

# **La ocurrencia de ciclones tropicales en el Caribe y México y el calentamiento global. Aplicación de un modelo climático regional**

Daniel Martínez-Castro, Israel Borrajero-Montejo, Arnoldo Bezanilla-Morlot y  
Abel Centella-Artola

*Instituto de Meteorología, Loma de Casablanca, Regla, La Habana, Apartado 17032, Habana 17. C.P.  
11700, La Habana, Cuba*  
*E-mail [daniel.martinez@insmet.cu](mailto:daniel.martinez@insmet.cu)*

Recibido: septiembre 28, 2010; Aceptado: mayo 23, 2011; Versión final recibida: junio 24, 2011

## **RESUMEN**

Para obtener una proyección de las posibles variación en la frecuencia de ocurrencia de trayectorias de ciclones tropicales en la región del Caribe y México, que se producirá a fines del presente siglo como consecuencia del cambio global, se obtuvieron escenarios climáticos de alta resolución anidando el modelo climático regional del sistema PRECIS en las simulaciones de la componente atmosférica del modelo global HadCM3 para el presente siglo. Alimentando el modelo regional con datos de reanálisis, se comprobó que el mismo es capaz de reproducir la distribución local de las variables meteorológicas observadas. Se comprobó, además la eficacia de la simulación anidada en el modelo global corrido en tiempo presente. Para las proyecciones de fin de siglo, se anidó el modelo regional en las salidas del modelo global para el escenario SRES-A2. Se detectaron estructuras vorticiales semejantes a ciclones tropicales (EVSCT) que se utilizaron como indicadores de la ocurrencia de los mismos. Mediante un método objetivo se contó la frecuencia de paso de las trayectorias ciclónicas por cada uno de los puntos de rejilla del dominio. Se analizó la diferencia entre los campos meteorológicos medios y la cantidad de EVSCT proyectados para fin de siglo con los simulados en tiempo presente por los mismos modelos. El calentamiento de la superficie del mar Caribe proyectado para los últimos 30 años del siglo resultó moderado, mientras que para los mares al oeste de México es mayor, lo que es consistente con el significativo incremento en el paso de EVSCT proyectado por las simulaciones para esta última zona, mientras que para el Caribe no se proyecta incremento medio en la ocurrencia de estos sistemas.

**Palabras clave:** Ciclón tropical, modelo climático regional, PRECIS, cambio climático, calentamiento global.

## **The occurrence of tropical cyclones in the Caribbean and Mexico and global warming. Application of a regional climate model**

### **ABSTRACT**

To obtain a projection of the possible variation in the frequency of occurrence of tropical cyclone tracks in the region of the Caribbean and Mexico that will take place by the end of the century as a consequence of global warming, high resolution climatic scenarios were produced by nesting the regional climate model of the PRECIS system in the simulations of the global climate model HadCM3 for the present century. Feeding the regional model with reanalysis boundary conditions, it was shown that it can adequately reproduce the local distribution of the observed meteorological variables for the simulation domain. The performance of the regional model nested in present time output from the global model was also tested. The regional model was run with the boundary conditions of the global model for the SRES-A2 scenario. Tropical cyclone-like vortices (TCLV) were detected, which were used as indicators of occurrence of tropical cyclones. Using an objective method, the frequency of passing of TCLV tracks was counted for the grid points covering the whole domain. The difference between the projected meteorological fields and quantity of TCLVs for the end of the present century relative to the present time simulations was analyzed. The projected warming of the surface of the Caribbean Sea for the last 30 years of the century is moderate, while it is greater for the western coasts of Mexico, which is consistent with the projected increment in the frequency of TCLV passing by each region, while no average increment is projected for the Caribbean region.

**Key words:** Tropical cyclone, regional climate model, PRECIS, climate change, global warming.

## INTRODUCCIÓN

Los ciclones tropicales (Emanuel, 2003) revisten especial importancia para la economía y la vida en general en los países afectados, entre los cuales se encuentra Cuba. Esto incluye tanto los efectos negativos debidos a los fuertes vientos y las inundaciones como positivos por su aporte a la acumulación de agua potable en embalses y cuencas subterráneas. Es por esto que la estimación del comportamiento futuro de los mismos y en particular, las posibles tendencias de cambio de su frecuencia de ocurrencia y su intensidad, posiblemente relacionadas con el calentamiento global por incremento del efecto invernadero, son objetivos prioritarios de investigación para los países que deben convivir con estos fenómenos.

En los últimos años, la literatura especializada internacional ha reflejado un agudo debate sobre el tema. Uno de los enfoques del problema se ha centrado en el análisis de la información disponible sobre ciclones tropicales en diferentes períodos para los cuales se posee información. Las variables estudiadas son, fundamentalmente la frecuencia de ocurrencia de ciclones tropicales con diferentes intensidades y sus parámetros estructurales característicos, así como la temperatura de la superficie del mar y la cizalladura vertical del viento. Los trabajos más recientes que abordan la temática del comportamiento de los ciclones tropicales (CT) con el cambio climático centran el debate en la posible existencia de relación entre el observado aumento de la frecuencia de ocurrencia de los ciclones tropicales en determinados intervalos de años y una tendencia al aumento de la temperatura de la superficie del mar (TSM) debida a causas antropogénicas relacionadas con la emisión a la atmósfera de gases de efecto invernadero. Como base conceptual de estas consideraciones pueden tomarse los trabajos de Emanuel y Holland (Emanuel, 1988; 1995; Holland, 1997) donde se demuestra que los ciclones tropicales actúan como máquinas térmicas cuya energía depende de la diferencia de temperatura entre la superficie del mar y los niveles superiores de la atmósfera y se proponen expresiones teóricas para determinar la llamada intensidad potencial de los ciclones en función de variables ambientales, quedando claro que su principal fuente de energía es la energía interna de la superficie del mar, proporcional a su temperatura. El período objeto de estudio, con información disponible sobre ciclones tropicales consiste en el siglo pasado y especialmente su segunda mitad y lo que va del presente. Recientemente, algunos autores (Emanuel, 2005; Webster *et al.*, 2005; Hoyos *et al.*, 2006; Mann *et al.*, 2007; Holland y Webster, 2007) han aportado argumentos sólidos a favor de que la tendencia al aumento de la TSM detectada durante el último siglo es debida a causas antropogénicas y que es ésta, a su vez la causa fundamental del aumento, o bien de la frecuencia de ocurrencia de CT en general, o bien de huracanes de gran intensidad en particular. Esta tendencia se ha visto apoyada en los últimos años por resultados de análisis estadístico de las salidas de modelos numéricos, alcanzándose un cierto grado de consenso sobre el tema (Emanuel, 2008; Emanuel *et al.*, 2008; Bender *et al.*, 2010; Knutson *et al.*, 2010). Otros autores, sin embargo, han puesto en duda la confiabilidad de las fuentes de datos utilizadas para arribar a tal conclusión o han expuesto otros argumentos para explicar las tendencias climatológicas del comportamiento de los CT, basados en la variabilidad climática natural (Landsea *et al.*, 1999; Pielke *et al.*, 2005; Bell y Chelliah, 2006; Landsea *et al.*, 2006; Landsea, 2007).

En el presente trabajo se aplica el sistema de modelación regional climática PRECIS (Providing Regional Climates for Impacts Studies) al estudio del comportamiento de la ocurrencia de ciclones tropicales en el área de los Mares Interamericanos (Caribe y Golfo de México), las costas de México y los territorios adyacentes. Este sistema ha sido desarrollado por el Hadley Centre de la Oficina Meteorológica del Reino Unido con el objetivo de facilitar una herramienta para los estudios y evaluaciones de cambio climático de alta resolución en los países que no cuentan con una alta capacidad de cómputo. El objetivo del presente trabajo es la estimación de las posibles variaciones en la frecuencia de paso de ciclones tropicales por diferentes zonas de la región de estudio en un clima futuro bajo las condiciones extremas propuestas por el escenario A1 del IPCC. En la sección 2 se describen las características principales del sistema utilizado, y en particular el modelo regional climático y las características de la configuración utilizada. En la sección 3 se exponen y se analizan los resultados de las simulaciones y por último, en la sección 4 se discuten las conclusiones y recomendaciones del trabajo.

Por otra parte, los resultados de simulaciones numéricas utilizando modelos globales y regionales con escenarios futuros que toman en cuenta el incremento de los gases de efecto invernadero en la atmósfera, que han ido ganando en precisión y confiabilidad, han aportado valiosa información en el tema. Para esto se ha utilizado diferentes métodos. Uno de ellos consiste en detectar y analizar los vórtices ciclónicos generados en las salidas de modelos globales, ya sea para tiempo presente o futuro, a partir de determinados umbrales fundamentados en características conocidas de los CT (Broccoli y Manabe, 1990; Bengtsson *et al.*, 1996; Sugi *et al.*, 2002; Yoshimura y Sugi, 2005; Mc Donald *et al.*, 2005). Este método ha adolecido de la limitación que impone la reducida resolución horizontal de estos modelos, excepto en el caso de la reciente simulación de Oouchi *et al.* (2006), que estudiaron los vórtices ciclónicos generados por las simulaciones climáticas de un modelo global con 20 km de resolución. En general, en la

última década, para alcanzar la alta resolución necesaria para la detección de los vórtices ciclónicos ha resultado más efectiva la aplicación de modelos de alta resolución anidados en la salida de un modelo global, ya sea el caso de modelos de CT que reproducen su estructura e interacciones (Knutson y Tuleya, 2004), como modelos regionales climáticos que toman sus condiciones de frontera de modelos globales (Walsh y Katzfey, 2000; Nguyen y Walsh, 2001; Walsh *et al.*, 2004). Recientemente, Walsh *et al.*, (2007) revisaron los diferentes criterios utilizados en la literatura para definir los vórtices ciclónicos y determinaron la relación óptima entre la resolución del modelo y el umbral de viento que define el vórtice. Un importante logro en este campo es la reciente aplicación de un modelo regional climático no hidrostático sin parametrización de cúmulos, con una resolución horizontal de 18 km y 45 niveles verticales a la simulación de la climatología reciente de los ciclones tropicales del Atlántico (Knutson *et al.*, 2007) el cual logra resultados muy alentadores.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

El sistema PRECIS, en su versión utilizada en este trabajo (Wilson *et al.*, 2003), consiste en el modelo regional climático HadRM3P, alimentado con las condiciones de frontera producidas por las salidas de la componente atmosférica actualizada del modelo acoplado global del Hadley Centre HadAMP3 (Gordon *et al.*, 2000), bajo las condiciones de emisión de CO<sub>2</sub> desarrolladas para el Informe Especial sobre Escenarios de Emisión del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC-SRES), de acuerdo a las cuales son calculadas las concentraciones futuras de dicho gas de efecto invernadero utilizadas en el modelo. La concentraciones de aerosoles de sulfato se calculan durante la corrida a partir de las emisiones de las sustancias precursoras de los mismos, utilizando el modelo del ciclo de azufre del PRECIS. El modelo regional también puede tomar sus condiciones de frontera de simulaciones del modelo global en tiempo presente o de datos cuasi-reales de reanálisis, para los períodos en que éstos están disponibles.

Las condiciones de frontera laterales, que se actualizan cada 6 horas, incluyen la presión, temperatura, humedad y las componentes horizontales del viento y las concentraciones de varias sustancias químicas asociadas al ciclo del azufre. Las condiciones de frontera de superficie se necesitan sobre el mar solamente, y consisten en series de valores de la TSM y la fracción de hielo en la superficie del mar. Estas últimas se actualizan cada 24 horas.

El modelo regional del PRECIS es un modelo hidrostático con 19 niveles verticales en coordenadas  $\sigma$ , que siguen la orografía del terreno, para los cuatro inferiores, y a alturas cada vez más cercanas a niveles de presión, que pasan a ser superficies isobáricas en los tres últimos niveles (Simmons y Burridge, 1981), con el mayor de ellos cerca de los 0.5 hPa. Las ecuaciones del modelo se resuelven en coordenadas esféricas rotadas de tal forma que el ecuador del sistema pasa por el dominio. Las variables de pronóstico son la presión superficial  $p^*$ , las componentes horizontales del viento  $u$  y  $v$ , una temperatura potencial conservativa ante cambios de fase  $\Theta_L$ , el contenido de agua total  $q_T$  (vapor, mas agua líquida mas hielo) y las razones de mezcla de cinco sustancias químicas asociadas al ciclo del azufre: dióxido de azufre gaseoso (SO<sub>2</sub>), dimetilsulfuro (DMS) y tres formas de aerosol de sulfato (SO<sub>4</sub>). Las componentes del viento se calculan en puntos desplazados de los puntos de rejilla de las variables escalares, según la rejilla B de Arakawa (Arakawa y Lamb, 1977).

El modelo incluye una parametrización de nubes estratiformes y la precipitación asociada a ellas, según la cual el contenido de agua de nube se calcula a partir de la sobresaturación del aire respecto al contenido de agua total para cada punto de rejilla, utilizándose una función predeterminada para la distribución de agua dentro de la cuadrícula, a través del cálculo de la humedad relativa crítica  $HR_{cr}$  por encima de la cual el exceso de vapor se convierte en agua o hielo de nube (Smith, 1990). Para temperaturas superiores a 0°C, se considera que toda el agua de nube es líquida, y para temperaturas inferiores se divide el agua entre líquida y sólida proporcionalmente al déficit de temperatura hasta alcanzar los -9°C, o inferior, en que toda el agua se considera hielo. La precipitación de nubes estratiformes se produce cuando el contenido de agua alcanza determinados valores umbrales, que difieren sobre tierra y sobre el mar siendo mayor el primero, considerando de esta forma las diferencias microestructurales entre las nubes continentales y marítimas. Se consideran los efectos de disminución de la lluvia estratiforme por evaporación durante la caída de las gotas y también el incremento de la eficiencia de precipitación cuando las nubes son sembradas con precipitación sólida procedente de capas superiores. También se incluye un coeficiente de eficiencia de precipitación, que es mayor para las nubes con mayor contenido de hielo. Para cada cuadrícula con nubes estratiformes se le asigna lluvia al menos al 75% de la correspondiente superficie, independientemente del valor de la fracción del área de la cuadrícula cubierta por nubes.

Las nubes convectivas y su precipitación se parametrizan a partir del esquema de flujo de masa desarrollado por Gregory y Rowntree (1990), incluyendo las corrientes descendentes en forma explícita y la influencia de la convección en el momentum (Gregory *et al.*, 1997). El flujo penetrante ascendente de la pluma convectiva depende de la estabilidad de las capas bajas de la atmósfera, y en su ascenso se toma en cuenta el mezclamiento con el aire

circundante. La precipitación convectiva se forma cuando la nube alcanza un umbral de 2 g/kg sobre tierra y de 0.4 g/kg sobre el mar, y la misma se asigna al 65% de la cuadrícula, independientemente de la fracción de área cubierta por nubes convectivas en la misma. El esquema de parametrización de la radiación incluye los ciclos de insolación estacionales y diurno, calculando los flujos de onda corta (6 bandas) y larga (8 bandas) en dependencia de la temperatura, la humedad, concentraciones de  $O_3$  y  $CO_2$  y otros cinco gases, así como los contenidos de agua líquida y sólida en las nubes. El solapamiento de los niveles con nubes estratiformes y la continuidad vertical de las nubes convectivas se considera en el esquema, así como la presencia de yunques en los casos de convección profunda. El radio efectivo de las gotas de nube se parametriza en función del contenido de agua líquida

La concentración de gotas de nube se estima en función de la concentración de aerosoles de sulfato, que actúan como núcleos de condensación de nube (NCN) y se utiliza, junto con el contenido de agua líquida para parametrizar el radio efectivo de las gotas, según el esquema de Martin *et al.* (1994). De esta forma, la concentración de aerosoles de sulfato afecta la radiación no sólo directamente, a través de los fenómenos de difusión y absorción de la luz solar incidente, sino también indirectamente, por su efecto en la microestructura de las nubes, que incide, a su vez en el albedo. A mayor cantidad de NCN, mayor concentración de gotas, menor radio efectivo y mayor albedo, lo que se calcula por el método propuesto por Jonas *et al.* (1994). Este fenómeno es conocido como efecto Twomey, o primer efecto indirecto de los aerosoles en la radiación. El segundo efecto, que consiste en la mayor estabilidad y tiempo de vida de las nubes con menor radio medio, no se considera en el modelo.

El mezclamiento en la capa fronteriza se logra empleando un esquema turbulento de primer orden (Smith, 1990). Las características del suelo y la vegetación se toman como datos sobre tierra pero, sobre el mar, la longitud de rugosidad se calcula a partir de la velocidad del viento local (Charnock, 1955). Se considera el efecto de las ondas de gravedad internas generadas por la orografía en el flujo.

El modelo de suelo empleado es el MOSES (Met Office Surface Exchange Scheme; Cox *et al.*, 1999), que usa los niveles de 0.1, 0.25, 0.65 y 2.0 metros desde la superficie, tanto para los flujos de calor como de humedad. En la base del modelo se considera cero el flujo de calor. La evaporación depende de la resistencia estomática a la temperatura, la tensión de vapor y la concentración de  $CO_2$ . Se considera que el follaje puede retener y evaporar agua, que no llega al suelo. El albedo es función del tipo de suelo y de la vegetación.

## **Experimentos numéricos**

Se analizaron los resultados de tres experimentos numéricos realizados anteriormente en el INSMET (<http://precis.insmet.cu/Precis-Caribe.htm>). El primero de ellos, de sensibilidad, utilizó como condiciones de frontera a los datos cuasi-observados obtenidos de los reanálisis (ERA-15) del Centro Europeo de Pronóstico del Tiempo de Plazo Medio (ECMWF), con el objetivo de simular la climatología de tiempo presente para determinar si el modelo era capaz de mantener y mejorar la representación del clima real de la región respecto a los campos de menor resolución (2.5 grados) de los reanálisis. Esta simulación se realizó desde 1979 hasta 1993. El segundo experimento, de control, utilizó como condiciones de frontera las proporcionadas por la corrida del HadCM3, desde 1961 hasta 1990, y el tercero, de predicción climática, utilizando la corrida del modelo global desde 2071 hasta 2100, bajo las condiciones del escenario A2 del IPCC-SRES. El modelo se corrió con una resolución espacial de 0.44 grados (50 km.) Las salidas se salvaron en forma de medias diarias. Debido al tipo de coordenadas rotadas utilizadas por el modelo, antes de procesar los resultados fue necesario realizar una transformación de coordenadas a la proyección Mercator y transformar los datos del formato propio del Hadley Center al formato estándar "grib", para su procesamiento gráfico con el software "GrADS", escribiéndolas también posteriormente algunas de las variables de salida en formato ASCII para su lectura por el programa de reconocimiento de trayectorias basadas datos de presión superficial y velocidad de viento.

El dominio utilizado comprende desde los 5 hasta los 33 grados de latitud norte y desde los 60 hasta los 120 grados de longitud oeste, comprendiendo los Mares Interamericanos (Mar Caribe y Golfo de México) y los territorios aledaños, así como la zona del Pacífico Oriental cercana a México y Centroamérica (Fig. 1).

En el presente trabajo se utilizan los resultados del experimento de sensibilidad para evaluar en forma preliminar la ejecución del modelo, y los de los experimentos de tiempo presente y de predicción climática, para analizar la variación en las condiciones de formación de los ciclones tropicales y el comportamiento de la frecuencia de ocurrencia de los vórtices ciclónicos en el clima futuro.



**Fig. 1. Dominio de integración del sistema PRECIS para la realización de los experimentos**

### **Metodología de detección de los vórtices ciclónicos**

El mecanismo de detección automático de estructuras vorticiales semejantes a ciclones tropicales (EVSCT) está diseñado para trabajar con campos medios diarios, por lo que se apoya en las características de la estructura de un ciclón que dejan huella en los mismos. El mismo se limitó al nivel de superficie, ya las variables de presión y viento, que son las fundamentales en la definición de un ciclón tropical. Los criterios y umbrales utilizados se derivaron de las observaciones de Weatherford y Grey (1988), adaptadas a las características de las salidas del modelo en forma de medias diarias, a partir de un análisis detallado de las imágenes animadas de los campos.

La primera etapa de la búsqueda consiste en registrar cada matriz de presión, comparando el valor de cada nodo con el valor medio de los nodos que forman un círculo a su alrededor. El radio de este círculo se escogió de 700 km y se usó un umbral de diferencia de presión de 5.5 hPa. Las matrices del módulo de la velocidad del viento, aun tratándose de valores medios diarios, muestran un patrón bastante definido para cada ciclón, con un aumento gradual desde la periferia hacia el centro, con la peculiaridad de que en una zona limitada alrededor del punto con presión mínima hay varios puntos con valores muy bajos, debidos a la huella del ojo, y muy próximo a éstos, casi siempre hacia el nordeste, se encuentran los valores máximos, de manera que la presencia de una diferencia grande entre los valores máximos y mínimos del viento en una región pequeña alrededor del punto de presión mínima se aplica como criterio confirmatorio, rechazando los casos en que esta diferencia es menor de 40 km/h

Una vez que se ha construido una lista con todas las EVSCT identificadas, éstas se ordenan en trayectorias, buscando en cada plazo (día en este caso) la EVSCT más próxima en el plazo anterior. En el caso de que ésta esté a más de 800 km, no se asignan más plazos a la secuencia. De esta manera se va creando la lista de trayectorias que se imprime como salida.

El método utilizado para detectar la presencia de estructuras vorticiales que pudieran estar asociadas a ciclones tropicales en la salida del modelo regional se basó en la premisa de la simplicidad, basándose en el análisis de datos medios diarios. Esto tiene la ventaja de eliminar posibles fluctuaciones de los campos, características de salidas instantáneas del modelo, aunque adolece de la limitación de que los datos han sido suavizados al promediar.

El método puede resumirse en los siguientes pasos:

En la rejilla de  $0.44^\circ$  (50 km), se busca un punto de mínima presión superficial, que cumpla que la presión promedio de los puntos de rejilla vecinos contenidos en una circunferencia de  $6^\circ$  (700 km) centrada en el punto sea al menos 5.5 hPa mayor que la del punto.

La diferencia entre los valores máximo y mínimo de la velocidad del viento en un entorno de 3 puntos de rejilla de radio ( $1.3^\circ$  o 150 km) centrado en el punto de máxima presión debe ser de al menos 40 km/h (11 m/s).

El final de la trayectoria de un vórtice individual ocurre cuando la posición del vórtice más cercano detectado al día siguiente está a más de  $7^\circ$  (800km) de la del día anterior.

## **RESULTADOS**

### **Evaluación de la ejecución del modelo**

Los resultados de las simulaciones de los campos de temperatura media del aire en superficie y de precipitación obtenidos en el experimento de sensibilidad se compararon por trimestres con los datos de la climatología mensual

de temperatura del aire y precipitación sobre los continentes, de la “Climate Research Unit” (CRU), de la Universidad de East Anglia (New *et al.*, 2000). La resolución de estos datos es de 0.5°.

La Tabla 1 muestra los resultados de las temperaturas medias simuladas y observadas promediadas espacialmente para la zona continental e insular del dominio para los trimestres diciembre-febrero, marzo-mayo, junio-agosto y septiembre-noviembre.

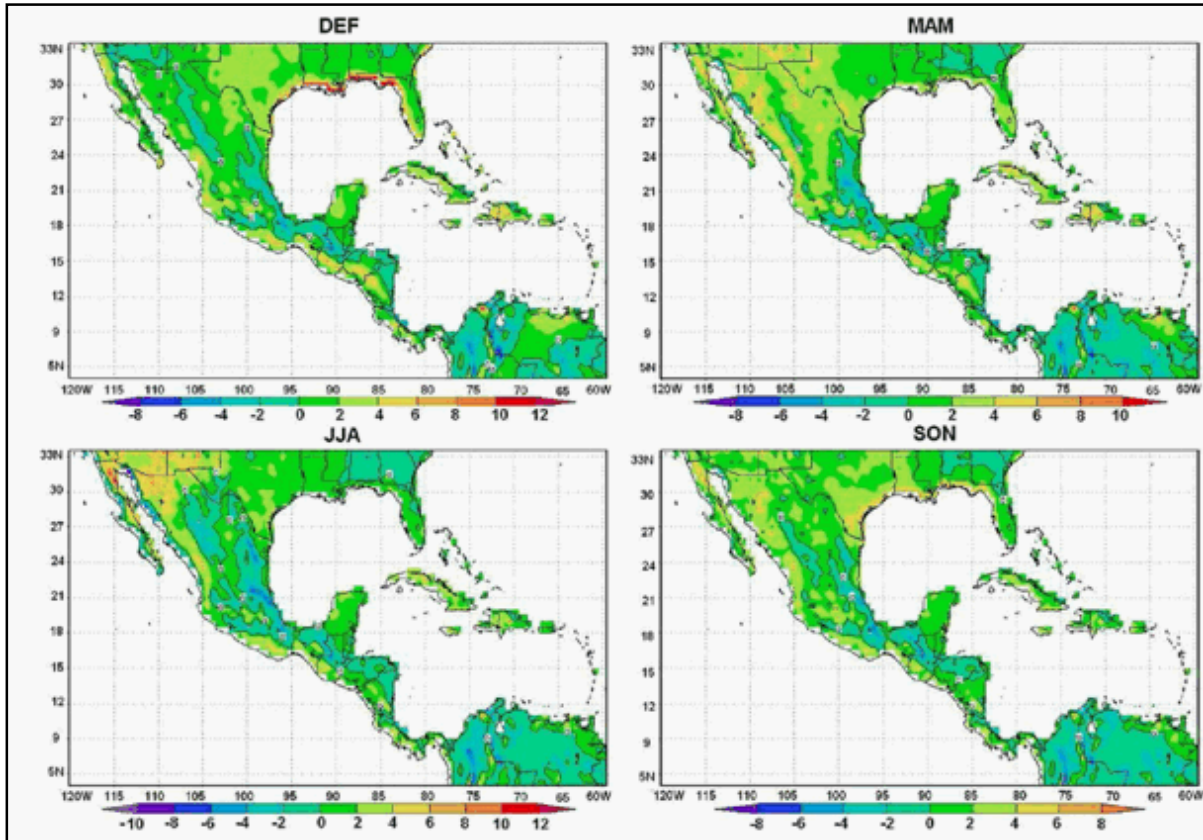
**Tabla 1. Promedios espaciales por trimestres de la temperatura media del aire y la precipitación simuladas por el PRECIS con las condiciones de frontera de ERA-15 y según los datos del CRU y otros parámetros estadísticos indicadores de la variabilidad y el error de la simulación.**

Parámetro estadístico	Trimestre			
	DEF	MAM	JJA	SON
Promedio CRU	18.03	22.49	25.64	22.47
Promedio PRECIS	18.85	23.36	26.01	22.80
Desv. Estándar PRECIS	5.56	3.54	2.77	3.22
Dif. PRECIS-CRU	0.63	0.81	0.31	0.18
Error medio cuadrático PRECIS-CRU	2.11	2.07	1.96	1.81
Coefficiente de Correlación espacial PRECIS-CRU	0.94	0.86	0.81	0.87
<b>Precipitación (mm/día)</b>				
Promedio CRU	1.77	2.69	5.64	4.39
Promedio PRECIS	1.65	2.81	4.57	3.89
Desv. Estándar PRECIS	1.98	3.14	4.01	4.10
Dif. PRECIS-CRU	-0.12	0.14	-1.05	-0.52
E.M.C. PRECIS-CRU	1.33	1.61	2.70	2.37
CE. PRECIS-CRU	0.52	0.71	0.57	0.63

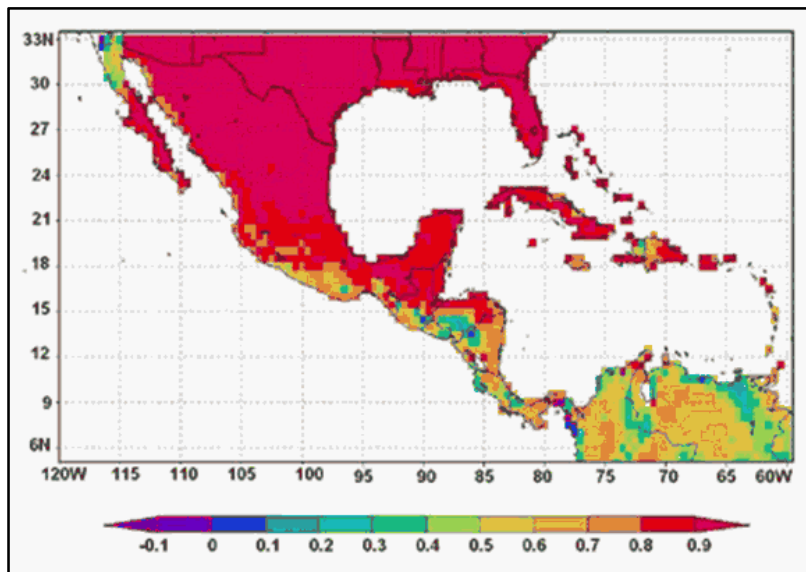
Puede observarse que, para el promedio espacial de temperatura del aire en todo el dominio, tanto el sesgo como el error estándar para los puntos de rejilla son muy pequeños para los tres trimestres, y el coeficiente de correlación espacial es muy alto. La ejecución del modelo no es tan buena respecto a la precipitación, ya que subestima la misma en tres de los períodos estacionales, y especialmente en el verano (JJA). También los coeficientes de correlación para la precipitación no son tan altos como para la temperatura, aunque están por encima del 50% para los cuatro períodos. Este comportamiento es de esperar, ya que la temperatura se pronostica directamente en el esquema numérico, mientras que la precipitación se obtiene de forma indirecta, mediante parametrizaciones.

Para investigar la capacidad del modelo de reproducir los patrones de la temperatura superficial del aire (a 2m de la superficie) y precipitación se obtuvieron los mapas del sesgo PRECIS-CRU por trimestre, para el dominio de simulación, que se muestran en la Fig. 2. Se observa que, independientemente de la estación, el sesgo del modelo se mantiene entre -2 y 2°C para la mayor parte del dominio. Por otra parte, la Fig. 3 muestra que las correlaciones punto a punto entre los campos de temperatura simulado por el modelo y observado son mayores de 0.5 para casi todo el dominio y mayores que 0.8 para América del Norte, las islas del Caribe y la mayor parte de México, lo que refleja una buena reproducción de los patrones de dicha variable y de su variabilidad temporal.

La distribución espacial del sesgo de estimación de la precipitación estacional del modelo se muestra en la Fig. 4. El análisis del campo de correlaciones de la precipitación entre el modelo y las observaciones del CRU (Fig. 5) muestra coeficientes de correlación mayores que 0.5 para la mayor parte del dominio, incluso para las regiones que mostraban sesgo negativo en la Fig. 4, lo que indica que, al igual que para la temperatura del aire, el modelo reproduce aceptablemente las variaciones temporales y los patrones de precipitación



**Fig. 2.** Promedios estacionales de la diferencia entre temperatura media del aire en superficie (oC) estimada por el modelo con las condiciones de frontera de ERA-15 (1979-1993) y calculada según los datos observados del CRU, para el dominio de integración del modelo



**Fig. 3.** Campo de correlaciones punto a punto entre los resultados del modelo para la temperatura media del aire en superficie con las condiciones de frontera de ERA-15 (1979-1993) y las observaciones del CRU para el dominio

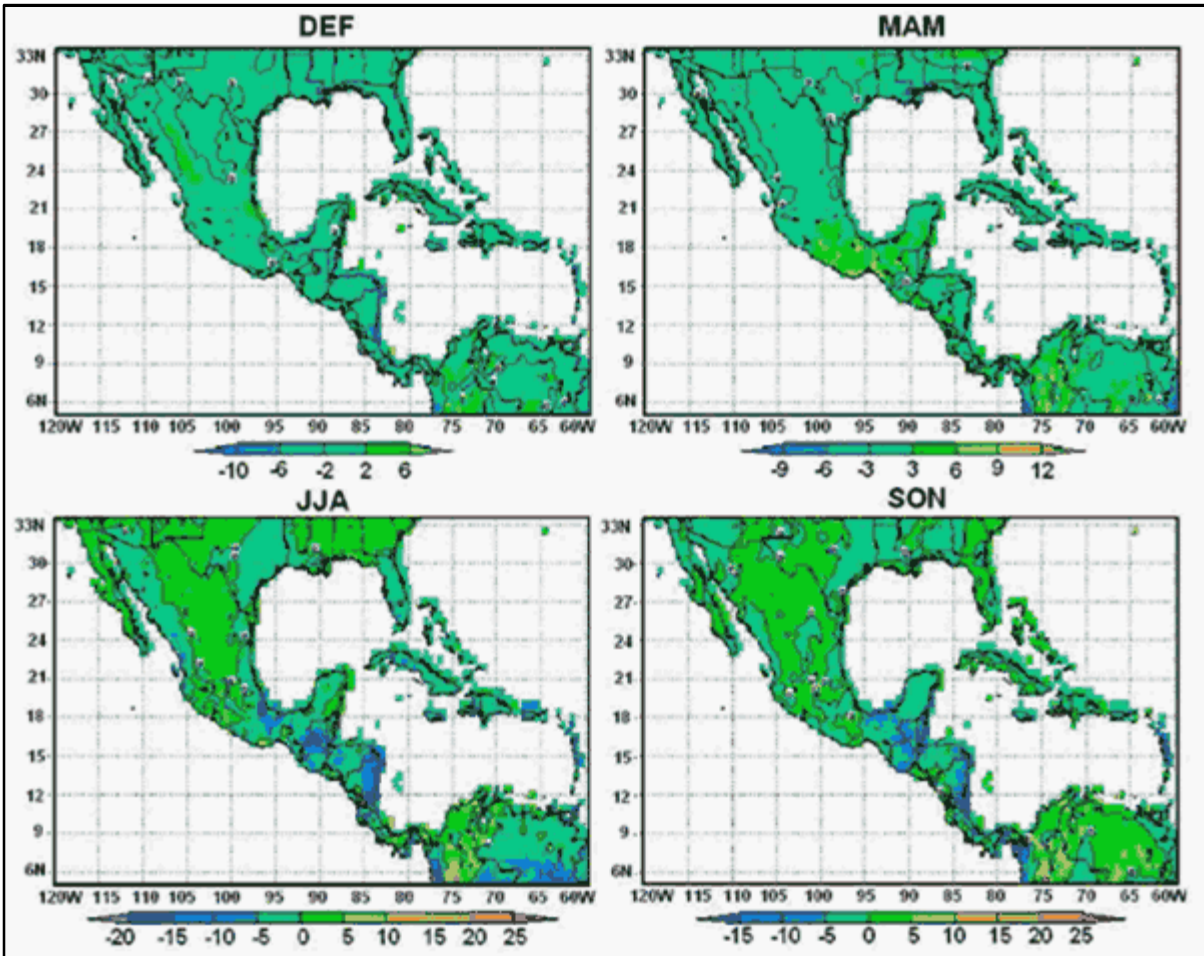
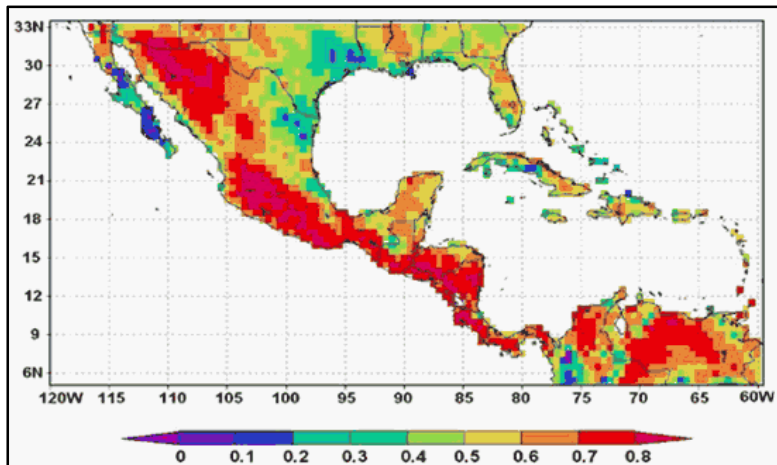


Fig. 4. Promedios estacionales de la diferencia entre precipitación media estimada por el modelo (mm/día) con las condiciones de frontera de ERA-15 (1979-1993) y calculada según los datos observados del CRU, para el dominio de integración del modelo

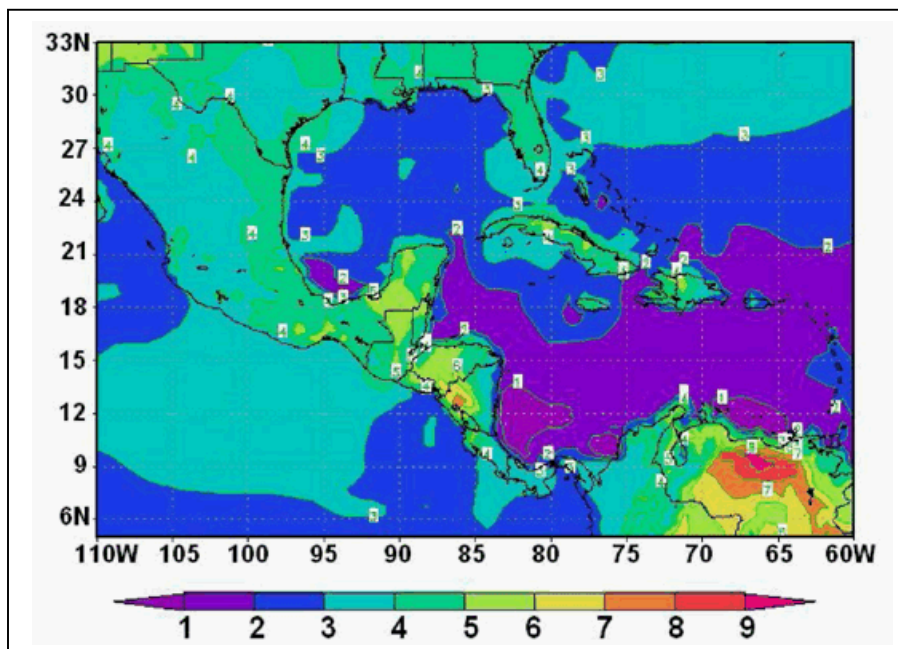


**Fig. 5. Campo de correlaciones punto a punto entre los resultados del modelo para la precipitación con las condiciones de frontera de ERA-15 (1979-1993) y las observaciones del CRU para el dominio**

### **Proyección del comportamiento de la temperatura de superficie para fines del siglo**

La Fig. 6 muestra la distribución espacial de la diferencia entre la temperatura de la superficie subyacente (suelo o mar) de octubre obtenida del experimento de control (1961-1990), en condiciones actuales de concentración de gases de efecto invernadero, y la proyección obtenida para fines de siglo (2071-2100) a partir del escenario SERS-A2 de incremento de gases de efecto invernadero. Se observan incrementos de más de 3°C sobre tierra, especialmente sobre México, Estados Unidos y las Antillas Mayores, y aún mayores sobre la América Central. Los mayores incrementos sobre el mar se observan cerca de la costa mexicana del Pacífico, Golfo de México, mares alrededor de Cuba y Océano Atlántico al norte del paralelo 21, mientras que para la mayor parte del Mar Caribe el incremento es menor de 2°C. Las distribuciones obtenidas para los otros meses del período ciclónico son muy similares.

Para comprobar la capacidad del modelo y el método utilizado de reproducir la frecuencia de ciclones tropicales observados, se obtuvo la distribución espacial de la frecuencia de paso de huracanes por los distintos puntos del dominio a través de un gráfico de isolíneas de densidad de trayectorias ciclónicas. La densidad de trayectorias se calculó contando las veces que el centro de la trayectoria de un vórtice ciclónico pasó por el interior de una cada cuadrícula de 2.5 x 2.5 grados durante los 30 años de simulación. Se obtuvo inicialmente la distribución de densidad de trayectorias de EVSCT a partir del experimento de control (Fig. 7), la que se comparó con la distribución de densidad de trayectorias reales de ciclones tropicales obtenida a partir de la base de datos de la NOAA-TPC-NHC (National Oceanic and Atmospheric Administration, Tropical Prediction Center/National Hurricane Center, Historical North Atlantic and East-Central North Pacific Tropical Cyclone Tracks, 1851-2005; <http://maps.csc.noaa.gov/hurricanes/>) (Fig.8).



**Fig. 6. Diferencia entre la temperatura media de la superficie subyacente del mes de octubre promediada para el período 1961-1990 obtenida del experimento de control y la proyección obtenida para el período 2071-2100 de las simulaciones del PRECIS en presencia de incremento de la concentración de gases de efecto invernadero, según el escenario SRES-A2**

La comparación entre las Fig. 7 y 8 muestra que el modelo y el método de detección son capaces de predecir el patrón de densidad de trayectorias de ciclones tropicales en el dominio de simulación. Llama la atención la coincidencia de las principales zonas de ocurrencia de ciclones tropicales, como, en primer lugar, los mares al oeste de México y California y, en segundo lugar, la zona formada por el norte del Golfo de México, la costa sudeste de los

Estados Unidos, las Bahamas y la mitad occidental de Cuba. Por otra parte, el modelo subestima en algo menos que un vórtice por año la densidad de trayectorias en la zona del máximo de 60 situada al sur de la península de Baja California, y estima bien los de el resto del dominio.

La Fig. 9 muestra la densidad de trayectorias obtenidas de las predicciones del PRECIS para el escenario SRES-A2, cuyo análisis muestra el mantenimiento de los patrones de isóneas, así como un aumento de la densidad para el sur de Baja California, acompañado de la desaparición de la zona de máximo secundario detectada en los datos del NHC y también simulada en el experimento de tiempo presente en la zona occidental de Cuba y el Sur de La Florida

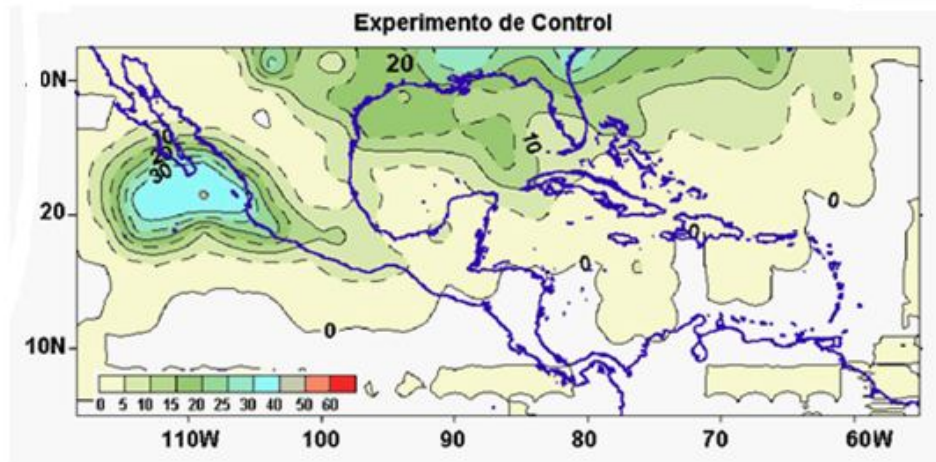


Fig. 7. Isóneas de densidad de trayectorias de EVSCT obtenidas de la salida del experimento de control realizado para el período 1961-1990.

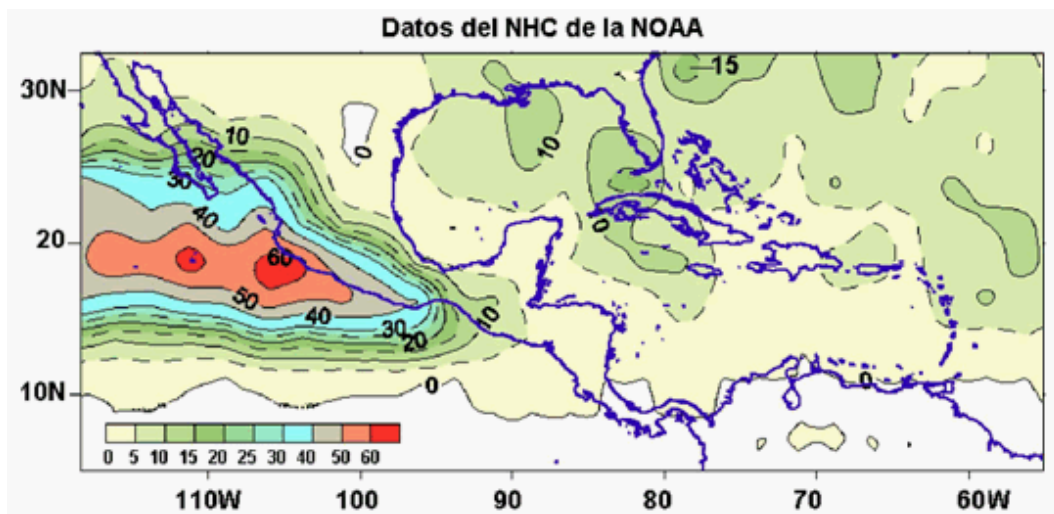
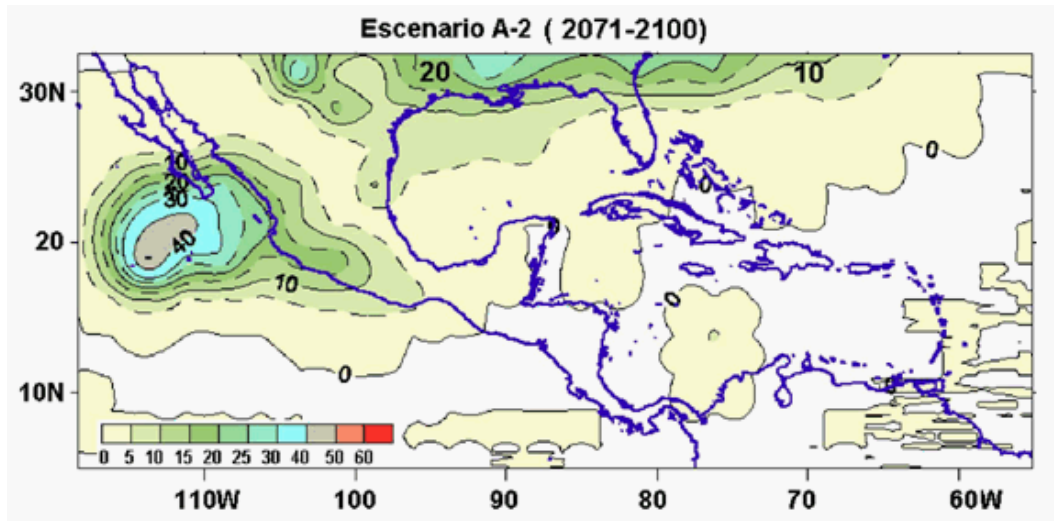
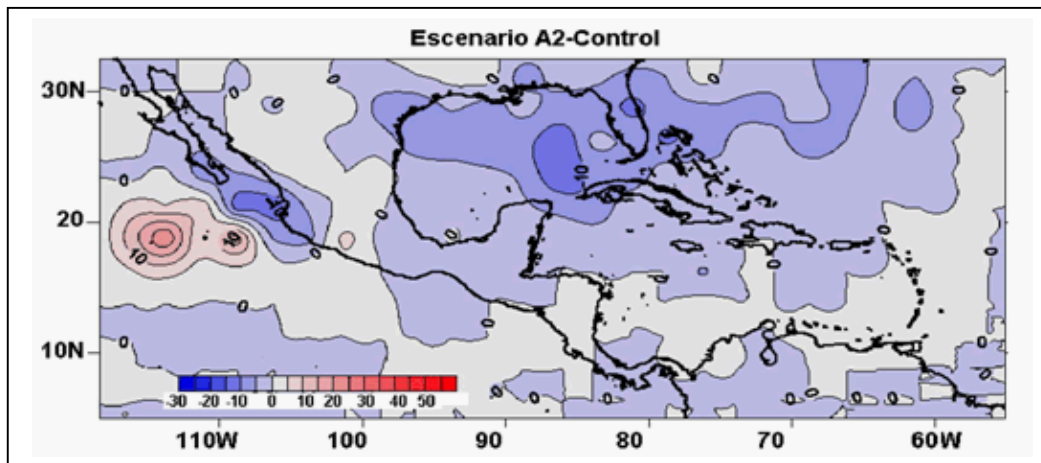


Fig. 8. Isóneas de densidad de trayectorias obtenidas de los datos de trayectorias de ciclones tropicales del "National Hurricane Center" de la NOAA., para el período 1961-1990



**Fig. 9.** Isolíneas de densidad de trayectorias de EVSCT obtenidas de la salida del experimento de predicción realizado para el período 2071-2100 con las condiciones de concentración de CO<sub>2</sub> del escenario SRES-A2 y las condiciones de frontera de la salida del HadCM3 correspondiente a dicho escenario

Para ganar en claridad en el análisis de la proyección futura, se construyó un mapa con la diferencia entre la distribución de la densidad de trayectorias obtenidas para la simulación de control en tiempo presente (1961-1990) y para el experimento de predicción con el escenario A2, el cual se muestra en la Fig. 10. De la misma puede apreciarse el incremento de la densidad de trayectorias en la zona al sur de la Península de California, aunque también se aprecia un decremento en la zona cercana a la costa mexicana. Por otra parte, en todo el Caribe se observa poca variación, mientras que para la zona del Golfo de México, Florida, occidente de Cuba y Las Bahamas se observa un ligero decremento, que es consistente con lo encontrado recientemente por otros autores (Emanuel, 2008; Bender *et al.*, 2010; Knutson *et al.*, 2010). Este comportamiento puede estar relacionado con la distribución del incremento de temperatura media de la superficie subyacente proyectado (Fig. 6), ya que en la costa del Pacífico de México se observa un incremento de 2 a 4 grados, mientras que en el Caribe es menor que 2 grados.



**Fig. 10.** Isolíneas de la diferencia entre la densidad de trayectorias de EVSCT obtenidas de la salida del experimento de predicción realizado con el escenario SRES-A2 (2071-2100) y la obtenida en el experimento de control (1961-1990) con las condiciones de frontera de la salida del HadCM3.

## CONCLUSIONES

Se aplicó el sistema de modelación regional climática PRECIS, con 50 km de resolución horizontal al dominio comprendido desde los 5 hasta los 33 grados de latitud norte y desde los 60 hasta los 120 grados de longitud oeste, comprendiendo los Mares Interamericanos (Mar Caribe y Golfo de México) y los territorios aledaños, así como la zona del Pacífico Oriental cercana a México y Centroamérica. Los experimentos de sensibilidad, alimentados con datos de reanálisis y de control, con las condiciones de frontera generadas por el modelo global HadCM3 mostraron la capacidad del sistema de reproducir el comportamiento climatológico de las principales variables meteorológicas en condiciones de tiempo presente. El experimento de predicción climatológica realizado con la salida del HadCM3 en las condiciones del escenario SRES-A2 mostró un incremento de la temperatura de la superficie del mar, que varió entre 1 y 2 grados para la mayor parte del Mar Caribe y entre 2 y 4 grados para el resto de los mares del dominio.

Se desarrolló un algoritmo de detección de vórtices ciclónicos en el análisis del nivel de superficie de los campos de salida del PRECIS, consistentes en medias diarias de las principales variables meteorológicas bajo restricciones de gradiente espacial de viento y presión. La aplicación de dicho algoritmo en condiciones de tiempo real produjo valores y patrones de distribución realistas de los vórtices ciclónicos en tiempo presente, comparados con los datos de trayectorias de tormentas tropicales del “National Hurricane Center”.

Este resultado fundamenta la aplicación de dicho algoritmo de detección a las salidas del experimento de predicción con el escenario A2. Como resultado, se obtuvo que para el período 2071-2100 se proyecta la continuidad aproximada del patrón actual de distribución espacial de las isolíneas de densidad de trayectorias, intensificándose el máximo al sur de Baja California y desapareciendo el máximo de la zona occidental de Cuba y La Florida. El general, se proyecta un aumento de la frecuencia de paso de vórtices ciclónicos al oeste de la costa occidental de México, aunque más alejados de la costa que en la actualidad y una disminución de la ocurrencia en la mayor parte del Caribe, y especialmente en el Golfo de México, occidente de Cuba, costa Este de Estados Unidos y Las Bahamas.

## REFERENCIAS

- Arakawa, A. y V. R. Lamb (1977):** Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model. In: *Methods in Computational Physics*, 17 [J. Chang (ed.)]. Academic Press, New York, 173-265.
- Bell, G. D. y M. Chelliah (2006):** Leading tropical modes associated with interannual and multidecadal fluctuations in North Atlantic hurricane activity. *J. Clim.*, 19, 590-612.
- Bender M.A, T.R. Knutson, R.E. Tuleya, J.J. Sirutis, G.A. Vecchi, S.T. Garner y I.M. Held (2010):** Modeled impact of anthropogenic warming on the frequency of intense atlantic hurricanes. *Science*, 327: 454-458.
- Bengtsson, L., M. Botzet y M. Esch (1996):** Will greenhouse gas-induced warming over the next 50 years lead to higher frequency and greater intensity of hurricanes?. *Tellus*, 48A, 57-73.
- Broccoli A.K. y S. Manabe (1990):** Can existing climate models be used to study anthropogenic changes in tropical cyclone climate? *Geophys. Res. Lett.*, 17, 1917-1920.
- Charnock, H. (1955):** Wind stress on a water surface. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 81, 639-640.
- Cox, P. M., R. A. Betts, C. B. Bunton, R. L. H. Essery, P. R. Rowntree y J. Smith (1999):** The impact of new land surface physics on the GCM simulation of climate and climate sensitivity. *Clim. Dyn.*, 15:183-203.
- Emanuel, K. A. (1988):** The maximum intensity of hurricanes. *J. Atmos. Sci.*, 45, 1143-1155.
- (1995): Sensitivity of tropical cyclones to surface exchange coefficients and a revised steady-state model incorporating eye dynamics. *J. Atmos. Sci.*, 52, 3969-3976.
- (2003): Tropical cyclones. *Annu Rev. Earth Planet. Sci.* 31, 75-104.
- (2005): Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, 436, 686-688.
- (2008): The hurricane-climate connection. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 89, 5, ES10-ES-20.
- , **R. Sundararajan y J. Williams (2008):** Hurricanes and global warming. Results from downscaling IPCC AR4 simulations. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 89, 3, 347-367.
- Gordon C., C. Cooper, C. A. Senior, H. T. Banks, J. M. Gregory, T. C. Johns, J. F. B. Mitchell y R. A. Wood (2000):** The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Climate Dyn.*, 16, 147-168.
- Gregory, D. y P. R. Rowntree (1990):** A mass-flux convection scheme with representation of cloud ensemble characteristics and stability dependent closure. *Mon. Wea. Rev.*, 118:1483-1506.

- , **R. Kershaw y P. M. Inness (1997)**: Parametrization of momentum transport by convection II: Tests in single column and general circulation models. *Q. J. R. Meteorol. Soc* 123:1153-1183.
- Holland, G. J. (1997)**: The maximum potential intensity of tropical cyclones. *J. Atmos. Sci*, 54, 2919-2541.
- y **P. J. Webster (2007)**: Heightened tropical cyclone activity in the North Atlantic: natural variability or climate trend?. *Phil. Trans. R. Soc. A*. doi:10.1098/rsta.2007.2083. Published online.
- Hoyos C. D., P. A. Agudelo, P. J. Webster y J. A. Curry (2006)**: Science, v. 312. De-convolution of the factors contributing to the increase in global hurricane intensity. *Science*, 312, 94-97.
- Jones, A., D. L. Roberts y A. Slingo (1994)**: A climate model study of indirect radiative forcing by anthropogenic sulphate aerosols. *Nature* 370:450-453.
- Knutson, T. R. y Tuleya, R. E. (2004)**: Impact of CO<sub>2</sub>-induced warming on simulated hurricane intensity and precipitation: sensitivity to the choice of climate model and convective parameterization. *J. Clim.* 17, 3477-3495.
- , **J. J. Sirutis, S. T. R. Garner, I. M. Held y R. E. Tuleya (2007)**: Simulation of the recent multi-decadal increase of Atlantic hurricane activity using an 18-km grid regional model.. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 88, 10: 1549-1565.
- , **J. L. McBride, J. Chan, K. Emanuel, G. Holland, C. Landsea, I. Held, J. P. Kossin, A. K. Srivastava y M. Sugi (2010)**: Tropical cyclones and climate change. *Nat. Geos.* 3:157-163.
- Landsea, C. W. (2007)**: Counting Atlantic tropical cyclones back to 1900. *Eos*, 88, 18: 197-202.
- , **B.A. Harper, K. Horau and J.A. Knaff (2006)**: Can we detect trends in extreme tropical cyclones?. *Sci. Perspect.* 313, 452-454.
- , **R. A. Pielke Jr and A. M. Mestas-Núñez (1999)**: Atlantic basin hurricanes: indices of climate change. 42, 89-129.
- Mann M. E., K. A. Emanuel, G. J. Holland y P. J. Webster (2007)**: Atlantic Tropical cyclones revisited. *Eos*, 88, 36: 349-350.
- Martin, G. M., D. W. Johnson y A. Spice (1994)**: The measurement and parametrisation of effective radius of droplets in warm stratocumulus clouds. *J. Atmos. Sci.* 51:1823-1842.
- McDonald, R. E., D. G. Bleaken, D. R. Cresswell, V. D. Pope y C. A. Senior (2005)**: Tropical storms: Representation and diagnosis in climate models and the impact of climate change. *Climate Dyn.*, 25, 19-36
- New, M., M. Hulme y P. Jones (2000)** Representing twentieth-century space-time climate variability: Part II: Development of 1901-1996 monthly grids of terrestrial surface climate. *J Climate*, 13: 2217-2238.
- Nguyen K. C. y K. J. E. Walsh (2001)**: Interannual, decadal and transient greenhouse simulation of tropical cyclone-like vortices in a regional climate model of the South Pacific. *J. Climate*, 14, 3043-3054.
- Oouchi, K.J., J. Yoshimura, H. Yoshimura, R. Mizuta y A. Noda (2006)**: Tropical cyclone climatology in a global-warming climate as simulated in a 20 km-mesh global atmospheric model: Frequency and intensity analyses. *J. Meteor. Soc. Japan*, 84, 259-276.
- Pielke R. A., C. W. Landsea, M. Mayfield, J. Lever y R. Pasch (2005)**: Hurricanes and global warming. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* , Nov., 1571-1575.
- Simmons, A. J. y D. M. Burridge (1981)**: An energy and angular-momentum conserving vertical finite difference scheme and hybrid vertical coordinates. *Mon. Wea. Rev.* 109:758-766.
- Smith, R. N. B., 1990**: A scheme for predicting layer clouds and their water content in a general circulation model. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 116:435-460.
- Sugi, M., A. Noda y N. Sato (2002)**: Influence of the global warming on tropical cyclone climatology: An experiment with the JMA global model. *J. Meteor. Soc. Japan*, 80, 249-272.
- Walsh, K. J. y J. J. Katzfey (2000)**: The impact of climate change on the poleward movement of cyclone-like vortices in a regional climate model. *J. Climate*, 13, 1116-1132.
- , **K. C. Nguyen y J. L. McGregor (2004)**: Fine resolution regional climate model simulations of the impact of climate change on tropical cyclones near Australia. *Climate Dyn.*, 22, 47-56.
- , **M. Fiorino, C. W. Landsea y K. L. McInnes (2007)**: Objectively determined resolution-dependent threshold criteria for the detection of tropical cyclones in climate models and reanalysis. *J. Climate*, 20, 2307-2314.
- Weatherford, C. L. y W. M. Grey (1988)**: Typhoon structure as revealed by aircraft reconnaissance. Part I: Data analysis and climatology. *Mon. Wea. Rev.*, 116, 1032-1043.
- Webster, P. J., G. J. Holland, J. A. Curry y H. R. Chang (2005)**: Changes in tropical cyclone number, duration and intensity in a warming environment. *Science*, v. 309, 5742: 1844-1846
- Wilson S., D. Hassell, D. Hein, R. Jones y R. Taylor (2003)**: Installing and using the Hadley Centre regional climate modelling system – PRECIS. Version 1.0. Hadley Centre for Climate Prediction and Research.

**Yoshimuri, J. y M. Sugi (2005):** Tropical cyclone climatology in a high resolution AGCM. Impacts of SST warming and CO2 increase. SOLA, 1, 133-136.