



Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones

ISSN: 1409-2433

mta.cimpa@ucr.ac.cr

Universidad de Costa Rica

Costa Rica

Rivera, Erick R.; Amador, Jorge A.

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

Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones, vol. 15, núm. 2, julio-diciembre, 2008, pp. 131-173

Universidad de Costa Rica

San José, Costa Rica

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=45326936003>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

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

ERICK R. RIVERA^{*} JORGE A. AMADOR^{**}

Recibido/Received: 20 Feb 2008 — Versión revisada/Revised version: 10 Abr 2008
— Aceptado/Accepted: 11 Jul 2008

Resumen

Mediante la evaluación del campo vectorial de viento en bajo nivel y de precipitación derivados de dos modelos de circulación general (ECHAM4.5 y CCM3.6), para el período 1990-1999, se determinó la habilidad de dichos modelos para simular aspectos dinámicos y termodinámicos asociados al clima centroamericano y su variabilidad climática. Para ello, primeramente se analizan las características de la atmósfera consideradas como fundamentales contribuyentes del régimen climático regional. De acuerdo con los resultados de esta evaluación, el ECHAM4.5 exhibe una representación más realista de varios aspectos del ciclo anual y estacional de la atmósfera tropical de interés, por lo que la información de gran escala ($\approx 5 \times 10^3$ km) de este modelo se utiliza en la parte II de este trabajo para proveer las condiciones iniciales y de contorno como funciones de espacio y tiempo necesarias para efectuar un proceso de reducción de escala dinámica de hasta 30 km de resolución espacial con el modelo regional MM5v3.

Palabras clave: modelos numéricos, predicción climática estacional, reducción de escala dinámica, clima, variabilidad climática.

Abstract

^{*}Centro de Investigaciones Geofísicas, Universidad de Costa Rica, 2060 San José Costa Rica. E-mail: errivera@cariari.ucr.ac.cr

^{**}Centro de Investigaciones Geofísicas y Escuela de Física, Universidad de Costa Rica, 2060 San José Costa Rica. E-mail: jamador@cariari.ucr.ac.cr

The ability of two general circulation models (ECHAM4.5 and CCM3.6) to simulate key climate features of Central America is determined by the evaluation of both precipitation and low-level wind fields for the period 1990-1999. According to the evaluation, ECHAM4.5 exhibits a more realistic representation of the regional climate. Therefore, its output is used in order to provide the initial and boundary conditions necessary to perform a dynamical downscaling using the regional model MM5v3.

Keywords: numerical models, seasonal climate prediction, dynamical downscaling, climate, climate variability.

Mathematics Subject Classification: 86A10.

1. Introducción

El conocimiento adecuado del clima como una función de espacio-tiempo y la capacidad de predecirlo son retos que las sociedades han enfrentado a lo largo de la historia y que siguen vigentes en nuestra época. Por supuesto, en Centroamérica esta realidad no es la excepción y en los últimos años ha existido una creciente demanda por el desarrollo de herramientas y facilidades computacionales que permitan la utilización de un sistema completo de predicción climática a partir de modelos numéricos de la atmósfera.

Los modelos numéricos atmosféricos son básicamente representaciones de los procesos dinámicos y físicos que se producen en la atmósfera terrestre. Los modelos de circulación general (MCG) mediante el uso del sistema completo de ecuaciones para fluidos compresibles y procesos diabáticos intentan reproducir el comportamiento atmosférico global de la manera más completa posible para diferentes escalas de movimiento. Esta tarea implica generalmente la utilización y disponibilidad de una importante capacidad de cómputo.

El factor computacional en cierta forma limita la capacidad de los MCG de simular o pronosticar aspectos climáticos a escalas inferiores a los cientos de kilómetros. Una solución a esta problemática se encuentra en la utilización de modelos numéricos regionales (MNR) o de área limitada que, a partir de los resultados de gran escala provenientes de los MCG, pueden producir información de alta resolución de la circulación atmosférica regional. Este procedimiento es conocido como reducción de escala o regionalización dinámica (*dynamical downscaling*, en inglés).

Por ser los modelos representaciones aproximadas de la realidad, su desempeño no es del todo perfecto. Esto hace necesario realizar evaluaciones detalladas de los MCG disponibles con el fin de determinar “el modelo óptimo” para elaborar predicciones futuras del clima en el ámbito regional. Para realizar la evaluación se debe poseer localmente un amplio conocimiento de los aspectos climáticos, una familiarización razonable de la dinámica y física de los modelos y una disponibilidad de datos con los cuales comparar y evaluar las salidas de estos modelos.

Puesto que la experiencia desarrollada en Centroamérica en cuanto al uso e implementación de sistemas de modelado numérico ha sido escasa, el presente estudio pretende ser una base de trabajo e investigación en esta importante área. Para ello, se resumen primero las características climáticas de Centroamérica con el fin de tener un panorama de referencia que posibilite examinar los resultados de las simulaciones hechas por dos

modelos de circulación general: el ECHAM4.5 (*European Centre Hamburg Model* versión 4.5, Roeckner et al., 1996) y el CCM3.6 (*Community Climate Model* versión 3.6, Kiehl et al., 1996). Esta parte I trabajo (denominado de ahora en adelante RA1) describe y discute los modelos, los datos y métodos utilizados y se identifica el MGC que muestra el mejor desempeño, capturando aspectos de la estructura cuatri-dimensional de la atmósfera. Este modelo es entonces utilizado para que proporcione las condiciones iniciales y de contorno necesarias para la ejecución de un experimento de reducción de escala con el modelo regional MM5v3 (*Fifth Generation Mesoscale Model* versión 3, Grell et al., 1993; Dudhia et al., 2005). Estos experimentos de reducción de escala se discuten en un artículo que acompaña al presente (Parte II) el cual de ahora en adelante se denominará RA2 (Rivera & Amador, 2009).

En la actualidad existe una amplia variedad de modelos numéricos de predicción climática y en algunos casos, resultados provenientes de estos modelos son utilizados por diferentes grupos de trabajo e instituciones regionales para elaborar las perspectivas del clima futuro. Sin embargo, el desarrollo de conocimientos y de métodos de trabajo adecuados para implementar el uso de estas herramientas, unido a la formación de recurso humano calificado y el establecimiento de infraestructura adecuada, son necesidades que deben satisfacerse con el propósito de lograr un verdadero aprovechamiento de estas técnicas de modelado numérico. En este sentido, el presente trabajo pretende contribuir a un mejor entendimiento del estado del problema y a la proposición de una solución teórica-práctica a futuro del mismo.

El clima y muchas de sus manifestaciones están íntimamente ligadas a las diferentes actividades humanas, tales como la agricultura, la ganadería, la generación de energía, el transporte, la comunicación y la salud. Por ejemplo, las pérdidas económicas en Centroamérica asociadas al huracán Mitch (1998) superaron los 6200 millones de dólares (IPCC, 2001) y debido al evento de El Niño 1997-1998, en América Central y América del Sur se concentró el 4,1% de la mortalidad y el 54,4% del total de las pérdidas económicas (OPS, 2000). Por tales motivos, el estudio de las características climáticas de una región, el buen entendimiento de sus variaciones y la posibilidad de predecirlas, adquieren una importancia especial para nuestra sociedad (WMO, 1999; Bedritsky, 1999; Basher et al., 2001).

La predicción climática es fundamental en los procesos de toma de decisiones y constituye un problema de gran complejidad que requiere contar con suficiente información de buena calidad y la utilización de técnicas, herramientas y conocimientos científicos que permitan estimar con cierto grado de confianza el comportamiento futuro del clima (Moura & Sarachik, 1997).

El desarrollo a finales del siglo XIX de las ecuaciones de Navier-Stokes, que permiten teóricamente explicar el comportamiento de los fluidos, fue un paso importante hacia la comprensión de los procesos que ocurren en la atmósfera terrestre. A principios del siglo XX, Bjerkness (1904) estableció las condiciones suficientes para una solución racional del problema de la predicción, a saber: (a) un conocimiento preciso del estado de la atmósfera al momento inicial y (b) un conocimiento preciso de las leyes por las cuales un estado de la atmósfera se desarrolla a partir de otro. Más adelante, Richardson (1922) utilizó el sistema completo de ecuaciones básicas de la atmósfera para pronosticar el tiempo en

una pequeña área de Europa; esto lo realizó con la ayuda de una calculadora mecánica. Aunque su pronóstico no fue realista, su trabajo fue relevante en el desarrollo futuro de la predicción.

Con el auge de la computación a partir de la segunda mitad del siglo XX, se desarrollaron procesos lógicos computacionales conocidos como modelos numéricos o dinámicos, que consisten en representaciones matemáticas de los procesos que ocurren en la atmósfera y que tienen como finalidad dar una solución numérica directa a las ecuaciones. En la actualidad se ha desarrollado una amplia gama de dichos modelos, cada uno con sus características especiales y con sus ventajas y limitaciones (ver por ejemplo Gates et al., 1998). La utilización de modelos dinámicos para atacar el problema de la predicción requiere en general de un ambiente propicio que incluye como factores esenciales la existencia de personal con conocimiento del problema científico (*peopleware*), la disponibilidad de equipo (*hardware*) y de programas de cómputo (*software*) adecuados.

En Centroamérica, ha predominado el uso de modelos estadísticos para realizar predicción del clima, ya que el costo económico y computacional que representan ha sido mucho menor que el de los modelos numéricos, además de que no ha sido posible, sino hasta en los últimos años, poseer personal calificado para intentar estas tareas. Hoy en día, gracias a los avances en las comunicaciones, es posible acceder al código de los modelos numéricos y a productos derivados de los mismos para aplicaciones al problema de la predicción. Sin embargo, aún existe el problema de que tales modelos numéricos no han sido evaluados completamente en latitudes bajas, es decir, no se ha comprobado la capacidad que tienen de representar adecuadamente diversos aspectos del clima en las regiones tropicales.

El presente trabajo tiene como objetivos generales brindar una mayor comprensión del problema de la predicción climática a partir de modelos numéricos y su importancia para la región centroamericana, dar a conocer la relevancia que tiene el desarrollo de un proceso de evaluación de los modelos de circulación general que son utilizados en la elaboración de predicciones climáticas y así identificar aquellos que proveen una representación más realista de las características del clima regional y establecer las bases para un método de trabajo que permita la realización de predicciones climáticas de alta resolución mediante el uso de modelos numéricos regionales o de área limitada que son anidados en modelos de circulación general que proporcionen la mejor información de gran escala (proceso de reducción de escala dinámica, ver RA2).

Para lograr lo anterior se preparan sendas climatologías regionales utilizando viento y precipitación, generadas por dos modelos de circulación general: el ECHAM4.5 y el CCM3.6, se comparan las climatologías de los modelos anteriores con la climatología regional derivada de datos observados o dinámicamente inicializados y se determina la habilidad de dichos modelos para capturar características climáticas de la región centroamericana, mediante la comparación de patrones climáticos y el empleo de métodos objetivos.

2. Área de trabajo y breve revisión del clima regional

2.1. Área de trabajo

Los datos y el análisis provenientes de las observaciones, de los modelos de circulación general (ECHAM4.5 y CCM3.6) y del modelo regional (MM5v3, RA2) que se utilizan en esta investigación se concentran en la región comprendida entre los 15°S – 35°N y los 50°O – 115°O, aproximadamente (Figura 1), para el período 1990-1999.

La escogencia de este período se debe principalmente a un asunto de disponibilidad de datos y de los productos de los modelos numéricos utilizados. En el caso específico del modelo ECHAM4.5, se cuenta únicamente con información para realizar el análisis en el período arriba especificado.

La delimitación del área geográfica permite no solamente cubrir toda Centroamérica, sino que también incluye aquellas zonas que ejercen una importante influencia en el comportamiento de las características climáticas regionales, por ejemplo, el Océano Pacífico Tropical del Este y el Mar Caribe.

Es importante mencionar que en la región de estudio también juega un papel importante el relieve como factor modificante del clima y en donde sobresalen cadenas montañosas como la Sierra Madre en México, las cordilleras centroamericanas y los Andes en Suramérica. Además, existen cuatro pasos principales que se encuentran a lo largo de estas cadenas montañosas mencionadas: el paso de Chivela en el Istmo de Tehuantepec, el paso del Golfo de Fonseca, el paso del Lago de Nicaragua y del Golfo de Papagayo y el del Istmo de Panamá (Schultz et al., 1997). En la Figura 1 se muestra la ubicación de estos rasgos topográficos, así como la forma de la topografía (representada por el geopotencial superficial, m^2/s^2) para un modelo de circulación general con resolución horizontal de aproximadamente 2.8° x 2.8° (como en el caso del ECHAM4.5 y el CCM3.6).

2.2. Breve revisión del clima y la variabilidad climática regional

El clima puede ser definido como el estado medio de la atmósfera observado durante un período razonablemente largo (OMM, 1992). Se diferencia del estado del tiempo debido a que éste último es la condición de la atmósfera en un instante determinado, definido por los diversos elementos meteorológicos (OMM, 1992). Según Lorenz (1970), el tiempo es pues el estado que se tiene y el clima es lo que se esperaría como condición media. Con el objetivo de determinar cuales de los principales elementos meteorológicos o del clima son capturados en mayor o menor medida por los MCG utilizados aquí, se presenta a continuación una breve revisión de estos rasgos característicos.

2.2.1. Aspectos del clima

Debido a factores como la topografía, en Centroamérica se pueden distinguir dos regiones con regímenes anuales de precipitación claramente diferenciados entre sí: la región o vertiente del Pacífico y la región o vertiente del Caribe (Magaña et al., 1999; Amador et al., 2003).

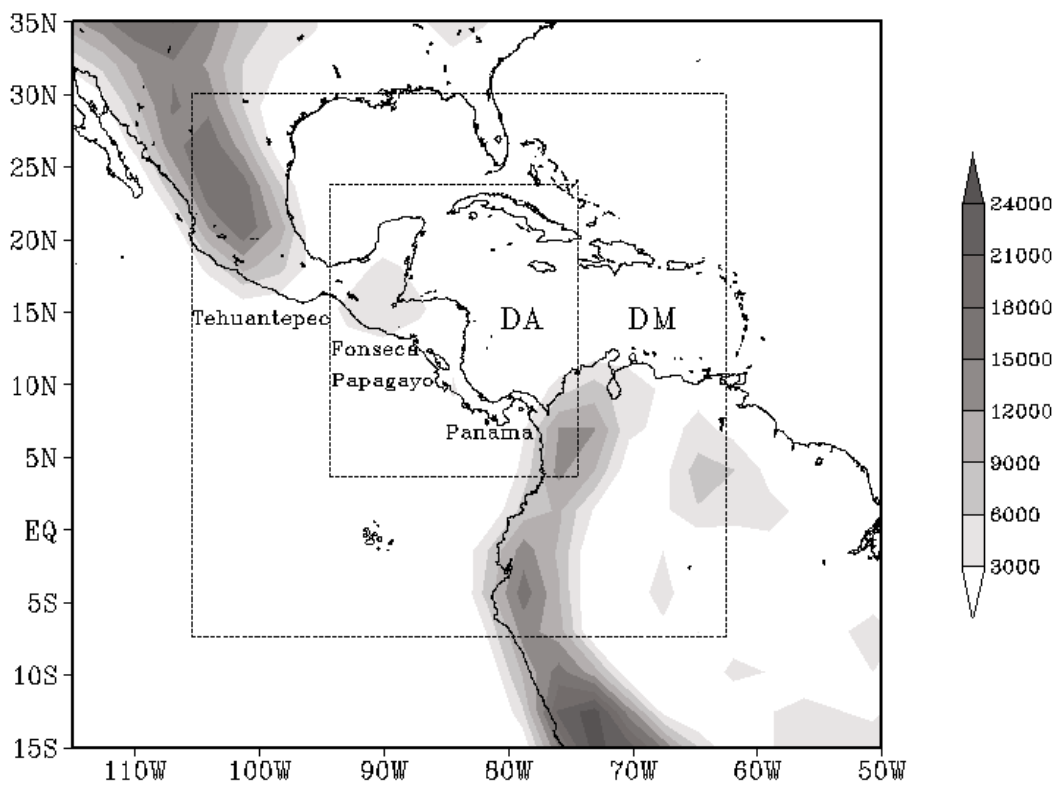


Figura 1: Área de estudio.

La vertiente del Pacífico presenta una estación seca, que ocurre entre los meses de diciembre y marzo (Amador et al., 2003), y una estación lluviosa que, de acuerdo con Magaña et al. (1999), tiene un comportamiento bimodal, con máximos en junio y septiembre-octubre y un mínimo relativo durante julio-agosto. Esta reducción es conocida en la región como “canícula” o “veranillo”. Dichos autores han formulado hipótesis sobre las posibles causas de este fenómeno. Según ellos, el “veranillo” está asociado con un incremento en la velocidad del viento alisio y una disminución en la actividad convectiva en la región de la piscina de agua caliente (Wang & Enfield, 2001; 2003) ubicada en el Océano Pacífico oriental tropical. Ambos comportamientos se han asociado a una disminución de las temperaturas superficiales del mar (TSM), que a su vez es provocada por un aumento de nubosidad que inhibe la llegada de radiación solar. El aumento en el viento alisio y la interacción con las montañas de Centroamérica produce un máximo de precipitación en el Caribe y un mínimo de precipitación en el Pacífico (Magaña et al., 1999).

Una característica regional muy importante es la corriente en chorro de bajo nivel de los Mares Intra-Americanos (CCMIA), la cual, según Amador (1998) y Amador & Magaña (1999), se establece en junio, alcanza su máximo en julio y se debilita en septiembre. Sin embargo, trabajos recientes de Amador et al. (2006) plantean un concepto más general, en donde la CCMIA también se presenta durante el invierno boreal, con un máximo en febrero. Además, en los períodos de máxima intensidad de esta corriente en chorro, también se observa una fuerte rama hacia el norte (sur) durante el verano en el Hemisferio Norte (Sur). Aunque el origen de esta corriente en chorro no es del todo conocido, se ha encontrado que tiene un importante papel en la determinación de la cortante vertical de viento y con ello podría influir en el potencial desarrollo de sistemas convectivos tropicales (Amador et al., 2000). También, la interacción de la CCMIA con perturbaciones tales como las ondas tropicales favorecería la intensificación de las últimas debido a que la corriente en chorro podría potencialmente transferir energía cinética a estas perturbaciones (Amador, 1998; Amador & Magaña, 1999).

Por otro lado, Amador et al. (2006) resumen las características de una corriente en chorro del oeste en bajos niveles que se presenta en las costas occidentales de Colombia: la corriente en chorro del Chocó (CCC), que ha sido discutida por Poveda & Mesa (2000). Este evento presenta valores máximos durante octubre-noviembre para luego decrecer en intensidad en los meses siguientes hasta casi desaparecer durante febrero-marzo (Poveda & Mesa, 2000). La interacción entre la CCC y la porción oeste de la cordillera de los Andes favorece el desarrollo de actividad convectiva fuerte a escala local.

El paso de ondas tropicales, originadas principalmente frente a las costas occidentales de África desde mayo a noviembre, tiene influencia en la distribución anual de precipitación en el Caribe y Centroamérica (Riehl, 1954; Carlson, 1969; Burpee, 1972; Reed & Recker, 1971; Amador, 1981; Farfán & Zehnder, 1997; Amador et al., 2006).

Los ciclones tropicales del Caribe son otros de los sistemas que influyen en el régimen de lluvia. Fernández & Barrantes (1996) consideran dos tipos de efectos debidos a estos: (a) los directos, que se refieren a los asociados con el paso del centro del ciclón sobre la región y (b) los indirectos, que se refieren a los que son producidos por la interacción del flujo de alimentación de estos sistemas con la topografía, lo cual puede producir importantes acumulados de lluvia en la región Pacífica.

Los llamados temporales son disturbios tropicales que producen lluvia de manera continua por períodos de dos a cuatro días y pueden afectar tanto a áreas en la vertiente del Pacífico como en la vertiente del Caribe (Fernández & Barrantes, 1996). De acuerdo con Fernández & Barrantes (1996) puede hacerse una distinción entre los temporales del Pacífico y los temporales del Caribe. Los primeros, según los autores, están relacionados con la migración meridional de la Zona de Convergencia Inter-Tropical (ZCIT), la ocurrencia de ciclones tropicales y la presencia de vaguadas de niveles bajos y medios; la mayor frecuencia de estos eventos se da en los meses de junio y septiembre-octubre. Los segundos ocurren con mayor frecuencia durante los meses invernales del Hemisferio Norte y están asociados con las incursiones de aire frío que se presentan en esta época.

Las incursiones de aire frío provienen de la gran masa continental de América del Norte (Schultz et al., 1997, 1998). De acuerdo con Reding (1992), la máxima intensidad y frecuencia de estos eventos se da en los meses de enero y febrero. Además, durante el invierno boreal se presentan sistemas nubosos de bajo nivel que se trasladan hacia el este (Velázquez, 2000) y que contribuyen con los acumulados de precipitación en el Caribe.

Con respecto a la variabilidad de la estación lluviosa en Centroamérica, Amador et al. (2003) hacen referencia a varios estudios que se ha realizado sobre el tema y que se citan a continuación. Enfield & Alfaro (1999) afirman que las fluctuaciones en las TSM de los Océanos Atlántico y Pacífico tropicales están relacionadas con la duración y ocurrencia de este período lluvioso. Además, de acuerdo con Alfaro & Cid (1999), las TSM del Atlántico Norte tropical muestran la mayor influencia sobre la región en comparación con otros parámetros que tienen correlaciones positivas con la lluvia en Centroamérica. Por otro lado, la región Niño 3 tiene una menor correlación negativa con la precipitación regional e influye solamente en la vertiente Pacífica.

Tanto la CCMIA como la CCC parecen variar de acuerdo con los episodios de El Niño Oscilación del Sur (ENOS), según se desprende de la revisión de Amador et al. (2006). Durante fases cálidas (frías) del ENOS, la CCMIA en el verano boreal muestra magnitudes de viento mayores (menores) de lo normal (Mora & Amador, 2000; Amador et al., 2003), mientras que la CCC muestra un comportamiento opuesto (Poveda & Mesa, 2000).

3. Ecuaciones básicas y modelos climáticos utilizados

3.1. Principios y ecuaciones fundamentales

Las ecuaciones básicas utilizadas en los modelos numéricos atmosféricos son derivados de tres principios fundamentales de la física del continuo, la conservación de momento, la conservación de energía termodinámica y la conservación de masa. Además de estas ecuaciones, se requiere una adicional que ligue las variables dinámicas con las termodinámicas (ecuación de estado) y otra que determine la evolución en el tiempo del campo de humedad. Es usual que cuando estos principios se aplican al sistema total tierra-atmósfera, se utilice una geometría esférica para representarlos. En este caso, las ecuaciones del sistema se pueden escribir como (Washington y Parkinson, 1986):

Ecuaciones de momento:

$$\frac{du}{dt} - \frac{uv \tan \phi}{r} + \frac{uw}{r} = -\frac{1}{\rho r \cos \phi} \frac{\partial p}{\partial \lambda} + f v - \hat{f} w + F_\lambda$$

$$\frac{dv}{dt} + \frac{u^2 \tan \phi}{r} + \frac{vw}{r} = -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \phi} + f u + F_\phi$$

$$\frac{dw}{dt} - \frac{u^2 + v^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + \hat{f} u + F_z$$

Conservación de masa:

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{\rho}{r \cos \phi} \left[\frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{\partial (v \cos \phi)}{\partial \phi} \right] + \rho \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Conservación de energía:

$$C_v \frac{dT}{dt} = -p \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{\rho} \right) + Q$$

Evolución de la humedad:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{1}{\rho} M + E$$

donde,

u, v, w : componentes zonal, meridional y vertical del viento, respectivamente,

r : radio de la Tierra,

ϕ : latitud,

λ : longitud,

z : coordenada vertical,

t : tiempo,

$f = 2\Omega \sin \phi$, con Ω : velocidad angular de la Tierra,

$\hat{f} = 2\Omega \cos \phi$,

F_i : términos de fricción,

ρ : densidad,

C_v : calor específico del aire a volumen constante,

T : temperatura,

p : presión,

Q : pérdida o ganancia neta de calor,

q : cantidad de vapor de agua,

M : razón de cambio en el tiempo del vapor de agua debido a la condensación o congelamiento,

E : razón de cambio en el tiempo del vapor de agua debido a la evaporación.

3.2. Modelo ECHAM4.5

El modelo de circulación general ECHAM4.5 es el cuarto de una serie de modelos desarrollados en el *Max Planck Institut für Meteorologie* (MPIM) y es derivado del modelo del *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF, Simmons et al., 1989). Roeckner et al. (1996) presentan detalladamente las características del ECHAM4.5.

Con base en los trabajos de Phillips (1994) y Lohmann & Bennartz (2002) se presenta la siguiente descripción resumida de este modelo: el ECHAM4.5 utiliza como variables de pronóstico la vorticidad ($\vec{\nabla} \times \vec{V}$), la divergencia ($\vec{\nabla} \cdot \vec{V}$), el logaritmo de la presión en superficie, la temperatura, y las razones de mezcla del vapor de agua, agua líquida en la nube y hielo en la nube. Las ecuaciones del modelo se resuelven en 19 niveles verticales en un sistema de coordenadas híbrido usando el método espectral con truncación triangular en el número de onda 42 (T42), para el caso estándar. Los términos no lineales y los procesos físicos son evaluados en puntos de rejilla de una “rejilla gaussiana” (Washington & Parkinson, 1986). Las nubes y los cúmulos son representados por el esquema de flujo de masa de Tiedke (1989). Se utiliza una aproximación de ajuste basada en la energía potencial convectiva disponible, CAPE por sus siglas en inglés, (Nordeng, 1994). La transferencia turbulenta de momento, calor, vapor de agua y agua total en la nube es calculada con base en el esquema de Brinkop & Roeckner (1995). El código de radiación está basado en el esquema de Fouquart & Bonnel (1980), para el caso de la radiación de onda corta, y en el esquema de Morcrette (1991), para el caso de la radiación de onda larga.

El esquema de nubes estratiformes resuelve separadamente las ecuaciones de pronóstico para nubes de agua y nubes de hielo (Lohmann & Roeckner, 1996). Las propiedades ópticas de las nubes están definidas por el esquema de Rockel et al. (1991). El modelo utiliza una técnica semi-lagrangiana (Rasch & Williamson, 1990) para calcular la advección horizontal y la vertical del vapor de agua. El esquema de integración en el tiempo es semi-implícito.

3.3. Modelo CCM3.6

El CCM3.6 es un modelo de circulación general desarrollado por el *National Center for Atmospheric Research* (NCAR). Kiehl et al. (1996) describen detalladamente este modelo.

Siguiendo a Rasch & Kristjánsson (1998) se resumen a continuación algunas de las características del CCM3.6. Las ecuaciones de evolución para el calor y el momento utilizan una representación espectral para el tratamiento horizontal y diferencias finitas verticales de primer orden para los gradientes verticales. El transporte de humedad utiliza un esque-

ma semi-lagrangiano. En cuanto al tratamiento en la vertical, el modelo utiliza un sistema de coordenadas híbrido compuesto por 18 niveles que se extiende hasta aproximadamente 35 km.

El esquema de integración en el tiempo usado para las ecuaciones dinámicas y termodinámicas es semi-implícito. El paso de tiempo (*time step*) es de 20 minutos para los procesos dinámicos. La convección profunda es simulada a través del esquema de Zhang & McFarlane (1995) y la poco profunda utiliza el esquema de Hack (1994).

3.4. Datos utilizados: Observaciones

Las observaciones empleadas para las evaluaciones de los resultados de los modelos globales y del modelo regional son obtenidas de la base de datos del Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI), conocida como NUMEROSA y que se encuentra en continuo proceso de ampliación y desarrollo. Esta base incluye los siguientes conjuntos de datos (algunos de ellos disponibles en los centros de información global o regional):

1. Estaciones meteorológicas de Centroamérica. Esta información ha sido obtenida por medio de los distintos proyectos de investigación en los que el CIGEFI ha participado, de la base de datos de *Global Historical Climatology Network* versión 2 (GHCN2, Peterson & Vose, 1997) y de diferentes instituciones de la región cuyo personal ha recibido formación académica y profesional en el área de la meteorología en la Universidad de Costa Rica.
2. Reanálisis de *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) y *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) (Kalnay et al., 1996). Este reanálisis provee información global ordenada en rejillas de $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ de resolución horizontal para diferentes variables atmosféricas y a diferentes niveles de altura desde 1947 al presente.
3. Proyecto CRN-073 (IAI, <http://www.iai.int>). Información de precipitación y temperatura media para la región de México, Centroamérica y el Caribe con una resolución de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$.
4. Precipitación de *Climate Prediction Center* (CPC) *Merged Analysis of Precipitation* (CMAP) (Xie & Arkin, 1996 y Xie & Arkin, 1997). Datos globales mensuales de precipitación ordenados en rejillas de aproximadamente $2.8^\circ \times 2.8^\circ$.

Para efectos de este trabajo se consideran los datos del Reanálisis de NCEP/NCAR como observaciones, aunque en un sentido estricto esto no es así. El Reanálisis es un análisis de diferentes campos atmosféricos que se obtiene a partir de la utilización de un modelo global que realiza una asimilación dinámica completa de “todos” los datos obtenidos por medio de redes globales de observación (datos dinámicamente inicializados).

3.5. Datos de los modelos numéricos

1. ECHAM4.5 (Roeckner et al., 1996). Esta información fue facilitada por el *International Research Institute for Climate and Society* (IRI, <http://www.iri.columbia.edu>)

y se encuentra en la actualidad incorporada a la base de datos del CIGEFI. Los datos corresponden a la salida de cinco miembros o cinco distintas realizaciones físico-estadísticas del modelo, a saber: miembros 09 a 13. Cada miembro se diferencia del otro porque se generó con distintas condiciones iniciales utilizando el método de perturbación en el tiempo. Estos datos tienen una resolución temporal de 6 horas y están disponibles para el período 1987-2001; sin embargo, solamente se utiliza para efectos de este trabajo la década de 1990-1999. La resolución horizontal de este modelo es de aproximadamente $2.8^\circ \times 2.8^\circ$ y cubre 18 niveles en la vertical.

2. CCM3.6 (Kiehl et al., 1996). Los resultados para este modelo, también de circulación general, se encuentran en la biblioteca de datos del IRI (<http://iri.columbia.edu>) y consisten en datos mensuales para el período de estudio especificado. Espacialmente, la resolución de este modelo es de unos $2.8^\circ \times 2.8^\circ$. A diferencia del ECHAM4.5, se tiene únicamente información del promedio de 24 miembros (conocido en inglés como el *ensemble*) generados a partir del método de perturbación en el tiempo, lo cual hace este promedio estadísticamente más estable aunque no necesariamente más cercano al clima verdadero.

4. Métodos

4.1. Climatología mensual

Con el propósito de obtener la climatología derivada para algunos parámetros meteorológicos seleccionados por su importancia climática (sección 2.2 anterior) tanto de las observaciones como de los modelos globales, se calculan los promedios espaciales mensuales de las variables viento en 925 hPa y la precipitación para el período 1990-1999. Estos resultados se representan utilizando el programa llamado *Grid Analysis and Display System* (GrADS, <http://grads.iges.org>). Debido a que se tienen datos de cinco miembros del modelo ECHAM4.5, se promedian las cinco climatologías provenientes de cada miembro con el fin de obtener una única climatología representativa de dicho modelo y que se toma como referencia para realizar la evaluación correspondiente.

Para efectuar las comparaciones entre las simulaciones de los modelos globales y las observaciones se usan, en el caso de los promedios espaciales, restas directas entre ambos resultados. Debido a que los datos del Reanálisis de NCEP/NCAR tienen una resolución diferente a la de los modelos globales, $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ los primeros y $2.8^\circ \times 2.8^\circ$ los segundos, se efectúa una interpolación para que la resolución del reanálisis concuerde con la de los modelos globales mediante el método conocido como *re-mapeo conservativo* (Jones, 1999) y que forma parte de las opciones presentes en el programa denominado *Climate Data Operators* (CDO, <http://www.mpimet.mpg.de/~cdo>).

Por otro lado, se calculan también los promedios mensuales sobre dos áreas (Figura 2): una denominada región del Caribe ($11^\circ\text{N} - 17^\circ\text{N}$, $75^\circ\text{O} - 83^\circ\text{O}$, aproximadamente) y otra denominada región del Pacífico (tropical oriental) ($11^\circ\text{N} - 17^\circ\text{N}$, $89^\circ\text{O} - 97^\circ\text{O}$, aproximadamente). Estas áreas fueron escogidas considerando su importancia climática (sección 2.2) e incluye seis puntos de rejilla de los modelos globales y del Reanálisis (interpolado).

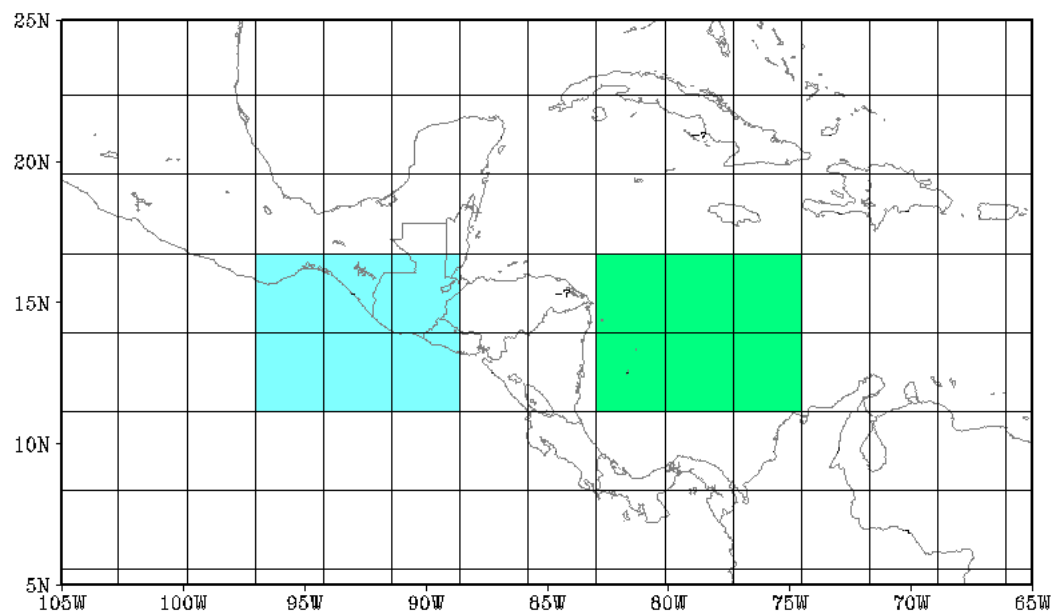


Figura 2: Área Caribe (derecha) y área Pacífico (izquierda) empleadas para realizar las series de tiempo observadas y simuladas de las variables viento en 925 hPa y precipitación.

En el caso de los promedios sobre cada una de las áreas, se comparan gráficamente las series de tiempo observadas con las simuladas. También se calculan en algunos casos los porcentajes de variación entre ambos resultados.

Entre las características climáticas que se comparan y analizan en estos casos, por tener un impacto importante en las condiciones climáticas regionales se tiene: el veranillo (Magaña et al., 1999), la corriente en chorro de los Mares Intra-Americanos (Amador, 1998; Amador & Magaña, 1999; Amador et al., 2003; Amador et al., 2006), la corriente en chorro del Chocó (Poveda & Mesa, 2000) y la conocida migración estacional de la Zona de Convergencia Inter-Tropical (Alfaro et al., 1998; Velázquez, 2000). En este trabajo no se comparan los campos de temperatura ya que éstos en general presentan poca variabilidad estacional, en contraste con las variables y campos escogidos; de forma que la evaluación de los modelos se realiza para elementos con una alta variabilidad temporal y espacial.

4.2. Prueba t de Student

Se aplica también una prueba t de Student de una cola para estudiar la significancia estadística de las diferencias entre los promedios mensuales simulados por los modelos globales y los promedios mensuales observados para las variables de viento en 925 hPa y precipitación. La prueba de dos colas solamente permite conocer si las muestras son diferentes a un nivel de significancia dado, mientras que la prueba de una cola es más exigente y permite determinar si una muestra es significativamente mayor o menor que la otra.

El cálculo del estadístico t se realiza considerando que las dos muestras están emparejadas puesto que se comparan las mismas variables. La expresión utilizada para t es la siguiente (Wilks, 1995):

$$t = \frac{\overline{x_1} - \overline{x_2}}{[(S_1^2 + S_2^2 - 2S_{12})/N]^{1/2}}$$

donde,

t : Valor de estadístico t ,

$\overline{x_1}$: Promedio mensual simulado,

$\overline{x_2}$: Promedio mensual observado,

S_1^2 : Varianza de la muestra para el mes simulado,

S_2^2 : Varianza de la muestra para el mes observado,

S_{12} : Covarianza de las dos muestras,

N : Número de elementos de la muestra.

El número de grados de libertad está dado por:

$$\nu = 2(N - 1)$$

La hipótesis nula H_o establece que $\overline{x_1} - \overline{x_2} = 0$. Si el valor de t se encuentra fuera del umbral establecido para la significancia estadística (α), entonces se desecha la hipótesis nula y se cumple la hipótesis alternativa ($H_1 : \overline{x_1} > \overline{x_2}$ o $\overline{x_1} < \overline{x_2}$). En el presente trabajo, para valorar la sensibilidad de los resultados en representar las características climáticas regionales relevantes, se utilizan valores de α iguales a 0,1 (90 %), 0,05 (95 %) y 0,01 (99 %).

4.3. Variabilidad interanual

Para examinar la variabilidad interanual de los datos observados y simulados se utiliza la lista de eventos de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) hasta 1997 presentada por Mora & Amador (2000). En dicha lista se presentan los intervalos de duración, en meses, de cada evento. Debido a que el período de estudio del presente trabajo es 1990-1999, se emplean los criterios presentados por los autores mencionados para completar la lista hasta 1999.

Una vez obtenida la información completa de eventos ENOS se calculan compuestos de El Niño tomando en consideración únicamente aquellos meses que presentan una fase cálida del ENOS. Lo mismo se realiza para el caso de La Niña. Este procedimiento permite obtener los patrones típicos de comportamiento de las variables estudiadas durante cada uno de estos eventos.

Seguidamente, se calculan las diferencias espaciales entre meses o estaciones El Niño y meses o estaciones La Niña con el propósito de determinar las variaciones que se producen tanto en el patrón de viento en 925 hPa como en la precipitación, dependiendo de la fase del ENOS.

5. Climatología y variabilidad climática observadas versus simuladas

5.1. Climatología

5.1.1. Viento en 925 hPa

De acuerdo con Amador et al. (2006) la corriente en chorro de bajo nivel de los Mares Intra-Americanos (CCMIA) es parte del sistema de viento alisio y tiene dos máximos: uno en febrero y otro en julio. Dichos autores afirman que la CCMIA provee humedad a Norteamérica durante el verano boreal y a Suramérica durante el invierno boreal. Esto debido al calentamiento diferencial que se produce entre las masas continentales y las masas oceánicas. La información del Reanálisis de NCEP/NCAR para los meses de febrero y julio del período de estudio muestra este comportamiento (Figuras 3a y 3b).

Para los meses mencionados, tanto el modelo ECHAM4.5 como el modelo CCM3.6 capturan los patrones de desvíos que se producen en el campo de viento en 925 hPa (Figuras 4a y 4b y Figuras 5a y 5b, respectivamente), indicando esto que los modelos responden a las condiciones globales que propician este comportamiento. Sin embargo, en el caso del ECHAM4.5, se presenta subestimación del flujo hacia Suramérica que se encuentra al este de la Cordillera de los Andes durante el invierno boreal (Figura 6a), con diferencias que superan los 2 m/s. La prueba t de Student indica que dichas diferencias

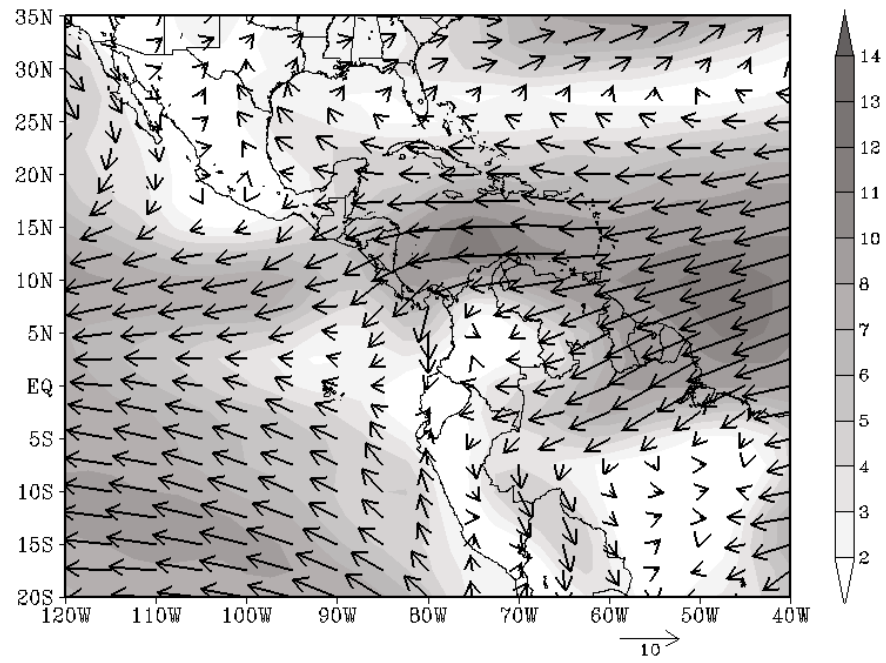
son significativas al 99 % de confianza (Figura 7a). Por otro lado, en el verano boreal este modelo presenta flujo hacia el norte más intenso (contrastes que sobrepasan los 2 m/s) en comparación con el Reanálisis de NCEP/NCAR (Figura 6b) y este comportamiento se aprecia sobre prácticamente toda la región de las Antillas. Con la prueba t de Student para julio se confirma este patrón, ya que la sobreestimación mencionada tiene una significancia del 99 %.

En el caso del CCM3.6, la intensidad del viento en bajo nivel que se ramifica al sur (norte) es subestimada durante el mes de febrero (julio) (Figuras 8a y 8b), donde las diferencias pueden llegar hasta los 3 m/s o más en algunas zonas y éstas son significativas al 99 % de acuerdo con la prueba t de Student (Figuras 9a y 9b). Este panorama puede tener efectos negativos en el patrón simulado o pronosticado de transporte de humedad y de precipitación en Suramérica y en la zona de las Grandes Planicies de Estados Unidos durante los respectivos períodos de verano.

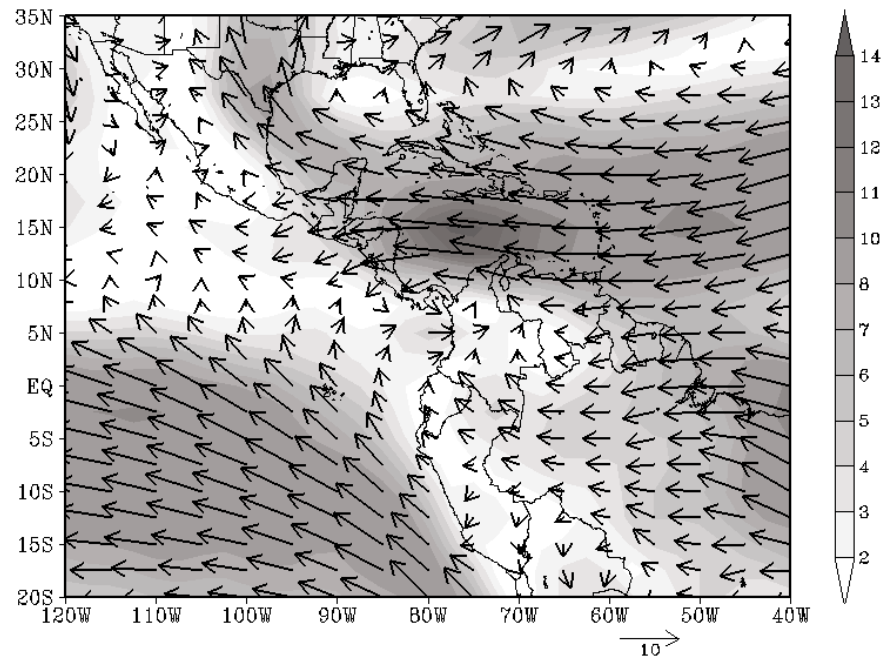
Es importante destacar que la posición del núcleo de la corriente en chorro, ubicado alrededor de 12.5° - 17.5° N y 70° - 80° O, no es correctamente capturado durante los meses de junio, julio y agosto (JJA) por el modelo CCM3.6 (ver por ejemplo Figuras 5b y 7b). En la Figura 8b se puede apreciar que las discrepancias en cuanto a la magnitud del viento en la región del máximo de la CCMIA pueden llegar a ser mayores que los 5 m/s durante el verano boreal lo cual implica serias distorsiones dinámicas asociadas al transporte de momento y energía cinética media de la corriente en chorro. En cuanto al invierno boreal, la intensidad de dicha característica climática no presenta valores significativamente distintos a los observados (Figuras 7b y 9b). Dada la trascendencia que posee esta corriente en chorro en la determinación del clima regional, los problemas en su correcta simulación pueden incidir negativamente en la elaboración de predicciones climáticas estacionales. Por otro lado, un aspecto digno de mencionar es que el CCM3.6 presenta una amplia zona en la cual se da una sobreestimación del viento durante el mes de febrero en el Pacífico centroamericano. En cuanto al modelo ECHAM4.5, éste tiene problemas para determinar la transición hacia un máximo de la corriente en chorro en JJA, pero su representación es mejor que la del CCM3.6 (ver por ejemplo Figura 4a). La ubicación y magnitud de la CCMIA que muestra el ECHAM4.5 durante los meses de febrero y julio coincide en mayor grado con la información proveniente del Reanálisis de NCEP/NCAR, aunque evidentemente no es una representación perfecta, como se puede constatar en las Figuras 6b y 8b.

En cuanto al ciclo anual del viento, que se calcula utilizando seis puntos de rejilla de los modelos y del Reanálisis (ver Figura 2), se observa que en la región denominada Caribe (Figura 10a) el CCM3.6 tiene deficiencias para representarlo correctamente durante los meses de junio, julio y agosto, confirmando así lo observado en los patrones espaciales. En este modelo, el viento simulado es más consistente con lo observado para la época comprendida entre noviembre y mayo. Mientras, el ECHAM4.5 parece obtener mejores resultados a lo largo del año, aunque muestra problemas durante los meses de mayo y junio, en los que no logra, de acuerdo con lo afirmado en el párrafo anterior, representar la transición hacia un máximo en el viento de bajo nivel en los meses siguientes.

Siguiendo con el ciclo anual pero esta vez en la región denominada Pacífico (Figura 10b), nuevamente se aprecian problemas del CCM3.6 en la representación obtenida para

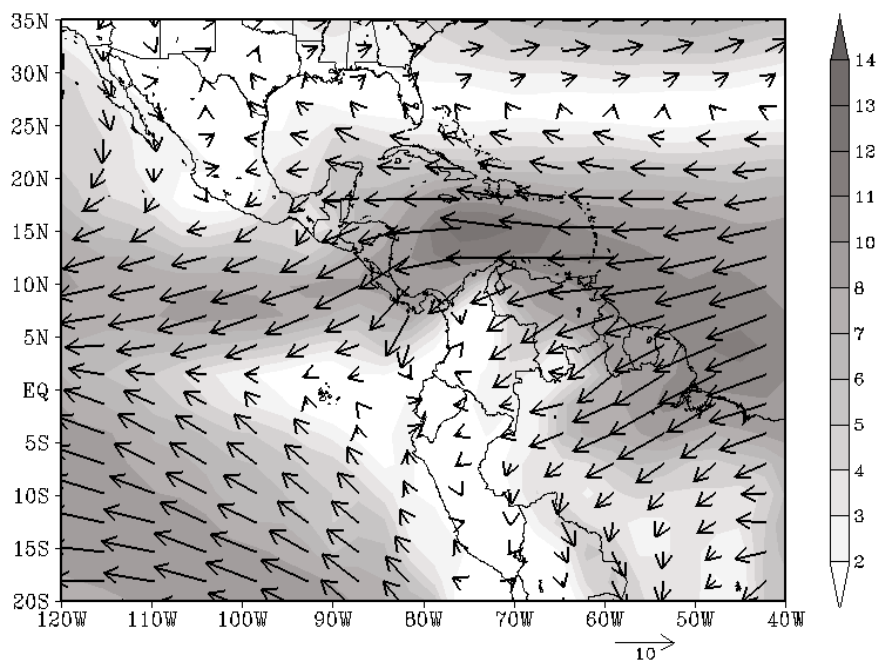


(a)

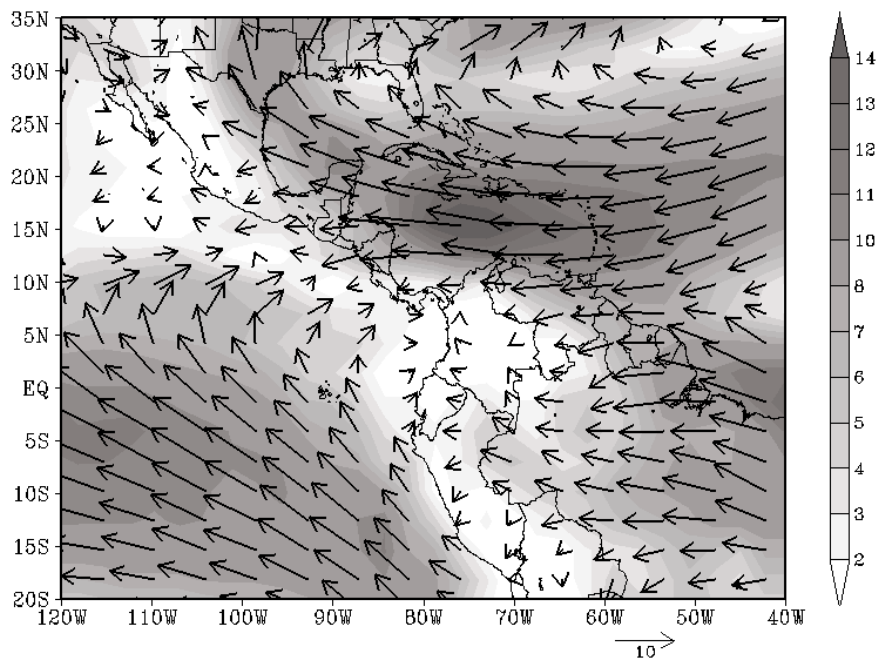


(b)

Figura 3: Viento promedio en 925 hPa (m/s) para (a) febrero y (b) julio (período 1990-1999), utilizando datos del Reanálisis de NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996).

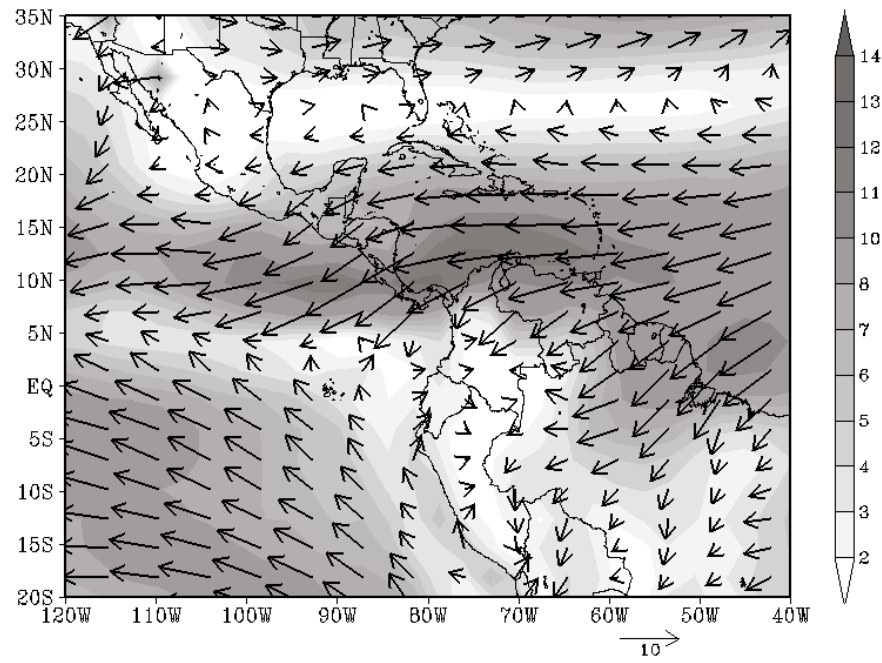


(a)

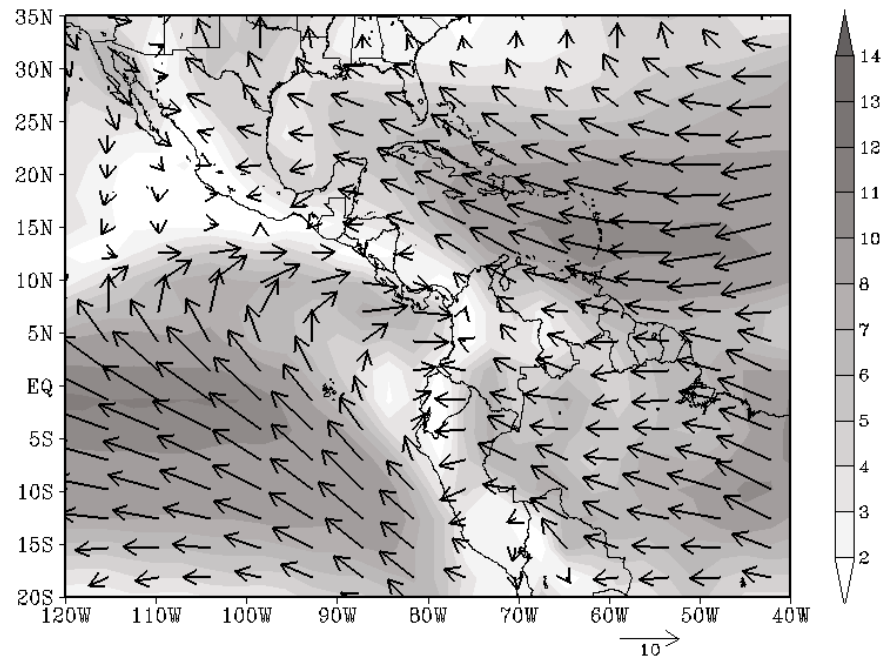


(b)

Figura 4: Ídem Figura 3 excepto para (a) febrero y (b) julio (período 1990-1999), utilizando datos del ECHAM4.5 (Roeckner et al., 1996).

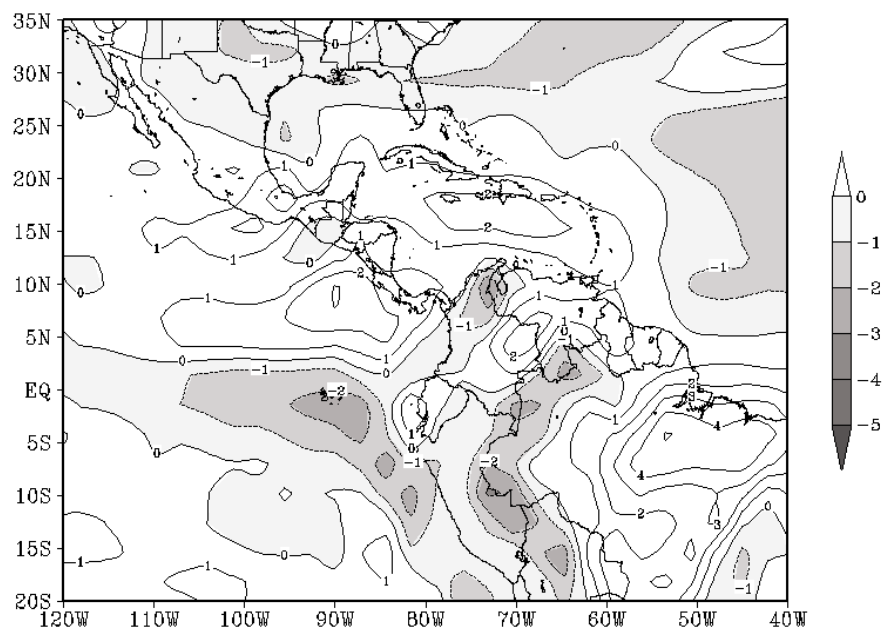


(a)

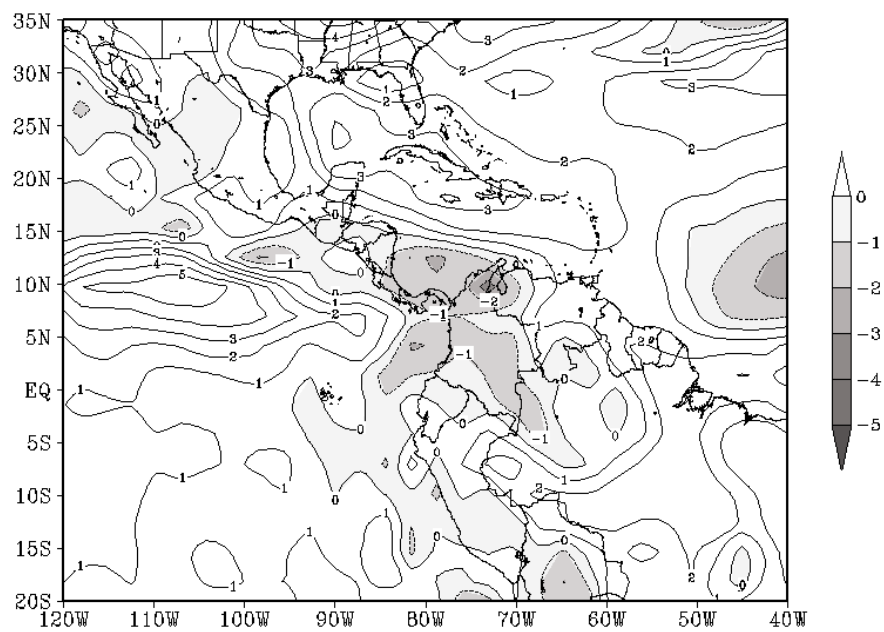


(b)

Figura 5: Ídem Figura 3 excepto para (a) febrero y (b) julio (período 1990-1999), utilizando datos del CCM3.6 (Kiehl et al., 1996).



(a)



(b)

Figura 6: Diferencia de la magnitud del viento en 925 hPa (m/s) para (a) febrero y (b) julio (período 1990-1999) para el ECHAM4.5 menos el Reanálisis NCEP/NCAR.

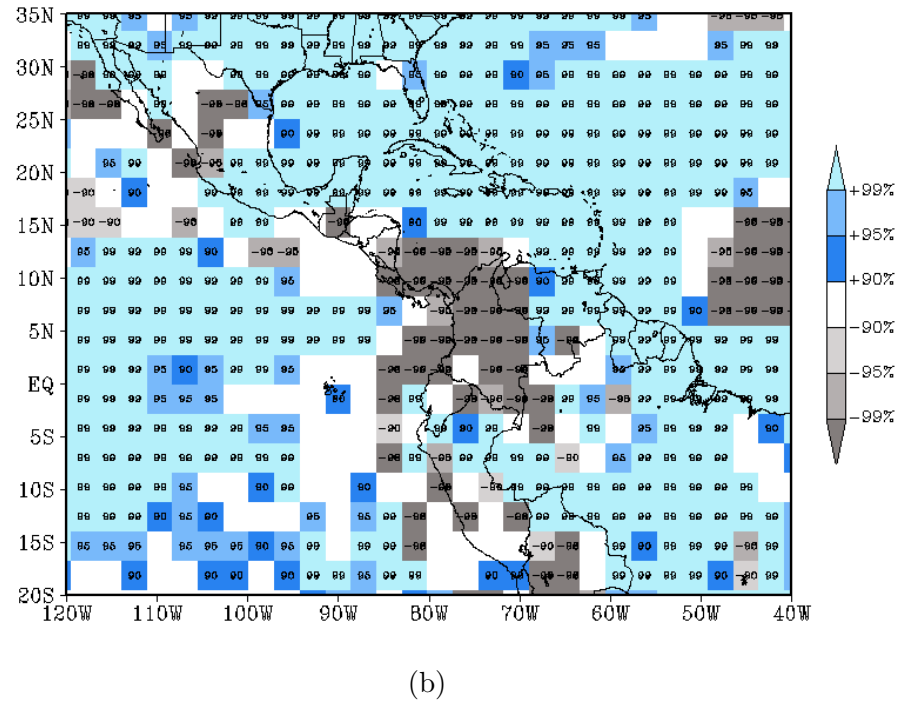
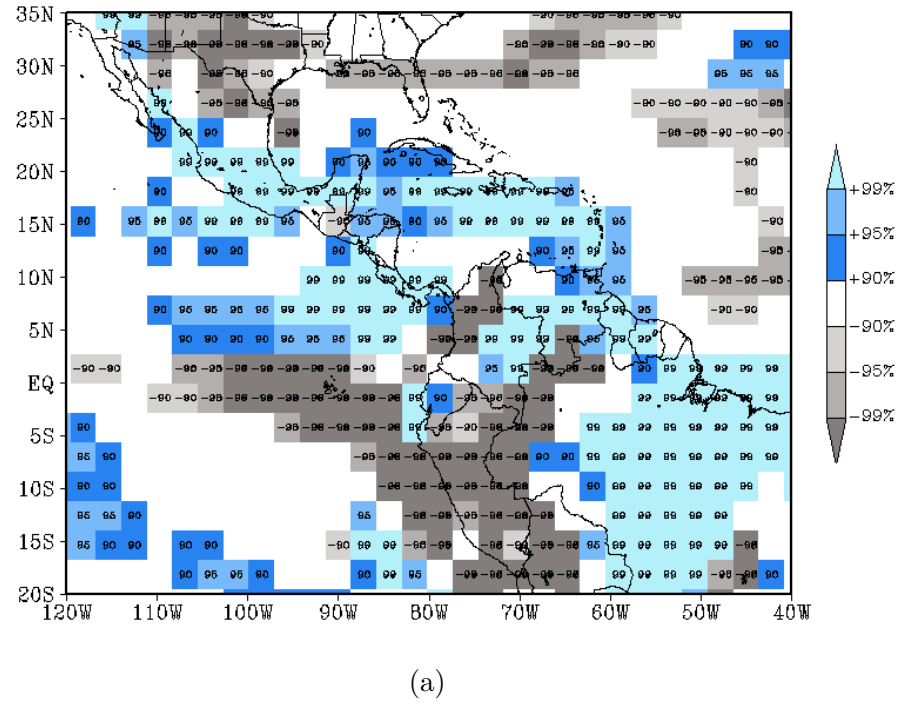
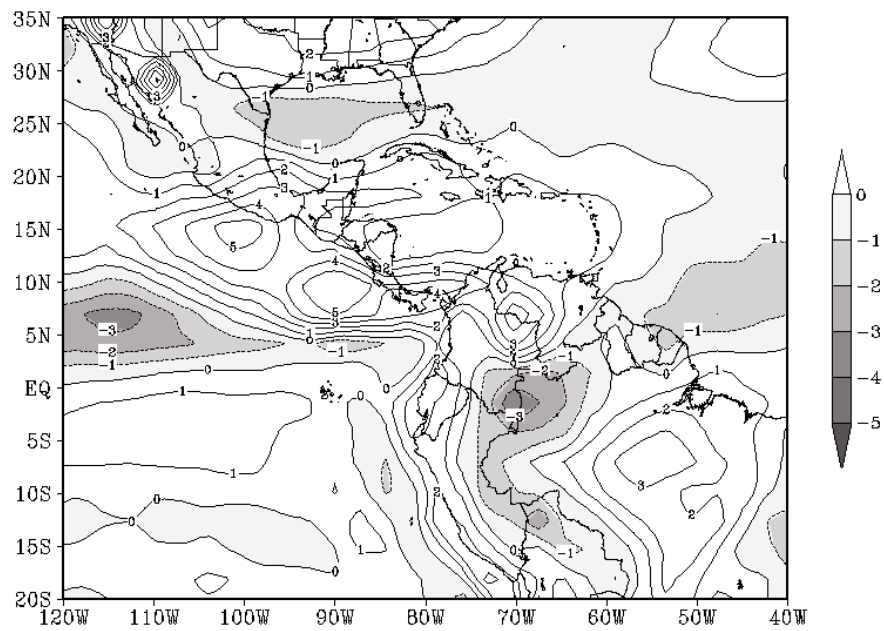
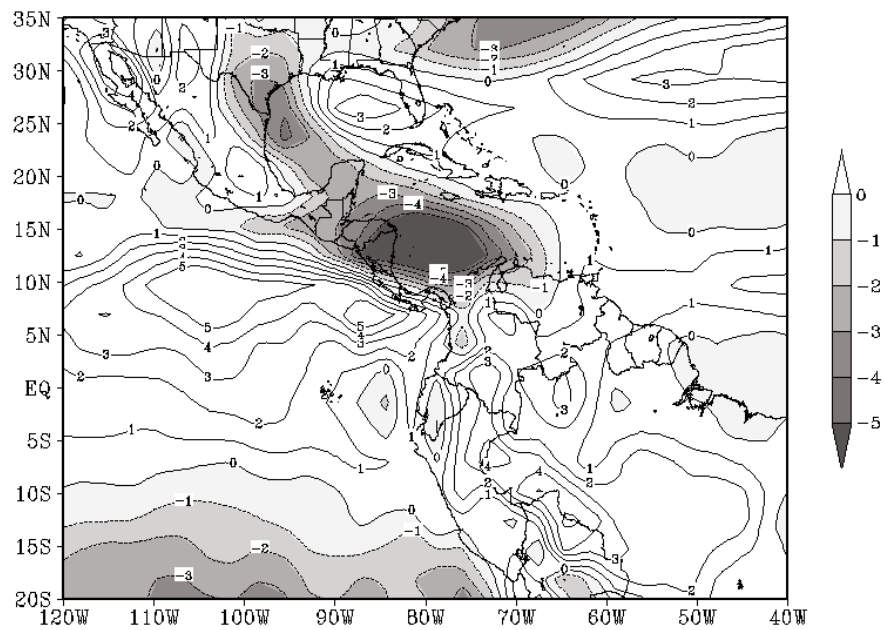


Figura 7: Prueba t de Student de la magnitud del viento en 925 hPa para (a) febrero y (b) julio (período 1990-1999) para el ECHAM4.5 menos el Reanálisis NCEP/NCAR.



(a)



(b)

Figura 8: Ídem Figura 6 excepto para (a) febrero y (b) julio (período 1990-1999) para el CCM3.6 menos el Reanálisis NCEP/NCAR.

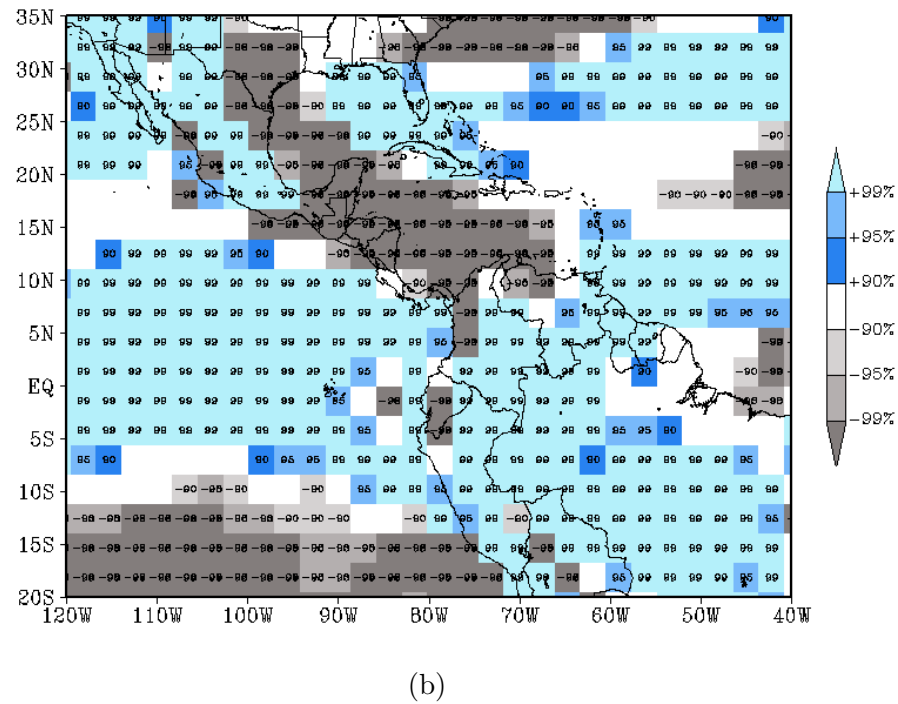
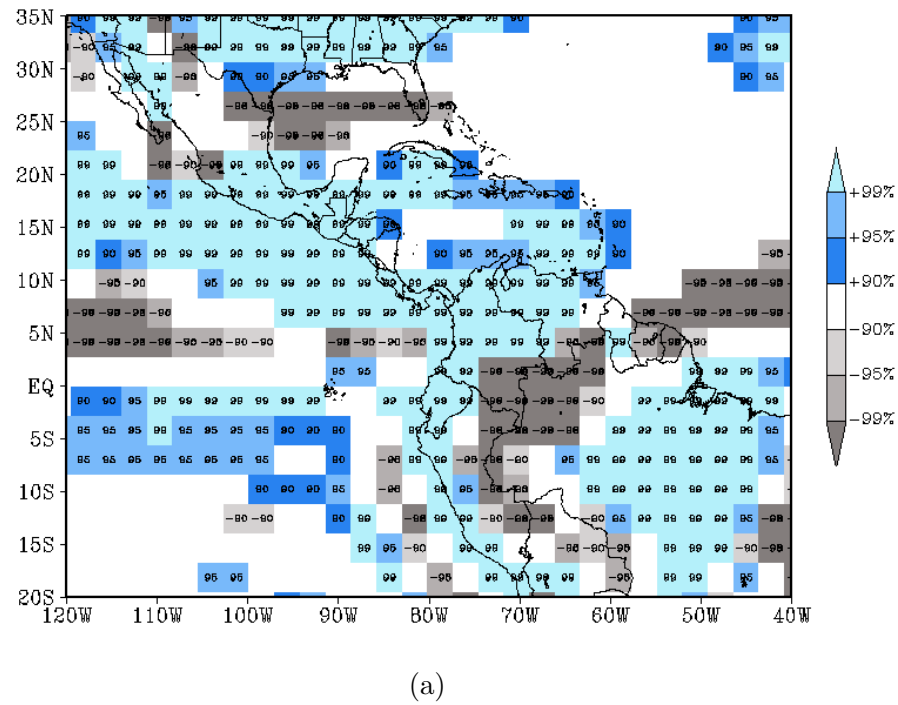
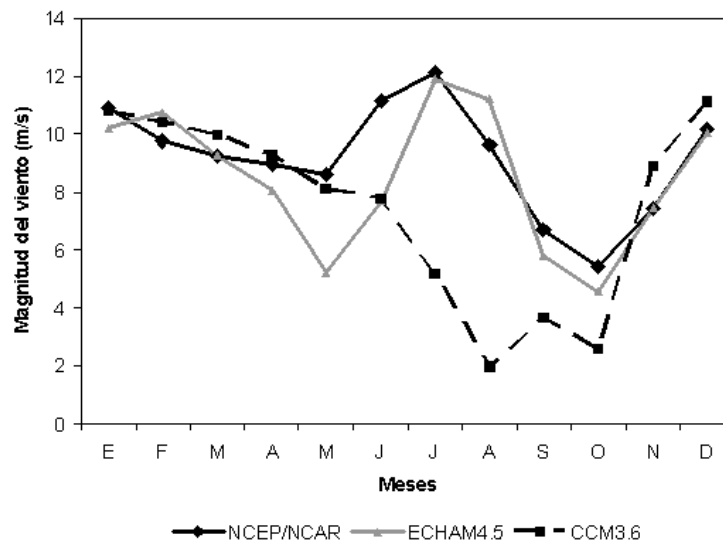
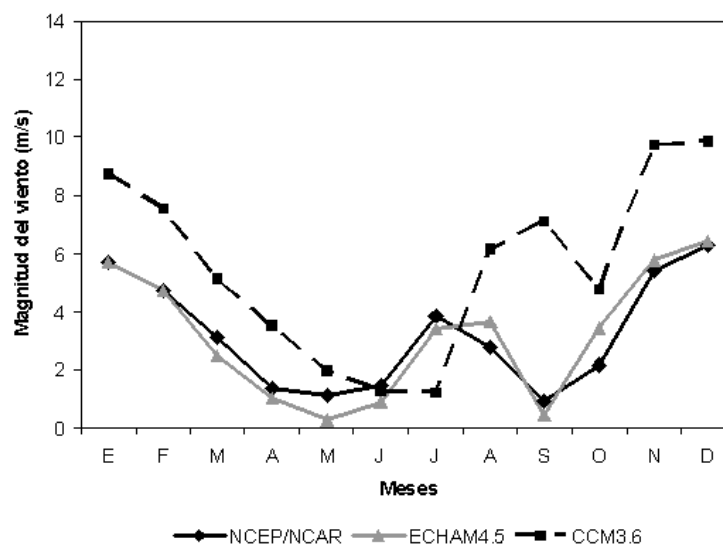


Figura 9: Ídem Figura 7 excepto para (a) febrero y (b) julio (período 1990-1999) para el CCM3.6 menos el Reanálisis NCEP/NCAR.



(a)



(b)

Figura 10: Magnitud de viento promedio en 925 hPa (m/s) (período 1990-1999) para (a) área Caribe y (b) área Pacífico. Ver Figura 1 para la configuración de estas áreas.

el período junio-agosto. El contraste más evidente en este modelo se da en el mes de julio, cuando éste simula un mínimo en la magnitud de viento, mientras que, de acuerdo con los resultados del Reanálisis, el viento presenta un valor alto relacionado posiblemente con el paso del viento producto de la CCMIA hacia el Pacífico. De manera interesante, el modelo ECHAM4.5 reproduce con gran fidelidad el comportamiento del viento, al menos en esta región que fue escogida para estudiar el ciclo anual. La correcta o incorrecta simulación de esta característica podría tener implicaciones importantes en la captura de la señal del “veranillo” por parte de los modelos y en la distribución regional de la precipitación.

Con respecto a la corriente en chorro del Chocó (CCC), ubicada frente a la costa pacífica de Colombia, la Figura 11 muestra que ambos modelos simulan con dificultades cuantitativas el máximo relativo de viento que se presenta en esa región durante los meses de octubre-noviembre (Figura 11a). Sin embargo, en el caso del ECHAM4.5 (Figura 11b) es más evidente que la intensidad o magnitud de esta característica es subestimada. Por tanto, cabe esperar en este modelo anomalías negativas en la precipitación sobre la región del Chocó durante la época de máxima intensidad de la CCC.

Una observación importante que debe realizarse es que durante la mayoría de los meses del año el modelo CCM3.6 produce diferencias de valores de viento de 5 m/s o más sobre amplias regiones del Pacífico tropical oriental. En el caso del modelo ECHAM4.5 diferencias de esta magnitud se presentan principalmente en las proximidades de la costa pacífica de Centroamérica durante los meses de junio y julio. Estos problemas, relacionados con la dinámica de los modelos, parecen influir en el patrón de precipitación como se expone en la siguiente sección.

5.1.2. Precipitación

Dentro de las características climáticas regionales más importantes que se espera que simulen los modelos está el posicionamiento medio y la migración meridional de la Zona de Convergencia Inter-Tropical (ZCIT). Analizando los resultados del ECHAM4.5 y el CCM3.6 y comparándolos con dos bases de datos observados (CRN-073 y CMAP), se puede concluir que ambos modelos globales son capaces de simular la estructura espacial a gran escala de esta ZCIT en la región de estudio, sin embargo, en general tienen problemas para simular la migración estacional de este sistema. En el mes de febrero, por ejemplo, el CCM3.6 parece colocar la ZCIT más al norte en el Pacífico tropical oriental, lo cual se refleja en la Figura 13a (en el ECHAM4.5 esta situación parece no presentarse y las discrepancias son menores para dicho mes, según la Figura 12a).

Existen, además, problemas en cuanto a la estimación de la cantidad de precipitación por parte de los modelos globales. En particular, hay una alta sobreestimación de esta variable en la región próxima a las costas del Pacífico centroamericano durante el período del verano boreal. Esto parece estar muy cercanamente relacionado con las características del patrón de viento sobre esta región, el cual es mucho más intenso que lo mostrado por el Reanálisis de NCEP/NCAR (ver sección anterior). Viento alisio muy intenso en los modelos sobre la región del Pacífico durante la época mencionada en el párrafo anterior, que ha atravesado el ecuador y cambiado su dirección hacia el oeste, produciría más convergencia a lo largo del litoral. La situación expuesta puede ser en parte responsable

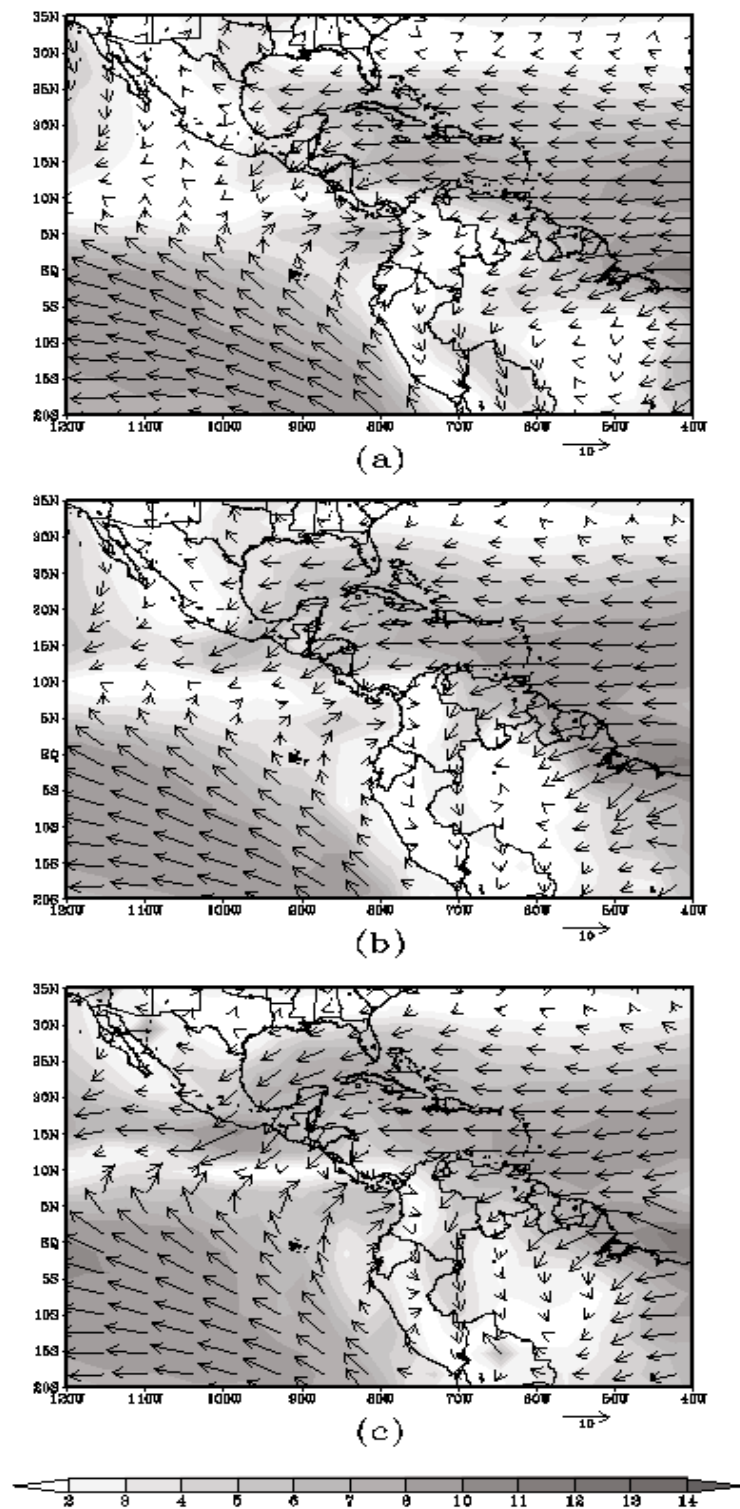


Figura 11: Viento promedio en 925 hPa (m/s) para octubre-noviembre (período 1990-1999) para (a) Reanálisis NCEP/NCAR, (b) ECHAM4.5 y (c) CCM3.6.

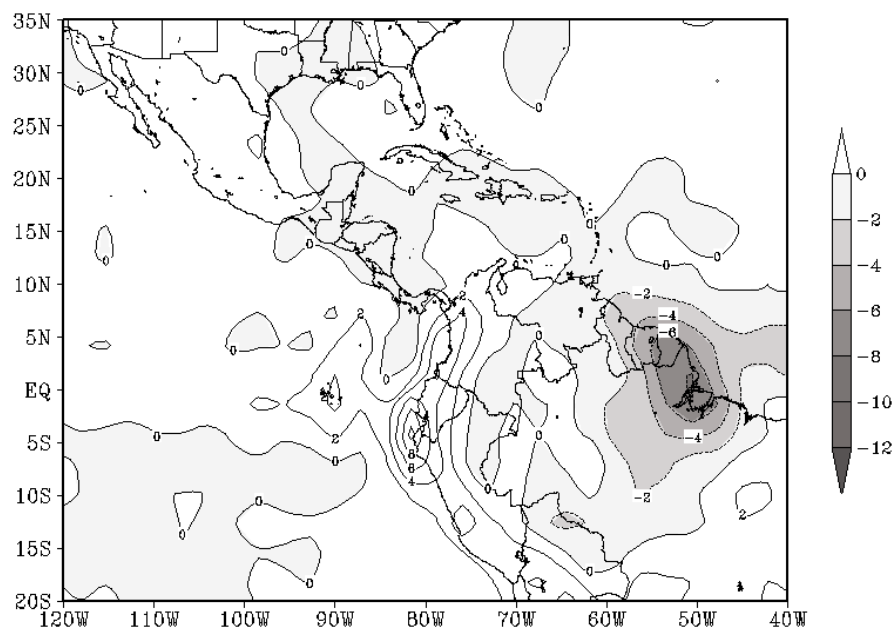
por la mayor cantidad de precipitación que se aprecia en las Figuras 12b y 13b. Si se comparan con los datos espaciales de CMAP, en el modelo ECHAM4.5 las diferencias en la cantidad de lluvia superan los 10 mm/día (alrededor de 300 mm/mes) en el Pacífico centroamericano durante el mes de julio. Este resultado se hace más significativo si se toma en cuenta que CMAP estima que la precipitación de esa zona oscila alrededor de los 10 mm/día. Es decir, el modelo global puede llegar a duplicar la lluvia observada. El resultado indicado se confirma en el Cuadro 1 (que utiliza las observaciones del CRN-073) y además muestra que en los meses de mayo a septiembre se sobreestiman en más de un 100 % los valores observados.

Puesto que el CCM3.6 produce viento más intenso durante la mayor parte del año en la señalada región y este es un elemento clave en el proceso de interacción flujo-topografía-lluvia, se observa igualmente mayor precipitación durante prácticamente todos los meses (ver por ejemplo Figuras 13a y 13b), alcanzando las diferencias valores iguales o superiores a los 10 mm/día en el mes de agosto (no se muestra). En el Cuadro 1 igualmente se pone en evidencia este comportamiento y se puede notar que en dicho mes los datos simulados exceden en más de un 200 % a los observados y en los meses de julio y septiembre la sobreestimación supera el 100 %.

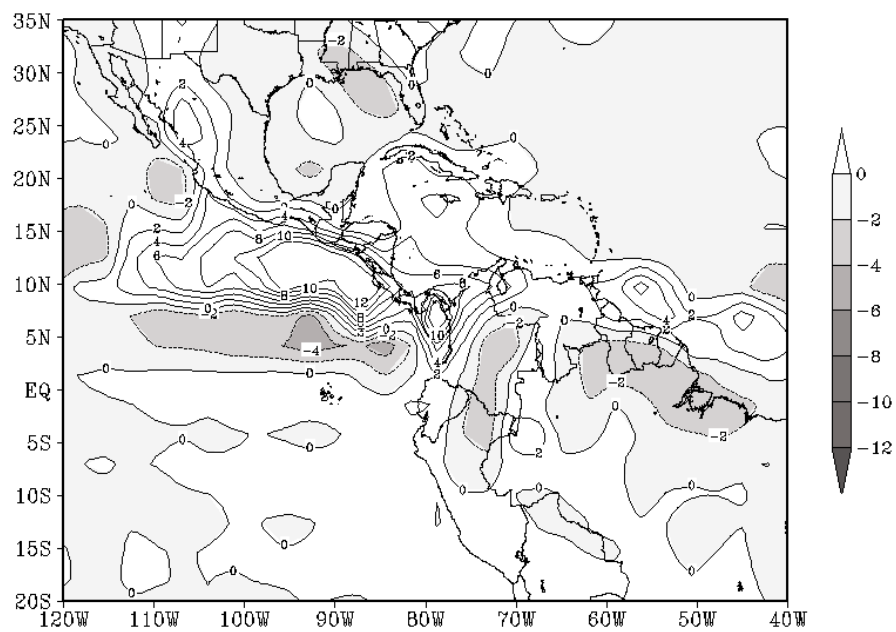
Aparte del posible efecto del viento intenso en el Pacífico, los esquemas de parametrización que ambos modelos utilizan también pueden incidir en el comportamiento de la precipitación en dicha región y estos resultados pueden evidenciar la necesidad de mejorarlos con el fin de obtener mejores simulaciones o predicciones. Cabe mencionar que en esta área existe un importante déficit de observaciones tanto de humedad como de variaciones verticales de temperatura, lo cual tiene también incidencia en los problemas de simulación de la lluvia.

A pesar de las inconsistencias de los modelos en cuanto a la precipitación cerca del Pacífico de Centroamérica, se puede resaltar que el ECHAM4.5 parece capturar el comportamiento bimodal de la precipitación y como consecuencia, la señal del veranillo. Esto se puede notar al momento en que se analiza el ciclo anual sobre esta región (Figura 14). Los datos observados provenientes del CRN-073 muestran en la Figura 14 una disminución relativa en la cantidad de lluvia para el período julio-agosto. En este modelo, el mínimo relativo también se produce, sin embargo, éste se encuentra más sesgado hacia el mes de agosto. La explicación a esta situación puede estar en el hecho de que el ECHAM4.5 simula de mejor manera el comportamiento de la CCMIA y la forma como el intenso viento asociado con la misma puede pasar del mar Caribe hacia el océano Pacífico e influir en la disminución relativa de la precipitación. El caso del CCM3.6 es diferente, el análisis de la Figura 14 muestra que existe un comportamiento unimodal con un máximo durante el mes de agosto, el cual es uno de los meses en que, por el contrario, está presente climatológicamente el veranillo. Nuevamente, los problemas en cuanto a la representación de la CCMIA por parte de este modelo puede influir en que esta importante señal no aparezca en los resultados de las simulaciones.

El ciclo anual sobre la región ubicada en el Caribe muestra una mejor congruencia entre lo simulado y lo observado. Aunque existen diferencias en los valores de la precipitación, se nota que éstas no son tan altas como en el caso de la región del Pacífico. El ECHAM4.5 subestima la precipitación en nueve de los doce meses del año, siendo ésta más fuerte y

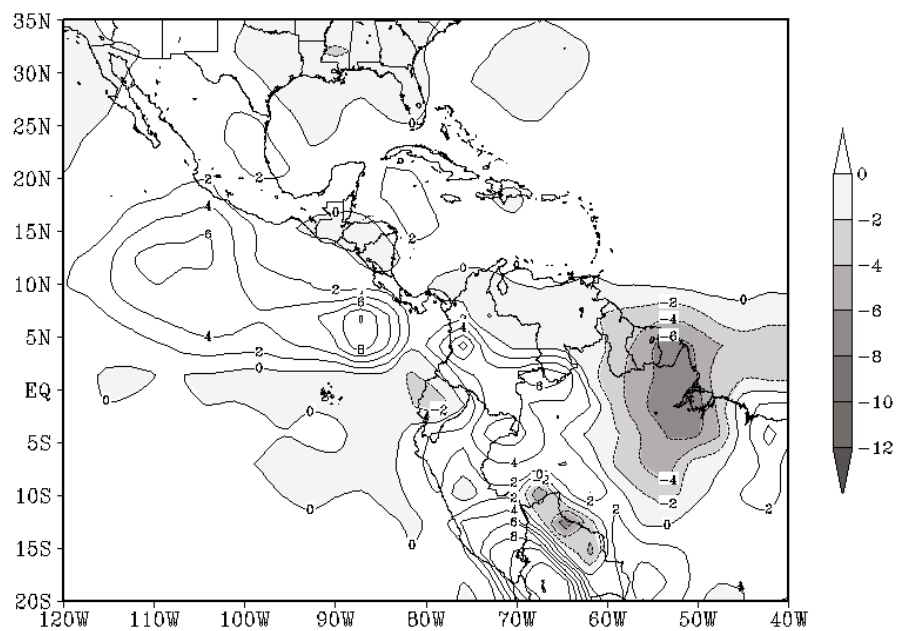


(a)

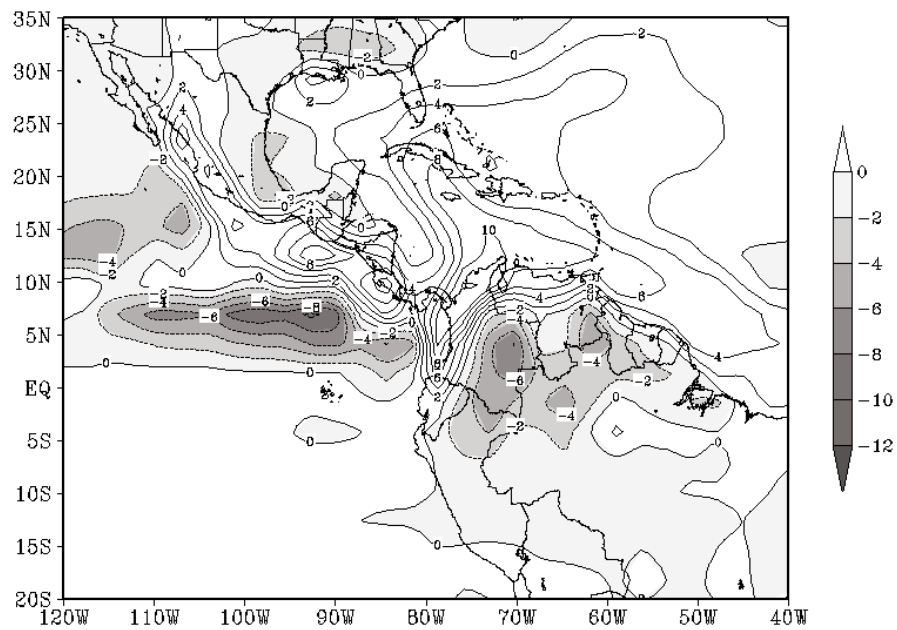


(b)

Figura 12: Diferencia de la precipitación (mm/día) para (a) febrero y (b) julio (período 1990-1999) para el ECHAM4.5 menos el CMAP (Xie & Arkin, 1996).



(a)

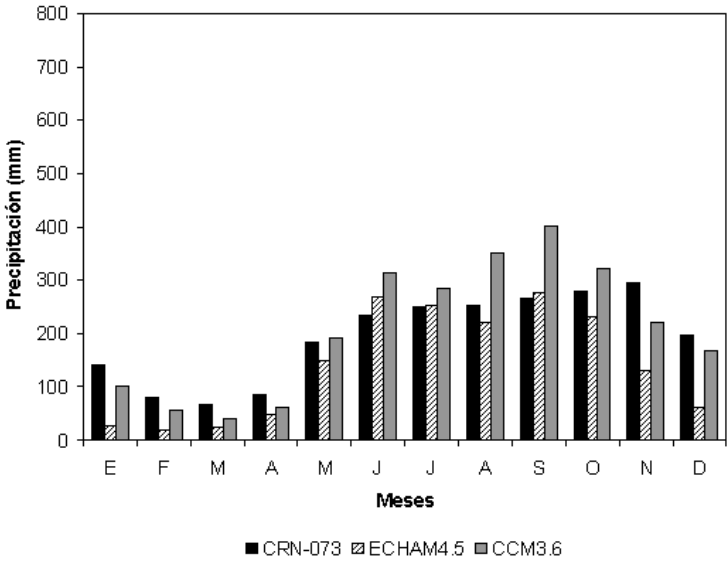


(b)

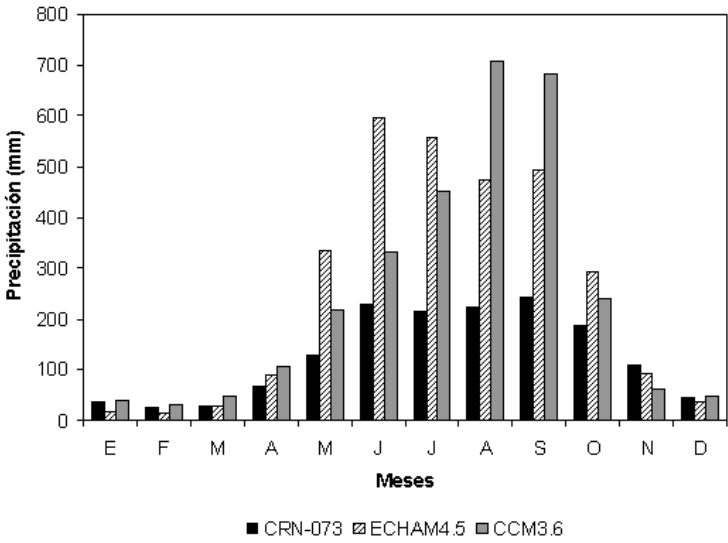
Figura 13: Ídem para Figura 12 excepto para (a) febrero y (b) julio (período 1990-1999) para el CCM3.6 menos el CMAP.

Precipitación Región Pacífico (mm/mes): 1990-1999					
Mes	CRN-073 (BD1)	ECHAM4.5 (BD2)	CCM3.6 (BD3)	Diferencia BD1 menos BD2 (%)	Diferencia BD1 menos BD3 (%)
E	36,92	19,83	39,30	-46,28	6,45
F	26,17	13,47	30,08	-48,50	14,96
M	27,71	28,59	45,82	3,17	65,36
A	67,05	89,57	105,92	33,59	57,98
M	128,48	335,99	217,71	161,51	69,45
J	227,77	595,95	331,87	161,64	45,70
J	215,86	557,69	450,64	158,36	108,76
A	222,75	473,39	709,01	112,53	218,30
S	243,38	492,72	681,57	102,45	180,05
O	186,71	292,76	240,10	56,79	28,59
N	106,91	92,02	61,81	-13,92	-42,19
D	45,31	38,57	48,86	-14,88	7,85
Precipitación Región Caribe (mm/mes): 1990-1999					
Mes	CRN-073 (BD1)	ECHAM4.5 (BD2)	CCM3.6 (BD3)	Diferencia BD1 menos BD2 (%)	Diferencia BD1 menos BD3 (%)
E	140,90	25,83	99,95	-81,66	-29,07
F	80,92	19,23	55,33	-76,23	-31,63
M	67,72	25,27	41,16	-62,69	-39,22
A	84,09	47,00	59,46	-44,11	-29,30
M	184,49	148,62	190,75	-19,44	3,39
J	232,69	269,04	314,67	15,62	35,23
J	248,74	252,45	284,67	1,49	14,44
A	254,11	220,39	350,41	-13,27	37,90
S	264,69	275,52	401,48	4,09	51,68
O	279,12	231,82	319,33	-16,95	14,41
N	295,83	129,58	219,06	-56,20	-25,95
D	197,51	60,34	168,69	-69,45	-14,59

Cuadro 1: Precipitación simulada por los modelos ECHAM4.5 y CCM3.6 para las regiones Caribe y Pacífico y las diferencias con respecto al CRN-073.



(a)



(b)

Figura 14: Precipitación (mm) (período 1990-1999) para (a) área Caribe y (b) área Pacífico.

evidente durante el período de noviembre a abril. Por ejemplo, en el mes de enero, la lluvia producida por el ECHAM4.5 equivale aproximadamente al 18 % de la que se observa en los datos del CRN-073 y en promedio, para esos meses, la subestimación es de un 65 %. En mayo-octubre, este modelo produce mejores resultados puesto que el porcentaje de diferencia entre la lluvia observada y la simulada no supera el 20 % en ninguno de esos meses. En el mes que representa uno de los máximos en la CCMIA (julio), la diferencia es muy baja (menos de 2 %), siendo este un posible indicativo de que el modelo está simulando correctamente la lluvia asociada a la presencia y forzamiento dinámico en varios aspectos de esta corriente en chorro. Examinando el CCM3.6, puede constatarse que este modelo tiende a sobreestimar los valores de precipitación durante el período mayo-octubre. En promedio, la sobreestimación ronda el 26 % en dicha época. Durante noviembre-abril, al igual que en el ECHAM4.5, hay subestimación de la cantidad de lluvia, aunque no tan marcada. En promedio, la subestimación de este período es de aproximadamente un 28 %.

5.2. Variabilidad interanual

5.2.1. Viento en 925 hPa

El Cuadro 2 presenta la duración en meses de los fenómenos del ENOS para el período 1990-1999, siguiendo los resultados y el criterio de Mora & Amador (2000). Usando esta información se calculan los compuestos El Niño y La Niña para el viento en 925 hPa durante la estación enero, febrero y marzo (EFM) y la estación junio, julio y agosto (JJA).

La Figura 15 compara el Reanálisis de NCEP/NCAR con los modelos ECHAM4.5 y CCM3.6 para EFM. De acuerdo con el Reanálisis, durante eventos El Niño (La Niña) se presenta una disminución (aumento) de alrededor de 1 m/s en la intensidad del viento en 925 hPa sobre la región del máximo de la CCMIA. Este comportamiento se refleja también sobre el Pacífico, en donde se presentan anomalías negativas (positivas) en la magnitud del viento en 925 hPa sobre dicha región en la fase cálida (fría) del ENOS. Por otro lado, la rama de la CCMIA que se desvía hacia Suramérica durante EFM presenta una mayor (menor) intensidad durante eventos de El Niño (La Niña).

El ECHAM4.5 y el CCM3.6 para EFM muestran que la magnitud del viento de bajo nivel para el Caribe y el Golfo de México es menor durante los eventos El Niño ocurridos en la década de estudio que durante los eventos La Niña. Este patrón concuerda con el observado en el Reanálisis. Sin embargo, en el ECHAM4.5 la disminución del viento es muy marcada. El CCM3.6, por el contrario, produce valores más cercanos a los observados. En cuanto al aumento en la rama de la CCMIA que penetra al sur del continente durante la fase cálida del ENOS, se aprecia que los dos modelos no capturan esta característica y tienden a presentar un debilitamiento de la misma para dicha fase.

En la Figura 16a, la información del Reanálisis muestra una intensificación (disminución) de la CCMIA durante eventos El Niño (La Niña) en los meses JJA. Este resultado es consistente con lo afirmado por Amador & Magaña (1999), Mora & Amador (2000), Amador et al. (2003) y Amador et al. (2006). El mismo comportamiento se da en el campo de viento sobre las regiones cercanas a la costa Pacífica de Centroamérica y del sur de México.

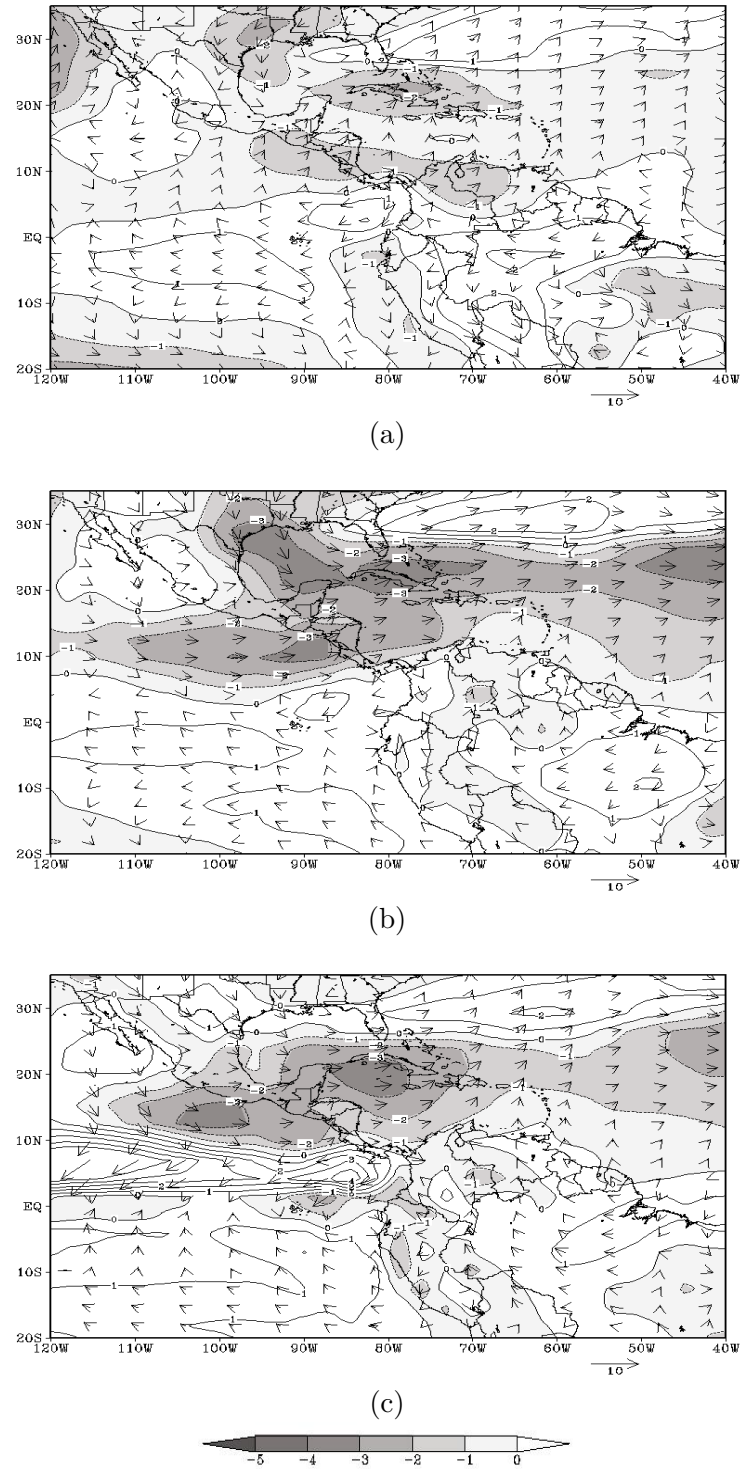
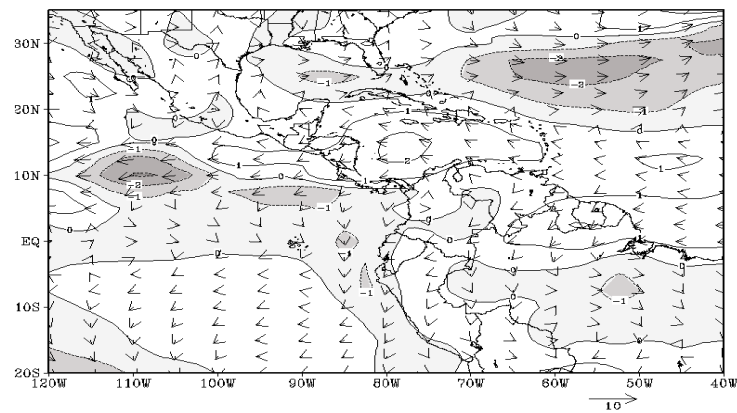
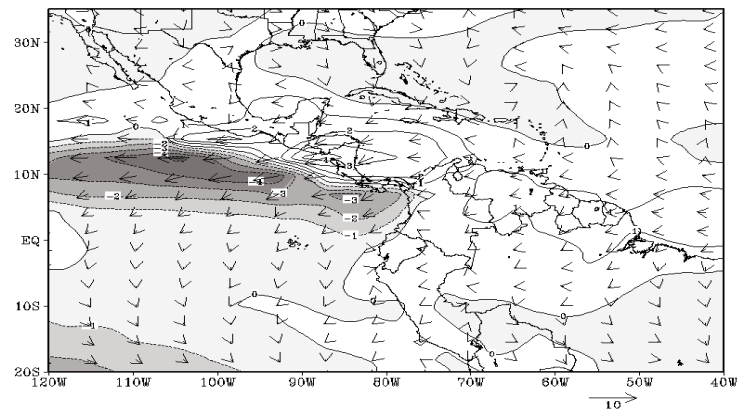


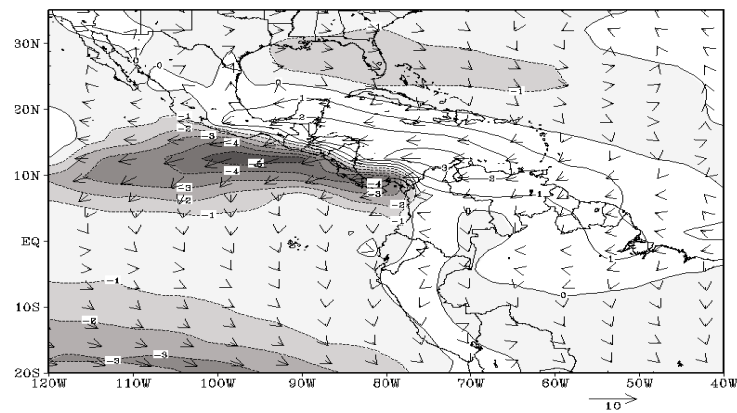
Figura 15: Compuestos El Niño menos La Niña para viento promedio en 925 hPa (m/s) durante EFM (período 1990-1999) para (a) el Reanálisis NCEP/NCAR, (b) el ECHAM4.5 y (c) el CCM3.6.



(a)



(b)



(c)



Figura 16: Ídem Figura 15 excepto para JJA (período 1990-1999) para (a) el Reanálisis NCEP/NCAR, (b) el ECHAM4.5 y (c) el CCM3.6.

Eventos El Niño 1990-1999		
Inicio	Final	Duración (meses)
Mar 1991	Jun 1992	16
Ago 1992	Oct 1993	15
Feb 1994	Abr 1995	15
Mar 1997	May 1998	15
Eventos La Niña 1990-1999		
Inicio	Final	Duración (meses)
Mar 1996	Dic 1996	10
Jul 1998	Jun 1999	12
Set 1999	May 2000	9

Cuadro 2: Eventos El Niño (arriba) y La Niña (abajo) durante la década 1990-1999 de acuerdo con los criterios de Mora & Amador (2000).

El patrón simulado por el modelo ECHAM4.5 se asemeja al que se explica en el párrafo anterior (Figura 16b). Sin embargo, nuevamente este modelo sobreestima el aumento tanto en la intensidad de la CCMIA como en la magnitud del viento que pasa hacia el Pacífico centroamericano.

El CCM3.6 también identifica en la fase cálida del ENOS un aumento de la intensidad del viento en el Caribe, pero no así en el oeste de la región centroamericana, donde se presenta una disminución de esta variable (Figura 16c). La razón por la que se da este fenómeno se encuentra posiblemente en las dificultades que este modelo tiene para simular el correcto posicionamiento y magnitud de la CCMIA para la época del verano boreal (ver sección 4.1.1).

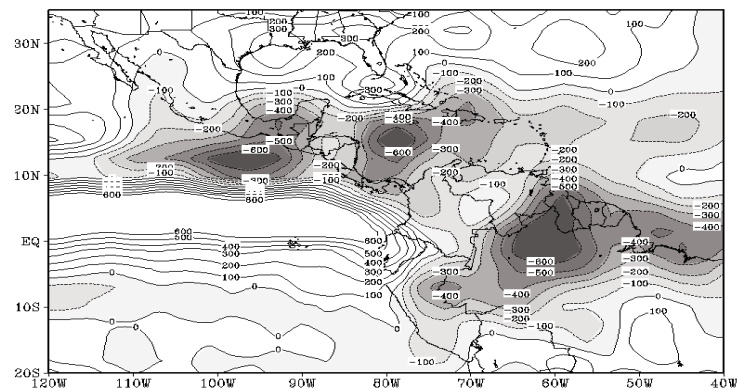
5.2.2. Precipitación

Los compuestos de precipitación anual muestran, a gran escala, que la lluvia observada (CMAP, Figura 17a) sobre la región del mar Caribe, el sur de México y Centroamérica es menor durante eventos El Niño al compararse con la que se produce durante eventos La Niña. En el sur de Estados Unidos se presenta el comportamiento inverso.

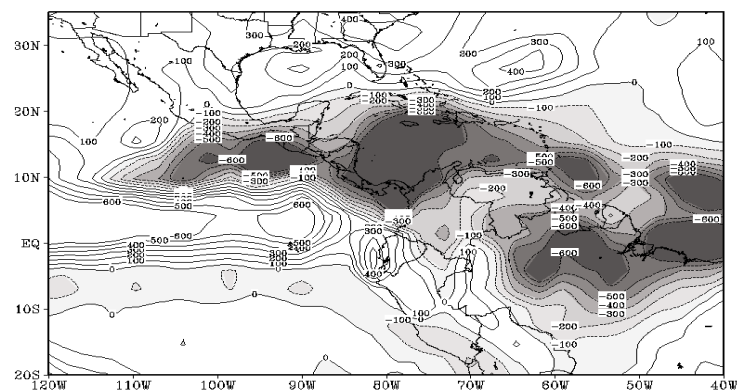
De acuerdo con la Figura 17a, existe además una franja al norte del ecuador (FNE) entre los $0^{\circ} - 7^{\circ}\text{N}$ y $80^{\circ}\text{O} - 120^{\circ}\text{O}$ que presenta una mayor precipitación durante la fase cálida del ENOS. Esto está estrechamente relacionado con la zona en donde se producen las anomalías positivas de las temperaturas superficiales del mar. Otra zona importante de mencionar es la que se ubica en el noroeste de Brasil y sobre las Guayanas, en donde se aprecia una fuerte disminución de las precipitaciones.

El modelo ECHAM4.5 en términos generales reproduce de buena forma el patrón de precipitación que se observa en los datos estimados de CMAP (Figura 17b). Sin embargo, tiende a producir mucho menos lluvia en el mar Caribe y en Centroamérica.

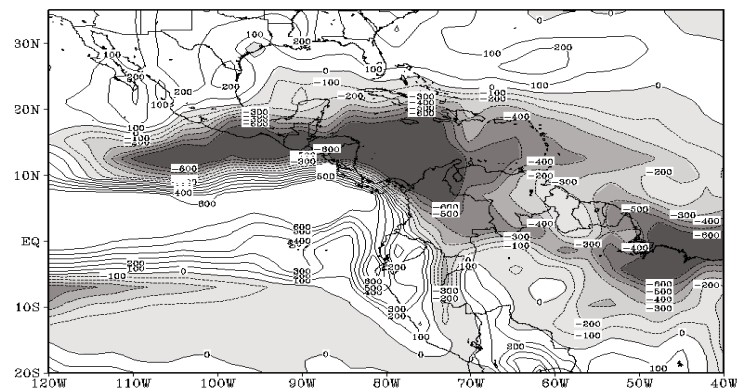
En la Figura 17c se observa que en el modelo CCM3.6 los patrones generales de dife-



(a)



(b)



(c)

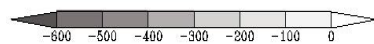


Figura 17: Compuestos El Niño menos La Niña para precipitación anual (mm) (período 1990-1999) para (a) el CMAP, (b) el ECHAM4.5 y (c) el CCM3.6.

rencias de lluvia El Niño menos La Niña concuerdan con los de CMAP. Los problemas se evidencian principalmente en la FNE, ya que en este modelo se encuentra desplazada más hacia el norte, indicando que la precipitación en regiones al sur de Centroamérica (costa pacífica de Costa Rica y Panamá) es mayor durante eventos El Niño en relación con los eventos La Niña.

6. Conclusiones

Los modelos de circulación general (MCG) son modelos numéricos que intentan proveer una completa descripción del comportamiento de la atmósfera a nivel global. En el presente trabajo se realizó un análisis para determinar las características climáticas que se consideran fundamentales contribuyentes al régimen climático regional y con base en esta información, se evaluaron los resultados producidos por dos MCG (el ECHAM4.5 y el CCM3.6) para dos variables fundamentales, el viento en 925 hPa y la precipitación, lo cual permitió establecer cuál de ellos captura de mejor manera aspectos del clima regional. Durante este proceso se usaron observaciones y datos dinámicamente inicializados (forzando que los datos observados satisfagan el balance numérico derivado de la discretización de las ecuaciones dinámicas y de las relaciones físicas establecidas) disponibles en la base NUMEROSA del Centro de Investigaciones Geofísicas de la Universidad de Costa Rica, específicamente, el Reanálisis de NCEP/NCAR y la precipitación de CMAP y de CRN073. Se estableció la década de 1990-1999 como período de estudio, debido principalmente a la disponibilidad de información. La elaboración de promedios mensuales espaciales y temporales, además del análisis estadístico con la prueba t de Student, proporcionaron un panorama que posibilitó apreciar las fortalezas y debilidades de cada MCG empleado.

Los resultados de la evaluación de los MCG favorecieron al modelo ECHAM4.5, principalmente por las siguientes razones: (a) presentó mayor habilidad en simular el ciclo anual de viento en 925 hPa sobre la región de la CCMIA, luego de analizar los promedios espaciales y la serie de tiempo generada para el Caribe, (b) en el Pacífico centroamericano también mostró una buena representación del viento en bajo nivel, (c) con respecto a la precipitación, el ECHAM4.5 capturó, aunque con un sesgo hacia agosto, la señal del veranillo que es característica de los meses de julio-agosto en la región del Pacífico, no obstante, se debe mencionar también que este modelo sobreestima la cantidad de lluvia en toda esa zona. Por las razones expuestas, este MCG se empleó para conducir el experimento de reducción de escala dinámica con el modelo regional MM5v3 y con ello obtener simulaciones para el mes de enero del 2000 con una máxima resolución espacial de 30 km, aspecto tratado y discutido en otro trabajo complementario al presente (RA2).

Algunas de las limitaciones encontradas en el presente trabajo se discuten a continuación.

En cuanto a la evaluación de los modelos de circulación general (MCG), se recomienda incluir otros modelos aparte del ECHAM4.5 y el CCM3.6 y contar con simulaciones para una mayor cantidad de años, preferiblemente 30 años o más, con el propósito de obtener climatologías de modelos que cumplan los requerimientos establecidos por la Organización Meteorológica Mundial (OMM). También, esta cantidad de años favorece el estudio de la

variabilidad climática reproducida por los modelos.

El número de miembros utilizados en el caso del ECHAM4.5 es relativamente pequeño. Contar con el conjunto completo de miembros que fue generado (24 en total) sería ideal para realizar una evaluación más completa de los resultados de este modelo y facilitaría la elaboración de una muestra suficientemente grande de miembros para la reducción de escala con el MM5v3. Similar situación ocurre con el CCM3.6, ya que solamente se poseen datos mensuales provenientes del promedio de 24 miembros y no hay datos con mejor resolución temporal que permitan hacer una regionalización dinámica con un modelo de área limitada diseñado para pronóstico de tiempo.

El desarrollo de una capacidad para generar en la región estas simulaciones globales y no solamente obtener datos de otros centros internacionales significaría un avance importante, ya que el sistema de predicción climática sería completo, por lo cual deben continuarse los esfuerzos destinados a alcanzar este objetivo.

La representación del ciclo diurno de variables como la temperatura y el viento en superficie para diferentes regiones de Centroamérica debe examinarse con el fin de determinar si los modelos responden eficientemente a los forzamientos físicos y dinámicos que determinan el comportamiento diario de la atmósfera sobre esta región.

La prueba estadística *t* de Student es una herramienta muy sencilla para evaluar las salidas de los modelos de circulación general, por lo que se recomienda el uso de técnicas que proporcionen más luz en los patrones de circulación para este tipo de problemas. Un método que puede cumplir con este cometido es emplear técnicas específicas de análisis multivariado, entre ellas, por ejemplo, el análisis de componentes principales.

7. Agradecimientos

Este trabajo forma parte de la Tesis de Maestría “El Problema y Aplicaciones de la Reducción de Escala Dinámica para la Predicción Climática Estacional en Centroamérica” defendida exitosamente por el primero de los autores (ERR) en octubre del 2006 en el marco del Programa de Posgrado en Ciencias de la Atmósfera de la Universidad de Costa Rica. Los autores desean agradecer al Dr. Luis Farfán y al Dr. Eric Alfaro por sus valiosos comentarios. Para la realización de este trabajo se contó con el apoyo financiero por parte del proyecto *Variabilidad climática, modelado y predicción de hidroclimatología regional* (UCR-VI-805-98-506) y de National Oceanic and Atmospheric Administration Office for Global Programs (NOAA/OGP) y del Comité Regional de Recursos Hidráulicos (CRRH), por medio de un proyecto regional para modelado climático. Agradecimiento especial a los proyectos ANUIES/CSUCA y Assessments of Impacts and Adaptations to Climate Change (AIACC-LA06). Se reconoce el apoyo internacional y local de los proyectos IAI-CRN-2050 y el VI-805-A7-002 respectivamente, en la realización de este trabajo. A las siguientes instituciones: Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH), International Research Institute for Climate and Society (IRI), Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y Universidad de los Andes, Venezuela. A Blanca Calderón por su asistencia técnica. Finalmente, los autores

agradecen los comentarios y sugerencias de los revisores del trabajo.

Referencias

- [1] Alfaro, E.; Cid, L.; Enfield, D. (1998) “Relaciones entre el inicio y término de la estación lluviosa en Centroamérica y los océanos Pacífico y Atlántico tropical”, *Investigaciones Marinas* **26**: 56–69.
- [2] Alfaro, E.; Cid, L. (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**: 205–222.
- [3] Amador, J. A. (1981) *Mean Fields and Synoptic Scale Systems during Phase III of GATE*. Ph. D. thesis, University of Reading, United Kingdom.
- [4] Amador, J. A. (1998) “A climatic feature of tropical Americas: The trade wind easterly jet”, *Top. Meteor. Oceanogr.* **5**(2): 91–102.
- [5] Amador, J. A.; Magaña, V. (1999) “Dynamics of the low level jet over the Caribbean Sea”. Preprints 23rd Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, American Meteorological Society, January 1999, Dallas Texas.
- [6] Amador, J. A.; Magaña, V.; Pérez, J. B. (2000) “The low level jet and convective activity in the Caribbean”. Preprints 24th Conference in Hurricanes and Tropical Meteorology, American Meteorological Society, May 29 – June 2, 2000, Fort Lauderdale, Florida.
- [7] Amador, J. A.; Chacón, R. E.; Laporte, S. (2003) “Climate and climate variability in the Arenal Basin of Costa Rica”, in: H. F. Díaz y B. Morehouse (Eds.) *Climate and Water: Transboundary Challenges in the Americas*, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands: 317–350.
- [8] Amador, J. A.; Alfaro, E.; Lizano, O.; Magaña, V. (2006) “Atmospheric forcing of the eastern tropical Pacific: a review”, *Progress in Oceanography* **69**(2–4): 101–142.
- [9] Basher, R.; Clark, C; Dilley, M.; Harrison, M. (2001) “Coping with the climate: a way forward”, IRI Report CW/01/2, International Research Institute for Climate and Society, Palisades, New York.
- [10] Bedritsky, A. I. (1999) “El impacto del tiempo y del clima en el desarrollo económico sostenido”, *Boletín de la Organización Meteorológica Mundial* **48**: 214–221.
- [11] Bjerckness, V. (1904) “Das problem von de wettvorhersage, betrachtet vom standpunkt der mechanik und der physik”, *Meteor. Z.* **21**: 1–7.
- [12] Brinkop, S.; Roeckner, E. (1995) “Sensitivity of a general circulation model to parameterizations of cloud-turbulence interactions in the atmospheric boundary layer”, *Tellus* **47**: 197– 220.

- [13] Burpee, R. W. (1972) “The origin and structure of easterly waves in the lower troposphere of North Africa”, *J. Atmos. Sci.* **29**: 77–90.
- [14] Carlson, T. N. (1969) “Some remarks on African disturbances and their progress over the tropical Atlantic”, *Mon. Wea. Rev.* **97**: 716–726.
- [15] Dudhia, J.; Gill, D.; Guo, Y.-R.; Manning, K.; Wang, W.; Bruyere, C. (2005) “PSU/NCAR mesoscale modeling system tutorial class notes and users’ guide: MM5 modeling system version 3”, Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado.
- [16] Enfield, D.; Alfaro, E. (1999) “The dependence of Caribbean rainfall on the interaction of the tropical Atlantic and Pacific Oceans”, *J. of Climate* **12**: 2093–2103.
- [17] Farfán, L. M.; Zehnder, J. A. (1997) “Orographic influence on the synoptic-scale circulations associated with the genesis of Hurricane Guillermo (1991)”, *Mon. Wea. Rev.* **125**: 2683–2698.
- [18] Fernández, W.; Barrantes, J. A. (1996) “The Central American temporal: a long-lived tropical rain-producing system”, *Top. Meteor. Oceanogr.* **3**(2): 73–88.
- [19] Fouquart, Y.; Bonnel, B. (1980) “Computations of solar heating of the Earth’s atmosphere: a new parameterization”, *Beitr. Phys. Atmos.* **53**: 35–62.
- [20] Gates, W. L.; Boyle, J.; Covey, C.; Dease, C.; Doutriaux, C.; Drach, R.; Fiorino, M.; Gleckler, P.; Hnilo, J.; Marlais, S.; Phillips, T.; Potter, G.; Santer, B.; Sperber, K.; Taylor, K.; Williams, D. (1998) “An overview of the results of the Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP)”, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **73**: 1962–1970.
- [21] Grell, G. A.; Dudhia, J.; Stauffer, D. R. (1993) “A description of the fifth generation Penn State/NCAR mesoscale model”, NCAR Technical Note 398+IA, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado.
- [22] Hack, J. J. (1994) “Parameterization of moist convection in the NCAR Community Climate Model, CCM2”, *J. Geophys. Res.* **99**: 5551–5568.
- [23] IPCC (2001) “Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability”, in: J. J. McCarthy, O. F. Canziani, N. A. Leary, D. J. Dokken, K. S. White (Eds.) *Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Chapter 14, Cambridge University Press, Cambridge and New York: 1032 pp.
- [24] Jones, P.W. (1999) “First- and second-order conservative remapping schemes for grids in spherical coordinates” *Mon. Weath. Rev.* **127**: 2204–2210.
- [25] Kalnay, E.; Kanamitsu, M.; Kistler, R.; Collins, W.; Deaven, D.; Gandin, L.; Iredell, M.; Saha, S.; White, G.; Woollen, J.; Zhu, Y.; Chelliah, M.; Ebisuzaki, W.; Higgins, W.; Janowiak, J.; Mo, K. C.; Ropelewski, C.; Wang, J.; Leetmaa, A.; Reynolds, R.;

- Jenne, R.; Joseph, D. (1996) "The NCEP/NCAR reanalysis 40-year project", *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **77**: 437–471.
- [26] Kiehl, J. T.; Hack, J.; Bonan, G. B.; Boville, B. A.; Briegleb, B. P.; Williamson, D. L.; Rasch, P. J. (1996) "Description of the NCAR Community Climate Model (CCM3)", NCAR Technical Note 420+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado.
- [27] Lohmann, U.; Roeckner, E. (1996) "Design and performance of a new cloud microphysics scheme developed for the ECHAM general circulation model", *Clim. Dyn.* **12**: 557–572.
- [28] Lohmann, U.; Bennartz, R. (2002) "Absorption of solar radiation in the atmosphere using improved water vapor line data", *J. Geophys. Res.* **107** doi: 10.1029/2001JD001101.
- [29] Lorenz, E. N. (1970) "Climate change as a mathematical problem", *J. Appl. Meteor.* **9**: 325–329.
- [30] Magaña, V.; Amador, J. A.; Medina, S. (1999) "The midsummer drought over Mexico and Central America", *J. Climate* **12**: 1577–1588.
- [31] Mora, I.; Amador, J. A. (2000) "EL ENOS, el IOS y la corriente en chorro de bajo nivel en el oeste del Caribe", *Top. Meteor. Oceanog.* **7**(1): 1–20.
- [32] Morcrette, J.-J. (1991) "Radiation and cloud radiative properties in the ECMWF operational weather forecast model", *J. Geophys. Res.* **96**: 9121–9132.
- [33] Moura, A. D.; Sarachik, E. S. (1997) "Predicciones climáticas estacionales a interanuales y sus aplicaciones: nuevas instituciones; nuevas posibilidades", *Boletín de la Organización Meteorológica Mundial* **46**: 398–403.
- [34] Nordeng, T. E. (1994) "Extended versions of the convective parameterization scheme at ECMWF and their impact on the mean and transient activity of the model in the tropics", Technical Report 206, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Reading, England.
- [35] OMM (1992) *Vocabulario Meteorológico Internacional*. Editorial OMM, Suiza.
- [36] OPS (2000) *Crónicas de desastres No. 8: Fenómeno El Niño 1997–1998*. Organización Panamericana de la Salud, Washington, D.C.
- [37] Peterson, T. C.; Vose, R. S. (1997) "An overview of the Global Historical Climatology Network temperature data base", *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **78**: 2837–2849.
- [38] Phillips, T. J. (1994) *A Summary Documentation of the AMIP Models*. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California.

- [39] Poveda, G.; Mesa, O. J. (2000) “On the existence of Lloró (the rainiest locality on Earth): enhanced ocean-land-atmosphere interaction by a low-level jet”, *Geophys. Res. Lett.* **27**: 1675–1678.
- [40] Rasch, P. J.; Williamson, D. L. (1990) “Computational aspects of moisture transport in global models of the atmosphere”, *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **116**: 1071–1090.
- [41] Rasch, P. J.; Kristjansson, J. E. (1998) “A comparison of the CCM3 model climate using diagnosed and predicted condensate parametrizations”, *J. Climate* **11**: 1587–1614.
- [42] Reding, P. J. (1992) *The Central American cold surge: an observational analysis of the deep south-ward penetration of North American cold fronts*. M.S. thesis, Department of Meteorology, Texas A&M University, Texas, USA.
- [43] Reed, R. J.; Recker, E. E. (1971) “Structure and properties of synoptic-scale disturbances in the equatorial Western Pacific”, *J. Atmos. Sci.* **28**: 1117–1133.
- [44] Richardson, L. F. (1922) *Weather Prediction by Numerical Process*. Cambridge University Press, reprinted Dover, New York, 1965.
- [45] Riehl, H. (1954) *Tropical Meteorology*. McGraw-Hill, New York-London.
- [46] Rivera, E. R.; Amador, J. A. (2009): “Predicción estacional del clima en Centroamérica mediante la reducción de escala dinámica. Parte II: Aplicación del modelo MM5v3”, aceptado en *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*.
- [47] Rockel, B.; Raschke, E.; Weyres, B. (1991) “A parameterization of broad band radiative transfer properties of water, ice and mixed clouds”, *Beitr. Phys. Atmos.* **64**: 1–12.
- [48] Roeckner, E.; Arpe, K.; Bengtsson, L.; Christoph, M.; Claussen, M.; Dümenil, L.; Esch, M.; Giorgetta, M.; Schlese, U.; Schulzweida, U. (1996) “The atmospheric general circulation model ECHAM-4: Model description and simulation of present-day climate”, MPI-Report 218, Max Planck Institut für Meteorologie, Hamburg, Germany.
- [49] Schultz, D. M.; Bracken, W. E.; Bosart, L. F.; Hakim, G. J.; Bedrick, M. A.; Dickinson, M. J.; Tyle, K. R. (1997) “The 1993 superstorm cold surge: frontal structure, gap flow, and tropical impact”, *Mon. Wea. Rev.* **125**: 5-39; Corrigenda, **125**: 662.
- [50] Schultz, D. M.; Bracken, W. E.; Bosart, L. F. (1998) “Planetary- and synoptic-scale signals associated with Central American cold surges”, *Mon. Wea. Rev.* **126**: 5–27.
- [51] Simmons, A. J.; Burridge, D. M.; Jarraud, M.; Girard, C.; Wergen, W. (1989) “The ECMWF medium-range prediction model: development of the numerical formulations and the impact of increased resolution”, *Meteorol. Atmos. Phys.* **40**: 28–60.

- [52] Tiedtke, M. (1989) “A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models”, *Mon. Wea. Rev.* **117**: 3040–3061.
- [53] Velásquez, R. C. (2000) *Mecanismos Físicos de Variabilidad Climática y Eventos Extremos en Venezuela*. Tesis de Licenciatura en Meteorología, Departamento de Física Atmosférica, Oceánica y Planetaria, Escuela de Física, Universidad de Costa Rica, Costa Rica.
- [54] Wang, C.; Enfield, D. (2001) “The tropical Western Hemisphere warm pool”, *Geophys. Res. Lett.* **28**: 1635–1638.
- [55] Wang, C.; Enfield, D. (2003) “A further study of the tropical Western Hemisphere warm pool”, *J. Climate* **16**: 1476–1493.
- [56] Washington, W. M.; Parkinson, C. L. (1986) *An Introduction to Three-Dimensional Climate Modeling*. Univesity Science Books, Mill Valley, California.
- [57] Wilks, D. S. (1995) *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press, New York.
- [58] WMO (1999) *The 1997–98 El Niño Event in Brief*. World Meteorological Organization, Geneva.
- [59] Xie, P.; Arkin, P. A. (1996) “Analyses of global monthly precipitation using gauge observations, satellite estimates, and numerical model predictions”, *J. Climate* **9**: 840–858.
- [60] Xie, P.; Arkin, P. A. (1997) “Global precipitation: a 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs”, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **78**: 2539–2558.
- [61] Zhang, G. J.; McFarlane, N. A. (1995) “Sensitivity of climate simulations to the parameterization of cumulus convection in the Canadian Climate Centre general circulation model”, *Atmos.–Ocean* **33**: 407–446.