

Condiciones sinópticas más favorables para el aprovechamiento de la energía eólica en Cuba. Período poco lluvioso

Most favorable synoptic conditions for the exploitation of the wind energy in Cuba. Dry raining season

Juliet Perdigón Morales

Instituto de Meteorología
juliet.perdigon@insmet.cu

Geidy Rodríguez Vera

Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas
geidy@instec.cu

Alfredo Roque Rodríguez

Instituto de Meteorología
alfredo.roque@insmet.cu

Entregado: 4 de abril, 2012; aceptado: 9 de octubre, 2012

Resumen

En el presente trabajo se definen las condiciones sinópticas más favorables (CSF) del período poco lluvioso del año, para el aprovechamiento de la energía eólica en Cuba. Mediante un enfoque climatológico-sinóptico se identifican los valores anómalos positivos significativos de la rapidez media diaria del viento y sus causas a escala sinóptica a partir de su clasificación subjetiva. Las diferencias significativas entre las poblaciones pertenecientes a uno y otro tipos de condición sinóptica se estimaron por medio del estadígrafo de prueba Z; se tomó como base de datos las series observacionales de la rapidez media diaria del viento de 17 estaciones meteorológicas de superficie, de una muestra de 33 años (1977-2009). Se examina, además, la distribución de frecuencias por mes para las CSF identificadas, incluyendo un análisis particular de los efectos de estas en el régimen de vientos sobre los puntos geográficos seleccionados. Como resultado, se definió un total de 14 condiciones sinópticas más favorables para el aprovechamiento del viento como recurso energético en Cuba. Del total de días identificados con anomalías positivas significativas, 47 % estuvo asociado con la influen-

cia de anticiclones migratorios de origen continental. La costa norte de la región centro-oriental mostró las mayores anomalías positivas de la rapidez media del viento, favorecidas por un grupo de condiciones sinópticas que incluyen a las más frecuentes; todo ello corroboró a esta región como la más idónea de Cuba para el aprovechamiento del viento como recurso energético en la generación de electricidad.

PALABRAS CLAVE: Rapidez del viento, condiciones sinópticas, energía eólica.

Abstract

In the present research the dry raining season most favorable synoptic conditions (FSC) for the exploitation of the wind energy in Cuba were defined and characterized. With a climatological-synoptic approach, the positive anomalous values of the daily mean wind speed were identified, as well as their causes in a synoptic scale from its subjective classification. The significant differences between the population belonging to one or another synoptic condition kind were estimated from the stratigraphy of Z test. As data background, the observational series of the daily mean speed of the wind from 17 weather

stations in the period 1977–2009 was taken. Moreover, the variation and distribution of the frequencies by months of the FSC are examined including a detailed analysis of their effects in the wind patterns on the diverse selected geographical points. As a result of the previous analysis 14 most favorable synoptic conditions were defined, mainly associated —the 47 %— with the influence of migratory anticyclones of continental origin. The north coast of the mid-eastern region was the most favored one with significant positive anomalies of the wind mean speed, under the influence of a large group of the FSC including the most frequent ones. Therefore, it confirms this region as the most suitable in Cuba for the exploitation of the wind as source of energy in the production of electricity.

KEYWORDS: Wind speed, synoptic conditions, wind energy

Introducción

Poderosas son las razones que existen para dirigir los esfuerzos hacia el aprovechamiento de los recursos renovables en la obtención de energía; estas contemplan los serios problemas, tanto económicos, como medioambientales, que acarrea el empleo de las fuentes convencionales; en el caso particular de Cuba, se suma el gran interés de disminuir la dependencia energética exterior. Dentro de las posibilidades que ofrecen las distintas energías alternativas, la eólica presenta ventajas por encima de otras fuentes de energía, puesto que la explotación del recurso eólico no implica liberación de desechos tóxicos; es una energía inagotable, no requiere de grandes áreas de captación y abunda en muchas regiones, principalmente costeras y montañosas (Colectivo de autores, 2007).

En Cuba se han realizado estudios de prospección del viento con el interés de conocer sus potencialidades reales para su aprovechamiento mediante el

despliegue de aerogeneradores autónomos, sistemas híbridos y parques eólicos; además de evaluar el rendimiento económico-financiero de tales instalaciones y estimar con una precisión mayor la potencialidad energética de distintas regiones del país.

Proenza (2004) evaluó la potencialidad de las áreas costeras, principalmente, del litoral norte de la mitad oriental del país. Una versión del *Atlas eólico de Cuba* se obtuvo a partir del modelo WASP (Wind Analysis Speed Program, por sus siglas en inglés) y la red de datos de superficie (Soltura *et al.*, 2006), en el cual se resumen la estadística y la climatología eólica de 49 estaciones meteorológicas, con un análisis local de la rugosidad que facilita una mejor resolución microescalar. Perigó (2007) realizó estudios de prospección a partir de la modelación del recurso eólico en el municipio Maisí y obtuvo los terrenos más idóneos para su aprovechamiento. Roque *et al.* (2007) obtuvieron el perfil vertical medio del viento para diferentes condiciones físico-geográficas y con distintas estratificaciones de la atmósfera, confirmando que los valores más altos de rapidez del viento se alcanzan en la costa norte de la zona oriental de Cuba. A su vez, Álvarez *et al.* (2008) relacionaron el estado del tiempo para cuatro estaciones del territorio nacional vinculadas con el empleo de la energía del viento. Carrasco (2008) estudió los efectos de la brisa de mar en el aprovechamiento de la energía eólica.

El pronóstico de la rapidez media mensual en lugares de interés energético resulta un tema de notable importancia para el país; esto permitiría a los despachadores de carga conocer la energía que podrá generar el parque y, según sea, tomar decisiones que favorecerán un mejor servicio de electricidad y contribuirá a reducir el gasto de combustibles, con una planificación correcta del consumo de estos. Aunque muy poco se ha avanzado en esta dirección. Matos *et al.* (2008) desarrollaron un modelo simple para la predicción de la generación eólica (MOSIMPRE) utilizando los *procesos sinópticos objetivos* (PSOs) que es-

tablecieron Fernández y Díaz, 2005. Este constituye el primer modelo de pronóstico para parques eólicos realizado en Cuba con herramientas de la climatología sinóptica; sin embargo, este se ha aplicado a un punto específico del país, tomando en consideración procesos sinópticos que reflejan un comportamiento medio de la troposfera, bajo un enfoque sinóptico-climatológico en el cual se establece el nexo entre la circulación de la atmósfera a escala sinóptica y el comportamiento del campo de viento.

El objetivo de este trabajo es identificar y caracterizar las condiciones sinópticas más favorables para el aprovechamiento del viento como recurso energético en Cuba durante el período poco lluvioso del año; para ello, se encauza desde la perspectiva climatológico-sinóptica, enfocándose en las anomalías de la rapidez media del viento y las causas sinópticas involucradas. De este modo, el siguiente estudio difiere de trabajos antecedentes (Pazos, 1998; Fernández y Díaz, 2005) que se orientan en el comportamiento medio de condiciones atmosféricas y en cómo estas influyen sobre el régimen de viento. Con esta investigación se adquieren pasos preliminares en el desarrollo futuro de un método para el pronóstico de la rapidez media del viento en regiones de interés energético, a partir de la identificación de las condiciones

sinópticas que favorecen los mejores registros de la rapidez media del viento.

Materiales y métodos

Para la realización de esta investigación se emplearon datos provenientes de la Red Nacional de Estaciones Meteorológicas de Superficie, disponible en el Sistema de Administración de Datos Climáticos, procesados en el Centro del Clima del Instituto de Meteorología de Cuba.

Se emplearon los valores de la rapidez media diaria del viento en superficie en el período 1977-2009, registrados en un total de 17 estaciones en diferentes puntos del archipiélago cubano. Estas se seleccionaron de modo que abarcasen toda la isla de Cuba en aras de obtener una mejor representación espacial en el reconocimiento del efecto que producen las diferentes situaciones sinópticas sobre el régimen de vientos (Fig. 1).

Para el estudio de las configuraciones sinópticas se definió un espacio limitado en el plano horizontal por las coordenadas 10 y 50 grados de latitud norte, así como 110 y 50 grados de longitud oeste (Fig. 2), área óptima en el análisis de los sistemas que actúan directamente sobre el estado del tiempo en Cuba.

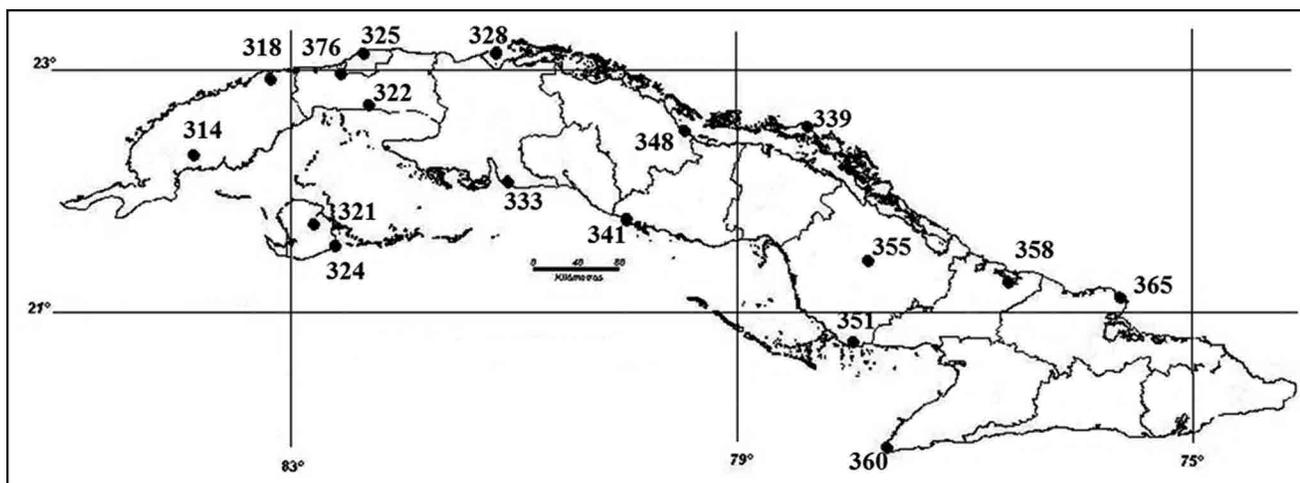


Fig. 1 Distribución espacial de las estaciones meteorológicas seleccionadas.

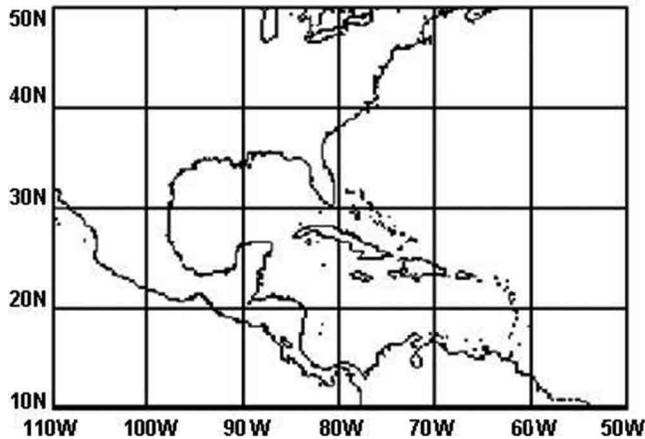


Fig. 2 Espacio sinóptico utilizado.

Las cartas sinópticas, hasta 2002, se consultaron en el archivo del Instituto de Meteorología de Cuba; de 2003 en adelante, se emplearon las almacenadas en el Centro de Pronósticos de esa institución, y algunas fueron obtenidas de los datos del reanálisis del National Center of Environmental Prediction (NCEP). Los mapas sinópticos de superficie analizados correspondieron al horario de las 1200 UTC; para observar la persistencia y la evolución de la situación sinóptica identificada se tuvo en cuenta, además, el horario de las 1800 UTC. En virtud de complementar y verificar el análisis detallado de los mapas sinópticos se consultó: la *Cronología de los frentes fríos* que han afectado a Cuba desde la temporada invernal 1916-1917 hasta 1982-1983 (67 temporadas) de Rodríguez *et al.* (1984) y su actualización (González, 1999); la *Cronología de los “sures”* obtenida de la base de datos creada por Ballester y Sarmiento (2001) y actualizada hasta 2010; la *Cronología de huracanes en Cuba* (Pérez R. *et al.*, 2008), así como también la base de datos “atl_hurtrack” sobre la trayectoria de los ciclones tropicales formados en el Atlántico, extraída del sitio web oficial de la Asociación Nacional Océano y Atmósfera (NOAA, por sus siglas en inglés).

Los mapas medios de superficie para las 1200 UTC, representativos de las condiciones sinópticas definidas durante el proceso de clasificación subjetiva, fueron proporcionados de forma objetiva por NOAA-

CIRES Climate Diagnostics Center, Boulder, Colorado, los Estados Unidos, desde su sitio web en <http://www.cdc.noaa.gov>. Estos se elaboraron con paso de 5 grados de latitud x 5 grados de longitud para el área antes definida; la rejilla consta de 9 puntos x 13 puntos.

Las diferencias significativas entre las poblaciones pertenecientes a uno u otro tipo de condición sinóptica se estimaron por medio del parámetro estadístico Z para cada punto de la rejilla, de acuerdo con la metodología empleada por Peagle y Kierulff (1974), el cual constituye un estadígrafo de prueba que rechaza la hipótesis asumida de que dos poblaciones tienen medias iguales si $|Z| > 1.96$, para el nivel de significación prefijado de 5 %, evidenciándose que las muestras pertenecen a dos poblaciones diferentes. Este criterio se utilizó para corroborar la tipificación realizada en algunos casos de incertidumbre.

El proceso de clasificación de las configuraciones se fundamenta en la interrelación entre sucesos anómalos en el régimen de vientos y su estrecho vínculo con los mecanismos de la circulación atmosférica, para lo cual se utilizó una combinación de métodos teórico (análisis y síntesis, histórico-lógico), sinóptico y estadístico matemático (estadística descriptiva).

El proceso de tipificación bajo el enfoque climatológico-sinóptico comenzó con el estudio del comportamiento histórico de la rapidez media del viento en el período 1977-2009; esto permitió la selección por mes de los años en que la rapidez media del viento superó la norma histórica mensual, los cuales fueron denominados como AMS (años de máximos significativos de la rapidez media del viento). Una vez definidos los AMS se impuso la condición de que, en estos, más de 80 % de las estaciones involucradas en el estudio presentaran anomalías positivas de la rapidez media del viento, en comparación con sus normas climáticas mensuales, y fue esta la esencia de discriminación. El análisis por estación permitió, además, diferenciar en qué región geográfica de Cuba se presentaron los mayores valores de esa variable.

Teniendo en cuenta las anomalías diarias de la rapidez media del viento para cada estación, se seleccionaron aquellos días que presentaron anomalías positivas, bajo el criterio de que más de 80 % de las estaciones meteorológicas registraran valores de la rapidez media diaria del viento por encima de su norma histórica y que en, al menos, tres pertenecientes a una misma región geográfica de Cuba, las anomalías superaran 2 m/s. De esta manera, se garantizó la selección de los días con valores favorables para la generación de energía, puesto que puesto que la rapidez media mensual de todas las estaciones escogidas para este estudio superan 3 m/s la rapidez media mensual de todas las estaciones escogidas para este estudio superan 3 m/s y “se considera que vientos con velocidades promedio entre 5.0 y 12.5 m/s son los óptimos para ser aprovechados energéticamente” (Perigó, 2007). Los días identificados fueron definidos como DAPS (días con anomalías positivas significativas de la rapidez media del viento).

Con el objetivo de determinar las condiciones sinópticas que propiciaron vientos aprovechables energéticamente, se prosiguió al análisis sinóptico de 906 mapas diarios de superficie en el horario de las 1200 UTC, suma que se corresponde con el total de DAPS identificados para este período del año. La tipificación subjetiva de las configuraciones sinópticas más favorables se efectuó conciliando los resultados obtenidos de todo el procesamiento estadístico realizado para la rapidez media del viento, y la información adquirida en un análisis posterior de los mapas sinópticos.

Análisis de los resultados

Se definió un total de 14 tipos de condiciones sinópticas más favorables (CSF) para el aprovechamiento del viento como recurso energético en el período poco lluvioso del año (PpLL). La figura 3 muestra, tanto la frecuencia relativa de las CSF organizadas en

orden de mayor a menor frecuencia (eje vertical secundario), como su frecuencia relativa mensual (eje vertical primario). Se aprecia que más de la mitad de las condiciones sinópticas reconocidas en el PpLL no exceden en 5 % de frecuencia relativa con respecto al total de DAPS que fueron examinados en el proceso. Tan solo las dos CSF que encabezan el total identificado representan, aproximadamente, 50 %, y para todos los meses del PpLL.

Un grupo de condiciones sinópticas resultaron excluidas durante el proceso de tipificación debido a la bajísima frecuencia presentada durante todo el PpLL o por estar vinculadas a organismos tropicales que influyeron sobre el territorio cubano durante noviembre (fundamentalmente en su primera quincena), cuando predominan cuadros sinópticos que retoman patrones de octubre. Este grupo de situaciones sinópticas, representando 3 % de la muestra, sufrió la denominación de “casos aislados” (CA).

La figura también muestra la frecuencia relativa mensual de cada CSF. En el primer bimestre del PpLL del año, excluyendo el grupo de CA, se presenció poca variabilidad de las CSF, a pesar de la gran variedad de patrones sinópticos que se presentan, en general, durante estos dos meses. En enero, los valores significativos de la rapidez media del viento aprovechables en la obtención de energía corresponden, precisamente, a las dos CSF más frecuentes, mientras que febrero exhibe una mayor variabilidad de las CSF, con una influencia no despreciable de las CSF 4, 5 y 7, además de las CSF 1 y 2, las más frecuentes. En estos dos últimos meses, se aprecia con respecto al bimestre anterior la aparición de las CSF 4, 11 y 12, asociadas todas a sistemas de bajas presiones extratropicales, típicas durante esta época del año y determinantes en la generación de las anomalías positivas significativas de la rapidez media del viento en la costa sur de la porción oriental y la región occidental de Cuba, imponiendo sobre esta última los fuertes regímenes de los vientos “sures”. En el tercer bimestre del PpLL,

las CSF presentaron una variabilidad mayor que en meses anteriores. En abril, como resultado de la mejor configuración que adopta el Anticiclón Subtropical del Atlántico Norte en esta época del PpLL, se presenció un aumento de la frecuencia de la CSF 6 en comparación con los bimestres anteriores; la segunda CSF resultó más frecuente para este mes.

Como consecuencia de la circulación general de la atmósfera, en Cuba, se observa la influencia sobre gran parte del año del Anticiclón Subtropical del Atlántico Norte, que durante los meses de la temporada invernal cede lugar al dominio de anticiclones migratorios de origen continental. Por ello, las condiciones sinópticas relacionadas con el predominio de las altas presiones migratorias reflejaron los mayores valores de frecuencia dentro de la gran diversidad de sistemas sinópticos identificados en el PpLL, representados por 47 %.

Mientras que la influencia de frentes fríos sobre nuestro territorio mostró también gran responsabilidad en la ocurrencia de valores significativos del

viento en este período del año, los sistemas de bajas presiones extratropicales presentaron una discreta frecuencia.

En la figura 4 se desglosan los seis grandes grupos de condiciones sinópticas definidas en el proceso de clasificación para el período poco lluvioso del año, así como las CSF involucradas en cada uno de estos. Las CSF 1, 3 y 10 del Grupo 1 están asociadas con la presencia de anticiclones migratorios continentales que imponen un fuerte régimen de brisotes sobre el archipiélago cubano. El Grupo 2 encierra situaciones sinópticas caracterizadas por la influencia de frentes fríos que se sitúan sobre el territorio nacional. Las CSF 5, 6 y 13 del Grupo 3 se caracterizan por el dominio sobre Cuba del Anticiclón Subtropical del Océano Atlántico. El Grupo 4, integrado por las CSF 7, 8 y 9, está asociado con la influencia del cinturón de las altas presiones subtropicales; entretanto, los centros de bajas presiones extratropicales involucran los dos últimos grupos. Las CSF 4 y 14 del Grupo 5 imponen sobre Cuba un fuerte gradiente barométrico median-

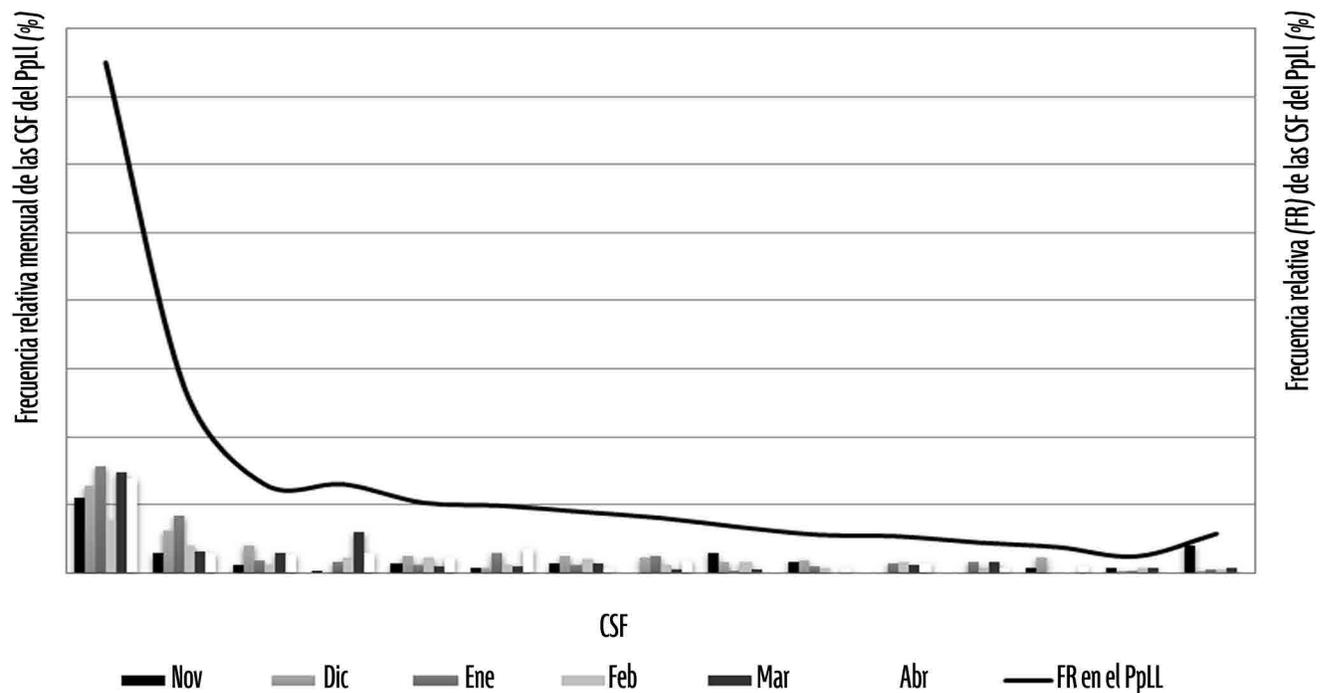


Fig. 3 Distribución de frecuencia relativa de las CSF del PpLL del año.

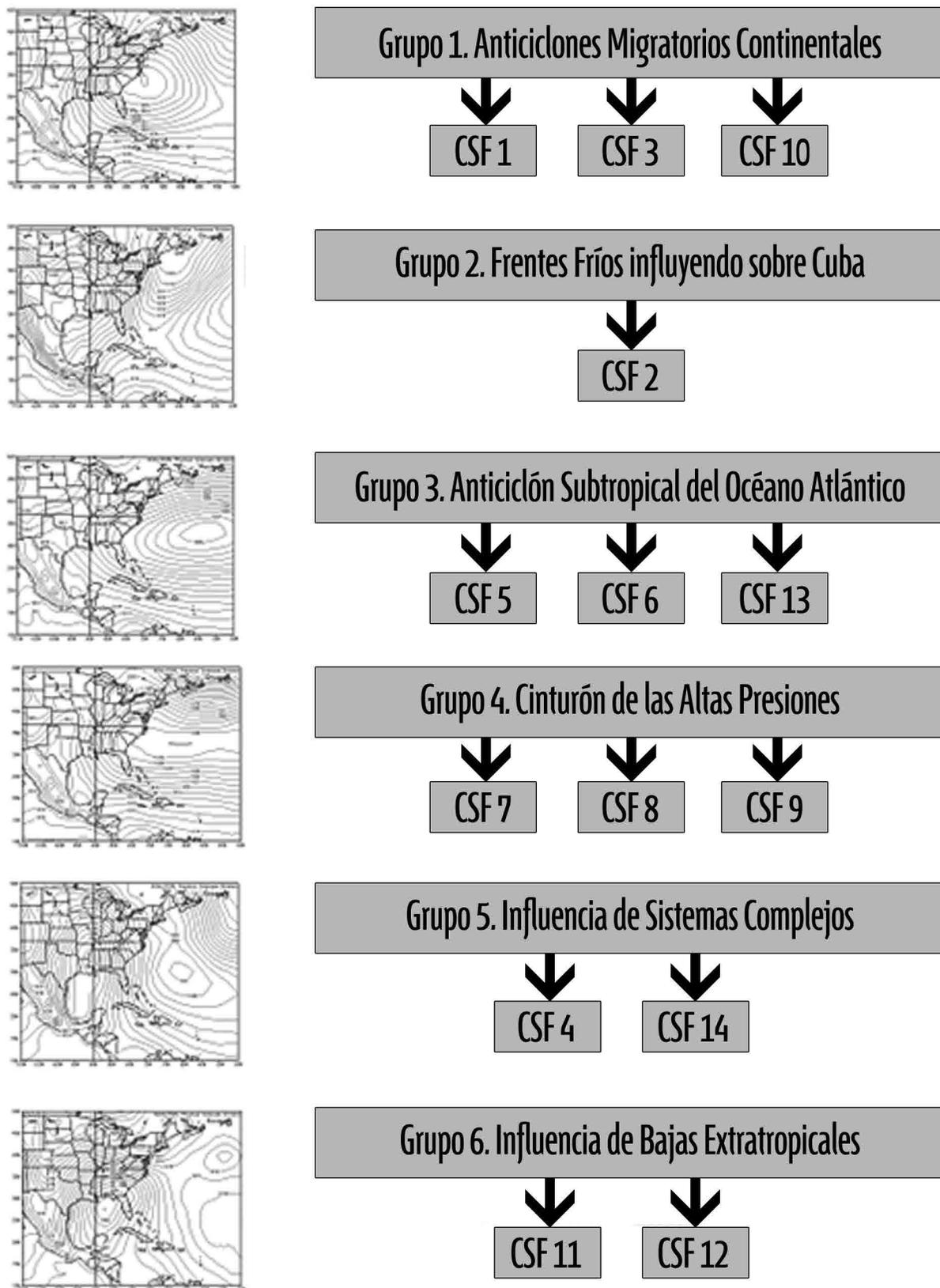


Fig. 4 Condiciones sinópticas más favorables para el aprovechamiento del viento como recurso energético (período poco lluvioso).

te la combinación de dos sistemas béricos de desigual circulación (ciclónica y anticiclónica); y las CSF 11 y 12 del Grupo 6 se relacionan con la influencia de sistemas de bajas presiones extratropicales.

A continuación, se describen muy brevemente las 14 CSF para la ocurrencia de los valores significativos de la rapidez media del viento, pertenecientes al PpLL.

Condiciones sinópticas más favorables del Grupo 1

CSF 1: Extenso sistema anticiclónico migratorio de origen continental, con una presión máxima promedio de 1030 hPa. Su centro se ubicó con mayor frecuencia entre los 30 y 40 grados de latitud norte y entre los 85 y 65 grados de longitud oeste, sobre la porción sureste de los Estados Unidos, sus costas y el Océano Atlántico adyacente. Impone moderados gradientes de presión sobre nuestro territorio, con vientos, principalmente, del NE al E. Se presentó con un mínimo de frecuencia en febrero, un máximo en enero y un máximo relativo en marzo.

Con elevada frecuencia y, fundamentalmente, durante los meses de noviembre, marzo y abril, provocaron un aumento de la rapidez de los vientos, reforzada por la ocurrencia de regímenes de brisotes sobre gran parte del territorio, induciendo vientos fuertes del primer cuadrante en zonas de la costa norte dada la abrupta pendiente barométrica que mostraron estos sistemas. Las anomalías positivas significativas se registraron sobre la mitad oriental del territorio nacional en más de 80 % del total de casos, sobre todo en zonas de la costa norte de la región oriental.

CSF 3: Dorsal anticiclónica migratoria extendida meridionalmente al sur, desbordándose por los estados del extremo este de Norteamérica, el Océano Atlántico adyacente, Las Bahamas, la mitad noreste del Golfo de México, hasta cubrir totalmente a Cuba a partir de sus isobaras periféricas, imponiendo sobre ella moderados gradientes béricos. El sistema se caracteriza por una amplitud extensa y gran intensidad. Su centro se ubicó entre los 35 y 50 grados de latitud

norte, y entre 85 y 70 grados de longitud oeste, con 1030 hPa aproximadamente, exhibiendo, en 45 % del total, valores superiores a su presión central media.

Las anomalías positivas significativas de la rapidez media del viento se obtuvieron en la costa norte de las regiones central y oriental del país; su frecuencia relativa indica valores superiores en diciembre, marzo y abril, representando 70 % del total de la muestra en el período. Estos dos últimos coinciden con los meses en que se registran los mayores valores de la rapidez media mensual bajo su influencia.

CSF 10: Anticiclón migratorio de origen continental que extiende su dorsal, mayormente, al sureste por el Océano Atlántico occidental, e influye sobre nuestro territorio a partir del flujo de retorno; domina el resto de las islas caribeñas, Las Bahamas, el Golfo de México, la mitad este de los Estados Unidos y el Océano Atlántico adyacente. Presentó un máximo de frecuencia en diciembre y un máximo relativo en noviembre. Los sistemas de alta presión se ubicaron, como promedio, entre los 30 y 40 grados de latitud norte y entre los 82 y 72 grados de longitud oeste, con una intensidad media de 1029 hPa. Imponen sobre Cuba débiles gradientes barométricos, más apretados hacia la porción oriental del país, y genera vientos del primer cuadrante.

Esta CSF presenta similitud con la CSF 1 en el campo de presión percibido sobre Cuba, mientras que se diferencia en la configuración que adquieren las isobaras del sistema anticiclónico, lo cual se refleja en el comportamiento desigual que, en ambos casos, adquirieron los rangos de anomalías de la rapidez media de los vientos, sobre todo el archipiélago cubano. Bajo la influencia de esta CSF, las anomalías positivas se produjeron, fundamentalmente, sobre la mitad oriental del país.

Condiciones sinópticas más favorables del Grupo 2

CSF 2: Frente frío atravesando la isla de Cuba e influencia, justo hasta la región situada detrás del siste-

ma frontal, de un sistema anticiclónico migratorio de origen continental que provoca la penetración de aire frío en el Golfo de México y el Mar Caribe occidental. El centro de alta presión se ubicó con regularidad entre los 25 y 40 grados de latitud norte y entre los 100 y 85 grados de longitud oeste, sobre la porción sur de los Estados Unidos y la mitad norte del Golfo de México, extendiéndose ligeramente hacia el sureste, hasta influir sobre el archipiélago cubano, con una presión máxima aproximada de 1030 hPa. El frente frío prevaleció situado sobre la mitad oriental del país. En los DAPS, los que con mayor frecuencia provocaron las mejores anomalías de la rapidez media del viento con respecto a la norma histórica fueron provocadas por los frentes fríos moderados y los frentes fríos moderados y clásicos; sin embargo, los frentes fríos débiles afectaron con mayor frecuencia el territorio cubano en los AMS dentro del período 1977-2009.

Las anomalías positivas de la rapidez media del viento se obtuvieron siempre sobre la mitad occidental del país; los mayores registros de afectación por frentes fríos le pertenecen a enero, diciembre y febrero.

Condiciones sinópticas más favorables del Grupo 3

CSF 5: Dorsal anticiclónica oceánica extendida hacia el suroeste por todo el Océano Atlántico occidental y central, el extremo oriental del continente norteamericano y sus costas atlánticas, Las Bahamas, penetrando hasta la porción noreste del Golfo de México, cubriendo así nuestro archipiélago, e imponiendo sobre este gradientes de presión moderados. Estos anticiclones continentales sufren un proceso de transformación modificándose sobre las aguas cálidas del Océano Atlántico, con centros desplazados hacia el noreste; el centro anticiclónico oceánico se situó, aproximadamente, entre los 35 y 45 grados de latitud norte y entre los 65 y 50 de longitud oeste, con una presión máxima media de 1033 hPa. Sistemas más intensos, con presiones centrales que igualan o superan 1030 hPa, se percibieron en 80 % de los

casos, sobre todo en el segundo trimestre del período, coincidiendo con el momento del PpLL, cuando se registraron los valores más significativos del viento bajo la influencia de esta CSF.

Impone vientos de región este, fundamentalmente del noreste y sobre la mitad oriental del país. Su frecuencia relativa mostró, en diciembre, su máximo absoluto y, en febrero-abril, sus máximos relativos, con períodos de muy baja frecuencia entre cada uno de estos meses. Las anomalías positivas significativas de la rapidez media del viento se adquirieron en la costa norte-centro-oriental del país, también sobre el sur de Camagüey.

CSF 6: Sistema de alta presión oceánica sobre el Océano Atlántico occidental-central, que se orienta zonalmente y abarca con su gran dorsal extendida hacia el oeste y suroeste, durante el primer bimestre del PpLL del año, el área amplia del océano sobre la cual se ubica, aproximadamente entre los 10 y 45 grados de latitud norte, las costas atlánticas del continente norteamericano, el extremo más oriental de ese continente, Las Bahamas, el mar Caribe, la mitad este del Golfo de México y Las Antillas, incluyendo a Cuba. Sobre esta última, impuso débiles gradientes béricos durante el primer bimestre del período, y moderados en el resto, más acentuados hacia la región oriental. La ubicación de los centros anticiclónicos oceánicos presentó una variabilidad temporal evidenciada en el comportamiento levemente oscilante que estos presentaron, fluctuando cada mes entre longitudes más o menos próximas a Cuba. No obstante, su centro de 1030 hPa se ubicó con mayor frecuencia entre los 30 y 35 grados de latitud norte y entre los 65 y 50 grados de longitud oeste, más debilitados en diciembre y más intensos en febrero. Los vientos se presentaron marcadamente de dirección E durante todo el PpLL del año.

Mantuvo, en general, baja frecuencia; se obtuvieron los máximos absoluto y relativo en abril y enero, respectivamente. Los mejores valores de la rapidez

media del viento se registran sobre la costa norte-centro-oriental del archipiélago cubano, también en la estación de Bahía Honda, en Pinar del Río (tabla 1).

CSF 13: Flujo del este asociado al Anticiclón Subtropical del Océano Atlántico extendido latitudinalmente por el Océano Atlántico central; su centro se ubicó con gran frecuencia fuera de los límites del mapa. Extiende su dorsal hacia el oeste-suroeste, hasta los 75 grados de longitud oeste y por encima de los 25 grados de latitud norte. Solo se presentó durante abril y los meses del primer bimestre del PpLL del año, adquiriendo en diciembre su máximo absoluto. Impone débiles gradientes barométricos, con vientos de región E en toda Cuba.

Sucedió a la CSF 6, provocado por el lento desplazamiento hacia el este que sufren las altas presiones oceánicas en el Océano Atlántico. Con muy baja frecuencia, generaron anomalías positivas significativas de la rapidez media del viento, registradas sobre la costa norte de la región oriental y en las estaciones de Cayo Coco, en la costa norte-central, y Camagüey, en zona del interior de las provincias orientales.

Condiciones sinópticas más favorables del Grupo 4

CSF 7: Sistema anticiclónico migratorio de origen continental, ubicado con mayor frecuencia sobre el extremo este de los Estados Unidos, el cual domina la mitad oriental de ese territorio, sus costas adyacentes y el Golfo de México; extiende sus isobaras de forma limitada sobre nuestro país e influye sobre este en combinación con un flujo del este asociado con las altas presiones oceánicas del Atlántico, el cual se ubicó, generalmente, fuera de los límites del espacio sinóptico estudiado.

Impone sobre el archipiélago cubano gradientes barométricos moderados, debilitados hacia los meses extremos del período invernal. El centro de acción migratorio se ubicó, regularmente, entre los 35 y 45 grados de latitud norte y entre los 85 y 72 grados de longitud oeste. Estos sistemas de alta presión se

exhibieron intensos con destacada frecuencia (como promedio 1032 hPa), con una probabilidad alta de exceder 1030 hPa, fundamentalmente, en diciembre y febrero. Generó vientos del NE al E, con mayor componente este sobre las provincias orientales y del NE hacia las occidentales.

En diciembre, presenta mayores probabilidades de inducir anomalías positivas significativas de la rapidez media del viento, principalmente durante su segunda quincena; se distingue, además, un máximo relativo en febrero, sobre todo en la primera quincena. Los valores significativos de esta variable se obtuvieron sobre la costa norte de la región central y la porción más oriental de Cuba.

CSF 8: Sistema anticiclónico complejo extendido zonalmente, que resulta del acople entre uno migratorio de origen continental y otro oceánico. Enlaza sus isobaras y domina todo el Océano Atlántico, el Mar Caribe, el extremo este de los Estados Unidos, Las Bahamas, la mitad oriental del Golfo de México y Las Antillas, comprendida Cuba; esta última permanece cubierta completamente por el denso flujo del este, relativo a la amplia circulación del sistema anticiclónico. El centro migratorio se ubicó, frecuentemente, entre los 30 y 40 grados de latitud norte, y entre los 83 y 70 grados de longitud oeste, con una presión máxima de 1029 hPa; los sistemas fuertes prevalecieron durante diciembre. El centro oceánico se contempló con asiduidad sobre longitudes tan lejanas que sobrepasaron los límites del mapa sinóptico.

Es un CSF que impone moderados gradientes de presión sobre el territorio nacional, más apretado hacia la mitad oriental, con vientos del NE al E.

La distribución de frecuencia relativa durante los meses del PpLL muestra un máximo absoluto en enero, mientras que diciembre resultó el segundo mes que, con mayor frecuencia, se mostró como condición sinóptica generadora de los vientos favorables para su aprovechamiento energético. Las anomalías positivas significativas se generaron sobre toda la

costa norte de las regiones central y oriental, incluyendo el sur de la provincia de Camagüey.

CSF 9: Anticiclón migratorio de origen continental con 1034 hPa como promedio en su región central, situado sobre el extremo este de los Estados Unidos. Domina la mitad oriental del continente norteamericano, sus costas adyacentes, la mitad norte del Golfo de México y Cuba. Su circulación establece vientos fuertes del primer cuadrante en combinación con un flujo del este asociado a las altas presiones oceánicas del Atlántico, perturbado aproximadamente entre los 18 y 28 grados de latitud norte, y entre los 75 y 67 grados de longitud oeste. Como resultado, influye sobre el territorio un flujo fuerte del NE causado por la pendiente barométrica creada a partir de la perturbación que produce la profundización de bajas presiones en el Mar Caribe, apretando el gradiente bórico sobre el país. La perturbación del flujo oceánico presenta dos áreas promedio en su posición. En 51 % de la muestra, la perturbación abre el gradiente barométrico en la porción oriental del territorio, provocando calma sobre dicha región y anomalías negativas de la rapidez media del viento. Lo inverso sucede en el porcentaje restante, cuando se fortalece el gradiente bórico sobre el oriente del país y se favorecen las anomalías positivas de la rapidez media del viento.

Presenta mayor probabilidad de ocurrencia durante el primer bimestre del PpLL, principalmente en noviembre, en consonancia con los patrones de circulación en superficie de esta época, vinculados con hondonadas de características frontales sobre la parte oriental de Cuba y la influencia de anticiclones continentales migratorios que establecen un régimen de vientos de componente NE sobre el área, creando condiciones favorables para la ocurrencia de brisotes (Fernández y Díaz, 2005). Los valores relevantes de la rapidez media del viento se obtuvieron sobre la costa norte de las regiones occidental y central.

Condiciones sinópticas más favorables del Grupo 5

CSF 4: Combinación de dos centros bóricos que influyen de conjunto sobre nuestro archipiélago. Sistema anticiclónico oceánico ubicado sobre las aguas del Atlántico occidental, dominando también Las Bahamas y la mitad oriental de Cuba; se encuentra acoplado con un centro de bajas presiones extratropicales sobre la región del Golfo de México y los estados del sur del continente norteamericano, extendiendo su influencia sobre el occidente cubano e intensificando el gradiente barométrico en esta región. Genera vientos de región S en casi todo el territorio, sobre todo del SE, e impone sobre Cuba débiles gradientes barométricos durante los primeros meses del PpLL, fortaleciéndose aproximadamente desde febrero, y con un nuevo y ligero debilitamiento en abril. Hacia el occidente del país se presenciaron gradientes más fortalecidos que someten esta región a regímenes de vientos “sures”, registrados con mayor frecuencia durante marzo. El centro de alta presión modificado en el Océano Atlántico se situó, como promedio, entre los 27 y 40 grados de latitud norte y entre los 70 y 62 grados de longitud oeste, con una presión máxima de 1025 hPa, presenciándose sistemas más intensos durante febrero, con una presión central media de 1030 hPa. La baja extratropical se ubicó, como promedio, entre los 27 y 40 grados de latitud norte, y entre los 95 y 87 grados de longitud oeste, con una presión mínima de 1001 hPa. Durante febrero y marzo se exhibieron bajas presiones más profundas que las obtenidas en el resto del período, con mayores probabilidades de mínima presión entre 990 hPa y 1000 hPa.

Esta CSF presentó en marzo un máximo absoluto de frecuencia —mostrándose sobre todo en la segunda quincena—, con máximos relativos durante abril y febrero, en correspondencia con el incremento que durante este último trimestre del período adquiere la frecuencia de bajas extratropicales posicionadas mayormente sobre la porción occidental del Golfo de México y sur de los Estados Unidos. Los valores más

elevados de la rapidez media del viento se registraron, precisamente, en estos meses del período, con anomalías positivas significativas sobre la costa norte de La Habana, en Cabo Cruz y en regiones de la costa sur occidental.

CSF 14: Sistema de altas presiones migratorias de origen continental ubicadas sobre el extremo este de los Estados Unidos, que influye sobre nuestro país en combinación con un sistema de bajas presiones extratropicales situado sobre el Océano Atlántico Occidental. Los centros de mínima presión se ubicaron con mayor frecuencia durante todo el período invernal, entre los 27 y 40 grados de latitud norte, y entre los 75 y 64 grados de longitud oeste, con una presión central de 1006 hPa. El anticiclón migratorio de origen continental presentó un área media entre los 30 y 40 grados de latitud norte, y entre los 90 y 80 grados de longitud oeste, con una presión máxima de 1031 hPa. La interacción de las isobaras de ambos sistemas béricos fortalece el gradiente barométrico que se impone de moderado a débil sobre casi todo el territorio nacional. Produce vientos del N al NE.

Se presentó solo en noviembre, enero y marzo; en este último, se obtuvo su máximo absoluto; los valores significativos se alcanzaron sobre la costa norte occidental y la costa sur de la región oriental.

Condiciones sinópticas más favorables del Grupo 6

CSF 11: Sistema de bajas presiones extratropicales con centro ubicado sobre el Golfo de México, principalmente sobre su porción nororiental, dominando el propio golfo, la Península de Yucatán, la porción sur y sureste de los Estados Unidos, el Saco de Charleston, Las Bahamas septentrionales y la mitad occidental de Cuba. El centro se ubicó, como promedio, entre los 28 y 35 grados de latitud norte, y entre los 92 y 80 grados de longitud oeste, con una presión mínima de 1001 hPa. Esta CSF impone un débil y escaso flujo del S sobre el resto del territorio nacional, con frecuente ocurrencia de calmas sobre la costa norte

de la región central y las provincias orientales. Produce débiles gradientes barométricos sobre todo el archipiélago nacional, más fuertes en marzo dada la profundización que adquieren durante esta época las bajas extratropicales, mostrándose mucho más extensos los sistemas y extendiendo su influencia hacia, prácticamente, todo el país, sin incluir la porción oriental. Los valores mayores de la rapidez media del viento se registraron, precisamente, en marzo. Los vientos en Cuba se imponen de región sur; propiamente del S sobre la mitad occidental, y del SE sobre el resto del territorio cubano, registrándose con elevadísima frecuencia, sobre todo en marzo y abril, vientos “sures” en el occidente del país.

La distribución de frecuencia relativa muestra su ausencia durante el primer bimestre del PpLL, aumentando su probabilidad a partir de enero, acorde con la exclusividad que presentan estos patrones de circulación en esta época del año; el máximo se obtiene en febrero y destacan dos máximos relativos en enero y abril.

CSF 12: Sistema de baja presión extratropical ubicado, como promedio, sobre las costas de los estados del este del territorio norteamericano, en las proximidades de Cabo Hatteras, dominando con su amplia circulación la mitad oriental de los Estados Unidos, el Océano Atlántico adyacente, Las Bahamas, la porción noreste del Golfo de México y débilmente sobre la mitad occidental de nuestro país, imponiendo débiles gradientes béricos. El centro de baja presión se ubicó entre los 30 y 38 grados de latitud norte, y entre los 83 y 75 grados de longitud oeste, con una presión de 995 hPa, presenciándose en marzo los valores más bajos de presión mínima. Desde su centro, se extiende hacia el suroeste un frente frío que atraviesa la isla de Cuba, básicamente, por las provincias occidentales, con mayor probabilidad de cruzar la provincia de Pinar del Río.

Igualmente que la CSF 11, la CSF 12 se ausentó durante el primer bimestre del PpLL, y presentó dos

máximos absolutos (enero y marzo). Las anomalías positivas de la rapidez media del viento se registraron solamente sobre la mitad occidental del país, incluyendo las estaciones del sur de la región oriental.

Efectos producidos por las CSF del PpLL en la rapidez media del viento

La tabla 1 muestra los promedios de las anomalías positivas de la rapidez media del viento registradas en cada estación meteorológica bajo el dominio de las CSF del PpLL. De esta manera, se visualizan mejor las regiones con mayores posibilidades de captación ante la influencia de cada CSF.

Las anomalías positivas significativas de la rapidez media del viento sobre la porción norte occidental, se produjeron con mayor frecuencia bajo el dominio de las CSF 2 y 4, y en un menor número de casos bajo el dominio de las CSF 9, 11, 12 y 14, en mayoría pertenecientes al grupo de las menos frecuentes dentro del total de CSF identificadas dentro del PpLL del año. Los valores de la rapidez media del viento aprovecha-

bles energéticamente son poco frecuentes sobre la costa sur del occidente cubano; estos se registran bajo el dominio de las CSF 2, 11 y 12. Durante el PpLL no se obtuvieron valores apreciables de la rapidez media del viento sobre la porción sur de la región central del país, mientras que en su costa norte estos se presentaron con elevada frecuencia bajo la influencia de las CSF 1, 2, y de la CSF 5 a la 9. Son más frecuentes las anomalías positivas de la rapidez media del viento en la costa norte de la región oriental de Cuba, favorecidas por la influencia de CSF que incluyen algunas de las más frecuentes: la CSF 1, 3, de la CSF 5 a la 8, la CSF 10 y la CSF 13. En la estación meteorológica de Punta de Lucrecia se alcanzaron anomalías mayores a 3 m/s.

La estación meteorológica de Cabo Cruz presentó un comportamiento casi análogo al de las provincias occidentales; en esta región se registraron anomalías aprovechables desde el punto de vista energético próximas a 2 m/s, con alta frecuencia bajo la influencia de las CSF 1 y 3. Algunas anomalías positivas su-

TABLA 1

Valores promedio de anomalías de la rapidez media del viento (m/s)

CSF	314	318	376	325	321	324	322	328	333	341	348	339	355	351	360	358	365
1	0,9	1,7	0,6	0,9	1,9	1,3	1,0	1,8	0,2	1,3	2,7	3,0	1,6	2,0	2,1	2,9	3,7
2	1,2	3,7	2,6	2,9	1,7	1,5	2,0	1,7	1,2	1,0	1,2	1,3	0,2	0,3	1,1	0,1	-0,8
3	0,9	1,8	0,9	1,1	1,7	1,4	1,2	1,6	0,4	1,4	2,1	2,8	1,5	1,6	2,1	2,2	2,6
4	2,0	1,3	3,0	3,8	1,9	2,8	2,1	0,9	1,7	0,4	0,4	0,0	0,1	0,7	3,3	0,9	0,8
5	0,9	1,7	1,0	1,1	1,7	1,1	1,3	1,3	0,7	1,2	2,7	2,9	1,8	2,5	1,2	2,9	3,3
6	0,5	2,0	0,9	0,7	1,3	1,0	1,0	2,1	0,1	1,2	2,4	2,5	2,2	1,4	0,1	2,7	3,3
7	0,9	2,0	0,4	1,0	1,9	1,2	1,3	1,5	0,6	1,1	2,3	2,5	1,3	1,6	0,8	1,9	3,0
8	0,9	1,1	0,5	0,4	1,4	0,9	0,8	0,5	0,1	1,7	2,4	2,5	1,7	2,4	0,6	2,9	3,9
9	0,9	2,9	1,5	2,6	2,5	1,7	1,3	2,2	1,4	1,4	3,0	2,6	1,0	1,2	1,6	0,8	1,3
10	0,6	0,9	0,1	-0,1	1,2	1,3	0,4	0,4	0,3	1,2	1,8	1,4	1,3	1,9	1,5	2,8	2,6
11	1,9	1,3	3,4	4,4	1,6	2,2	2,5	1,8	1,6	0,9	0,2	-1,2	0,1	0,2	3,7	-0,5	-1,6
12	1,7	2,8	3,8	3,5	1,0	0,8	2,7	1,4	2,0	1,3	-0,1	-1,0	0,2	0,6	3,6	-0,9	-2,4
13	0,4	0,5	0,1	-0,8	0,5	0,0	0,5	1,1	-0,5	1,2	1,9	2,2	2,2	1,9	-0,2	2,6	3,6
14	0,3	3,7	3,3	3,7	1,4	0,8	1,8	2,0	1,1	0,9	1,9	0,8	0,5	2,1	5,4	0,0	1,1

periores a 3 m/s se alcanzaron ante el dominio de las CSF 4, 11, 12 y 14.

Conclusiones

El análisis sinóptico de 906 mapas de presión superficial (según el total de días con anomalías positivas significativas seleccionados a partir del estudio estadístico de la rapidez media del viento) sobre una muestra de 33 años (1977-2009) permitió definir 14 condiciones sinópticas más favorables (CSF) para el aprovechamiento del viento como recurso energético en Cuba durante el período poco lluvioso del año.

El enfoque climatológico-sinóptico bajo el cual se encauzó el estudio, permitió establecer el nexo entre las anomalías de la rapidez media del viento que son aprovechables energéticamente y sus causas, según las configuraciones sinópticas involucradas, definiendo de estudios previos basados en el comportamiento medio de las condiciones atmosféricas y en cómo estas influyen en el régimen de viento.

De las CSF, 47 % estuvo asociado principalmente con la influencia de anticiclones migratorios de origen continental.

El vínculo con los patrones de circulación atmosférica del otro período del año (período lluvioso) se apreció durante la primera quincena de noviembre, comprendiendo los casos excluidos en el análisis.

Los valores de la rapidez media del viento favorables para su empleo energético registrados en la región occidental estuvieron asociados a las CSF menos frecuentes, excepto CSF 2, mientras que la costa sur central no resultó potencialmente aprovechable durante este período del año.

El estudio corroboró que la costa norte de la región centro-oriental es la más idónea de Cuba para el aprovechamiento del viento como fuente de energía en la generación de electricidad. Las anomalías positivas significativas de la rapidez media del viento se obtuvieron en esta región, bajo la influencia de un

grupo de CSF que incluyeron a las más frecuentes.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo siempre estaremos agradecidos a quienes nos apoyaron durante su desarrollo. Entre ellos, no olvidar al muy querido meteorólogo Cantero, a la doctora Maritza Ballester, a la doctora Lourdes Álvarez, al doctor Mario Carnesol-tas, al licenciado Elier Pila y al doctor Ramón Pérez. Asimismo, sentimos gran gratitud por los dos revisores anónimos y por la doctora Miriam Limia, por sus útiles comentarios sobre una versión anterior de este artículo.

Referencias bibliográficas

- Álvarez, L., Borrajero, I. y Álvarez, R 2008, Análisis de la calidad de la información y la tendencia de la rapidez del viento en algunas estaciones relacionadas con la ubicación de aerogeneradores eólicos. Memorias de la Convención Trópico 2008, Ciudad de la Habana del 16 al 20 de junio del 2008, ISBN: 978-959-282-079-1, E: \PDF\METEOROLOGIA.pdf, 1390-1402.
- Álvarez, L., Borrajero, I., Álvarez, R. y Aenlle, L. 2008, Análisis preliminar de la variable estado del tiempo presente para cuatro estaciones relacionadas con el desarrollo eólico en Cuba. Revista Ecosolar. No. 24. Edición electrónica.
- Ballester M. y S. Sarmiento 2001, Base de datos de los "sures" que han afectado a Cuba desde la temporada invernal 1918-19. Centro de Pronósticos, INSMET.
- Carrasco, M. 2008, Caracterización de la brisa de mar y sus efectos en el aprovechamiento de la energía eólica. Estudio de dos casos. Presentado como requisito para optar por el título de Licenciado en Meteorología, La Habana, Cuba.
- Fernández, A. J. y Díaz, Y. A 2005, Catálogo de pro-

- cesos sinópticos del archipiélago cubano en el período 1979-1993. Editado por Instituto de Meteorología, Centro meteorológico provincial de Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba.
- González, P.C. 1999, Climatología de los frentes fríos que han afectado a Cuba. Revista Cubana de Meteorología, vol 6, no. 1. Edición electrónica.
- Lecha, E. L., Paz, L. y Lapinel, B 1994, El clima de Cuba. Ed. Academia. La Habana, Cuba.
- Matos, F., Batista, L.M. y Pérez, A 2008, Modelo simple para la predicción de la generación eólica (MOSIMPRE) utilizando los procesos sinópticos objetivos. Aplicación al parque eólico demostrativo de Turiguanó. Revista Ecosolar, no. 26. Edición electrónica.
- Moreno, C., Martínez, J., Leiva, G., Roque, A., Novo, R., Costa, A., Llanes, C., Herrera, O., Sarmiento, A., Pérez, R., Limia, M., Montesinos, A. y Menéndez, M 2007, Diez preguntas y respuestas sobre Energía Eólica. Ed. CUBASOLAR. La Habana.
- Pazos, C 1998, Análisis sinóptico-estadístico del viento en Cuba y la ocurrencia de brisas marinas y tormentas locales severas en la provincia de Ciego de Ávila. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Meteorológicas, Ciego de Ávila, Cuba.
- Peagle, J. N and Kierulff, L. P 1974, Synoptic Climatology of 500 -mb Winter Flow Types. J. Appl. Meteor. Vol. 13. No 2, pp 205-220.
- Perigó, E. 2007, Estudio de factibilidad para el empleo de la energía eólica en el municipio Maisí. Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Ciencias Meteorológicas. Edición Electrónica.
- Proenza, J 2004, Estudio del recurso eólico en la zona costera de la provincia Holguín. Revista "Ciencias Holguín". Edición electrónica.
- Rodríguez, R. M., González, C. y Quiñones, J. V 1984, Cronología de los Frentes Fríos que han afectado a Cuba desde la temporada invernal 1916-1917 hasta 1982-1983 (67 temporadas). Reporte de Investigación del Instituto de Meteorología, No. 9, Academia de Ciencias de Cuba, 15pp.
- Roque, A., Soltura, R., Báez, R., Calzadilla, A., Hernández, K., Hoz Matveeva, B., Serrat, I., Reyes, P., Varona, P., Osa, O. y Samanta, M, 2007, Red de torres meteorológicas de referencia para el programa eólico. Resultados preliminares del estudio del viento con fines energéticos. Memorias del IV Congreso de Meteorología en Cuba. La Habana. Edición electrónica.
- Soltura, R., Roque, A., Rivero, I., Wallo, A., Báez, R., Vázquez, R., Rivero, R., Ayala, M., Rodríguez, G., Carrasco, H., Curbelo, A., González, A., Herreras, O., Martín, G., Díaz, J. y Hernández, G 2006, Informe del Mapa de Potencial Eólico de Cuba. Informe Científico-Técnico de Instituto de Meteorología.

ANEXO 1

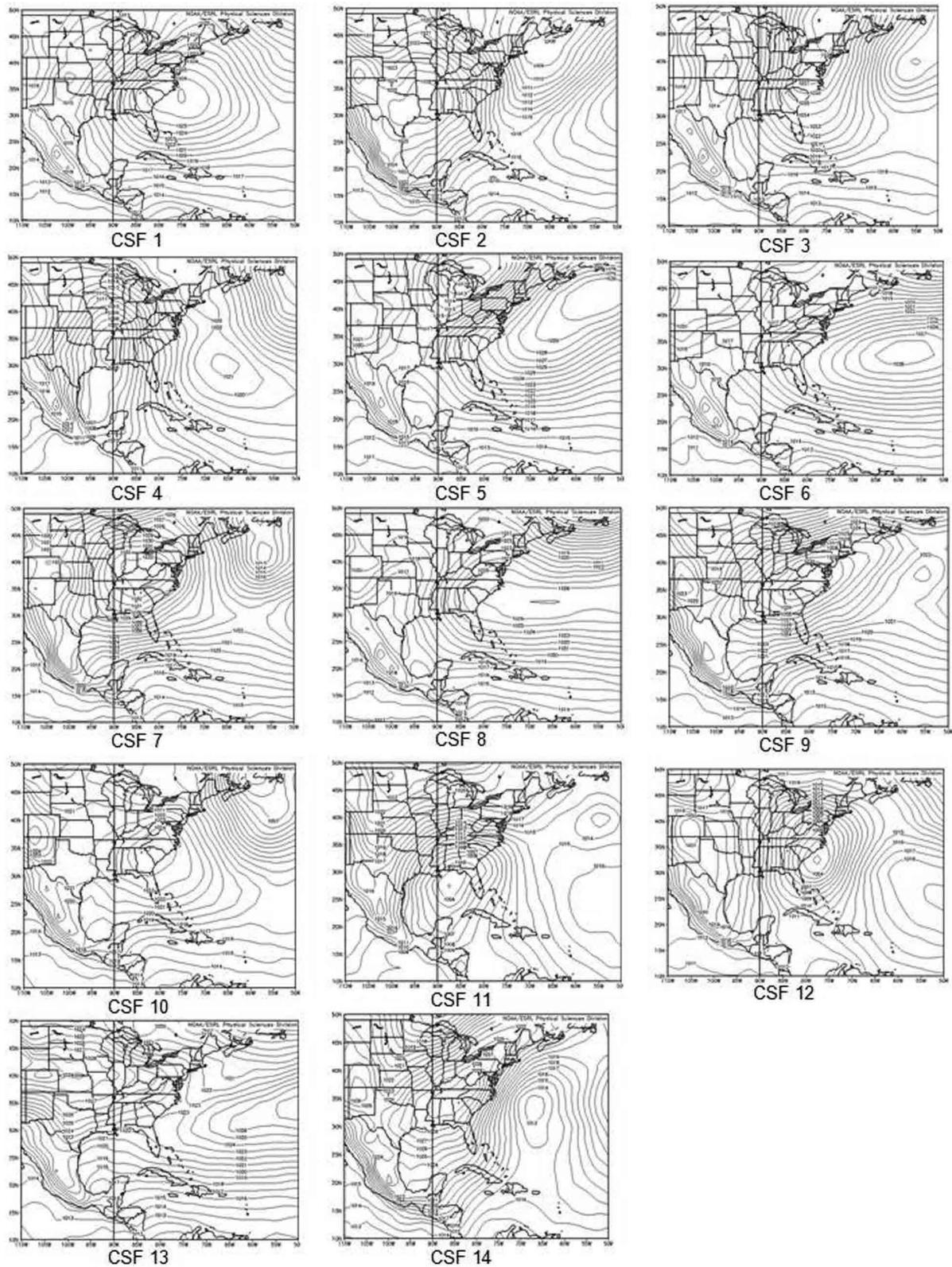


Fig. 1 Mapas medios de las condiciones sinópticas más favorables (CSF) del período poco lluvioso del año.

