

Escenarios climáticos para temporadas con alto y bajo número de huracanes en el Atlántico

Eric J. Alfaro

Escuela de Física, Centro de Investigaciones Geofísicas y Centro de Investigaciones en Ciencias del Mar y Limnología, Universidad de Costa Rica. 2060-Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San José, Costa Rica. (ejalfaro@cariari.ucr.ac.cr)

(Recibido: 8-May-2007. Publicado: 1-Jun-2007)

Resumen

Se estudió la relación entre la variación de la actividad anual de los ciclones tropicales en el Atlántico y las variaciones decadales e interanuales de la Temperatura Superficial del Mar (TSM). Utilizando el análisis de tabla de contingencia se asignaron las probabilidades condicionales para los escenarios bajo, dentro y arriba de lo normal en la actividad anual de los ciclones tropicales dado un escenario bajo, dentro y arriba de lo normal en distintos índices de TSM para el periodo 1944-2004 (61 años). La actividad anual de los ciclones se estudió en función de la comparación normalizada de la TSM en el Atlántico y el Pacífico tropical. Se observó que años con pocos huracanes estaban acompañados de condiciones más frías (cálidas) que el promedio en el Atlántico Tropical Norte (Pacífico Ecuatorial del Este), una mayor cortante vertical del viento en el Atlántico Tropical Norte pero menor en el Pacífico Ecuatorial del Este cerca de Centroamérica y una presión media a nivel del mar mayor (menor) en el Atlántico Tropical Norte (Pacífico Ecuatorial del Este). Años con una alta actividad de huracanes mostraron, en términos generales, patrones opuestos en el campo de las anomalías a los descritos anteriormente para las regiones estudiadas.

Palabras Clave: Variabilidad Climática, Huracanes, Centroamérica, Atlántico Tropical, Desastres Naturales.

Abstract

Variability in the annual number of Tropical Cyclones for the Atlantic was studied as a function of the interannual and decadal variability of Sea Surface Temperature (SST). Given a scenario below normal, neutral and above normal in some selected SST indices for 1944-2004 (61 years), contingency table analysis was used to calculate the conditional probabilities for scenarios below normal, neutral and above normal for different annual time series of tropical cyclones activity in the Atlantic basin. This annual activity was conditioned on the difference between the normalized SST of the tropical North Atlantic and the Equatorial Eastern Pacific. Lower than average activity years were observed with cooler (warmer) than average temperatures in the Tropical North Atlantic (Eastern Equatorial Pacific), greater wind shear over the Tropical North Atlantic but smaller over the Eastern Tropical Pacific, near Central America; and higher (lower) sea level pressure in the Tropical North Atlantic (Eastern Equatorial Pacific). Higher than average activity years were observed in general terms with opposite anomaly patterns in the regions described previously.

Key Words: Climate Variability, Tropical Cyclones, Central America, Tropical Atlantic, Natural Disasters.

1. Introducción

En el informe de febrero del 2007, realizado por el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático, o IPCC por sus siglas en inglés, se planteó el calentamiento global del sistema climático como inequívoco, con una tendencia lineal en los últimos 50 años de $+0,13^{\circ}\text{C}$ por década, tanto en la temperatura superficial del aire como en la del mar (Alley *et al.*, 2007). Correlacionado con un incremento en la temperatura superficial del mar (TSM), se ha notado bajo este escenario un incremento en la actividad de los ciclones tropicales intensos en el Atlántico Norte a partir de 1970 (Hoyos *et al.*, 2006). Sin embargo, la evidencia de que esta tendencia sea un producto

del incremento de los gases de efecto invernadero es todavía objeto de debate en la literatura científica (Pielke *et al.*, 2005; Gray, 2006). Al estudiar los resultados de distintos modelos de circulación general, el reporte del IPCC descrito anteriormente, encontró que es muy probable que los ciclones tropicales sean más intensos en las próximas décadas debido a la tendencia hacia el calentamiento de la TSM en las regiones tropicales. Dentro de los impactos más probables de este aumento en la intensidad de los ciclones tropicales se pueden citar daños a cosechas, caída de árboles, daños a los arrecifes de coral y problemas con el abastecimiento de agua potable, entre otros, además del incremento en el riesgo de enfermedades, daño a infraestructura, muertes y heridos, así como de desordenes por estrés post-traumático (Adger *et al.*, 2007). El escenario anterior podría empeorar debido a que también se proyecta un incremento en el nivel del mar (Adger *et al.*, 2007; Alley *et al.*, 2007).

Debido a lo anterior, se hace necesario comprender mejor cuales serían los escenarios climáticos que favorecen una mayor o menor actividad anual de huracanes en una cuenca oceánica determinada (Kerr, 2006; Liu, 2007), donde dos factores muy importantes que favorecen la formación de ciclones tropicales son las condiciones de mínima cortante vertical del viento horizontal entre la baja y la alta troposfera y que la temperatura del mar esté por encima de los 26°C para una capa de 60 m de profundidad (Gray, 1978; Lizano y Fernández, 1996; Hobgood, 2005).

El objetivo de este trabajo consistió en estudiar la relación entre la variación de la actividad anual de los ciclones tropicales en la cuenca del Atlántico debido a variaciones decadales e interanuales de la TSM en los océanos Atlántico y Pacífico Tropical. Además, se contempló estudiar el comportamiento de algunas variables troposféricas alrededor de los mares Intra-Americanos (Mar Caribe y Golfo de México) durante años con una baja o alta actividad de ciclones tropicales en la cuenca del Atlántico. Lo anterior cobra especial importancia al ser Centroamérica y el Caribe una región muy vulnerable a los impactos causados por el paso de los ciclones tropicales, en donde por ejemplo el paso de un solo ciclón tropical como el huracán Mitch, produjo más de 10000 muertos y daños por alrededor de 8,5 mil millones de dólares (Pielke *et al.*, 2003). Cabe destacar que los impactos provocados por estos ciclones pueden ser causados en forma directa, al tocar tierra el ciclón tropical, o en forma indirecta, al inducir una circulación atmosférica que favorezca la ocurrencia de un evento extremo de precipitación. Costa Rica por ejemplo, es prácticamente afectada en forma indirecta todos los años por el paso y formación de ciclones tropicales en el Mar Caribe (Alvarado y Alfaro, 2003) y sólo ha sido impactada en forma directa por una tormenta tropical en 1887 (Lizano y Fernández, 1996; Díaz, 2005), sin que necesariamente ésta haya provocado grandes impactos tanto físicos como económicos en el país.

2. Datos y metodología

En este trabajo, los índices de TSM usados fueron el Niño 3 y la Oscilación Multidecadal del Atlántico (OMA), ambos obtenidos de la Agencia Nacional para la Atmósfera y el Océano (NOAA por sus siglas en inglés). Diversos estudios, como los realizados por Gray (1984), Goldenberg *et al.* (2001) y Molinari y Mestas-Núñez (2003) han mostrado que la variabilidad observada en estos índices de TSM está relacionada con la variabilidad observada en la actividad anual de ciclones tropicales en la cuenca del Atlántico. Las series de tiempo para la actividad anual de ciclones tropicales se calcularon utilizando la base de datos de huracanes HURDAT del Laboratorio de Oceanografía y Meteorología del Atlántico, de la NOAA en Miami, EEUU (Landsea *et al.*, 2004).

Las series de ciclones tropicales calculadas, basadas en la división de categorías de ciclones tropicales llamada Saffir-Simpson (Lizano y Fernández, 1996; Hobgood, 2005), fueron: Huracanes Mayores (> categoría 2, vientos > 177 km/h), Huracanes Menores (categorías 1 y 2, vientos > 118 y < 176 km/h), Tormentas Tropicales (vientos > 62 y < 117 km/h), Ciclones Menores (Huracanes Menores y Tormentas Tropicales), Total de Huracanes (Huracanes Menores y Mayores) y Total de Ciclones Tropicales (Total de Huracanes y Tormentas Tropicales). La categoría asignada a cada ciclón tropical correspondió a la máxima que obtuvo durante su desarrollo. Los años utilizados en el análisis comprendieron el periodo 1944-2004 (61 años). Se escogió este periodo por la confiabilidad en la asignación de categorías y trayectorias de los ciclones tropicales (Neumann *et al.*, 1993), ya que fue alrededor de este año cuando se iniciaron los vuelos militares de reconocimiento para la recolección de datos *in situ* en los ciclones. En la fig. 1 se presentan las series de tiempo para la actividad anual de las Tormentas Tropicales, los Huracanes Menores y Mayores.

Posteriormente se utilizó un análisis de tabla de contingencia (Alfaro *et al.*, 2003) y se asignaron las probabilidades condicionales para los escenarios bajo (BN), neutral (N) y arriba de lo normal (AN) en las actividades anuales de los ciclones tropicales dado un escenario bajo (BN), neutral (N) y arriba de lo normal (AN) en los distintos índices de TSM.

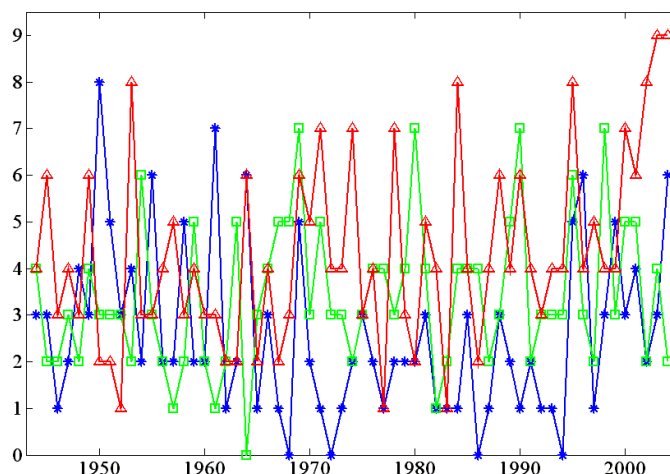


Fig. 1: Series de tiempo para la actividad anual de las Tormentas Tropicales, línea roja con triángulos, los Huracanes Menores, línea verde con cuadros, y los Mayores, línea azul con asteriscos. Cuenca del Atlántico, periodo 1944-2004.

Finalmente se utilizaron los datos del reanálisis del NCEP/NCAR (Kalnay *et al.*, 1996) y los datos concatenados de los análisis de Kaplan *et al.* (1998) y Reynolds y Smith (1994) para hacer mapas compuestos de las anomalías de diferentes variables troposféricas y de TSM para los años con alta o baja actividad de huracanes en el Atlántico. Los datos se obtuvieron del Centro de Diagnóstico Climático (CDC) de la NOAA, EEUU. Los compuestos elaborados comprendieron los meses de junio a octubre, meses en los cuales se observa la mayor formación de ciclones tropicales en el océano Atlántico y los mares Intra-Americanos (Lizano y Fernández, 1996; Alvarado y Alfaro, 2003; Hobgood, 2005).

3. Resultados

En la tabla 1 se presenta un resumen de los estadísticos para las series de tiempo de la actividad anual de ciclones tropicales calculadas. Se observa en este cuadro que la serie del Total de Ciclones Tropicales mostró una tendencia lineal positiva significativa al 95 %, principalmente debido a que la tendencia asociada a la serie de Tormentas Tropicales es también positiva y significativa al 99 %. Esto también explica el valor observado para la serie del Total de los Ciclones Menores, ya que para ninguna de las series de huracanes se observó alguna tendencia significativa al 90 %. Lo anterior está de acuerdo con lo encontrado por Landsea *et al.* (1999) y Alley *et al.* (2007). Al hacer el gráfico de cajas (no mostrado) para estas series se observó que los años 1950 y 1961 fueron detectados como atípicos en la serie de Huracanes Mayores con 8 y 7 huracanes, respectivamente; y el año 1995 fue clasificado como atípico en las series de Ciclones Menores y del Total de Ciclones con 14 y 19 eventos, respectivamente. Se clasificaron como años atípicos aquellos cuyos valores son mayores al del percentil 75 más 1,5 veces el intervalo intercuartílico (Wilks, 1995).

Tabla 1: Resumen de los estadísticos para las series de tiempo de la actividad anual de ciclones tropicales calculadas para el periodo 1944-2004.

Estadístico	Tormentas Tropicales	Huracanes Menores	Huracanes Mayores	Ciclones Menores	Total de Huracanes	Total de Ciclones
Promedio	4,33	3,41	2,61	7,74	6,02	10,34
Desv. estándar	2,02	1,58	1,847	2,60	2,287	3,26
Mediana	4	3	2	7	6	11
Interv. intercuartílico	3	2	2	3	3,25	4
Tendencia (ciclones/año)	0,04	0,03	-0,01	0,06	0,00	0,05
Valor-p	0,00	0,11	0,31	0,00	0,77	0,05

Luego se calcularon las correlaciones entre distintas estaciones climáticas del año de los distintos índices de TSM y las series de actividad anual de ciclones tropicales como un primer paso en la identificación de las posibles relaciones entre los índices oceánicos y las series de tiempo de los ciclones tropicales. La fig. 2 muestra estas

correlaciones para el Total de Huracanes. Las correlaciones con el índice OMA son positivas mientras que aquellas con Niño 3 son negativas. Esto sugiere que periodos con anomalías de TSM positivas (negativas) en el Atlántico (Pacífico) tienden a estar asociados con años en los cuales se observó un mayor número de huracanes en el Atlántico, mientras que periodos con anomalías de TSM negativas (positivas) en el Atlántico (Pacífico) tienden a estar asociados con años de pocos huracanes en dicho océano. Valores similares pero para el periodo 1950-1999 fueron calculados por Landsea *et al.* (1999).

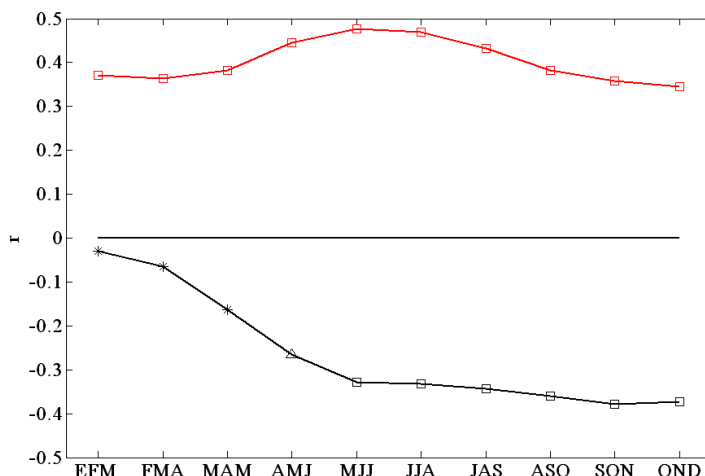


Fig. 2: Correlaciones entre distintas estaciones climáticas del año de los índices usados y el número total de huracanes en el Atlántico para el periodo 1944-2004. La línea roja representa las correlaciones con el índice OMA y la negra con el Niño 3. Los cuadrados representan una significación estadística mayor al 99 %, los triángulos entre 95 y 99 % y los asteriscos menor al 90 %. La significación estadística de los valores se calculó de acuerdo a Davis (1976).

La fig. 2 se usó para determinar cuál de las estaciones climáticas del año en los índices oceánicos está mejor correlacionada con la serie del Total de Huracanes. La tabla 2 muestra el análisis de tabla de contingencia entre el índice OMA durante el periodo MJJ y el número Total de Huracanes, mientras que la tabla 3 muestra este análisis pero utilizando el índice Niño 3 durante SON. Nótese que las tablas 2 y 3 confirman en términos generales los resultados mostrados en la fig. 2.

Tabla 2: Probabilidades condicionales entre el índice OMA, MJJ y el número total de huracanes en el Atlántico, para el periodo 1944-2004. Los valores entre paréntesis son las frecuencias empíricas absolutas ($\chi^2 = 16,77^{***}$ y $r = 0,48^{***}$, donde $\alpha = 0,01 \Rightarrow ***$, $0,05 \Rightarrow **$, $0,10 \Rightarrow *$).

		Huracanes		
		BN	N	AN
OMA, MJJ	BN	75(15)***	25(4)	0(0)***
	N	33(7)	38(8)	29(6)
	AN	20(4)**	35(7)	45(9)*

Tabla 3: Probabilidades condicionales entre el índice Niño 3, SON y el número total de huracanes en el Atlántico, para el periodo 1944-2004. Los valores entre paréntesis son las frecuencias empíricas absolutas ($\chi^2 = 5,20$ y $r = -0,38^{***}$, donde $\alpha = 0,01 \Rightarrow ***$, $0,05 \Rightarrow **$, $0,10 \Rightarrow *$).

		Huracanes		
		BN	N	AN
Niño 3, SON	BN	25(5)	40(8)	35(7)
	N	43(9)*	33(7)	24(5)
	AN	60(12)***	25(5)	15(3)***

Adicionalmente se calculó la diferencia normalizada de los índices OMA, MJJ y Niño 3, SON con el fin de explorar en forma conjunta la influencia de las TSM del Atlántico y Pacífico tropical sobre la actividad anual del Total de Huracanes. Estos resultados se muestran en la tabla 4.

Tabla 4: Probabilidades condicionales entre la diferencia normalizada del índice OMA, MJJ y el índice Niño 3, SON y el número total de huracanes en el Atlántico, para el periodo 1944-2004. Los valores entre paréntesis son las frecuencias empíricas absolutas ($\chi^2 = 18,91^{***}$ y $r = 0,59^{***}$, donde $\alpha = 0,01 \Rightarrow ***$, $0,05 \Rightarrow **$, $0,10 \Rightarrow *$).

		Huracanes		
		BN	N	AN
(OMA, MJJ)-(Niño 3, SON)	BN	75(15)***	20(4)**	5(1)***
	N	38(8)	43(9)*	19(4)**
	AN	15(3)***	35(7)	50(10)***

Comparando los resultados obtenidos en la tabla 4 con aquellos de las tablas 2 y 3, se nota que los distintos escenarios fueron mejor diferenciados utilizando el índice empírico de la tabla 4. Estos sugieren que cuando la diferencia de las anomalías normalizadas de TSM entre el Atlántico y el Pacífico es negativa (positiva), el escenario más probable es una temporada de huracanes BN (AN) en la cuenca del Atlántico con un 75 % (50 %) de probabilidades. Nótese también que las probabilidades para las condiciones (BN, AN) y (AN, BN) son muy bajas (5 y 15 %, respectivamente). Para la tabla 4, los años identificados con la condición (BN, BN) fueron: 1947, 1957, 1965, 1968, 1972, 1974, 1978, 1982, 1986, 1991, 1992, 1993, 1994, 1997, 2002; con (N, N) fueron: 1948, 1953, 1959, 1964, 1966, 1967, 1975, 1981, 1985; y con (AN, AN): 1954, 1955, 1961, 1995, 1996, 1998, 1999, 2000, 2001, 2004. Las trayectorias de los ciclones tropicales que alcanzaron la categoría de huracán para esos años se muestran en la fig. 3. Nótese de esta figura que a pesar de que se identificaron en la tabla 4 quince años en la condición (BN, BN), la actividad de los ciclones tropicales en el Atlántico fue mucho menor que aquella observada durante los diez años correspondientes a la condición (AN, AN).

Las figs. 4, 5 y 6 muestran los mapas compuestos de anomalías entre junio y octubre de TSM, la cortante vertical del viento troposférico ($\delta\vec{V}/\delta z$, s^{-1} , calculada como la diferencia vectorial del viento entre los niveles de 200 y 850 hPa), y la presión media a nivel del mar (PMNM) para las condiciones (BN, BN) y (AN, AN) de los años identificados en la tabla 4, descrita anteriormente.

Las figs. 4a, 5a y 6a muestran que durante los años con condiciones (BN, BN) se observaron anomalías negativas (positivas) de TSM en el Atlántico Tropical Norte (Pacífico Ecuatorial del Este), una mayor cortante vertical del viento en el Atlántico Tropical Norte pero menor sobre el Pacífico Tropical del Este cercano a Centroamérica y una mayor (menor) PMNM en el Atlántico Tropical Norte (Pacífico Ecuatorial del Este). Por otro lado, las figs. 4b, 5b y 6b muestran en general patrones opuestos para las regiones descritas anteriormente durante los años con condiciones (AN, AN). Estos patrones opuestos se resaltan al hacer la diferencia con los campos del escenario (BN, BN) y que se muestran en las figs. 4c, 5c y 6c.

Un análisis de correlación análogo al presentado para la serie del número del Total de Huracanes en el Atlántico, se realizó con las otras series de ciclones tropicales descritas en la introducción, esto con el fin de identificar si la relación encontrada con el Total de Huracanes es la misma que al considerar las Tormentas Tropicales, los Huracanes Menores y los Huracanes Mayores en forma separada. La fig. 7 muestra los resultados para la serie de Huracanes Mayores, siendo la interpretación de estos muy similar a los presentados en la fig. 2.

Para la serie de tiempo de Huracanes Menores, las correlaciones encontradas con los distintos índices de TSM usados en el presente análisis son muy pequeñas y no significativas (fig. 8). Los resultados obtenidos para la serie de las Tormentas Tropicales (no mostrados) son muy similares a los presentados en la fig. 8. Esto se puede interpretar como que la variabilidad observada en los índices de TSM usados en este análisis sobre la variabilidad observada en la actividad anual de Ciclones Tropicales Menores (Huracanes Menores y Tormentas Tropicales) es marginal.

Para explorar la consistencia de las relaciones encontradas en la tabla 4, se realizó el análisis de tabla de contingencia entre las mismas variables pero para los años 1871-2004. Estos resultados se muestran en la tabla 5.

Si bien es cierto que los resultados de la tabla 5 son consistentes con aquellos de la tabla 4, se nota en la primera un sesgo importante hacia valores anuales con cuentas bajas de ciclones tropicales en las series de tiempo. Esto podría estar asociado a problemas en la asignación de la categoría de los ciclones tropicales antes del año 1944,

años en los cuales era inusual asignar categorías altas a los huracanes debido a problemas con la observación de los mismos (Landsea *et al.*, 2006).

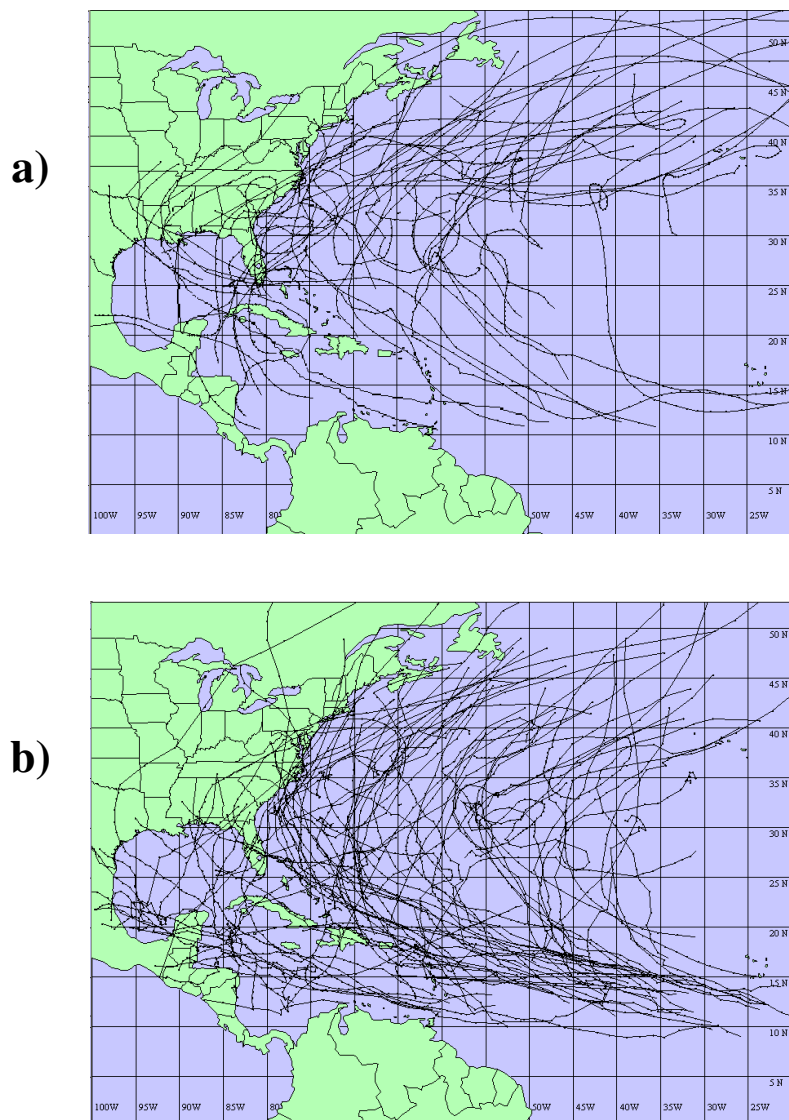


Fig. 3: Trayectorias de los ciclones tropicales que alcanzaron la categoría de huracán para los años mencionados en el texto de la tabla 4 e identificados en la condición a) (BN, BN) y b) (AN, AN).

Tabla 5: Probabilidades condicionales entre la diferencia normalizada del índice OMA, MJJ y el índice Niño 3, SON y el número Total de Huracanes en el Atlántico, para el periodo 1871-2004. Los valores entre paréntesis son las frecuencias empíricas absolutas ($\chi^2 = 39,41 ***$ y $r = 0,54 ***$, donde $\alpha = 0,01 \Rightarrow ***$, $0,05 \Rightarrow **$, $0,10 \Rightarrow *$).

		Huracanes		
		BN	N	AN
(OMA, MJJ)-(Niño 3, SON)	BN	80(36)***	16(7)***	4(2)***
	N	43(19)*	34(15)	23(10)*
	AN	22(10)**	24(11)*	53(24)***

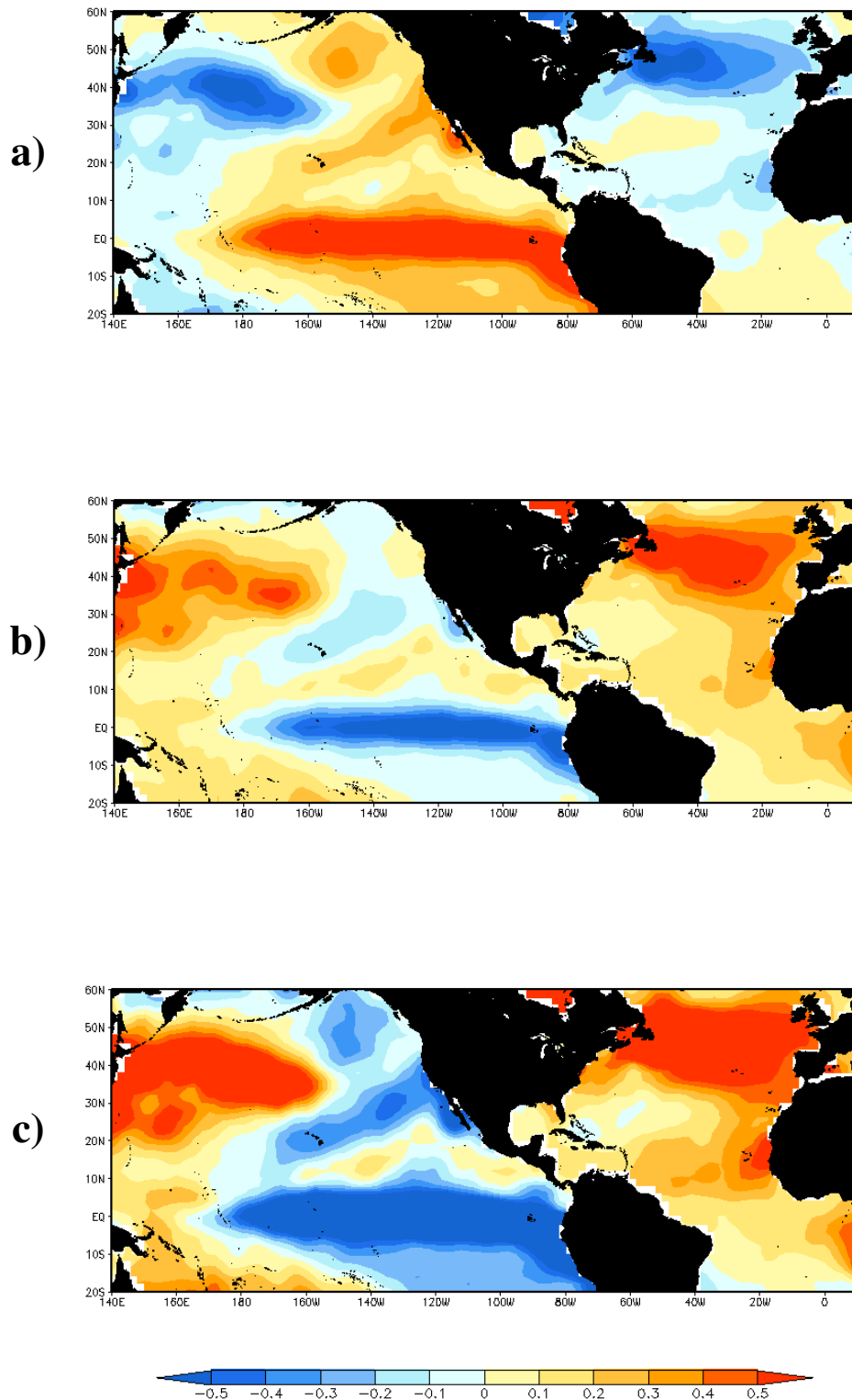


Fig. 4: Compuestos de anomalías de TSM ($^{\circ}\text{C}$) entre junio y octubre para los años con condiciones a) (BN, BN), b) (AN, AN) y c) para la diferencia de b) y a). Periodo base para el cálculo de las anomalías: 1944-2004.

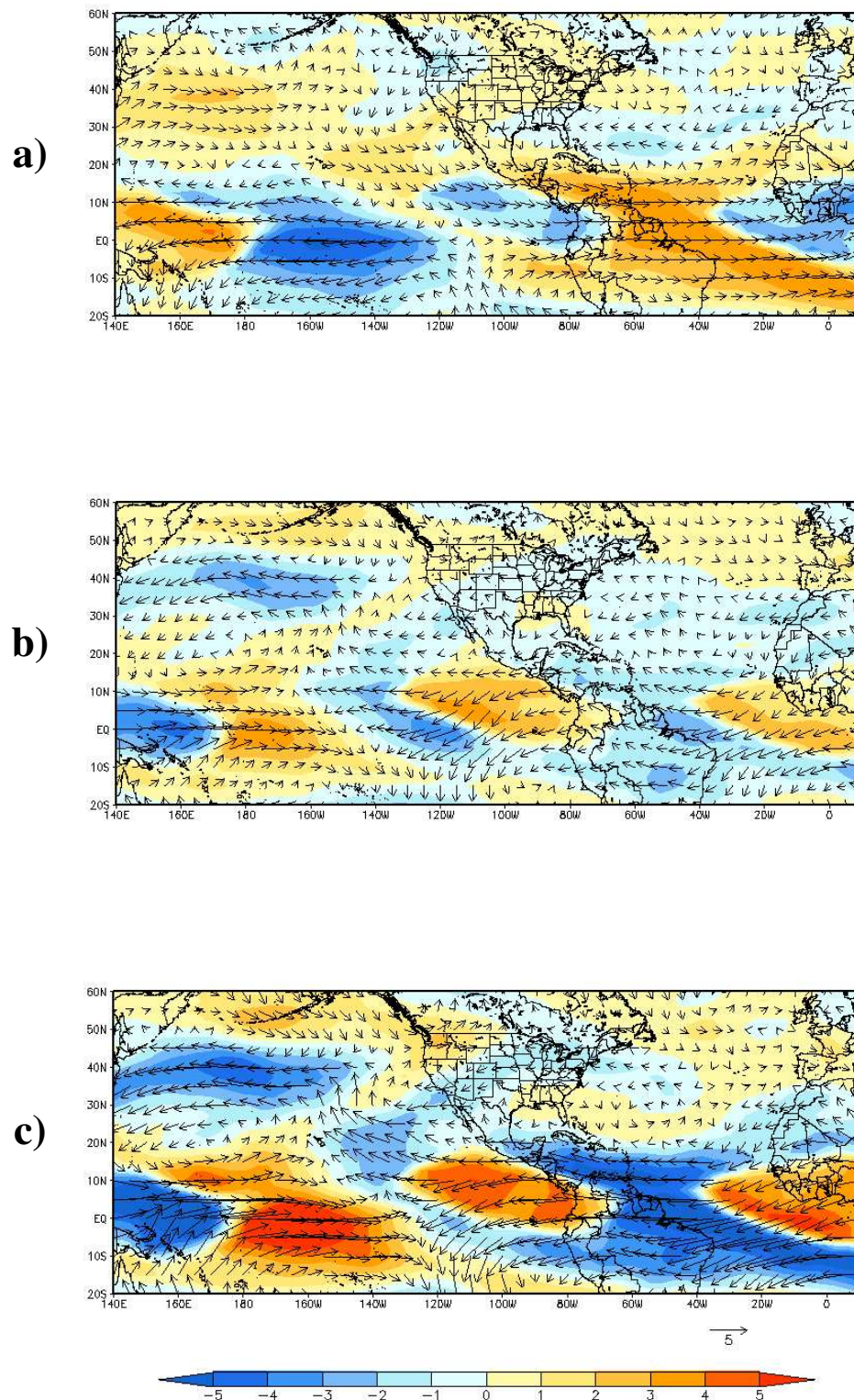


Fig. 5: Compuestos de anomalías de la cortante del viento ($\delta \vec{V} / \delta z$, s^{-1}) entre junio y octubre para los años con condiciones a) (BN, BN), b) (AN, AN) y c) para la diferencia de b) y a). Las flechas indican los vectores de la cortante y la escala de colores su valor escalar. Periodo base para el cálculo de las anomalías: 1944-2004.

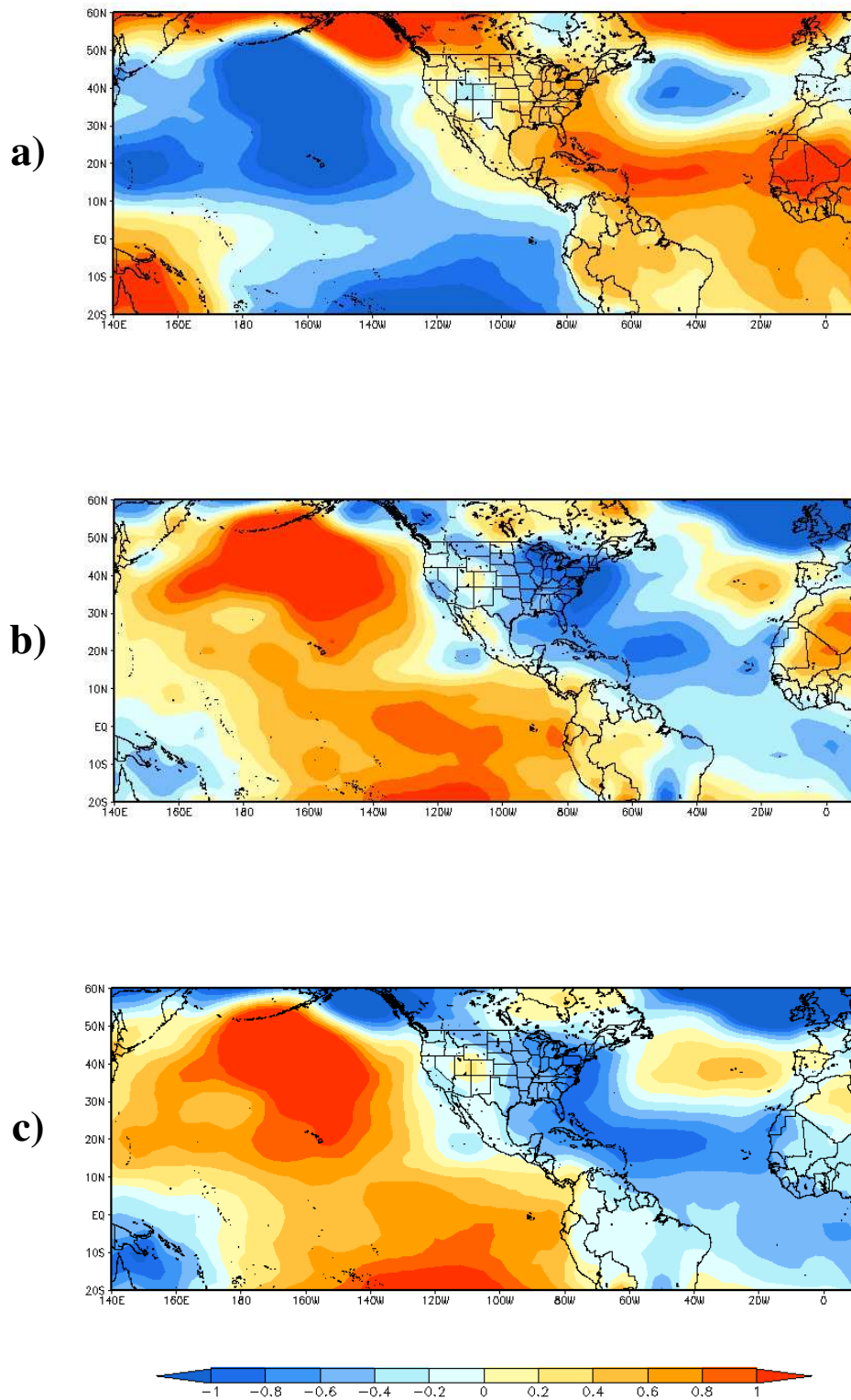


Fig. 6: Compuestos de anomalías de la PMNM (hPa) entre junio y octubre para los años con condiciones a) (BN, BN), b) (AN, AN) y c) para la diferencia de b) y a). Periodo base para el cálculo de las anomalías: 1944-2004.

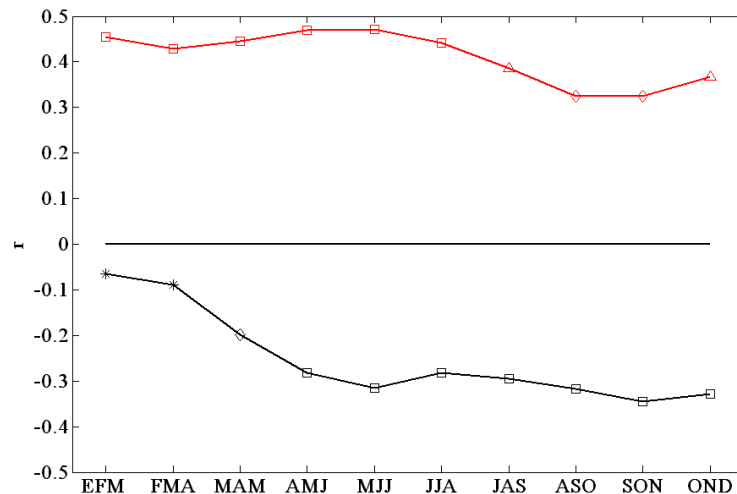


Fig. 7: Correlaciones entre distintas estaciones climáticas del año de los índices usados y el número total de huracanes Mayores en el Atlántico para el periodo 1944-2004. La línea roja representa las correlaciones con el índice OMA y la negra con el Niño 3. Los cuadrados representan una significación estadística mayor al 99 %, los triángulos entre 95 y 99 %, los rombos entre 90 y 95 % y los asteriscos menor al 90 %. La significación estadística de los valores se calculó de acuerdo a Davis (1976).

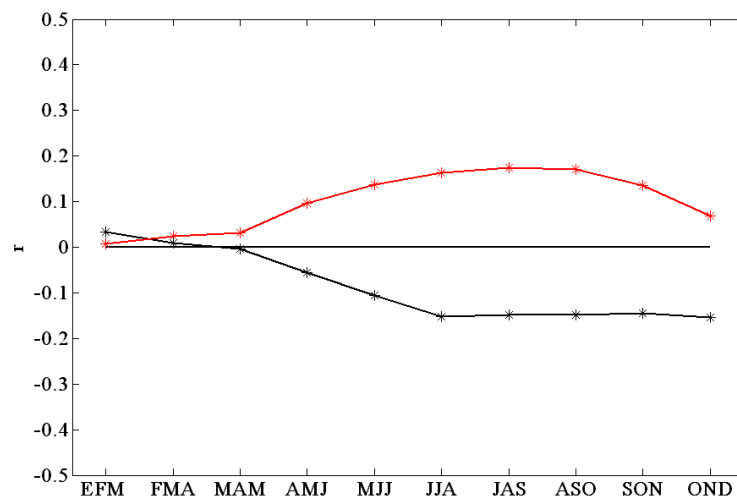


Fig. 8: Correlaciones entre distintas estaciones climáticas del año de los índices usados y el número total de Huracanes Menores en el Atlántico para el periodo 1944-2004. La línea roja representa las correlaciones con el índice OMA y la negra con el Niño 3. Los asteriscos representan una significación estadística menor al 90 %. La significación estadística de los valores se calculó de acuerdo a Davis (1976).

4. Discusión

Para ninguna de las series de huracanes se observó alguna tendencia significativa al 90 % durante el periodo 1944-2004. Lo anterior coincide con los resultados de Landsea *et al.* (1999), para el periodo 1950-1999 y con los de Klotzbach (2006), para las últimas dos décadas (1986–2005) pero no con el resultado de Hoyos *et al.* (2006). Sin embargo, estos estudios no son directamente comparables con este trabajo, ya que la definición usada en estos dos últimos de huracán intenso, comprende solo las categorías 4 y 5, y además ellos realizan su estudio para un periodo de tiempo más corto. La presencia o no de tendencias en las series de tiempo de ciclones tropicales ha sido un tema de amplia discusión en la literatura científica (Kerr 2006), ya que la existencia de una variabilidad

multidecadal en el sistema climático (eg. Mantua *et al.*, 1997; Landsea *et al.*, 1999; Dima *et al.*, 2001; Enfield *et al.*, 2001; Molinari y Mestas-Nuñez, 2003; Bell y Chelliah, 2006) y la calidad de los registros obtenidos previos a las observaciones rutinarias de satélites, complican la detección de estas tendencias (Alley *et al.*, 2007). Landsea *et al.* (2006) agregan que incluso la asignación de tales categorías por medio del uso de sensores remotos no fueron homogéneas durante las décadas de 1970 y 1980, por lo que no se puede concluir que hay una clara tendencia en la actividad del número anual de ciclones tropicales, lo cual está de acuerdo con lo descrito por el IPCC (Alley *et al.*, 2007).

Para la cuenca del Atlántico se confirmaron algunos resultados de trabajos previos en los cuales periodos anómalamente cálidos (fríos) en la misma tienden a estar asociados con periodos de mayor (menor) actividad de huracanes, mientras que las fases cálidas (frías) del ENOS tienden a estar asociadas con años de menor (mayor) actividad de huracanes (Gray, 1984; Goldenberg *et al.*, 2001; Molinari y Mestas-Nuñez, 2003; Bell y Chelliah, 2006). Estos resultados también concuerdan con los obtenidos por Taylor *et al.* (2002), que encontraron que durante la primera parte de la estación lluviosa en el Caribe, es decir MJJ, la anomalía de la TSM en el Atlántico Tropical Norte es el principal modulador de la convección profunda asociada a la precipitación, en donde anomalías positivas (negativas) de TSM en esta región, coinciden con una mayor (menor) área de la piscina de aguas cálidas (Wang y Enfield, 2003) y una mayor (menor) cantidad de precipitación.

Por otro lado, durante la última parte de la estación lluviosa, es decir ASO, la variabilidad de la convección profunda en el Caribe esta modulada tanto por la TSM en el Pacífico como en el Atlántico ecuatorial, al modular la estructura de la cortante vertical del viento en la troposfera sobre el Atlántico Tropical Norte, en donde eventos cálidos (fríos) en el Pacífico ecuatorial aumentan (disminuyen) la cortante vertical en el Caribe, lo que trabaja en contra (a favor) de la convección profunda en esa región.

Sin embargo, en este trabajo, los mejores resultados se obtuvieron cuando se estudió la actividad anual de los ciclones en función de la comparación normalizada de la TSM en el Atlántico y el Pacífico ecuatorial. Esta interconexión entre ambas cuencas oceánicas es importante de considerar en regiones de alta vulnerabilidad a los desastres naturales como Centroamérica (Banichevich y Lizano, 1998; Wang, 2006).

Para el año 2005 se observó que la diferencia normalizada de los índices OMA, MJJ – Niño 3, SON fue muy por arriba de lo normal al compararla con el periodo 1944-2004, ya que esta se ubicó entre los percentiles 91 y 92. Para ese año, el Total de Ciclones Tropicales fue de 27 con un Total de Huracanes de 15, un Total de Huracanes Menores de 8 y un Total de Tormentas Tropicales de 12, valores nunca observados entre 1871 y el 2004. Además, el Total de Huracanes Mayores fue de 7, uno menos que el observado en 1950 e igual que los registrados en 1961. La alta actividad de ciclones tropicales durante el año 2005 se debió principalmente a las altas temperaturas observadas en el océano Atlántico (Blake *et al.*, 2006), las cuales se ubicaron entre los percentiles 97 y 98 al compararlas con el periodo 1944-2004 durante MJJ. Wang *et al.* (2006) explican que la presencia de una piscina de aguas cálidas en el Atlántico Tropical (Wang y Enfield, 2003) está asociada con una reducción de la PMNM, un incremento en la convección atmosférica y en la nubosidad, correspondiendo también con una cortante vertical del viento débil en la troposfera y temperaturas más cálidas en una capa más profunda del océano, lo cual aumenta la actividad de huracanes en el Atlántico. Todo lo anterior coincide con los resultados obtenidos en el presente estudio (figs. 4, 5 y 6).

Por último, para el año 2006 se observó que la diferencia normalizada de los índices OMA, MJJ – Niño 3, SON estuvo ligeramente por arriba de lo normal al compararla con el periodo 1944-2004, ya que esta se ubicó entre los percentiles 68 y 69, y el percentil 66,67 es el límite superior del tercio de los datos que se considerarían normales en ese período. Esto se debió a que los valores de la OMA durante MJJ siguieron siendo altos, entre los percentiles 97 y 98, pero los valores observados en el índice Niño 3 durante ASO también se observaron altos, entre los percentiles 91 y 92. Esto último, según Taylor *et al.* (2002) aumenta la cortante vertical del viento troposférico sobre la región de generación de ciclones tropicales en el Atlántico, lo que no favorece su formación durante el segundo semestre del año, que es la temporada de mayor actividad de ciclones tropicales en el Atlántico (Lizano y Fernández, 1996; Alvarado y Alfaro, 2003; Taylor y Alfaro, 2005), y en donde su variabilidad está dominada por las distintas fases del ENOS (Gray, 1984; Goldenberg *et al.*, 2001; Molinari y Mestas-Nuñez, 2003; Bell y Chelliah, 2006). Lo anterior explica que el año 2006 fue un año de actividad ciclónica en el Atlántico que se considera dentro de lo normal al compararlo con la tabla 1. Para ese año, el Total de Ciclones Tropicales fue de 9, con 4 Tormentas Tropicales y 5 Huracanes (3 Huracanes Menores y 2 Mayores).

Agradecimientos

Este trabajo se realizó gracias al apoyo de los siguientes proyectos: UCR-V.I.- 805-A7-002, 805-98-506, 808-A6-053, V.D- ED-1977, IAI-CRN2-050, IAI-03SGP211-214 y ANUIES-CSUCA 01-2004. Agradecimiento especial a Erick Rivera por su apoyo en la elaboración de los mapas de anomalías. A Mary Moreno, Javier Soley y Omar Lizano por sus comentarios al manuscrito. A este último también por su colaboración con la elaboración de los mapas de trayectorias de huracanes. Finalmente, a Chris Landsea por sus acertadas sugerencias en cuanto al periodo de las series de tiempo utilizado en el análisis.

Bibliografía

- Adger N, *et al.* (2007): *Climate Change 2007: Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability. Summary for Policymakers*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponible en: IPCC Secretariat, c/o WMO, 7bis, Avenue de la Paix, C.P. N° 2300, 1211 Geneva 2, SWITZERLAND (<http://www.ipcc.ch>). 23pp.
- Alfaro E, Soley J, Enfield D (2003): *Uso de una tabla de Contingencia para Aplicaciones Climáticas (Use of a Contingency Table for Climatic Applications)*, ISBN 9978-310-00-2. Editado por ESPOL y FUNDESPOL, Guayaquil, Ecuador. 51pp.
- Alley R, *et al.* (2007): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponible en: IPCC Secretariat, c/o WMO, 7bis, Avenue de la Paix, C.P. N° 2300, 1211 Geneva 2, SWITZERLAND (<http://www.ipcc.ch>). 21pp.
- Alvarado L, Alfaro E (2003): Frecuencia de los ciclones tropicales que afectaron a Costa Rica durante el siglo XX. *Tópicos Meteorológico y Oceanográficos*, 10(1): 1-11.
- Banichevich A, Lizano O (1998): Interconexión a nivel ciclónico-atmosférico entre el Caribe y el Pacífico Centroamericanos. *Rev. Biol. Trop.*, 46 (Supl. 5): 9-22.
- Bell GD, Chelliah M (2006): Leading tropical modes associated with interannual and multi-decadal fluctuations in North Atlantic hurricane activity. *J. Climate*, 19: 590-612.
- Blake E, Bell G, Pasch R (2006): Precursor climate aspects of the 2005 Atlantic hurricane season. *Memories of the 27th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology. Monterey, California, EEUU, Amer. Meteor. Soc.*, paper 2A.2.
- Davis R (1976): Predictability of sea surface temperature and sea level pressure anomalies over the North Pacific Ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, 6: 249-266.
- Díaz R (2005): La tormenta tropical de 1887 y su paso por las fuentes históricas costarricenses. *Revista Estudios*, No. 18-19: 39-56.
- Dima M, Rimbu N, Stefan S (2001): Quasi-decadal variability in the Atlantic basin involving tropics-midlatitudes and ocean-atmosphere interactions. *J. Climate*, 14: 823-831.
- Enfield D, Mestas-Núñez A, Trimble P (2001): The Atlantic Multidecadal Oscillation and its relationship to rainfall and river flows in the continental U.S. *Geophys. Res. Lett.*, 28: 2077-2080.
- Goldenberg S, Landsea C, Mestas-Núñez A, Gray W (2001): The recent increase in Atlantic hurricane activity: Causes and Implications. *Science*, 293: 474-479.
- Gray W (2006): Global warming and hurricanes. *Memories of the 27th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology. Monterey, California, EEUU, Amer. Meteor. Soc.*, paper 4C.1.
- Gray W (1984): Atlantic seasonal hurricane frequency. Part I: El Niño and 30 mb Quasi-Biennial Oscillation Influences. *Mon. Weather Rev.*, 112: 1649-1668.
- Gray W (1978): Hurricanes: their formation, structure and likely role in the tropical circulation. In *Meteorology over the Tropical Oceans* (D. Shaw, Ed.), Billing & Sons Limited, Great Britain, pp. 155-218
- Hobgood J (2005): Tropical Cyclones. In *Encyclopedia of World Climatology* (J. Oliver, Ed.), Springer, Netherlands, pp. 750-755

- Hoyos C, Agudelo P, Webster P, Curry J (2006): Deconvolution of the factors contributing to the increase in global hurricane intensity. *Science*, 312: 94-97.
- Kalnay E, *et al.* (1996): The NCEP/NCAR Reanalysis 40-year Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 437-471.
- Kaplan A, Cane MA, Kushnir Y, Clement AC, Blumenthal MB, Rajagopalan B (1998): Analysis of global sea surface temperatures 1856-1991. *J. Geophys. Res.*, 103: 18567-18589.
- Kerr R (2006): A tempestuous birth for hurricane climatology. *Science*, 312: 676-678.
- Klotzbach P (2006): Trends in global tropical cyclone activity over the past twenty years (1986-2005). *Geophys. Res. Lett.*, 33, L10805, doi:10.1029/2006GL025881.
- Landsea C, *et al.* (2004): The Atlantic Hurricane database Re-analysis Project. In *Hurricanes and Typhoons, past, present and future* (R. Murnane & K. Liu, Eds.), Columbia University Press, New York, pp. 178-221.
- Landsea C, Harper B, Hoarau K, Knaff J (2006): Can we detect trends in extreme tropical cyclones? *Science*, 313: 452-454.
- Landsea C, Pielke R, Mestas-Nuñez A, Knaff J (1999): Atlantic basin hurricanes: Indices of climatic changes. *Climatic Change*, 42: 89-129.
- Liu K (2007): Uncovering Prehistoric Hurricane Activity. *American Scientist*, 95: 126-133.
- Lizano O, Fernández W (1996): Algunas características de las tormentas tropicales y de los huracanes que atravesaron o se formaron en el Caribe adyacente a Costa Rica durante el periodo 1886-1988. *Tópicos Meteorológico y Oceanográficos*, 3(1): 3-10.
- Mantua N, Hare S, Zhang Y, Wallace J, Francis R (1997): A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78: 1069-1079.
- Molinari R, Mestas-Nuñez A (2003): North Atlantic decadal variability and the formation of tropical storms and hurricanes. *Geophys. Res. Lett.*, 30(10): 1541, doi:10.1029/2002GL016462.
- Neumann C, Jarvinen B, McAdie C, Elms J (1993): Tropical Cyclones of the North Atlantic Ocean, 1871-1992, Prepared by the National Climatic Data Center, Asheville, NC, in cooperation with the National Hurricane Center, Coral Gables, FL. 193pp.
- Pielke R, Landsea C, Mayfield M, Pasch R (2005). Hurricanes and global warming. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 86: 1571-1575.
- Pielke R, Rubiera J, Landsea C, Fernandez M, Klein R (2003): Hurricane vulnerability in Latin America and the Caribbean: Normalized damage and loss potentials. *Natural Hazards Review*, 101-114.
- Reynolds R, Smith T (1994): Improved global sea surface temperature analyses using optimum interpolation. *J. Climate*, 7: 929-948.
- Taylor M, Alfaro E (2005): Climate of Central America and the Caribbean. In *Encyclopedia of World Climatology* (J. Oliver, Ed.), Springer, Netherlands, pp. 183-189.
- Taylor M, Enfield D, Chen A (2002): The influence of the tropical Atlantic vs. the tropical Pacific on Caribbean Rainfall. *J. Geophys. Res.*, 107(c9): 3127, doi:10.1029/2001JC001097.
- Wang C (2006): An overlooked feature of tropical climate: Inter-Pacific-Atlantic variability. *Geophys. Res. Lett.*, 33: L12702, doi: 10.1029/2006GL26324.
- Wang C, Enfield D (2003): A further study of the tropical Western Hemisphere warm pool. *J. Climate*, 16: 1476-1493.
- Wang C, Enfield D, Lee S, Landsea C (2006): Influences of the Atlantic warm pool on western hemisphere summer rainfall and Atlantic hurricanes. *J. Climate*, 19: 3011-3028.
- Wilks D (1995): *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press, San Diego, EEUU. 465 pp.

