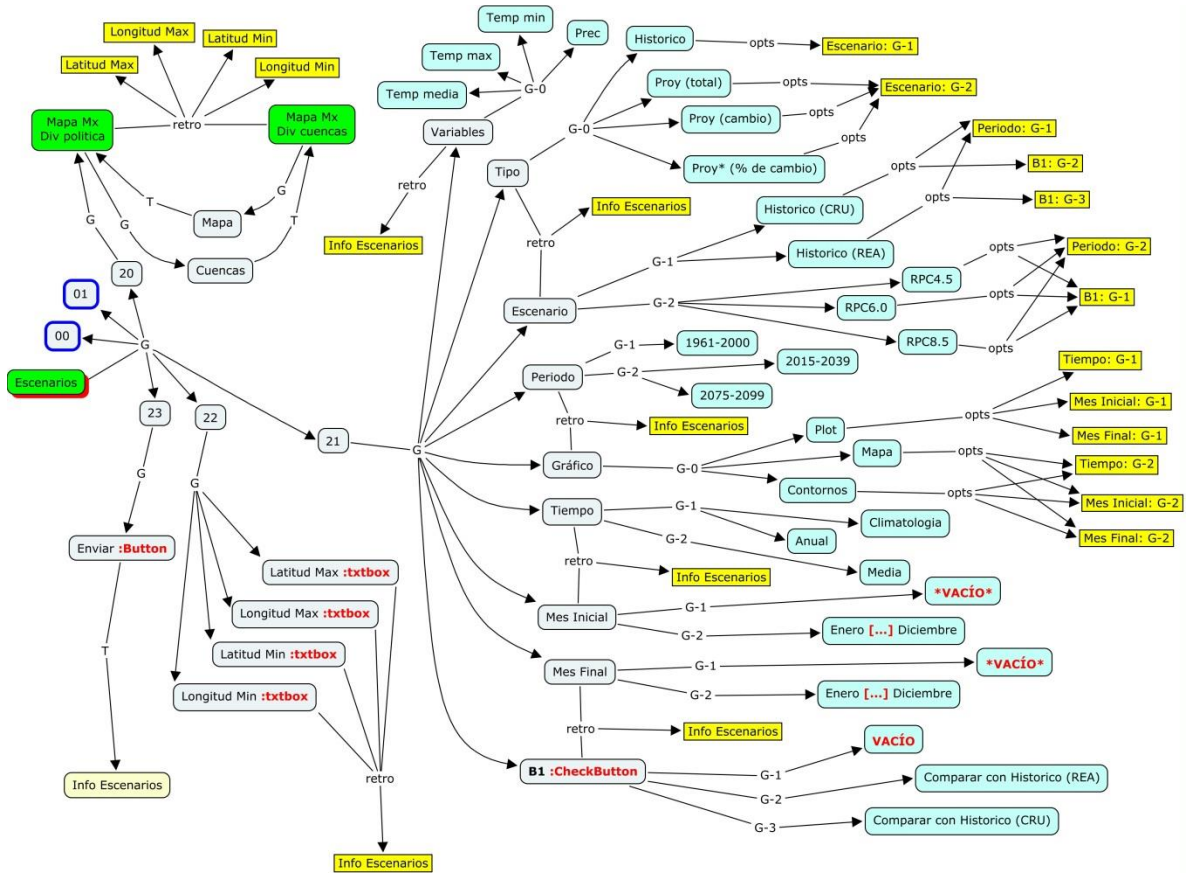


Figura 70. Estructura y funcionalidad de “Escenarios”.

En los párrafos siguientes, se describen las principales características de la simbología que se utiliza para describir la estructura y funcionalidad del sitio.

El Nodo de entrada es el nodo inicial del grafo, simbolizado como se muestra en la Figura 62 y representa la página de entrada a alguna sección del sitio Web. En el ejemplo que se está considerando y que se muestra en la Figura 70, este nodo es el que está etiquetado como “Escenarios”, el cual representa la página Web que se muestra en la Figura 71.

Subdivisión geométrica y transferencia directa.

En la Figura 79 se muestra la página correspondiente al nodo inicial de la estructura mostrada en la Figura 68. En la Figura, adicionalmente se ha subdividido la página en secciones rectangulares que se han numerado así: 00, 01, 20, 21, 22 y 23. Esta numeración corresponde a una subdivisión geométrica que se ha hecho de la página en

cuestión. La subdivisión puede ser arbitraria o corresponder en alguna medida con la funcionalidad.

En el gráfico de la Figura 70, la subdivisión geométrica se representa mediante una arista múltiple, de un solo origen y varios destinos, etiquetada con la letra “G”. Para una mayor comprensión de este concepto, en la Figura 80 se muestra una ampliación de la sección correspondiente a la subdivisión geométrica de la página *Web* mostrada en la Figura 72.

Otra característica de la estructura de subdivisión geométrica, es lo que se denomina *transferencia directa* en este documento tal como se muestra en la Figura 71. Se ha denominado de esta manera, porque los elementos de la subdivisión geométrica, son directamente visibles y accesibles desde la página representada por el nodo de origen, esto es, “Escenarios”, en el caso del ejemplo mostrado.

Los nodos de subdivisión, que en el caso de la Figura 73 son los etiquetados con 00, 01, 20, 21, 22 y 23, si no tienen mayor información tendrán el aspecto que se muestra en dicha Figura, pero pueden ser diferentes en otros casos, como el nodo etiquetado como “Mapa Mx Div Política”, mostrado en la Figura 70, y que es un nodo verde y que representa un sector de la página con información geográfica, en este caso.

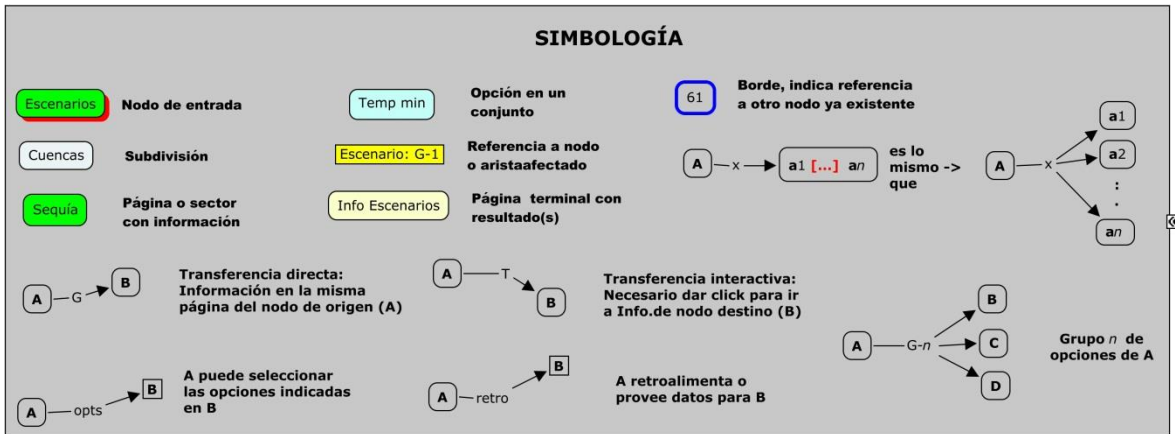


Figura 71. Los principales elementos de la simbología utilizada.

Figura 72. Página de entrada a “Escenarios” y su *subdivisión geométrica*.

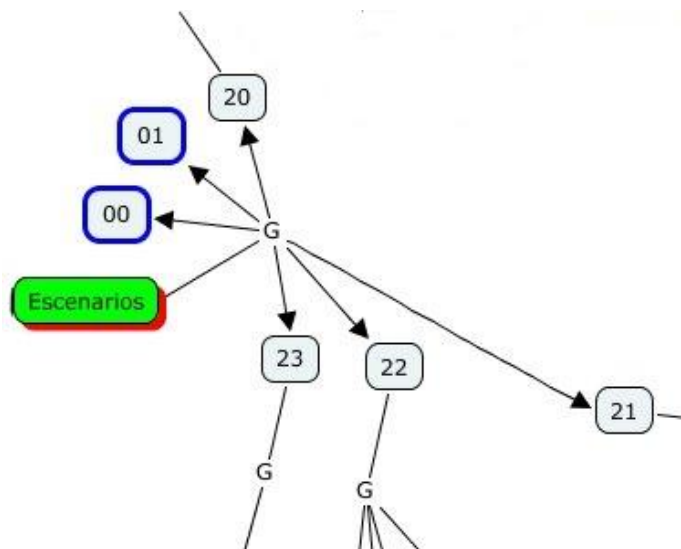


Figura 73. La estructura de la subdivisión geométrica de la página mostrada en la Figura

59

Dado que los diagramas que representan la estructura del sitio pueden resultar bastante complejos, es conveniente introducir referencias a nodos que se han definido en alguna otra parte del mismo diagrama o incluso en alguna otra parte. En la Figura 73, los nodos etiquetados con 00 y 01, tienen un borde azul diferente que los otros nodos. Ello indica que, como también se señala en la simbología de la Figura 71, la definición de esos nodos se encuentra en otra parte; en otro diagrama, en el caso del ejemplo presentado.

Las interfaces al usuario proveen diversas formas para agrupar opciones, entre las cuáles pueda seleccionar el usuario alguna para asignársela a alguna variable o categoría. Entre éstas formas se encuentran, por ejemplo, los *combo-boxes*, los sub-menús, los *radio-buttons*, etc. Un ejemplo de esto se muestra en la Figura 74, donde al oprimir en el ítem “Escenario” del menú izquierdo de la página de ejemplo, se despliega un *combo-box* con una secuencia de opciones entre las que se puede elegir una. Esto se ha resaltado en color rojo en la Figura.



Figura 74. Despliegado de opciones.

En el diagrama de estructura, esta situación se simboliza por medio de lo que en la simbología de la Figura 71 se ha denominado como “Grupo n de opciones de A”, y que para el caso mostrado en la Figura 81, se ilustra en la Figura 75. Debe notarse que la

Figura muestra dos grupos de opciones, a saber, el grupo G-1 y el grupo G-2, y que es este último al que corresponde lo desplegado en la Figura 75. El que en un ítem se despliegue uno u otro grupo de opciones, depende de consideraciones que se detallan más adelante, en la siguiente sección.

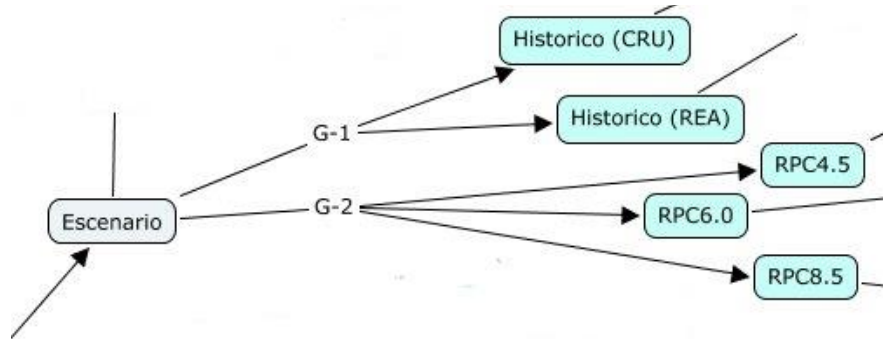


Figura 75. Grupos de opciones (detalle de Figura 70).

A continuación se describen las interacciones entre elementos, como a las acciones que recíprocamente tienen algunos elementos de la estructura con otros de la misma: esto es con nodos o con aristas del grafo. En la simbología de la Figura 71, los gráficos que representan esto, son los que tienen aristas etiquetadas “opts” y “retro” y que corresponden con los dos tipos de interacciones que se describen en seguida.

Definición de opciones

En ocasiones, la selección de algún elemento u opción por parte del usuario puede, habilitar o inhabilitar las opciones que aparezcan como parte de otro ítem particular en la página. Siguiendo con el ejemplo mostrado en la Figura 75, es notorio que el nodo “Escenario” tiene dos grupos de opciones, a saber: el grupo G-1 y el grupo G-2. Sin embargo, en el desplegado de la Figura 75, se muestran únicamente las opciones correspondientes al grupo G-2, esto es, RPC4.5, RPC6.0 y RPC8.5. Esto se debe a que, previamente el usuario ha elegido en el menú correspondiente al ítem “Tipo”, el valor “Proy (total)”, y esta acción ha habilitado el grupo de opciones G-2, por una parte, y por otra, ha inhabilitado el grupo G-1, ambos del nodo “Escenario”. El acercamiento de la estructura que se muestra en la Figura 76 ilustra lo que se ha explicado aquí.

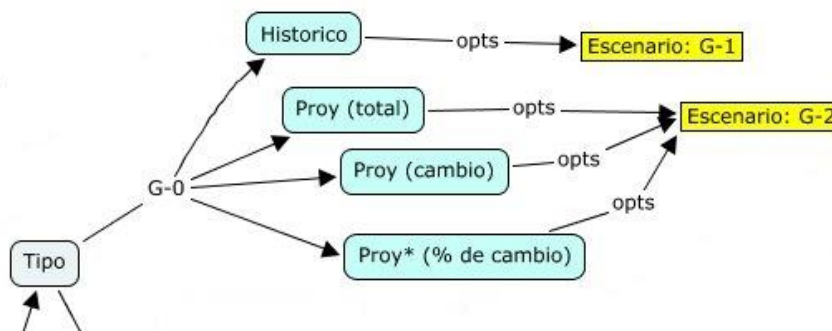


Figura 76. Habilitación de opciones.

La retroalimentación se realiza durante la construcción de una consulta. La información correspondiente a esa consulta se colecta de los distintos elementos gráficos de la interfaz, simbolizados por nodos en el grafo que representa la estructura, y se usa para alimentar como datos de entrada, a algún otro nodo, que representa la construcción del resultado deseado por el usuario y que se elabora mediante los procesos de consulta referidos. La Figura 75 muestra la mecánica del proceso que se ha descrito en este párrafo.

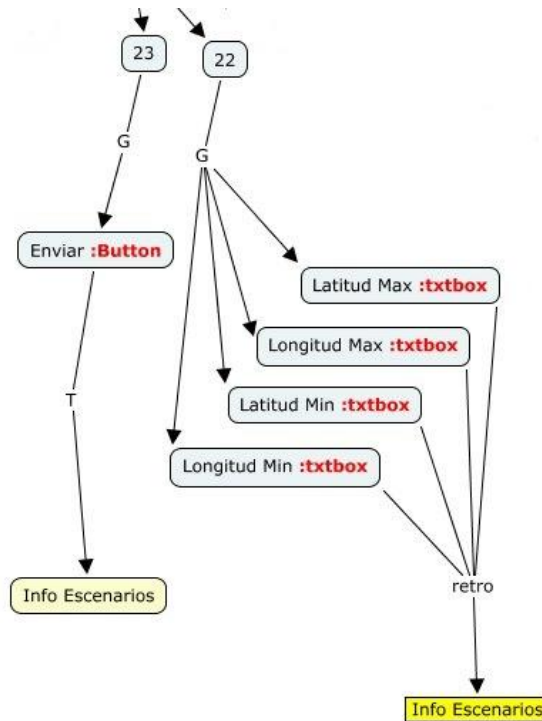


Figura 75. El proceso de retroalimentación de información.

En la Figura 75, el nodo etiquetado como “23”, representa el área geométrica “23” mostrada en la Figura 72. Esta área contiene un único botón “Enviar”, que al ser aplastado ejecuta una “transferencia interactiva”, marcada por la arista etiquetada con “T”, en la Figura 84, y que desemboca en una página terminal con resultados, que, en el ejemplo, está etiquetada como “Info Escenarios” y cuya apariencia puede ser como la mostrada en la Figura 76. El asunto es que, el armado de dicha página requiere de información, parte de la cuál es provista o retroalimentada por lo colectado en “Latitud Max”, “Longitud Max”, “Latitud Min”, y “Longitud Min”, tal como se muestra en la Figura 75.

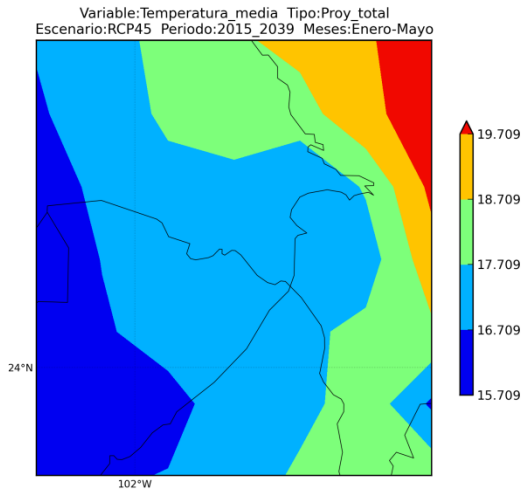


Figura 76. Una página terminal típica de “Escenarios”.

La estructura y funcionalidad: página de inicio se muestra en la Figura 77 muestra gráficamente la estructura y la funcionalidad de la página de inicio, a la que se ha denominado “AdeccMex” (Actualización de Escenarios de Cambio Climático para México). En la Figura 86 se muestra la apariencia y la subdivisión geométrica de dicha página.

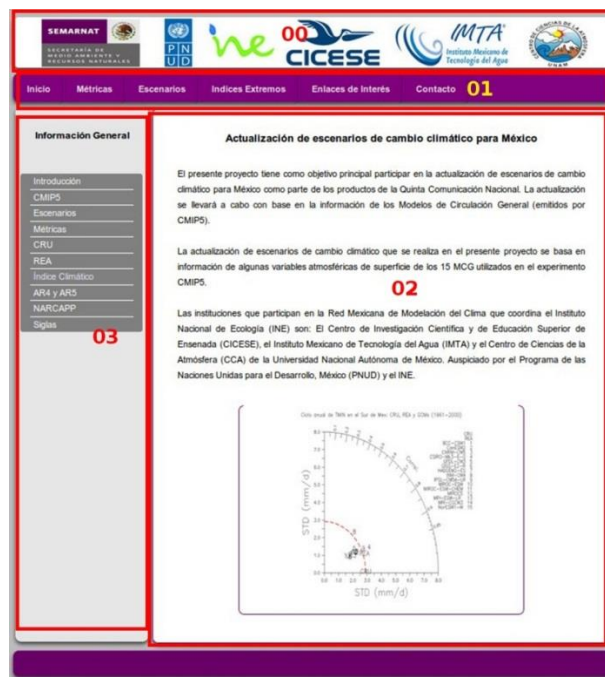


Figura 77. Apariencia de la página inicial y su subdivisión geométrica.

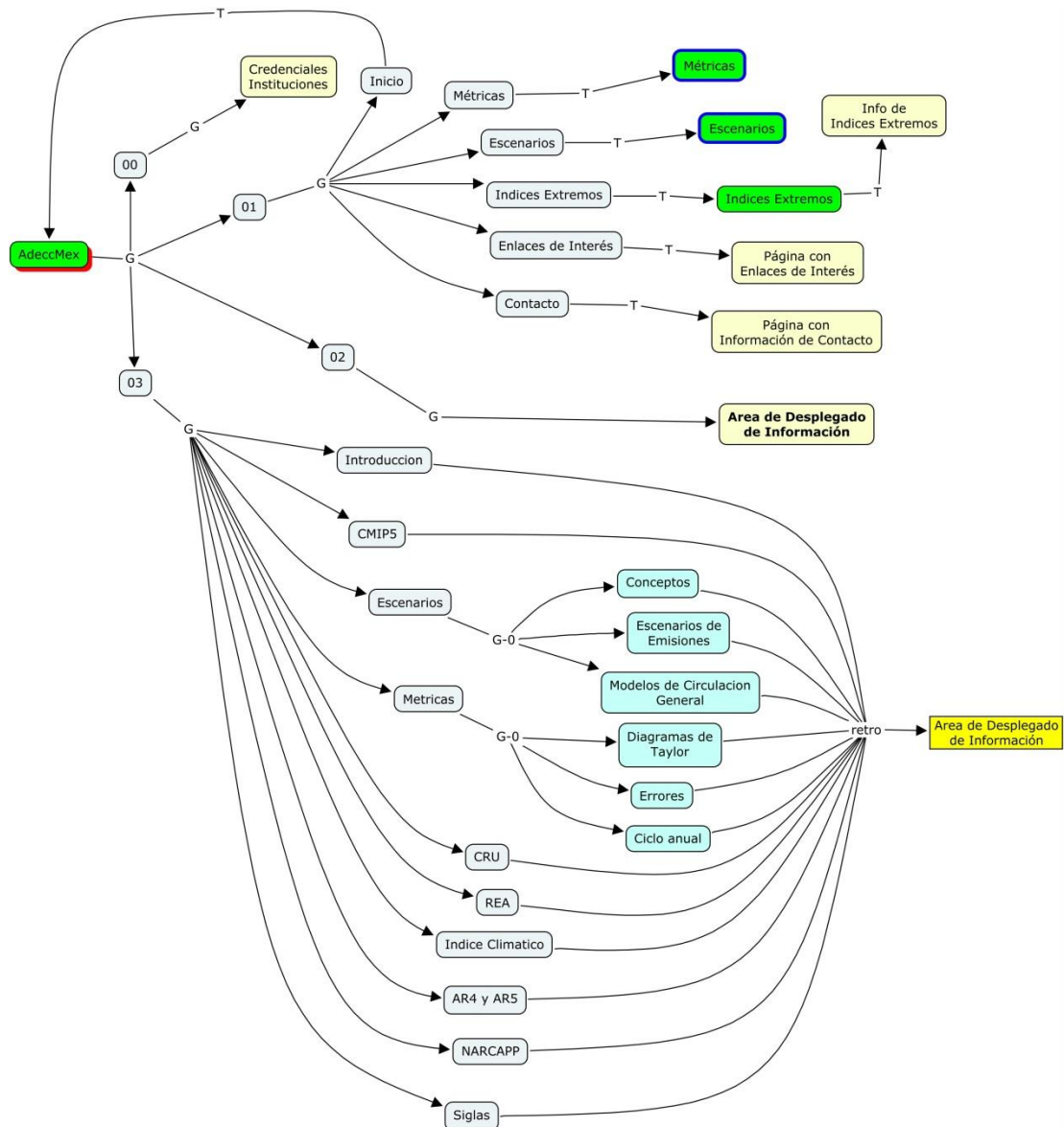


Figura 78. Estructura y funcionalidad de la página inicial.

La nota con referencia a esta página es que todas las selecciones de ítems en el menú de la izquierda desembocan en la retroalimentación del área de desplegado de información, que básicamente es un sitio en el que se da información introductoria de todos los conceptos manejados en el sistema.

La estructura y funcionalidad de “Métricas” se muestra en la Figura 79 se detalla gráficamente la estructura y la funcionalidad de Métricas; la subdivisión geométrica de la página correspondiente se muestra en la Figura 80.

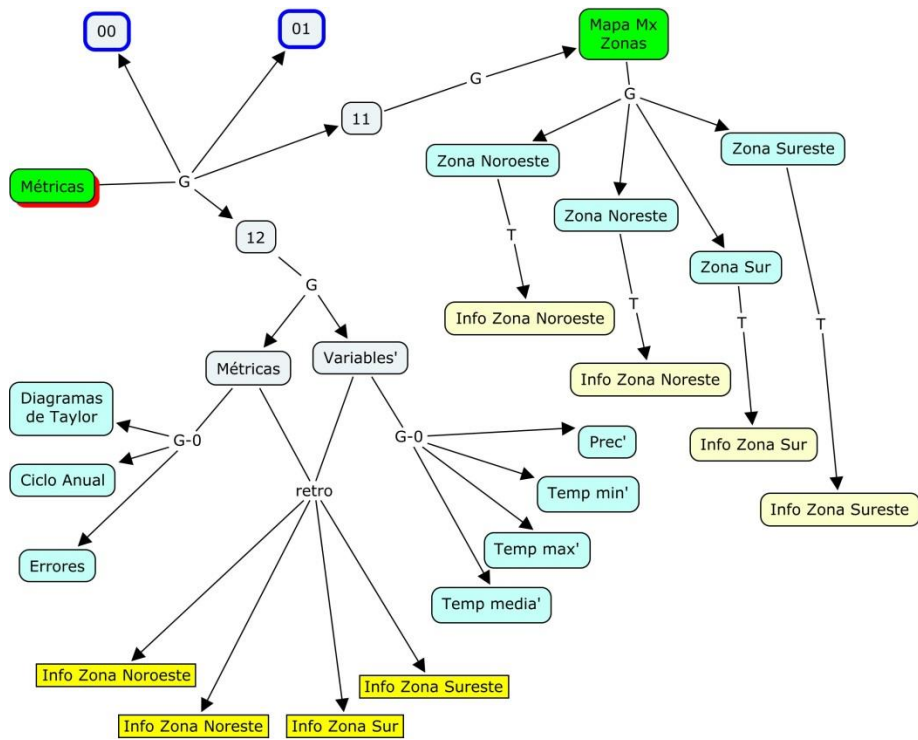


Figura 79. Estructura y funcionalidad de “Métricas”.

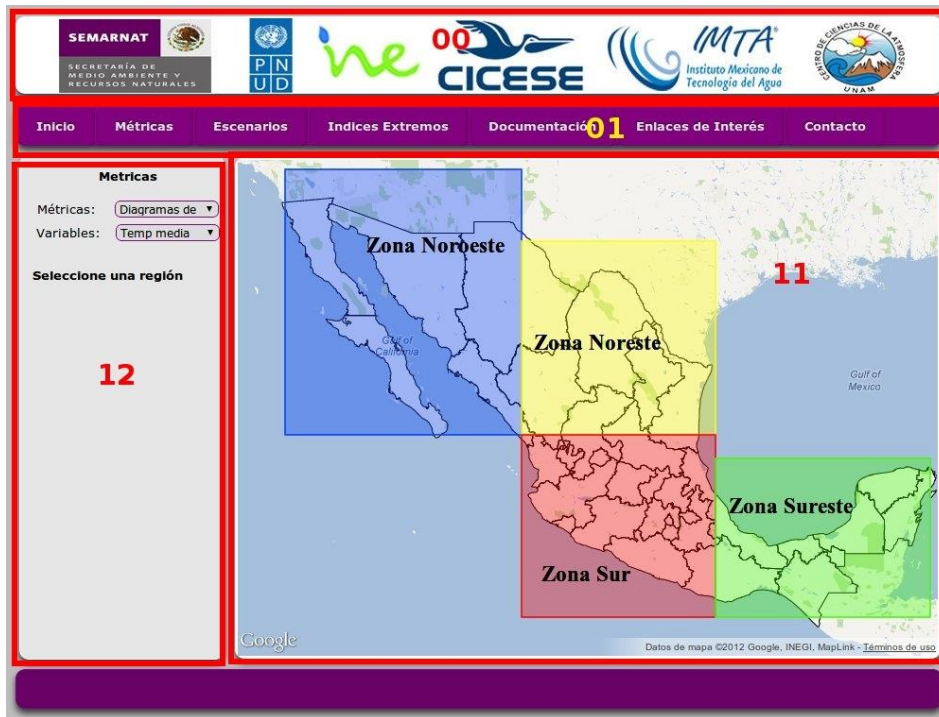


Figura 80. Página de entrada a “Métricas” y su subdivisión geométrica

La estructura y funcionalidad de “Escenarios” es la componente que se eligió para ejemplificar la simbología que se está utilizando a lo largo de estas notas

Estructura y funcionalidad de “Enlaces” y “Contacto”

La estructura y funcionalidad de “Enlaces” y “Contacto” es muy simple y por ello se ha incluido directamente en el diagrama de la Figura 77. La única función de estos ítems es proporcionar información de ligas que son de interés para la temática del sitio, en el primer caso, y de información para contactar a los responsables del sitio, en el segundo caso.

i. Próximos Pasos

Se sugiere en proyectos futuros aplicar el método REA a 22 modelos, ya que cuando se comenzó este proyecto solo estaban disponibles 15 MCG.

Se propone diseñar un prototipo de proyecto de regionalización dinámica utilizando el modelo WRF al seleccionar los modelos con mejor desempeño según las métricas.

Se propone estudiar las causas dinámicas de los cambios en los fenómenos regionales que afectan a México (el monzón, los ciclones tropicales, frentes fríos, etc.) para entender mejor los impactos futuros y las incertidumbres asociadas a dichos cambios.

Para contribuir a la formación de recursos humanos es importante impartir talleres a la comunidad estudiantil y usuarios de los datos actuales, para fomentar tanto el conocimiento aprendido en este proyecto como el asociado en la generación de escenarios de cambio climático.

j. Bibliografía

Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P. y Wilbanks, T.J. (2010). Thenextgeneration of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, Vol. 463.

Taylor, K.E., Stouffer, R.J. y Meehl, G.A. (2011). A summary of the CMIP5 Experiment Design. Submitted to *Bulletin of the American Meteorological Society*.

D. S. Wilks. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press. 2011.

Giorgi, F. y L.O. Mearns, 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, 1141-1158.

Montero-Martínez, M.J. y J.L. Pérez-López, Regionalización de proyecciones de precipitación y temperatura en superficie aplicando el método REA para México, en

Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México, Volumen II. Eds. P.F. Martínez Austria y A. Aguilar Chávez, ISBN: 978-607-7563-01-3, 118 pp., IMTA, México, pp. 11-21, 2008.

Cavazos, T. y Arriaga-Ramirez (2012) Regional climate change scenarios for Baja California and the North American monsoon. *Journal of Climate*, 25, 5904-5915.

CRU (2012) <http://www.cru.uea.ac.uk>, revisada en agosto de 2012.

Giorgi, F. y Mearns, L. (2001) Calculation of Average, Uncertainty Range, and Reliability of Regional Climate Changes from AOGCM simulations via the “Reliability Ensemble Averaging” (REA) Method. *Journal of Climate*. Vol. 15, pp. 1141-1158.

Mitchel, T.D. y P.D. Jones (2005) “An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution Grids”. *Journal of climate*. Vol. 25, pp. 693–712

Montero Martínez, M.J. y J.L. Pérez López (2008) Regionalización de proyecciones de precipitación y temperatura en superficie aplicando el método REA para México, en *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México, Volumen II*. Eds. P.F. Martínez Austria y A. Aguilar Chávez, 118 pp., IMTA, México, pp. 11-21.

Montero Martínez, M.J. y J.L. Pérez López (2008) Regionalización de proyecciones de precipitación y temperatura en superficie aplicando el método REA para México, en *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México, Volumen II*. Eds. P.F. Martínez Austria y A. Aguilar Chávez, 118 pp., IMTA, México, pp. 11-21.

Murphy J., D. M. H. Sexton, D. N. Barnett, G. S. Jones, M. J. Webb, M. Collins y D. A. Stainforth (2004) “Quantification of modeling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations”. *Nature* 430, 768-772.

Peterson TC, Easterling DR, Karl TR, Groisman P, Nicholls N, Plummer N, Torok S, Auer I, Boeh

Gullett M.D, Vincent L, Heino R, Tuomenvirta H, Mestre O, Szentimrey T, Salinger J, Forland E, Hanssen-Bauer I, Alexandersson H, Jones P, Parker D. (1998a) “Homogeneity adjustments of in situ atmospheric climate data: a review International”. *Journal of Climatology*. Vol. 18: 1493–1517.

k. Anexo 1: Actividades Detalladas

Para la primera etapa:

Actividades detalladas para general escenarios de cambio climático para México del Proyecto SEMARNAT-INE-PNUD en el que participan el CICESE, IMTA, CCA-UNAM y el SMN.

La Tabla A1 que se muestra al final del documento (p. 12) resume el porcentaje de actividades a llevar a cabo por cada institución durante el periodo del proyecto (noviembre 2011 – agosto 2012).

1. Descarga de información por internet

Descarga de datos del proyecto denominado CMIP5 (Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados, fase 5, por sus siglas en inglés).

- 1.1 Estimación de tamaños de archivos, el número de los mismos y tiempo para su descarga en una red de alta velocidad. Para los escenarios: RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5 con resolución mensual, de las variables:

Temp. Máx.	Temp. Mín.	Temp. Prom.
Precipitación	Presión sup.	Humedad Rel.
Humedad Esp.	Viento	

- 1.2. Descarga de los archivos correspondientes a los períodos:

Histórico:	1961-2000	(40 años)
Futuro cercano:	2015-2039	(25 años)
Futuro lejano:	2075-2099	(25 años)

2. Interpolación de los datos de los MCG

- 2.1 Cortar las bases de datos en tiempo (para los tres periodos que se mencionan en el punto anterior) y en espacio (0 a 40 N y -140 a -60 W). Después, aplicar el método de interpolación bilineal de la plataforma “cdo” de acuerdo a la malla de los datos observados del CRU (50 km x 50 km) a la totalidad de las variables, ensambles y periodos descargados, según los MCG correspondientes a cada institución.

3. Análisis de métricas

- 3.1 Cambiar las unidades de las variables de Temperatura, Precipitación y Presión y a °C, mm/d y mb, respectivamente. Para cada variable y periodo, promediar los experimentos para analizar un solo ensamble promedio por MCG.
- 3.2 Calcular las métricas consensuadas por punto de malla para los datos del CRU y para los ensambles promedio de cada MCG, para cada periodo y variable (Tmax, Tmin, Tprom y Precip).
- 3.3 Desarrollar el código para calcular las regiones hidrológicas del país
- 3.4 Promediar las métricas calculadas por punto de malla para cada región hidrológica del país a partir de los datos observados del CRU.
- 3.5 Lo mismo que el 3.4, pero para los modelos, sus periodos y escenarios.

4. Usar metodología del REA calculando incertidumbre

- 4.1 Revisión y adaptación del método REA a los datos de CMIP5.
- 4.2 Aplicación de REA a los escenarios de reciente lanzamiento: RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5 utilizando el CRU en las variables:
 - 4.2.1 Precipitación
 - 4.2.2 Temperatura máxima
 - 4.2.3 Temperatura mínima
 - 4.3.4 Temperatura media

5. Colaboraciones internacionales

- 5.1 Durante la realización del proyecto se identificarán oportunidades de colaboración guiadas tanto hacia la generación de capacidades institucionales en México como en formación de recursos humanos, generación de herramientas de procesamiento y análisis como la Regionalización Dinámica.

- 5.2 Acercamiento a instituciones extranjeras para acordar colaboraciones internacionales.
- 5.3 Desarrollo de colaboraciones internacionales.

6. Obtención de índices climáticos

- 6.1 Seleccionar y calcular los índices climáticos que se utilizarán.
- 6.2 Elaborar mecanismos para capacitar a instituciones usuarias.
- 6.3 Elaborar material para capacitar a instituciones usuarias.
- 6.4 Planeación y logística de talleres.
- 6.5 Difundir mediante talleres, los fundamentos, alcances y limitaciones de los índices climáticos.

7. Comparación entre resultados de AR4 y AR5. Asesorías para los grupos de trabajo en impactos

- 7.1 Identificación de limitaciones de modelos en la reproducción de procesos físicos que aporten variabilidad al clima regional.

8. Lecciones aprendidas

- 8.1 Documentar aprendizajes durante todo el proceso de ejecución del proyecto.

9. Revisión de NARCAPP

- 9.1 Estudio y documentación de la metodología aplicada en la regionalización de NARCAPP.
- 9.2 Identificar métodos de regionalización, fundamentos y aplicación en Norteamérica para obtener capacidad de reproducción de escenarios regionales en México.
- 9.3 Revisión de resultados científicos y documentación de las lecciones aprendidas.

10. Otros (Elaboración de portal para descarga de bases de datos)

- 10.1 Elaboración de un catálogo de productos distribuibles mediante un portal WEB.
- 10.2 Diseño y elaboración de una base de datos de acceso simplificado a resultados masivos generados por el proyecto.
- 10.3 Diseño y elaboración de un portal WEB de consulta dinámica de resultados.

11. Actividades complementarias

- 11.1 Participar durante el segundo, cuarto, octavo y decimosegundo meses de proyecto en reuniones trimestrales de trabajo, realizadas por el INE para presentar avances y obtener retroalimentación para el desarrollo del proyecto.
- 11.2 Participar durante el segundo, octavo, y decimosegundo meses en tres talleres realizados por el INE, para presentar avances a tomadores de decisiones (representantes de sector gubernamental, académico y sociedad civil) en el desarrollo del proyecto.
- 11.3 Generación y entrega del primer informe parcial.

- 11.4 Generación y entrega del segundo informe parcial
- 11.5 Generación de síntesis ejecutiva de 15 cuartillas para que sea considerada como insumo para la Estrategia Nacional de Adaptación al cambio climático que desarrolla el INE, enfocada a Modelación del clima, incluyendo análisis de escenarios actualizados a partir de resultados de modelos de circulación global que serían considerados para el Quinto Informe de Evaluación del IPCC.
- 11.6 Generación y entrega del tercer informe parcial
- 11.7 Preparar y entregar al INE el informe final del proyecto, incluyendo un resumen ejecutivo para tomadores de decisiones y una presentación en power point, tanto en español como en inglés.

Tabla A1. Desglose de actividades por institución de acuerdo al calendario de 10 meses. Mes 1 corresponde a noviembre de 2011 y mes 10 a agosto de 2012.

ACTIVIDAD	IMTA (%)	CCA (%)	CICESE (%)	SMN Supervisión	Calendario (mes)
1.1	100	0	0	N	1 = Nov 2011
1.2	40	30	30	N	1, 2
2.1	40	30	30	S	1, 2, 3
3.1	40	30	30	S	3,4
3.2	40	30	30	S	5, 6
3.3	100	0	0	S	5, 6
3.4	30	35	35	S	5, 6
3.5	40	30	30	S	5, 6
4.1	100	0	0	S	7, 8
4.2	100	0	0	S	7, 8
4.2.1	100	0	0	S	7, 8
4.2.2	100	0	0	S	7, 8
4.2.3	100	0	0	S	7, 8
4.2.4	100	0	0	S	7, 8
5.1	35	35	30	S	7, 8, 9, 10
5.2	30	35	35	S	7, 8, 9, 10
5.3	30	35	35	S	7, 8, 9, 10
6.1	40	33	33	N	del 3 al 10
6.2	33	33	34	N	del 3 al 10
6.3	60	20	20	N	del 3 al 10
6.4	33	33	34	N	del 3 al 10
6.5	20	45	35	N	del 3 al 10
7.1	50	25	25	S	9, 10
8.1	50	25	25	S	9, 10
9.1	80	20	0	S	7, 8, 9, 10
9.2	80	20	0	S	7, 8, 9, 10
9.3	80	20	0	N	7, 8, 9, 10
10.1	60	40	0	N	7, 8, 9, 10
10.2	60	40	0	N	7, 8, 9, 10
10.3	60	40	0	N	7, 8, 9, 10
11.1	30	30	40	S	del 3 al 10
11.2	30	30	40	S	del 3 al 10
11.3	30	30	40	N	4
11.4	30	30	40	N	6
11.5	60	20	20	N	6
11.6	30	30	40	N	10
11.7	30	30	40	N	10

Para el segundo período:

1. Análisis de métricas

- 1.2 Calcular las métricas: raíz cuadrática media, desviación estándar, error medio absoluto y correlación por punto de malla para los datos del CRU para cada modelo, para cada periodo histórico 1961-2000 en las variables Tmax, Tmin, Tprom y Precip.
- 1.3 Promediar las métricas calculadas por punto de malla para cada una de las cuatro regiones del país a partir de los datos observados del CRU.
- 1.4 Lo mismo que el 3.4, pero para los modelos, sus periodos y escenarios.
- 1.5 Evaluar el desempeño de los modelos individualmente mediante gráficas-espaguetis que indiquen la dispersión respecto a las observaciones para cada una de las cuatro regiones.

2. Actividades complementarias

- a. Participar en reuniones de trabajo, realizadas por el INE para presentar avances y obtener retroalimentación para el desarrollo del proyecto.
- b. Participar en los talleres realizados por el INE, para presentar avances a tomadores de decisiones (representantes de sector gubernamental, académico y sociedad civil) en el desarrollo del proyecto.
- c. Generación y entrega del segundo informe parcial
- d. Generación de síntesis ejecutiva de 15 cuartillas para que sea considerada como insumo para la Estrategia Nacional de Adaptación al cambio climático que desarrolla el INE, enfocada a Modelación del clima, incluyendo análisis de escenarios actualizados a partir de resultados de modelos de circulación global que serían considerados para el Quinto Informe de Evaluación del IPCC.

3. Síntesis ejecutiva para la Estrategia Nacional de Adaptación al cambio climático ENA.

Escenarios regionalizados por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) para México a partir de resultados de los MCG del cuarto informe de evaluación del IPCC.

Resumen.

Se presenta una síntesis de los estudios aplicados por el IMTA para regionalizar el escenario de cambio climático SRES-A2 para el siglo XXI, derivados del Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (AR4, por sus siglas en inglés). Esta regionalización se realizó utilizando el método “Reliability Ensemble Averaging” (REA) para las variables de temperatura y precipitación en México utilizando 23 modelos de circulación general acoplados que participaron en el AR4. El método REA utiliza dos criterios de evaluación:

el desempeño para reproducir el clima actual (criterio de desempeño) y la convergencia de los cambios simulados entre modelos (criterio de convergencia).

Se regionalizaron las proyecciones climáticas para las variables precipitación y temperatura superficial bajo los escenarios mencionados, interpolándolos a una malla regular de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (60 km aproximadamente) para el escenario de emisión SRES-A2. En el caso de la precipitación los cambios se dan de manera porcentual en relación a la climatología base de 1961-1990. Los análisis muestran que las variaciones estacionales proyectadas son lo suficientemente significativas para anticipar que no solo habrá cambios importantes en los valores totales de precipitación y temperatura, sino también en la variabilidad estacional de ambas variables. Así, se estima que estos cambios traerán consigo retos a la forma de adaptarse de los diferentes sectores (agricultura, hidráulico, salud, entre otros) a los diversos cambios en el clima que se avecinan para el presente siglo en nuestra región.

Introducción

En los últimos años, se ha extendido el uso de los modelos numéricos de circulación general acoplados (MCG), esto ha sido posible tanto por el avance en el conocimiento de los procesos físicos de la atmósfera, como por el desarrollo de tecnología de transmisión y procesamiento digital: internet y computadoras con procesadores crecientemente veloces.

Esto ha permitido que los MCG sean herramientas versátiles y de grandes alcances tanto para estudiar la dinámica atmosférica como para analizar sus efectos a corto, mediano y largo plazos. Los MCG reproducen la dinámica atmosférica global y estiman los posibles cambios en el clima en las décadas futuras. Estas herramientas, aplicadas en forma acoplada con modelos de océano, son una aproximación a los escenarios climáticos futuros.

Los grandes centros de pronóstico del clima mundiales se han coordinado para aportar información y conocimiento sustentado para la mejor toma de decisiones de amplios sectores gubernamentales internacionales, nacionales, estatales y municipales.

En estudios de vanguardia de los impactos asociados a cambio climático se han utilizado grupos de modelos numéricos para estimar los posibles efectos a futuro considerando ciertos escenarios de cambio climático tanto para futuro cercano (menos de 20 años) como lejano (más de 40 años). Las proyecciones a futuro realizadas con los modelos numéricos estiman las condiciones atmosféricas que se tendrían bajo diferentes posibilidades de desarrollo económico, social considerando aspectos ambientales.

Por otra parte, es fundamental la evaluación de la vulnerabilidad de asentamientos humanos ante eventos asociados al cambio climático, siendo imprescindible la implementación de medidas de adaptación tanto al clima actual como al clima futuro posible, reduciendo los riesgos de pérdidas tanto de la infraestructura como de vidas humanas.

Recientemente se ha valorado la relación entre clima y sociedad, por ello es importante considerarlo en la planeación y operación de infraestructura y desarrollo social, así, el diseño e implementación de políticas públicas en México, tales como los Programas Estatales de Acción ante el Cambio Climático (PEACC) y esfuerzos adicionales de instituciones de investigación y desarrollo tecnológico para reducir la vulnerabilidad ante los impactos posibles por el efecto del cambio climático.

Objetivo

Sintetizar los resultados generados en el IMTA del cambio estimado de precipitación y temperatura superficial para el escenario SRES-A2 proyectado para el siglo XXI, utilizando el método REA. Los cambios proyectados en precipitación se presentan de forma porcentual y los de temperatura de superficie en grados centígrados (C), ambos en relación al período base 1961-1990.

Datos y metodología

La configuración de los MCG analizados se presenta en la Tabla 1, los modelos en letra cursiva fueron utilizados para el cálculo de las anomalías de precipitación utilizando un promedio aritmético simple a una resolución de 2.5° x 2.5°.

Fuentes de datos utilizadas:

- a) Base de datos denominada CRU (Climate Research Unit por sus siglas en inglés) para precipitación, temperatura media, mínima y máxima, para el período base 1961-1990, con resolución de 0.5° x 0.5°.
- b) Simulaciones realizadas por los 23 MCG del AR4 en las variables precipitación, temperatura media, mínima y máxima, en los periodos 1961-1990 (histórico) y 2010-2098 (futuro), estas simulaciones corresponden al escenario SRES-A2.

Las bases de datos de los MCG se interpolaron a una resolución de 0.5° x 0.5°.

Tabla 1. Configuración de los MCG utilizados.

Modelo	Siglas y Resolución de Malla (Global)	País
1. <i>Bjerknes Centre for Climate Research, Bergen Climate Model Version 2</i>	<i>BCCR-BCM2.0</i> 128 lons x 124 lats	NORUEGA
2. <i>Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Coupled Global Climate Model 3</i>	<i>CCCMA-CGCM3</i> 96 lons x 48 lats	CANADA
3. <i>Centre National de Recherches Meteorologiques, Coupled Model 3</i>	<i>CNRM-CM3</i> 128 lons x 124 lats	FRANCIA
4. <i>CSIRO Atmospheric Research, Mk3.5</i>	<i>CSIRO-MK3.5</i> 192 lons x 96 lats	AUSTRALIA
5. <i>CSIRO Atmospheric Research, Mk3</i>	<i>CSIRO-MK3</i> 192 lons x 96 lats	AUSTRALIA
6. <i>Max Planck Institute for Meteorology ECHAM5</i>	<i>MPI_ECHAM5</i> 192 lons x 96 lats	ALEMANIA
7. <i>Meteorological Institute of the University of Bonn, ECHO-G</i>	<i>MIUB_ECHO_G</i> 96 lons x 48 lats	ALEMANIA KOREA
8. <i>National Oceanic Atmospheric Administration Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, CM2.0</i>	<i>GFDL-CM2.0</i> 144 lons x 90 lats	USA
9. <i>National Oceanic Atmospheric Administration Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, CM2.1</i>	<i>GFDL-CM2.1</i> 144 lons x 90 lats	USA
10. <i>National Institute of Geophysics and Volcanology, ECHAM 4.6</i>	<i>INGV-ECHAM-SXG</i> 320 lons x 160 lats	ITALIA
11. <i>Institute for Numerical Mathematics, CM3</i>	<i>INMCM3.0</i> 72 lons x 45 lats	RUSIA
12. <i>Institut Pierre-Simon Laplace</i>	<i>IPSL-CM4</i> 96 lons x 72 lats	FRANCIA
13. <i>Model for Interdisciplinary Research on Climate Medium Resolution</i>	<i>MIROC3_2_MEDRES</i> 128 lons x 64 lats	JAPON
14. <i>Meteorological Research Institute, Coupled Global Climate Model 3</i>	<i>MRI-CGCM2_3_2A</i> 128 lons x 64 lats	JAPON
15. <i>National Center for Atmospheric Research Community Climate System Model</i>	<i>NCAR_CCSM3_0</i> 256 lons x 128 lats	USA

16. National Center for Atmospheric Research Parallel Climate Model	NCAR_PCM1 128 lons x 64 lats	USA
17. Hadley Centre for Climate Prediction, Met Office	UKMO_HADCM3 96 lons x 73 lats	REINO UNIDO
18. Hadley Centre Global Environmental Model Met Office	UKMO_HADGEM1 192 lons x 145 lats	REINO UNIDO
19. Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Coupled Global Climate Model 3 T63	CCCMA-CGCM3 128 lons x 64 lats	CANADA
20. Laboratory Atmospheric Sciences and Geophysical Institute of Atmospheric Physics, FGOALS1.0_g	IAP-FGOALS 128 lons x 64 lats	CHINA,
21. National Aeronautics and Space Administration Goddard Institute for Space Studies, Atmosphere-Ocean Model	GISS-AOM 90 lons x 60 lats	USA
22. National Aeronautics and Space Administration Goddard Institute for Space Studies, ModelE20/HYCOM	GISS-EH 72 lons x 46 lats	USA
23. Model for Interdisciplinary Research on Climate High resolution	MIROC3_2_HIRES 320 lons x 160 lats	JAPON

El método REA considera dos criterios de fiabilidad: el desempeño del modelo en reproducir el clima actual (criterio de desempeño) y la convergencia de los cambios simulados entre modelos (criterio de convergencia). El principio de éste método es: se calcula la anomalía de precipitación (o de cualquier otra variable climatológica) a través de un ensamble de datos de diferentes a los MCG utilizando, como primera aproximación, el promedio de la anomalía proyectada por cada MCG, estimando un promedio ponderado del ensamble, asignándoles pesos específicos a cada modelo basándose en los criterios de fiabilidad mencionados anteriormente. El método FEP se describe detalladamente en Montero-Martínez y Pérez-López (2008).

Resultados relevantes: Proyecciones regionalizadas de precipitación y temperaturas mínima y máxima

Como ejemplo, se muestra la climatología estacional observada (datos del CRU) del período de 1961 a 1990 para precipitación acumulada (Fig. 1), temperatura mínima (Fig. 2) y temperatura máxima (Fig. 3).

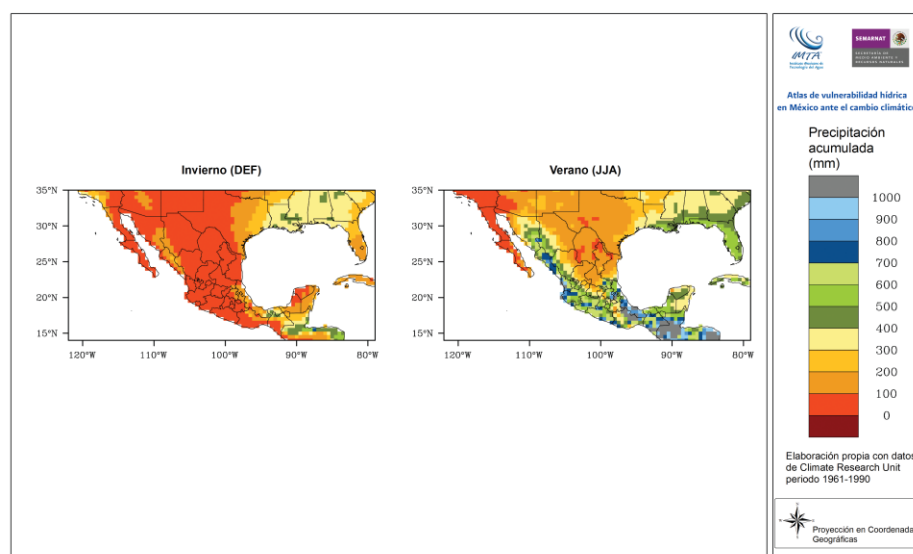


Fig. 1. Precipitación acumulada observada. (1961-1990)

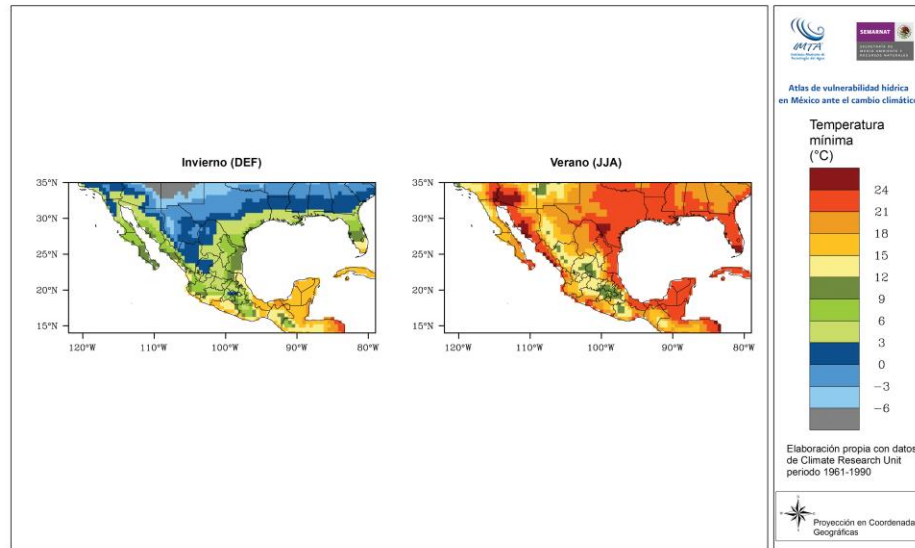


Fig. 2. Temperatura mínima observada (1961-1990)

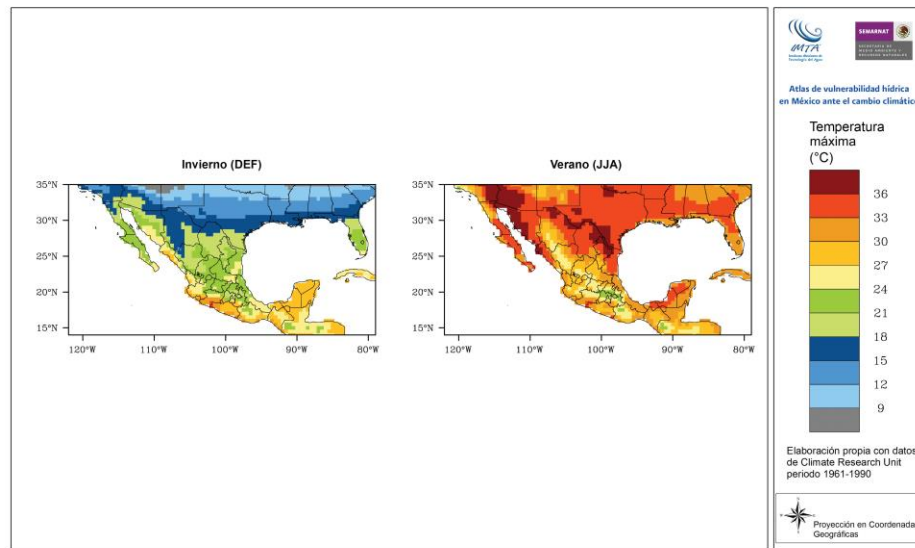


Fig. 3. Temperatura máxima observada (1961-1990)

Respecto a la variación esperada estacional de invierno y verano de precipitación, de acuerdo al método FEP, para el presente siglo dividido en tres periodos diferentes (Fig. 4), se observa que a excepción de una pequeña región para el suroeste de Coahuila (en la que habría cambios positivos de precipitación para el verano), para todo el país se estima un reducción en las precipitaciones totales para el presente siglo. También se observa

que las proyecciones climáticas de precipitación para el invierno resultan ser mayores en términos porcentuales que las correspondientes para el verano.

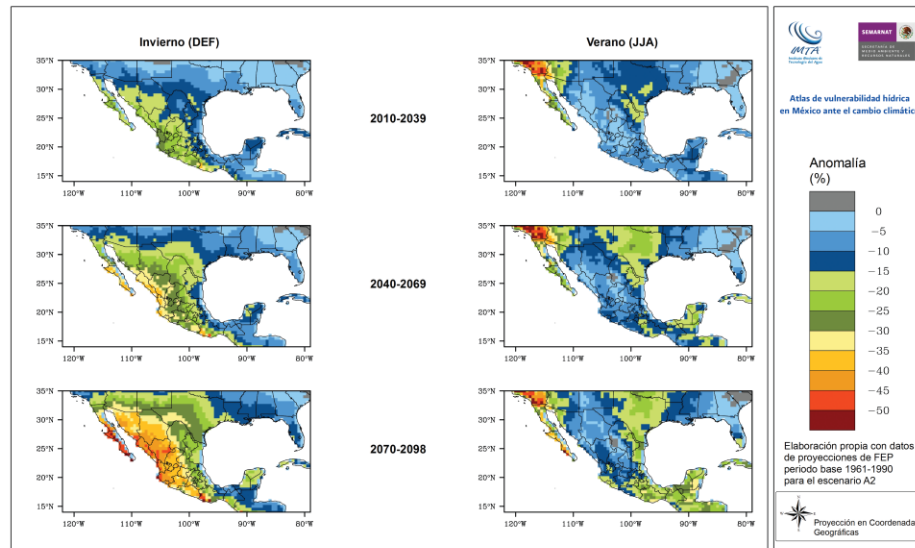


Fig. 4. Anomalía de precipitación respecto al período de 1961 a 1990

En algunas regiones habría cambios drásticos, mientras que en otras permanecen sin cambio significativo, como es el caso de la región de Tabasco y norte de Chiapas, donde se observa que se mantendría sin cambios durante el invierno, sin embargo para el verano se esperan cambios de -5 a -10% para el período 2010-2039 hasta -35 a -40% para final del siglo (2070-2098).

Respecto a la temperatura mínima de superficie durante el presente siglo para el invierno y verano (Fig. 5), en todos los casos se proyectan cambios positivos en la temperatura de nuestra región para este siglo respecto al pasado inmediato. Los cambios en valores de temperatura mínima son en general de menor magnitud que sus correspondientes de temperatura máxima. De igual forma, en general los cambios en verano suelen ser más grandes que los de invierno para ambas temperaturas.

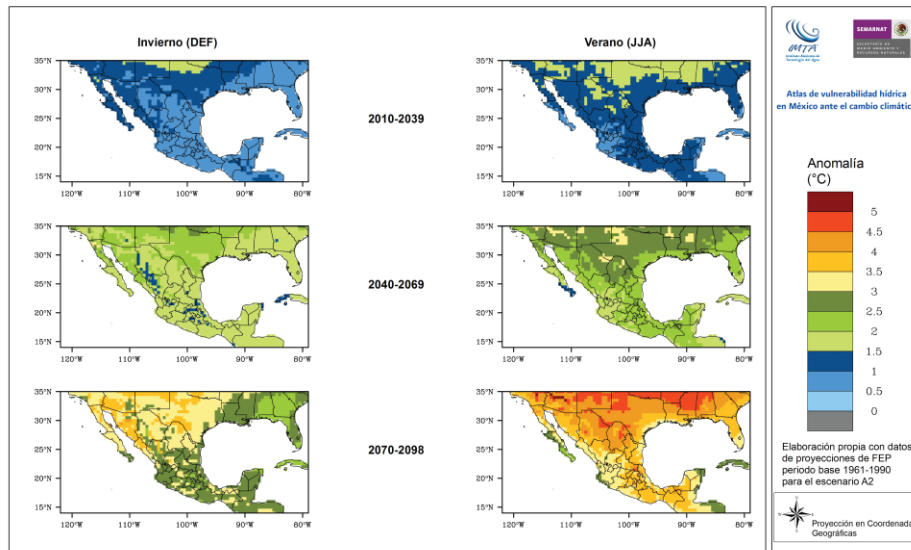


Fig. 5. Anomalía de temperatura mínima respecto al período de 1961 a 1990

Por otra parte, los valores de cambio máximos en temperatura máxima sobrepasan 5 °C, para algunas zonas en el centro del país durante el verano y hacia finales de siglo (Fig. 6)

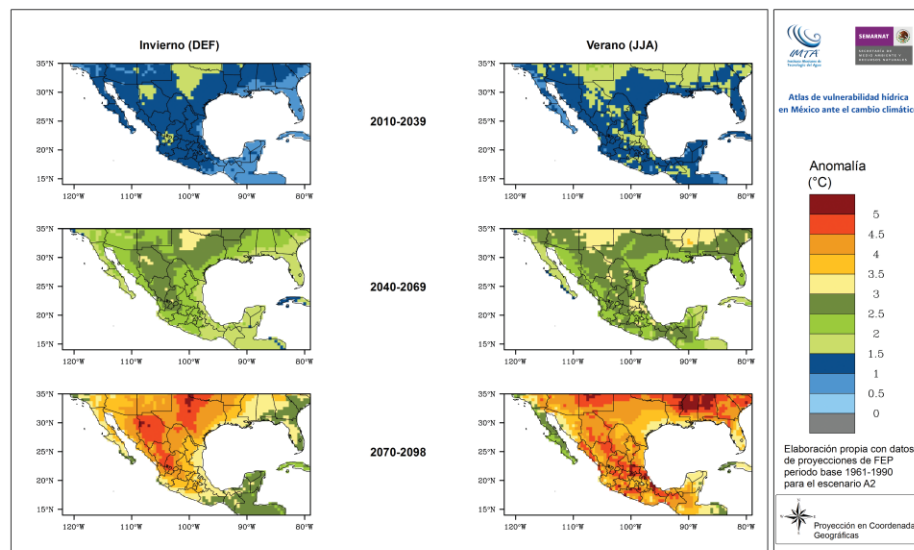


Fig. 6. Anomalía de temperatura máxima respecto al período de 1961 a 1990.

Bases de datos utilizados

La base de datos CRU

Proviene de la unidad de Investigación Climática (CRU por sus siglas en inglés), que es parte de la Escuela de Ciencias Ambientales en la Universidad del Anglia Oriental, Inglaterra (UEA, por sus siglas en inglés) desde 1972 (CRU, 2012). CRU es ampliamente reconocida como una de las instituciones líder dedicadas al estudio del cambio climático, cuyo principal objetivo es mejorar el entendimiento científico en tres áreas: Historia del clima pasado y su impacto en la humanidad, el curso y las causas del cambio climático durante este siglo y prospectos a futuro.

Los datos de CRU utilizados en este proyecto son la versión TS 3.1, con resolución temporal de un mes para el periodo de 1901-2009 y una resolución espacial de $0.5 \times 0.5^\circ$ (Figura 1). El CRU maneja variables como: temperatura media, mínima, máxima, precipitación, entre otras. Para generar esta base de datos se utilizan datos de estaciones meteorológicas distribuidas alrededor del mundo, más de 8,000 para la temperatura y de 6,000 para precipitación, por ello posee datos solamente sobre continente. Las fuentes potenciales de no homogeneidades en las estaciones climáticas y métodos de corrección fueron utilizando el método de Global Historical Climatology Network-Monthly (GHCN) de Peterson *et al.* (1998a).

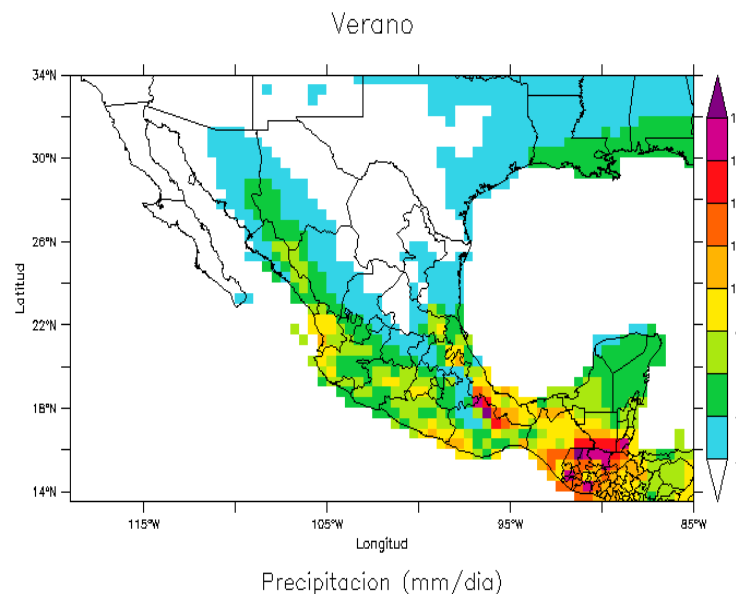


Figura 1. Resolución espacial del CRU TS3.1, ejemplo: Variable de precipitación para el verano climatológico de 1961-2000.

Tabla 2. Fuente de datos de CRU. Las variables son temperatura (tmp), DTR (dtr), precipitación (pre), presión de vapor (vap), cubierta de nubes (cld), duración de la luz solar (spc), y días húmedos (wet). Dtr incluye información de la temperatura mínima y la máxima (fuente: Mitchel y Jones, 2005).

Etiqueta	Referencia	Información	Periodo
Jones	Jones y Moberg(2003)	tmp	1701-2002
Hulme	Mike Hulme, comunicación personal	pre	1697-2001
GHCN v2	Peterson <i>et al</i> (1998c).	Tmp,dtr,pre	1702-2001
Mark New	New <i>et al.</i> (2000)	Tmp, dtr, vap, cld,spc	1701-1999
Hahn	Hahn y Warren (1999)	Tmp, vap, cld	1971-96
MCDW	William Angel, comunicación personal	Tmp, pre, vap, spc, wet	1990-2002
CLIMAT	UK Met Office, comunicación personal	Tmp, dtr, pre, vap, spc, wet	1994-2002

Descripción del formato Netcdf.

Las bases de datos masivas requieren un almacenamiento óptimo para su acceso y procesamiento, para ello, existen formatos internacionalmente reconocidos, uno de ellos es el formato Netcdf (Network Common Data Form), el cual es una forma de almacenado de información de forma binaria. Los archivos tienen la extensión .nc, este formato fue generado por el programa de Unidata en University Corporation para la investigación atmosférica (UCAR), es auto descriptivo, es decir, los archivos de datos contienen información del área geográfica, fechas, variables y niveles verticales. Las variables se almacenan como series de conjuntos bidimensionales (Fig. 29)

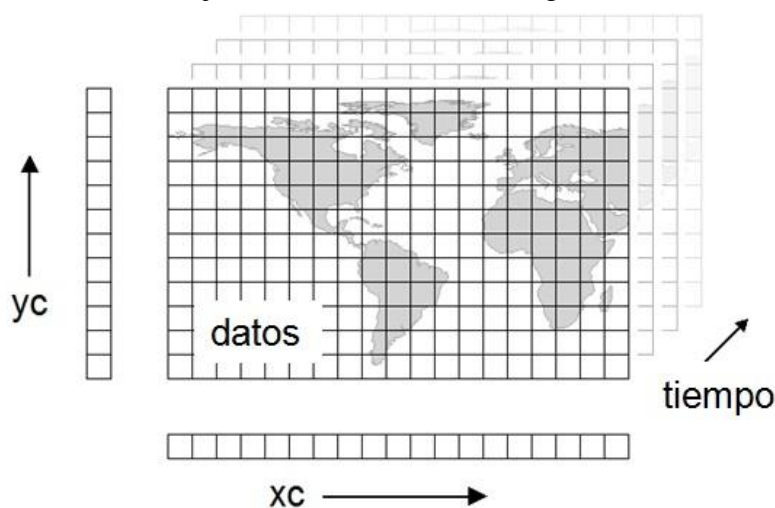


Figura 29 Estructura espacial y temporal del formato Netcdf

1. Actividades complementarias

- a. Participar en reuniones de trabajo, realizadas por el INE para presentar avances y obtener retroalimentación para el desarrollo del proyecto.
- b. Participar en los talleres realizados por el INE, para presentar avances a tomadores de decisiones (representantes de sector gubernamental, académico y sociedad civil) en el desarrollo del proyecto.
- c. Generación y entrega del tercer informe parcial

