

Circulación Troposférica asociada a los Frentes Fríos Fuertes que afectaron a Cuba en el período 1950–2008

Tropospheric Circulation associated Cold Strong Fronts that affected Cuba in the period 1950–2008

Lic. Ailyn Caridad Jústiz Águila | ailyn.justiz@insmet.cu | Centro de Pronóstico, Instituto de Meteorología

Dra. Cecilia González Pedroso | cecilia.gonzalez@insmet.cu | Centro de Pronóstico, Instituto de Meteorología

Recibido: 8 enero, 2013; aceptado: 30 de abril, 2013. pp. 26 – 43.

Resumen

En este trabajo se realiza un estudio de carácter climatológico sinóptico en relación con los frentes fríos fuertes que afectaron a Cuba en el período 1950–2008. Se analizan el comportamiento troposférico de esa situación meteorológica y sus características, con el objetivo principal de establecer los diferentes patrones circulatorios asociados cuando estos sistemas influyen sobre el archipiélago cubano. Los resultados obtenidos demuestran su comportamiento climatológico, que aporta a una mejor comprensión acerca de la estructura troposférica en las bajas latitudes, a la vez que contribuye a una mejor efectividad en los pronósticos meteorológicos relacionados con estos eventos. Se constató que la mayor frecuencia de los frentes fríos fuertes que afectaron a Cuba corresponde a los clasificados como “clásicos” por su tipo, los cuales tienen asociado un flujo meridional predominante en la troposfera media, con lo que se reafirma el intercambio de la circulación extratropical en las bajas latitudes. Además, se muestran las características que presentan los frentes fríos fuertes que influyen sobre Cuba bajo la influencia de eventos teleconectivos El Niño–Oscilación del Sur (ENOS) y Oscilación del Atlántico Norte (NAO), valorando y determinando el comportamiento del campo de viento y el flujo en la troposfera superior.

PALABRAS CLAVE: patrones sinópticos, circulación troposférica, frentes fríos fuertes, eventos teleconectivos.

Abstract

In this paper an study of climatological synoptic character on the Cold Strong Fronts that concerned to Cuba, in the years from 1950 to 2008, is realized. The tropospheric behavior is analyzed of this meteorological situation, his characteristics associated, as well as, the different circulatory associate bosses when they affected the Cuban island. These results demonstrate his climatological behavior that contribute to a better comprehension of the tropospheric structure in the low latitudes and contributes to a better efficiency in the meteorological forecasts to them associate. There was denoted that the major frequency of the cold strong fronts (FFF) that concerned to Cuba corresponds to him to classified like classic for his type. They have a predominant southern flow associate in the average troposphere reaffirming the exchange of the extratropical circulation with the low latitudes. In addition, it shows the characteristics that present under the influence of the events teleconectivos ENSO and NAO, valuing and determining the behavior of the wind field for the high troposphere.

Keywords: synoptic patterns, tropospheric circulation, strong cold fronts, teleconnective events.

Introducción

En la actualidad, se denota una demanda creciente del apoyo meteorológico en casi todas las esferas de la vida, puesto que la necesidad de conocer los pronósticos del tiempo para diferentes plazos resulta de gran interés. Por ello, todo estudio que aborde aquellas situaciones atmosféricas que inciden directamente en el estado del tiempo y que sean capaces de producir eventos extremos o severos, resultan de suma importancia para el desarrollo de la meteorología sinóptica (en particular, de la climatología sinóptica), los estudios de variabilidad climática, el aporte al pronóstico operativo y su contribución a un mejor conocimiento del comportamiento entre latitudes medias y el trópico.

En el análisis de los frentes fríos fuertes (FFF) como, entre otros, un sistema meteorológico que impacta la actividad socioeconómica en Cuba durante la temporada invernal, se han descrito estos sistemas invernales en términos de los patrones de la circulación general de la atmósfera como consecuencia de la modulación de los esquemas circulatorios devenidos de la interacción océano–atmósfera. Además, se tuvo en cuenta que los FFF producen cambios en los campos de viento, de nubosidad, de temperaturas extremas, de precipitación y del estado del mar, con aspectos negativos que inciden en la realización de las disímiles actividades.

La ausencia de un estudio que refleje el comportamiento climatológico detallado de los FFF con relación a su estructura troposférica, motiva para acometer este trabajo teniendo en cuenta, asimismo, otras características relevantes para su pronóstico en la meteorología operativa. No obstante, el conocimiento de estas situaciones meteorológicas dentro de la variabilidad climática, tan útil en el presente, también incita a la realización de este estudio con miras a la comprensión, la mitigación y la adaptación al cambio climático; de ahí, proviene su importancia

y actualidad. Por estas razones, el objetivo general de este trabajo consiste en determinar los patrones medios troposféricos asociados a los FFF que afectaron a Cuba en el período 1950–2008. Para ello, se tomaron diversos objetivos específicos: en primer lugar, la actualización de la cronología de los FFF que han afectado a Cuba desde 1950 hasta 2008; establecer los patrones sinópticos medios asociados a esos FFF en toda la troposfera; y, no por último menos importante, determinar el comportamiento medio del campo de viento, la temperatura y la humedad ligados a los FFF cuando afectan al occidente cubano.

En este trabajo se exponen, además, las características dinámicas y térmicas de los FFF que afectan a Cuba, sobre la base de los patrones de flujo en los diferentes niveles de la troposfera que fueron seleccionados con este objetivo y establecer los patrones medios troposféricos asociados con estos en el período 1950–2008.

Materiales y métodos

El entorno geográfico seleccionado para el estudio de la muestra objeto de análisis se localiza entre las latitudes 15° N y 60° N, y las longitudes 110° W y 50° W (Fig. 1). Esta área se escogió por ser representativa en el estudio de los patrones circulatorios asociados a los sistemas meteorológicos invernales que afectan el archipiélago cubano.

Con el propósito de obtener una base de datos inicial para comenzar el estudio de estos fenómenos meteorológicos, se consultaron las cronologías de frentes fríos que afectaron a Cuba, desde la temporada invernal 1916–1917, hasta 2008–2009. Esa información sirvió de referencia para obtener las posibles fechas de afectación de los FFF al archipiélago cubano, seleccionando el tipo de frente (clásico, revesino o secundario) y las provincias que fueron afectadas por estos sistemas invernales y, de esta manera, actualizar la cronología de estos sistemas, la cual quedó formada por 85 casos.

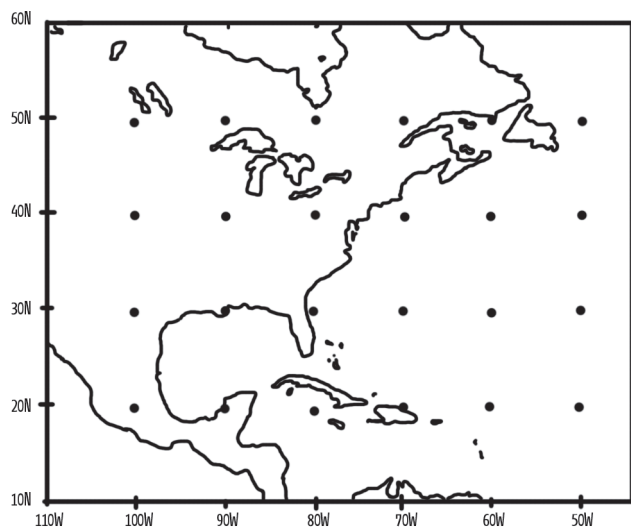


Fig. 1 Dominio de estudio.

Con el análisis de la altura geopotencial en la columna troposférica y el campo bórico en el nivel de la superficie del mar, se espera determinar los patrones circulatorios asociados a los FFF. Asimismo, se caracterizará la influencia de eventos de teleconexión y otras anomalías circulatorias que hayan incidido de forma significativa en la presencia o no de estos sistemas invernales en el territorio cubano, en particular, en la región occidental.

En cada caso, se analizan, además de la presión a nivel del mar, otras variables, como la altura geopotencial (1 000 hPa, 850 hPa, 700 hPa, 500 hPa, 200 hPa), la velocidad del viento (200 hPa y 300 hPa), la humedad relativa y la temperatura en 850 hPa, así como los campos derivados, tales como la divergencia, la vorticidad y los movimientos verticales (w) en 700 hPa y 500 hPa.

Los diferentes niveles y variables, obtenidos mediante la descarga desde el sitio Web <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/composites/day/> del NCEP/NCAR, así como algunos de sus campos derivados, extraídos mediante funciones `hdivg` y `hcurl` del GrADS, tomando como entrada las componentes zonal y meridional del viento, se justifican a partir de que permiten, mediante su análisis, determinar el estado termodinámico de la atmósfera y valorar el

comportamiento medio de las condiciones meteorológicas asociadas a los FFF. El análisis gráfico de los datos se realizó con Microsoft Excel, en sus versiones 2003 y 2007.

Análisis y discusión

Se efectuó el procesamiento estadístico descriptivo a la muestra seleccionada para caracterizar y definir el comportamiento de los FFF en el período seleccionado. Para determinar el comportamiento estacional de estos sistemas meteorológicos se tomaron los valores de frecuencia de casos por cada temporada invernal (Fig. 2), a los cuales se les determinaron los estadígrafos media, mediana, varianza y desviación estándar.

La figura 2 refleja la distribución estacional de los FFF; se aprecian como características significativas su valor absoluto 9, que se manifestó en la temporada invernal 1952–1953, y el período en que Cuba no ha sido afectada de forma consecutiva por FFF (1996–2008). Este período es notable por la ausencia de esos sistemas meteorológicos en bajas latitudes, por lo cual será caracterizado en este estudio.

En los 58 períodos invernales analizados se tiene un promedio de 1.4 FFF que influyen en una temporada sobre el archipiélago cubano, con una variación o desviación estándar de 1.77, lo que muestra su gran variabilidad interestacional. Además, se obtuvo

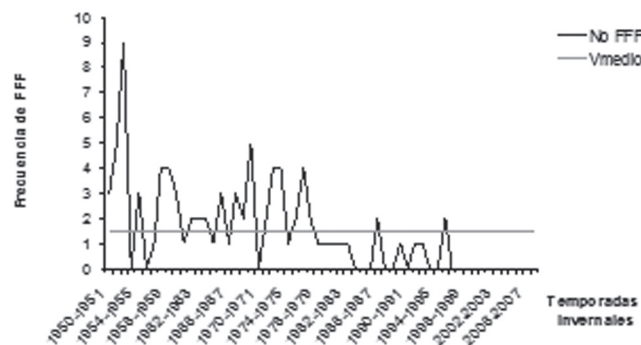


Fig. 2 Distribución estacional de los FFF en el período desde 1950 hasta 2008.

que en 39.6 % de las temporadas no se presentaron FFF, mientras que en 60.4 % se observaron FFF en el occidente cubano, de los cuales en 24.1 % de las temporadas se denotaron más de dos FFF.

El trimestre diciembre-enero-febrero resultó el de mayor afectación de FFF sobre el occidente de Cuba, y la influencia de estos presentó, según sus tipos, el comportamiento siguiente: 92.94 % clásicos (resultaron predominantes), 3.53 % revésinos y 3.53 % secundarios.

El análisis de las variables consideradas se realizó, primero, tanto en las temporadas invernales en las que Cuba fue afectada por FFF (período activo, desde 1950–1951, hasta 1995–1996), como en aquellas en las que el territorio cubano no fue afectado por esos sistemas (período inactivo, desde 1996–1997, hasta 2007–2008).

Resultados

Análisis de la presión a nivel del mar

En el análisis a la muestra de estudio para cada mes de la temporada invernal se determinaron las posiciones medias (en los mapas a nivel de la superficie del mar) de los centros béricos (bajas extratropicales y altas migratorias) asociados al período activo de los FFF

que afectaron al archipiélago cubano (Fig. 3a), para los centros de alto y bajo barómetros. Con relación a su intensidad, los valores oscilaron entre 1 023 hPa y 1 028 hPa para los anticiclones, mientras que para las bajas extratropicales oscilaron entre 1 008 hPa y 1 012 hPa. Un análisis similar se realizó para el período inactivo, que presenta la posición media del centro ciclónico localizado en la porción noroccidental del Atlántico, con valores entre 1 006 hPa y 1 010 hPa (Fig. 3b) para todos los meses del período poco lluvioso. Las altas presiones, con intensidades entre 1 017 hPa y 1 021 hPa, ocuparon la zona mostrada en la figura 3b; en marzo y abril se denotó la influencia de la dorsal subtropical, con centros de 1 020 hPa y 1 017 hPa, respectivamente, en los estados del sureste de los Estados Unidos (South Carolina, Georgia, Alabama, Mississippi y Tennessee). Esta situación anticiclónica influye sobre Cuba y los mares adyacentes e impone un flujo del este que no contribuye al desplazamiento de los sistemas frontales sobre el área.

En el caso de la presión a nivel del mar, para el período inactivo, en todos los meses se detectaron anomalías negativas sobre toda la costa oriental del continente norteamericano, hasta cabo Hatteras y

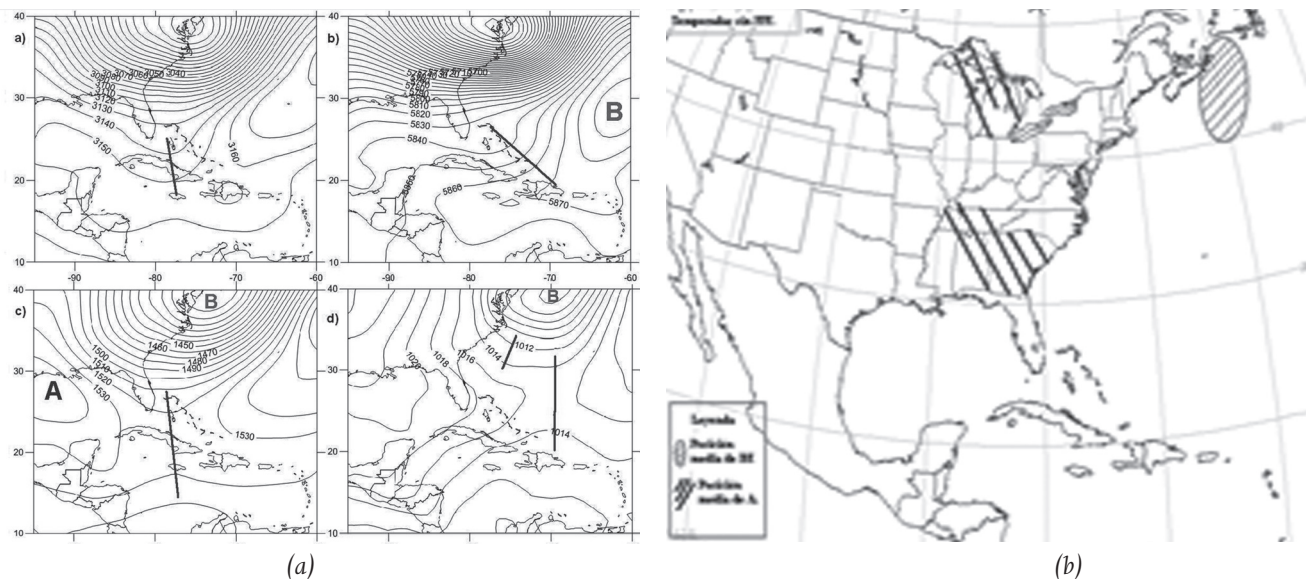


Fig. 3 Posición media de los centros béricos, asociados a los FFF (en la superficie a nivel del mar), en el período 1950–2008. a) Período activo; b) período inactivo.

el Atlántico adyacente, así como en gran parte de los Estados Unidos, asociadas a la posición media del sistema frontal, el cual se hallaba ligeramente más profundo al norte de los 35° de latitud norte, en el período 1996–2008. En el área del Golfo de México, Cuba y la Florida, se observaron anomalías positivas entre 0.5 hPa y 0.7 hPa, lo cual no contribuye al desplazamiento de esos sistemas hacia bajas latitudes.

Análisis de la altura geopotencial en el nivel de 850 hPa

Período activo

En el primer mes del año se refleja la posición media de la vaguada polar cerrada y profunda que se extiende meridionalmente desde Canadá hasta la región occidental del territorio cubano (Fig. 4a). Por delante de la vaguada se observa la presencia del Anticiclón Subtropical del Atlántico Norte, que influye hasta la mitad oriental de Cuba, mientras que sobre los estados occidentales de los Estados Unidos se aprecian centros de alto barómetro. Estas altas presiones continentales migratorias influyen sobre la mitad occidental del continente, hasta el territorio mexicano y el oeste del Golfo de México. Esta situación se mantuvo presente en abril, octubre, noviembre y diciembre; en febrero y marzo, la vaguada se observó ligeramente inclinada hacia el suroeste, desde el sureste de Canadá, hasta la península de Yucatán. Estas circunstancias contribuyeron al desplazamiento de los frentes fríos hacia las inmediaciones del archipiélago cubano.

Período inactivo

En enero (Fig. 4b) se observó una vaguada polar débil, desde el Atlántico noroccidental hacia el suroeste hasta el Saco de Charleston, que afectó la costa oriental del continente norteamericano, mientras que por debajo de 35° N se constató la influencia del Anticiclón Subtropical, situación que persistió durante toda la tem-

porada invernal. En este período, en todos los meses se denotaron anomalías positivas en la columna troposférica, con núcleos máximos entre 8 mgp y 16 mgp, localizados sobre Canadá (en octubre y enero), a lo largo de la costa oriental del continente (en febrero) y en los estados centro-occidentales de los Estados Unidos (en marzo–abril), lo cual indica, en este último caso, una intensificación de las altas presiones continentales. En noviembre y diciembre, los núcleos máximos se localizaron sobre el Golfo de México y el Atlántico.

En diciembre se observaron anomalías negativas sobre el este de Canadá, en noviembre y octubre se localizaron sobre todo el Atlántico, mientras que en abril se hallaban en el sureste de los Estados Unidos (costas de Las Carolinas, Georgia y La Florida), las cuales se extendieron, además, por toda la costa atlántica de América del Norte.

En el Golfo de México, la región occidental de Cuba y la península de la Florida se observaron anomalías positivas desde noviembre hasta abril, con valores que alcanzaron 8 mgp y con máximos en febrero (entre 4 mgp y 8 mgp), asociados a un incremento de la combinación de las altas presiones de origen continental y las oceánicas presentes en este nivel durante estos meses. En octubre, las anomalías encontradas en esta área fueron negativas, con valores de -3 mgp, relacionadas con la influencia de las altas presiones migratorias. El comportamiento descrito evidencia una situación desfavorable para el desplazamiento de los sistemas invernales hacia bajas latitudes.

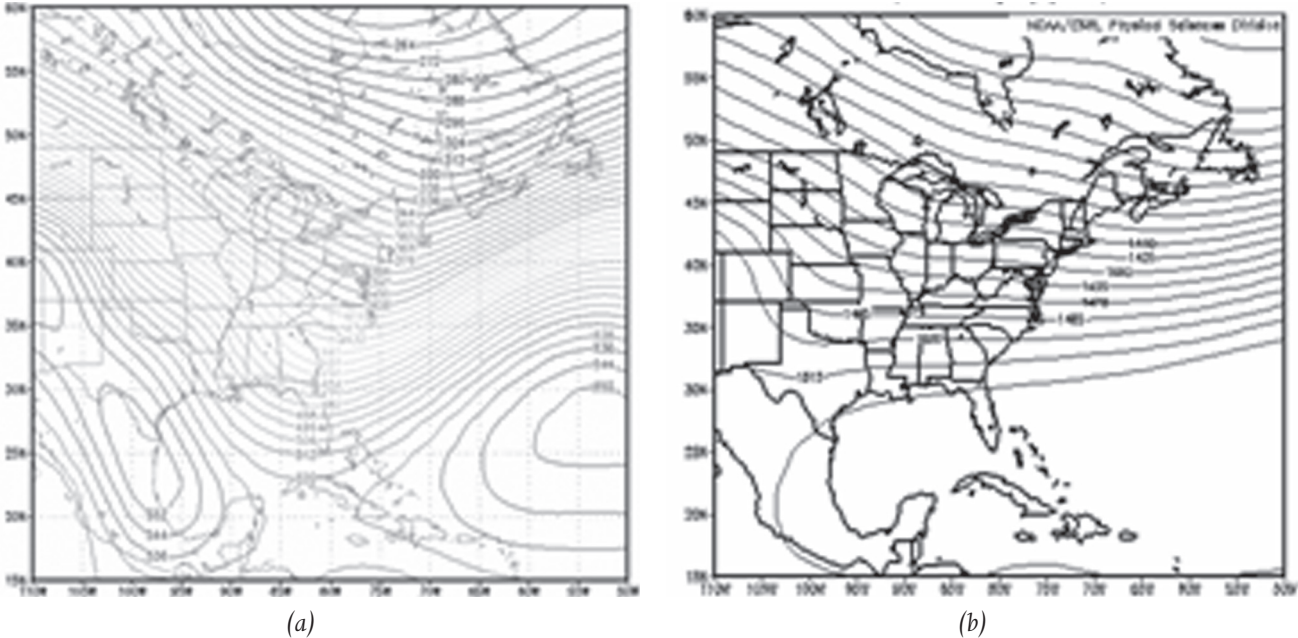


Fig. 4 Mapa medio (enero) en el nivel de 850 hPa.

Análisis de la altura geopotencial en el nivel de 700 hPa

Período activo

En todos los meses, la vaguada polar se extendió, meridionalmente, bien definida (Fig. 5a), desde el norte de los Grandes Lagos, hasta el Golfo de México, afectando la mitad oriental de Estados Unidos, mientras que las circulaciones anticiclónicas se observaron muy débiles y, por ende, se facilitó el avance de la onda polar hacia latitudes tropicales.

Período inactivo

La onda polar se observó más debilitada y se extendió desde el Atlántico noroccidental, hacia el suroeste, hasta la península de la Florida, afectando toda la costa este de los Estados Unidos; por debajo de 30° N no se identifica y solo se observa la influencia del Anticiclón Subtropical, lo cual no permite el avance de la vaguada hacia el este (Fig. 5b).

Desde diciembre hasta abril prevalecieron anomalías positivas en toda el área de estudio, con máximos, en enero, de hasta 20 mgp localizados al

norte del estado de Minnesota. Con igual intensidad, en marzo se localizó otro máximo en el occidente de los Estados Unidos. En febrero, el núcleo intenso llegó hasta 16 mgp, cuando se encontraba al norte de Nueva York, mientras que en diciembre y abril los valores más altos alcanzaron 14 mgp sobre el Atlántico (diciembre) y en la mitad oriental de Canadá (abril).

En octubre y noviembre se observaron anomalías positivas y negativas. Los valores negativos se localizaron sobre el suroeste del Atlántico, mientras que los positivos (entre 16 mgp y 20 mgp) correspondieron a la porción noroccidental del continente norteamericano. Esta situación no contribuye a que penetre la vaguada polar hacia las latitudes tropicales y limita la afectación de los FFF a Cuba.

Análisis de la altura geopotencial en el nivel de 500 hPa

En todos los meses, la onda polar se extendió meridionalmente con su eje norte-sur sobre la región central de los Estados Unidos y penetró en el Golfo

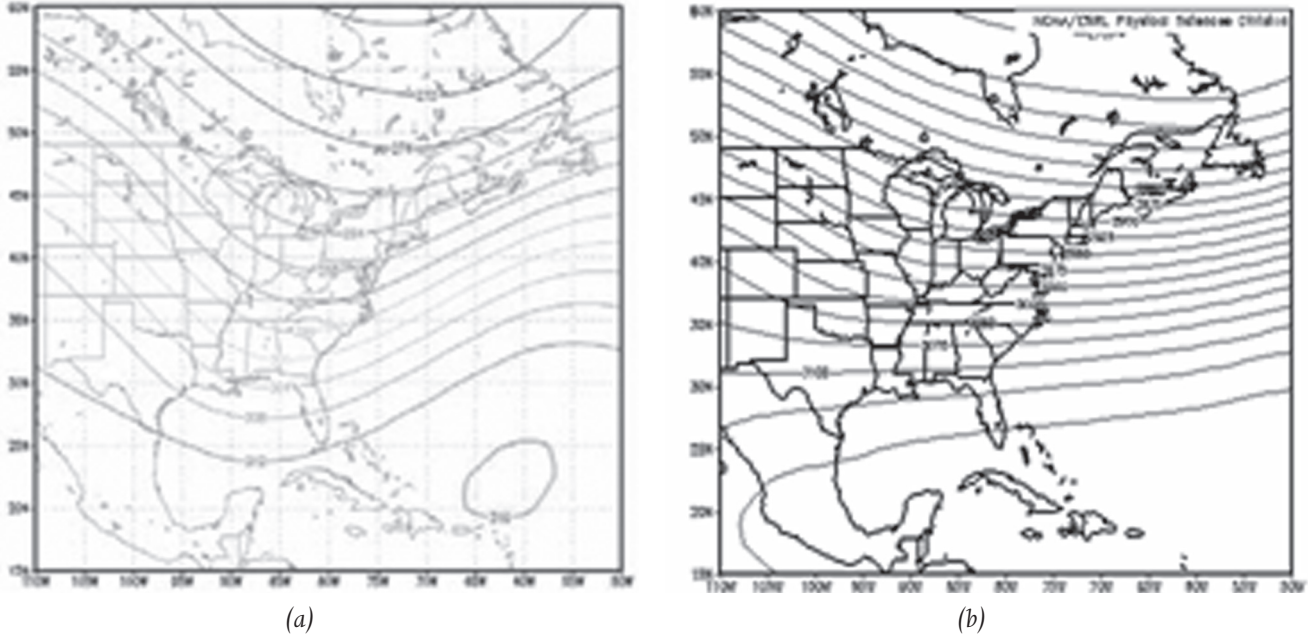


Fig. 5 Mapa medio (enero) en el nivel de 700 hPa.

de México hasta la península de Yucatán, imponiéndose marcadas corrientes del cuadrante IV detrás del eje, lo que delimita las dorsales asociadas a esa vaguada (Fig. 6a).

En el período inactivo se observa un flujo zonal positivo al norte de 25° N y pese a que contribuye al movimiento hacia el este de los sistemas frontales,

las corrientes del cuadrante II que actúan sobre el territorio cubano, asociadas a la influencia de las altas presiones oceánicas, impiden la penetración de la vaguada por debajo de esa latitud (Fig. 6b) y, por tanto, no se manifiestan condiciones favorables para una aproximación y con ello la afectación de esos sistemas meteorológicos a Cuba.

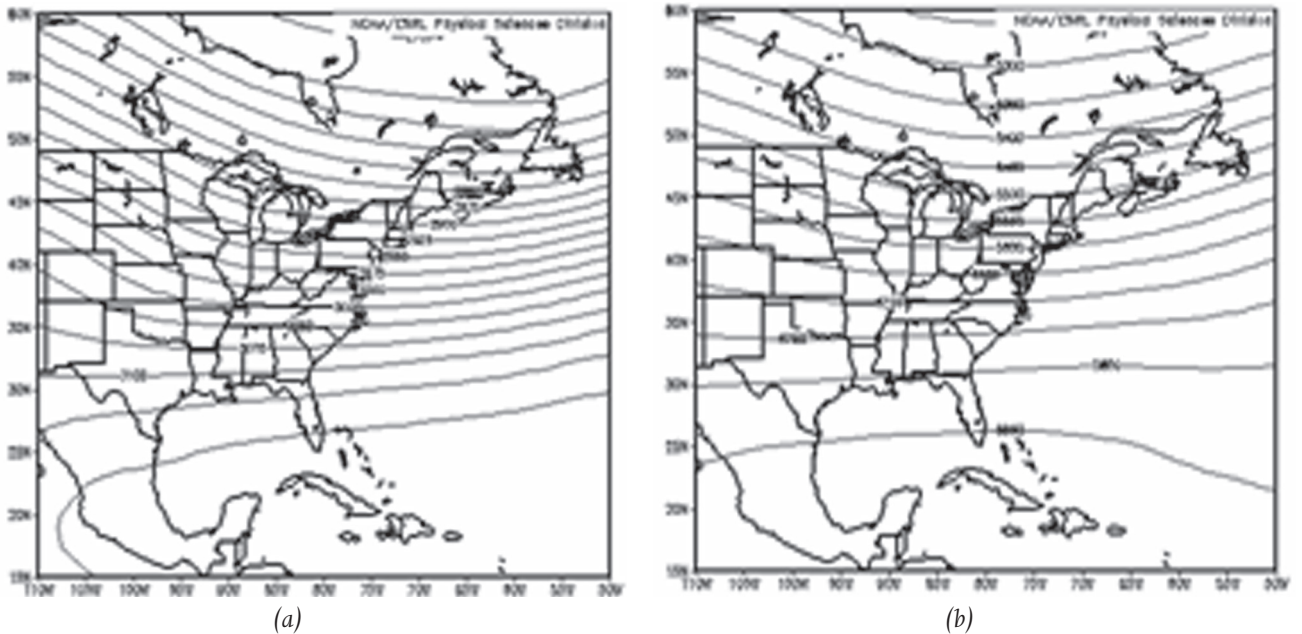


Fig. 6 Mapa medio (noviembre) en el nivel de 500 hPa. a) Período activo; b) período inactivo.

En áreas inmediatas a Cuba se observaron anomalías positivas en todos los meses, con valores máximos que oscilaron entre 3 mgp y 24 mgp, alcanzando los valores más significativos en febrero (15 mgp y 24 mgp); el resto de los meses se mantuvo por debajo de 15 mgp.

Análisis de la altura geopotencial en el nivel de 200 hPa

Período activo

Durante todos los meses, la vaguada polar se observa muy profunda y cerrada, extendiéndose meridionalmente desde Canadá hasta la porción norte del Golfo de México, sobre la mitad oriental del continente norteamericano. La situación meteorológica descrita contribuye al desplazamiento de esa onda hacia el este y las bajas latitudes (Fig. 7a).

Período inactivo

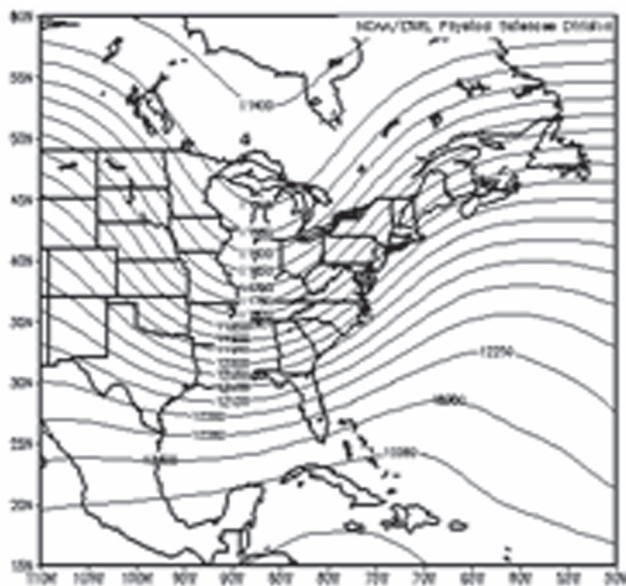
Predomina un flujo zonal positivo al sur de 50° N, más intenso en marzo y abril, con una dorsal sobre el Mar Caribe occidental y central (Fig. 7b).

Este período arrojó anomalías positivas durante todos los meses (octubre–abril), excepto en noviembre, cuando se observaron anomalías negativas sobre el Atlántico. La figura 7 muestra una vaguada muy abierta y desplazada hacia las latitudes medias y altas, presionada por la fuerte dorsal subtropical; con esa situación a la altura de 10 km se corrobora una condición de aporte negativo al movimiento de los FFF hacia el archipiélago cubano.

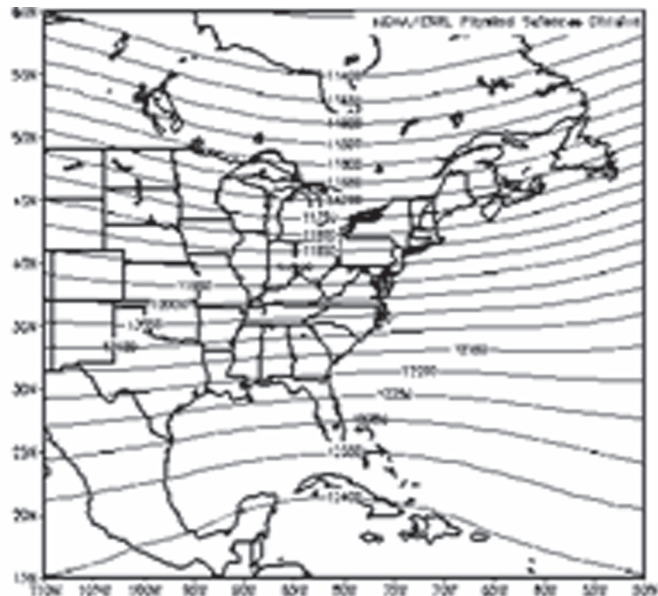
Análisis de la temperatura en el nivel de 850 hPa

De acuerdo con las características de las ondas polares, el campo térmico también responde a estas oscilaciones norte–sur en el nivel de 850 hPa sobre el Golfo de México.

Para el período activo (Fig. 8a), sobre el archipiélago cubano el campo medio de la temperatura refleja una vaguada térmica extensa y profunda, que se extiende meridionalmente, desde el centro de Canadá, hasta la porción sur del territorio mexicano.



(a)



(b)

Fig. 7 Mapa medio (noviembre) en el nivel de 200 hPa.

La isoterma de 7.5 °C se encuentra entre 25° y 35° N en casi todos los meses, excepto en el trimestre diciembre-febrero, donde esa isoterma penetra más hacia el sur, bajando en latitud, y se localiza en las proximidades de 20° N, coincidiendo con el trimestre de mayor actividad frontal de intensidad fuerte.

En la temporada invernal del período inactivo (Fig. 8b), el campo térmico sobre el occidente cubano en el nivel de 850 hPa mostró una orientación casi zonal de las isotermas, las cuales se observan más unidas en el área continental por encima de 30° N. La isoterma de 7.5 °C se localizó al norte de 35° N, más retirada hacia el sur en el trimestre diciembre-febrero, para encontrarse en las inmediaciones de los 30° N. Sobre Cuba y los mares adyacentes, las temperaturas se mantuvieron durante todo el período entre 12.5 °C y 15 °C. La distribución de las isotermas descritas, prácticamente en fase con las isohipsas, contribuyó a que las vaguadas se estacionaran o presentasen un lento desplazamiento y, finalmente, se dispararan en su porción sur o se manifestara un movimiento retrógrado.

La diferencia de la temperatura media entre los períodos analizados (activos e inactivos) osciló entre 1 °C y 3 °C en octubre y noviembre, y fue de 1 °C en enero y marzo. En febrero y abril casi no fue perceptible entre ambas temporadas, mientras que resultó más acentuada en diciembre, cuando los valores se incrementaron a 2 °C y 3 °C.

Análisis de la humedad relativa en el nivel de 850 hPa

El nivel de 850 hPa arrojó la localización de los núcleos de humedad relativa máximos y mínimos (Figs. 9a y b). Los núcleos máximos para ambos períodos presentaron una posición similar, ubicándose sobre el extremo oriental de los Estados Unidos, el sureste de Canadá y la porción sur del territorio mexicano; sin embargo, los valores se encontraron entre 75 % y 80 % para el período inactivo, ligeramente superiores durante el período activo (75 % y 85 %).

En el caso de los mínimos para la humedad relativa, en el período activo se localizaron en las inme-

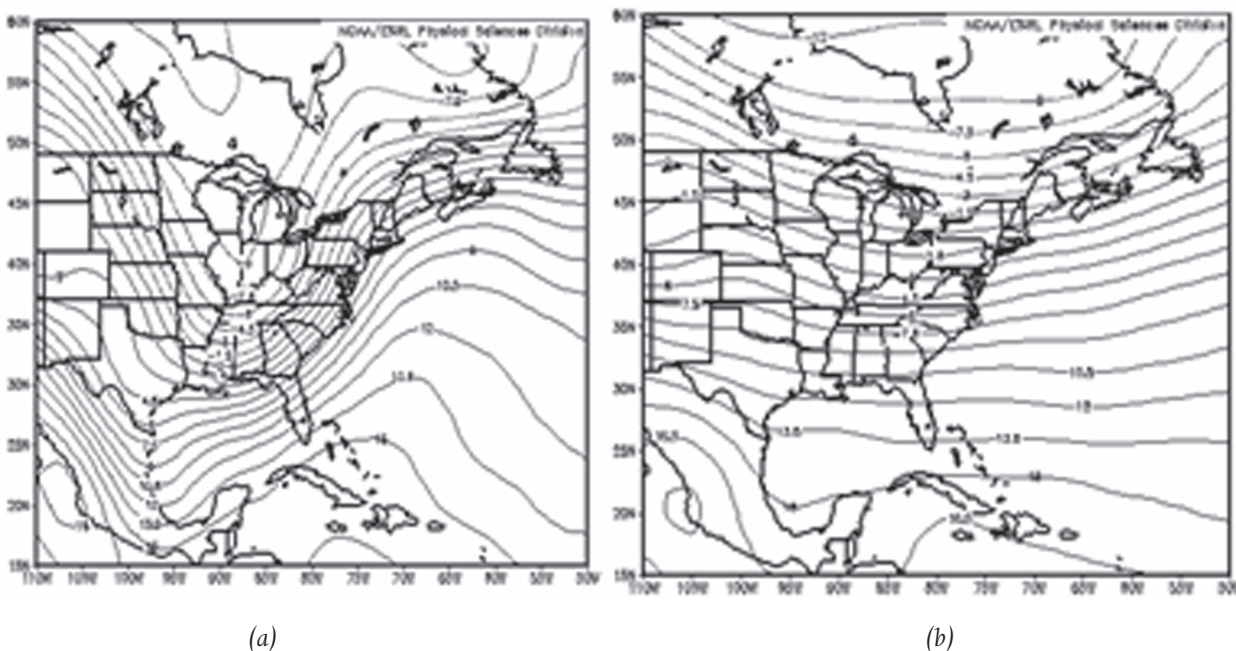


Fig. 8 Mapa medio (noviembre) de la temperatura en el nivel de 850 hPa.



Fig. 9 Posición media de los núcleos de humedad relativa máximos y mínimos en el nivel de 850 hPa. a) Período activo; b) Período inactivo.

diaciones de Texas, Louisiana y la porción noroeste del Golfo de México, con valores entre 30 % y 45 %, mientras que para el período inactivo se hallaban sobre México y la costa sur de los Estados Unidos, con valores entre 20 % y 40 %.

Análisis de la vorticidad en el nivel de 700 hPa

La vorticidad es un campo importante para el pronóstico de las variables nubosidad y precipitación. En el período invernal activo, el campo medio de la vorticidad, situado entre 3 km y 5 km de altura (Fig. 10a), arrojó como característica intrínseca una amplia zona de vorticidad positiva (ZVP) extendida de noreste a suroeste (desde Canadá, hasta el Golfo de México) que abarcaba gran parte de la mitad oriental del continente norteamericano en la mayoría de los meses, excepto en febrero y marzo, cuando la ZVP no estuvo muy definida por debajo de 35° y 40° N, respectivamente. Los núcleos más intensos del período activo se observaron sobre los estados orientales de los Estados Unidos en noviembre a

enero, mientras que en el resto del período se localizaban sobre Canadá. En este nivel, la posición de la ZVP coincide, prácticamente, con la posición de la vaguada polar en la superficie, no así en febrero y marzo. A ambos lados del eje de esta vaguada, existieron valores negativos de vorticidad en octubre, noviembre, diciembre, enero y abril, con núcleos sobre la mitad occidental de los Estados Unidos, el territorio mexicano, el extremo occidental del Golfo de México y el Atlántico occidental, asociados a las dorsales correspondientes. Sin embargo, en el bimestre febrero-marzo, los núcleos de vorticidad negativa cubrieron Las Bahamas, la porción sur de la Florida y la mitad oriental de Cuba hasta el Atlántico.

El período inactivo estuvo caracterizado por una ZVP que se extendió al norte de los 35° N desde noviembre hasta abril, con un área positiva pequeña sobre la mitad occidental de Norteamérica en enero (Fig. 10b). Los núcleos máximos se localizaron en el sureste de Canadá en octubre y febrero; sobre el centro canadiense, en noviembre; sobre Nueva Escocia, en diciembre, marzo y abril; mientras que en enero se encontraba entre 50° y 55° W. Asimismo,

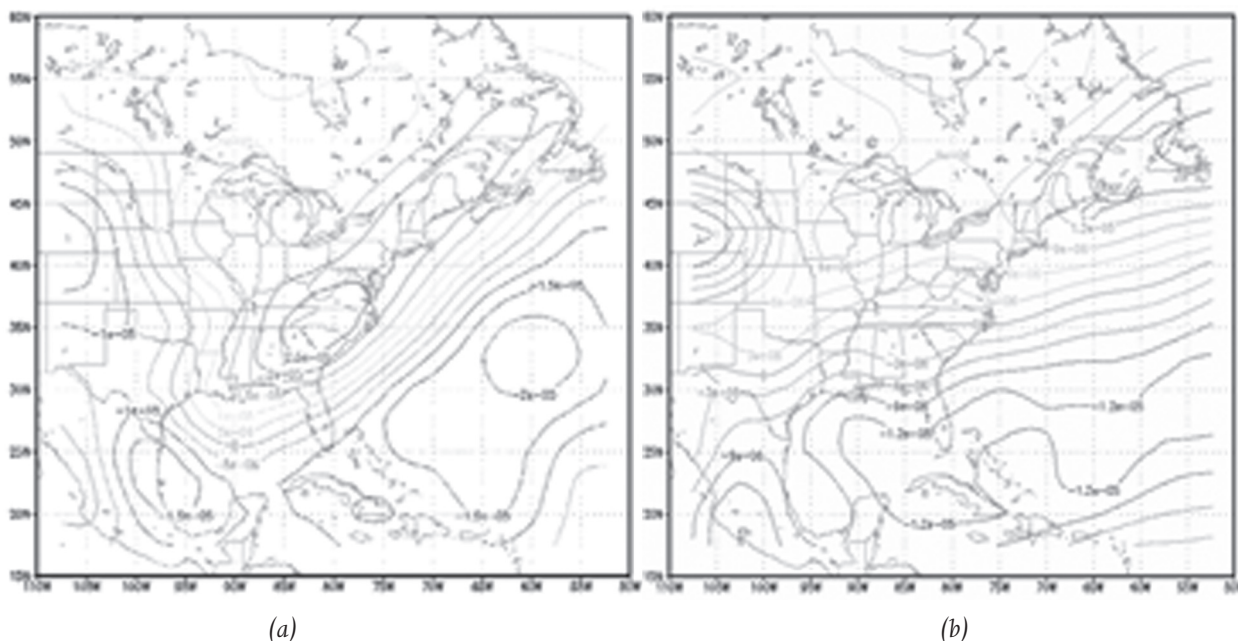


Fig. 10 Mapa medio de vorticidad (enero) en el nivel de 700 hPa.

se denotó una ZVN al sur de 40° N, en octubre, y en las inmediaciones de los 35° N, el resto de los meses, con núcleos sobre el territorio mexicano que, en algunos casos, llegaron al Golfo de México, el sur de la Florida, las Bahamas septentrionales y Cuba, los cuales se observaron con mayor intensidad en este período. Esto corrobora la intensidad de las altas presiones oceánicas que influyen en el área.

Sobre el archipiélago cubano, la vorticidad se caracterizó por la presencia de valores negativos en todos los meses, presentando sus máximos desde octubre hasta enero en la mayor de las Antillas, mientras que en febrero ese núcleo solo afectó a su mitad occidental; estuvieron asociados a la dorsal extendida sobre Cuba y los mares adyacentes, proveniente del Anticiclón Subtropical del Atlántico Norte.

Análisis de la divergencia en el nivel de 500 hPa

El campo divergente por meses para el período activo se caracterizó por la presencia de una amplia zona de convergencia extendida de NE-SW por toda la costa

este del continente norteamericano (Fig. 11a) y que influyó, además, en gran parte del Atlántico, desde el oriente de Canadá, hasta Carolina del Sur en octubre, con valores máximos sobre el estado de Virginia. En noviembre y abril hasta el Golfo de México, con núcleos máximos sobre Carolina del Norte en noviembre y sobre Cabo Hatteras en abril; precisamente, sobre este último también se observaron núcleos en diciembre y enero, los cuales, junto con febrero y marzo, forman la zona convergente que se extendía no solo hasta el Golfo de México, sino hasta Cuba y el Mar Caribe occidental.

Los núcleos máximos en febrero y marzo se localizaron sobre el territorio canadiense. Por detrás de la convergencia observada en octubre se apreció una zona de divergencia amplia, con un núcleo de máxima intensidad (4×10^{-6}) que afectaba el extremo oriental de México, el sur de los estados de Texas y Louisiana, además de Mississippi y Tennessee. En febrero y marzo se observaron zonas de divergencia pequeñas localizadas, fundamentalmente, sobre México y el centro de los Estados Unidos. En los restantes meses se observó una divergencia extendida en

casi toda el área, con marcados centros (2 a 6×10^{-6}) sobre México y los estados centrales de los Estados Unidos. En el territorio cubano, el campo de la divergencia no tuvo grandes fluctuaciones en todos los meses, puesto que en octubre y noviembre se observaron movimientos divergentes. De diciembre a marzo prevaleció la convergencia; en abril, el extremo occidental del territorio fue afectado por una divergencia débil, mientras que sobre el extremo más oriental se observó una convergencia.

En el período inactivo de FFF, las zonas de convergencia cubrían gran parte del área de estudio y se extendían por toda la costa este del continente norteamericano, desde Canadá, hasta el Golfo de México, aunque también se denotaban por la costa oriental de los Estados Unidos y el Atlántico adyacente (Fig. 11b). Los núcleos máximos de convergencia se localizaron sobre el extremo oriental de Canadá, muy cerca de la posición media del centro de bajas presiones observado en el mapa de superficie de presión a nivel del mar. Sobre el occidente de Canadá se observaron áreas divergentes pequeñas en octubre–abril; además, en diciembre y enero se denotaron corrientes descendentes en los estados más occidentales de los

Estados Unidos y México. Los núcleos de máxima divergencia (9×10^{-7}) se mantuvieron durante todos los meses sobre el territorio mexicano.

Análisis de la velocidad vertical w en el nivel de 700 hPa

Para el período activo, los valores máximos de movimientos ascendentes se hallaron entre -0.1 Pa/s y -0.3 Pa/s, localizados sobre el extremo oriental del continente norteamericano e influyendo, además, esos movimientos sobre el Golfo de México, Cuba y el Mar Caribe occidental. En el período inactivo, los movimientos ascendentes se observaron más debilitados, con valores que oscilaron entre -0.02 Pa/s y -0.06 Pa/s sobre Canadá y el Atlántico occidental (noviembre a febrero) y sobre el territorio mexicano (octubre, marzo y abril).

De forma similar, se hizo el análisis de la posición y la intensidad de los movimientos descendentes. Se constataron, para el período activo, núcleos máximos entre 0.13 Pa/s y 0.3 Pa/s sobre los estados de Texas, Louisiana y Mississippi; en el caso del período inactivo, los núcleos máximos de movimientos des-

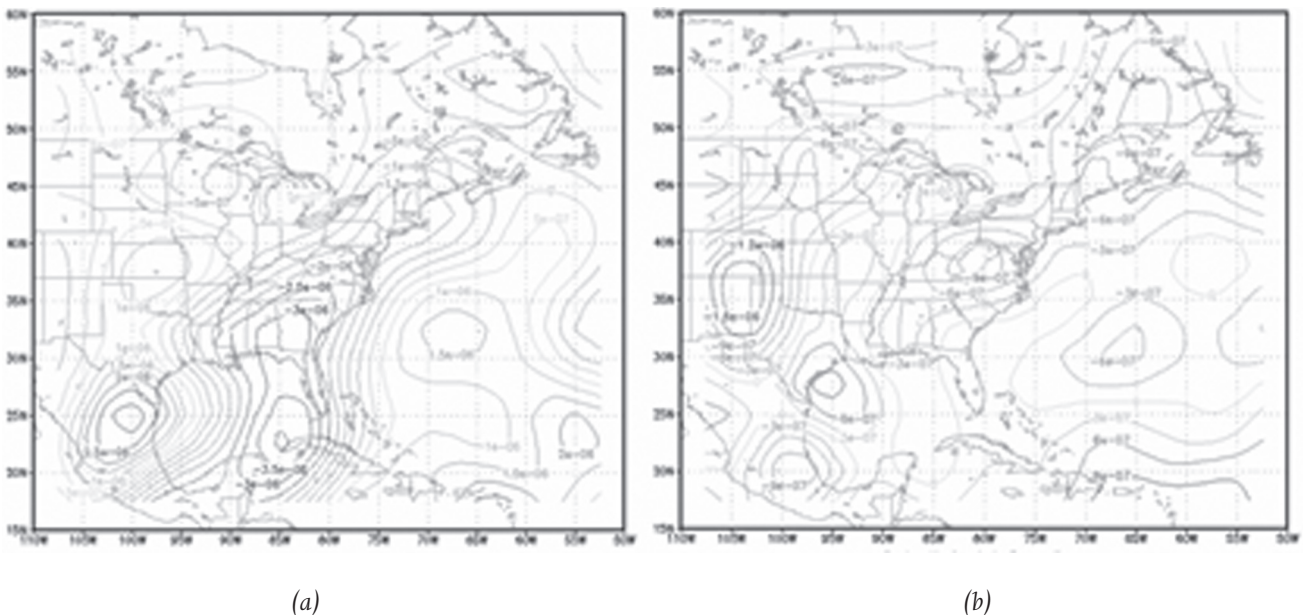


Fig. 11 Mapa medio de divergencia (enero) en el nivel de 500 hPa.

cendentes se hallaban más al noroeste, sobre el estado de Colorado, con valores entre 0.03 Pa/s y 0.08 Pa/s.

En el nivel de 500 hPa, la distribución media de los movimientos verticales asociada al período inactivo mostró núcleos ascendentes y descendentes. Se observaron anomalías negativas sobre Cuba y el Golfo de México, con valores entre 0 Pa/s y -0.01 Pa/s en octubre. En diciembre se observaban entre -0.0025 Pa/s y -0.0075 Pa/s; en el bimestre marzo-abril, los valores se encontraban entre 0 Pa/s y -0.0075 Pa/s, mientras que en noviembre se encontraba en 0.01 Pa/s. En el primer mes del año, las anomalías se hallaban entre 0.0075 Pa/s y -0.05 Pa/s y, por último, en febrero oscilaron entre -0.0025 Pa/s y -0.0125 Pa/s.

En noviembre-abril, la anomalía negativa se asoció con una disminución de los movimientos descendentes en el entorno de Cuba; en octubre, los valores negativos arrojaron un descenso en los movimientos ascendentes en esa área.

Análisis del espesor en la capa 1000/500 hPa

Para el período activo, la distribución media del espesor estuvo caracterizada por la presencia de una vaguada térmica profunda extendida desde Canadá hasta el sur de México, con valores entre 5 100 mgp y 5 700 mgp, mostrando por el gradiente meridional el intercambio entre latitudes medias y bajas (Fig. 12a). En el período inactivo se observó un flujo casi zonal, desde el territorio canadiense, hasta el Golfo de México y, en algunos meses, hasta el Mar Caribe occidental, con valores entre 5 100 mgp y 5 750 mgp. Estos valores altos se deben a una advección más cálida y son consecuentes con el campo térmico en el nivel de 850 hPa (Fig. 12b).

Las anomalías en el espesor indican cuánto más fría o más cálida se presenta una región con relación

a otra. En todos los meses del período inactivo se observaron anomalías positivas a lo largo de toda el área de estudio, indicando un calentamiento. En enero y febrero, las máximas anomalías positivas se encontraban en las proximidades de los Grandes Lagos, con valores entre 35 mgp y 30 mgp, respectivamente; en diciembre y octubre, los máximos se localizaban en la porción este de Canadá, con valores de 33 mgp y 30 mgp; en noviembre, se encontraban sobre el estado de Montana, con valores de 35 mgp. Estos núcleos presentaron variaciones en la posición y la intensidad en marzo y abril, para encontrarse en abril sobre Wisconsin, con un valor de 15 mgp, y en marzo sobre los estados de Nuevo México y Colorado, con un valor de 25 mgp.

En áreas próximas al territorio cubano se observaron anomalías positivas, con valores de hasta 20 mgp, durante toda la temporada invernal.

Análisis del viento en el nivel de 200 hPa

Los niveles superiores de la troposfera son muy representativos para el análisis de la situación de las corrientes en chorro polar y(o) subtropical y sus núcleos, en específico, mediante el análisis del viento en el nivel de 200 hPa.

En los meses invernales del período activo frontal, el eje de la corriente en chorro asociado al campo de viento arrojó una orientación de NE-SW, extendido desde Nueva Escocia hasta la costa pacífica de México, con una disminución de su extensión en febrero y abril (Fig. 13a).

Los máximos valores del viento medio (el núcleo máximo) se comportaron muy similar en todos los meses, con valores entre 47.5 m/s y 60 m/s; el más bajo se alcanzó en noviembre y los más altos se obtuvieron en el bimestre enero-febrero.

La posición de los núcleos máximos se mantuvo entre las latitudes de 25° y 40° N, y entre las longi-

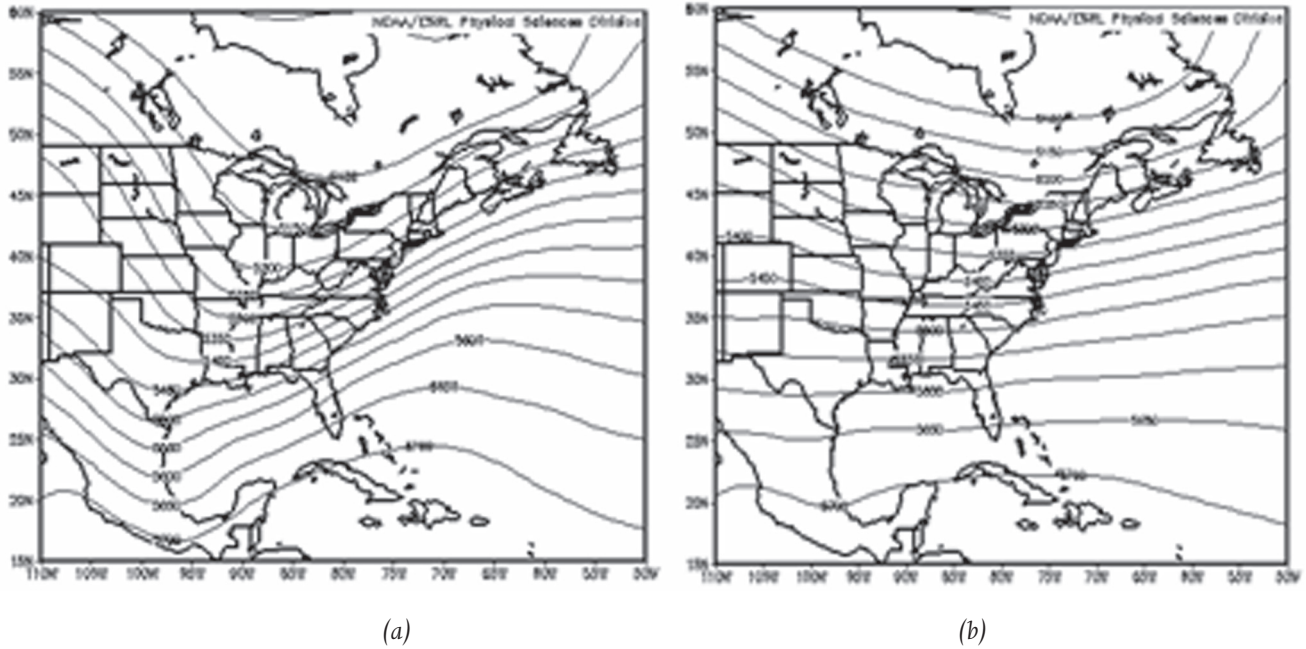


Fig. 12 Mapa medio del espesor (enero) en la capa 1000/500 hPa.

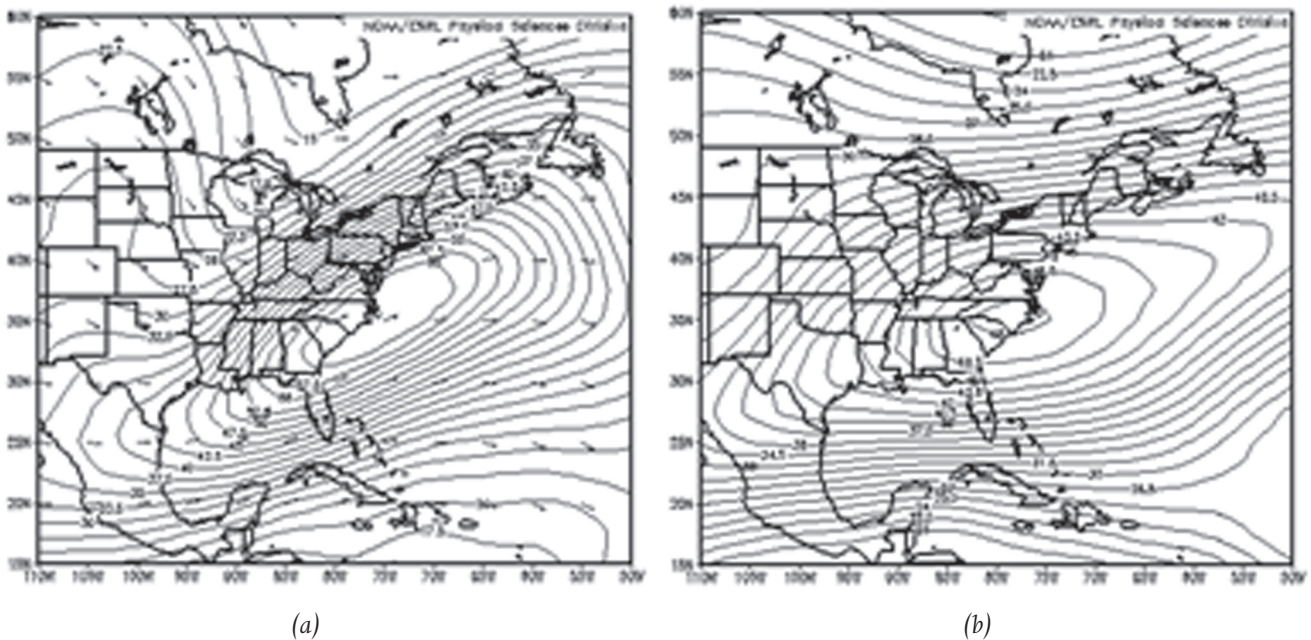


Fig. 13 Mapa medio del viento (enero) en el nivel de 200 hPa.

tudes de 65° y 85° W para casi todos los meses; solo en abril la posición de estos núcleos cambió, para extenderse entre 25° y 40° N y entre 105° y 75° W.

Sobre el territorio cubano y, de manera significativa, sobre la región occidental, el flujo se mantuvo de componente SW durante octubre, enero y febrero; el

resto de los meses se observaron corrientes con una mayor componente del oeste.

Los valores del viento medio más pequeños se observaron en octubre, con valores que oscilaban entre 18 m/s y 23 m/s. A partir de entonces, esos valores ascendieron considerablemente hasta alcanzar, en mar-

zo, entre 34 m/s y 38 m/s. En abril, esas cifras volvieron a disminuir en comparación con el mes anterior.

En el período inactivo, sobre el archipiélago cubano, la posición media del eje de vientos máximos se observó extendida casi zonal, desde 50° W, hasta 110° W por 40° N en octubre. En los meses restantes, el eje se extendió entre 25° y 40° N, y desde 50° y 110° W (Fig. 13b).

Los núcleos máximos oscilaron entre 33 m/s y 49 m/s. La posición media de estos núcleos se mantuvo en casi todos los meses por encima de 30° N, excepto en marzo y abril, cuando se observó ligeramente por debajo de esta latitud. En abril el núcleo máximo se localizaba sobre el estado de Texas, mientras que en los meses restantes estos núcleos se observaron en la costa este de los Estados Unidos.

Sobre el occidente cubano, el flujo de viento se comportó de manera homogénea durante todos los meses, con marcadas corrientes del oeste; los valores máximos (entre 32 m/s y 35 m/s) se alcanzaron en marzo, y disminuyeron en el resto de los meses, hasta alcanzar en octubre los mínimos (entre 13 m/s y 17 m/s).

El análisis del comportamiento del campo medio del viento a la altura de 12 km en los períodos activo e inactivo arroja que, tanto la posición del eje, como la intensidad de la corriente en chorro desempeñan un papel importante en la afectación a Cuba de los sistemas frontales de intensidad fuerte, manifestándose como una contribución positiva el eje orientado noreste-suroeste desde la porción norte del Golfo de México y la península de la Florida, la costa oriental de los Estados Unidos y el Atlántico adyacente, así como un núcleo de intensidad media de 60 m/s, en oposición a una orientación del eje zonal con un núcleo de intensidad media de 48 m/s.

Patrones atmosféricos de teleconexión

Los patrones atmosféricos son referidos como estados de flujo en la troposfera. Por ejemplo, un patrón de referencia en el Atlántico Norte es el dipolo norte-

sur en temperatura. Esos patrones referidos son el resultado complejo de la interacción entre las montañas, los océanos, las diferentes superficies y condiciones dinámicas de la atmósfera, así como otros procesos.

El tiempo local es afectado por los diferentes patrones de la circulación por mediación de los sistemas béricos en la atmósfera, el campo de viento asociado que, en su movimiento, perturba las masas de aire y, en consecuencia, la advección térmica, así como la humedad, la estabilidad atmosférica y el movimiento de las tormentas.

En este trabajo se abordarán dos de los patrones de teleconexión de mayor contribución a la variabilidad tropical en la escala temporal, en particular, a los sistemas invernales que afectan al archipiélago cubano en el período seco. Estos son el evento EL Niño/Oscilación Sur (ENOS, por sus siglas en inglés) y la Oscilación del Atlántico Norte (NAO, por sus siglas también en inglés).

EL Niño/Oscilación Sur (ENOS)

ENOS es el fenómeno océano-atmósfera caracterizado por las fluctuaciones del campo de la presión superficial en los océanos Pacífico tropical oriental y Pacífico tropical occidental, asociado a los eventos El Niño y La Niña. La presión superficial es más alta que lo normal en el Pacífico tropical occidental y más baja que lo normal en el Pacífico tropical oriental durante el evento El Niño, mientras que la situación se invierte en presencia del evento La Niña (Philander, 1990). Cuando está presente este evento de teleconexión, los inviernos en el hemisferio norte se caracterizan por una intensificación en el flujo de los oeste en la troposfera superior sobre el Pacífico nororiental y el Golfo de México (Yarnal, 1985; Aceituno, 1989).

La relación entre la circulación atmosférica en presencia del evento ENOS y la variabilidad de los frentes fríos que afectan a Cuba se examinará por los

patrones de flujo, en particular, aquellos asociados a los de intensidad fuerte. Esta relación fue analizada por otros investigadores cubanos (González C, 1999), en especial, la frecuencia mensual de los frentes fríos. Este autor encontró, una anomalía positiva en la frecuencia de afectación a Cuba de los sistemas frontales; por esta razón, en este trabajo se analizará la incidencia del ENOS en los FFF por medio del campo de viento en la troposfera alta, de acuerdo con lo expuesto por autores foráneos.

Se tomaron en cuenta los eventos ENOS moderados y fuertes ocurridos dentro del período de estudio (1950–2008), y no se consideraron los eventos clasificados como débiles, puesto que su influencia no se ha valorado de significativa.

En el análisis de la velocidad del viento en el nivel de 300 hPa se consideró la posición y la intensidad de la corriente en chorro (su núcleo más intenso), así como el valor de las isógonas sobre el occidente de Cuba y los mares adyacentes, las que estaban asociadas al sistema de grandes vientos en alturas de 10 km a 12 km; en este trabajo se relacionó la fase negativa de la NAO para cada mes del período activo y se obtuvo que el núcleo central presenta un incremento en su intensidad que oscila entre 50 m/s y 60 m/s, situado en el Atlántico occidental, próximo a la costa oriental de los Estados Unidos, entre 35° y 42° N. Las velocidades climáticas de ese centro se hallan entre 32 m/s y 45 m/s, y su posición media en los 40° y 50° N. Sobre Cuba y los mares adyacentes se denotó, en octubre–abril, un incremento en las velocidades entre 16 m/s y 32.5 m/s, superiores a las climáticas, entre 13 m/s y 26 m/s. El eje de la corriente mostró una orientación predominante SW/NNE. Resulta de interés señalar que en todos los meses asociados a esas situaciones (octubre–abril), estuvo presente un flujo zonal positivo en bajas latitudes de la troposfera alta. La figura 14 se muestra la situación del campo de viento correspondiente a la temporada invernal 1976–1977; se observa la posición y la intensidad de

la corriente en chorro, así como la orientación de su eje. Esta situación fue comparada con la climática y arrojó valores anómalos positivos sobre el occidente de Cuba y los mares adyacentes, así como en el valor del núcleo central.

Los resultados obtenidos son consecuentes con los hallados por Aceituno (1989) con relación al flujo troposférico superior, con predominio de los oestes, al considerar la mayor influencia del ENOS en la fase negativa de la NAO sobre el sur de los Estados Unidos y el Atlántico, con lo cual se favorecen los desarrollos ciclónicos invernales. También se señala que el tipo de FFF prevaleciente es clásico, asociado a esas bajas extratropicales.

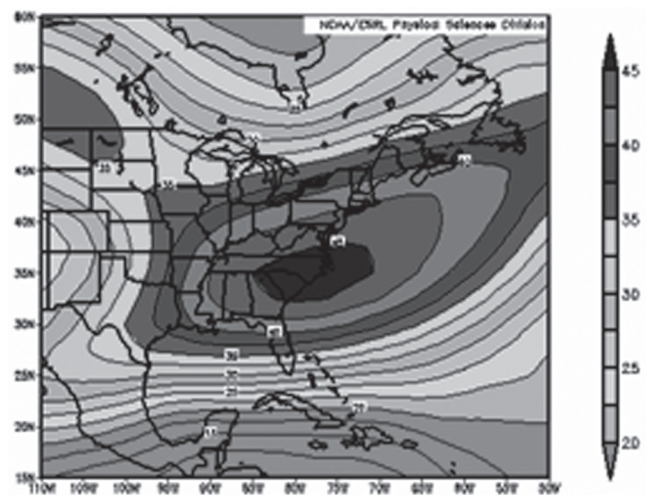


Fig. 14 Velocidad media del viento (m/s) en el nivel de 300 hPa en el período diciembre–enero de 1976–1977.

Oscilación del Atlántico Norte (NAO)

Esta oscilación se caracteriza por anomalías en la troposfera media en los centros béricos de la baja de Islandia y el Anticiclón Subtropical del Atlántico Norte, y presenta dos fases: una positiva y otra negativa. Cuando los valores de la baja de Islandia están por debajo (sobre) de lo normal, los valores de la altura del centro anticiclónico subtropical son, generalmente, superiores (por debajo) a la norma

(Barnston and Livezey, 1987). Ambas fases de la NAO están asociadas con los cambios en la intensidad y la situación de la corriente en chorro (Hurrell, 1995). Walsh *et al.* (2001) afirmaron que la fase negativa de la NAO precede al movimiento de los frentes fríos a lo largo de la costa oriental de los Estados Unidos y el Golfo de México, e influyen de forma significativa en la irrupción de aire frío que acompaña a ese proceso. Entre las motivaciones por las cuales se valora en este estudio la oscilación NAO puede apuntarse lo expresado por Wallace y Gutzler (1981) cuando afirman que los patrones de esta oscilación están asociados con fluctuaciones en la intensidad media climatológica de la corriente en chorro en el Atlántico occidental, sistema que — como se expuso — desempeña un papel importante en los frentes fríos que afectan al archipiélago cubano.

Otro aspecto de los eventos de teleconexión que incide en la variabilidad tropical es la relación entre ENOS y NAO, notándose que la influencia del evento ENOS sobre NAO se encuentra en el sur de los Estados Unidos y el centro del Atlántico Norte, pero, además, el evento El Niño favorece la fase negativa de NAO y contribuye a las anomalías ciclónicas en esas regiones.

En los resultados hallados por Halpert y Bell (1997) quedaron muy bien definidas las fases positiva y negativa de NAO, así como aquellos períodos invernales en el hemisferio norte en los que la fase negativa de ese evento teleconectivo fue significativa para el comportamiento del flujo troposférico. En concordancia con esa investigación, en este estudio se evalúa el campo térmico en los niveles de la superficie a nivel del mar y en el nivel de 850 hPa, representando a la troposfera baja, en las temporadas invernales estudiadas, con el objetivo de caracterizar el comportamiento de la temperatura en esos niveles, que podría reflejar la incidencia de la fase negativa de NAO en los FFF que afectan a Cuba.

El análisis a la distribución media de la tempera-

tura en el nivel de 850 hPa y en la superficie a nivel del mar arrojó anomalías negativas entre -1°C y -2°C sobre el occidente cubano. La figura 15 muestra el valor anómalo negativo de -1.5°C sobre el occidente cubano, el que se extiende sobre la porción sur de la península de la Florida y las Bahamas, asociado a una masa de aire más fría que la climática que podría estar relacionada con la intrusión de aire polar en bajas latitudes, corroborando el patrón bipolar asociado a NAO en su fase negativa, con el máximo de -8°C en el estado de Missouri.

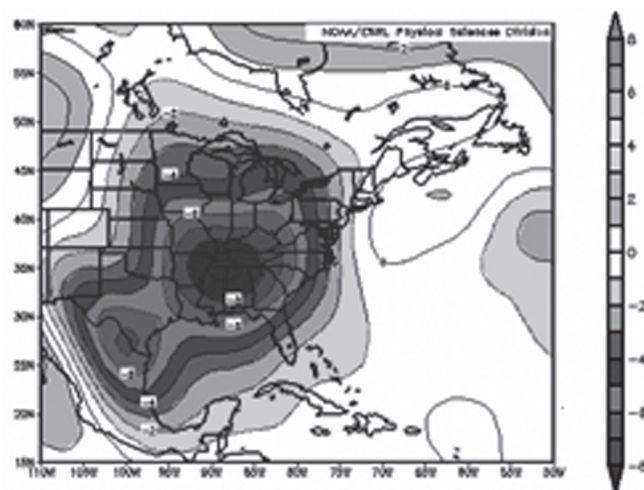


Fig. 15 Anomalía de la temperatura en el nivel de 850 hPa en la temporada invernal 1976-1977.

Conclusiones

1. Se denotó una alta variabilidad estacional y otra interestacional, con un máximo de nueve FFF en una temporada y un período de más de diez temporadas sin FFF.
2. La influencia de los FFF sobre el occidente de Cuba presentó, por sus tipos, el comportamiento siguiente: 92.94 % clásicos, 3.53 % revesinos y 3.53 % secundarios.
3. La frecuencia de los FFF y la intrusión de aire frío en el occidente cubano es una consecuencia directa de la intensidad y la amplitud de la circulación en latitudes medias.

4. Se determinaron los patrones de flujo principales en la troposfera, asociados a los períodos activos e inactivos de los FFF cuando afectan al archipiélago cubano. En el período activo se denotó de forma significativa un flujo del cuadrante IV asociado a la vaguada polar profunda que está representada desde la troposfera baja hasta las alturas entre 10 km y 12 km, con su eje extendido meridionalmente que delimita las dorsales que forman la onda larga asociada. En el período inactivo de los FFF, se denotó un flujo zonal positivo débil y retirado hacia las latitudes al norte de 30 ° N y la dorsal subtropical bien estructurada, desde la superficie a nivel del mar, hasta la troposfera media y, en ocasiones, alta.
5. La climatología sinóptica desarrollada muestra las configuraciones medias de las distintas variables (temperatura y humedad) y los campos meteorológicos (divergencia, vorticidad y movimientos verticales) en los diferentes niveles de la troposfera para los períodos activo e inactivo.
6. Se analizó la relación de los eventos teleconectivos ENOS y NAO con los FFF que influyen sobre Cuba, y se determinaron las particularidades en el comportamiento del campo térmico en la troposfera baja con anomalías negativas entre -1 °C y -2 °C sobre el occidente cubano. En el campo de viento y flujo en la troposfera superior se consideró la mayor influencia de ENOS en la fase negativa de NAO sobre el sur de los Estados Unidos y el Atlántico, favoreciendo los desarrollos ciclónicos invernales, señalándose los FFF de tipo clásico que están asociados a esas bajas extratropicales.

Referencias

- Aceituno, P 1989, 'On the functioning of the Southern Oscillation in the South American: Sector. Part II upper-air circulation', *Journal of Climate*, vol. 2, pp.341–355.
- Barnston, G & Livezey, R 1987, 'Classification, Seasonality and Persistence of Low-Frequency Atmospheric Circulation Patterns', *Mon. Wea. Rev.*, vol. 115, pp. 1083–1126.
- González, M L 1999, Contaminación Atmosférica. Inédito.
- González, C 1999, 'Climatología de los frentes fríos que han afectado a Cuba 1916–1917 hasta 1996–1997', *Revista Cubana de Meteorología*, vol. 6, no.1. pp.15–19.
- Halpert, M & Bell, G 1997, *Climate Assessment for 1996*.
- Hurrell, J 1995, 'Decadal trends in the North Atlantic. Oscillation: Regional temperatures and precipitation', *Science*, vol. 269, pp. 676–679.
- Philander, S 1990, 'El Niño, La Niña and the Southern Oscillation', *International Geophysics Series*, vol. 46.
- Wallace, J & Gutzler, D 1981, 'Teleconnections in the Geopotential Height Field during the Northern Hemisphere Winter', *Mon.Wea.Rev*, vol 109, pp.784–812.
- Walsh, J, Portis, D, & Lamb, P 2001, 'Extreme cold outbreaks in the United States and Europe, 1948–1999', *Journal of Climate*, vol. 14, pp. 2642–2658.
- Yarnal, B 1985, 'A 500 mb synoptic climatology of Pacific Northwest coastal winters in relation to climatic variability, 1948–1949 to 1977–1978', *J. Climatology*, vol. 5, pp. 237–52.