

Métodos dinámicos y estadísticos de reducción de escala:

Aplicaciones al clima, variabilidad climática y cambio climático.

Trabajo in extenso.

Jorge A. Amador

Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI) y Escuela de Física,

Universidad de Costa Rica (jorge.amador@ucr.ac.cr)

Eric J. Alfaro

Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI), Escuela de Física

y Centro de Investigaciones en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR),

Universidad de Costa Rica (erick.alfaro@ucr.ac.cr)

Trabajo in extenso sometido al

III Congreso Iberoamericano sobre Desarrollo y Ambiente

5 – 9 Noviembre 2007

Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica

Autor para correspondencia, Dr. Jorge A. Amador, Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI), Universidad de Costa Rica, 11501-2060 San José, Costa Rica. Tel. (506) 2511 5320 / Fax. (506) 2234 2703. Email: jorge.amador@ucr.ac.cr

Resumen

Actualmente, las salidas de algunos Modelos Atmosféricos de Circulación General Acoplados tienen buena habilidad para simular el comportamiento de variables (circulaciones) de gran escala o escala global, las cuales a su vez, interaccionan con procesos de escala regional o local en el ámbito del sistema climático. Sin embargo, estas salidas no son en general muy útiles para el estudio de ciertos impactos locales, debido a que su resolución espacial está por encima de la escala de los impactos locales que se desean analizar. Lo anterior es muy importante de tomar en cuenta al estudiar impactos del clima, las actividades del hombre, la biodiversidad en los ambientes marino-costeros y arrecifes en las regiones tropicales, por ejemplo. En términos generales, se han usado dos aproximaciones para lidiar con esta deficiencia: los métodos de ajuste de escala dinámico y las de tipo estadístico. Ambas técnicas muestran niveles similares de habilidad bajo las mismas condiciones climáticas al estimar variables atmosféricas superficiales. En el presente trabajo, se discuten los elementos básicos del sistema climático y las posibles causas de los cambios observados en el sistema físico. Se presentan además en forma resumida, los principales conceptos asociados a los elementos que definen el sistema climático, la definición de clima de una región, algunos aspectos de la variabilidad climática asociada al estado medio de la atmósfera y las generalidades del problema del cambio climático global con énfasis en el aspecto regional del mismo. Se presentan además los esquemas metodológicos del proceso de reducción de escala, una discusión sobre sus ventajas y limitaciones, así como algunas aplicaciones al tiempo atmosférico y clima regional.

Palabras claves (keywords): Reducción dinámica de escala, reducción estadística de escala, clima, variabilidad climática, cambio climático, impactos locales (dynamical downscaling, statistical downscaling, climate, climate variability, climate change, local impacts).

1. Introducción

Al final del período Cretácico, hace aproximadamente unos 65 millones de años, se produjo la extinción masiva de los dinosaurios y otras especies vivientes. La causa de esta catástrofe es aún incierta, aunque la teoría actualmente más aceptada es la que señala el impacto de un meteorito de gigantescas dimensiones como detonante de un cambio climático con nefastas consecuencias para la flora y la fauna del planeta. Durante el Cenozoico (Era Terciaria y Cuaternaria), los mamíferos se multiplicaron y diversificaron como una natural consecuencia de la desaparición de los grandes reptiles. Hace unos dos millones de años, durante el Plioceno, también como consecuencia de profundos cambios climáticos, los mamíferos comenzaron a declinar y muchas especies desaparecieron. Es a partir de la Edad de Hielo, en que aparece por primera vez un primate avanzado (el homo). Hace aproximadamente unos 25.000 años se extinguió el hombre de Neandertal, con lo que el homo sapiens pasó a ser la única especie humana sobre la Tierra. Desde entonces los cambios climáticos han afectado la vida y actividades del homo sapiens y por ende su capacidad de adaptación. La era actual parece sorprender una vez más al hombre y a las especies vivientes ante la aparición de un nuevo cambio climático, cuyo origen es aún desconocido en esencia (natural y/o antropogénico?). Sin embargo, se acepta a menudo que ha sido el hombre y sus actividades las que han servido de detonante para el cambio observado en las condiciones físicas del sistema (efecto invernadero).

En el presente trabajo, se discuten con algún detalle, los elementos básicos del sistema climático y las posibles causas de los cambios observados en el sistema físico. Se presentan además en forma resumida, los principales conceptos asociados a los elementos que definen el sistema climático, la definición de clima de una región, algunos aspectos de la variabilidad climática asociada al estado medio de la atmósfera y las generalidades del problema del cambio

climático global con énfasis en el aspecto regional del mismo (sección 2). Con el objetivo de ofrecer los elementos relevantes a la línea de trabajo a seguir en este artículo, se discuten en la sección 3, las guías metodológicas y los pasos más importantes del proceso de obtención de escenarios climáticos regionales. Una discusión somera sobre los métodos de predicción climática más comúnmente utilizados en la actualidad, se presenta a manera de marco general, en las secciones 4 y 5. Uno de los aspectos más importantes del proceso de obtención de estos escenarios climáticos regionales lo constituyen las bases de datos históricas disponibles en la región de interés, de manera que en la sección 6 se analiza lo relativo a los datos climáticos, la documentación histórica y los indicadores de representación y su importancia y utilización en el problema de la confección de escenarios climáticos regionales. La disponibilidad de recursos de tipo científico (por ejemplo, información climática confiable, modelos y herramientas para la preparación de escenarios climáticos regionales) y tecnológico (plataformas de computación y acceso a redes de datos e Internet) se analiza en la sección 7. En la esta misma sección se discuten algunas aplicaciones y ejemplos al tiempo meteorológico y a escenarios climáticos regionales derivados para ilustrar los métodos discutidos. Otro de los más importantes elementos del proceso de obtención de escenarios climáticos regionales lo constituyen los recursos humanos e institucionales disponibles por país y en la región, aspectos que se analizan en la sección 8. Las recomendaciones y sugerencias de los autores se encuentran en la sección 9, que incluye aspectos de las necesidades de capacitación, entrenamiento y formación relativas al problema en cuestión.

Los conceptos técnicos y científicos utilizados en este trabajo siguen en todo momento, a menos que se indique en el texto lo contrario, las definiciones básicas del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (en inglés, Intergovernmental Panel on Climate

Change, IPCC) relativas al clima, la variabilidad climática, el cambio climático, a los escenarios climáticos y a variables o elementos del sistema climático asociados a ellos (<http://www.ipcc.ch/>). Como fuente complementaria de definiciones se utiliza el Glossary of Meteorology del American Meteorological Society (ver <http://www.ametsoc.org/memb/onlinemembervices/>).

2. Elementos del sistema climático

El clima está constituido por aquellos rasgos o elementos básicos (variables u observables) del sistema climático que tienen una variación relativamente lenta en el tiempo. El sistema climático está conformado por la biosfera, la atmósfera, la criósfera, la hidrósfera y la litósfera y sus fronteras. Lo normal es caracterizar el clima por promedios simples de las componentes o variables del sistema termodinámico (precipitación, viento y temperatura, por ejemplo) sobre períodos que pueden ir desde un mes o más hasta varios años, considerando siempre la variabilidad en el tiempo y en el espacio de esas cantidades promedio. Amador et al. (2006), presenta una discusión del clima regional y mecanismos físicos de forzamiento atmosférico para varias escalas de movimiento. En contraste al clima, el “tiempo atmosférico” es el estado a corto plazo (minutos a días) de la atmósfera caracterizado usualmente en términos de temperatura, humedad, precipitación, nubosidad, visibilidad y viento en esas escalas temporales.

Para algunas aplicaciones, en especial cuando se trata de cambios en el clima, el periodo de tiempo sobre el cual se promedia es del orden de varias décadas o más (promedios a largo plazo). El periodo y espacio tridimensional sobre el cual se hace la estadística del sistema puede variar, según se desprende de la evolución de este concepto en las últimas décadas, como resultado de un mejor entendimiento de los factores y mecanismos que determinan los elementos

del clima y su variabilidad. Es así como se puede hablar de clima local (por ejemplo promedios de variables a largo plazo sobre áreas relativamente pequeñas) y clima regional o global (promedios de los observables sobre áreas o regiones de escala continental o global). Marengo y Amador (2005) presentan un resumen de los principales modos de variabilidad regional y algunos ejemplos de cambio climático observado en América Latina.

2.1. Variabilidad climática

Al igual que el clima, el concepto de variabilidad climática puede ser definido en función de términos temporales o espaciales (desviaciones temporales o espaciales de las variables con respecto a los promedios considerados). En la escala temporal y más allá del orden de la escala sinóptica (varios días) se puede hablar, por ejemplo, de variabilidad intra-estacional, estacional, del ciclo anual o inter-anual, para caracterizar las señales o elementos que distinguen las condiciones de un área o región con respecto a sus promedios sobre el periodo elegido. En el aspecto espacial, el ejemplo más utilizado de esta variabilidad es la clasificación climática por zonas, cada una de ellas relativamente homogénea en espacio y tiempo con respecto a las variables consideradas, durante periodos de tiempo previamente establecidos (p.e., métodos de Holdridge, Thornthwaite o Koeppen, ver Oliver 2005).

2.2. Cambio climático

El concepto de cambio climático es utilizado para caracterizar cambios sistemáticos sostenidos en los promedios a largo plazo de los elementos o variables climáticas (temperatura, vientos y precipitación, por ejemplo). El cambio climático en un sistema como el de la Tierra puede deberse a mecanismos físicos de forzamiento externo como cambios en las emisiones de

radiación solar o cambios en los parámetros orbitales; así como también por procesos internos del sistema climático o a forzamiento de tipo antropogénico.

En el marco de este trabajo es usual la pregunta; ¿Cómo afecta o puede afectar el cambio climático global los diversos aspectos relativos a la variabilidad en escalas temporales y espaciales menores? Aún cuando se acepta generalmente que puede haber un efecto presente en estas escalas de circulación menores, no ha sido posible determinar hasta el momento cómo y en que medida afecta a cada una de esas escalas de movimiento. Para el caso de los huracanes, por ejemplo, en un reciente y detallado trabajo de investigación, Pielke Jr. et al. (2005) concluyen que las afirmaciones de ligamen entre cambio climático e impacto de huracanes son prematuras ya que entre otras razones, no se han establecido conexiones entre emisiones de gases de efecto invernadero y el comportamiento observado de los huracanes. Un problema semejante se presenta al discutir el ligamen entre el cambio climático y el efecto de este sobre la frecuencia e intensidad de eventos meteorológicos extremos como sequías, inundaciones y tormentas severas.

3. Escenarios climáticos

El concepto de escenario climático se utiliza para denotar un estado probable o plausible, normalmente simplificado, del sistema climático ante uno o más diferentes tipos de forzamientos como los descritos en la sección anterior. El escenario está basado en un conjunto internamente consistente de relaciones físicas o estadísticas entre los distintos parámetros del sistema climático y se construye para ser utilizado explícitamente para identificar e investigar las posibles consecuencias de ese estado en diferentes sectores sociales. En este trabajo, se entiende que el cambio climático es esencialmente el debido al forzamiento de tipo antropogénico, el cual a su vez sirve de entrada o dato inicial a los modelos de impacto social. El o los escenarios climáticos

construidos mediante estos elementos usualmente requieren conocimiento del sistema climático actual. Un escenario de cambio climático es simplemente la diferencia entre un escenario climático y el clima actual o de una línea o estado base.

Las interacciones entre las diferentes componentes del sistema climático se llevan a cabo en diferentes escalas espaciales y temporales, siendo la más extensa de ellas en el aspecto espacial, la escala global. Las proyecciones sobre del clima son generalmente resueltas en esta escala global utilizando el sistema completo de ecuaciones dinámicas sobre el dominio geométrico del globo terrestre usando algún tipo de representación espacial y temporal de las variables (soluciones en diferencias finitas o mediante métodos espectrales, básicamente) e incluyendo en la mayor parte de los casos, procesos físicos de escalas menores no representados explícitamente en las ecuaciones. Este tipo de aproximación al problema se realiza mediante los denominados modelos atmosféricos de circulación general (MACG). A medida que la velocidad de procesamiento de las computadoras y su capacidad de almacenamiento de datos han aumentado, se han venido utilizando modelos atmosféricos acoplados a modelos oceanográficos (o a otros modelos geofísicos), los cuales permiten una mejor representación del sistema climático y sus interacciones como un todo.

Los modelos MACG acoplados (MACGA) del tipo climático, constituyen en realidad una representación generalmente simple del sistema climático y se emplean para preparar las predicciones o proyecciones del clima hacia el futuro para diferentes horizontes de tiempo. Para este proceso se requiere un conocimiento adecuado de las condiciones iniciales del clima con base en una distribución apropiada de observaciones de los parámetros del sistema durante periodos adecuados. Datos faltantes en el tiempo o regiones con pocos datos climáticos introducen importantes incertidumbres en las predicciones, que junto a las representaciones

simplificadas de los procesos físicos y dinámicos del sistema, conllevan a aumentar la dispersión e incertidumbre de los resultados y proyecciones.

Las predicciones y los escenarios climáticos regionales son generalmente derivados de los globales mediante distintos tipos de procedimientos, ya sean de tipo físico-dinámico, estadístico o mixto (híbrido) y en algunos pocos casos mediante inferencias subjetivas. En esta fase, la disponibilidad de bases de datos regionales es un elemento de especial importancia. Un problema usual en el uso de datos climáticos es la diferencia en el espaciamiento temporal y espacial de los datos en relación con la información obtenida de los MACGA. Para la obtención de escenarios climáticos regionales se requiere entonces de información básica de estos modelos y sus predicciones a diferentes horizontes temporales, incluidas las incertidumbres en las predicciones asociadas a diferentes estados iniciales, de datos climáticos que determinen la línea o estado base del clima en la región de interés y de un sistema o grupo de procedimientos para traducir o transferir la información global sobre el estado futuro estado del sistema a la escala espacio-temporal requerida.

4. El problema físico de los estudios de adaptación

La mayor parte de los estudios de adaptación basados en escenarios de clima futuro derivados directa o indirectamente de MACGA son generalmente realizados en una de las siguientes tres escalas, a) simulaciones globales llevadas a cabo usando bases de datos climáticos interpolados a una resolución de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ o mayor; b) análisis regionales utilizando rejillas o mallas de más alta resolución donde los datos climáticos han sido reducidos de escala o ajustados a una escala requerida (“downscaling”) con base en los resultados de los MACGA ó; c) estudios locales donde los resultados de los modelos y datos climáticos observados son interpolados de

alguna manera a las coordenadas de algún sitio de interés (Price et al. 2001). A pesar de que cada uno de estos tres procedimientos poseen ventajas y desventajas, la escala global a) es muy extensa y solo provee un análisis “muy general”, mientras que los impactos determinados por la c) atribuyen generalmente más certidumbre de lo garantizado por el MACGA y no pueden ser fácilmente utilizados para regiones en que se desea obtener implicaciones socio-económicas específicas y repuestas a los problemas de manejo de recursos. La escala intermedia b) tiene potencial para proveer análisis de escenarios que son de valor real para los que toman decisiones tomando en cuenta variaciones espaciales regionales e interacción con los elementos climáticos que la caracterizan. Jones et al. (2005), discuten con detalle algunos de estos aspectos para estudios de impacto y adaptación con énfasis en los países en desarrollo.

La necesidad de obtener datos con una alta resolución espacial se debe principalmente a dos razones, primero para permitir el muestreo del sector de interés con una intensidad tal que refleje la interacción entre clima, suelos (o superficies), hidrología e impactos humanos y segunda para proveer resultados de simulación en una escala operacional importante para la toma de decisiones.

En sectores relevantes (por ejemplo, recursos hídricos, marino-costeros, agricultura y salud humana) los cambios climáticos que ocurren a lo largo de muchos años o décadas son de especial importancia para determinar los efectos en la disponibilidad de electricidad, la alimentación y los riesgos de enfermedades asociadas a estos cambios, sin embargo, cambios en la variabilidad climática interanual o en escalas temporales menores afectan aspectos esenciales en el manejo de embalses de tipo plurianual, el cambio estacional de cultivos o la incidencia y frecuencia estacional de enfermedades ligadas a las condiciones climáticas. En algunos casos, como en el de los modelos de manejo de ecosistemas, se usan estimaciones horarias basadas en

información diaria o mensual y en modelos más complejos que requieren valores diarios para representar los procesos humanos y se utilizan los generadores estocásticos de tiempo (Semenov y Barrow 2000) a partir de datos mensuales.

5. Métodos de predicción climática mediante ajuste o reducción de escala

Como se mencionó anteriormente, actualmente las salidas de algunos MACGA tienen una buena habilidad para reproducir el comportamiento de variables de gran escala o escala global, las cuales a su vez, interaccionan con procesos de escala regional o local. Sin embargo, estas salidas no son en general muy útiles para el estudio de impactos locales debido a que su resolución espacial está por encima de la escala de los impactos locales que se desean analizar (Wilby et al. 2004). En términos generales, se han usado dos aproximaciones para lidiar con esta deficiencia: las técnicas o métodos de ajuste de escala dinámico y las de tipo estadístico. Hoy en día, ambas técnicas muestran niveles similares de habilidad bajo las mismas condiciones climáticas al estimar variables atmosféricas superficiales (Gershunov et al. 2000; Wilby y Dawson 2004). A pesar de estos resultados, debe siempre tomarse en cuenta que las relaciones estadísticas no son relaciones de causalidad, lo que implica en principio menor habilidad para describir y entender la física y dinámica de las interacciones entre los diversos componentes del sistema climático. Cabe mencionar que las relaciones estadísticas deben estar sustentadas por un modelo conceptual físico. Cuando se utilizan ambas técnicas de manera interrelacionada, es decir la numérica y la estadística, se habla de esquemas o técnicas híbridas o mixtas.

5.1. Métodos dinámicos

El método de ajuste dinámico es un procedimiento para obtener información de alta resolución sobre el tiempo atmosférico, clima o cambio climático a partir de MACGA de relativamente baja resolución. Típicamente, la resolución de estos modelos globales es del orden de 150-300 km de latitud por 150-300 km de longitud. La mayoría de los modelos de impacto requieren información en escalas del orden de 50 km o menos, de manera que este método de ajuste dinámico es conveniente o necesario para estimar la información requerida en escalas menores a las de los MACGA. El método de ajuste dinámico utiliza un modelo de área limitada de alta resolución (modelo climático regional o MCR) con condiciones de frontera como función del tiempo derivadas del MACGA. El MCR está dinámicamente inmerso en el modelo global (proceso de anidamiento) para obtener información en escalas menores a las de este modelo. Los MCR generalmente utilizan dominios de trabajo a nivel regional o sub-regional (por ejemplo $10^6 - 10^7 \text{ km}^2$) con resoluciones de 20 a 50-60 km. En casos especiales las resoluciones pueden llegar aún a escalas menores (Stolz 2004), sin embargo, se podría esperar que la incertidumbre asociada a los resultados aumente. Este tipo de procedimiento de ajuste dinámico es muy útil y con frecuencia necesario, cuando los modelos de impacto requieren información en escalas locales para producir resultados o escenarios de clima o de cambio climático en esa misma escala. Hay evidencia de que los MCR simulan significativamente mejor el clima y la meteorología regional que los MACGA, en especial sobre regiones montañosas (Giorgi y Mearns 1999), una característica importante del dominio espacial en Centroamérica. La reducción dinámica de escala también se puede aplicar a MACGA del tiempo atmosférico como el GFS (Sela 1982, 1988) y modelos anidados regionales (MR) utilizados usualmente también para tiempo atmosférico como el MM5 (Grell et al. 1993; Dudhia et al. 2005).

Como todo procedimiento en que interviene la incertidumbre o falta de conocimiento sobre la naturaleza de las relaciones entre las distintas componentes del sistema climático, el ajuste dinámico posee algunas ventajas y desventajas. Entre las ventajas más importantes de este método se puede argumentar el hecho de que actualmente los modelos dinámicos incorporan el “estado del arte” en cuanto a la física y dinámica conocida del sistema climático, en especial cuando los resultados provienen de modelos o sistemas acoplados que incluyen los procesos de interacción tierra-océano-atmósfera. Un aspecto importante de esta técnica es que el proceso se puede implementar utilizando retroalimentación dinámica, es decir, lo que sucede física y dinámicamente en el MCR puede ser transferido al MACGA, cada cierto tiempo de integración, vía las fronteras comunes del dominio de anidamiento (en inglés, two-way nesting) modificando así los procesos de escala global, de manera que esta información a su vez es transferida de nuevo en el tiempo al MCR mediante un proceso de interacción continua. Los resultados obtenidos del clima o del cambio climático obedecen entonces a relaciones de orden físico y no empírico o estadístico como en el caso de las otras técnicas en que la relación de causalidad no está presente.

La identificación del MACGA (o de los MACGAs) que mejor brinde(n) información climática (el que o el grupo que mejor capture los rasgos o elementos forzantes climáticos regionales fundamentales) al MCR es un paso importante en la obtención de escenarios climáticos regionales a alta resolución si se utiliza esta técnica dinámica. Lo anterior conlleva un proceso de evaluación de los MACGA disponibles, si este es el caso, para identificar el modelo o el grupo de modelos que mejor brinde información sobre las condiciones de contorno (típicamente cada seis horas en el dominio de interés) al MCR (ver aplicación completa en Rivera y Amador 2007a,b). Estos elementos forzantes del clima son imprescindibles por su

relación física con escalas sub-regionales o locales, lo cual es indudablemente importante en la aplicación de los modelos de impacto. Con frecuencia, los grandes centros de predicción mundial sobre cambio climático ofrecen en línea, o en bancos de datos especiales, resultados o predicciones climáticas para distintos horizontes de tiempo de modelos individuales (a menudo bajo diferentes condiciones iniciales) o de una colectividad de modelos (también llamados “ensembles”), lo cual constituye una oportunidad para obtener escenarios climáticos y estimados estadísticos de la dispersión de esas predicciones que pueden ser utilizadas para la formulación de medidas de adaptación sectorial.

A pesar de las ventajas de tipo físico y dinámico, la aplicación de este método requiere considerable conocimiento del clima y la variabilidad climática regional, buena experiencia en modelado climático y en general tiene requerimientos altos de uso computacional, en algunos casos, como los necesarios para correr los MACGA. Con los avances computacionales de los últimos años, sin embargo, el uso de un cluster de computadoras para resolver este problema es una opción viable y no tan costosa. El Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI) tiene actualmente en uso un cluster pequeño (10 procesadores) y un cluster más grande (42 procesadores) con base en prototipos de estaciones de trabajo computacional usando procesadores rápidos de uso comercial. Estas facilidades de cómputo han sido utilizadas para aplicar este proceso de reducción de escala al caso del huracán Mitch (simulaciones numéricas) a fin de determinar la distribución espacial y temporal de la precipitación para la costa Pacífica de Costa Rica (Amador y Bonilla 2007) en una escala de hasta 3.3 km para compararla con los datos observados en estaciones puntuales y con los impactos sociales sufridos.

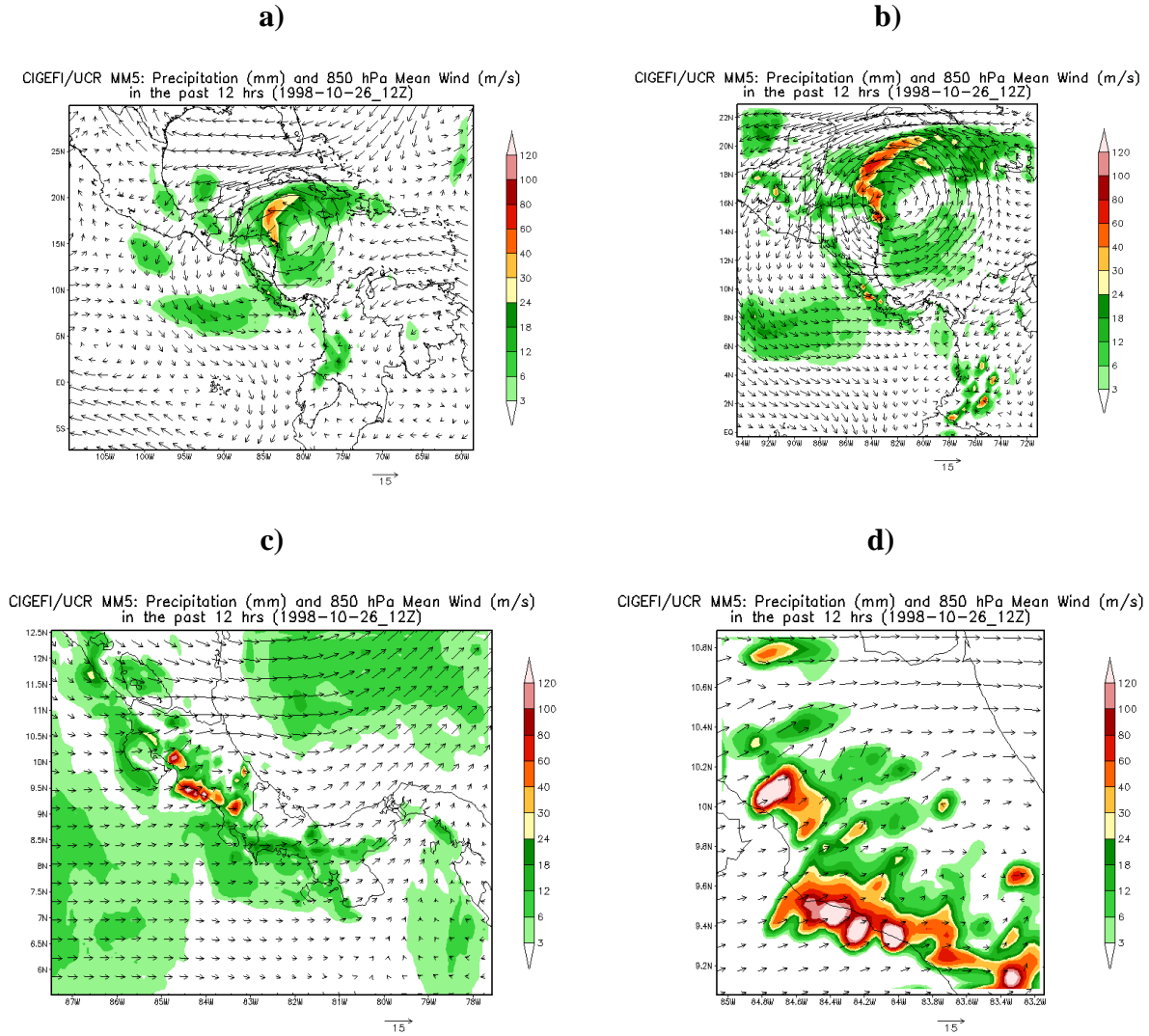


Figura 1. Vientos en 850 mb (1500 m de altura aproximadamente) y distribución de precipitación acumulada para el 25 de octubre de 1998 de las 00.00 GMT a las 12.00 GMT (06.00 p.m. del 25 de octubre a 06.00 a.m. del 26 de octubre de 1998, hora de Costa Rica) en a) el dominio madre (90 km de resolución), b) dominio 2 (30 km de resolución), c) dominio 3 (10 km de resolución) y d) dominio 4 (3.3 km de resolución), de acuerdo a simulaciones realizadas con el modelo de mesoescala MM5 ejecutadas en el cluster Sibú-Ará del Centro de Investigaciones Geofísicas de la Universidad de Costa Rica (Apéndice I). Los datos de entrada son del NCEP/NCAR (Kalnay et al. 1996)

La Figura 1 muestra un ejemplo de reducción dinámica utilizando datos de entrada del NCEP/NCAR (Kalnay et al. 19996) y el MM5 (Grell et al. 1993; Dudhia et al. 2005) como MCR. El caso estudiado es el del huracán Mitch (octubre- noviembre 1998) para cuatro dominios de integración utilizando interacción dinámica de dos vías entre los dominios de 90, 30, 10 y 3.3 Km (Figura 1a, 1b, 1c, y 1d, respectivamente). Nótese el mejoramiento en el detalle del campo de vientos de precipitación conforme la resolución se hace más fina, es decir, conforme se va del dominio de 90 Km al de 3.3 Km. Este tipo de procedimiento se puede aplicar para los escenarios de cambio climático si se poseen predicciones de MACGA a varios horizontes de tiempo y se anida un MR del tipo MMM5 o WRF (Weather Research and Forecasting, Shamarock et al. 2005; Wang et al. 2007) Un aspecto importante de esta técnica de ajuste dinámico es la necesidad de entrenamiento y formación de personal especializado para la aplicación de los modelos dinámicos, la interpretación de los resultados y la aplicación de éstos a los diferentes sectores de la sociedad.

5.2. Métodos estadísticos

Las técnicas de ajuste de escala estadístico usan las salidas de los MACGA y permiten la construcción de escenarios climáticos para sitios individuales o regiones con una resolución a diferentes escalas temporales como la diaria, la mensual y la estacional, utilizando para ello información estadística o de relación derivada de series de tiempo históricas. Estas técnicas son muy útiles cuando se requiere una evaluación rápida de escenarios climáticos locales a un relativamente bajo costo. Adicionalmente, éstas son en general flexibles y el uso de “ensembles” o agrupaciones de tipo estadístico de escenarios climáticos permite un análisis relativamente

confiable de la dupla riesgo/incertidumbre (ver Tabla 1 con detalles sobre sus fortalezas y debilidades más adelante según Wilby y Dawson 2004).

Todos los esquemas de ajuste de escala estadístico se basan en relaciones empíricas entre los predictores de gran escala derivados de los MACGA (temperatura, viento y precipitación, por ejemplo) y los predictantes regionales o locales. Estos métodos difieren principalmente en la forma de calcular la función matemática de transferencia y en el proceso del ajuste estadístico. De especial atención en estas técnicas es el hecho de que las relaciones predictor-predictante son algunas veces no estacionarias (Wilby y Dawson 2004), lo cual, simula mejor el comportamiento real del sistema climático.

Dentro de los métodos estadísticos más usados están las técnicas del análisis multivariado, varias de las cuales han sido utilizadas por investigadores del CIGEFI-UCR para el estudio de distintos campos superficiales sobre Centroamérica tales como la precipitación y temperatura superficial del aire y que se suponen están relacionadas con fenómenos de una escala mayor o global como el ENOS (El Niño-Oscilación del Sur). Como ejemplo de algunas de las técnicas ya implementadas y utilizadas en la región se pueden citar el Análisis de Correlación Canónica o ACC (Soley y Alfaro 1999, Alfaro 2007a,b), la Descomposición en Valores Singulares o DVS (Enfield y Alfaro 1999), las Funciones Ortogonales Empíricas o FOE (Alfaro, 2002), los modelos Vectoriales Auto Regresivos-Medias Móviles o VARMM (Alfaro y Cid 1999; Alfaro y Soley 2001) y las Regresiones Lineales o RL (Alfaro 2000; Alfaro y Amador 2003). En gran medida esto ha sido posible por los avances durante los últimos años en el desarrollo de la base de datos geofísicos NUMEROSA del CIGEFI-UCR (Soley 2005), ya que el uso de estas técnicas requiere datos de buena calidad que se extiendan por periodos de tiempo

razonables para asegurar alguna estabilidad estadística en las relaciones entre predictores y predictandos.

Tabla 1. Balance general de las debilidades y fortalezas del ajuste de escala estadístico (Wilby y Dawson 2004).

Fortalezas	Debilidades
Brinda información en la escala de las estaciones meteorológicas usadas a partir de las salidas de los MACGA.	Depende del realismo del forzamiento en la frontera del MACGA.
Barato, poco demandante computacionalmente y fácil de transferir entre diferentes plataformas de trabajo.	La escogencia del tamaño del dominio y su localización afectan los resultados.
Los “ensambles” de los escenarios climáticos permiten el análisis de riesgo/incertidumbre.	Requiere datos de muy buena calidad para la calibración del modelo.
Es aplicable a predictantes “no-tradicionales” tales como la calidad del aire o altura del oleaje.	Las relaciones predictor-predictante son con frecuencia no estacionarias.
	La escogencia de las variables usadas como predictores afectan el resultado.
	La escogencia del esquema empírico de la función de transferencia afecta el resultado.
	La variabilidad climática de baja frecuencia se vuelve problemática, especialmente si se usan series de tiempo cortas.
	Los resultados no retroalimentan al MACGA.

Una de las técnicas que permite transferir en forma eficiente información de un campo de variables con un número grande de predictores hacia otro campo de variables con un número grande de predictantes es el ACC (Johnson y Wichern 1988; Soley y Alfaro 1999, Alfaro et al.

2006). En esta técnica se asocian patrones presentes y pasados del campo usado como predictor (temperatura superficial del mar, TSM, por ejemplo) al campo de la variable sobre la cual se quiere hacer el ajuste de escala tomado como predictante (por ejemplo, la precipitación; Gershunov y Cayan 2003; Alfaro 2007b). Una ventaja del uso de esta técnica es que no asume una relación estacionaria entre los campos de los predictores y los predictantes ya que se pueden incorporar las tendencias existentes en alguno de ellos como fuente de variabilidad (Gershunov y Cayan 2003).

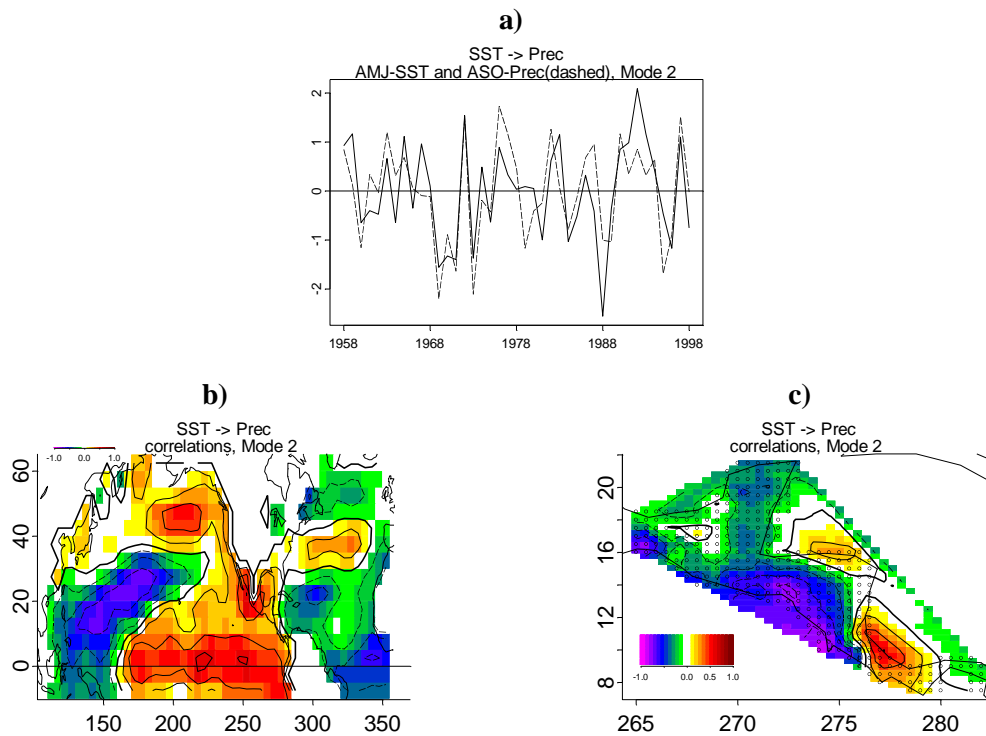


Figura 2. Segundo modo de variabilidad del ACC entre los campos de TSM durante el trimestre de AMJ y la precipitación sobre Centroamérica durante el trimestre de ASO. Las series de tiempo y su correlación se muestran en (a): TSM (línea sólida) y la precipitación (línea a trazos), la correlación entre las series es de 0.72. Los patrones espaciales de TSM (b) y de precipitación (c) se muestran como la correlación de los modos mostrados en (a) con las series de tiempo de los campos respectivos, es decir los valores de la rejilla de TSM en (b) y las estaciones de precipitación en (c). Los valores de correlación se representan por la escala de colores (-1: violeta, 1: rojo oscuro).

Actualmente se han obtenido algunos resultados preliminares para la precipitación sobre Centroamérica usando esta técnica por parte de investigadores del CIGEFI-UCR (Figura 2). En esta figura se muestra que un contraste fuerte de temperaturas entre el Pacífico ecuatorial del este y el mar Caribe durante el trimestre de Abril-Mayo-Junio (AMJ) afecta la distribución de precipitación en el istmo centroamericano durante el trimestre Agosto-Setiembre-October (ASO). Para ilustrar lo que se puede hacer con esta técnica en el caso de obtención de escenarios climáticos para la región, si se poseen proyecciones de MACGA de la TSM, se pueden deducir, para las situaciones especiales requeridas, el posible comportamiento de la precipitación. A modo de interpretación, en la Figura 2 se observa que temperaturas anómalamente cálidas (frías) en el Pacífico ecuatorial del este acompañadas de temperaturas anómalamente frías (cálidas) en el Mar Caribe (Figura 2b) tienden a estar asociadas con una disminución (un aumento) de la precipitación sobre una porción amplia del istmo (Figura 2c), ubicado sobre la costa Pacífica y el Norte de Centroamérica.

Otra técnica de fácil implementación y que no requiere conocimientos avanzados de estadística es la basada en regresiones lineales, simples o múltiples, en donde se busca establecer una relación significativa entre distintos predictores de las salidas de los MACGA y algún predictante como la precipitación en un sitio específico. El inconveniente de esta técnica es que las relaciones entre predictor-predictante son únicas y válidas solo para ese sitio específico. Por supuesto que esta técnica puede ser implementada para un conjunto de estaciones definidas pero con un relativo alto costo computacional. Para una adecuada utilización de este tipo de procedimiento estadístico, es muchas veces indispensable poseer conocimientos y experiencia en el tiempo atmosférico y clima regional, pues se puede asociar una interpretación física más sólida a la relación estadística encontrada.

5.3. Métodos Mixtos

A menudo, los métodos dinámicos y estadísticos por si solos no permiten construir un cuadro de escenarios en el que se definan adecuadamente sus incertidumbres y limitaciones. En estos casos, los métodos mixtos o híbridos pueden ser utilizados, aunque su uso es generalmente más complejo de implementar y requiere de experiencia más formal y documentada. En general, en este tipo de problema, el esquema dinámico precede al estadístico, el cual podría consistir simplemente en la determinación de incertidumbres con base en diferentes miembros de un ensemble o colectividad de resultados de los MACGA (Rivera y Amador 2007a,b). Entre más miembros del ensemble se utilicen, más estables serán los estadísticos de la distribución de las variables en los escenarios climáticos.

Un método mixto que toma ventaja de la técnica ACC para la construcción de escenarios de cambio climático ha sido propuesto por Gershunov et al. (2000) y Gershunov (2004). Estos autores propusieron un esquema híbrido de ajuste de escala (Figura. 3) en donde por ejemplo los patrones de campos de temperatura superficial del mar se asocian con patrones de variabilidad de las salidas de los MACGA como puede ser la altura del geopotencial en 500 hPa. Estos resultados son posteriormente usados como forzantes de los campos troposféricos superficiales, generalmente precipitación o temperatura superficial del aire, en un esquema de ACC.

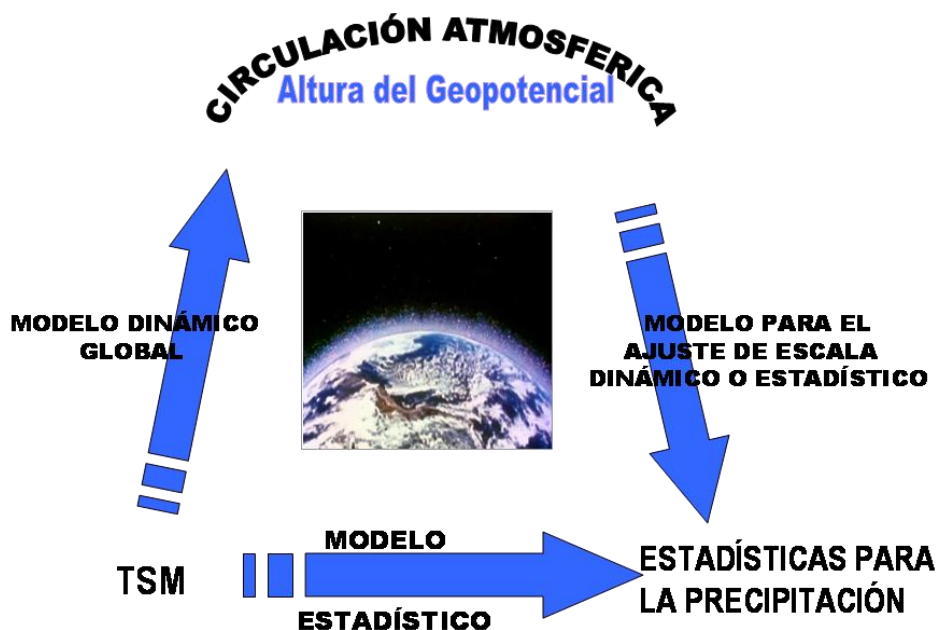


Figura. 3. Ejemplo de un esquema comparativo entre las aproximaciones del ajuste de escala dinámico, estadístico e híbrido. Adaptado de Gershunov (2004).

6. Datos climáticos, documentación histórica e indicadores por representación

La mayoría de las bases de datos para estudios y aplicaciones al problema del cambio climático en la región han sido recopiladas y organizadas por los Servicios Meteorológicos o Hidrológicos Nacionales y/o por otras instituciones nacionales o regionales de los países que tienen responsabilidad a nivel gubernamental para el ofrecimiento de servicios públicos a los diferentes sectores de la sociedad. Algunas bases de datos de carácter más regional, han sido desarrolladas por entes o instituciones nacionales de países desarrollados. El Climate Prediction Center del National Oceanic Atmospheric Administration (NOAA / CPC) tiene en desarrollo un proyecto comprensivo para mejorar el análisis de precipitación diaria basada en observaciones directas en las Américas. El objetivo de este proyecto es desarrollar productos para el análisis y aplicaciones de datos de precipitación diarios, mensuales y estacionales mejorados en un sistema

de mallas en apoyo al monitoreo del clima, predicción climática e investigación aplicada. Los productos están en expansión y esta iniciativa espera incluir todos los países de la región, según se describe en: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/realtime/index.shtml>. Información y direcciones electrónicas de otras bases de datos para diferentes tipos de aplicaciones, incluyendo cambio climático, están disponibles en la Organización Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization, WMO Distributed Databases) en <http://www.wmo.ch/web/ddbs/ddbs.html> y en http://cera-www.dkrz.de/IPCC_DDC/.

Los científicos sociales pueden ofrecer una importante contribución al rescate e implementación de bases de datos históricas para aplicaciones al cambio climático, en especial porque una parte de su trabajo consiste en el análisis de información y documentos históricos de décadas o siglos atrás en los que a menudo se consignaban datos sobre el tiempo y clima de la región. Un ejemplo de este tipo de contribuciones se encuentra en los trabajos de Solano (1999) y Solano y Díaz (2005) que permiten aplicaciones como las de Amador (2003). En relación con los indicadores por representación (en inglés, proxy data) han sido utilizados en diferentes estudios de impactos locales (Jansen et al. 2007).

7. Recursos científicos y tecnológicos para la obtención de escenarios climáticos

Por recursos científicos se entiende la información climática confiable, los modelos numéricos atmosféricos (de tiempo y clima) disponibles y en uso actual y las herramientas de diverso tipo adquiridas para la preparación de escenarios climáticos regionales. Los tecnológicos incluyen entre otros, las plataformas de computación, las comunicaciones para acceso a redes de datos y las redes de Internet.

Fundamentalmente hay dos tipos de modelos o herramientas para la adquisición de datos y la confección de escenarios de cambio climático, ambos de origen normalmente académico ligado a universidades, centros o instituciones de investigación de países desarrollados. Algunos de estos modelos, por diferentes razones, son de dominio público y están disponibles por medio de la red de Internet en centros especializados. Uno de estos casos es el modelo de mesoescala denominado MM5 Modeling System Version 3 (MM5v3) (<http://www.mmm.ucar.edu/mm5/mm5v3.html>). Una aplicación de este modelo usando reducción dinámica de escala fue presentada en la Figura 1. El otro tipo de modelo es de uso más restringido, en ocasiones no se posee el código fuente (tipo caja negra) y sus aplicaciones están vinculadas a los intereses científicos y técnicos de los grupos que desarrollaron esa herramienta. En este tipo puede citarse el PRECIS (<http://www.met-office.gov.uk/research/hadleycentre/models/PRECIS.html>). Ambos tipos de herramientas tienen ventajas y desventajas para su aplicación; algunas de ellas son descritas y discutidas en las siguientes secciones.

7.1. Modelos dinámicos de dominio público

El modelo MM5 tiene su origen en el desarrollo realizado por el grupo PSU/NCAR (Penn State University/Nacional Center for Atmospheric Research). Es un modelo de mesoescala de área limitada definida en un sistema de coordenadas σ (Sigma), donde σ igual a 1 coincide con el contorno de la Tierra, que fue diseñado para simular o predecir circulaciones regionales y de mesoescala. Ha sido desarrollado por PSU/NCAR como un modelo comunitario mejorado continuamente por contribuciones de usuarios de varias universidades y laboratorios gubernamentales alrededor del mundo. El “Fifth-Generation NCAR / Penn State Mesoscale

Model (MM5)” es el último de una serie desarrollado a partir del modelo de mesoescala usado por Anthes en la Universidad Estatal de Pennsylvania a principios de los años 70, que fue luego documentado por Anthes y Warner (1978). Entre las principales características de este modelo se pueden citar: i) capacidad de anidamiento múltiple de dominios, ii) dinámica no-hidrostática que permite el uso del modelo en una escala de pocos km, iii) capacidad de multi-procesamiento en plataformas de memoria compartida y distribuida, iv) aptitud de asimilación cuatri-dimensional de datos y v) mayor número de opciones físicas en procesos parametrizables con respecto a otras versiones anteriores del MM5. Este modelo tiene además el soporte de varios programas y rutinas auxiliares y todo el conjunto es referido colectivamente como el Sistema de Modelado MM5. Se dispone de una versión de este modelo que puede ser corrida en conjuntos de computadores mediante procesos de paralelismo computacional, con las ventajas que esto representa para el usuario con recursos computacionales limitados.

A pesar de que el MM5 está siendo utilizado de manera extensiva en muchos países, actualmente está en desarrollo el Weather Research and Forecasting (WRF) Model (<http://www.wrf-model.org/index.php>), el cual es un sistema de predicción numérico del tiempo diseñado no solo para aplicaciones de pronóstico operacional sino que puede cubrir necesidades de investigación atmosférica. El WRF es adecuado para un gran rango de aplicaciones que va, en la escala espacial, desde los pocos metros a los miles de kilómetros. El desarrollo de este modelo es un esfuerzo compartido principalmente entre NCAR, el National Oceanic and Atmospheric Administration/ National Centers for Environmental Prediction (NOAA/NCEP), el Forecast Systems Laboratory (FSL), la Air Force Weather Agency (AFWA), el Naval Research Laboratory, la Universidad de Oklahoma y la Federal Aviation Administration (FAA).

Algunos de estos modelos han sido utilizados para predicción climática estacional o simulaciones climáticas y pueden ser adaptados a la preparación de escenarios climáticos utilizando datos pronosticados del clima a partir de MACGA si se tiene la información de las condiciones de contorno requeridas por estos modelos de área limitada en el espacio tri-dimensional para diferentes horizontes de tiempo.

Relacionado con la temática del ajuste de escala dinámico, el CIGEFI-UCR organizó el Taller "Introducción al Problema del Modelado del Tiempo y el Clima Regional y Aplicaciones Básicas", del 9 al 13 de octubre del 2006. En este taller se capacitó sobre el uso de esta metodología a personas de varios países de Centroamérica que laboraban en los servicios meteorológicos e hidrológicos de la región.

7.2. Modelos y herramientas de dominio cerrado

En los últimos años algunas instituciones o universidades han desarrollado programas de aplicación relativos al cambio climático y a la generación de escenarios climáticos. En muchos casos estos programas son de uso restringido y el acceso a ellos es por medio de convenios o acuerdos especiales con los usuarios quienes en general no tienen a su disposición los códigos fuente de los programas. Esta situación presenta limitaciones y dificultades a los usuarios para algunos tipos de aplicaciones especiales como las regionales o locales, sin embargo es necesario recalcar que su utilidad general para la confección de escenarios climáticos está fuera de discusión para los efectos de este trabajo.

Una herramienta útil en este sentido y actualmente gratuita es el programa Statistical Downscaling Model o SDSM (Wilby y Dawson 2004), el cual puede verse en el sitio <http://www-staff.lboro.ac.uk/~cocwd/SDSM/>). Este programa ha sido usado experimentalmente

por los investigadores del CIGEFI-UCR para la construcción de escenarios de cambio climático en diversos sitios de Centroamérica a escalas temporales diarias a partir de la salida de un MACGA (Alfaro y Amador, 2003). Actualmente el Instituto Canadiense para Estudios Climáticos (CICS) ha creado un sitio web (<http://www.cics.uvic.ca/scenarios/sdsm/select.cgi>) desde el cual se pueden bajar los datos diarios del reanálisis del NCEP/NCAR para la identificación de los predictores y las salidas de varios experimentos de MACGA para distintos escenarios socioeconómicos (por ejemplo, A1 y A2, ver IPCC 2007), entre 1961 y 2099, para producir los escenarios de cambio climático. Estos experimentos cubren la región de interés, por lo que en un principio su uso es factible en esta área. La Figura 4 muestra el uso de esta técnica para la construcción de escenarios en donde se nota que un incremento de la precipitación (predictante) en la estación de Juigalpa (12.06° N, 85.22 ° W), Nicaragua, aparece asociado a un incremento en la vorticidad en el nivel de 850 hPa (predictor).

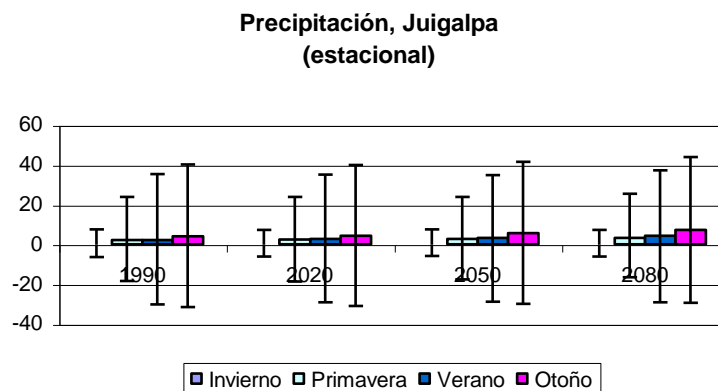


Figura 4. Cambio de la precipitación (mm) estacional en la estación de Juigalpa (12.06 °N, 85.22W), Nicaragua, usando como predictor la vorticidad en 850 hPa, a partir de resultados de las corridas del MACGA-Canadá para el escenario A1 para una resolución 3.7 ° latitud x 3.75 ° longitud.

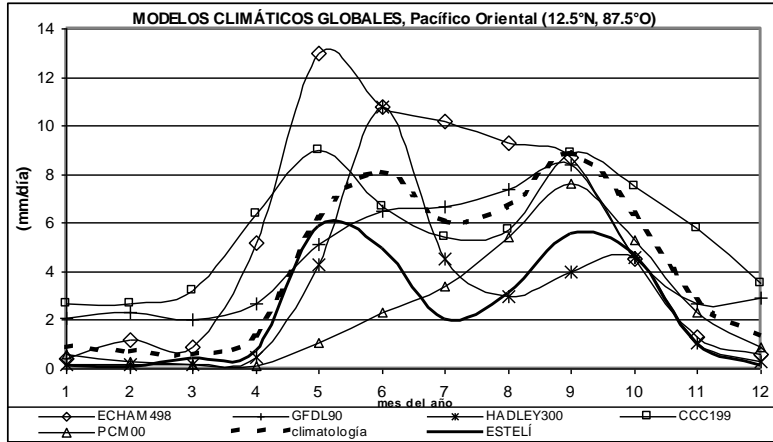
Otro programa usado para la generación de escenarios climáticos y también gratuito es el MAGICC/SCENGEN (Wigley 2004a,b; <http://www.cgd.ucar.edu/cas/wigley/magicc/>). El MAGICC es un programa amigable que toma los escenarios de emisiones de los gases de efecto invernadero, gases reactivos y de dióxido de azufre como entrada y produce como salida la temperatura global media y el aumento del nivel del mar. El MAGICC es un modelo acoplado del ciclo de los gases con un modelo climático. Este método ha sido usado en todos los reportes del IPCC para producir las proyecciones futuras del cambio de la temperatura global media y del nivel del mar. Las últimas versiones reproducen los resultados del Tercer Reporte de Evaluación o TAR del IPCC y el MAGICC puede ser usado para extender los resultados del TAR-IPCC a otros escenarios de emisiones. Para finales del 2007 se espera la publicación completa del Cuarto Reporte de Evaluación del IPCC (en inglés, AR4).

El SCENGEN es un algoritmo de regionalización que usa el método de escalamiento de patrones (Santer et al. 1990) para producir escenarios de cambio climático en una rejilla de 5° de latitud por 5° de longitud. Los resultados regionales del SCENGEN están basados en las salidas de modelos acoplados de circulación atmósfera-océano, los cuales pueden ser usados individualmente o en forma conjunta.

Sin embargo, debido a que la salida del SCENGEN es una rejilla con variabilidad espacial con poco detalle (5° lat x 5° lon) es recomendable aplicar alguna técnica de ajuste de escala para los estudios de cambio climático de impacto local. Tradicionalmente, se asume en forma burda que el cambio de temperatura o precipitación para algún horizonte futuro de tiempo y asociado a este píxel grueso de 5° lat x 5° lon es el que se va a reflejar a una escala espacial más fina o incluso al nivel de estaciones. Cabe destacar que esta premisa no es necesariamente

válida en una región de alta variabilidad climática, especialmente hablando, como la de Centroamérica.

a)



b)

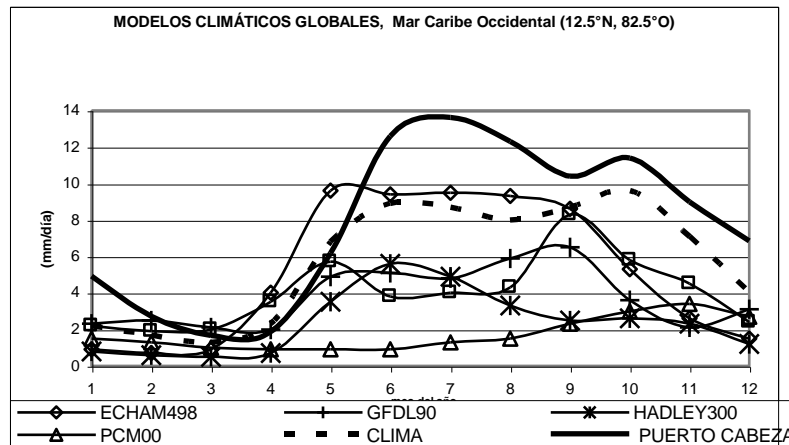


Figura 5. Ciclo anual promedio de la climatología base (1961-1990) de 5 modelos del MAGICC/SCENGEN en un punto cercano al a) Pacífico (12.5° N, 87.5° W) y b) Caribe (12.5° N, 82.5° W) de Centroamérica. Por comparación se graficó en a) y b) la climatología correspondiente de las estaciones de Estelí y Puerto Cabezas en Nicaragua (línea gruesa continua) y la estimación satelital de la lluvia en ese punto (línea gruesa a trazos, período 1981-2000).

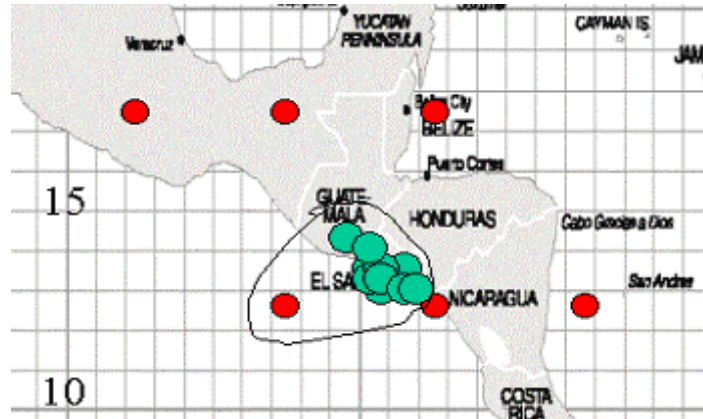


Figura. 6. Grupo de estaciones en la costa Pacífica de Centroamérica cuya correlación promedio fue mayor con el ciclo anual de precipitación de un punto de la salida del modelo ECHAM4.5 que no es él más cercano a ellas espacialmente hablando.

Finalmente, el CIGEFI-UCR ha explorado y propuesto el uso de este método en una forma diferente para la región. Stolz (2004) propone usar este software observando los siguientes dos pasos previos. Evaluar primero en las salidas de los MACGA para escoger aquellos que capturen elementos climáticos claves en nuestra región como por ejemplo el “veranillo” (Magaña et al. 1999) y la corriente en chorro de bajo nivel en el Caribe (Amador 1998; Amador y Magaña 1999; Amador et al. 2000; Amador et al. 2003 y Amador et al. 2006)). La Figura 5 muestra algunos ciclos anuales para puntos cercanos a Centroamérica. En segundo lugar, se deben determinar los puntos con información procedente del MAGICC/SCENGEN que se correlacionen mejor con las estaciones elegidas de la región y no necesariamente con aquellas que espacialmente coinciden con el píxel de la salida del MACGA, ya que por ejemplo una estación de régimen climático del Pacífico podría estar contenida dentro del área de un píxel del MACGA cuya información en su mayoría esta asociada con un ciclo anual del Caribe. La Figura. 6 muestra un ejemplo hecho con estaciones sobre la costa Pacífica de Centroamérica.

8. Disponibilidad en la Región de Recursos Humanos e Institucionales

Desde 1997 se han venido realizando en distintas partes de Latinoamérica los llamados Foros Regionales de Predicción Climática (conocidos como RCOFs por sus siglas en inglés). Estos RCOFs se han desarrollado en regiones que comparten sistemas climáticos con características en común y/o agrupados estratégicamente en organismos regionales como Centroamérica, el Caribe del Este, la costa Pacífica de Suramérica y la región del MERCOSUR (Sureste de Suramérica).

Si bien es cierto antes del año 2000 los RCOFs efectuados en Centroamérica tenían un concepto Mesoamericano, en donde se contemplaba además de la participación de los siete países Centroamericanos a México, Colombia, Ecuador y Venezuela, a partir del “Foro sobre pronósticos climáticos y sus aplicaciones en América Central. Avanzando hacia el próximo siglo” llevado a cabo en Ciudad de Belice, Belice, del 22 al 24 de mayo del 2000 y promovido por el Comité Regional de Recursos Hidráulicos (CRRH), un órgano del Sistema de la Integración Centroamericana (SICA), la predicción climática se realiza únicamente para los países de América Central: Belice, Guatemala, Honduras, El Salvador, Nicaragua, Costa Rica y Panamá. Desde ese foro, los RCOFs en Centroamérica adquieren soporte gubernamental y forman parte del marco de acciones aprobado por los presidentes de la región para reducir la vulnerabilidad de los impactos de desastres naturales. Esto es motivado principalmente por el hecho de que las economías de estos siete países esta basada en actividades tales como la exportación de productos agrícolas y/o marinos, lo que los hace vulnerables a variaciones climáticas interanuales fuertes. Además, en muchos de ellos la producción de energía hidroeléctrica representa más del 55% de la capacidad instalada y la región es susceptible a incendios forestales y hambrunas durante periodos largos de sequía (Donoso y Ramírez 2001). A

modo de ejemplo las pérdidas en producción de granos en la región durante 1994 alcanzaron los US\$ 160.3 millones, principalmente por factores climáticos.

Aparte del apoyo de los países y organizaciones miembros del SICA, el CRRH ha contado con el apoyo tanto financiero como logístico de distintas organizaciones para la organización de los RCOFs. Dentro de estas organizaciones podemos citar: la Oficina de programas Globales de la NOAA (OGP-NOAA), el Instituto Internacional de Investigaciones en Clima y Sociedad (IRI), la Organización Meteorológica Mundial (OMM), el Centro del Agua para el Trópico Húmedo de Latinoamérica y El Caribe (CATHALAC), el Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI), la Oficina de Asistencia para Desastres Externos del AID (OFDA-USAID) y recientemente con el apoyo del programa de Cooperación México-Centroamérica (Donoso y Ramírez 2001). Estos foros, generalmente reúnen a los representantes de los servicios meteorológicos e hidrológicos, así como a los miembros de la comunidad científica y académica, que trabajan en la elaboración de las perspectivas climáticas regionales y locales. El objetivo de estos foros es el de usar la experiencia climática nacional para elaborar una perspectiva climática de consenso regional, generalmente de precipitación, de los próximos meses y que además se presente en una forma útil para las distintas agencias involucradas e interesadas.

Los periodos para los cuales se hacen las predicciones actualmente en Centroamérica son: Mayo-Junio-Julio, Agosto-Septiembre-Octubre y Diciembre-Enero-Febrero-Marzo. En ellos también se hacen pronósticos sobre la entrada de la estación lluviosa, el periodo de veranillo y canículas y la salida de la estación lluviosa, respectivamente. Sin embargo, la Perspectiva no contempla eventos extremos puntuales y de corta duración. El mapa producido (ver por ejemplo Figura 7) presenta escenarios de probabilidad de la condición media en el trimestre y no se

refiere a las condiciones en cada uno de los meses individualmente. Además, los participantes de los foros hacen consideraciones especiales por país.

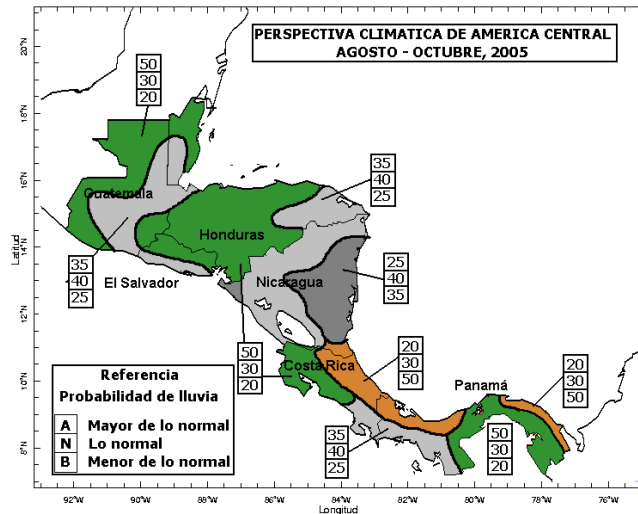


Figura. 7. Mapa de probabilidades de precipitación, correspondiente a la perspectiva climática del período Agosto-Setiembre-Octubre del 2005, elaborado durante el “II Foro del Clima de América Central del 2005 (II FCAC- 05)”, Ciudad de Panamá, Panamá, del 18 al 22 de julio del 2005.

La metodología recomendada para los RCOFs es simple, en ella las probabilidades de los distintos terciles de la precipitación o temperatura, como predictante, se extraen de una tabla de contingencia de dos variables en donde se usa algún índice climático como predictor, p.e. el Índice de Oscilación del Sur (IOS) o índices asociados al promedio de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) en alguna región como por ejemplo Niño 3 o el Atlántico Tropical Norte (ATN). Esta perspectiva se integra luego regionalmente para ayudar a los distintos servicios meteorológicos en sus diversas actividades, así como también a los tomadores de decisión y grupos de interés involucrados.

Con el fin de mejorar estos foros, la comunidad científica y académica ha discutido algunos problemas que han enfrentado los RCOFs y las posibles formas en las cuales los resultados de sus investigaciones pueden ayudar con estos procesos. Dentro de los problemas detectados se puede mencionar que al no tener una metodología estandarizada, las diferentes contribuciones nacionales a la predicción regional no son uniformes y algunas veces no son consistentes físicamente, teniéndose resultados en países vecinos diametralmente opuestos a lo largo de sus fronteras. Por otra parte, el fundamento estadístico sobre la metodología de los terciles parece no serles muy familiar a algunos de los participantes, por lo que sus perspectivas climáticas se basan en ocasiones en evaluaciones subjetivas. Algunas de las razones de lo anterior son: i) los recursos de algunas instituciones están limitados al quehacer diario y pueden asignar muy poco de su presupuesto a actividades de investigación y capacitación; además, ii) hasta ahora ha habido muy pocas oportunidades de entrenamiento sobre estos conceptos para los participantes en estos foros.

El CIGEFI-UCR como parte de sus actividades de extensión, ha contribuido activamente para superar estas deficiencias desarrollando una serie de programas amigables para facilitar la implementación del pronóstico climático usando el concepto de los terciles y capacitando a los participantes de los foros sobre distintos aspectos teóricos y prácticos asociados a la predicción climática (Alfaro et al. 2003). El software elaborado por los investigadores del CIGEFI-UCR fue introducido en la región centroamericana durante el “I Foro regional del Clima en Centroamérica 2003”, celebrado en la Universidad de San Pedro Sula, San Pedro Sula, Honduras, del 7 al 9 de abril del 2003. Durante este foro se desarrolló una sesión práctica con los participantes del foro llamada: “Análisis de Contingencia para Aplicaciones Climáticas: algunos ejemplos para Centroamérica” (Dr. Eric J. Alfaro). Adicionalmente hubo dos sesiones teóricas introductorias:

“Conceptos Básicos sobre una Tabla de Contingencia” (Dr. Javier Soley, CIGEFI-UCR) y “Principios del pronóstico estadístico climático” (David Enfield, AMOL-NOAA). Los programas desarrollados han tenido una buena aceptación por parte de los participantes de los foros climáticos de Centroamérica y la costa oeste de Suramérica, en donde dichas herramientas son usadas actualmente para la elaboración de sus perspectivas climáticas. Actualmente el CIGEFI continúa cooperando y participando de las distintas actividades de capacitación que se desarrollan durante los RCOFs.

Los principales aspectos que actualmente consideran estos participantes para elaborar la predicción durante el RCOF son la evolución de las anomalías de la temperatura de la superficie del mar (TSM) de los océanos Pacífico y Atlántico Tropical, los pronósticos de TSM en esos océanos para los próximos meses, las predicciones climáticas de distintos modelos de circulación general, los registros históricos de lluvia para años análogos y los pronósticos para la temporada de huracanes en el océano Atlántico y el Caribe de diferentes agencias (cuando sea pertinente). Además, se utilizan los escenarios climáticos, usando análisis contingente de lluvia, basados en los valores de la temperatura superficial del mar en las regiones del Atlántico Tropical Norte y del Niño 3, las estimaciones basadas en análisis contingente realizadas por los Servicios Meteorológicos Nacionales (SMNs) y la evolución del clima de la Región durante primer semestre anterior al RCOF.

Cabe destacar que el producto elaborado no es directamente distribuido al público en general. En primera instancia los SMHs de la región realizan una video conferencia luego de cada RCOF en donde se dan a conocer los resultados del evento a las distintas instituciones interesadas. Se recomienda además, que debido a lo amplio de la escala, en áreas con microclimas el comportamiento de la lluvia puede presentar variaciones respecto a lo descrito en

la “Perspectiva”, por tanto, las decisiones que se tomen con base en ella a nivel nacional o local deben considerar estas singularidades y que los interesados en obtener más información deberán contactar a las organizaciones encargadas de las predicciones climáticas en cada país. Por último, estas perspectivas son tomadas e interpretadas por distintas organizaciones regionales como CORECA y CEPREDENAC, para ser luego transferidas hacia usuarios específicos dentro de los cuales podemos citar a los sectores agrícolas, protección y producción forestal, pesca, administración de áreas protegidas y generación de energía.

9. Conclusiones y recomendaciones

La elección de la técnica estadística o dinámica a usar depende también del nivel de dominio de los conceptos de clima y variabilidad climática regional, los estadísticos y de las técnicas computacionales del grupo hacia el cual se requiere hacer esta transferencia. Si el nivel de dominio en estos temas por parte del grupo no es el adecuado, se deben considerar sesiones de entrenamiento en estos tópicos para subsanar parcialmente estas deficiencias.

El método del ACC es relativamente fácil de implementar en la región con usuarios que tengan un adecuado nivel de formación en estadística, los cuales generalmente se encuentran en los centros de investigación de las universidades como en el CIGEFI-UCR.

MAGICC/SCENGEN Estos programas son de fácil manejo por parte de grupos heterogéneos en su nivel académico, pero con conocimientos climáticos básicos como el grupo participante en los RCOFs de Centroamérica. La ventaja de explorar su uso con este tipo de grupo es que este además puede aportar alguna interpretación preliminar de los resultados obtenidos como se mencionó anteriormente. Sin embargo, debido a que la salida del SCENGEN es una rejilla con variabilidad espacial poco detallada (5° lat x 5° lon) es recomendable aplicar

alguna técnica de ajuste de escala para los estudios de cambio climático de impacto local. Tradicionalmente, se asume en forma burda que el cambio de temperatura o precipitación para algún horizonte futuro de tiempo y asociado a este píxel grueso de 5° lat x 5° lon es el que se va a reflejar a una escala espacial más fina o incluso al nivel de estaciones. Cabe destacar que esta premisa no es necesariamente válida en una región de alta variabilidad climática, espacialmente hablando, como la que interesa a este trabajo.

Un aspecto importante de esta técnica de ajuste dinámico es la necesidad de entrenamiento y formación de personal especializado para la aplicación de los modelos e interpretación de los resultados.

En el proceso de reducción de escala para estudios de impacto, los científicos sociales pueden ofrecer una importante contribución al problema con el rescate e implementación de bases de datos históricas para aplicaciones a la variabilidad y el cambio climático, en especial porque una parte de su trabajo consiste en el análisis de información y documentos históricos de décadas o siglos atrás en los que a menudo se consignaban datos sobre el tiempo y clima de la región.

10. Agradecimientos

Se agradece a los proyectos: CRN-2050-IAI, V.I. 805-A7-002, V.I. 808-A6-053 y ED-1977, UCR. El presente trabajo fue parcialmente financiado por los proyectos MM5-UCR de NOAA/OGP (VI-805-98-506) y el VI-7863-2006. Se agradece el apoyo y la oportunidad brindada por los organizadores del III Congreso Iberoamericano sobre Desarrollo y Ambiente. A Erick Rivera y Blanca Calderón por la ejecución del MM5 para el caso Mitch y a Natalie Mora por su colaboración en la preparación del manuscrito.

11. Referencias

- Alfaro, E., 2007a. Predicción Climática de la Temperatura Superficial del Aire en Centroamérica. *Ambientico*, No 165, 6-10.
- Alfaro, E., 2007b. Uso del Análisis de Correlación Canónica para la predicción de la precipitación en Centroamérica. Aceptado en *Revista Ingeniería y Competividad*. Cali, Colombia. En prensa.
- Alfaro, E., 2002: Some Characteristics of the Annual Precipitation Cycle in Central America and their Relationships with its Surrounding Tropical Oceans. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 9(2), 88-103.
- Alfaro, E., 2000: Response of Air Surface Temperatures over Central America to Oceanic Climate Variability Indices. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 7(2), 63-72.
- Alfaro, E., A. Gershunov and D. Cayan, 2006: Prediction of Summer Maximum and Minimum Temperature over the Central and Western United States: The Roles of Soil Moisture and Sea Surface Temperature. *J. Climate*, 19(8), 1407-1421.
- Alfaro, E. y J. Amador, 2003: Assessment of some MACGA's features and applications of Downscaling in the Central American Region. In *Memories of the First Latin American and the Caribbean Regional Workshop, Assessment for Impacts and Adaptation to Climate Change in Multiple Regions and Sectors*. AICC-CRRH(SICA)-UCR, San José, Costa Rica. Del 27 al 30 de mayo del 2003.
- Alfaro, E., J. Soley y D. Enfield, 2003: Uso de una Tabla de Contingencia para Aplicaciones Climáticas (Use of a Contingency Table for Climatic Applications), ISBN 9978-310-00-2. Editado por ESPOL y FUNDESPOL, Guayaquil, Ecuador. 51pp.
- Alfaro, E. y L. Cid, 1999: Ajuste de un modelo VARMA para los campos de anomalías de precipitación en Centroamérica y los índices de los océanos Pacífico y Atlántico Tropical. *Atmósfera*, 12(4), 205-222.
- Alfaro, E. y F. Soley, 2001: Ajuste de un modelo VAR como predictor de los campos de anomalías de precipitación en Centroamérica. *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*, 8(1), 99-116.
- Amador, J. A. y A. Bonilla 2007: Ciclones tropicales y sociedad: Una aproximación al enfoque científico de estos fenómenos atmosféricos como referente para la investigación social en

- desastres. En: Concepciones y representaciones de la naturaleza y la ciencia en América Latina, Programa de Estudios Sociales de la ciencia, la Técnica y el Medio Ambiente, Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI). En trámite de publicación.
- Amador, J. A., E. J. Alfaro, O. G. Lizano, and V. O. Magaña, 2006. Atmospheric forcing of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69, 101-142.
- Amador, J. A., J. R. Chacón, and S. Laporte, 2003. Climate and climate variability in the Arenal Basin of Costa Rica. In *Climate, Water and Trans-boundary Challenges in the Americas*. Ed. Henry Díaz and Barbara Morehouse. Kluwer Academic Publishers. Holland, pp. 317-349.
- Amador, J. A., 2003. Clima y variabilidad climática en Costa Rica a través de información histórica del siglo XIX. En: *Estudios sobre historia y ambiente en América, II: Norteamérica, Sudamérica y el Pacífico*. Compiladores: Bernardo García Martínez y María del Rosario Prieto. México, El Colegio de México / IPGH. (ISBN 968-6384-69-X), pp. 37-54.
- Amador, J. A., V. O. Magaña and J. B. Pérez, 2000. The low level jet and convective activity in the Caribbean. Preprints 24th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, American Meteorological Society, 29 May-2 June, 114-115.
- Amador, J. A., and V. Magaña, 1999. Dynamics of the Low-level jet over the Caribbean Sea. Preprints 23rd Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, American Meteorological Society, 10-15 January, 99, Vol. 2, 868-869.
- Amador, J., 1998. A climatic feature of the tropical Americas: The trade wind easterly jet. *Top. Meteor. y Ocean.* 5(2), 91-102.
- Anthes, R. A., and T. T. Warner, 1978: Development of hydrodynamic models suitable for air pollution and other mesometeorological studies. *Mon. Wea. Rev.*, 106, 1045-1078.
- Donoso, M., y P. Ramírez, 2001: Latin America and the Caribbean: Report on the Climate Outlook Forums for Mesoamerica. In: *Coping with the climate: A step Forward*. Workshop Report: A multi-stakeholder review of Regional Climate Outlook Forums. October 16-20, 2000, Pretoria, South Africa. Publication IRI-CW/01/1. 11-18.
- Díaz, R. y F. Solano, 2005. *La ciencia en Costa Rica: (1814-1914). Una mirada desde la óptica universal, latinoamericana y costarricense*. Editorial Costa Rica. San José, Costa Rica. 70pp.
- Dudhia, J., D. Gill, Y-R. Guo, K. Manning, W. Wang, y C. Bruyere, 2005: PSU/NCAR Mesoscale Modeling System Tutorial Class Notes and Users' Guide: MM5 Modeling System Version 3. Mesoscale and Microscale Meteorology Division, NCAR, 117 pp.

- Enfield, D. y E. Alfaro, 1999: The dependence of caribbean rainfall on the interaction of the tropical Atlantic and Pacific Oceans. *J. Climate*, 12, 2093-2103.
- Gershunov, A., 2004: Regional climate forecasting via statistical downscaling as well as by Pure Statistics. Presented at The California Energy Commission's Annual Climate Change Conference, From Climate to Economics: Anticipating Impacts of Climate Change in California. Sacramento, California, June 9-10, 2004.
- Gershunov, A., y D. Cayan, 2003: Heavy daily precipitation frequency over the contiguous United States: Sources of climate variability and seasonal predictability. *J. Climate*, 16, 2752-2765.
- Gershunov, A., T. Barnett, D. Cayan, T. Tubbs y L. Goddard, 2000: Predicting and downscaling ENSO impacts on intraseasonal precipitation statistics in California: The 1997/98 event. *J. Hydrometeor.*, 1, 201-209.
- Giorgi, F. and L.O. Mearns. 1999. Introduction to special section: Regional climate modeling revisited. *Journal of Geophysical Research*, 104(D6): 6335–6352.
- Grell, G. A., J. Dudhia, y D. R. Stauffer, 1993: A description of the fifth generation Penn State/NCAR mesoscale model. NCAR Tech. Note 398+IA, 122 pp.
- Jansen, E., J. Overpeck, K.R. Briffa, J.-C. Duplessy, F. Joos, V. Masson-Delmotte, D. Olago, B. Otto-Bliesner, W.R. Peltier, S. Rahmstorf, R. Ramesh, D. Raynaud, D. Rind, O. Solomina, R. Villalba and D. Zhang, 2007: Palaeoclimate. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Johnson, R. y D. Wichern, DW, 1988: Canonical Correlation Analysis. In: *Applied Multivariate Statistical Analysis*. 2da. ed. Prentice Hall, New York, 438-469.
- Jones, P., J. A. Amador, M. Campos, K. Hayhoe, M. Marin, J. Romero and A. Fischlin, 2005. Generating climate change scenarios at high resolution for impact studies and adaptation: Focus on developing countries. In *Tropical Forests and adaptation to climate change: In search of synergies*. C. Robledo, M. Kanninen, L Pedroni, Editors..CIFOR, Bogor Barat, Indonesia, 38-56.

- Magaña, V., J. A. Amador, and S. Medina, 1999. The Mid-Summer Drought over México and Central America. *J. of Climate*, 12, 1577-1588.
- Marengo, J. and J. A. Amador, 2005. Climate variability and climate change in Latin America. IPCC Fourth Assessment Report (AR4). Ed. T. Carter, IPCC. Contribution to IPCC WG II, April 2004.
- Oliver, J. E. (2005): Climate Classification. In *Encyclopedia of World Climatology* (J. Oliver, Ed.), Springer, Netherlands, pp. 218-227.
- Pielke R. Jr., C. Landsea, M. Mayfield and R. Pasch, 2005. Hurricanes and global warming. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 86: 1571-1575.
- Price, D.T., D. W. McKenney, D. Caya, and H. Côté, 2001. Transient climate change Scenarios for High Resolution Assesment of Impacts on Canada's Forest Ecosysems. Report to Climate Change Action Fund, July 2001, 42 pp.
- Rivera, E. y J. A. Amador, 2007a: Predicción Estacional del Clima en Centroamérica mediante la reducción de escala dinámica. Parte I: Evaluación de los Modelos de Circulación General CCM3.6 y ECHAM4.5. Enviado a la Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones (CIMPA - UCR - CCSS).
- Rivera, E. y J. A. Amador, 2007b: Predicción Estacional del Clima en Centroamérica mediante la reducción de escala dinámica. Parte II: Aplicación del modelo MM5v3. Enviado a la Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones (CIMPA - UCR - CCSS).
- Santer, B.D., Wigley, T.M.L., Schlesinger, M.E. ynd Mitchell, J.F.B., 1990: Developing Climate Scenarios from Equilibrium MACGA Results. Max-Planck-Institut für Meteorologie Report No. 47, Hamburg, Germany, 29 pp.
- Sela, J. G., 1982: The NMC Spectral Model, NOAA Tech. Rep. NWS-30, 36 pp.
- Sela, J. G., 1988: The new NMC operational spectral model, Eighth Conference on Numerical Weather Prediction, February 22-26, Baltimore, Maryland.
- Semenov, M.A. and E.M. Barrow. 2000. Development of climate change scenarios for agricultural applications. In: T. Carter, M. Hulme, W.A. Cramer and R. Doherty (eds.) *Climate Scenarios for Agricultural, Ecosystem and Biological Impacts, ECLAT-2. Second Workshop Report*, Climate Research Unit, University of East Anglia, Norwich, U.K., pp. 32–49.

- Shamarock, W. C., J. Klemp, J. Dudhia, D. Gill, D. Barker, W. Wang, y J. Powers. 2005: A Description of the Advanced Research WRF Version 2. NCAR Tech. Note TN-468+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO.
- Solano, F., 1999. El proceso de institucionalización de la meteorología en Costa Rica en el siglo XIX. Tesis de Licenciatura. Escuela de Historia. Universidad de Costa Rica. 227pp.
- Soley, F., 2005: Estado de la base de datos NUMEROSA. Informe técnico. Centro de Investigaciones Geofísicas, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 30pp.
- Soley, F. y E. Alfaro, 1999: Aplicación de análisis multivariado al campo de anomalías de precipitación en Centroamérica. Tóp. Meteor. Oceanog., 6(2), 71-93.
- Stolz, W., 2004: Generación de escenarios de precipitación en Centroamérica para el siglo XXI. Informe técnico. Centro de Investigaciones Geofísicas, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 21pp.
- Wang, W., D. Barker, J. Bray, C. Bruyère, M. Duda, J. Dudhia, D. Gill, y J. Michalakes, 2007: WRF Version 2 Modeling System User's Guide. http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide/contents.html
- Wigley T., 2004a: The MAGICC/SCENGEN 4.1:Technical Manual. 12pp.
- Wigley T., 2004b: The MAGICC/SCENGEN 4.1:User Manual. 24pp.
- Wilby, R. y C. Dawson, 2004: Using SDSM versión 3.1-A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. England, UK. 67pp.
- Wilby, R., S. Charles, E. Zorita, B. Timbal, P. Whetton y L. Mearns, 2004: Guidelines for use of climate Scenarios developed from statistical downscaling methods. IPCC Technical Document. 27pp.

Apéndice I. Configuración del modelo MM5

- 1- Utiliza cuatro dominios:
 - 1^{er} Dominio: 50 x 65 puntos de rejilla separados por 90 Km
 - 2^{do} Dominio: 91 x 88 puntos de rejilla separados por 30 Km
 - 3^{er} Dominio: 82 x 112 puntos de rejilla separados por 10 Km
 - 4^{do} Dominio: 64 x 67 puntos de rejilla separados por 3,3 Km
- 2- Ejecución con interacciones de dos vías entre los dominios (2 way-nesting)
- 3- Utiliza 35 niveles de la coordenada σ (sigma) en la vertical.
- 4- Parametrizaciones
 - a. esquema de humedad hielo simple
 - b. esquema de cúmulos para los primeros tres dominios es el Grell, para el cuarto dominio la lluvia se calcula explícitamente
 - c. esquema de capa límite es el MRF
 - d. esquema de radiación que considera la radiación emitida por nubes
 - e. Suelo es un modelo sencillo de multicapas
 - f. no toma en cuenta la convección poco profunda.