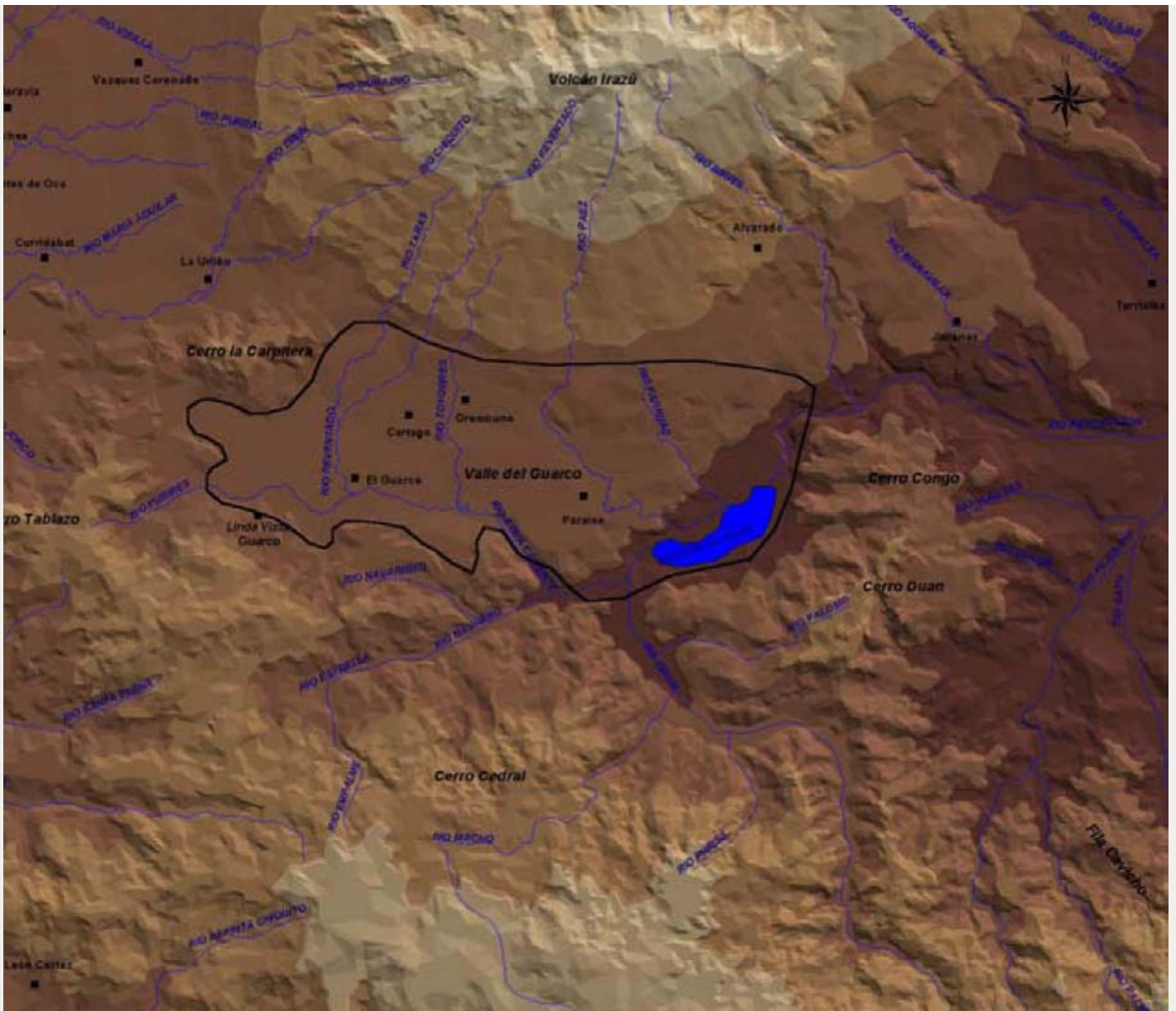


TÓPICOS METEOROLÓGICOS Y OCEANOGRÁFICOS



ISSN 1409 - 2034 | Volumen 9 | Julio 2002



CONTENIDO

Pág. Artículo

- 1 Variación estacional del viento en Costa Rica y su relación con los regímenes de lluvia
ANA CECILIA MUÑOZ, WALTER FERNÁNDEZ,
JORGE A. GUTIÉRREZ Y ELADIO ZÁRATE
- 14 Distribución horaria de la magnitud del viento en Costa Rica
ANA CECILIA MUÑOZ, WALTER FERNÁNDEZ,
JORGE A. GUTIÉRREZ Y ELADIO ZÁRATE
- 29 Potencial de energía eólica en Costa Rica
ANA CECILIA MUÑOZ, WALTER FERNÁNDEZ,
JORGE A. GUTIÉRREZ Y ELADIO ZÁRATE
- 48 Análisis estadístico multivariado de la concentración de CO₂
A. BANICHEVICH, J. BONATTI¹, J. TREJOS
- 56 Eventos extremos meteorológicos en Linda Vista, Valle del Guarco, Cartago
ING. JOSÉ ALBERTO RETANA, ING. ROBERTO VILLALOBOS

Variación estacional del viento en Costa Rica y su relación con los regímenes de lluvia

ANA CECILIA MUÑOZ¹

Escuela de Física, Instituto Tecnológico de Costa Rica,
Cartago, Costa Rica

WALTER FERNÁNDEZ, JORGE A. GUTIÉRREZ Y ELADIO ZÁRATE

Laboratorio de Investigaciones Atmosféricas y Planetarias,
Escuela de Física y Centro de Investigaciones Geofísicas,
Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica

(Recibido 20 de enero 2002, Aceptado 24 de marzo 2002)

ABSTRACT

The monthly wind distributions of 22 stations located in different regions of Costa Rica are analyzed. It is found that these distributions respond to the wind behavior at the synoptic scale and its interaction with topography. The stations which show the greater wind speeds are identified, as well as the range of variation of the wind speed and the predominant wind direction through the year. This analysis indicates that the stations located at barlovent, with respect to wind direction, have lower speeds than the ones located at sotavent. The station La Tejona, located near Arenal reservoir, shows the maximum values, reaching a speed of 37.1 km/h in February. The stations located in the Central Valley also show relatively high wind speeds. In the majority of the analyzed stations, the predominant wind direction corresponds to the Trade winds.

The influence of the sea breeze (mesoscale wind) and the equatorial westerlies (synoptic scale wind) is observed at the stations of Puntarenas, Damas, Pindeco and Palmar Sur.

The rainfall distributions at the same 22 stations, used for the wind distributions, are also analyzed with the purpose to establish if exist any relationship among these variables. The results show differences between the Pacific Watershed and the Caribbean Watershed. The majority of the analyzed stations in the Pacific Watershed show an opposite behavior between wind and rainfall. This clearly establish the influence of the Trade winds intensity in the production of rainfall and identify, in this region, a dry season and a rainy season. This behavior is not observed in the Caribbean Watershed.

1. Introducción

En Costa Rica se han realizado algunos estudios del viento (e.g., Zárate, 1977, 1978, 1980; ICE, 1980), los cuales analizan el comportamiento de esta variable en regiones específicas del país. En algunos casos se estudia el viento en relación con la precipitación (e.g., Zárate, 1977, 1981; Chacón y Fernández, 1984; Galo et al., 1996). Otros trabajos han discutido en forma general la posibilidad de la explotación de la energía eólica en Costa Rica (ICE, 1979, 1985; DSE, 1982; EES, 1984; Vindas, 1989), en los cuales se utilizaron los valores promedio mensual de la velocidad del viento, con registros pequeños y solo para pocos lugares del país. Además, existen otros

estudios en los que se analizaron los datos del viento con objetivos específicos para estudiar la modificación sufrida por el viento en superficie, por la construcción de un embalse (Fernández et al., 1986) o con fines de Ingeniería.

Los estudios del comportamiento del viento son necesarios como base a la utilización de energía eólica. Esta fuente de energía no convencional hasta la fecha no ha sido muy explotada por el hombre en escala comercial. En Costa Rica la principal fuente de energía es la energía hidroeléctrica y aunque la energía eólica no se considera una sustitución o una comparación con el potencial hidroeléctrico con el que tiene el país, ésta puede representar una fuente de energía complementaria.

Costa Rica presenta una topografía compleja que

¹ Corresponding author address: Ana Cecilia Muñoz, Escuela de Física, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
E-mail: cmunoz@itcr.ac.cr

incluye valles, mesetas y montañas de más de tres mil metros, lo que favorece el desarrollo de diversos fenómenos atmosféricos y permite que se presenten diferentes climas en las regiones del país. El principal rasgo orográfico es un sistema montañoso central que la atraviesa de noroeste a sureste. Este eje montañoso es una continuación de las cordilleras centroamericanas.

La interacción de los vientos sinópticos con la compleja topografía y la generación de vientos locales son factores muy importantes en los regímenes de lluvia que se observan. En general, la cadena montañosa que atraviesa longitudinalmente el país, lo divide en dos vertientes que se caracterizan por regímenes de precipitación muy diferentes: Vertiente del Pacífico y Vertiente del Caribe. Ambos regímenes presentan diferencias en cuanto a su distribución mensual y en las horas en que ocurre la lluvia. La Vertiente del Pacífico es menos lluviosa que la del Caribe y se caracteriza por una estación seca y otra lluviosa bien definidas. En la Vertiente del Caribe no se puede decir que existe una estación completamente seca, solamente se presenta una disminución relativa de la lluvia durante los meses de febrero y abril, septiembre y octubre (Campos y Castro, 1992).

En este trabajo se analiza la distribución a lo largo del año, de la magnitud de la velocidad del viento a una altura de 10 m sobre el suelo. También, se examina la posible relación de esta variable con la precipitación. Un estudio previo sobre el tema fue realizado por Zárate (1977). El presente trabajo actualiza y complementa dicho estudio. Además, este trabajo complementa otros de los autores sobre la distribución horaria de la magnitud del viento en Costa Rica (Muñoz et al., 2002a) y sobre el potencial de energía eólica en Costa Rica (Muñoz et al., 2002b).

Las estaciones escogidas para realizar el presente estudio se muestran en la Tabla 1, la cual brinda información acerca de su ubicación y del período utilizado para obtener el valor promedio de la velocidad y de la precipitación. La Figura 1 muestra la ubicación de las estaciones en las diferentes regiones climáticas del país.

2. Principales sistemas de viento: una breve revisión

Para analizar y comprender mejor el comportamiento del viento local en las estaciones analizadas en este estudio, es necesario conocer los principales sistemas de viento que afectan a Costa Rica.

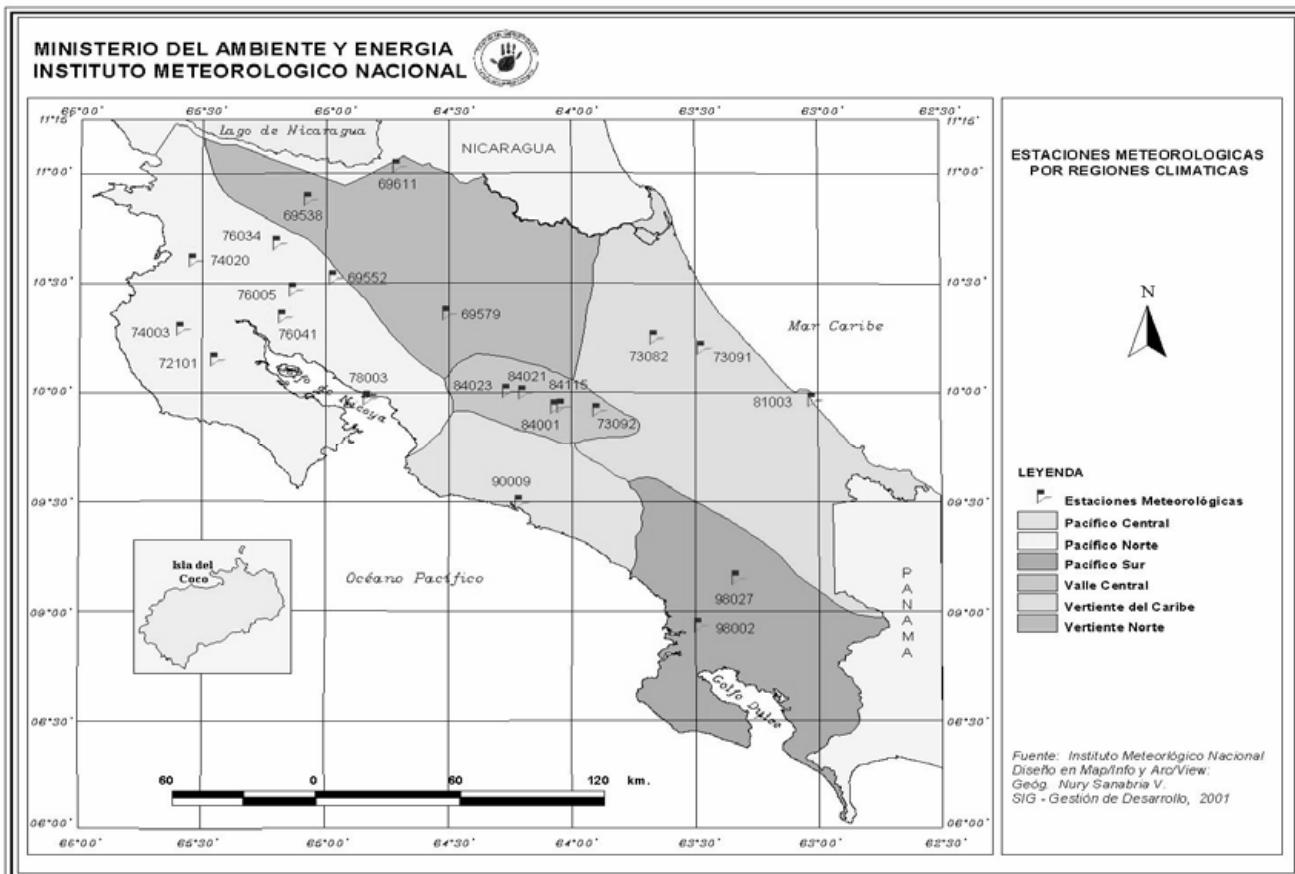


Figura 1: Ubicación de las estaciones meteorológicas en las diferentes regiones climáticas.

MUÑOZ: Variación estacional del viento en Costa Rica y su relación con los regímenes de lluvia

Tabla 1: Estaciones meteorológicas que miden la velocidad del viento y la lluvia utilizadas en este estudio. Con excepción de la estación La Tejona operada por el ICE, las demás, pertenecen al IMN.

ESTACIÓN	N°	LATITUD NORTE	LONGITUD OESTE	ALTITUD MSNM	DISTANCIA DESDE EL SUELO AL MEDIDOR DE VIENTO	PERIODO DE REGISTRO (VIENTO)	PERIODO DE REGISTRO (LLUVIA)
AEROP. JUAN SANTAMARIA	84021	10° 00'	84° 12'	932	10	1974 - 97	1956-98
COBAL	73082	10° 15'	83° 40'	55	10	1971 - 76	1970-76
COOP. TIERRA BLANCA	73092	09° 55'	83° 54'	2100	10	1986 - 90	1972-88
DAMAS	90009	09° 30'	84° 13'	6	4	1983 - 93	1984-98
HACIENDA EL CARMEN	73091	10° 12'	83° 29'	15	10	1981 - 96	1972-98
FABIO BAUDRIT	84023	10° 01'	84° 16'	840	10	1974 - 93	1961-98
FORTUNA	76034	10° 40'	85° 12'	430	10	1976 - 86	1976-94
LA PACÍFICA	76005	10° 25'	85° 05'	15	10	1983-87	1952-95
LA TEJONA	69552	10° 31'	84° 58'	640	10	1976-83	1974-79
LIBERIA	74020	10° 36'	85° 32'	85	9	1974 - 94	1975-98
LIMÓN	81003	9° 57'	83° 01'	5	10	1971 - 98	1941-98
LOS CHILES	69611	11° 02'	84° 43'	40	10	1991 - 93	1986-94
NICOYA	72101	10° 09'	85° 27'	120	8	1971 - 84	1939-98
PALMAR SUR	98002	08° 57'	83° 28'	16	8	1974 - 92	1941-94
PINDECO	98027	09° 08'	83° 20'	397	9	1985 - 93	1984-98
PUNTARENAS	78003	09° 59'	84° 46'	3	10	1971 - 93	1958-98
SANTA CLARA	69579	10° 21'	84° 31'	170	10	1971 - 93	1973-98
SANTA CRUZ	74003	10° 16'	85° 35'	54	10	1984 - 93	1950-96
SABANILLA	84115	09° 57'	84° 03'	1200	9	1985 - 93	1982-96
SAN JOSÉ	84001	09° 56'	84° 05'	1172	10	1971 - 81	1888-97
TABOGA	76041	10° 22'	85° 12'	10	6	1983 - 87	1989-98
UPALA	69538	10° 54'	85° 01'	50	10	1983 - 87	1961-94

Por este motivo en esta sección se hace una revisión general, sin entrar en mayores detalles, de los principales sistemas de vientos que afectan al país. Se agrupan en dos categorías:

Vientos de escala sinóptica, tales como los vientos alisios, los oestes sinópticos y los oestes ecuatoriales (Zárate, 1977).

Vientos de mesoescala, en los cuales se consideran las brisas de mar y tierra y las brisas de valle y montaña, las ondas de montaña y los vórtices de sotavento.

2.1 Vientos sinópticos

Vientos alisios

Costa Rica está ubicada en la zona tropical norte del hemisferio occidental, región que se encuentra bajo la influencia de los vientos alisios. La dirección media de estos vientos es del este-noreste en el hemisferio norte, casi perpendicular al sistema montañoso del país.

Aunque el viento predominante en Costa Rica es el flujo alisio, existen otros regímenes de viento con componente del oeste que lo interrumpen (Zárate, 1977). Los mismos son:

Oestes sinópticos de la troposfera baja y media

Son aquellos vientos con componente del oeste presentes en la troposfera media y baja y que afectan todo el territorio nacional. Se manifiestan como consecuencia de la presencia de disturbios ciclónicos localizados en el Mar Caribe y el norte y noreste de América Central, tales como bajas presiones, tormentas tropicales o huracanes. Debido a la influencia de estos vientos en la Vertiente del Pacífico se pueden presentar temporales o veranillos según sea el espesor de la capa húmeda, cuyo tope está definido por la isolínea de humedad relativa del 50%, y de la cortante vertical del viento. También estos vientos son los responsables de las lluvias intensas en la Vertiente del Pacífico, cuando una su efecto a las barreras orográficas de América Central.

Oestes ecuatoriales en la troposfera baja

Estos vientos, de escala sinóptica, afectan las costas del Pacífico y el Valle Central del territorio costarricense. Se producen debido al desplazamiento de la vaguada ecuatorial, del Ecuador hacia el hemisferio norte, lo que causa que el viento con componente inicial del este se desvíe hacia la baja presión y adquiera componente del oeste entre el Ecuador y la vaguada tropical. Los oestes ecuatoriales afectan la costa occidental de Centro América, principalmente desde abril hasta octubre.

2.2 Vientos de mesoescala

Son tipos de circulación de escala media que se asocian a las características de la superficie o de la topografía de la región y son inducidas en forma térmica, como las brisas de mar y tierra, de valle y montaña, ó en forma mecánica, como las ondas de montaña y vórtices de sotavento. (Atkinson, 1981).

Brisas de mar y tierra

La diferencia en las capacidades de respuesta de las áreas de tierra firme y del océano al campo de radiación origina un gradiente de temperatura, el cual produce en la atmósfera una inestabilidad baroclínica. Genera un sistema de circulación atmosférica conocido como brisa de mar en el día y brisa de tierra en la noche. Durante el día, la superficie terrestre se calienta más que la superficie del mar y como la densidad decrece hacia arriba, las superficies de densidad constante tienen una pendiente hacia arriba de la tierra al mar. Debido a que las superficies isobáricas son usualmente casi horizontales, los dos conjuntos de líneas se intersectan para formar un campo solenoidal en el plano vertical (efecto baroclínico). Este campo origina un sistema de circulación consistiendo de una corriente hacia la tierra adyacente a la superficie y un retorno más débil arriba. Debido al efecto de Coriolis el viento en superficie va rotando hacia la derecha en el hemisferio norte tendiendo a hacerse paralelo a la costa. El efecto es más pequeño en latitudes bajas. Varios factores, tales como el viento prevaleciente de gran escala, la topografía, la irregularidad de la costa y la estabilidad de la atmósfera pueden afectar la brisa de mar.

La brisa de tierra responde a una circulación contraria a la brisa de mar. El viento en superficie, fluye, durante la noche, desde la tierra hacia el mar. La brisa de tierra no es tan intensa como la brisa de mar, ni en velocidad ni en altura de desarrollo, ya que la fuente de calor es menor.

Brisas de montaña y valle

Los vientos de montaña y de valle poseen un mecanismo similar al de las brisas de mar y tierra.

En el día, la radiación absorbida por la ladera de una montaña, permite que el aire sobre la pendiente esté más caliente que el de la atmósfera libre, a la misma altitud. Estas diferencias generan gradientes de temperatura y de presión, los cuales producen vientos pendiente arriba en la montaña durante el día y pendiente abajo en la noche.

En un valle, cada ladera produce un sistema de brisas, pero en general, durante el día se tendrán brisas ladera arriba en la capa superficial y sus corrientes de retorno más arriba. Como resultado se presenta una

corriente de subsidencia sobre el valle, estableciendo un gradiente de temperatura entre la región central y externa del valle, y una circulación a lo largo del eje y hacia el interior del valle, llamada brisa del valle.

Ondas de montaña

Las circulaciones atmosféricas que resultan del flujo de aire que pasa sobre los cerros y las montañas pueden alcanzar diferentes escalas. El tamaño de una circulación está frecuentemente relacionada con el tamaño del obstáculo, pero también se debe considerar la velocidad del viento y la estabilidad vertical de la atmósfera.

Las ondas generadas se presentan debido principalmente a las oscilaciones verticales del aire inducidas por el obstáculo. El aire es forzado a subir, pero las fuerzas restauradoras debido a la gravedad hacen que el aire tienda a alcanzar su nivel original. Dado que las partículas tienen también un movimiento horizontal, éstas se moverán con un patrón de ondas en un plano vertical.

El flujo de aire sobre las montañas puede clasificarse en dos categorías: las ondas que ocurren sobre las montañas, llamadas ondas de montaña y los vórtices que ocurren a sotavento de la orografía.

El número de Froude permite hacer una

clasificación de los flujos orográficos y se calcula a partir de la expresión:

$$Fr = u/Nh$$

donde: “u” es la velocidad del fluido, “h” es la altura del obstáculo, y “N”, una medida de estratificación, es la medida de Brunt-Väisälä:

$$N^2 = g/q_0 (dq/dz)$$

donde: “g” es la aceleración de la gravedad, y “q” es la temperatura potencial.

En experimentos realizados en el laboratorio se ha observado que si el número de Froude es mayor que uno, el aire tiende a subir y a llegar a la cima del obstáculo, en lugar de evitar la orografía, generando así las ondas de montaña (Gutiérrez, 2000).

Cuando el número de Froude es menor que uno, el aire tiende a rodear el obstáculo, evitando pasar por encima, generando así vórtices a sotavento de la orografía. Los vórtices a sotavento se presentan cuando el número de Froude es inferior a 1 y superior a 0.1, (Gutiérrez, 2000).

La formación de estos vórtices a sotavento responden a un mecanismo baroclínico, el cual genera vorticidad horizontal y ésta a su vez genera vorticidad

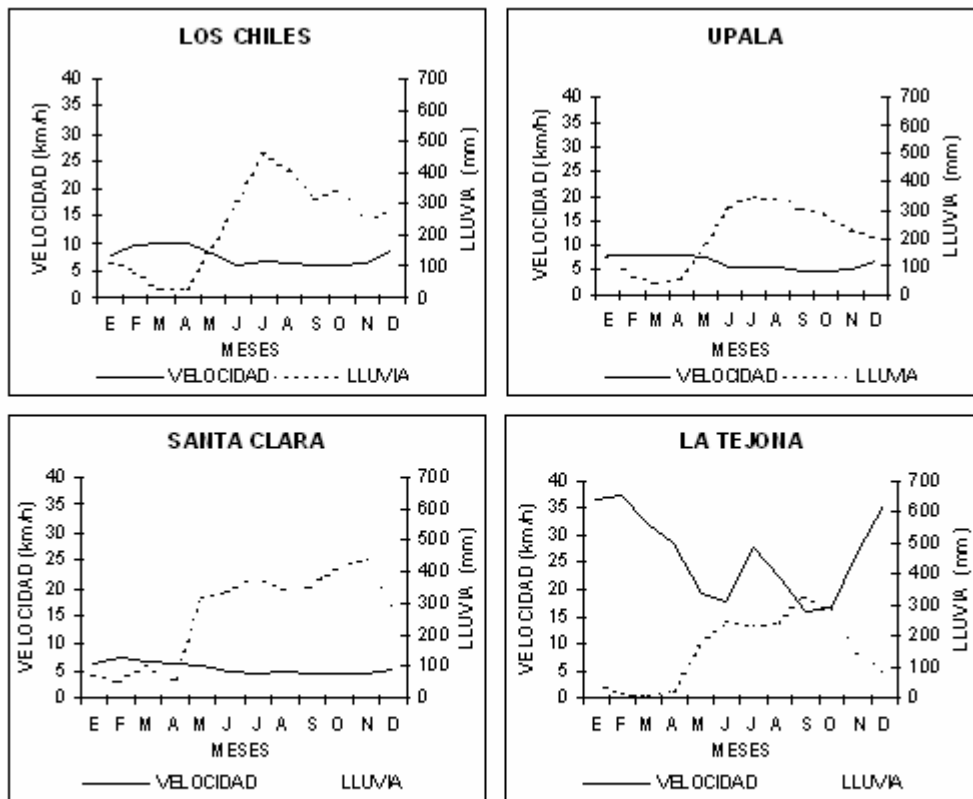


Figura 2: Distribución mensual de la velocidad del viento y de la lluvia en las estaciones Los Chiles (viento: 1991-93, lluvia: 1986-94), Upala (viento: 1983-87, lluvia: 1961-94), Santa Clara (viento: 1971-93, lluvia: 1973-98) y La Tejona (viento: 1976-83, lluvia: 1974-79).

vertical cuando el flujo pasa por el obstáculo. A su vez a sotavento de la orografía, se presentan flujos de retorno.

La formación de ondas de montaña se favorece cuando hay presencia de una capa húmeda estable profunda y un flujo aproximadamente perpendicular al obstáculo. Estas ondas producen fuertes vientos en superficie a sotavento de las montañas (citado por Campos y Castro, 1992).

3. Distribución estacional del viento y de la precipitación

En los meses comprendidos entre noviembre y abril, aumenta la velocidad del viento debido al incremento de los vientos alisios, inhibiendo el desarrollo y avance de las brisas de mar del Pacífico. Además hay un aumento en la cortante vertical del viento que inhibe la convección.

En la Vertiente del Pacífico, la velocidad del viento es mayor durante los meses de la época seca. Este comportamiento opuesto entre la velocidad del viento y la cantidad de lluvia, permite justificar el desarrollo de la energía eólica en nuestro país, como un acertado complemento al desarrollo de la energía hidroeléctrica, durante los meses en los cuales disminuye la precipitación.

A continuación, se presenta una descripción del comportamiento mensual de la velocidad del viento y la lluvia, para cada una de las estaciones consideradas en este estudio.

Zona Norte

Las estaciones Los Chiles, Upala y Santa Clara (San Carlos), ubicadas en la Zona Norte, muestran una distribución mensual de la velocidad bastante uniforme, con una leve tendencia a aumentar la magnitud de la velocidad en los meses de febrero o marzo, así como en julio o agosto (Figura 2). Santa Clara reporta valores de la velocidad entre 4.5 y 7.2 km/h, con dirección N y las estaciones de Los Chiles y Upala presentan valores entre 6.1 y 9.9 km/h, y 4.7 y 8 km/h respectivamente, con dirección E, SE (viento alisio).

Para las tres estaciones la distribución del promedio mensual de la precipitación, difiere un poco, de estación a estación y se nota que no existe una época seca bien definida (Figura 2). La precipitación aumenta desde mayo hasta julio alcanzando valores máximos entre 300 y 500 mm, en julio, aunque en Santa Clara el máximo se alcanza en septiembre. El máximo de precipitación que se

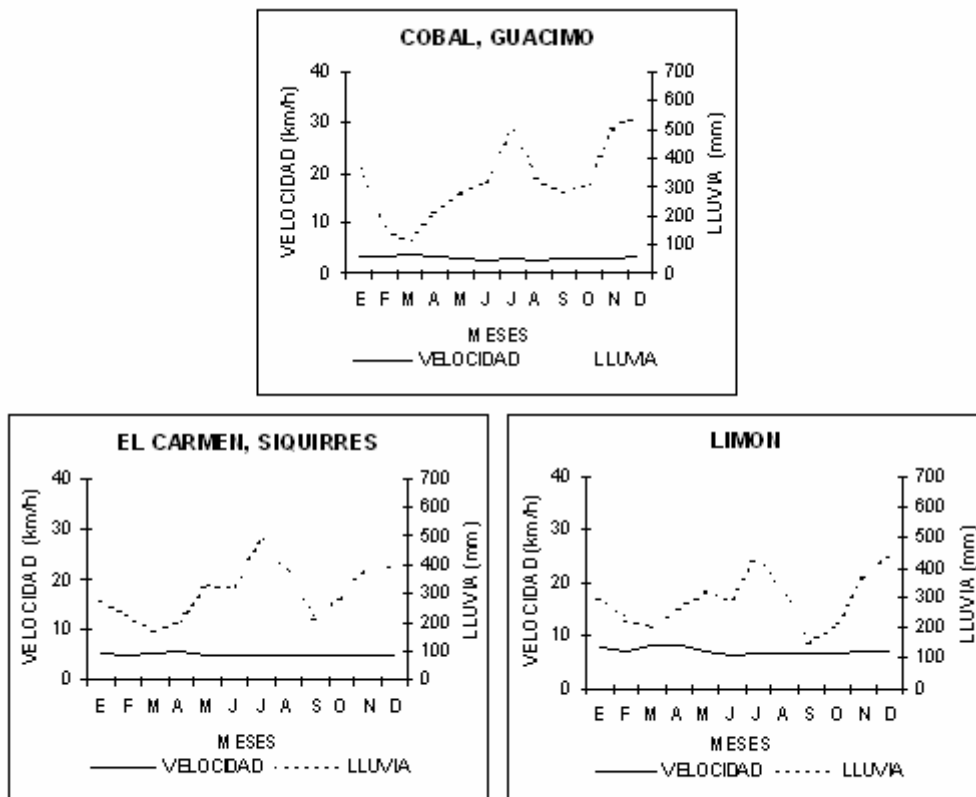


Figura 3: Distribución mensual de la velocidad del viento y de la lluvia en las estaciones Cobal (viento: 1971-76, lluvia: 1970-76), El Carmen (viento: 1981-86, lluvia: 1972-98) y Limón (viento: 1971-98, lluvia: 1941-98).

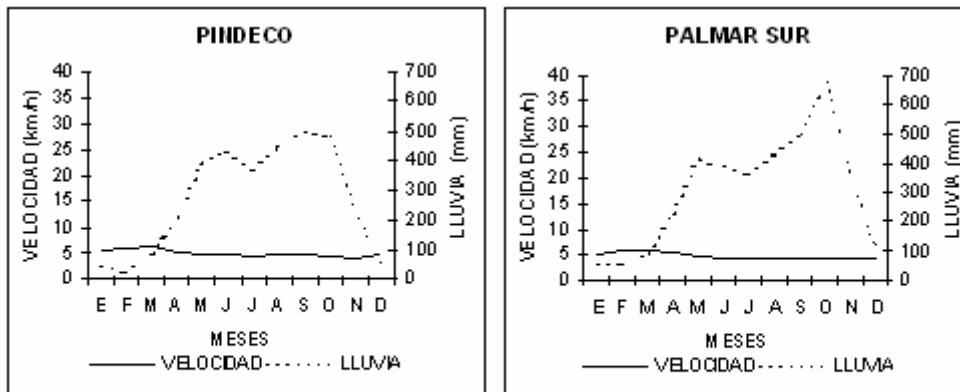


Figura 4: Distribución mensual de la velocidad del viento y de la lluvia en las estaciones Pindeco (viento: 1971-76, lluvia: 1970-76) y Palmar Sur (viento: 1974-92, lluvia: 1941-94)

encuentra en el este del Caribe, cerca de las costas de Centro América y durante los meses de verano, es consistente con las circulaciones cruzadas asociadas al flujo en la región de salida de la corriente en chorro de bajo nivel en los alisios, descritos por Amador, 1998.

La estación La Tejona de acuerdo al trazado de la divisoria de aguas utilizado en la Figura 1, se localiza en la región Pacífico Norte, sin embargo para su análisis está considerada dentro de las estaciones de la Zona Norte (Figura 2). Esta estación presenta los valores más altos de la velocidad, debido a que la región del Arenal se encuentra en una depresión tectónica entre las Cordilleras de Guanacaste y Tilarán y también a factores locales como la disminución de la rugosidad producida por el lago y las brisas inducidas por éste (Fernández et al, 1986). La distribución mensual de la velocidad muestra valores altos a partir de diciembre, alcanzando un máximo en febrero; luego los valores disminuyen hasta junio, aumentan en julio y descienden nuevamente hasta alcanzar un mínimo en septiembre. La rapidez promedio mensual varía entre 15.8 y 37.1 km/h y la dirección predominante es del E, asociada al viento alisio.

Esta estación presenta una época seca entre febrero y abril, luego se da un aumento en la precipitación, alcanzando en septiembre un máximo alrededor de 330 mm (Figura 2).

Región Caribe

Las estaciones Cobal (Guácimo), El Carmen (Siquirres) y Limón, ubicadas en la Región Caribe muestran una distribución anual de la velocidad del viento muy regular con valores casi constantes durante todo el año (Figura 3).

Las dos primeras estaciones reportan velocidades entre 2.7 y 5.6 km/h, con dirección predominante E, NE (viento alisio) y la estación Limón, valores alrededor de 7

km/h y con dirección predominante del E durante todo el año.

La distribución promedio mensual de la precipitación en estas estaciones es similar. Se observan valores máximos entre 400 y 560 mm entre los meses de julio y diciembre, en las estaciones Cobal y Limón y valores mínimos en los meses de marzo y septiembre, en Limón.

Además, no presentan una época seca bien definida a través del año. El máximo de lluvia en julio, está asociado aparentemente a la corriente en chorro en bajo nivel, como se mencionó (Amador, 1998) y el máximo en diciembre está asociado con las incursiones de los frentes fríos en la región, que inducen temporales en el Caribe.

Pacífico Sur

La distribución de la velocidad promedio mensual en las estaciones Pindeco y Palmar Sur, ubicadas en la región del Pacífico Sur, es muy regular a través del año, (Figura 4). La velocidad alcanza valores de 6 km/h, con dirección SO, O en Pindeco y valores de 5.5 km/h, con dirección O en Palmar Sur. Las direcciones SO y O del viento, son producto de las brisas de mar en la época seca y una combinación de la brisa del mar y los oestes ecuatoriales en la época lluviosa (Zárate, 1978). En estas estaciones aunque la distribución de la velocidad promedio mensual es uniforme a través del año, el patrón de la distribución de la precipitación es diferente para cada estación. (Figura 4). La precipitación aumenta entre marzo y junio, luego de presentar un mínimo en julio, correspondiente al veranillo, la precipitación alcanza un máximo de 500 mm y 700 mm en septiembre, respectivamente.

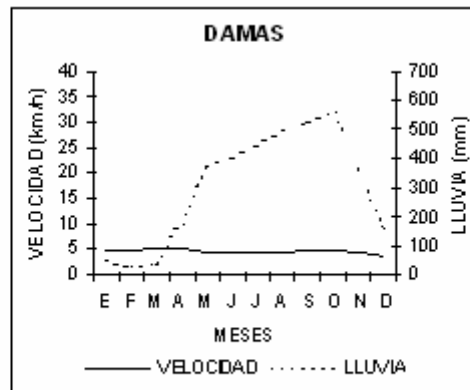


Figura 5: Distribución mensual de la velocidad del viento y de la lluvia en las estaciones Damas (viento: 1983-93 , lluvia: 1984-98).

Pacífico Central

La estación Damas, ubicada en la región del Pacífico Central intermontano, muestra una distribución anual de la rapidez promedio mensual muy regular (Figura 5). La velocidad posee valores entre 3.8 y 5.1 km/h con dirección predominante del sur.

El patrón de la distribución de la precipitación

muestra un incremento a partir de marzo hasta alcanzar un máximo cercano a los 600 mm en el mes de octubre.

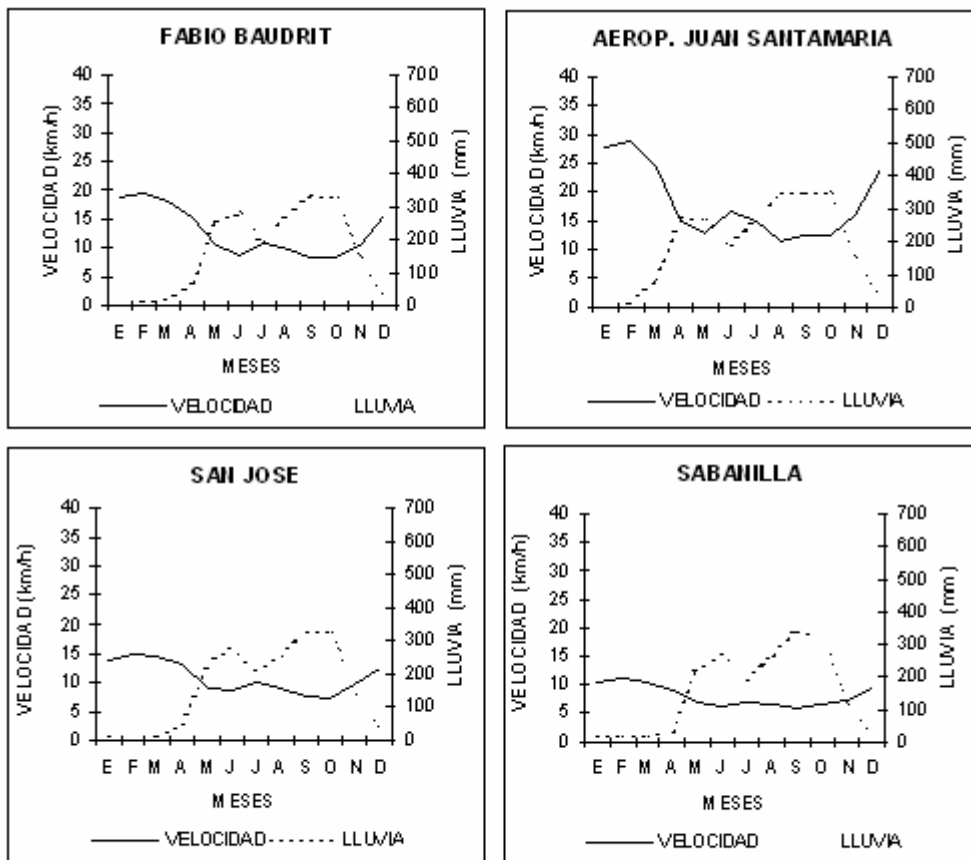


Figura 6: Distribución mensual de la velocidad del viento y de la lluvia en las estaciones Fabio Baudrit (viento: 1974-93, lluvia: 1961-98), Aeropuerto Juan Santamaría (viento: 1974-97, lluvia: 1956-98), San José (viento: 1971-81, lluvia: 1888-97) y Sabanilla (viento: 1985-93, lluvia: 1982-96).

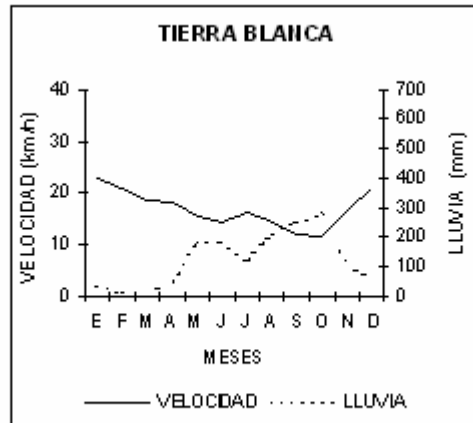


Figura 7: Distribución mensual de la velocidad del viento y de la lluvia en las estación Coop. Tierra Blanca (viento 1986-90, lluvia 1972-88)

Valle Central

En el Valle Central, las estaciones Estación Experimental Fabio Baudrit, Aeropuerto Juan Santamaría, San José y Sabanilla, presentan una distribución de la velocidad del viento irregular a través del año, (Figura 6).

En estas estaciones los valores más altos de la

velocidad se observan en los primeros meses del año, alcanzando un máximo en el mes de febrero, debido a un refuerzo del viento alisio. Los valores disminuyen en mayo y junio, aumentan nuevamente en julio y alcanzan los mínimos en septiembre u octubre.

La velocidad promedio mensual para este grupo de estaciones varía entre 5.9 y 28.7 km/h y la dirección

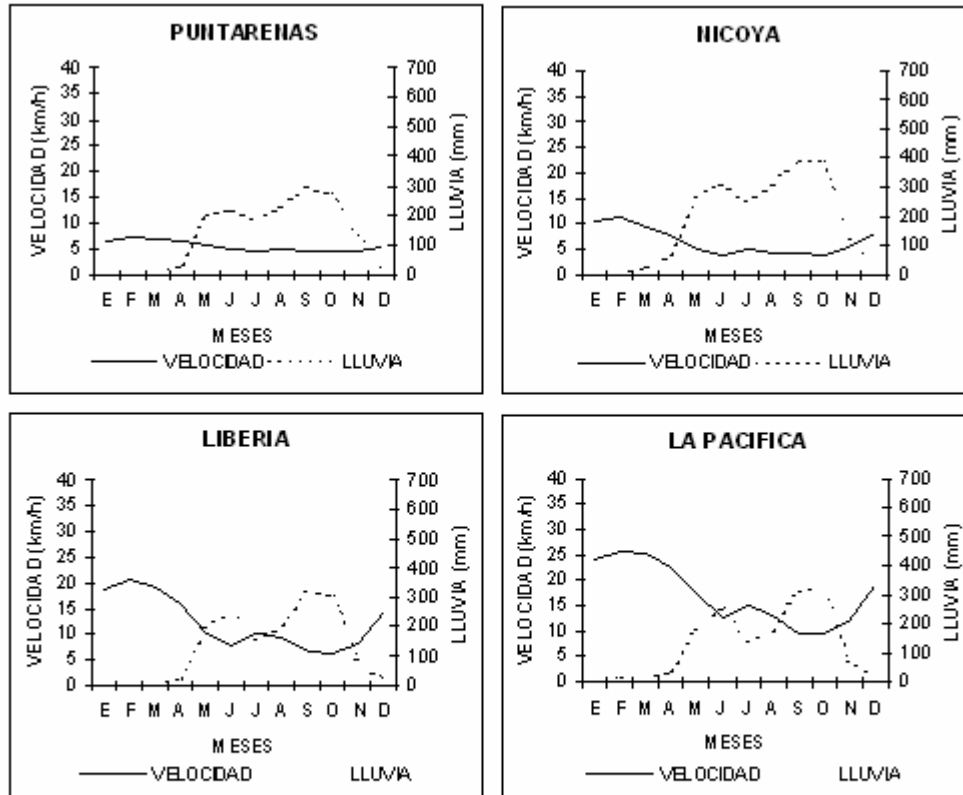


Figura 8: Distribución mensual de la velocidad del viento y de la lluvia en las estaciones Puntarenas (viento: 1971-93, lluvia: 1958-98), Nicoya (viento:1971-84, lluvia: 1939-98), Liberia (viento: 1974-94, lluvia: 1975-98) y La Pacifica (viento: 1983-87, lluvia: 1952-95)

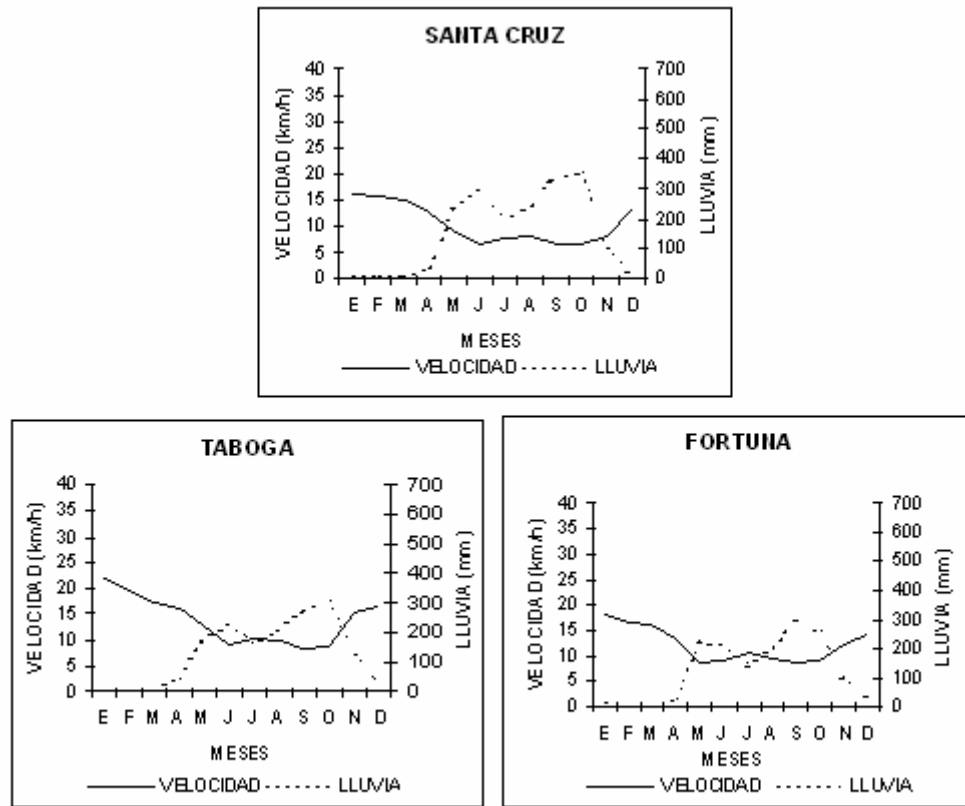


Figura 9: Distribución mensual de la velocidad del viento y de la lluvia en las estaciones Santa Cruz (viento: 1984-93, lluvia: 1950-96), Taboga (viento: 1983-87, lluvia: 1989-98) y Fortuna (viento: 1976-86, lluvia: 1976-94)).

predominante del viento es la del E, NE, correspondiente al viento alisio. Sabanilla posee los valores más bajos y Aeropuerto Juan Santamaría, los más altos.

La estación Coop. Tierra Blanca, posee una distribución anual de la velocidad promedio mensual, similar a la de las estaciones anteriores, con la diferencia de que la rapidez disminuye de enero a junio (Figura 7). La velocidad alcanza valores entre 11.4 y 22.5 km/h, con dirección predominante del este (viento alisio).

En todas estas estaciones se observa claramente un patrón de distribución de la lluvia opuesto al de la velocidad, es decir existe un aumento de precipitación cuando la rapidez del viento tiende a disminuir. Las estaciones Fabio Baudrit, Aeropuerto Juan Santamaría, San José y Sabanilla, muestran una época seca bien definida durante los meses de diciembre a marzo y con valores de cero precipitación (Figura 6). Durante los meses de lluvia se observa un incremento en el mes de junio y valores máximos, entre 300 y 350 mm en los meses de septiembre u octubre. En la estación Coop. Tierra Blanca, la distribución de la precipitación varía con respecto a las estaciones anteriores, ya que en los primeros meses del año hay presencia de lluvias, disminuyendo en febrero y marzo (Figura 7).

Pacífico Norte

En la región del Pacífico Norte, se ubican las estaciones: Puntarenas, Nicoya, Liberia, La Pacífica, Santa Cruz, Taboga y Fortuna (Bagaces).

La estación Puntarenas muestra una distribución anual de la velocidad promedio mensual muy regular. (Figura 8). Las velocidades poseen valores entre 4.5 y 7.2 km/h con dirección predominante del sur. De acuerdo a Zárate (1978), durante la época seca los vientos del sur corresponden a las brisas de mar y en la época lluviosa son producto de la combinación de la brisa de mar y los oestes ecuatoriales. En esta estación, la precipitación aumenta entre marzo y junio. Luego de presentar un mínimo en julio, se alcanza un máximo de 300 mm entre septiembre y octubre.

Las estaciones Nicoya, Liberia y La Pacífica muestran distribuciones de la velocidad promedio mensual muy similares entre sí. (Figura 8). Los valores más altos de la rapidez del viento se presentan a partir del mes de diciembre alcanzando un máximo en el mes de febrero, producto del refuerzo del viento alisio, luego los valores disminuyen hasta junio, aumentan en el mes de julio y decrecen nuevamente, hasta alcanzar valores mínimos en septiembre. La velocidad promedio mensual en esta región

del país varía entre los 3.6 y 25.7 km/h. Nicoya muestra los valores más bajos y La Pacífica los más altos.

La dirección predominante del viento en estas estaciones es del N, NE, lo que se asocia con vientos alisios fuertes.

Las estaciones antes mencionadas, muestran distribuciones de la precipitación muy semejantes entre sí. (Figura 8). En todas las estaciones se aprecia una época seca bien definida entre diciembre y marzo y se observa un incremento en la precipitación a partir de abril, y hasta junio. Los valores mínimos se presentan en julio y se alcanzan valores máximos entre 300 y 400 mm, en los meses de septiembre u octubre.

Las estaciones Santa Cruz, Taboga y Fortuna (Bagaces), ubicadas también en la región del Pacífico Norte, poseen una distribución anual de la velocidad promedio mensual similar a las estaciones anteriores (Figura 9).

Estas estaciones a diferencia de las otras, presentan una disminución de la rapidez entre enero y junio, aumenta en el mes de julio y alcanza los valores mínimos en septiembre y octubre. En estas estaciones se observan valores entre 6.4 y 22 km/h con dirección N-NE y NO para la estación de Fortuna, debido quizás a la presencia de brisas de montaña o vientos de retorno al pasar el flujo de aire a través del volcán Rincón de la Vieja.

Estas estaciones poseen una distribución mensual de la precipitación bastante similar (Figura 9). Se observa una época seca bien definida entre diciembre y marzo y luego la precipitación aumenta a partir de abril y hasta junio. En julio se nota una disminución y luego se alcanza un valor máximo, entre 300 y 400 mm, en septiembre u octubre. Además, se puede apreciar que cuando existe un aumento en la magnitud de la velocidad del viento, la precipitación disminuye y cuando hay una reducción en la magnitud de la velocidad del viento, la precipitación aumenta.

4. Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos, se observa que la distribución mensual de la velocidad del viento en nuestro país, responde al comportamiento del viento a escala sinóptica y a su interacción con la orografía.

Entre los meses de mayo y junio y también entre septiembre y octubre, los vientos alisios se debilitan debido a los sistemas de baja presión en el Golfo de México y en el Caribe. En julio y a principios de agosto, se observa un aumento del viento alisio y la disminución de la brisa húmeda del Pacífico. A partir del mes de noviembre y hasta marzo, se nota un incremento en la velocidad del viento alisio. Estos vientos aumentan desde noviembre, debido a la presencia de empujes polares desde latitudes medias, con ello el aumento del gradiente meridional de la presión sobre América Central y el

Caribe.

El análisis de la distribución mensual de la velocidad del viento, permite caracterizar esta variable, en las diferentes regiones del país.

En la región Zona Norte, las estaciones muestran una distribución bastante uniforme y similar entre sí, con valores que varían entre 4.5 y 10 km/h.

Las estaciones de la Región Caribe presentan una distribución uniforme, con valores casi constantes. Se observa que la velocidad disminuye conforme la estación se aleja de la costa, y varía entre 3 y 7.5 km/h.

En la región Pacífico Sur, la distribución es bastante uniforme y similar para todas las estaciones. La velocidad alcanza valores de 5 ó 6 km/h.

La estación Damas, ubicada en la región Pacífico Central, muestra una distribución uniforme, con valores alrededor de 4 km/h.

En la región Valle Central, la distribución es variable a través del año. De diciembre a abril y también en julio con valores altos y en septiembre y octubre con valores mínimos. La velocidad varía entre 5.8 y 28.7 km/h. La estación Tierra Blanca presenta un patrón de distribución diferente a las estaciones anteriores: la rapidez disminuye a partir de enero. La velocidad alcanza un valor de 22.5 km/h.

En la región Pacífico Norte, las estaciones Liberia y Nicoya, presentan una distribución muy parecida a las del Valle Central, velocidades altas en diciembre, en los primeros meses del año y en julio; velocidades bajas en septiembre y octubre. Puntarenas es la única estación de esta región que muestra una distribución regular, con valores alrededor de 5 km/h. Santa Cruz, Taboga, Fortuna y Nuevo Tronadora, tienen una distribución diferente: la velocidad disminuye a partir de enero, aumenta en julio y los valores mínimos se producen en septiembre y octubre.

Se observa claramente que las estaciones ubicadas a barlovento, con respecto al viento alisio, reportan velocidades menores que otras localizadas a sotavento. La estación La Tejona posee los máximos valores. Las estaciones ubicadas en la región Valle Central también presentan magnitudes del viento relativamente altas.

La dirección predominante del viento, en la mayoría de las estaciones analizadas, corresponde a la del flujo alisio; en las estaciones Puntarenas (Pacífico Norte), Damas (Pacífico Central), Pindeco y Palmar Sur (Pacífico Sur), se observa la influencia de la brisa de mar, al presentar vientos del S, O y SO.

Todas las estaciones del Valle Central y Pacífico Norte, excepto Puntarenas y Taboga (ubicadas cerca de la costa), muestran en el tercer trimestre una disminución apreciable de la magnitud de la velocidad del viento, entre los meses de abril y mayo, así como un aumento significativo en el cuarto trimestre, entre los meses de noviembre y diciembre. Estas variaciones coinciden con la época de transición de la época lluviosa y seca,

respectivamente.

De acuerdo con el análisis de las estaciones consideradas en este estudio, La Tejona presenta los valores más altos de velocidad y las de la región Pacífico Sur, los más bajos.

En Costa Rica no existe una relación general entre la distribución mensual de la lluvia y la velocidad del viento en superficie. En la mayoría de las estaciones de la Vertiente del Pacífico se observa un comportamiento opuesto entre la lluvia y la velocidad del viento. Durante los meses en los cuales la magnitud de la velocidad aumenta, existe una disminución de la lluvia y viceversa. Al descender la velocidad del viento alisio, la brisa del Pacífico aumenta y con ella el transporte de humedad. Este factor, unido a la existencia del sistema montañoso del país, favorece la presencia de las lluvias.

Este comportamiento opuesto entre la lluvia y la velocidad del viento, no se aprecia en las estaciones de la Vertiente del Caribe, pero, permite identificar una época seca y otra lluviosa en la Vertiente del Pacífico.

Agradecimientos

Los autores están agradecidos con Rafael Enrique Chacón por sus valiosos comentarios y sugerencias. También, expresan su agradecimiento al Instituto Meteorológico Nacional y al Instituto Costarricense de Electricidad por haber proporcionado los datos utilizados en este trabajo.

RESUMEN

Se estudia la distribución mensual del viento en 22 estaciones ubicadas en diferentes regiones del país. Se encuentra que esta distribución responde al comportamiento del viento en la escala sinóptica y a su interacción con la orografía. Se identifican las estaciones que presentan mayor velocidad del viento, así como el rango de variación de la rapidez y la dirección predominante a través del año. Este análisis lleva a establecer que las estaciones ubicadas a barlovento, con respecto a la dirección del viento, reportan velocidades menores que las ubicadas a sotavento. La estación La Tejona, ubicada cerca del embalse de Arenal, presenta los valores máximos, alcanzando una velocidad de 37.1 km/h en el mes de febrero. Las estaciones ubicadas en el Valle Central también muestran magnitudes del viento relativamente altas. La dirección predominante del viento, en la mayoría de las estaciones analizadas corresponde al viento Alisio, sistema de viento de escala sinóptica.

En las estaciones Puntarenas, Damas, Pindeco y Palmar Sur, se observa la influencia de la brisa de mar, (viento de mesoescala) y de los vientos ecuatoriales (vientos de escala sinóptica).

También, se analiza la distribución mensual de la lluvia en las mismas 22 estaciones seleccionadas para estudiar la distribución mensual de la velocidad del viento, con el propósito de establecer si existe alguna relación entre esas variables. Los resultados muestran diferencias entre la Vertiente del Pacífico y la Vertiente del Caribe. La mayoría de las estaciones analizadas en la Vertiente del Pacífico muestran un comportamiento opuesto entre el viento y la lluvia, estableciendo claramente la influencia de la velocidad del viento Alisio en la producción de la lluvia e identificando en esta región, una época seca y otra lluviosa. En la Vertiente del Caribe, no se aprecia este comportamiento.

Referencias

- Amador, J. A., 1998: "A climate feature of the Tropical Americas: The Trade Wind Easterly Jet", *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, Vol. 5, No. 2.
- Atkinson, B.W., 1981: *Meso-scale Atmospheric Circulations*, London-New York: Academic Press, 495 pp.
- Campos, M. y Castro, V., 1992: El clima a sotavento de las montañas de Costa Rica. *Tópicos Meteorológicos*, N°2.
- Chacón, R. E., y Fernández, W., 1984: "Temporal and spatial rainfall variability in the mountainous region of the reventazón river basin, Costa Rica", *Journal of Climatology*, Vol. 5.
- EES., 1984: "Non conventional energy sources. Wind energy". Electrowatt Engineering Services Ltd. Volume I.
- DSE., 1982: "Diagnóstico sobre energía eólica". San José, C.R.: Dirección Sectorial de Energía.
- Fernández, W., Chacón, R. E., Melgarejo, J., 1986: "Modifications of air flow due to the formation of a reservoir", *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Vol.25.
- Galo, E.R., Fernández, W. y Zárate E., 1996: Efectos de mesoescala del temporal de 29 de octubre al 3 de noviembre de 1985 sobre Costa Rica.
- Gutiérrez, Jorge A., 2000: Seminario regional de formación profesional para instructores meteorológicos nacionales de la AR III y AR IV. Lima, Perú.
- ICE., 1979: "Fuentes de energía no convencionales". San José, C. R.: Instituto Costarricense de Electricidad.
- ICE., 1980: "Análisis preliminar del viento en Costa Rica". San José: Instituto Costarricense de Electricidad.
- ICE., 1985. "Fuentes de energía no convencionales". San José: Instituto Costarricense de Electricidad.
- Muñoz, A.C., W. Fernández, J.A. Gutiérrez y E. Zárate, 2002a: Distribución horaria de la magnitud del viento en Costa Rica. *Tópicos Meteorológico y Oceanográficos*,
- Muñoz, A.C., W. Fernández, J.A. Gutiérrez y E. Zárate, 2002b: Potencial de energía eólica en Costa Rica. *Tópicos Meteorológico y Oceanográficos*,
- Vindas, Carlomagno., 1989. Estudio preliminar para la instalación de una planta eólica de generación eléctrica en Costa Rica. Tesis de grado. Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad de Costa Rica.
- Zárate, H. Eladio, 1977: "Principales sistemas de vientos que afectan a Costa Rica y sus relaciones con la precipitación". Tesis de grado. Escuela de Física. Universidad de Costa Rica.

- Zárate, H. Eladio, 1978: "Comportamiento del viento en Costa Rica". Nota de investigación #2. San José: Instituto Meteorológico Nacional.
- Zárate, H. Eladio, 1980: "El viento en San José". Nota técnica. San José, C. R.: Instituto Meteorológico Nacional.
- Zárate, H. Eladio, 1981: "Regímenes de lluvia y vientos en Limón, Costa Rica". Informe Semestral. San José. Instituto Geográfico Nacional.

Distribución horaria de la magnitud del viento en Costa Rica

ANA CECILIA MUÑOZ

Escuela de Física, Instituto Tecnológico de Costa Rica,
Cartago, Costa Rica

WALTER FERNÁNDEZ, JORGE A. GUTIÉRREZ Y ELADIO ZÁRATE

Laboratorio de Investigaciones Atmosféricas y Planetarias,
Escuela de Física y Centro de Investigaciones Geofísicas,
Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica

(Recibido 20 de enero 2002, Aceptado 24 de marzo 2002)

ABSTRACT

The diurnal variations of wind speed at 20 stations located in different parts of Costa Rica are analyzed. At the majority of the stations, the wind speed starts increasing at about 5 a.m. and reaches its maximum value near noon. The minimum values occur during the night or early morning. During the night the variation in wind speed is relatively small.

The analysis of the hourly wind speed distributions, as well as the analysis of monthly wind speed distribution, indicate that the stations of the Central Valley and the North-Pacific region, except Puntarenas and Taboga (located near the coast), show a significant decrease in wind speed between April and May, as well as a significant increase in wind speed between November and December. These periods coincide with the transition periods from the dry to the rainy season and from the rainy to the dry season, respectively. The results show that La Tejona station presents the highest wind speed values. The lowest values in wind speed are found in the stations located in the South-Pacific region.

1. Introducción

Variaciones diurnas de la magnitud del viento cerca de la superficie en diferentes lugares (e.g., Crawford y Hudson, 1973; Mahrt, 1981), promediadas sobre períodos relativamente largos, muestran que la magnitud del viento se incrementa marcadamente después de la salida del sol, alcanza su máximo valor temprano en la tarde y decrece significativamente hasta cerca de la puesta del sol, después de la cual se observa un decrecimiento. Durante la noche la magnitud del viento cambia muy poco.

El suelo se ajusta más rápido que el aire sobre él a un cambio en el flujo de energía solar (calentamiento o enfriamiento radiativo). Debido a esto, cuando un enfriamiento en la superficie toma lugar, una capa térmica interna (Townsend, 1976) se propaga lejos del suelo a través de la capa superficial (Antonia et al, 1979). Como lo menciona Antonia et al. (1979), Townsend (1976)

describe una tendencia a la desaceleración del flujo medio con el colapso del movimiento turbulento del flujo medio, cuando el número de Richardson excede un valor crítico. El incremento en la magnitud del viento cerca de la superficie que sigue al rompimiento de la inversión de la mañana se debe a una rápida y eficiente transferencia de momentum (cantidad de movimiento) desde afuera a través de la capa límite planetaria, la cual evoluciona inestablemente (o convectivamente) en el día (e.g., Arya, 1988). Algo similar ocurre durante los eclipses de sol (e.g., Fernández et al., 1994).

En este trabajo se analiza la distribución horaria de la velocidad del viento para estaciones que poseen esta información en Costa Rica. Otros trabajos de los autores tratan sobre la variación estacional del viento en Costa Rica y su relación con los regímenes de lluvia (Muñoz et al., 2002a) y sobre el potencial de energía eólica en Costa Rica (Muñoz et al., 2002b).

La Tabla 1 muestra la longitud de la serie de datos

1 Corresponding author address: Ana Cecilia Muñoz, Escuela de Física, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
E-mail: cmunoz@itcr.ac.cr

TOPICOS METEOROLOGICOS Y OCEANOGRAFICOS

Tabla 1: Período del registro de datos de la velocidad del viento en las estaciones utilizadas en este estudio

ESTACION	Años de registro de la velocidad horaria																											
	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98
AEROP. JUAN SANTAMARIA				x	x	x	x	x	X	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	X	
COBAL, GUACIMO	x	x	x	x	x	x																						
DAMAS, QUEPOS													x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x					
EL CARMEN, SIQUIRRES											x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
EST. EXP. FABIO BAUDRIT				x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x					
FORTUNA, BAGACES						x	x	x	x	x	x	x	x	x	x													
LIBERIA.				x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
LIMON	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
LOS CHILES																					x	x	x					
NICOYA	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x															
PALMAR SUR				x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x					
PINDECO															x	x	x	x	x	x	x	x	x					
PUNTARENAS	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x					
SANTA CLARA	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x					
SANTA CRUZ														x	x	x	x	x	x	x	x	x	x					
SABANILLA															x	x	x	x	x	x	x	x	x					
SAN JOSE	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x																	
TABOGA		x													x	x	x											
TIERRA																		x	x	x	x	x	x					
UPALA															x	x	x	x	x	x	x	x						

de la velocidad del viento, para cada estación. Como no se puede escoger un período común para todas las estaciones, se calculó el valor promedio horario utilizando toda la serie de datos disponible. Los valores promedio horario de la rapidez del viento fueron suministrados especialmente para este trabajo de investigación, por el Instituto Meteorológico Nacional. Para la estación La Tejana se calculó el valor promedio horario a partir de los

datos horarios suministrados por el Instituto Costarricense de Electricidad.

Para cada una de las estaciones se muestran cuatro gráficos, con la distribución horaria de la velocidad del viento para tres meses consecutivos. Se ilustra así el comportamiento horario de la rapidez del viento para todos los meses del año.

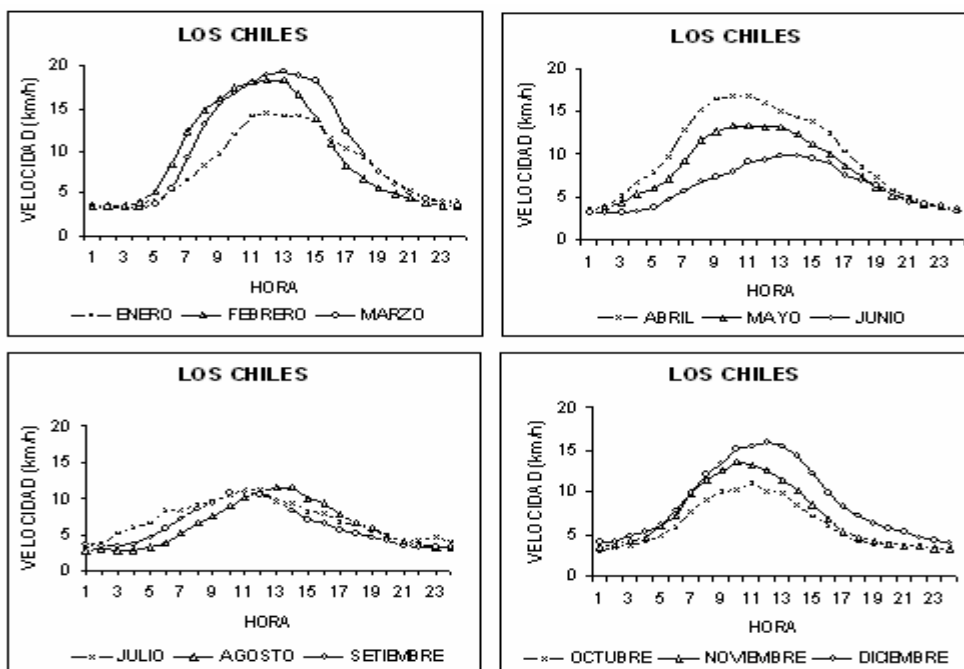


Figura 1: Distribución horaria de la velocidad del viento a una altura de 10 m en la estación Los Chiles (1991-94) y para los meses mostrados.

2. Zona Norte

La Figura 1 muestra la distribución de la velocidad horaria promedio del viento para todos los meses del año en la estación Los Chiles. La distribución es diferente para los diversos meses del año y los valores máximos se presentan entre las 10 y las 14 horas, variando

entre 9.9 km/h en junio y 19.4 km/h en marzo. Los valores mínimos se aprecian en las horas de la noche y de la madrugada, variando entre 2.7 km/h en agosto y 3.9 km/h en diciembre. En algunos meses del año se observa que la velocidad varía poco con respecto al tiempo entre las 19 y las 4 horas. La dirección predominante del viento para todas las horas del día y durante el año es del este, con

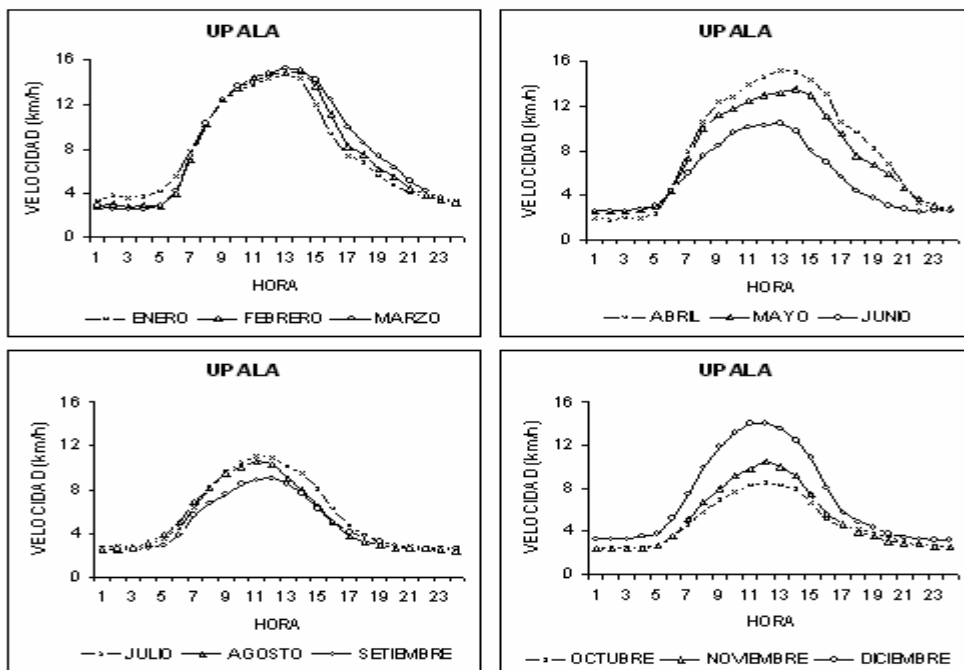


Figura 2: Distribución horaria de la velocidad del viento a una altura de 10 m en la estación Upala (1983-87) y para los meses mostrados.

TOPICOS METEOROLOGICOS Y OCEANOGRAFICOS

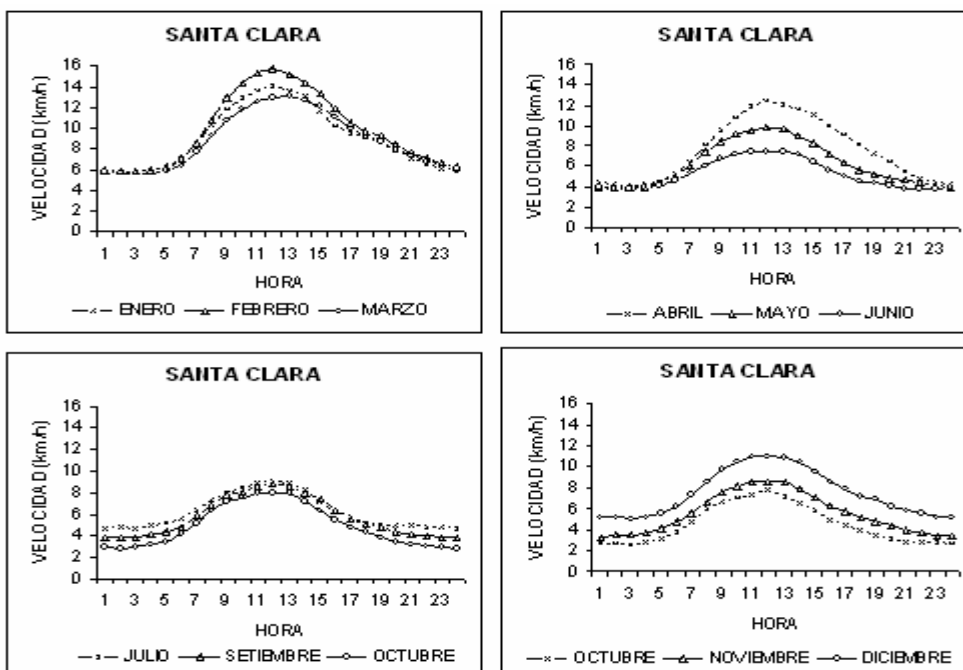


Figura 3: Distribución horaria de la velocidad del viento a una altura de 10 m en la estación Santa Clara (1983-97) y para los meses mostrados.

presencia de algunos nortes y norestes en las noches y madrugadas.

La distribución de la velocidad horaria promedio del viento para todos los meses del año en la estación Upala, se muestra en la Figura 2. La distribución es bastante regular para los diferentes meses del año. Los valores máximos se presentan entre las 11 y las 14 horas, variando entre 8.6 km/h en octubre y 15.3 km/h en marzo.

Los valores mínimos se presentan en las horas de la noche y de la madrugada, variando entre 1.8 km/h en abril y 2.3 km/h en octubre. En la mayoría de los meses del año se observa que la rapidez varía poco con respecto al tiempo entre las 19 y las 5 horas.

Se aprecia una disminución apreciable de la rapidez del viento entre los meses de mayo y junio y un aumento entre los meses de noviembre y diciembre,

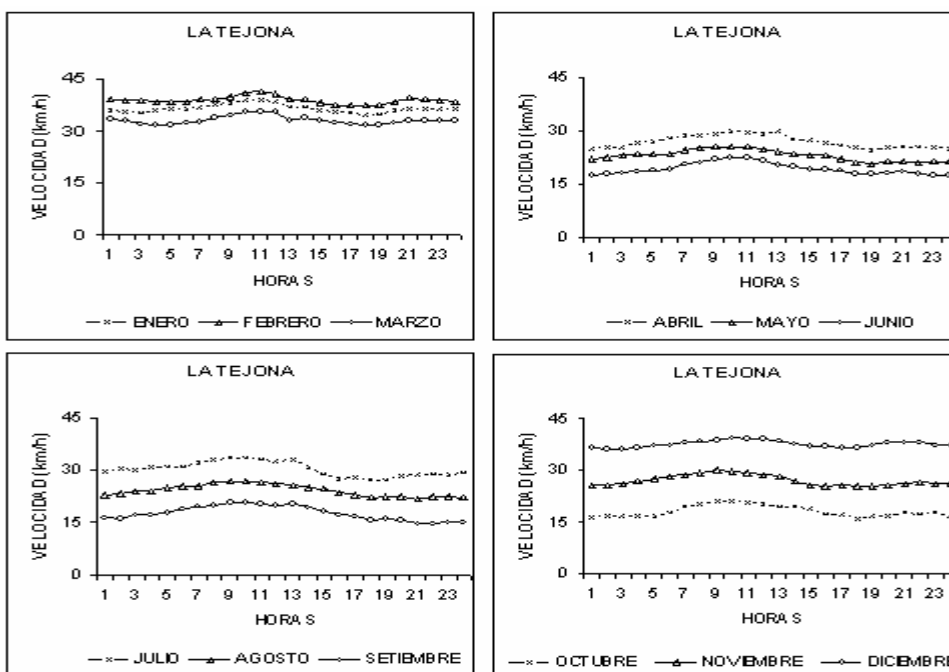


Figura 4: Distribución horaria de la velocidad del viento a una altura de 10 m en la estación La Tejona (1991-97) y para los meses mostrados.

MUÑOZ: Distribución horaria de la magnitud del viento en Costa Rica

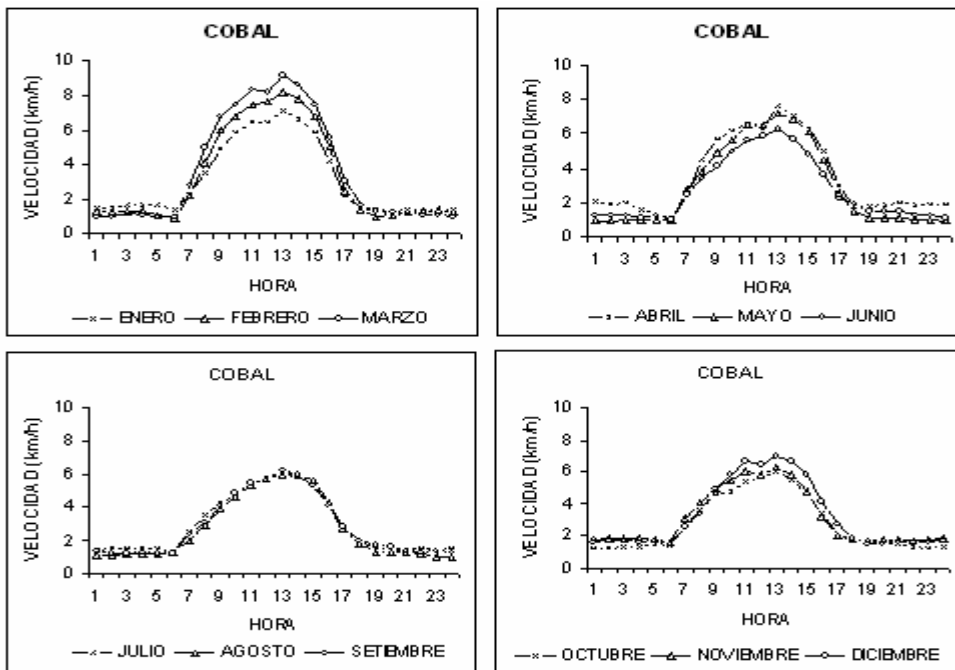


Figura 5: Distribución horaria de la velocidad del viento a una altura de 10 m en la estación Cobal (1971-76) y para los meses mostrados.

coincidiendo con la época de transición de la estación seca a la estación lluviosa y de la estación lluviosa a la estación seca, respectivamente. La dirección predominante del viento para casi todas las horas del día y durante todo el año es del E y SE (viento alisio), sin embargo en los meses de setiembre, octubre y noviembre, se presentan algunos casos del S, O y SO, en las horas de la noche y la madrugada.

En la Figura 3 se muestra la distribución de la

rapidez horaria promedio del viento para todos los meses del año en la estación Santa Clara.

La distribución de la velocidad es bastante similar para los diferentes meses del año. Los valores máximos se presentan entre las 11 y las 13 horas, variando entre 7.5 km/h en junio y 15.7 km/h en febrero. Los valores mínimos se aprecian en las horas de la noche y de la madrugada, variando entre 2.6 km/h en octubre y 5.8 km/h

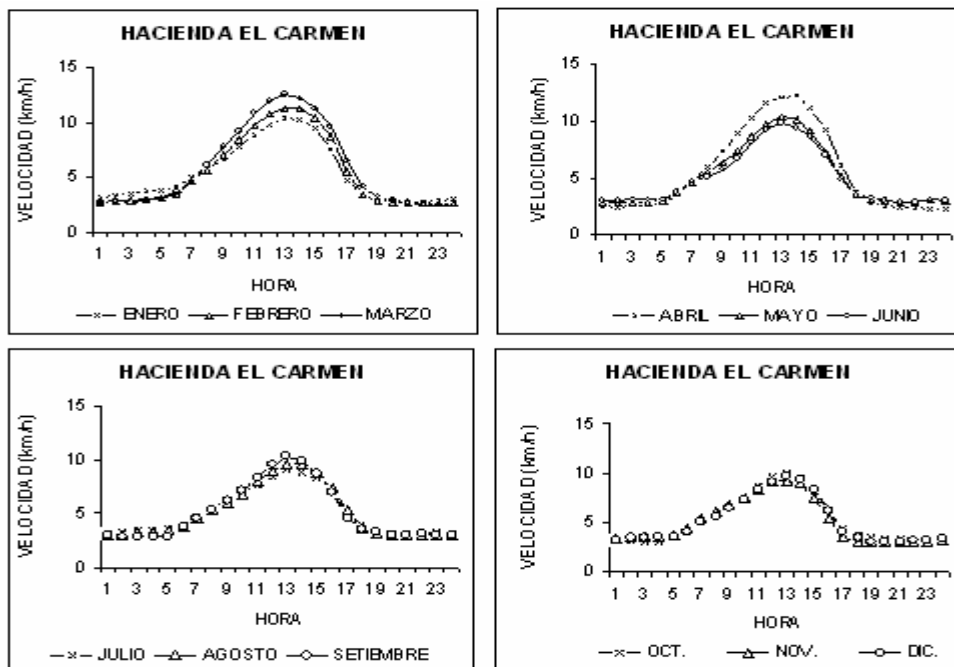


Figura 6: Distribución horaria de la velocidad del viento a una altura de 10 m en la estación Hacienda El Carmen (1982-98) y para los meses mostrados.

TOPICOS METEOROLOGICOS Y OCEANOGRAFICOS

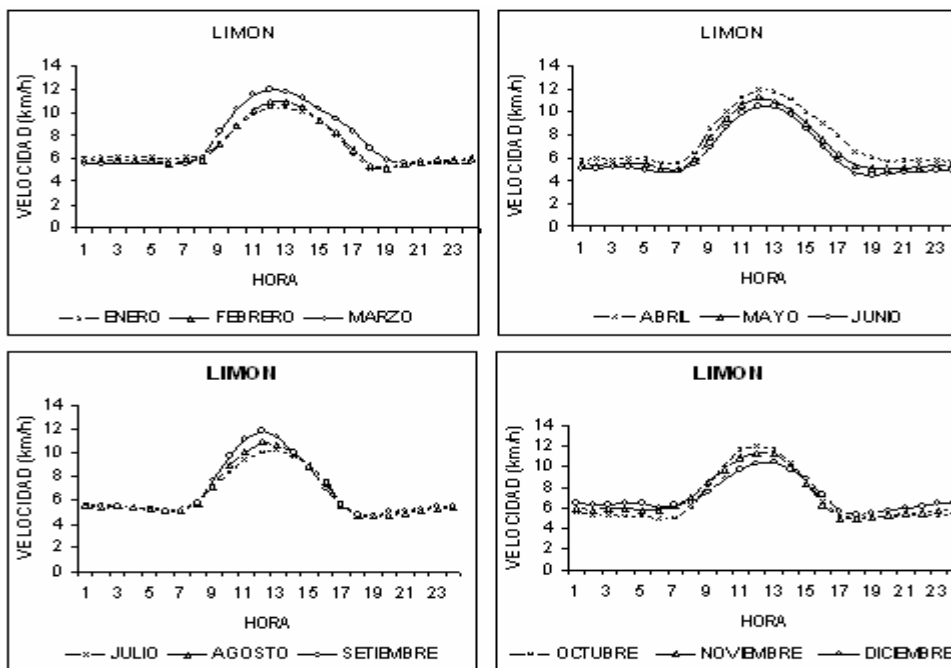


Figura 7: Distribución horaria de la velocidad del viento a una altura de 10 m en la estación Limón (1970-96) y para los meses mostrados.

en febrero.

En la mayoría de los meses del año se observa que la rapidez es relativamente constante entre las 18 y las 5 horas. Durante los meses comprendidos entre diciembre y abril la velocidad del viento es mayor que entre los meses de mayo a octubre.

La dirección predominante durante todo el año y para todas las horas del día es del norte, en los meses de abril, mayo, junio y octubre hay presencia de algunos

casos con vientos de O y SO en la noche y madrugada.

La figura 4 muestra la distribución de la rapidez horaria del viento en la estación La Tejona. Los valores máximos se presentan alrededor de las 9 horas, variando entre 20.9 km/h en setiembre y 41.2 km/h en febrero. Los valores mínimos ocurren en las horas de la tarde y la noche, con valores entre 14.8 km/h en setiembre y 36.1 km/h en diciembre.

El período escogido para procesar esta información

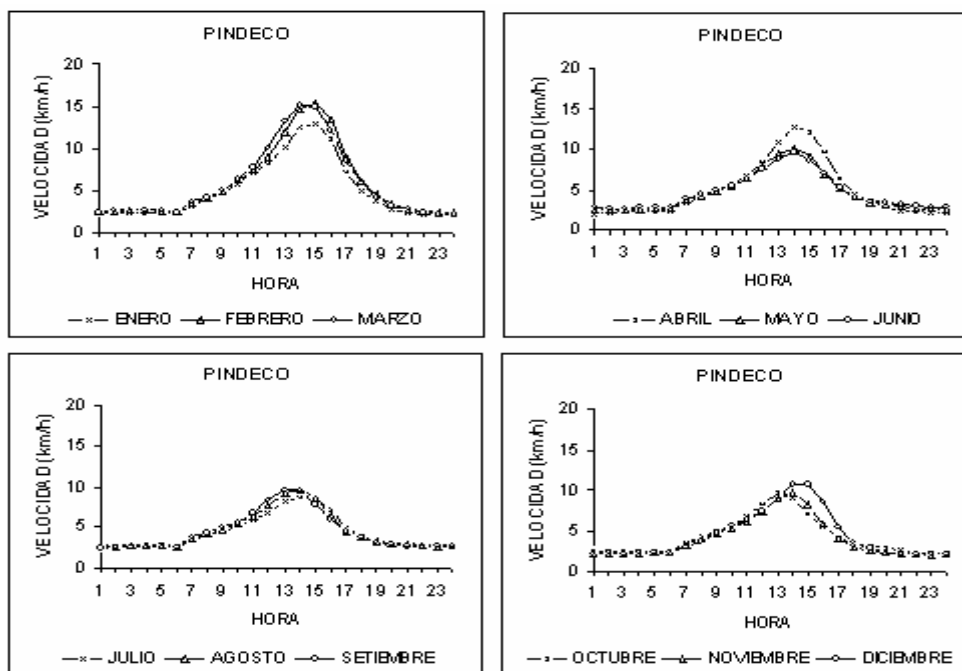


Figura 8: Distribución horaria de la velocidad del viento a una altura de 10 m en la estación Pindeco (1985-96) y para los meses mostrados.

MUÑOZ: Distribución horaria de la magnitud del viento en Costa Rica

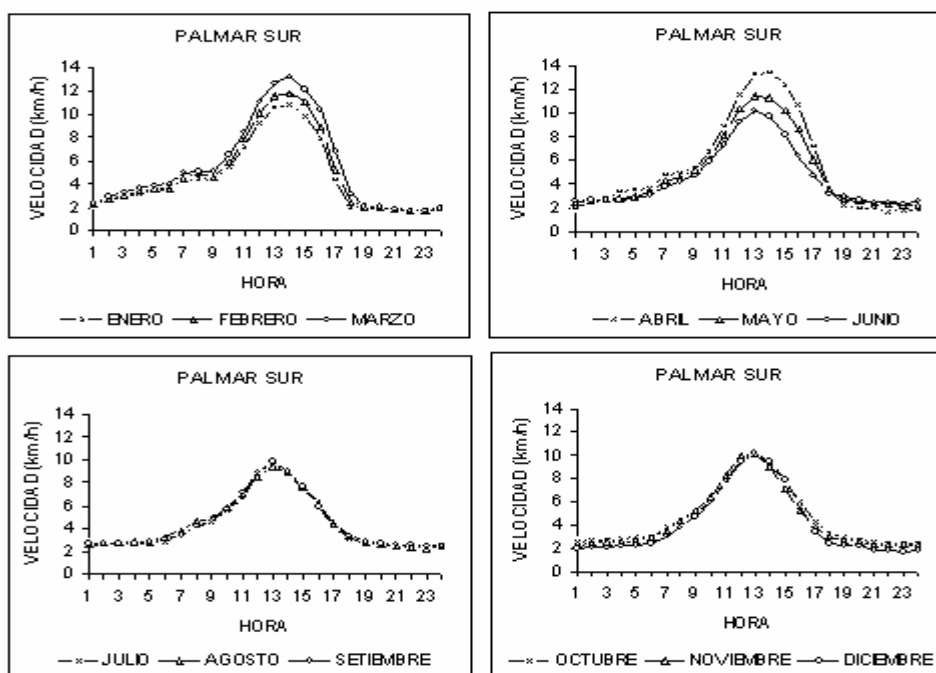


Figura 9: Distribución horaria de la velocidad del viento a una altura de 10 m en la estación Palmar Sur (1973-93) y para los meses mostrados.

(1991-1996) es posterior a la construcción del Embalse de Arenal. De acuerdo con los resultados obtenidos por Fernández et al, 1986, después de la construcción del embalse se observó durante el año, un incremento en la magnitud de la velocidad del viento y una reducción en la amplitud de su variación diurna. La superficie del embalse ofrece menos fricción al viento alisio, además,

durante el día, éste se refuerza debido a la presencia de la brisa de lago y el flujo pendiente arriba, producto de la inclinación del terreno sobre el cual se encuentra instalada la estación.

Durante la noche existe la brisa de tierra y un flujo pendiente abajo, debido a un gradiente de temperatura menor al que se presenta durante el día. Estos vientos

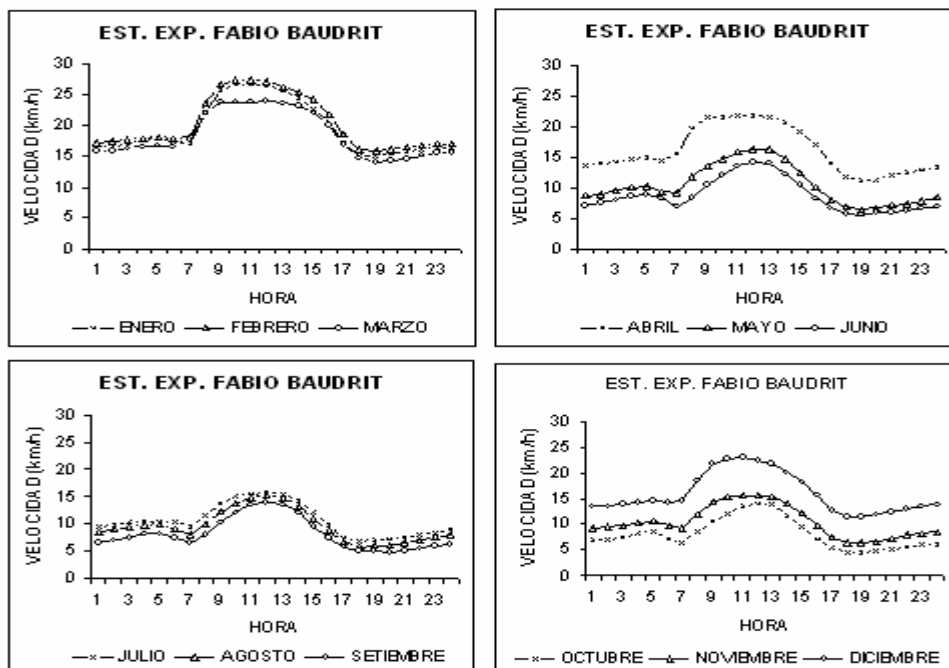


Figura 10: Distribución horaria de la velocidad del viento a una altura de 10 m en la estación experimental Fabio Baudrit (1973-94) y para los meses mostrados.

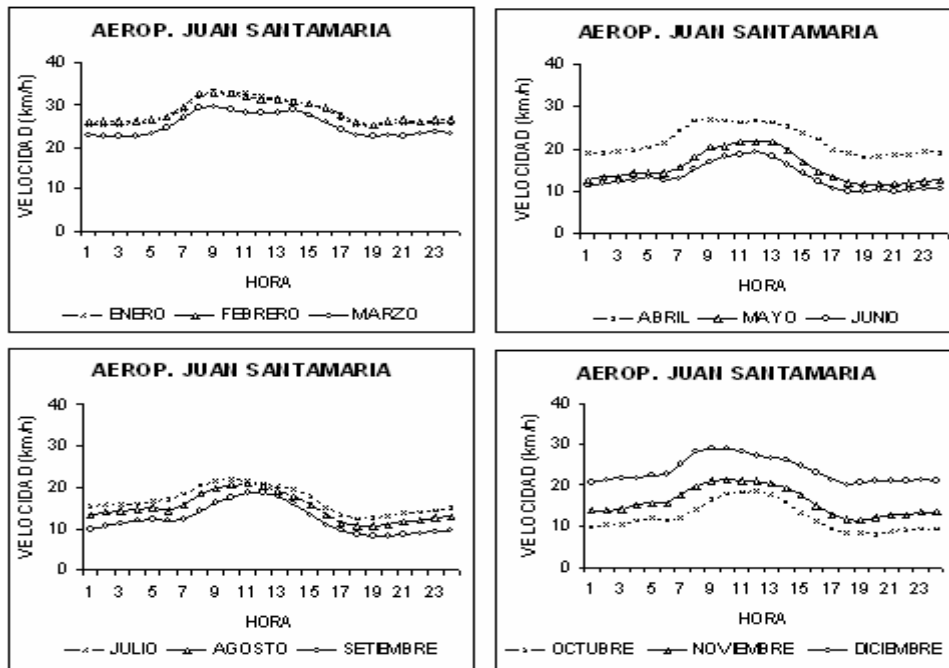


Figura 11: Distribución horaria de la velocidad del viento a una altura de 10 m en la estación Aeropuerto Juan Santamaría (1972-98) y para los meses mostrados.

producen una pequeña reducción en la velocidad del flujo que prevalece y permiten que la variación de la magnitud del viento a través del día no sea tan marcada.

3. Región Caribe

La distribución de la rapidez horaria del viento para todo el año de la estación Cobal se muestra en la Figura 5. Los valores mínimos de la velocidad del viento ocurren en las

horas de la noche y de la madrugada, variando entre 0.9 km/h en febrero y mayo y 1.6 km/h en noviembre. Los valores máximos se presentan a las 13 horas, alcanzando valores entre 6 km/h en agosto y octubre y 9.2 km/h, en marzo. Se observa además que entre las 19 y las 6 horas la rapidez no varían mucho con respecto al tiempo y los valores de la velocidad son muy similares en los diferentes meses del año.

La dirección predominante durante el año y para

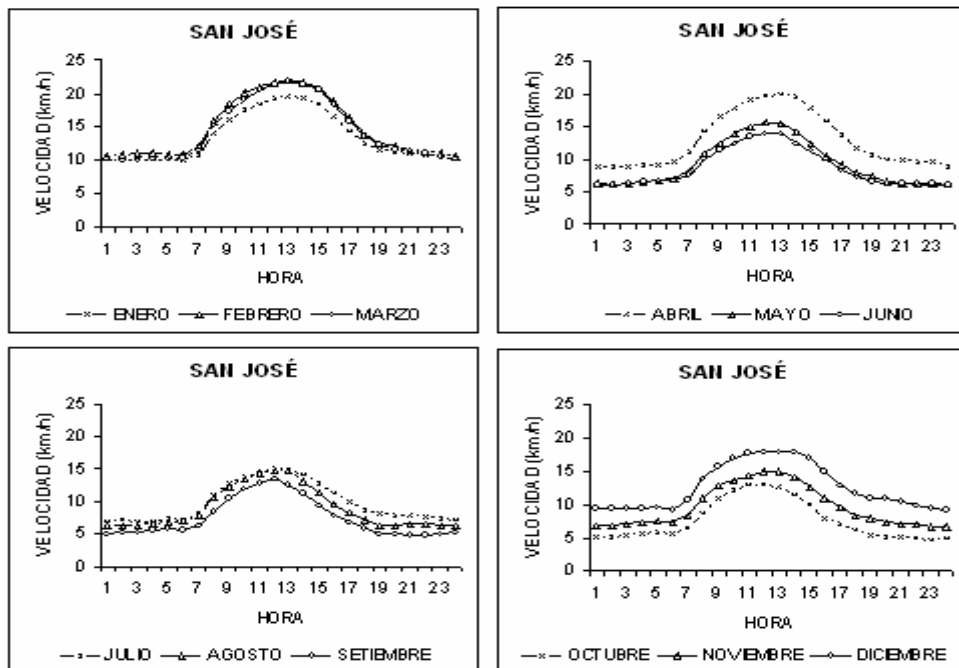


Figura 12: Distribución horaria de la velocidad del viento a una altura de 10 m en la estación San José (1970-80) y para los meses mostrados.

MUÑOZ: Distribución horaria de la magnitud del viento en Costa Rica

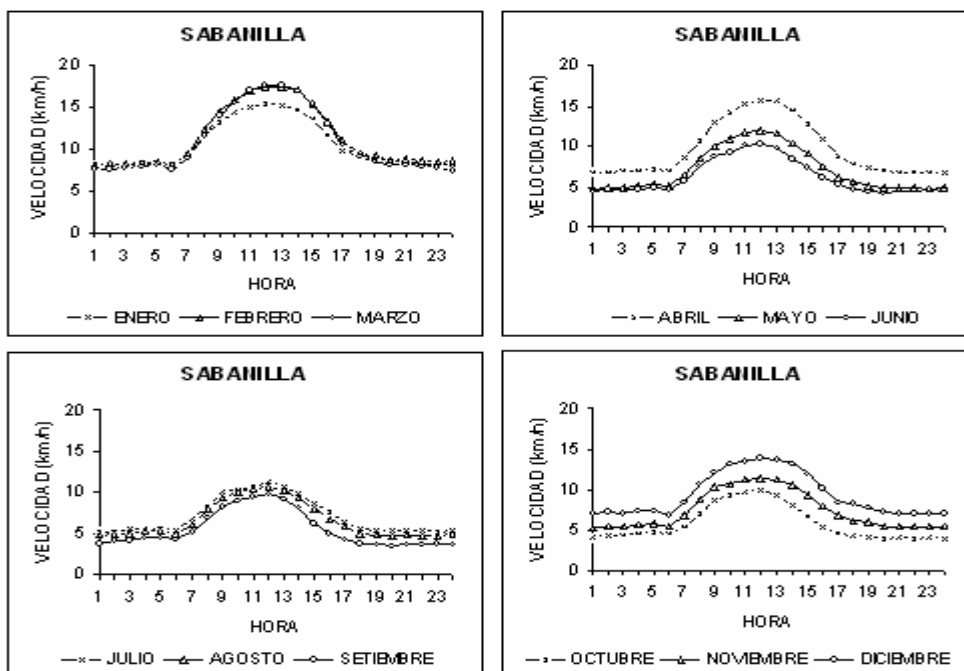


Figura 13: Distribución horaria de la velocidad del viento a una altura de 10 m en la estación Sabanilla (1982-95) y para los meses mostrados.

todas las horas del día es del E y NE. Se aprecian algunos casos con dirección S, O y NE en la noche y madrugada, antes de las 7 de la mañana.

La distribución de la rapidez horaria del viento para todos los meses del año en la estación Hacienda Carmen está dada en la Figura 6. Los valores mínimos de la rapidez del viento se presentan en las horas de la noche y de la madrugada, variando entre 2.3 km/h en abril y 3.1m km/h

en octubre. Los valores máximos ocurren entre las 13 y 14 horas, alcanzando valores entre 9.2 km/h , en julio y 12.5 km/h, en marzo.

Se observa además que entre las 19 y 6 horas la velocidad no varía mucho con respecto al tiempo y la distribución horaria del viento en los últimos seis meses del año es muy similar. Entre las 9 y 17 horas la dirección predominante durante el año es NE y E y entre las 17 y las

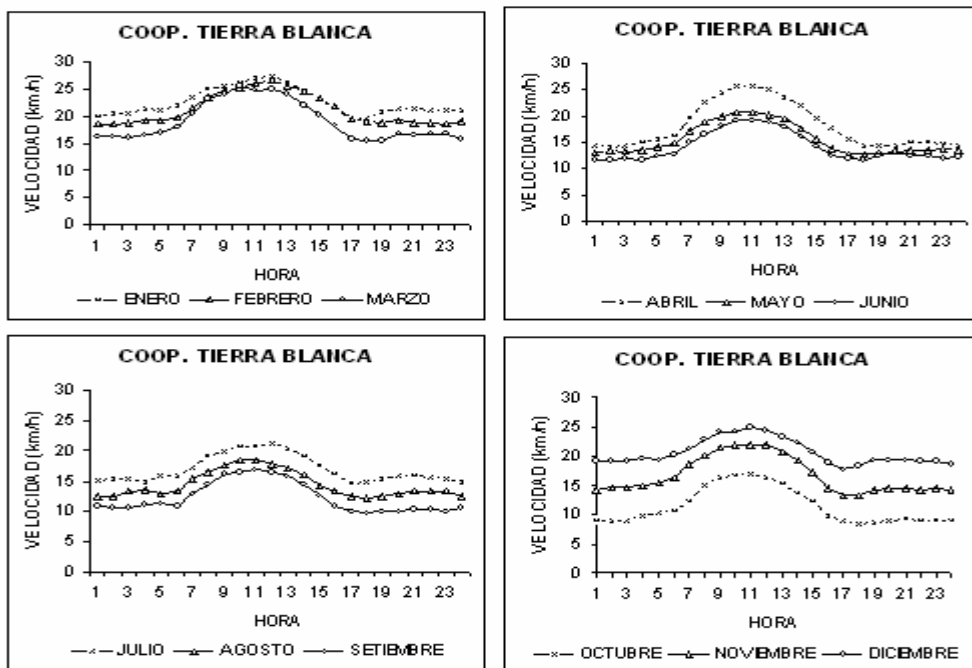


Figura 14: Distribución horaria de la velocidad del viento a una altura de 10 m en la estación Coop. Tierra Blanca (1986-90) y para los meses mostrados.

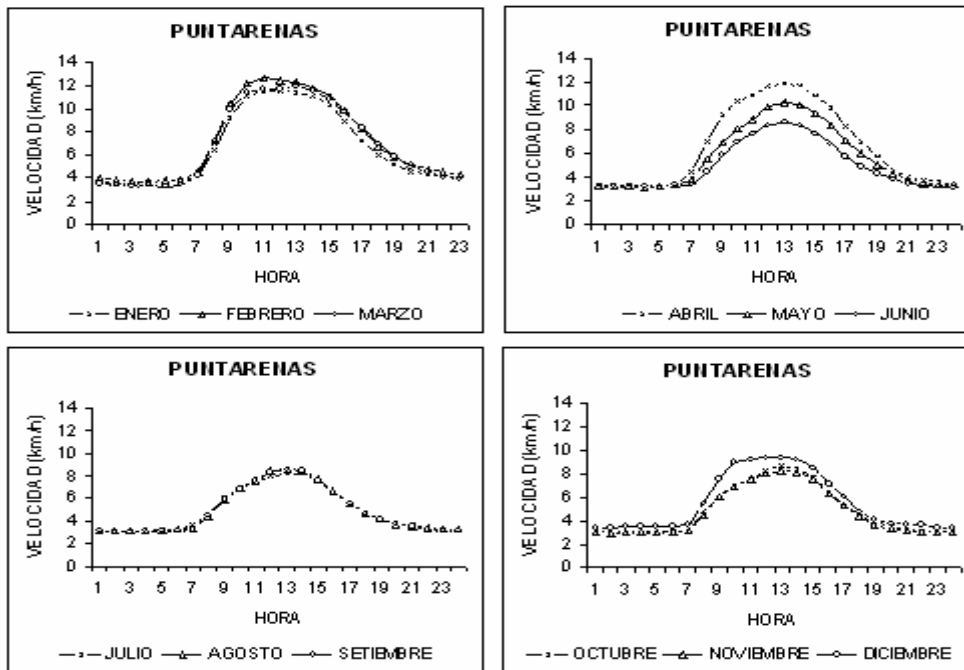


Figura 15: Distribución horaria de la velocidad del viento a una altura de 10 m en la estación Puntarenas (1971-94) y para los meses mostrados.

9 horas la dirección predominante es O, S, y SO (viento alisio y oestes ecuatoriales).

La Figura 7 muestra la distribución de la velocidad horaria promedio en la estación de Limón, la cual es bastante regular para todos los meses del año.

Los valores mínimos ocurren en las horas de la noche y la madrugada, variando entre 4.5 km/h en junio y 5.7 km/h, en abril y los máximos entre las 12 y las 13 horas, variando entre 10.3 km/h, en julio y 11.9 km/h en abril. Se observa que la rapidez no varía mucho con respecto al tiempo entre las 18 y 7 horas. La dirección predominante durante el año es N y NE entre las 9 y 17 horas y SO y O entre las 17 y 9 horas, con presencia de algunos NO (Viento alisio y brisa de tierra con oestes ecuatoriales).

4. Pacífico Sur

La Figura 8 muestra la distribución de la velocidad horaria promedio del viento para todos los meses del año en la estación Pindeco.

La distribución es similar para todos los meses del año. Los valores máximos se presentan entre las 13 y las 15 horas, variando entre 8.7 km/h en julio y 15.3 km/h en febrero. Los valores mínimos se aprecian en las horas de la noche y de la madrugada, variando entre 1.9 km/h en noviembre y 2.6 km/h en junio. En la mayoría de los meses del año se observa que la velocidad varía poco con respecto al tiempo entre las 19 y las 6 horas. En cuanto a la dirección del viento, entre las 8 y 12 horas se presentan

muchos casos de viento variable, en las horas de la tarde viento del SO, asociado con la brisa de mar y en las horas de la noche y hasta las siete de la mañana, viento con dirección O (Oestes ecuatoriales).

En la Figura 9 se muestra la distribución de la velocidad horaria promedio del viento para todos los meses del año en la estación Palmar Sur. La distribución es similar para todos los meses del año. Los valores máximos se presentan entre las 12 y las 13 horas, variando entre 9.4 km/h en agosto y 13.4 km/h en marzo. Los valores mínimos ocurren en las horas de la noche y de la madrugada, variando entre 1.7 km/h de enero a abril y 2.5 km/h en setiembre y octubre. En todos los meses del año se observa que la rapidez varía poco con respecto al tiempo entre las 18 y las 6 horas.

Durante todo el año se nota la presencia de brisa del mar, dirección del viento del O, entre las 10 y 18 horas. En enero y febrero se observan inclusive hasta las 21 horas (Oestes ecuatoriales). En las horas de la noche y la madrugada se mantiene el viento del E, NE y SE (viento alisio)

5. Valle Central

La estación Fabio Baudrit (Figura 10) muestra una distribución de la velocidad horaria del viento diferente para cada uno de los meses del año. Los valores mínimos de la rapidez del viento ocurren en las horas de la noche y de la madrugada, variando entre 4.5 km/h en octubre y 15.9 km/h en febrero. Los valores máximos se presentan entre las 10 y las 12 horas, alcanzando valores entre 14.1

MUÑOZ: Distribución horaria de la magnitud del viento en Costa Rica

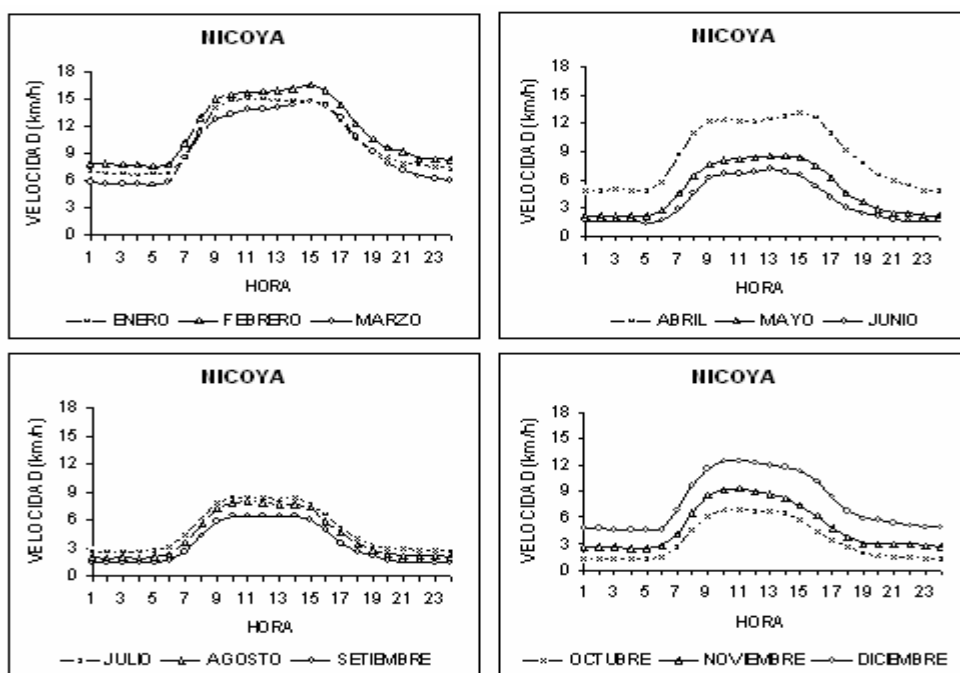


Figura 16: Distribución horaria de la velocidad del viento a una altura de 10 m en la estación Nicoya (1971-83) y para los meses mostrados.

km/h, en setiembre y octubre y 27.3 km/h, en febrero. La dirección predominante del viento durante los meses de diciembre y abril es del E, durante el día, y NE, en la noche y madrugada. Entre mayo y noviembre se observa la presencia de brisa de mar del Pacífico, viento del SO, entre las nueve y las siete de la noche en algunos casos. (Oestes ecuatoriales). El período con vientos del SO es menor en mayo y en noviembre, en julio se hace más pequeño coincidiendo con la ocurrencia del veranillo.

La distribución de la velocidad horaria del viento para todos los meses del año en la estación Aeropuerto Juan Santamaría se muestra en la Figura 11. Se observa que la distribución de la rapidez es similar de diciembre a abril. El resto de los meses se puede agrupar con otra forma similar. Los valores máximos se presentan entre las 9 y las 12 horas, variando entre 18.6 km/h en octubre y 33.4 km/h en enero. Los valores más bajos se aprecian en las horas de la noche y de la madrugada, con mínimos en la noche entre 8 km/h en octubre y 25.3 km/h en febrero.

La dirección predominante entre diciembre y abril y también en julio, para todas las horas del día es del E. (viento alisio). En los meses de mayo, junio, agosto y setiembre se observa entre las 11 y 16 horas viento con dirección SO (brisa de mar) y viento alisio para el resto del día. Para los meses de setiembre y octubre el comportamiento es similar, aunque la brisa de mar se presenta entre las 9 y 17 horas.

La Figura 12 muestra la distribución de la velocidad horaria del viento para todos los meses del año en la estación San José.

Se observa que la distribución de la rapidez es

similar para todos los meses del año. Los valores máximos se presentan entre las 11 y las 13 horas, variando entre 13 km/h en octubre y 22 km/h en febrero. Los valores mínimos se observan en las horas de la noche y de la madrugada, variando entre 4.7 km/h en octubre y 10.6 km/h en febrero. Para cada uno de los meses se observa que la rapidez varía poco con respecto al tiempo entre las 16 y las 6 horas. Además se aprecia una disminución apreciable de la velocidad del viento entre los meses de abril y mayo, época de transición de la estación seca a la estación lluviosa y un aumento apreciable de la velocidad del viento entre los meses de noviembre a diciembre, época de transición de la estación lluviosa a la estación seca. La dirección NO es la predominante para todas las horas durante el año.

La distribución de la velocidad horaria promedio del viento para todos los meses del año en la estación Sabanilla se muestra en la Figura 13. Se observa una distribución similar para todos los meses.

Los valores máximos se aprecian entre las 12 y las 13 horas, variando entre 9.7 km/h en setiembre y 17.4 km/h en febrero. Los valores mínimos se presentan en las horas de la noche y de la madrugada, variando entre 3.5 km/h en setiembre y 8.0 km/h en enero. Para cada uno de los meses se observa que la rapidez varía poco con respecto al tiempo entre las 19 y las 6 horas. Se nota una disminución apreciable de la velocidad del viento entre los meses de abril y mayo y un aumento significativo de la velocidad del viento entre los meses de noviembre a diciembre, coincidiendo con la época de transición de la estación seca a la estación lluviosa y de la estación

TOPICOS METEOROLOGICOS Y OCEANOGRAFICOS

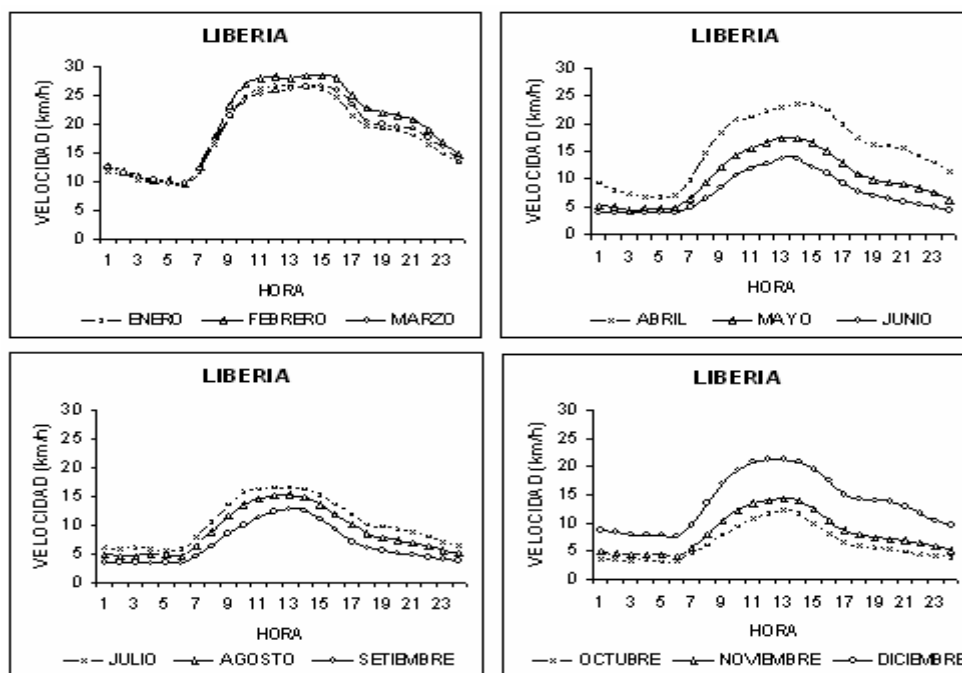


Figura 17: Distribución horaria de la velocidad del viento a una altura de 10 m en la estación Liberia (1974-99) y para los meses mostrados.

lluviosa a la estación seca, respectivamente.

La dirección predominante para todas las horas del día es del NE y en menor grado del E, la cual se manifiesta en la noche y madrugada, antes de la seis horas (viento alisio).

La Figura 14 muestra la distribución de la velocidad

horaria promedio del viento para todos los meses del año en la estación Coop. Tierra Blanca. Se observa una distribución similar para todos los meses. Los valores máximos se presentan entre las 10 y las 12 horas, variando entre 16.9 km/h en setiembre y 27.2 km/h en enero. Los valores mínimos se aprecian en las horas de la noche y de

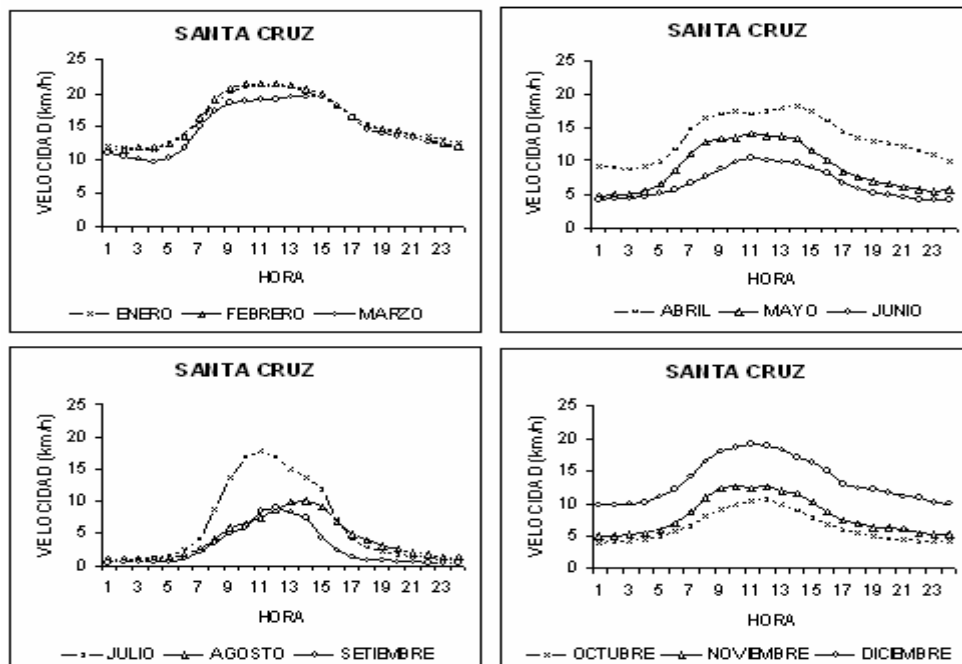


Figura 18: Distribución horaria de la velocidad del viento a una altura de 10 m en la estación Santa Cruz (1984-96) y para los meses mostrados.

la madrugada, variando entre 8.4 km/h en octubre y 19.3 km/h en enero. Para cada uno de los meses se nota que la rapidez varía poco con respecto al tiempo entre las 17 y las 6 horas. Se advierte una disminución apreciable de la velocidad del viento entre los meses de abril y mayo y un aumento apreciable entre los meses de noviembre a diciembre, coincidiendo con la época de transición de la estación seca a la estación lluviosa y de la estación lluviosa a la estación seca, respectivamente. El viento alisio, con dirección E, está presente en esta estación durante todas las horas del día y para todo el año.

6. Pacífico Norte

La estación Puntarenas (Figura 15) muestra una distribución de la velocidad horaria promedio del viento variable a través del año, aunque en el tercer trimestre los valores de rapidez son semejantes. Los valores máximos se presentan entre las 10 y las 13 horas, variando entre 8.3 km/h en noviembre y 12.6 km/h en febrero. Los valores mínimos ocurren en las horas de la noche y de la madrugada, variando entre 2.9 km/h en octubre y 3.7 km/h en marzo. En todos los meses del año se observa que la rapidez varía poco con respecto al tiempo entre las 19 y las 7 horas. La presencia de los vientos alisios, con dirección E y NE, se ve interrumpida por la brisa de mar del Pacífico, con dirección S y SO, durante todo el año, entre las 8 y 18 horas.

En la Figura 16 muestra la distribución de la velocidad horaria promedio del viento para todos los

meses del año en la estación Nicoya.

La distribución de la rapidez varía a través del año. Los valores máximos se presentan entre las 10 y las 15 horas, variando entre 6.4 km/h en setiembre y 16.6 km/h en febrero. Los valores mínimos se aprecian en las horas de la noche y de la madrugada, variando entre 1.2 km/h en octubre y 7.6 km/h en febrero.

En la mayoría de los meses del año se observa que la velocidad varía poco con respecto al tiempo entre las 19 y las 6 horas. En el segundo trimestre, se aprecia una disminución apreciable de la rapidez del viento de abril a mayo y en el cuarto trimestre un aumento de noviembre a diciembre, coincidiendo con la época de transición de la estación seca a la estación lluviosa y de la estación lluviosa a la estación seca, respectivamente. La dirección predominante entre los meses de noviembre a abril, durante todo el día es la del viento alisio con dirección NE. Se observan vientos del SO entre las 14 y 19 horas en mayo y setiembre y entre las 18 y 20 horas en junio y octubre, correspondiendo a brisas del mar y oestes ecuatoriales.

La distribución de la velocidad horaria promedio del viento para todos los meses del año en la estación Liberia se muestra en la Figura 17. La distribución de la rapidez varía a través del año y entre diciembre y abril es similar. Los valores máximos se presentan entre las 12 y las 15 horas, variando entre 12.2 km/h en octubre y 28.6 km/h en febrero. Los valores mínimos se manifiestan en las horas de la noche y de la madrugada, variando entre 3.1 km/h en octubre y 9.7 km/h en marzo. En la mayoría

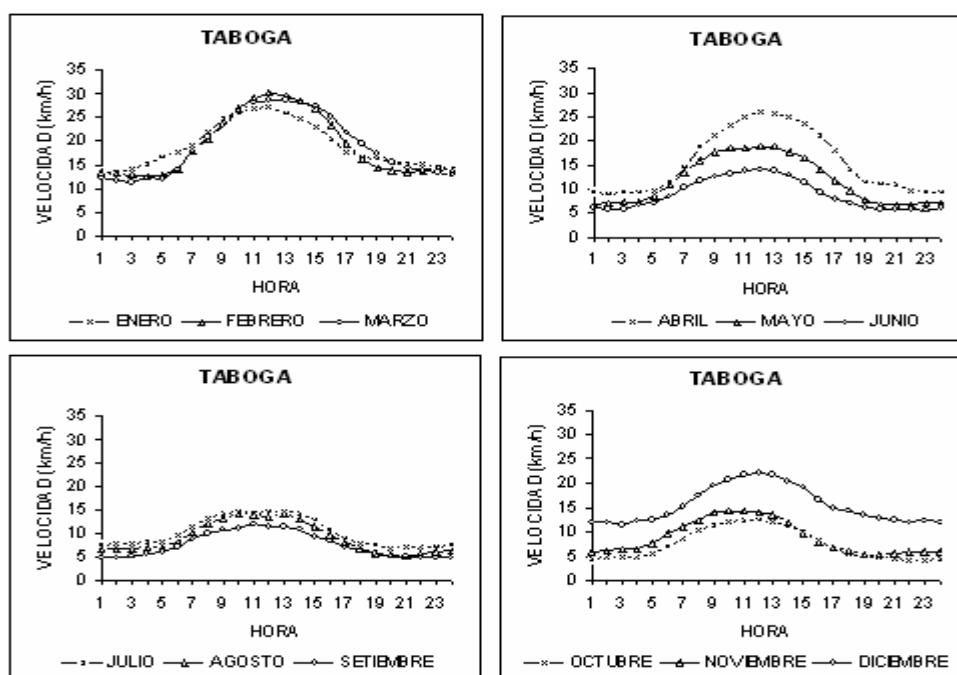


Figura 19: Distribución horaria de la velocidad del viento a una altura de 10 m en la estación Taboga (1971-72/ 1983-86) y para los meses mostrados.

de los meses del año se observa que la rapidez varía poco con respecto al tiempo entre las 19 y las 6 horas. Se observa una disminución apreciable de la velocidad del viento de abril a mayo y un aumento de noviembre a diciembre, coincidiendo con la época de transición de la estación seca a la estación lluviosa y de la estación lluviosa a la estación seca, respectivamente.

El viento alisio, con dirección E y NE, se ve interrumpido en los meses de mayo y junio, setiembre y octubre, con vientos del O correspondientes a la brisa de mar del Pacífico, entre las 12 y 16 horas.

La Figura 18 muestra la distribución de la velocidad horaria promedio del viento para todos los meses del año en la estación Santa Cruz. La distribución de la rapidez varía a través del año, presentando de diciembre a abril una distribución similar, al igual que para el resto de los meses del año.

Los valores máximos se presentan entre las 12 y las 15 horas, variando entre 12.0 km/h en octubre y 28.2 km/h en febrero. Los valores mínimos se perciben en las horas de la noche y de la madrugada, variando entre 3.1 km/h en octubre y 9.6 km/h en marzo. En la mayoría de los meses del año se observa que la rapidez varía poco con respecto al tiempo entre las 19 y las 6 horas. Se aprecia una disminución apreciable de la rapidez del viento de abril a mayo y un aumento de noviembre a diciembre, coincidiendo con la época de transición de la estación seca a la estación lluviosa y de la estación lluviosa a la estación seca, respectivamente. La dirección predominante durante todo el día y para todos los meses del año es del E y algunos NE, correspondiente al viento alisio. Solamente en el mes de setiembre se observa viento del O, entre las 13 y 16 horas, asociado a la brisa de mar.

La estación Taboga (Figura 19) muestra una distribución de la velocidad horaria promedio del viento variable a través del año. Los valores máximos, entre las 10 y las 13 horas varían entre 11.3 km/h en setiembre y 28.2 km/h en febrero. Los valores mínimos ocurren en la noche y la madrugada, variando entre 3.9 km/h en octubre y 12.5 km/h en enero y se observa que la rapidez varía poco con respecto al tiempo entre las 18 y las 5 horas. Se aprecia una disminución apreciable de la rapidez del viento de abril a mayo y un aumento significativo de noviembre a diciembre, coincidiendo con la época de transición de la estación seca a la lluviosa y de la estación lluviosa a la seca, respectivamente.

7. Conclusiones

Se analiza así la variación diurna de la velocidad a través de todo el año y en varias estaciones meteorológicas.

La distribución horaria de la velocidad del viento responde a la variación diurna de la radiación solar. Conforme la superficie de la tierra absorbe la radiación solar, se establecen mayores gradientes de temperatura,

generando así gradientes de presión y el movimiento turbulento del aire.

En la mayoría de las estaciones, la magnitud de la velocidad del viento aumenta a partir de las cinco de la mañana, alcanzando el valor máximo alrededor del medio día. A partir de las cinco de la tarde, y en las primeras horas de la madrugada, la rapidez del viento varía menos con respecto al tiempo. Los valores mínimos se presentan en la noche ó en la madrugada.

Los análisis de la distribución mensual y de la distribución horaria del viento indican que las estaciones del Valle Central y del Pacífico Norte, excepto Puntarenas y Taboga (ubicadas cerca de la costa), muestran en el tercer trimestre del año, una disminución apreciable de la magnitud de la velocidad del viento, entre los meses de abril y mayo, así como un aumento apreciable en el cuarto trimestre, entre los meses de noviembre y diciembre. Estos períodos coinciden con la época de transición de la época lluviosa y seca respectivamente. Los resultados muestran que La Tejona presenta los valores más altos de la velocidad y las estaciones de la región Pacífico Sur, los valores más bajos.

Es importante hacer notar que, para una región determinada, el rango de variación de la velocidad promedio horario, es mayor que el del promedio mensual. Cuando se analiza el comportamiento horario del viento, se incluyen los valores extremos de la variación diurna de la velocidad. Así, entre más pequeño sea el período en el cual se mide la velocidad del viento, más acertado resulta el cálculo del potencial de la energía del viento.

Agradecimientos

Los autores están agradecidos con Rafael Enrique Chacón por sus valiosos comentarios y sugerencias. También, expresan su agradecimiento al Instituto Meteorológico Nacional y al Instituto Costarricense de Electricidad por haber proporcionado los datos utilizados en este trabajo.

RESUMEN

Se analiza la variación diurna de la velocidad del viento a través de todo el año en 20 estaciones localizadas en diferentes partes de Costa Rica. En la mayoría de las estaciones, la magnitud de la velocidad del viento aumenta a partir de las cinco de la mañana, alcanzando el valor máximo alrededor del mediodía. Los valores mínimos se presentan en la noche ó en la madrugada. Durante la noche la variación de la rapidez del viento es relativamente pequeña.

Los análisis de la distribución horaria del viento, así como los de su distribución mensual, indican que las estaciones del Valle Central y del Pacífico Norte, excepto Puntarenas y Taboga (ubicadas cerca de la costa), muestran una disminución apreciable de la magnitud de la velocidad del viento entre los meses de abril y mayo, así como un aumento apreciable entre los meses de noviembre y diciembre. Estos períodos coinciden con la época de transición de la época lluviosa y seca respectivamente. Los resultados muestran que La Tejona presenta los valores más altos de la magnitud de la velocidad del viento y que los valores más bajos ocurren en las estaciones de la región Pacífico Sur.

Referencias

- Antonia, R. A., Chambers, A. J., Phong-Anant, D., Rajagopalan, S., and Screenivasan, K. R., 1979: "Response of atmospheric surface layer turbulence to a partial solar eclipse", *J. Geophys. Res.* 84, 1689-1692.
- Arya, S. P., 1988: *Introduction to micrometeorology*. San Diego. Academic Press. 307 pp.
- Crawford, K. C. y Hudson, H.R., 1973: "The diurnal wind variation in the lowest 1500 feet in Central Oklahoma: june 1966-may 1967", *J.Appl. Meteorol.* 12, 127-132.
- Fernández, W., Chacón, R. E., Melgarejo, J., 1986: "Modifications of air flow due to the formation of a reservoir", *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Vol.25.
- Mahrt, L., 1981: "The early evening boundary layer transition", *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* 107, 329-343.
- Muñoz, A.C., W. Fernández, J.A. Gutiérrez y E. Zárate, 2002a: Variación estacional del viento en Costa Rica y su relación con los regímenes de lluvia. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*,
- Muñoz, A.C., W. Fernández, J.A. Gutiérrez y E. Zárate, 2002b: Potencial de energía eólica en Costa Rica. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*,

Potencial de energía eólica en Costa Rica

ANA CECILIA MUÑOZ

Escuela de Física, Instituto Tecnológico de Costa Rica,
Cartago, Costa Rica

WALTER FERNÁNDEZ, JORGE A. GUTIÉRREZ Y ELADIO ZÁRATE

Laboratorio de Investigaciones Atmosféricas y Planetarias,
Escuela de Física y Centro de Investigaciones Geofísicas,
Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica

(Recibido 14 de febrero 2002, aceptado 20 de mayo de 2002)

ABSTRACT

The monthly and hourly distributions of the wind energy potential are analyzed for different regions of Costa Rica, where meteorological stations with wind records are available. The wind potential is estimated at 10 m above the ground.

The hourly average potential allows to group the different locations, according to the maximum hourly values, as follows:

From 0 to <50 W/m ² :	Upala, Santa Clara, Cobal, Limón, Hacienda El Carmen, Pindeco, Palmar Sur, Sabanilla, Puntarenas and Nicoya.
From 50 to <100 W/m ² :	Los Chiles, San José and Santa Cruz.
From 100 to <150 W/m ² :	Tierra Blanca.
From 150 to <200 W/m ² :	Fabio Baudrit and Liberia.
From 200 to <250 W/m ² :	Taboga.
From 250 to <300 W/m ² :	Aeropuerto Juan Santamaría.
From 300 to <550 W/m ² :	La Tejona

The station La Tejona presents the maximum values, reaching 389.3 W/m² in February.

From the results is important to notice that the production of electricity from wind energy is a good complement to the development of hydro-electrical energy. In the Pacific Watershed, the greater production of wind energy is possible during the dry season, when hydro-electrical energy may decrease. In addition, near noon, when the consumption of electricity is greater, the wind speed reaches its maximum values in its diurnal variation, which allows to obtain maximum values of the potential of wind energy.

1. Introducción

El término energía del viento o energía eólica describe el proceso a través del cual el viento es usado para generar energía mecánica o electricidad. Las turbinas de viento convierten la energía cinética del viento, en energía mecánica, la cual puede ser utilizada para triturar granos, para bombear agua ó para convertir esta energía mecánica en electricidad.

El aprovechamiento de la energía del viento se remonta a la historia temprana, ya que fue empleada para mover los barcos, moler los granos y para bombear agua. Existe evidencia de que la energía del viento fue utilizada para impulsar los barcos a lo largo del río Nilo en los 5000 a.C. Además algunos siglos antes de Cristo, los molinos de viento se usaban en China para bombear agua. En E.E.U.U., millones de molinos de viento se desarrollaron al final del siglo IX, muchos de ellos utilizados para bombear agua en fincas y haciendas. En 1900 pequeños sistemas de viento

1 Corresponding author address: Ana Cecilia Muñoz, Escuela de Física, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
E-mail: emunoz@itcr.ac.cr

Tabla 1. Valores de presión atmosférica en hPa en las estaciones Puntarenas y Limón.

MES	PRESIÓN ATMOSFÉRICA EN HPa MEDIDA EN LA ESTACIÓN PUNTARENAS	PRESIÓN ATMOSFÉRICA EN HPa MEDIDA EN LA ESTACIÓN LIMÓN	VALOR MEDIO DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA EN HPa
ENERO	1009	1012.9	1010.9
FEBRERO	1010	1013.1	1011.5
MARZO	1009	1012.4	1010.7
ABRIL	1009	1011.7	1010.4
MAYO	1010	1010.8	1010.4
JUNIO	1010	1010.7	1010.4
JULIO	1010	1011.3	1010.6
AGOSTO	1010	1011.0	1010.5
SETIEMBRE	1010	1010.4	1010.2
OCTUBRE	1010	1010.2	1010.1
NOVIEMBRE	1010	1010.8	1010.4
DICIEMBRE	1010	1011.8	1010.9

eléctricos fueron desarrollados para generar corriente directa. En 1910 generadores de turbinas de viento brindaron electricidad en muchas ciudades europeas.

La década de los años 80 se puede caracterizar como la época pre-comercial, con una gran producción de turbinas experimentales, algunos fracasos y la implemetación de las primeras generaciones de turbinas, sobre todo en los Estados Unidos y en menor cantidad en Dinamarca. La década de los 80 establece un gran avance tecnológico y económico.

La energía eólica tiene una ventaja con respecto a la hidráulica: su implementación es más rápida, por no necesitar obras civiles mayores. Un campo eólico de unos 20 MW de potencia instalada (por ejemplo 40 turbinas de 500 KW), se puede implementar en un año. Además, los transformadores de energía son modulares, consistiendo de unidades relativamente pequeñas. Si se presentan problemas o se necesita suministrar mantenimiento, únicamente la máquina afectada se apaga mientras que el resto del campo sigue produciendo. Además, la potencia instalada se puede incrementar paulativamente, aumentando el número de máquinas, si el sitio de emplazamiento así lo permite.

En Costa Rica la principal fuente de energía es la energía hidroeléctrica y aunque la energía eólica no se considera una sustitución o una comparación con el potencial hidroeléctrico con el que tiene el país, ésta puede representar una fuente de energía complementaria.

Aunque se han realizado algunos trabajos que han discutido en forma general la posibilidad de la explotación de la energía eólica en Costa Rica (ICE, 1979, 1980,

1985a,b; DSE, 1982; EES, 1984; Vindas, 1989), éstos utilizaron valores promedio mensual de la velocidad del viento, con registros bastante pequeños y solo para pocos lugares del país. Por este motivo, en este estudio se hace un trabajo más exhaustivo sobre el potencial de energía eólica en Costa Rica, haciendo uso de dos estudios previos sobre la variación estacional y horaria del viento en Costa Rica (Muñoz et al. 2002a, 2002b)

2. Energía eólica

La capacidad de un cuerpo para producir trabajo se llama energía y la energía se puede convertir de una a otra forma al realizar un trabajo.

La energía cinética del viento, energía de un cuerpo en movimiento, depende de su masa y de su velocidad. Al considerar el viento, aire en movimiento, como un flujo laminar con velocidad “v”, perpendicular a la sección transversal de un cilindro de área “A” y longitud “L”, se define su energía cinética como:

$$E = 0.5 m v^2 \quad (1)$$

m : masa de aire contenida en el cilindro de volumen A*L
v: velocidad del viento

Así, al calcular el flujo de energía por unidad de tiempo, se obtiene la siguiente expresión:

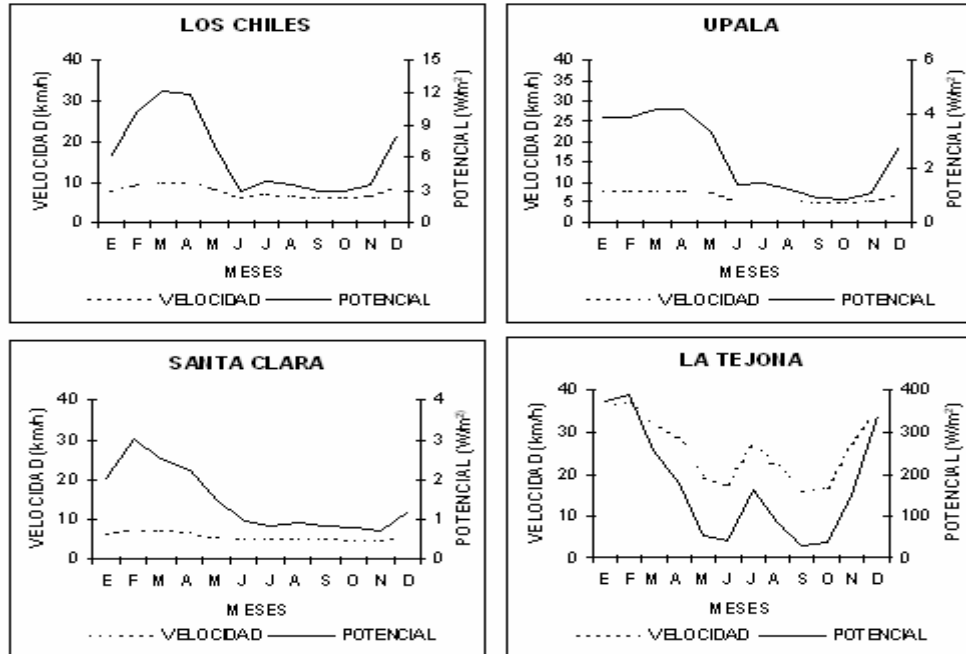


Figura 1: Distribución mensual de la velocidad del viento y del potencial eólico en las estaciones Los Chiles (1991-93), Upala (1983-87), Santa Clara (1971-93) y La Tejona (1991-97).

$$dE/dt = P = d/dt (0.5 \rho A L V^2) = 0.5 \rho A v^2 (dL/dt)$$

$$P = 0.5 \rho A V^3 \quad (2)$$

A su vez, se define el potencial del viento “P/A”, como el flujo de energía por unidad de tiempo a través de un área A:

$$P/A = 0.5 \rho V^3 \quad (3)$$

- P/A : potencial del viento
- ρ : densidad del aire
- v : velocidad del viento

Es decir, la energía por unidad de tiempo extraída del aire por un sistema eólico, se expresa en términos del flujo de energía cinética que pasa a través del área barrida por la turbina y por lo tanto es proporcional a la densidad del aire y al cubo de la velocidad del viento. (Rohatgi et al., 1994).

La densidad del aire en condiciones estándar (nivel del mar, 0°C) tiene un valor de 1.2929 Kg/m³. Para sitios con altitudes de 500 metros o más sobre el nivel del mar, la densidad del aire puede calcularse por medio de la ecuación barométrica:

$$\rho(h) = \rho_0 \exp(-\rho_0 g h / P_0) \quad (4)$$

- ρ_0 : densidad del aire
- P_0 : presión al nivel del mar
- g : valor de la gravedad

Una turbina no puede extraer toda la energía que posee el viento, razón por la cual la potencia de la turbina se expresa en función de un factor de rendimiento o eficiencia llamado el coeficiente de potencia C_p :

$$P/A = C_p 0.5 \rho V^3 \quad (5)$$

En 1929, A. Betz demostró que un convertidor óptimo de energía del viento, puede extraer un máximo de 16/27 de la energía contenida (EES, 1984), de manera que el potencial máximo que puede producir una turbina ideal de viento es:

$$P/A_{\text{máx}} = 0.59 (0.5 \rho V^3) \quad (6)$$

En la práctica, el potencial obtenido por un convertidor real de energía del viento es menor que $P_{\text{máx}}$, y depende del tipo de equipo y de su operación. La eficiencia de los convertidores típicos varía entre 0.15 y 0.5, (EES, 1984).

3. Factores que afectan el potencial del viento

Los factores que pueden limitar la obtención de la energía potencial del viento, se pueden clasificar en técnicos, económicos y otros (EES, 1984).

Los factores técnicos consideran la cantidad máxima de energía que puede ser extraída del flujo de aire, de acuerdo al sistema de conversión utilizado. Además, el funcionamiento de una turbina de viento puede ser afectado

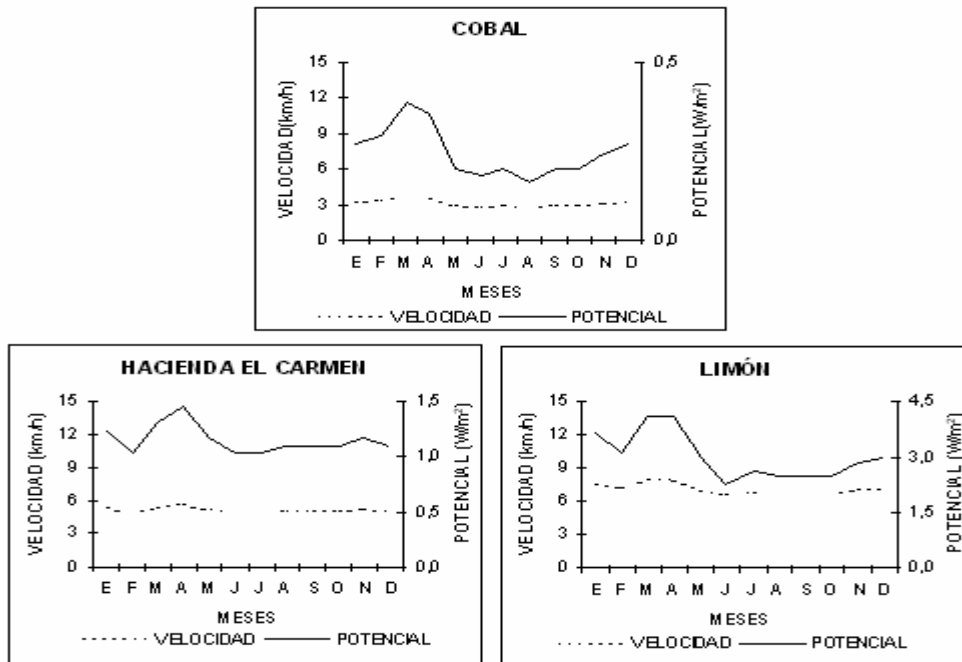


Figura 2: Distribución mensual de la velocidad del viento y del potencial eólico en las estaciones Cobal (1971-76), El Carmen (1981-96) y Limón (1971-98).

por la frecuencia de ocurrencia de velocidades extremas. Por último, se considera la capacidad de aprovechamiento y almacenamiento de energía e instalaciones de respaldo, en función del potencial de energía útil del viento. Además, es conveniente combinar este método de producción de energía con otro, como el hidroeléctrico, para lograr la mayor efectividad en la producción de electricidad.

Los factores económicos, comunes al desarrollo de otros proyectos de energía, toman en cuenta el costo de la electricidad generada por la energía del viento, así como el financiamiento de la obra. También considera el impacto macro-económico, la competencia con otras fuentes de energía y por supuesto la demanda y oferta de la energía.

Como factores restantes se consideran los problemas de aceptación, la disponibilidad de un terreno, el impacto sobre la agricultura y la oferta de la mano de obra local.

4. Variación de la rapidez con la altura

La rapidez del viento que es de interés para aplicaciones eólicas se ve afectada por la interacción con el terreno y su rugosidad. Esta interacción tiene dos efectos principales: provoca una disminución de la velocidad y es una de las causas de la turbulencia.

Comúnmente, la velocidad del viento se mide a una altura de 10 m sobre el terreno, pero para ciertas estaciones consideradas en este estudio, la velocidad se ha medido a una altura diferente. También es importante tomar en cuenta que la posición del eje de una turbina eólica se instala a una altura de 30 m ó a 50 m sobre el terreno.

Para aproximar la distribución de la velocidad del viento con la altura H y poder obtener un valor de la rapidez a la altura del eje V_H , relacionada con la rapidez medida en

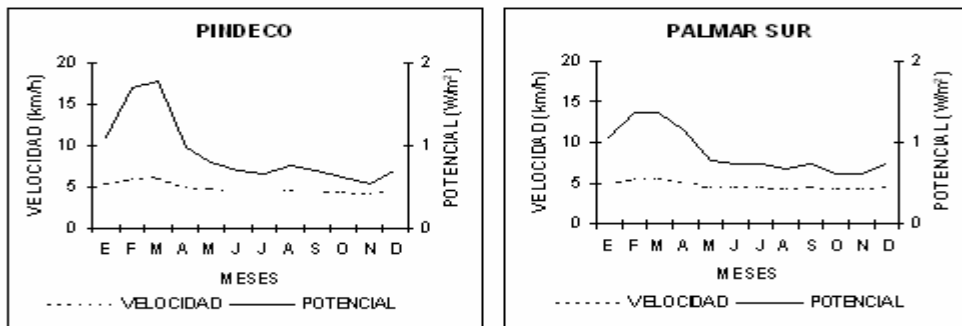


Figura 3: Distribución mensual de la velocidad del viento y del potencial eólico en las estaciones Pindeco (1971-76) y Palmar Sur (1974-92).

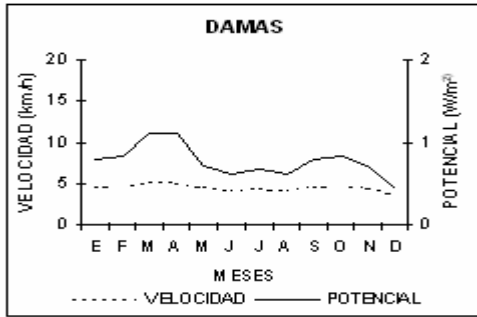


Figura 4: Distribución mensual de la velocidad del viento y del potencial eólico en las estación Damas (1983-93).

el nivel de referencia V_{ref} , se utilizan diferentes expresiones analíticas. La más sencilla es:

$$V_H / V_{ref} = (H / H_{ref})^x \quad \text{para } H < 80 \text{ m} \quad (7)$$

El parámetro “x” depende de las condiciones del terreno, sobre todo de su rugosidad. Su valor puede variar desde 0.06 para terrenos abiertos al lado del mar, hasta 0.60 para superficies muy rugosas, como el de una ciudad. Un valor utilizado en estudios genéricos, sin especificar el tipo de terreno, es $x = 1/7$ ó 0.14, (Snell, 1995).

Se supone que la influencia directa de la rugosidad sobre la distribución de la velocidad con la altura, no se extiende más allá de los 60 a 80 m sobre el nivel de referencia. Para elevaciones mayores, la rapidez cambia con la altura pero a consecuencia de la viscosidad del aire y de la turbulencia de escala más grande que la causada por la rugosidad del terreno.

El valor real de “x” para un sitio dado, se determina con la ayuda de mediciones de la rapidez a diferentes alturas. Los valores dados son promediados sobre mucho tiempo, tendiendo a valores válidos para una atmósfera neutralmente estable.

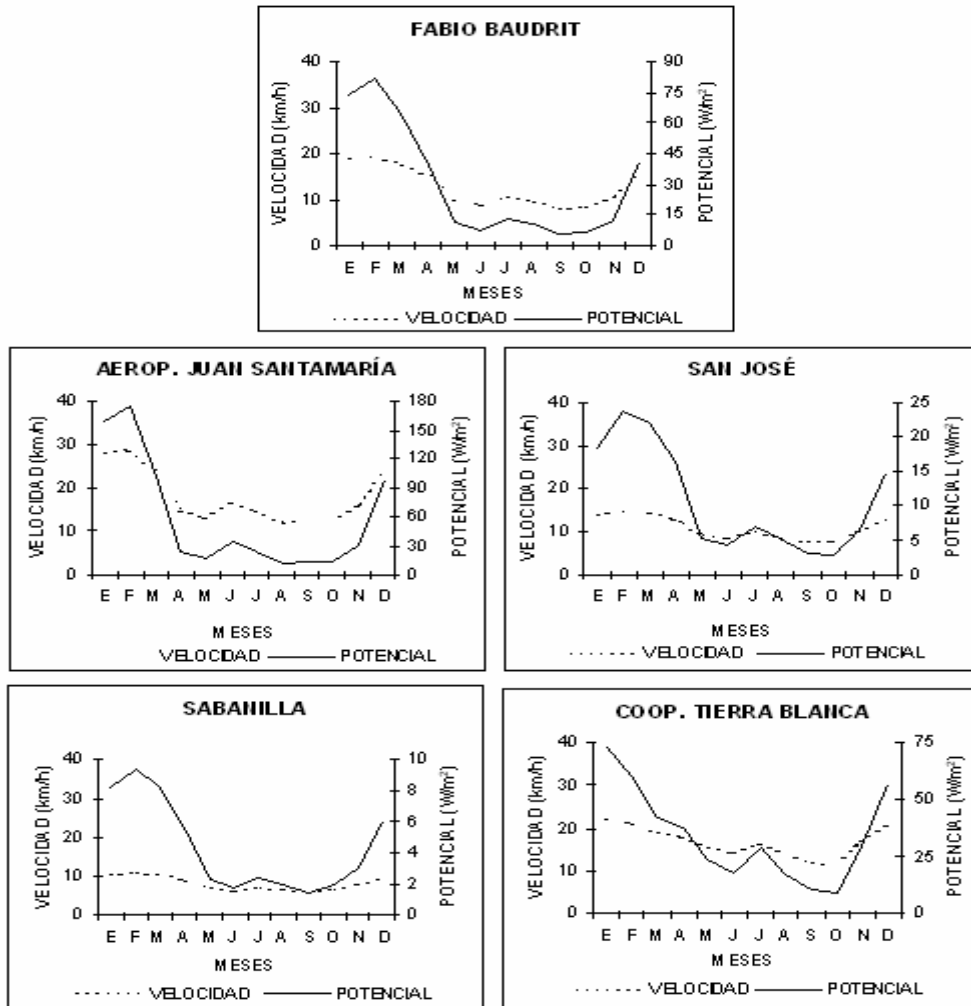


Figura 5: Distribución mensual de la velocidad del viento y del potencial eólico en las estaciones Fabio Baudrit (1974-93), Aeropuerto Juan Santamaría (1974-97), San José (1971-81) y Sabanilla (1985-93) y Tierra Blanca (1986-90).

TOPICOS METEOROLOGICOS Y OCEANOGRAFICOS

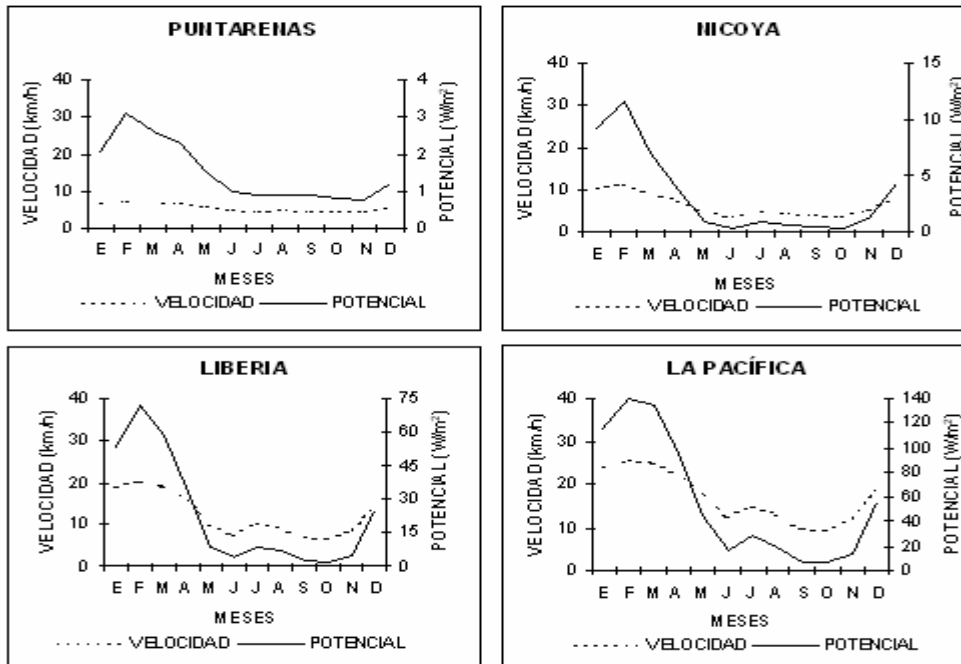


Figura 6: Distribución mensual de la velocidad del viento y del potencial eólico en las estaciones Puntarenas (1971-93), Nicoya (1971-84), Liberia (1974-94) y La Pacífica (1983-87).

5. Distribución estacional del potencial del viento

En esta sección se analiza la distribución a lo largo del año de la magnitud del potencial del viento a una altura de 10 m sobre el terreno. Las estaciones escogidas para este

estudio son las mismas estaciones mostradas en Muñoz et al. (2002a).

Se presentan los gráficos que muestran la distribución mensual de la rapidez del viento en km/h y la distribución del potencial del viento $(P/A)_{\max}$ en Watts/m^2 .

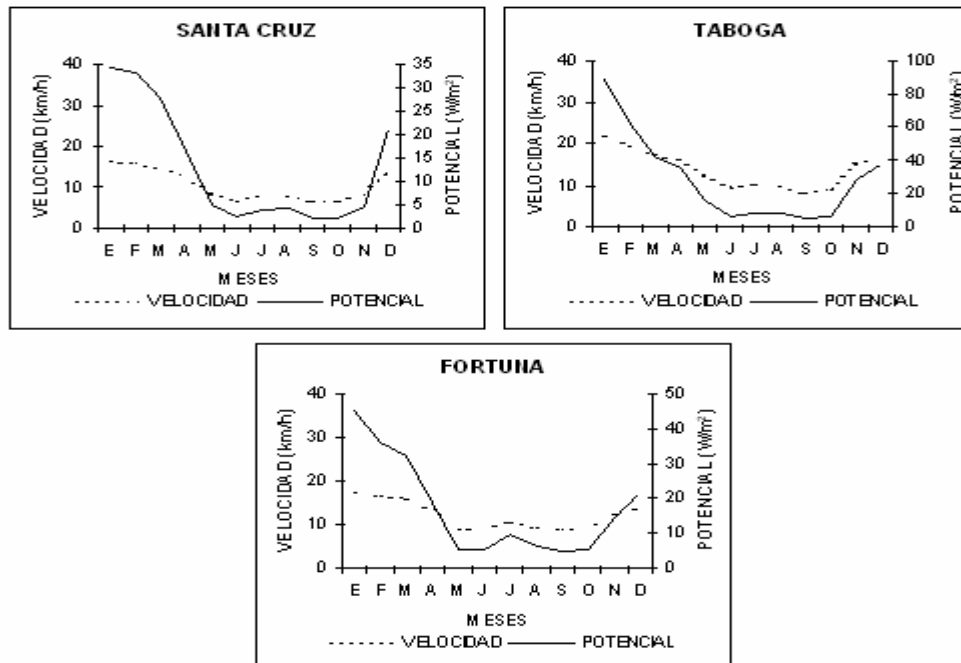


Figura 7: Distribución mensual de la velocidad del viento y del potencial eólico en las estaciones Santa Cruz (1984-93), Taboga (1983-87) y Fortuna (1976-86).

MUÑOZ: Potencial de energía eólica en Costa Rica

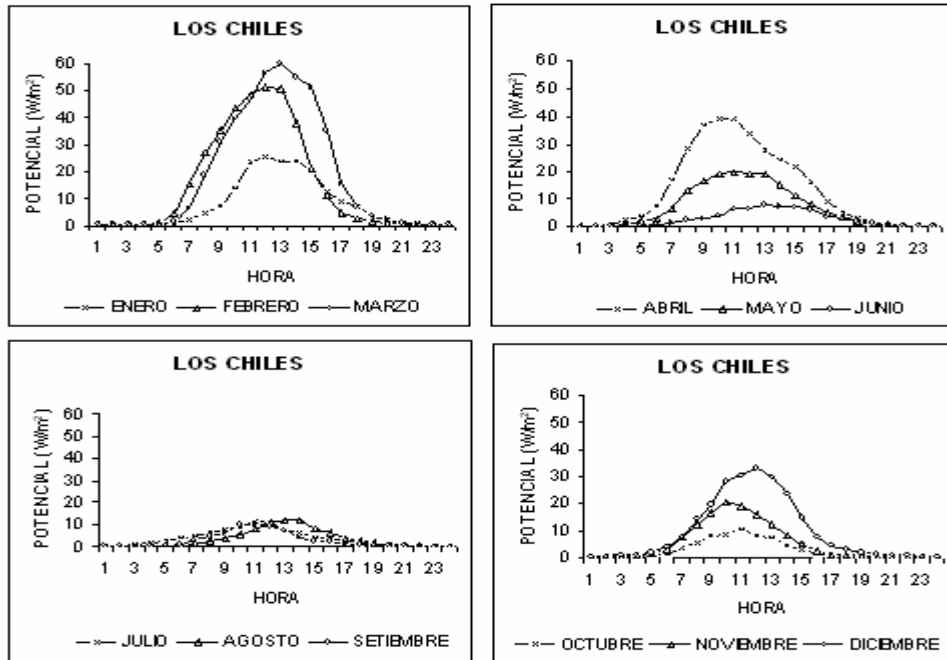


Figura 8: Distribución horaria del potencial eólico a una altura de 10 m en la estación Los Chiles (1991-94) y para los meses mostrados.

El cálculo del potencial del viento se realizó con el valor de la rapidez media mensual, evaluada en toda la serie disponible para cada estación, con la ecuación (5.5) y considerando $C_p = 0.6$, para todas las estaciones consideradas en esta investigación. Para calcular la densidad del aire a la altura a la cual se mide o se calcula la

rapidez, se utiliza como valor de la presión a nivel del mar, el valor promedio de las presiones medidas de las estaciones de Puntarenas y Limón.

La Tabla 1 muestra los valores de la presión atmosférica para todos los meses del año, en las estaciones Puntarenas y Limón.

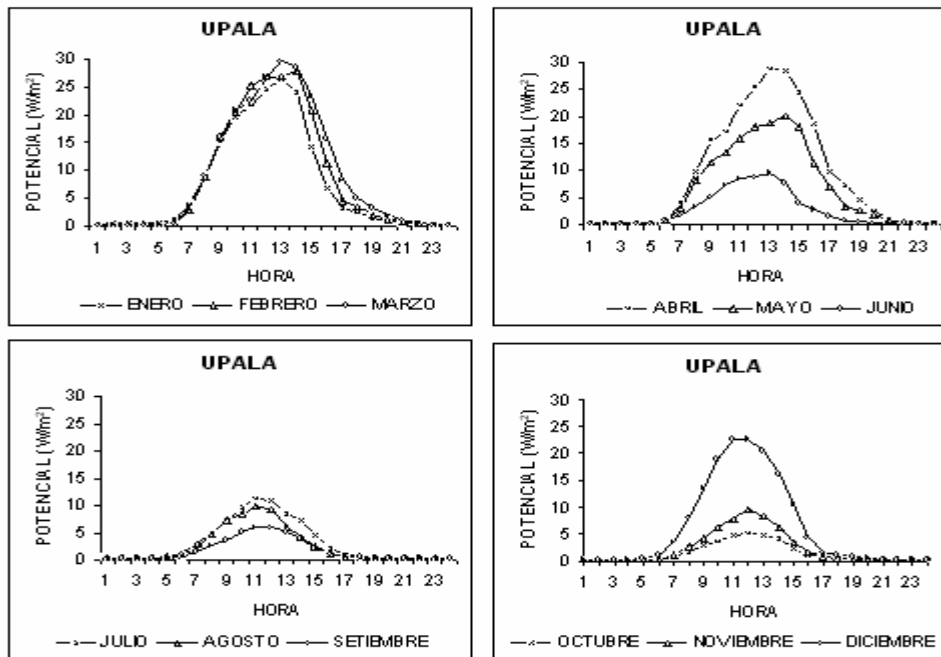


Figura 9: Distribución horaria del potencial eólico a una altura de 10 m en la estación Upala (1983-87) y para los meses mostrados.

TOPICOS METEOROLOGICOS Y OCEANOGRAFICOS

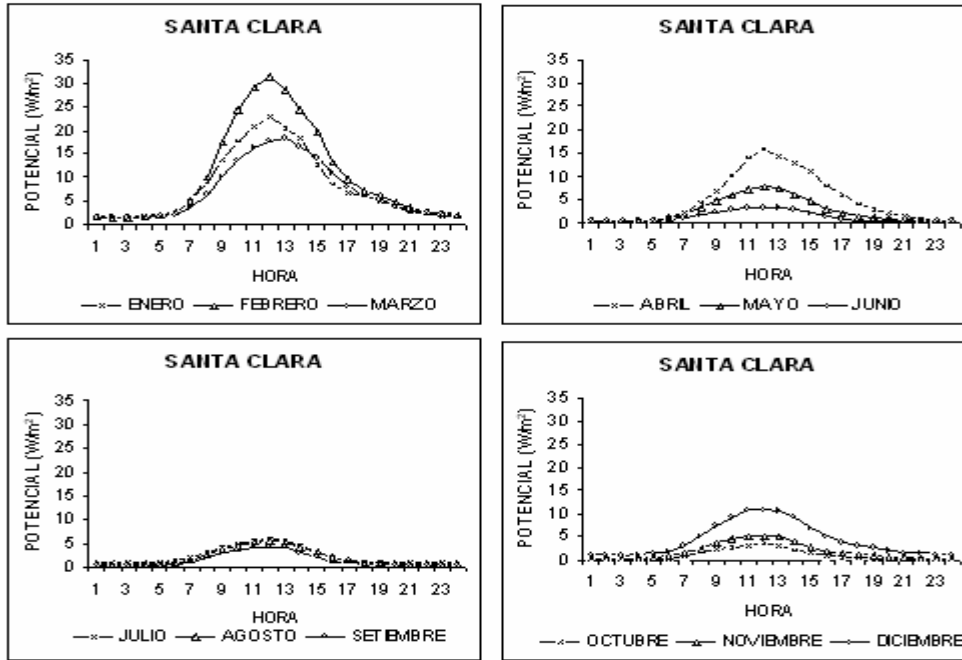


Figura 10: Distribución horaria del potencial eólico a una altura de 10 m en la estación Santa Clara (1983-97) y para los meses mostrados.

Es importante señalar que los gráficos no muestran la distribución mensual del valor promedio del potencial del viento, ya que ello implicaría que la velocidad promedio mensual del viento, se mantiene constante durante todo el mes.

Las estaciones se han agrupado de acuerdo a la

clasificación de las regiones del país presentadas en Muñoz et al. (2002a).

Zona Norte

La distribución mensual del potencial del viento en las

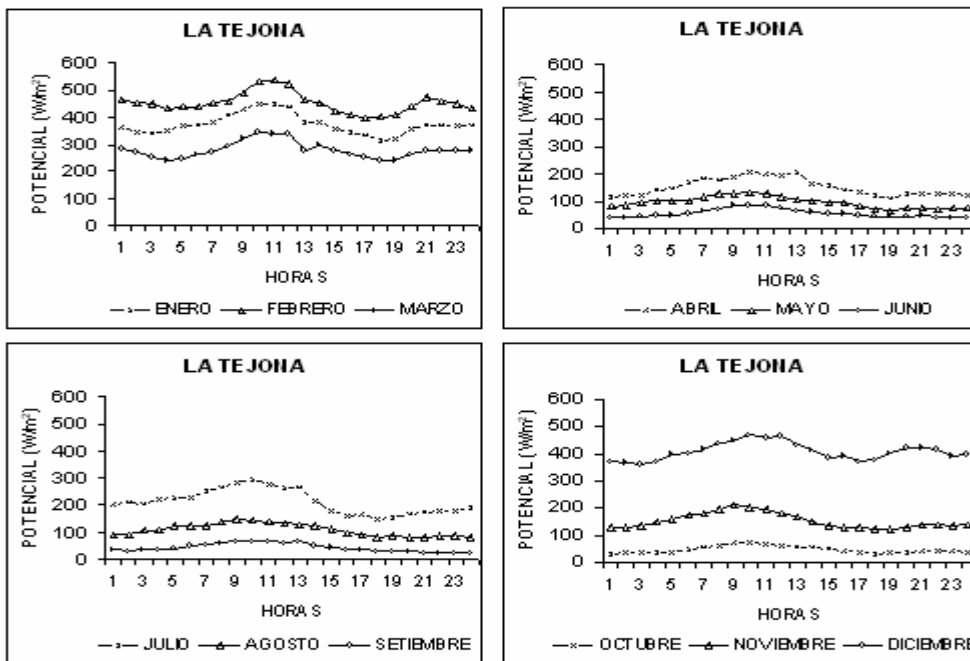


Figura 11: Distribución horaria del potencial eólico a una altura de 10 m en la estación La Tejona (1991-97) y para los meses mostrados.

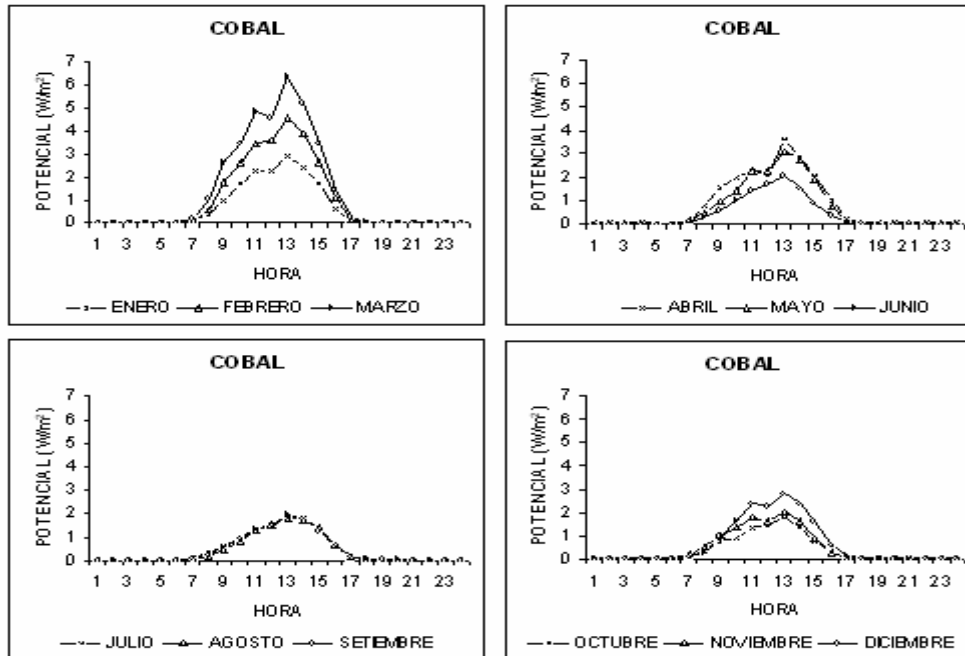


Figura 12: Distribución horaria del potencial eólico a una altura de 10 m en la estación Cobal (1971-76) y para los meses mostrados.

estaciones Los Chiles, Upala, Santa Clara y La Tejona se presentan en la Figura 1. Las tres estaciones muestran distribuciones muy parecidas entre sí y se puede notar cómo un pequeño aumento en la velocidad del viento, produce un gran aumento en el valor del potencial, debido a la dependencia del potencial del viento con el cubo de la rapidez.

Los valores máximos del potencial ocurren de diciembre a abril y varían entre 3.0 W/m^2 en Santa Clara y 389.3 W/m^2 en La Tejona.

Región Caribe

Las estaciones Cobal, El Carmen y Limón, ubicadas en la Región Caribe, presentan también distribuciones anuales del potencial del viento muy parecidas entre sí (Figura 2).

Los valores máximos del potencial del viento se presentan entre los meses de febrero y abril. La estación Limón, posee los valores más altos del potencial con un máximo de 4.1 W/m^2 y la estación Cobal muestra los valores más bajos, con un máximo de 0.4 W/m^2 .

Pacífico Sur

La distribución del potencial del viento mensual en las estaciones Pindeco y Palmar Sur, ubicadas en la región del Pacífico Sur, se caracteriza por presentar los valores máximos durante los meses de febrero y marzo (Figura 3). Ambas estaciones generan valores del potencial del viento, menores a 2.0 W/m^2 .

Pacífico Central

La estación Damas, ubicada en la región Pacífico Central, muestra una distribución mensual del potencial del viento, similar a la de las estaciones ubicadas en la región del Pacífico Sur (Figura 4). Los valores máximos de alrededor de 1.1 W/m^2 , se observan durante los meses de marzo y abril.

Valle Central

Las estaciones Fabio Baudrit, Aerop. Juan Santamaría, San José, Sabanilla y Tierra Blanca, presentan una distribución del potencial del viento mensual, con valores altos en diciembre y los primeros meses del año (Figura 5).

La estación Sabanilla muestra un aumento en el potencial, en el mes de abril, mientras que las otras estaciones, en el mes de junio. Los valores máximos para este grupo de estaciones varían entre 9.3 W/m^2 en Sabanilla y 173.4 W/m^2 en la estación del Aeropuerto Juan Santamaría.

Pacífico Norte

Las estaciones Puntarenas, Nicoya, Liberia y La Pacífica, ubicadas en el Pacífico Norte, presentan distribuciones del potencial eólico muy parecidas entre sí, con valores altos en los primeros meses del año. (Figura 6). Los máximos se observan en el mes de febrero alcanzando valores entre 3.1 W/m^2 en Puntarenas y 140.5 W/m^2 en La

Pacífica.

En la región del Pacífico Norte también se localizan las estaciones Santa Cruz, Taboga y Fortuna. Estas estaciones poseen una distribución similar a las estaciones anteriores (Figura 7), pero presentan una disminución del potencial a partir del mes de enero. En ellas encontramos valores máximos entre y 34.4 W/m^2 en Santa Cruz y 88.4 W/m^2 en Taboga.

6. Distribución horaria del potencial de energía eólica

En esta sección se analiza la distribución horaria de la magnitud del potencial del viento a una altura de 10 m sobre el terreno, para las mismas estaciones analizadas en la sección anterior.

La magnitud del potencial del viento depende directamente del cubo de la magnitud de la velocidad. Es así como la distribución horaria del potencial eólico tiene una forma semejante con la de la rapidez del viento, pero es importante hacer notar que para un cambio moderado en la magnitud de la velocidad del viento se obtiene un aumento apreciable en el valor del potencial eólico.

Este análisis permite observar con mayor detalle las variaciones del potencial eólico en función de las diferencias en la magnitud de la velocidad, hora a hora.

Los gráficos que se presentan a continuación, muestran la variación del potencial eólico promedio horario en W/m^2 , utilizando el valor promedio horario de la rapidez a 10 metros de altura. A su vez, no muestran la distribución

horaria del valor promedio del potencial del viento, ya que la velocidad del viento no se mantiene constante durante toda la hora.

El potencial eólico se calculó con la ecuación (5.5) y considerando $C_p = 0.6$.

Zona Norte

La distribución horaria del potencial del viento en la estación Los Chiles se presenta en la Figura 8.

Los valores máximos se presentan entre las 10 y las 14 horas, variando entre 7.99 W/m^2 en junio y 60.1 W/m^2 en marzo y los valores mínimos, durante la noche y la madrugada varían entre 0.18 W/m^2 en agosto y 0.49 W/m^2 en diciembre.

En la Figura 9 se muestra la distribución horaria del potencial del viento en la estación Upala. Los valores máximos, variando entre 5.2 W/m^2 en octubre y 29.5 W/m^2 en marzo, ocurren entre las 11 y las 14 horas. Los valores mínimos se presentan en las horas de la noche y la madrugada y varían entre 0.1 W/m^2 en agosto y 0.3 W/m^2 en diciembre.

La Figura 10 muestra la distribución del potencial horario promedio para todas las horas del día en la estación Santa Clara. Los valores máximos se presentan entre las 11 y las 13 horas, variando entre 3.2 W/m^2 en octubre y 31.4 W/m^2 en febrero. Los valores mínimos varían entre 0.2 W/m^2 en setiembre y octubre y 1.6 W/m^2 en febrero y se aprecian en las horas de la noche y la madrugada.

La distribución horaria del potencial del viento en la

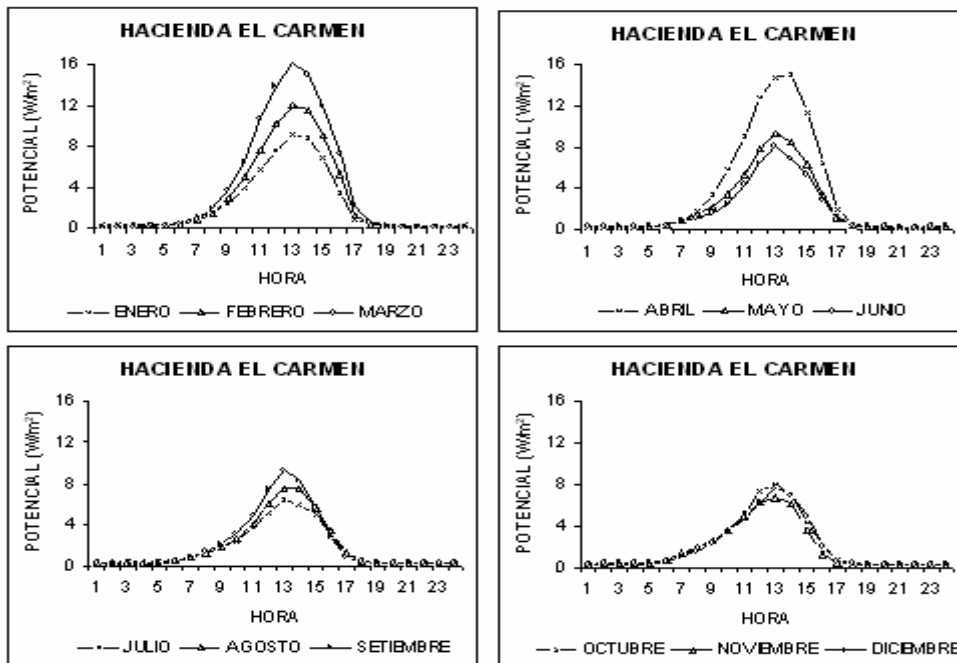


Figura 13: Distribución horaria del potencial eólico a una altura de 10 m en la estación Hacienda El Carmen (1982-98) y para los meses mostrados.

MUÑOZ: Potencial de energía eólica en Costa Rica

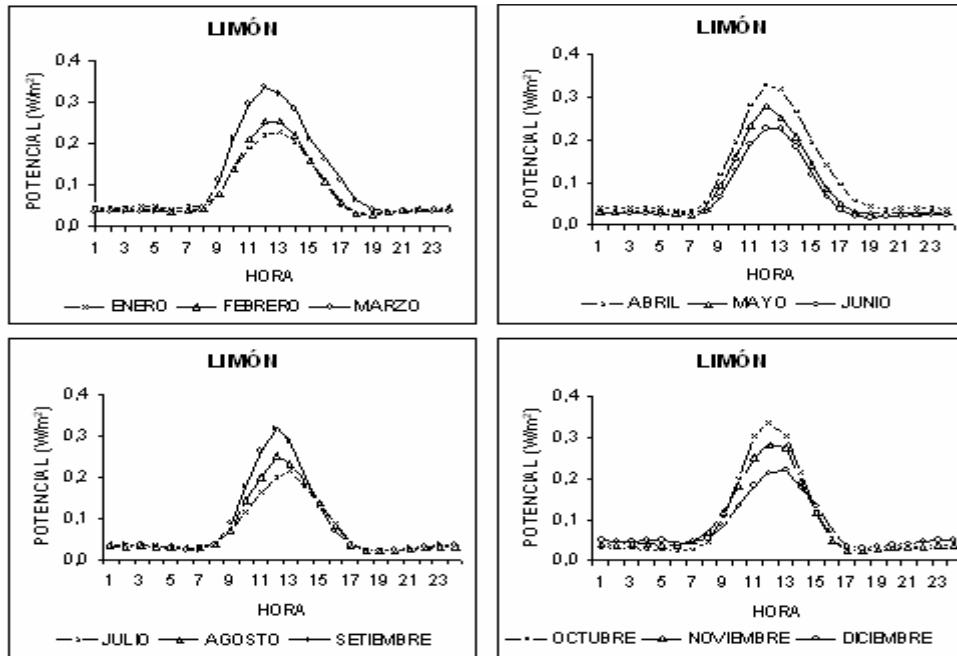


Figura 14: Distribución horaria del potencial eólico a una altura de 10 m en la estación Limón (1970-96) y para los meses mostrados.

estación La Tejona se observa en la Figura 11. Los valores máximos se presentan entre las 8 y las 11 horas, variando entre 69.6 W/m^2 en setiembre y 537 W/m^2 en febrero. Los valores mínimos varían entre 41.0 W/m^2 en junio y 397.1 W/m^2 en febrero y se presentan en las horas de la tarde y de la noche.

Región Caribe

La estación Cobal (Figura 12) presenta una distribución horaria del potencial del viento con las siguientes características. En el mes de febrero se observa un valor máximo de 6.4 W/m^2 y en los meses de agosto y

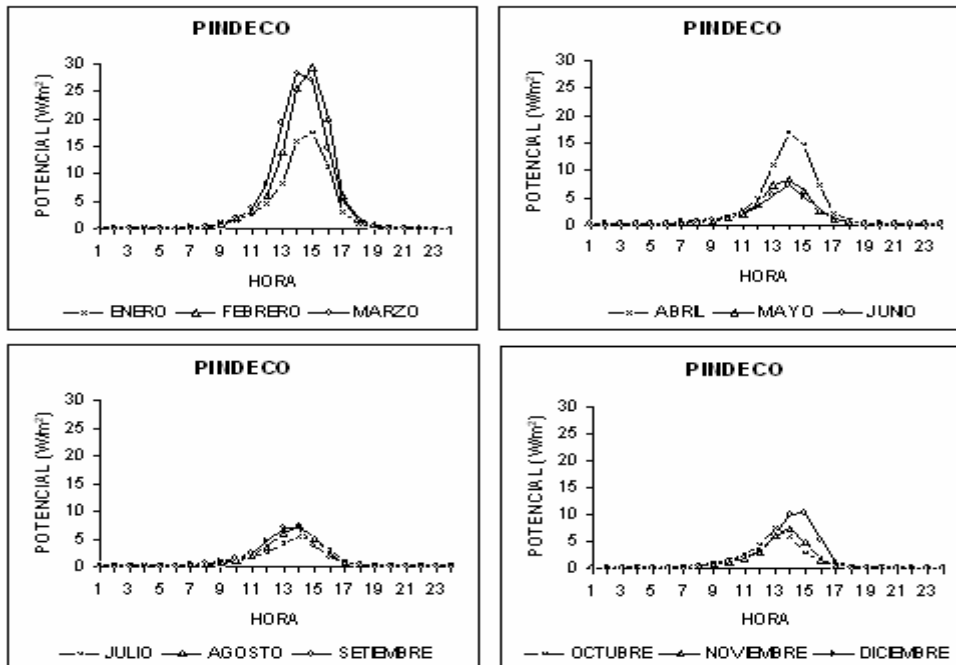


Figura 15: Distribución horaria del potencial eólico a una altura de 10 m en la estación Pindeco (1985-96) y para los meses mostrados.

TOPICOS METEOROLOGICOS Y OCEANOGRAFICOS

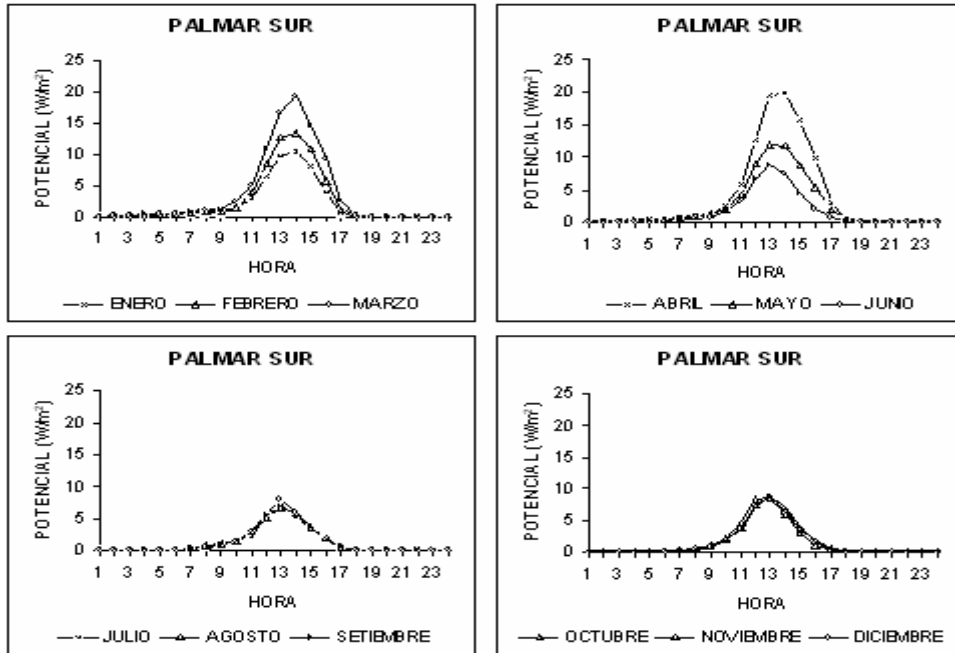


Figura 16: Distribución horaria del potencial eólico a una altura de 10 m en la estación Palmar Sur (1973-93) y para los meses mostrados.

octubre los valores altos apenas alcanzan 1.8 W/m^2 , produciéndose todos a las 13 horas. Los valores mínimos, cercanos a 0.1 W/m^2 , están presentes en las horas de la noche y de la madrugada de todo el año.

La distribución horaria del potencial del viento en la

estación El Carmen, se expone en la Figura 13. Los valores máximos se presentan entre las 13 y las 14 horas, variando entre 6.5 W/m^2 en julio y 16.2 W/m^2 en marzo y los valores mínimos, durante la noche y la madrugada varían entre 0.2 y 0.3 W/m^2 .

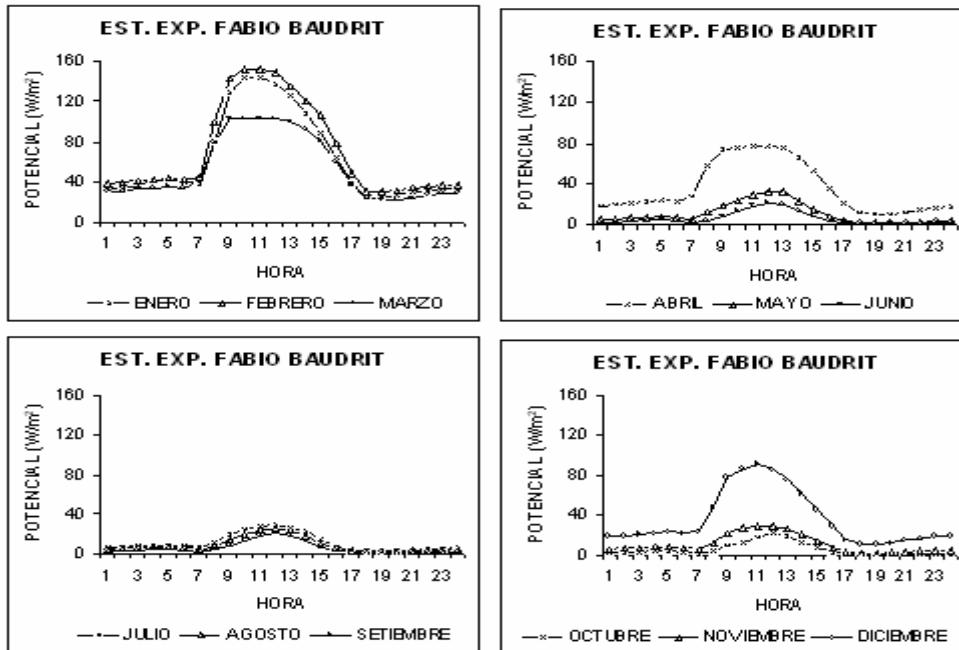


Figura 17: Distribución horaria del potencial eólico a una altura de 10 m en la Estación Experimental Fabio Baudrit (1973-94) y para los meses mostrados.

MUÑOZ: Potencial de energía eólica en Costa Rica

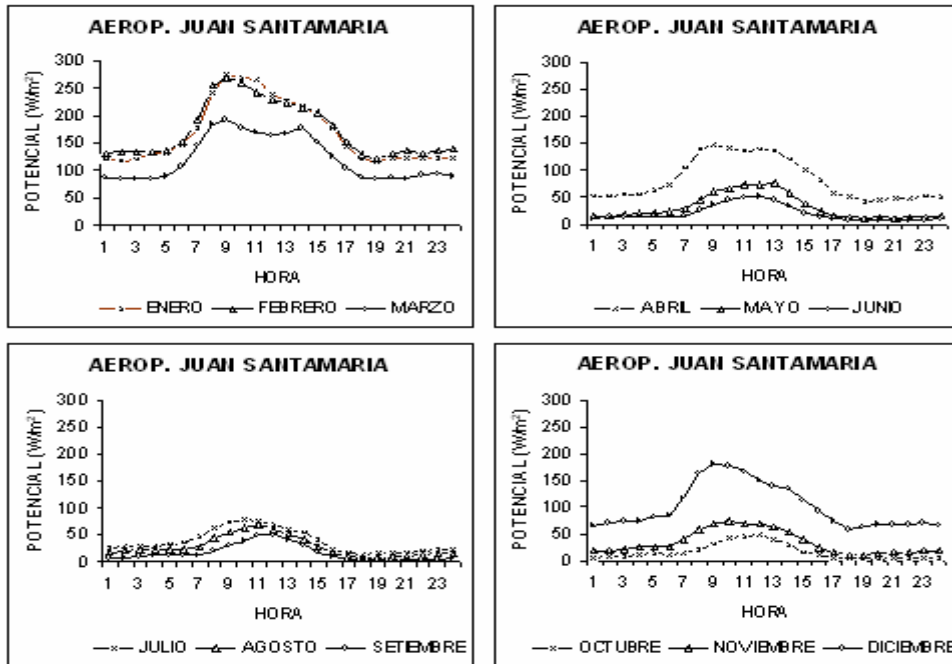


Figura 18: Distribución horaria del potencial eólico a una altura de 10 m en la estación Aeropuerto Juan Santamaría (1972-98) y para los meses mostrados.

En la Figura 14 se muestra la distribución horaria del potencial del viento en la estación Limón. Los valores del potencial para todas las horas del día a través de todo el año

son muy parecidos y varían entre 0.0 y 0.3 W/m². Los valores máximos se efectúan entre las 11 y las 15 horas.

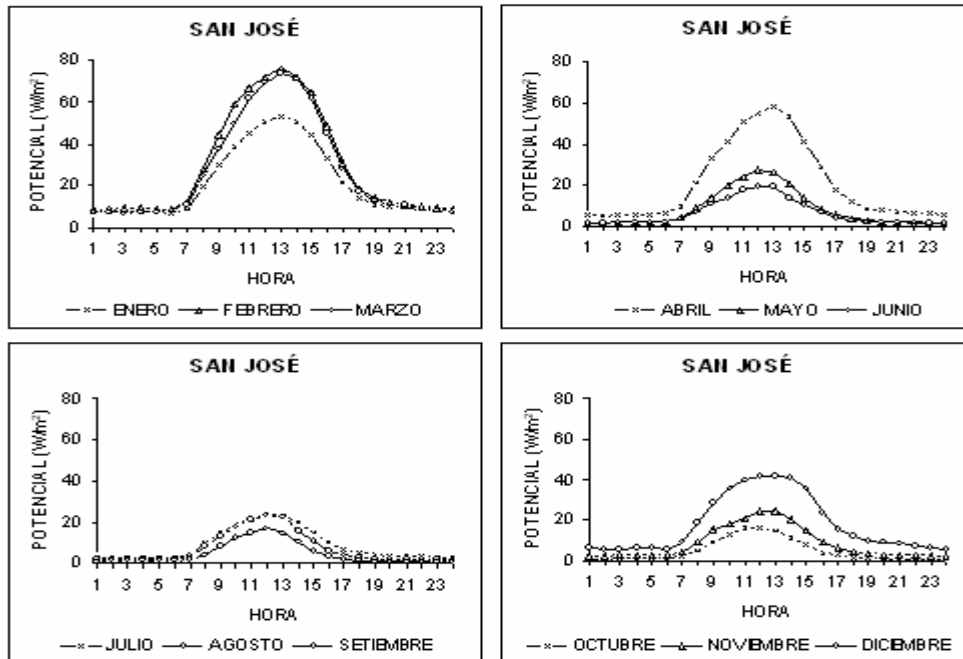


Figura 19: Distribución horaria del potencial eólico a una altura de 10 m en la estación San José (1970-80) y para los meses mostrados.

TOPICOS METEOROLOGICOS Y OCEANOGRAFICOS

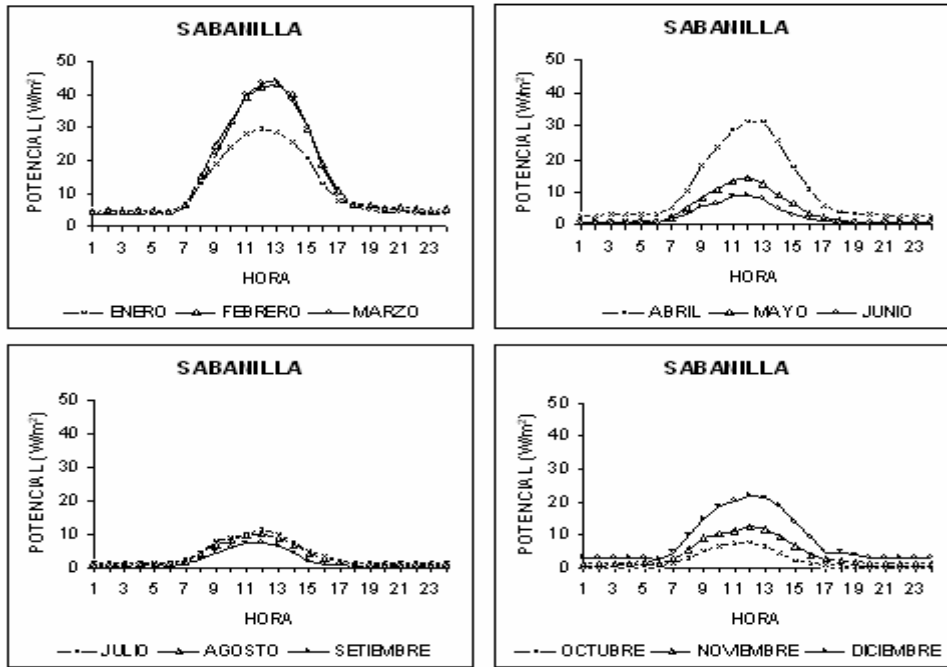


Figura 20: Distribución horaria del potencial eólico a una altura de 10 m en la estación Sabanilla (1982-95) y para los meses mostrados.

Pacífico Sur

En la Figura 15 se muestra la distribución horaria del potencial del viento en la estación Pindeco. Los valores

máximos, variando entre $5.5 W/m^2$ en julio y $29.5 W/m^2$ en febrero, se presentan entre las 13 y las 15 horas y los mínimos, alrededor de $0.1 W/m^2$, ocurren en las horas de la noche y la madrugada.

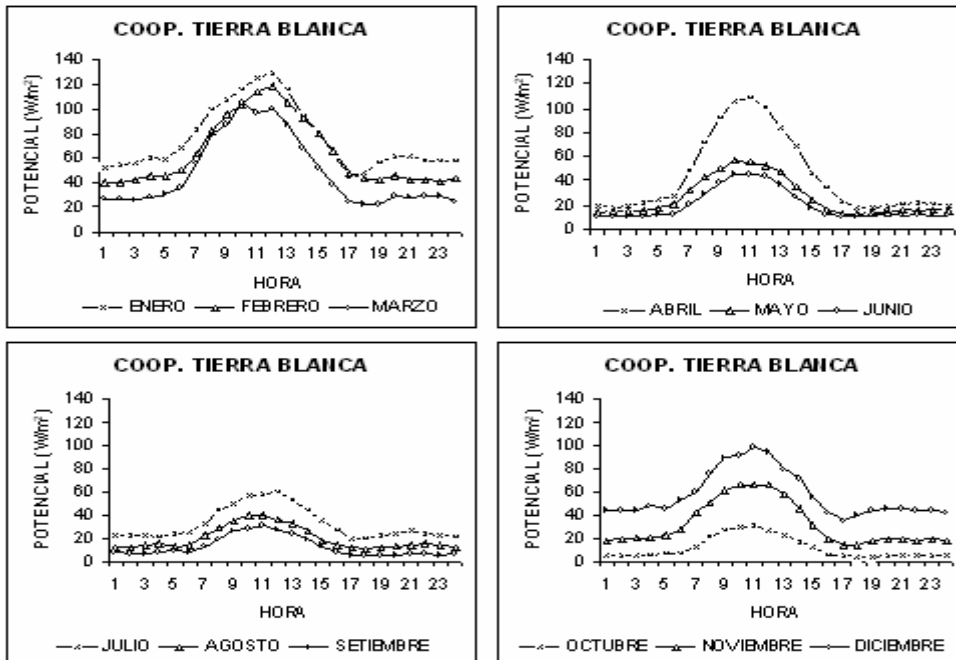


Figura 21: Distribución horaria del potencial eólico a una altura de 10 m en la estación Coop. Tierra Blanca (1986-90) y para los meses mostrados.

MUÑOZ: Potencial de energía eólica en Costa Rica

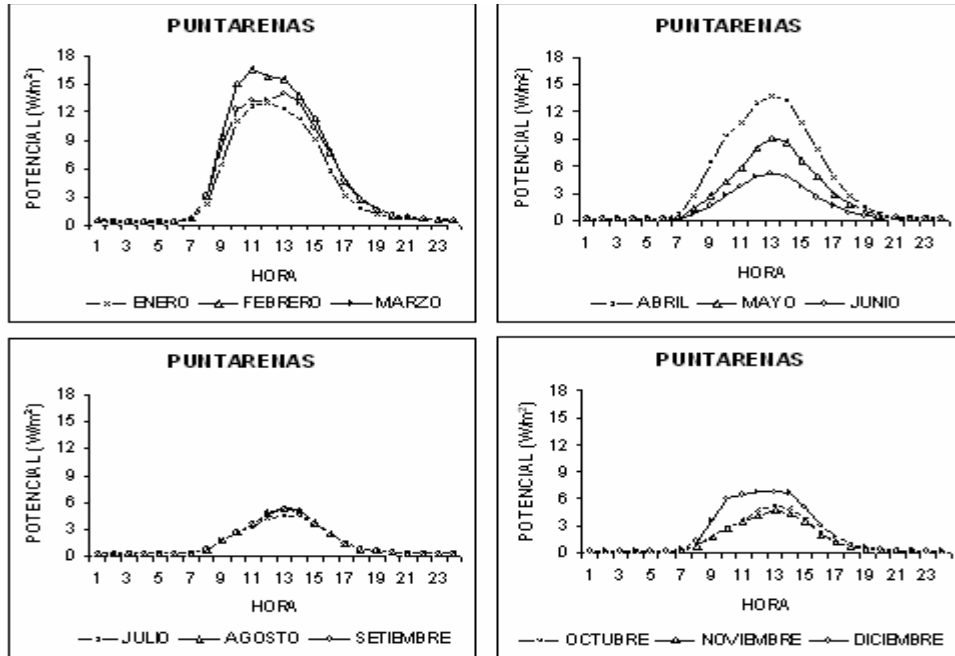


Figura 22: Distribución horaria del potencial eólico a una altura de 10 m en la estación Puntarenas (1971-94) y para los meses mostrados.

La distribución horaria del potencial del viento en la estación Palmar Sur se muestra en la Figura 16. La distribución posee las siguientes características. Se observa que los valores máximos se dan entre las 13 y 14 horas y varían entre 6.8 W/m² en el mes de agosto y 19.8 W/m² en abril. Los valores mínimos, cercanos a 0.1 W/m², están

presentes en las horas de la noche y de la madrugada de todo el año.

Valle Central

La distribución horaria del potencial del viento en la estación Fabio Baudrit se expone en la Figura 17. Los

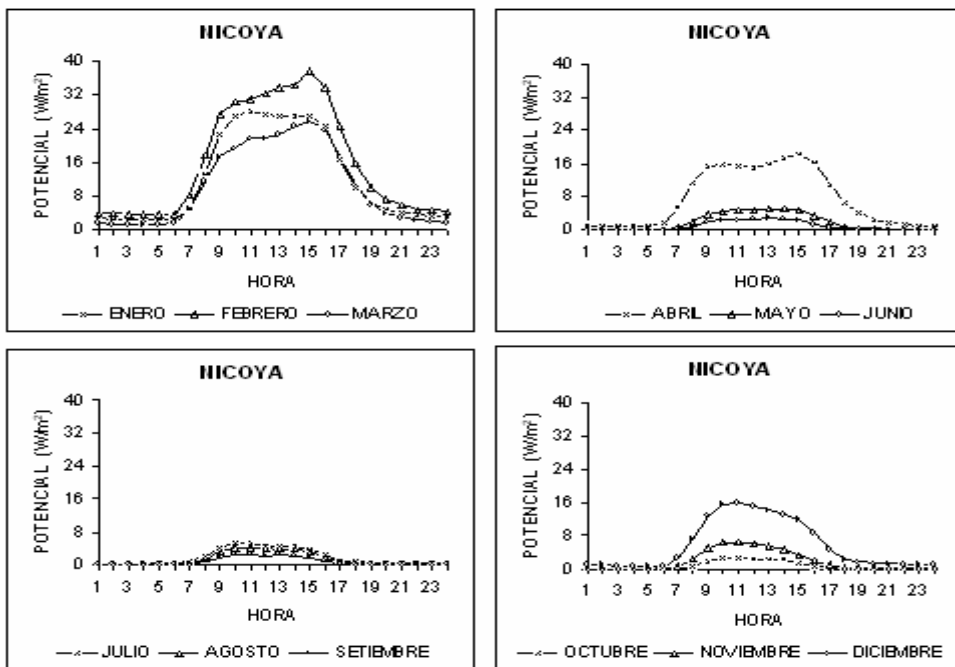


Figura 23: Distribución horaria del potencial eólico a una altura de 10 m en la estación Nicoya (1971-83) y para los meses mostrados.

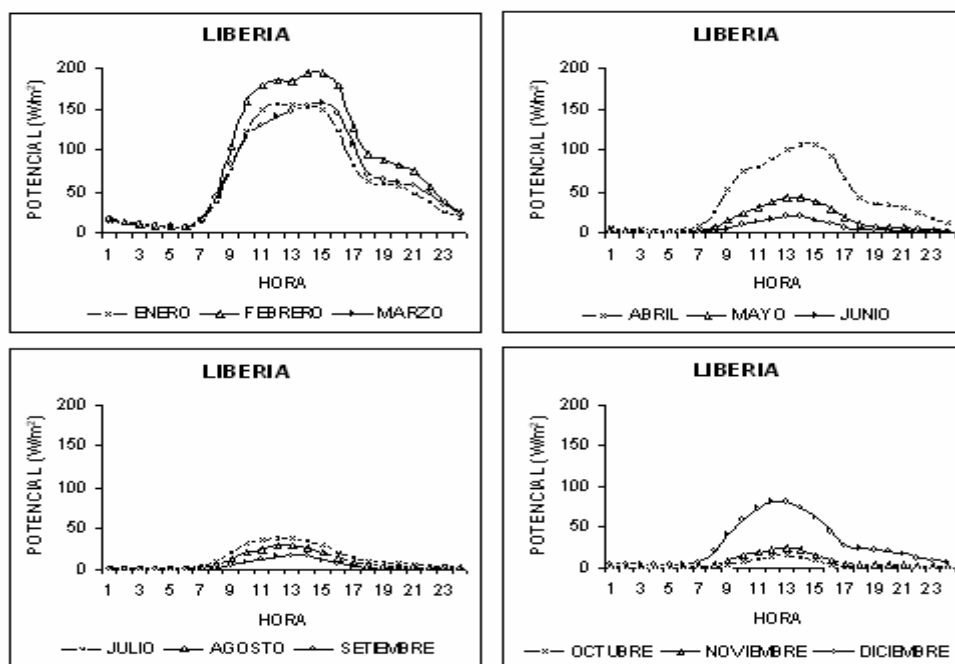


Figura 24: Distribución horaria del potencial eólico a una altura de 10 m en la estación Liberia (1974-99) y para los meses mostrados.

valores máximos se presentan entre las 10 y las 12 horas, variando entre 20.8 W/m² en setiembre y 151.1 W/m² en febrero y los valores mínimos, durante la noche y la madrugada varían entre 1.0 W/m² entre junio y octubre y 25.1 W/m² en enero.

En la Figura 18 se muestra la distribución horaria del potencial del viento en la estación Aeropuerto Juan Santamaría. Los valores máximos, variando entre 47.2 W/m² en octubre y 273.3 W/m² en enero, se presentan entre las 9 y las 13 horas. Los valores mínimos perduran con mayor frecuencia en las horas de la noche y varían entre 3.8 W/m² en octubre y 127.5 W/m² en febrero.

La Figura 19 muestra la distribución del potencial horario promedio para todas las horas del día en la estación San José. Los valores máximos se observan entre las 11 y las 13 horas, variando entre 17.1 W/m² en setiembre y 75.7 W/m² en febrero. Los valores mínimos varían entre 0.8 W/m² en setiembre y octubre y 8.5 W/m² en febrero y se presentan en las horas de la noche y la madrugada.

La distribución horaria del potencial del viento en la estación Sabanilla se observa en la Figura 20. Esta distribución presenta las siguientes características. Los valores máximos, que varían entre 7.6 W/m² en setiembre y 44.4 W/m² en el mes de marzo, ocurren entre las 12 y las 13 horas y los valores mínimos, presentes en las horas de la noche y de la madrugada, varían entre 0.3 W/m² en setiembre y 4.2 W/m² en los meses de enero y febrero.

La distribución horaria del potencial del viento en la estación Coop. Tierra Blanca, se muestra en la Figura 21. Los valores máximos se presentan entre las 10 y las 12

horas, variando entre 30.4 W/m² en setiembre y 126.6 W/m² en enero y los valores mínimos, durante la noche y la madrugada varían entre 3.7 W/m² en octubre y 45.2 W/m² en enero.

Pacífico Norte

En la Figura 22 se muestra la distribución horaria del potencial del viento en la estación Puntarenas. Los valores máximos se presentan entre las 11 y las 13 horas y varían entre 4.6 W/m² en julio y 16.6 W/m² en febrero. Los valores mínimos, durante las horas de la noche y la madrugada varían entre 0.2 y 0.4 W/m².

En la Figura 23 se muestra la distribución horaria del potencial del viento en la estación Nicoya. Los valores máximos, variando entre 2.3 W/m² en setiembre y 37.6 W/m² en febrero, se presentan entre las 11 y las 15 horas. Los valores mínimos, alrededor de 0.1 W/m² y hasta 3.7 W/m² en febrero, son notorios en las horas de la noche y la madrugada.

La estación Liberia (Figura 24) presenta las siguientes características en su distribución horaria del potencial del viento. Se observa que los valores máximos se dan entre las 12 y 15 horas y varían entre 14.8 W/m² en el mes de octubre y 192.3 W/m² en febrero. Los valores mínimos, variando entre 0.3 W/m² en setiembre y octubre y 8.8 W/m² en febrero, están visibles en las horas de la noche y de la madrugada.

La distribución horaria del potencial del viento en la estación Santa Cruz se muestra en la Figura 25. Los valores

MUÑOZ: Potencial de energía eólica en Costa Rica

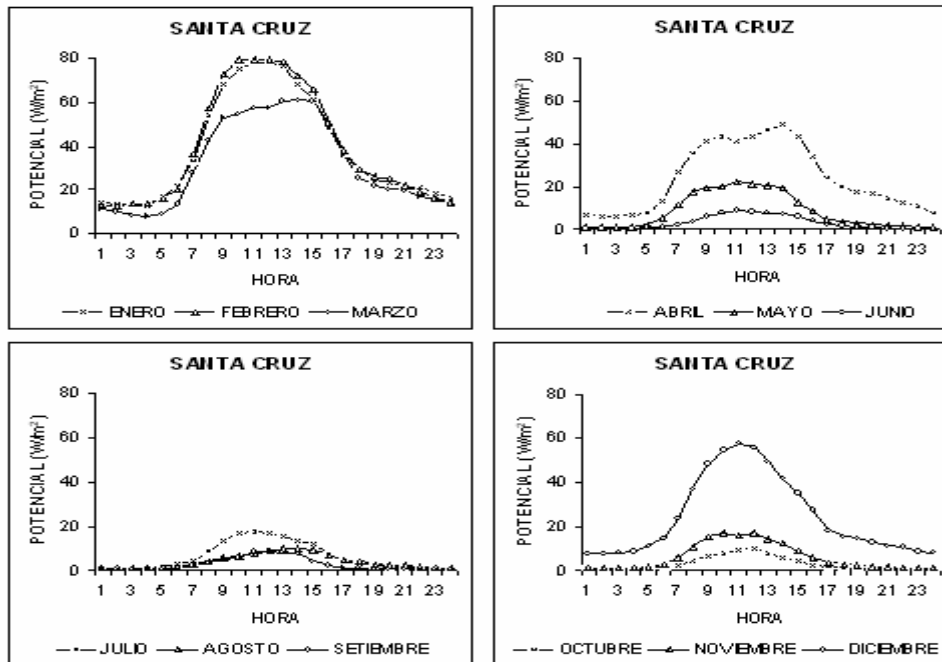


Figura 25: Distribución horaria del potencial eólico a una altura de 10 m en la estación Santa Cruz (1984-96) y para los meses mostrados.

máximos se presentan entre las 10 y las 14 horas, variando entre 9.0 W/m^2 en setiembre y 76.9 W/m^2 en febrero y los valores mínimos, durante la noche y la madrugada varían entre 0.5 W/m^2 entre setiembre y octubre y 12.2 W/m^2 en enero y febrero.

En la Figura 26 se muestra la distribución horaria del potencial del viento en la estación Taboga. Los valores máximos, variando entre 14.7 W/m^2 en setiembre y 228.0 W/m^2 en febrero, se presentan entre las 10 y las 13 horas. Los valores mínimos ocurren en las horas de la noche y la madrugada y varían entre 0.6 W/m^2 en octubre y 19.9 W/m^2 en febrero.

7. Conclusiones

El potencial de la energía del viento depende del cubo de la magnitud de la velocidad del viento, y para pequeñas variaciones en ella, se obtienen grandes variaciones en el potencial ya que depende directamente del comportamiento de la velocidad del viento.

El cálculo del potencial eólico promedio horario, permite agrupar las estaciones, según el valor máximo horario alcanzado, de la siguiente manera:

- De 0 a $<50 \text{ W/m}^2$: Upala, Santa Clara, Cobal, Limón, Hacienda El Carmen, Pindeco, Palmar Sur, Sabanilla, Puntarenas y Nicoya.
- De 50 a $<100 \text{ W/m}^2$: Los Chiles, San José y Santa

Cruz.

- De 100 a $<150 \text{ W/m}^2$: Tierra Blanca.
- De 150 a $<200 \text{ W/m}^2$: Fabio Baudrit y Liberia.
- De 200 a $<250 \text{ W/m}^2$: Taboga.
- De 250 a $<300 \text{ W/m}^2$: Aeropuerto Juan Santamaría.
- De 500 a $<550 \text{ W/m}^2$: La Tejona

De acuerdo a la distribución mensual y horaria de la velocidad del viento en nuestro país, es importante recalcar que la producción de electricidad a partir de la energía del viento, representa un buen complemento al desarrollo de la energía hidroeléctrica. En la Vertiente del Pacífico, la mayor producción de energía eólica es posible durante los meses correspondientes a la época seca, cuando la energía hidroeléctrica podría disminuir. Además, alrededor del medio día, cuando el consumo de electricidad es mayor, la velocidad del viento adquiere los valores máximos en su variación diurna, permitiendo obtener los máximos valores del potencial de la energía eólica.

Agradecimientos

Los autores están agradecidos con Rafael Enrique Chacón por sus valiosos comentarios y sugerencias. También, expresan su agradecimiento al Instituto Meteorológico Nacional y al Instituto Costarricense de Electricidad por haber proporcionado los datos utilizados en este trabajo.

TOPICOS METEOROLOGICOS Y OCEANOGRAFICOS

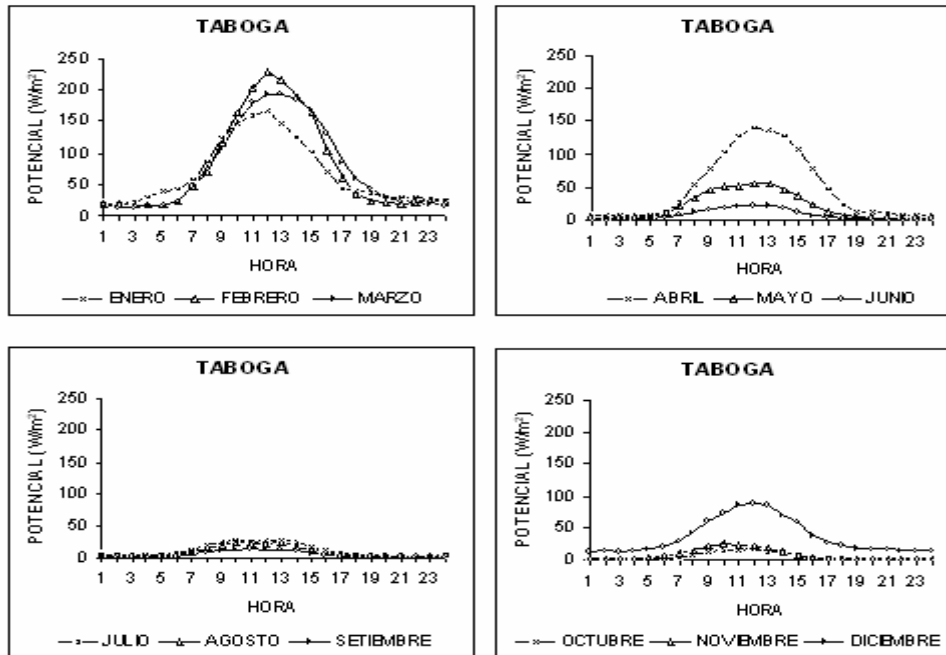


Figura 26: Distribución horaria del potencial eólico a una altura de 10 m en la estación Taboga (1971-72/ 1983-86) y para los meses mostrados.

RESUMEN

Se analiza la distribución mensual y horaria del potencial de energía eólica para diferentes lugares de Costa Rica. El potencial del viento es estimado a una altura de 10 metros sobre el nivel del suelo.

El cálculo del potencial promedio horario del viento, permite agrupar las estaciones, según los valores máximos horarios de la siguiente manera:

De 0 a <50 W/m ² :	Upala, Santa Clara, Cobal, Limón, Hacienda El Carmen, Pindeco, Palmar Sur, Sabanilla, Puntarenas y Nicoya.
De 50 a <100 W/m ² :	Los Chiles, San José y Santa Cruz.
De 100 a <150 W/m ² :	Tierra Blanca.
De 150 a <200 W/m ² :	Fabio Baudrit y Liberia.
De 200 a <250 W/m ² :	Taboga.
De 250 a <300 W/m ² :	Aeropuerto Juan Santamaría.
De 300 a <550 W/m ² :	La Tejona

La estación La Tejona presenta los valores máximos, alcanzando 389.3 W/m² en el mes de febrero.

A partir de los resultados obtenidos del análisis de la distribución mensual y horaria de la velocidad del viento en nuestro país, es importante recalcar que la producción de electricidad a partir de la energía del viento, representa un buen complemento al desarrollo de la energía hidroeléctrica. En la Vertiente del Pacífico, la mayor producción de energía eólica es posible durante los meses correspondientes a la época seca, cuando la energía hidroeléctrica podría disminuir. Además, alrededor del mediodía, cuando el consumo de electricidad es mayor, la velocidad del viento adquiere los valores máximos en su variación diaria, permitiendo obtener los máximos valores del potencial de la energía eólica.

Referencias

- EES., 1984: "Non conventional energy sources. Wind energy".. Electrowatt Engineering Services Ltd. Volume I.
- DSE., 1982: "Diagnóstico sobre energía eólica". San José, C.R.: Dirección Sectorial de Energía.
- ICE., 1979: "Fuentes de energía no convencionales". San José, C. R.: Instituto Costarricense de Electricidad.
- ICE., 1980: "Análisis preliminar del viento en Costa Rica". San José: Instituto Costarricense de Electricidad.
- ICE., 1985a: "Fuentes de energía no convencionales". San José: Instituto Costarricense de Electricidad.
- ICE., 1985b: "Fuentes de energía no convencionales. Resumen Ejecutivo". Zurich, Suiza. Electrowatt Ingenieros Consultores.
- Muñoz, A.C., W. Fernández, J. Gutiérrez y E. Zárate, 2002a: Variación estacional del viento en Costa Rica y su relación con los regímenes de lluvia. Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos, ,
- Muñoz, A.C., W. Fernández, J. Gutiérrez y E. Zárate, 2002b: Distribución horaria de la magnitud del viento en Costa Rica. Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos, ,
- Rohatgi, Janardan y Nelson Vaughn, 1994: "Wind Characteristics. An analysis for the generation of wind power". Texas, USA.

- Snell, Herman., 1995: "Generación de electricidad por medio de energía eólica",ITCR, Cartago.
- Vindas, Carlomagno., 1989. Estudio preliminar para la instalación de una planta eólica de generación eléctrica en Costa Rica. Tesis de grado. Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad de Costa Rica.

Análisis estadístico multivariado de la concentración de CO₂

A. BANICHEVICH, J. BONATTI¹, J. TREJOS

LIAP, LAFNA, Escuela de Física, Universidad de Costa Rica
CIMPA, Escuela de Matemática, Universidad de Costa Rica

(Recibido 14 de febrero 2002, aceptado 20 de mayo de 2002)

ABSTRACT

It is analyzed latitudinal distribution of CO₂ in the Earth and its relation north-south. Principal component analysis and hierarchical cluster analysis are used for interpretation of results.

1. Introducción

Debido a la posición del eje de rotación de la Tierra con respecto al Sol, posibilitando la variación en la cantidad de radiación solar que incide al planeta, los polos representan aquellas regiones del planeta, donde los ciclos anuales: invierno-verano, son casos extremos. En ambas regiones se dan aquellos días de verano donde el Sol nunca desaparece bajo el horizonte y aquellos días de invierno donde reina la absoluta oscuridad. Estos ciclos que describen los cambios en las estaciones anuales están determinados por diferentes hechos astronómicos y mecanismos asociados a la rotación de un cuerpo en el medio interestelar. Este hecho posibilita definir en la Tierra a los hemisferios geográficos, donde los polos reciben la menor radiación, y el ecuador la mayor cantidad en promedio.

Al considerarse al planeta Tierra a nivel climático global, se puede hablar de la existencia de dos hemisferios altamente asimétricos. Estos dos hemisferios no corresponden a los hemisferios geográficos que están delimitados por el ecuador, sino a hemisferios climáticos donde por superficie, el Hemisferio Sur sobrepasa al Hemisferio Norte en varios millones de kilómetros cuadrados. La línea que delimita la frontera entre ambos hemisferios está asociada a la Zona de Convergencia Intertropical o Ecuador climático, la cual tiene un comportamiento anual en función de la longitud. Mientras el Hemisferio Sur se caracteriza por poseer enormes superficies acuosas y criosféricas, el Hemisferio Norte

posee mayores superficies continentales. Este último hecho implica, por ende, que el Hemisferio Norte posee un mayor efecto interactuante con la atmósfera, debido a los mecanismos y procesos meteorológicos que están asociados a la interacción: orografía-atmósfera [1].

Una propiedad de especial importancia al considerarse la asimetría hemisférica terrestre está asociada a la presencia de moléculas triatómicas en el medio atmosférico. Básicamente se puede hablar de dos categorías de moléculas triatómicas en función de la radiación solar incidente y/o tipo de medio reactivo-químico en que se encuentran: 1) las que son altamente estables, como el CO₂ y el H₂O, y 2) las que son inestables, como es el caso del O₃ y N₂O. La concentración de ambas categorías de moléculas se da en mayor cantidad en el Hemisferio Norte que en el Hemisferio Sur [2,6,8,11]. Esta característica permite hablar de otra configuración hemisférica, y puede ser asociada -en parte- a las propiedades naturales propias de cada hemisferio. En el caso particular del CO₂, su alta concentración en el Hemisferio Norte está fuertemente correlacionada a la actividad antropogénica de los últimos dos siglos. El aumento en concentración del CO₂ está asociado al aumento en emisiones por el uso de la combustión como mecanismo generador de calor, energía mecánica, etc., a la deforestación, a la redistribución de la biota, ya sea con fines agrícolas u otros, etc. [3,9,12].

Si bien el aumento en la concentración del CO₂ a nivel atmosférico e hidrosférico es un evento global, aun no queda claro por qué la dependencia de la concentración del CO₂ en función de la latitud muestra un comportamiento

¹ Escuela de Física, Universidad de Costa Rica, 2060 San José, Costa Rica;
E-Mail: abaniche@cariari.ucr.ac.cr; jbonatti2000@yahoo.com.

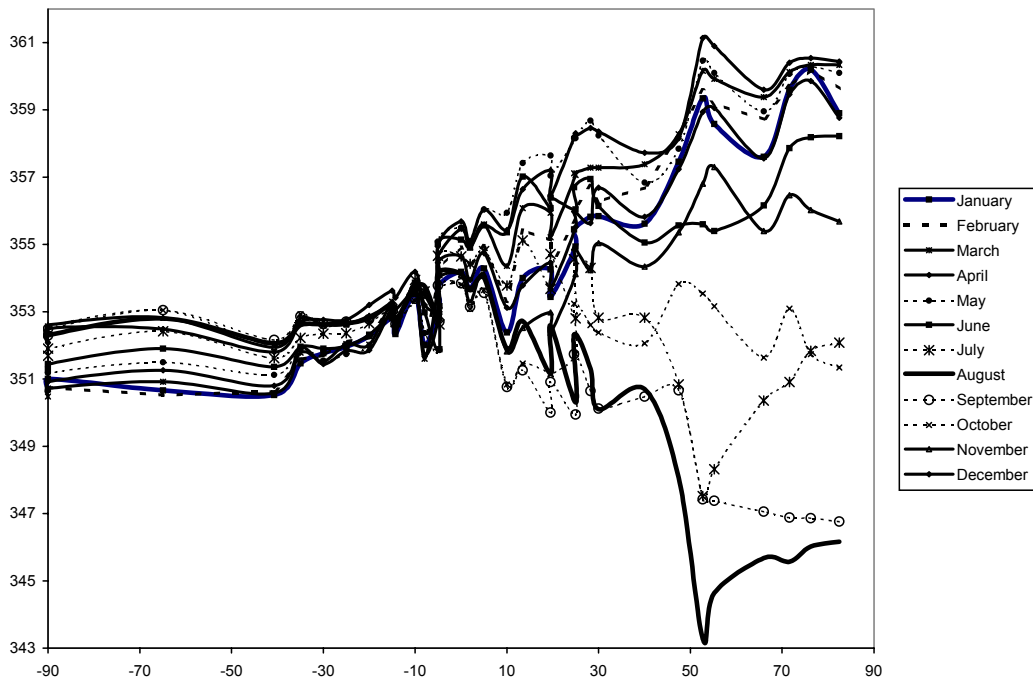


Figura 1. Distribución promedio del CO₂ (en ppm) para el período 1988-1992 en función de la latitud y el mes. Hemisferio Sur (-); Hemisferio Norte (+).

definido. En el Polo Norte se encuentran en promedio las mayores concentraciones. En el Polo Sur en promedio se encuentran las menores concentraciones. Como se puede observar en la Figura 1. [3], en función de los meses del año, se da una alta variación en los valores de la concentración. Al tomarse el promedio de la concentración para un rango de 5 años (1988-1992), se puede observar que el Hemisferio Norte muestra una alta variabilidad, mientras el Hemisferio Sur muestra un comportamiento casi monótono. Entre ambos extremos -en función de la latitud- se puede observar una región de transición entre ambos regimenes de comportamiento. Esta zona puede ser localizada entre -40 (latitud sur) y +5 (latitud norte). Mientras los valores en el Hemisferio Norte llegan a disminuir hasta por debajo de los del Hemisferio Sur a nivel mensual (mínimos: agosto, setiembre, octubre), los valores máximos se dan entre noviembre y junio. El mes de julio describe un comportamiento propio a lo largo de todas las latitudes. Al considerarse el comportamiento de la concentración en función del ciclo anual de irradiación (Figura 2. [4]), en forma similar se puede notar que existe una alta correlación entre las estaciones del Hemisferio Norte hasta 10 latitud Norte, una región de transición, y una región cuya correlación es inferior al 70% la cual corresponde al Hemisferio Sur.

El desfase que existe entre ambos hemisferios para describir una homogenización del CO₂ a nivel global, es entre tres y cuatro años. Durante este intervalo de tiempo, el

Hemisferio Sur alcanza los valores en concentración que se dieron en años anteriores en el Hemisferio Norte.

En el presente trabajo se analiza mediante métodos de análisis estadístico multivariado la concentración de CO₂ en 35 estaciones de observación, de distintos lugares del mundo, a lo largo de 5 años (de 1988 a 1992). La información es recogida mes a mes, por lo que se tienen 60 medidas para cada estación. Los datos fueron suministrados por Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge (Tennessee, U.S.A). A los datos originales les llamaremos datos sin filtrado, para distinguirlos de los datos filtrados que se producen después de un proceso de filtrado que se explica más adelante. En las series no se presentan datos faltantes.

2. Resultados

2.1 Análisis en Componentes Principales de los datos sin filtrado

El Análisis en Componentes Principales (ACP) tiene como objetivo realizar una proyección en pocas dimensiones de la tabla de datos 60 × 35 que se analiza, con el fin de ver mejor las principales asociaciones entre estaciones, entre los distintos instantes, así como estudiar las principales relaciones que pueden existir entre las estaciones y las épocas de medición.

Los dos primeros ejes del ACP con los datos sin

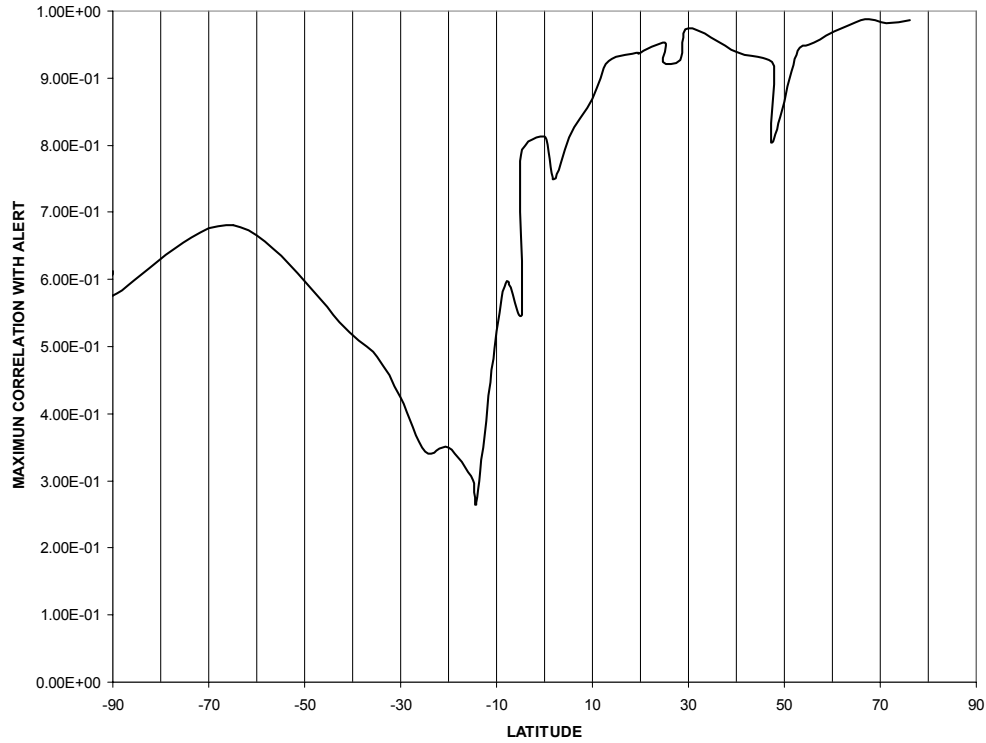


Figura 2. Correlación (%) para las concentraciones del CO₂ entre todas las estaciones consideradas, expresadas en función de la latitud. La estación de Alert Station (latitud: 82.27°N) es considerada como referencia. Hemisferio Sur (-); Hemisferio Norte (+).

filtrado contienen el 89% de la varianza total de los datos. En la figura 3 se muestra la posición de los instantes en el plano principal que generan las dos primeras componentes

principales. El primer cuadrante agrupa los datos de los años 88 y 89, y se opone por el origen al tercer cuadrante que agrupa principalmente a los datos de los años 92 y 91.

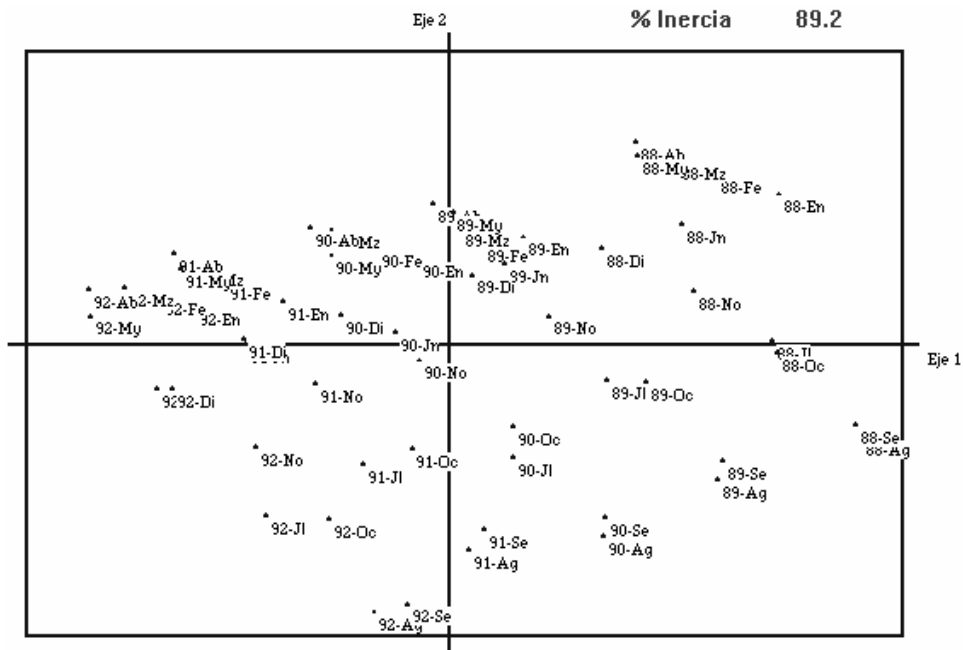


Figura 3. Plano principal generado por las dos primeras componentes principales del ACP de los datos sin filtrado.

Los

datos del año 90 son intermedios. El segundo cuadrante y el cuarto contienen una componente ficticia que opone los meses de valores altos (en el segundo cuadrante: febrero, marzo, abril, mayo) a los meses de valores bajos (en el cuarto cuadrante: agosto, setiembre, octubre).

La figura 4 muestra el círculo de correlaciones generado por las dos primeras componentes principales del ACP. Las coordenadas de los puntos son las correlaciones con las componentes principales, por lo que el gráfico muestra aproximadamente las correlaciones entre todas las estaciones de observación en el mismo tiempo. Se debe tomar en cuenta que cada punto genera un vector desde el origen hasta él, de modo que la correlación entre dos estaciones se interpreta como el coseno del ángulo que hay entre los dos vectores correspondientes [5,13]. Esta figura muestra un

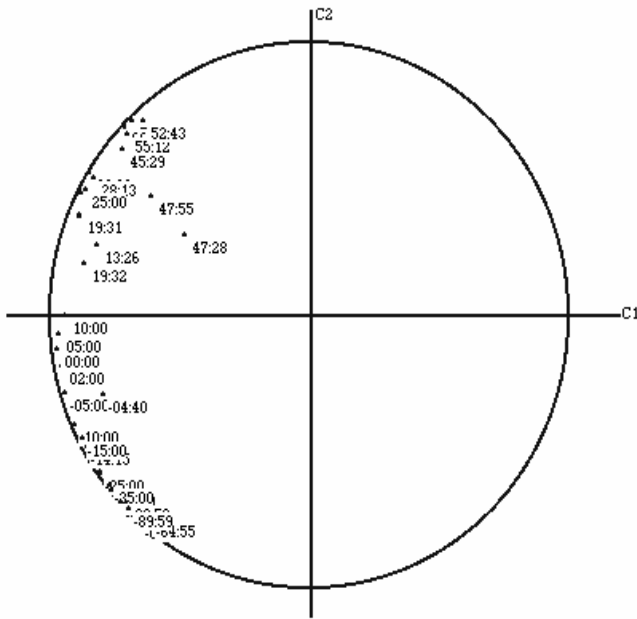


Figura 4. Círculo de correlaciones generado por las dos primeras componentes principales del ACP de los datos sin filtrado.

claro efecto de talla: la primera componente principal está fuertemente correlacionada con las estaciones que tienen mayor concentración de CO₂. De hecho, todas las estaciones tienen el mismo signo de correlación con la primera componente principal, mientras que es la segunda componente la que hace la diferencia entre las estaciones ubicadas en el hemisferio norte y en el hemisferio sur, con una zona intermedia que corresponde a las estaciones más

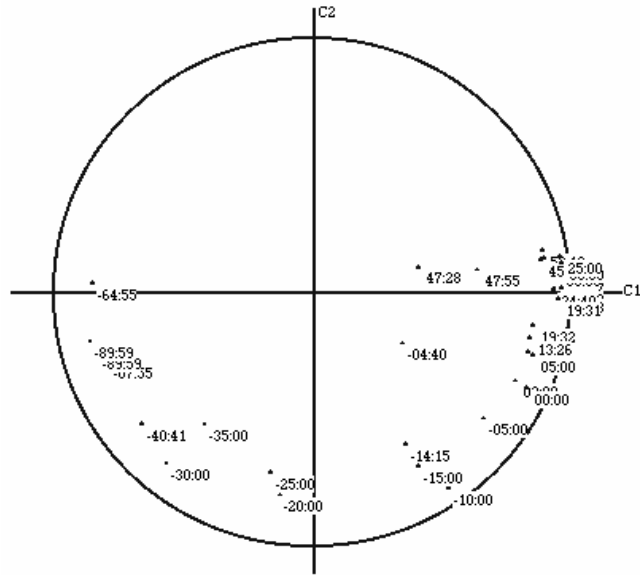


Figura 5. Círculo de correlaciones generado por las dos primeras componentes principales del ACP de los datos filtrados.

cercanas al Ecuador. De este comportamiento general, únicamente escapan las estaciones 47.28 y 47.55, y más ligeramente -04.40.

Aún si no mostramos la figura que contiene a la tercera componente principal, ésta muestra claramente la oposición que existe entre ciertos meses (abril, mayo, junio por un lado, y setiembre, octubre, noviembre, por el otro), para todos los años. Sin embargo, también esta tercera componente revela el comportamiento diferente que poseen las estaciones 47.55 y 47.28, quienes tienen tendencia a presentar mayores concentraciones de CO₂ en los meses de setiembre a noviembre que el resto de las estaciones.

En vista de que este primer ACP mostró que en gran parte la varianza es explicada por el transcurso de los años, lo cual es lógico simplemente porque la concentración en general crece conforme pasa el tiempo, se decidió filtrar los datos realizando una regresión lineal simple para cada estación y restar a los datos crudos la estimación con esa regresión; este procedimiento tiene como fin eliminar la tendencia creciente que presentan todos los datos a través del tiempo. Al resultado de este procedimiento le llamaremos datos filtrados.

2.2 Análisis en Componentes Principales con filtrado

Componente	Valor propio	Varianza explicada	Varianza acumulada
1	21.1	60%	60%
2	4.5	13%	73%
3	3.7	11%	84%
4	1.3	4%	88%

Tabla 1. Valores propios y varianza explicada para el ACP de los datos filtrados

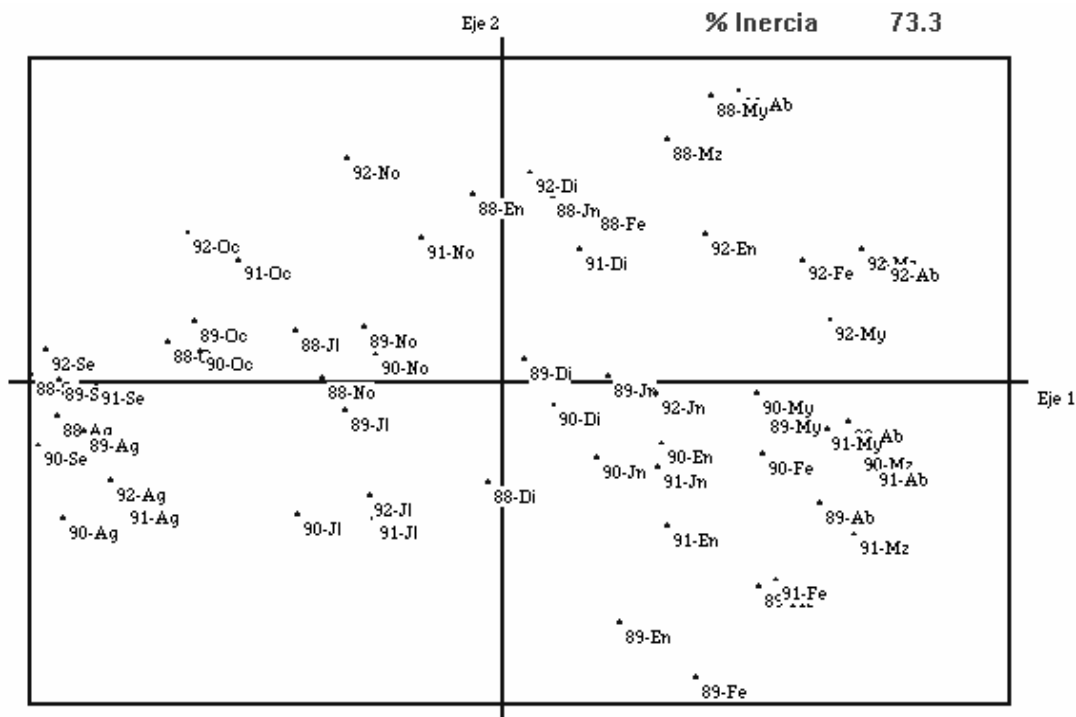


Figura 6. Plano principal generado por las dos primeras componentes principales del ACP de los datos filtrados.

Con los datos filtrados se efectuó entonces un segundo ACP. La varianza explicada por las primeras componentes principales se muestra en la tabla 1. Puede verse que, una vez eliminada la tendencia al filtrar los datos, la varianza explicada por las dos primeras componentes principales se reduce de 89% a 73%. Esto se debe a que en los datos sin filtrar la tendencia temporal absorbe demasiada varianza, mientras que en los datos sin filtrar la varianza es explicada por otros fenómenos: diferente comportamiento de los hemisferios y las diferencias entre los meses, como hacemos notar más adelante.

polo sur.

Por otra parte, la figura 6 muestra el plano principal generado por las dos primeras componentes principales. Este plano también muestra un claro comportamiento diferente entre los meses: por un lado, a la izquierda, se encuentran los meses de agosto a noviembre de todos los años, mientras que a la derecha se encuentran los meses de febrero a mayo. Los meses de julio, diciembre, enero y febrero son más bien intermedios, al igual que Nov. 91 y Nov. 92. La segunda componente principal muestra un comportamiento ligeramente diferente de May.88 y Ab.88,

Clase	Subclase	Estaciones	% Varianza interna
Norte	Norte-1a	47.28 47.55	4.29
	Norte-1b	82.27 66.00 76.14 71.19 55.12 52.43	2.17
	Norte-2	45.29 40.03 30.00 25.00 28.23 19.31 24.40 19.32 10.00 13.26	4.99
Ecuador + Sur	Ecuador	05.00 02.00 00.00 -05.00 -04.40 -10.00 -15.00 -14.15	1.11
	Sur	-07.55 -64.55 -89.59 -20.00 -25.00 -30.00 -35.00 -40.41	0.40

Tabla 2. Clasificación de las estaciones de observación, usando el método de Ward.

En la figura 5 se muestra el círculo de correlaciones generado por las dos primeras componentes principales. La primera componente principal hace una clara oposición entre el hemisferio norte (junto con algunos puntos ecuatoriales) al lado derecho del círculo de correlaciones, y el hemisferio sur, al lado izquierdo. Es curiosa la posición de -07.55, que es casi ecuatorial, pero que aparece junto al

por un lado, y Ene.89 y Feb.89, por el otro lado y de forma opuesta.

Las posiciones relativas de los puntos en el círculo de correlaciones (Figura 5 y el plano principal (Figura 6) anteriores, muestran que en el hemisferio norte hay una fuerte concentración de CO₂ en los meses del final del invierno e inicio de la primavera boreal, mientras que esta

TOPICOS METEOROLOGICOS Y OCEANOGRAFICOS

Clase	Sub clase	Grupo	Instantes (mes y entre paréntesis el año)	% Varianza interna
Oct-Jun	Oct-Nov	Nov	Nov(88,89,90,91,92), Ene(88)	0.46
		Oct	Oct(88,89,90,91,92)	0.32
	May-Jun	May	May(88,89,90,92)	0.27
		Jun	Jun(88,89,90,91,92)	0.42
	Dic-Abr	Dic	Dic(88,89,90,91,92)	1.00
		Ene-Feb	Ene(89,90,91,92) Feb(88,89,91) Mar(88)	1.11
Mar-Abr		Mar(89,90,91,92) Abr(88,89,90,91,92) May(91)	1.27	
Jul-Set	Jul	Jul(88,89,90,91,92)	0.41	
	Ago-Set	Ago	Ago(88,89,90,91,92)	0.45
	Set	Set(88,89,90,91,92)	0.41	

Tabla 3. Clasificación de los instantes de observación, usando el método de Ward.

fuerte concentración se da en el hemisferio sur en las respectivas estaciones australes. El comportamiento particular de los meses de May.88, Abr.88, Ene.89 y Feb.89, se debe a una concentración anormalmente alta en enero y febrero de 1989 en las estaciones -10.00, -14.15 y -15.00, y más bien baja en los meses de abril y mayo de 1988 en esas estaciones.

La tercera componente principal, no graficada aquí, muestra de nuevo el comportamiento particular de las estaciones 47.28 y 47.55, las cuales se distinguen de todo el resto de estaciones. Estas estaciones parecen tener un comportamiento singular en los meses de enero y febrero, durante los años 89, 90 y 91. El comportamiento ligeramente diferente de la estación -04.40 aparece de nuevo (esta estación tiende a parecerse a 47.28 y 47.55, más que el resto de las estaciones).

2.3 Clasificación

Con el fin de confirmar los resultados obtenidos en el ACP, se procedió a realizar una clasificación de las estaciones, por un lado, y de los instantes de observación, por el otro. Se usó el método de clasificación jerárquica ascendente de Ward [1,5] usando la distancia Euclídea clásica, que está disponible en la mayoría de los paquetes estadísticos. Los resultados reportados fueron obtenidos con el paquete PIMAD 3.0 desarrollado en la Universidad de Costa Rica [10].

2.3.1 Clasificación de las estaciones

La clasificación de las estaciones de observación, de acuerdo con las concentraciones filtradas de CO₂ usando el método de Ward y la distancia euclídea clásica, se muestra en la tabla 2. Se forman dos grandes clases, que etiquetamos Norte y Ecuador+Sur. La clase Norte tiene a su vez dos subclases: la subclase Norte-1 y la subclase Norte-2. La subclase Norte-1 tiene una clara separación entre las estaciones 47.28 y 47.55 (subclase Norte-1a) y el resto de las estaciones (subclase Norte-1b), mientras que la subclase

Norte-2 es bastante homogénea. La clase Sur+Ecuador, se separa claramente en las subclases Ecuador y la clase Sur, las cuales son muy homogéneas. Puede notarse la ubicación de -7.55, la cual tiene un comportamiento más cercano a la subclase "Sur" que a la subclase "Ecuador"; si se la trata de clasificar en esta última la varianza total empeora en 0.40%.

2.3.2 Clasificación de los instantes

Aplicando de nuevo el método de Ward sobre las distancias euclídeas entre los instantes (en unidades de meses), se obtiene un árbol de clasificación que muestra una gran coherencia con los resultados obtenidos hasta el momento. La tabla 3 muestra estos resultados, que se pueden resumir en que todos los meses, independientemente del año, tienen el mismo comportamiento. Hemos indicado, al interior de cada subclase, los grupos que se forman y que corresponden, *grosso modo*, a cada mes, proponiendo entonces como etiqueta del grupo el nombre del mes mayoritario en el grupo. Las únicas excepciones son Ene.88, que se comporta como los meses de noviembre; May.91, que se comporta como los meses de marzo-abril; y Mar.88, que se comporta como los meses de enero-febrero. Además, puede decirse que los meses de marzo y abril son prácticamente indistinguibles, lo mismo que los meses de diciembre-enero-febrero, por un lado, y mayo-junio, por el otro. Es de destacar que en todas las agrupaciones de clases, cuando se sube en el árbol de clasificación, se puede apreciar la continuidad en el tiempo.

3. Conclusiones

La de carbonización de la atmósfera en las regiones polares se puede ver como un proceso natural asociado al ciclo anual.

Pero debido al sistema de circulación de la atmósfera de nuestro planeta, constituido por la celda de Hadley, se debe esperar una alta correlación en las concentraciones de CO₂ únicamente entre las estaciones del Hemisferio norte o entre las estaciones del hemisferio sur. Es por ello que la

aparición de la anisotropía en la distribución del CO₂ se puede explicar como respuesta al incremento en la concentración de CO₂, sin embargo es de hacer notar la gran importancia que como sumideros tienen la biosfera y la hidrósfera.

Agradecimientos

Se agradece a Walter Fernández y a G. Omar Lizano por las discusiones. Los autores desean expresar su agradecimiento al Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge (Tennessee, U.S.A) por la cortesía de facilitar los datos sobre las concentraciones del CO₂. Este trabajo fue apoyado por la Vicerectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica, y por la Escuelas de Física y de Matemática, a través de los Proyectos 112-97-297 y 821-97-332, respectivamente.

RESUMEN

Se analiza la distribución latitudinal de la concentración del CO₂ en la Tierra tomando en cuenta la relación norte-sur. Se estudian, por medio de un análisis en componentes principales y de clasificación jerárquica, los factores que pueden afectar las variaciones temporales de dicha concentración.

Referencias

Anderberg, M. R. (1973) *Cluster Analysis for Applications*. Academic Press, New York.
 Banichevich, A. (1999) *El Ozono: una Trilogía de la Biodinámica*. En prensa, Editorial Tecnológica, San José, Costa Rica.

Boden, T.A.; Kaiser, D.P.; Sepanski, R.J. and Stoss, F.W. (Eds.) (1994) In: *TREND '93: A Compendium of Data on Global Change*, Carbon Dioxide Information Analysis Center, World Data Center, Publication No. ORNL/CDIAC-65, ESD Publication No. 4195, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A.
 Bonatti, J. y Banichevich, A. (1999) "Planetary anisotropy associated to CO₂". En publicación.
 Diday, E.; Lemaire, J.; Pouget, J. et Testu, F. (1982) *Eléments d'Analyse des Données*. Dunod, Paris.
 Hasse, L. and Dobson, F. (1986) In: *Introductory Physics of the Atmosphere and Ocean*, 1st Edition. Reidel Publishing Company, Dordrecht, The Netherlands.
 Holton, J.R. (1979) *Introduction to Dynamic Meteorology*, 2nd Edition. Academic Press, San Diego, p.5.
 McLellan, H.J. (1985) *Elements of Physical Oceanography*. Pergamon Press, Oxford/New York.
 Odum, E.P. (1989) *Ecology and Our Endangered Life-Support Systems*. Editorial Sinauer Associates Inc., Sunderland, U.S.A.
 Rodríguez, O. (1997) "PIMAD 2.1: Guía al Usuario", In: W. Castillo & J. Trejos (Eds.) X Simposio Internacional de Métodos Matemáticos Aplicados a las Ciencias, UCR-ITCR, Liberia, pp. 222-231.
 Ross, D.A. (1977) *Introduction to Oceanography*. Prentice-Hall Inc., New Jersey.
 Sagan, C.; Toon, O.B. and Pollack, J.B. (1979) "Anthropogenic albedo changes and the earth's climate", *Science* **206**: 1363.
 Trejos, J. (1997) *Principios de Análisis de Datos*. Notas de Curso, Universidad de Costa Rica.

Eventos extremos meteorológicos en Linda Vista, Valle del Guarco, Cartago

ING. JOSÉ ALBERTO RETANA¹

ING. ROBERTO VILLALOBOS

Gestión de Desarrollo, Instituto Meteorológico Nacional
San José, Costa Rica

(Recibido 14 de marzo 2002, aceptado 28 de mayo de 2002)

ABSTRACT

This is about an annual and monthly rain statistical study from Linda Vista, Cartago, Costa Rica. The objective was to analyse the climatic variability influence over the rainfall of this zone. The quintil statistic unit was used in order to get climatic scenarios: dry, normal, rainy, extreme dry years and extreme rainy years. The dry one takes place with fewer than 1270 mm per year (10% below the average). In this case, 63% can be explained with El Niño event. The driest months are since June until October. The rainy years group take place with more than 1530 mm per year (8% over the average). 30% of this scenario can be explained by La Niña phenomena. The rainiest months are since June until November. The extreme dry event is given with 1170 mm per year (17% below the average). 75% of those events can be explained by El Niño. In such cases, the driest month are from September to November. The extreme rainy event is given with 1670 mm per year. 40% of those cases are according with La Niña events. The rainiest month are from August until October.

Introducción

La variabilidad climática se refiere a las variaciones en el estado medio del clima, en escalas espaciales y temporales, más allá de eventos individuales. Puede deberse a procesos naturales o a fuerzas externas antropogénicas (IPCC 2001). El evento natural mejor conocido que constituye la mayor fuerza de variabilidad climática en el planeta es El Niño-Oscilación Sur (ENOS). Este es un fenómeno océano-atmosférico que ha provocado en muchos países extremos meteorológicos cuyos principales efectos son sequías o inundaciones.

ENOS puede presentar dos fases bien definidas. La primera se conoce popularmente como El Niño o fase cálida, que normalmente está asociada a períodos secos prolongados, sobre todo en la vertiente del Pacífico centroamericano y precipitación por encima de lo normal (promedio) en el litoral caribeño. La segunda es La Niña o fase fría, que se asocia a precipitaciones estacionales sobre

el promedio, en la vertiente pacífica y condiciones de normales a secas en el Caribe de Centroamérica.

La mayoría de las veces que ENOS ha afectado a Costa Rica, ha estado asociado con modificaciones en los patrones de viento (Vega y Stolz 1997, Fernández y Ramírez 1991, Ramírez 1990). Esto produce variaciones sensibles en el régimen pluviométrico y la temperatura ambiental principalmente. Muchas veces, estas alteraciones han desencadenado sequías importantes, sobre todo en Guanacaste y el Pacífico Central. En algunas ocasiones, las sequías se han extendido también a los valles y planicies: El Valle Central, el Valle de El General y las llanuras de San Carlos, cercanas al Lago de Nicaragua. Las modificaciones climáticas que se atribuyen a La Niña, producen intensas lluvias que han provocado inundaciones tanto en el Caribe como en el Pacífico.

El ENOS, es un indicador importante que puede explicar algunos de los eventos extremos meteorológicos que han impactado nuestro país. Sin embargo, existe un porcentaje no despreciable de eventos extremos que tienen

Corresponding author address: José Retana, Instituto Meteorológico Nacional, apartado 7-3350-1000, San José, Costa Rica,
Email: jretana@imn.ac.cr

su explicación en otros fenómenos de variabilidad. El objetivo de este trabajo es analizar la variabilidad climática y los eventos extremos de un punto del Valle del Guarco, en Cartago, que puede ser representativo de la zona.

Metodología

De la base de datos del Instituto Meteorológico Nacional, se analizaron los datos mensuales de precipitación de la estación meteorológica Linda Vista, del Valle del Guarco en Cartago. Esta estación presenta un registro de información confiable que va desde 1952 hasta el 2003. La extensión del registro y su calidad permite fundamentar estadísticamente los resultados obtenidos. Utilizando el método de escenarios climáticos propuesto por Villalobos y Retana (2001), se construyeron tres escenarios: seco, normal y lluvioso. Para analizar los eventos extremos se utilizó el estadístico quintil. De esta manera se separaron aquellos años cuyo total de precipitación anual (TPA) correspondiera con registros evidentemente extremos.

Los escenarios seco y lluvioso, así como los años

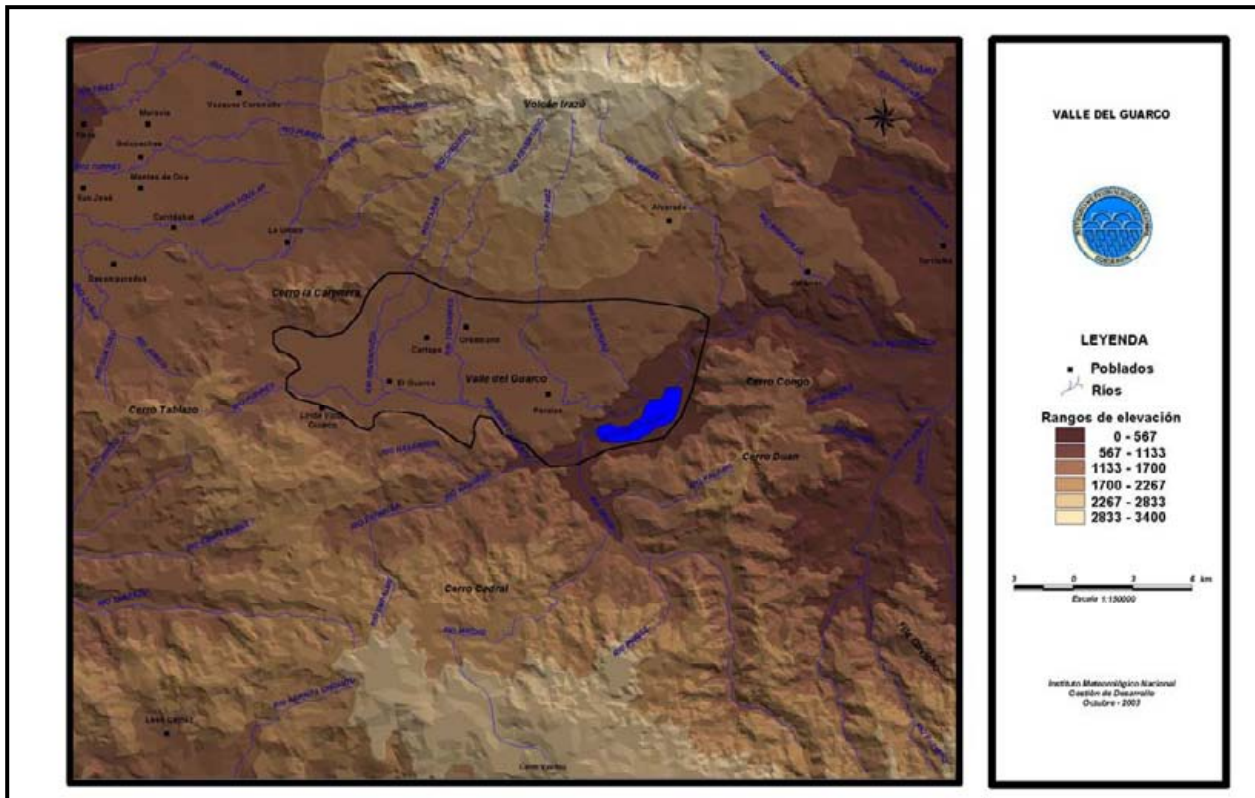
extremos.

Resultados

Ubicación del Valle del Guarco

El Valle del Guarco limita al norte con las estribaciones del Volcán Irazú, al este con los cerros Duan y Congo, al sur con las estribaciones de la Cordillera de Talamanca (Cerro Vueltas y Alto Cedral) donde nacen los ríos Grande de Orosí (río Macho, Purisil, Tapantí y Palomo, con sus respectivos afluentes) y el río Navarro. Al oeste limita con el Cerro Tablazo y al noroeste con el Collado de Ochomogo (Cerro de la Carpintera). El principal sistema de drenaje del valle lo constituye el río Reventazón que nace en el Cerro Cuericí, en las estribaciones del noreste de la cordillera de Talamanca.

Por la fertilidad de sus suelos volcánicos y aluviales, el Valle del Guarco es el asentamiento de importantes centros de población que tienen en la agricultura y ganadería sus principales fuentes económicas. En el mapa 1 se presenta la ubicación y característica orográfica del Valle del Guarco.



Mapa 1. El Valle del Guarco. Cartago

extremos, se analizaron según la presencia o no de alguna de las fases de ENOS. Se estimó la probabilidad de ocurrencia de escenarios y la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos durante El Niño y La Niña. Además se estimaron las anomalías en la precipitación mensual durante eventos

Clima

El Valle del Guarco se ubica en el extremo oriental de la Región Central de Costa Rica, lo que le permite disfrutar

de un clima particular, afectado por la influencia Caribe y Pacífica a la vez. De acuerdo con Coen (1967), el clima de esta región es propio de meseta, ya que combina el tipo de clima de las faldas del Caribe con el clima de las faldas del

presenta el primer máximo de lluvia, para luego ir descendiendo desde julio hasta agosto en un período de disminución de precipitación conocido como el veranillo. El veranillo es una característica estacional de los regímenes

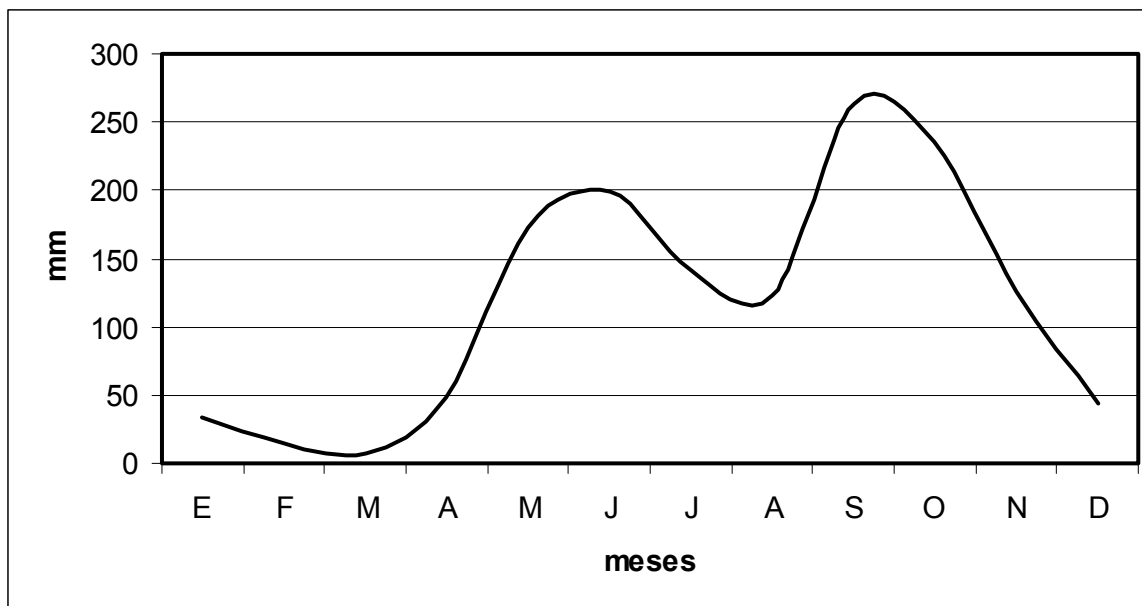


Gráfico 1. Precipitación mensual en Linda Vista. El Valle del Guarco. Cartago

Pacífico. Se caracteriza por lluvias moderadas y temperaturas frescas. Solano y Villalobos (2001) lo clasifican como un clima Valle Central 2 (VC2) con precipitaciones cercanas a los 2000 mm por año, con 128 días con lluvia y un solo mes seco. La temperatura máxima promedio es de 26 grados centígrados y la mínima promedio de 15 grados. El bosque asociado es el Húmedo Subtropical.

Con relación al tipo y cantidad de precipitación, presenta una influencia marcadamente Caribeña. Los vientos alisios del noreste son los principales responsables de llevar humedad al Valle. Esto permite niveles pluviométricos altos capaces de sostener una vegetación y paisaje siempre verde, aún dentro del período más seco. Sin embargo, los vientos del oeste del Pacífico influyen mucho en la estacionalidad de las lluvias, presentando períodos característicos de la vertiente pacífica: seco, lluvioso, transiciones y veranillo.

Para analizar los efectos de la variabilidad climática y los eventos extremos, se utilizó la información de la estación meteorológica Linda Vista (latitud 09 50, longitud 83 58) ubicada en el extremo oeste del Valle del Guarco a 1400 msnm. En el gráfico 1 se presenta el comportamiento de la precipitación mensual para lo que se considera un año normal.

De acuerdo con el gráfico 1, existe un período seco que va de enero a marzo, siendo marzo el mes más seco. Abril es considerado un mes de transición. Entre mayo y junio se

de lluvia de influencia Pacífico. Setiembre y octubre son los meses más lluviosos, donde se evidencia el mayor impacto de disturbios tropicales generados en el Caribe, aunque en la serie de datos meteorológicos el mes de setiembre es el más lluvioso. En noviembre pueden presentarse lluvias importantes y diciembre es un mes de transición.

Este comportamiento bimodal, puede ser alterado por diferentes fuerzas de variabilidad que generalmente son estacionales, o sea, se presentan con mayor incidencia en el período seco o en el período lluvioso del año. Estas fuerzas pueden llegar a crear situaciones deficitarias o de exceso. Entre estas fuerzas se encuentran los huracanes y disturbios tropicales del Atlántico, el movimiento de sistemas de presiones atmosféricas, domos térmicos oceánicos, entre otros. Otras fuerzas de variabilidad, que son periódicas pero sin un ciclo definido, son los fenómenos complejos de acople entre la dinámica oceánica y la atmosférica. El fenómeno ENOS es la fuerza de variabilidad interanual más estudiada y conocida.

En el gráfico 2 se presenta la serie de tiempo desde 1952 hasta el 2002, de las anomalías de la precipitación anual. La anomalía es considerada como el valor anual menos el valor promedio, expresada en milímetros de lluvia. Fuerzas de variabilidad pueden forzar a que precipite más o menos lluvia de lo que se está esperando.

Se puede observar en el gráfico 2 que las anomalías positivas presentan una mayor magnitud que las negativas. En la década de los sesentas, dominan las anomalías

positivas (excesos), mientras que en las décadas de los setentas, ochentas y principios de los noventas, dominan los déficits o anomalías negativas. A partir de 1995, vuelven a

presentar entre junio y octubre, siendo julio y agosto los meses más afectados.

De acuerdo con los análisis, un año seco tiene una alta

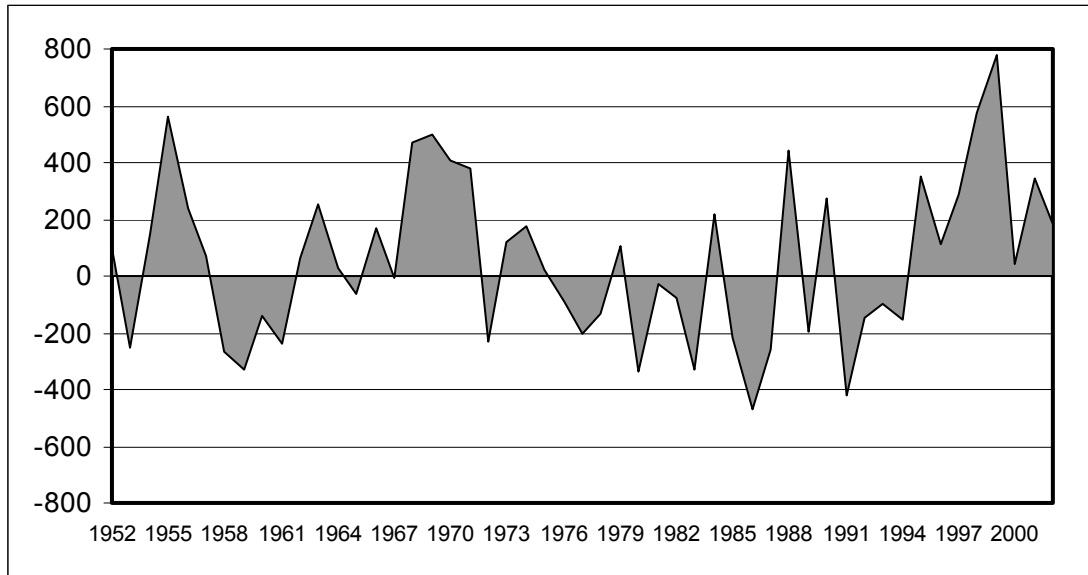


Gráfico 2. Anomalía (mm) de la precipitación anual de Linda Vista, El Guarco.

presentarse con mayor magnitud, las anomalías positivas.

Variabilidad climática, ENOS y escenarios

Las anomalías pueden estar relacionadas con fuerzas de variabilidad. Para entender mejor estas variaciones y sus magnitudes, se analizó el TPA para calcular tres escenarios climáticos que abarcan toda la amplitud de la variación de la

probabilidad de ser año Niño (48%), sin embargo no todo Niño provoca escenarios secos. Un año Niño tiene una probabilidad del 24% de ser normal y 28% de ser incluso lluvioso. En resumen, la aparición del fenómeno tiene mayor probabilidad de generar escenarios secos y menor de generar normales o lluviosos.

Los escenarios lluviosos se presentan a partir de un exceso de precipitación del 8% con respecto al promedio

Escenarios	Rangos (mm)	Promedio anual (mm)
Seco	Menos de 1270	1150
Normal	1270 – 1530	1413
Lluvioso	Más de 1530	1693

Tabla 1. Rango de TPA(mm) estimados para tres escenarios climáticos. Linda Vista.

lluvia anual. En la tabla 1 se presentan los rangos estimados para cada escenario.

Los escenarios secos se dan a partir de un déficit de un 10% con relación al promedio del escenario normal. Esta disminución es de aproximadamente 143 milímetros que normalmente se distribuyen en el período lluvioso (junio a noviembre). En Linda Vista, se han dado 16 años secos. De estos, 10 han coincidido con la presencia de El Niño. Por lo tanto, el 63 % de los años secos podrían tener su explicación en la fase cálida de ENOS. El resto de años secos, tiene otra explicación meteorológica. Durante un Niño de características secas, las mayores deficiencias de lluvia se

anual del escenario normal. Esto representa alrededor de 117 mm más de lluvia. Este exceso es frecuente durante la época lluviosa (junio a noviembre). De 23 casos lluviosos en Linda Vista, 7 han sido Niña, o fase fría de ENOS. Esto indica que el 30% de los casos lluviosos pueden encontrar explicación en este fenómeno. Una Niña tiene un 78% de posibilidades de ser lluvioso y un 22% de ser normal. De acuerdo con los registros, la fase fría de ENOS no ha concordado con escenarios secos en Linda Vista.

En el gráfico 3 se presenta la anomalía promedio, en milímetros de lluvia, que se podría experimentar si un evento El Niño condujera a un escenario seco (a) y si un

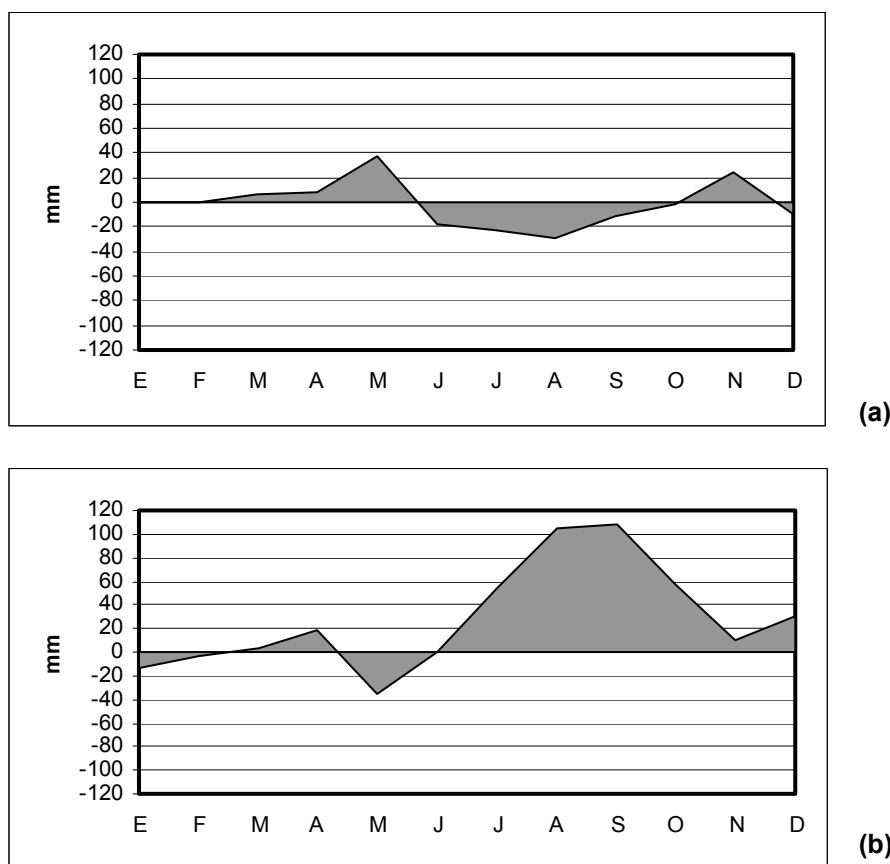


Gráfico 3. Anomalía (mm) de la precipitación durante El Niño en escenario seco (a) y La Niña en escenario lluvioso (b). Linda Vista, El Guarco.

evento La Niña condujera a un escenario lluvioso (b).

La anomalía mayor (positiva o negativa) se experimenta durante fases frías de ENOS. Por ser un clima de influencia Caribeña, la condición lluviosa se ve más favorecida. Por otra parte, cinco de nueve eventos La Niña han sido precedidos de eventos El Niño. Durante La Niña se pueden tener variaciones de hasta 440 mm anuales, principalmente entre junio y diciembre. Agosto y setiembre son los meses de mayor variación. En el caso de El Niño, los meses de mayor variación son los correspondientes al veranillo, julio y agosto.

En el gráfico 4 se presenta la frecuencia de los escenarios con relación al TPA. Se puede observar que el mayor número de casos corresponde al escenario lluvioso. Los escenarios seco y normal presentan prácticamente el mismo número de casos. Por lo tanto, esta zona tiene una mayor tendencia hacia años lluviosos que hacia años secos o normales.

Muy probablemente la influencia del Caribe, es la fuerza que provoca esta tendencia ya que el Caribe es más lluvioso que el Pacífico. Con respecto a la probable distribución mensual de los tres escenarios, se puede

observar en el gráfico 5, sus comportamientos promedio.

Existe un patrón estacional bien definido para los tres escenarios. Sin embargo se observa un desplazamiento del veranillo y el máximo de lluvia en el escenario normal con relación al escenario seco y lluvioso. Mientras que el escenario normal presenta el veranillo en el mes de agosto, en el escenario seco y lluvioso se presenta en julio. En ese mismo sentido, el escenario normal presenta el máximo de lluvia en setiembre, mientras que los escenarios extremos lo

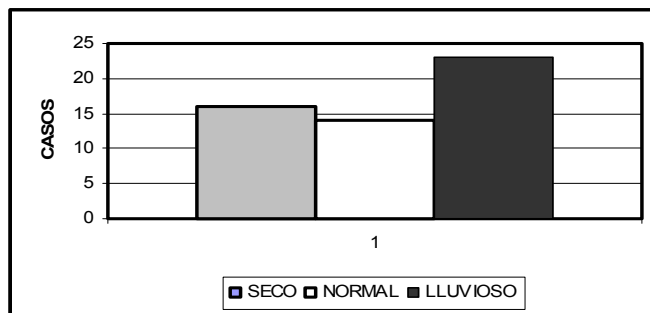


Gráfico 4. Frecuencia de escenarios de acuerdo con el total de precipitación anual. Linda Vista.

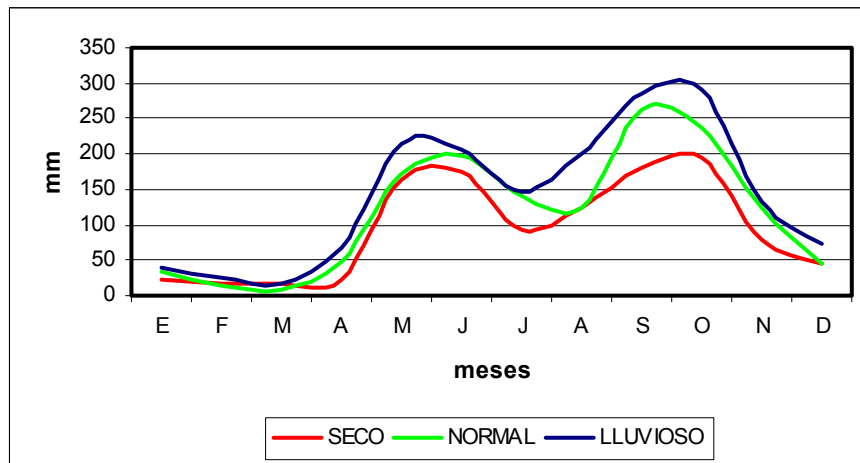


Gráfico 5. Precipitación mensual promedio para tres escenarios climáticos. Linda Vista.

presentan en octubre. Cualquier diferencia entre los límites seco y lluvioso se debe considerar lluvia normal.

Eventos Extremos y ENOS.

Los eventos extremos secos, se presentan cuando la precipitación anual disminuye un 17% con relación al promedio del escenario normal. Esto representa 235 mm menos. De 8 años considerados extremadamente secos, 6 han sido Niño. En otras palabras, el 75% de los eventos extremos secos tienen su explicación en la presencia de El Niño. Los años más secos fueron 1986 (con solo 946 mm) y 1991 (989 mm), ambos años fueron Niño. En el gráfico 6 se presentan las anomalías promedio mensual que se pueden presentar durante años secos extremos.

El evento extremo lluvioso, se presenta cuando existe un exceso de precipitación anual del 18%, alrededor de unos 253 mm sobre el promedio. En Linda Vista, se han producido 15 años extremos lluviosos. De estos, solo 6 han sido Niña (40%). La fase fría de ENOS no explica mucho de la variabilidad extrema lluviosa de la zona. El año más lluvioso fue 1999 (año Niña) con 2189 mm y el 2002 (año Niño) con 1592 mm. Del total de eventos extremos lluviosos, el 40% corresponde a eventos La Niña, el 33% a eventos El Niño y el 20% a otro tipo de fenómenos de variabilidad, como por ejemplo el que ocurrió del 2000 al 2001 y que causó una sequía prolongada en la mayor parte de la vertiente pacífica de Centroamérica. En el gráfico 7 se presenta la anomalía promedio mensual esperada durante años extremos lluviosos.

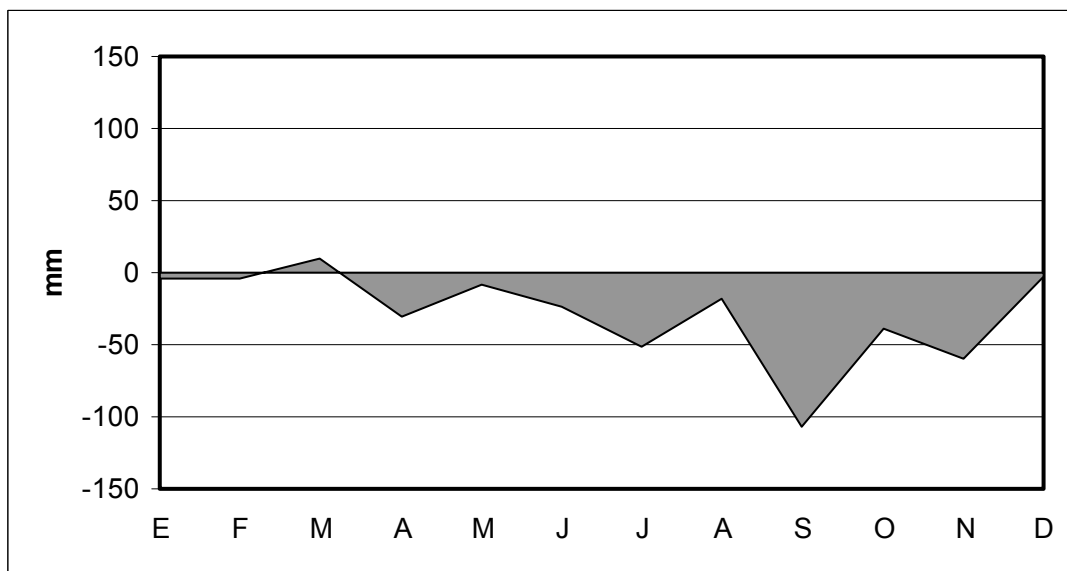


Gráfico 6. Anomalía promedio mensual (mm) durante eventos secos extremos. Linda Vista.

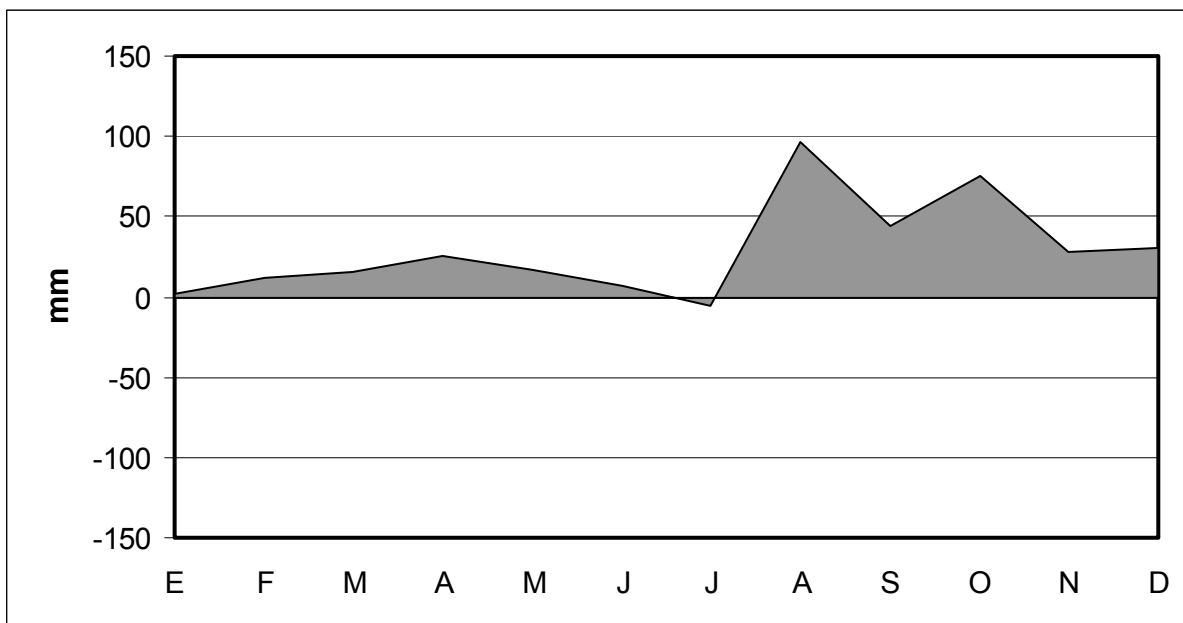


Gráfico 7. Anomalía mensual (mm) durante eventos lluviosos extremos. Linda Vista.

RESUMEN

Se realizó un estudio estadístico de la precipitación anual y mensual en la estación Linda Vista del Guarco, Cartago, para analizar la influencia de la variabilidad climática en la zona. Usando el estadístico quintil, se agrupó la precipitación anual en años secos, normales y lluviosos, años extremos secos y años extremos lluviosos. Los escenarios secos en Linda Vista se presentan con lluvias inferiores a 1270 mm por año (10% menos del promedio). El 63% de estos años puede ser explicado por la presencia del fenómeno El Niño. Las mayores deficiencias hídricas durante estos años se dan entre junio y octubre. Los escenarios lluviosos se presentan con precipitaciones superiores a los 1530 mm por año (8% más del promedio). El 30% de estos años puede ser explicado por la presencia de La Niña. Los mayores excesos hídricos se dan entre junio y noviembre. Los eventos extremos secos se presentan con lluvias menores de 1170 mm por año (17% menos del promedio). El 75% de estos eventos puede ser explicado por El Niño. Las mayores reducciones se dan entre setiembre y noviembre. Los eventos extremos lluviosos se presentan con lluvias mayores a 1670 mm por año (18% más sobre el promedio). El 40% de estos casos coincide con la presencia de La Niña. Los mayores excesos se presentan en los meses de agosto a octubre.

Conclusiones

El clima de Linda Vista tiene una influencia Caribeña que se manifiesta en los montos anuales de precipitación y en la tendencia hacia los escenarios lluviosos. Por otra parte, la influencia Pacífica se manifiesta en la estacionalidad característica, con períodos secos y lluviosos bien definidos a lo largo del año y un período de veranillo entre julio y agosto.

Los eventos El Niño tienen una mayor probabilidad de generar escenarios secos, antes que normales o lluviosos. Mientras tanto, la Niña tiene una mayor probabilidad de generar escenarios lluviosos, antes que normales. De acuerdo con los registros existentes no se han observado

eventos La Niña bajo un escenario seco.

Los eventos extremos secos, pueden ser explicados en mayor medida por la presencia de El Niño. Cuando estos se presentan, se pueden esperar disminuciones de la lluvia anual desde un 17% (235 mm) hasta un 33% (470 mm), principalmente entre julio y noviembre. Los eventos extremos lluviosos, no tienen una explicación clara en ENOS. Cualquiera de sus fases puede generar eventos extremos lluviosos, o incluso ocurrir sin la presencia de estas fases de ENOS. Un evento extremo lluvioso puede producir excesos de precipitación desde un 18% anual (253 mm) hasta un 55% (776 mm), distribuidos principalmente entre agosto a diciembre.

Bibliografía

- Fernández, W.; Ramírez, P. 1991. El Niño, la Oscilación del Sur y sus efectos en Costa Rica: Una revisión. Tecnología en Marcha. Vol 11(1):3-10.
- Coen, E. 1967. Algunos aspectos sobre climas de Costa Rica, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. Impacts, adaptation and vulnerability. A contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, USA. 1032p.

TOPICOS METEOROLOGICOS Y OCEANOGRAFICOS

- Ramírez, P. 1990. El fenómeno de El Niño Oscilación del Sur. Ministerio de Recursos Naturales Energía y Minas – Instituto Meteorológico Nacional. San José, Costa Rica. Boletín Meteorológico. Año XIV-1990. Abril. p3-5.
- Solano, J.; Villalobos, R. 2001. Aspectos fisiográficos aplicados a un bosquejo de regionalización geográfica climática de Costa Rica. Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos. 8(1):26-39.
- Vega, G.; Stolz, W. 1997. El fenómeno de El Niño su impacto en la economía de Costa Rica. Ministerio del Ambiente y Energía. Instituto Meteorológico Nacional. Oficina de Pronósticos. Nota técnica. San José, Costa Rica. 9p.
- Villalobos, R.; Retana, J. 2001. Un método para el pronóstico de lluvias en Costa Rica: agrupación de años con características pluviométricas semejantes para la creación de escenarios climáticos. Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos. 8(1):50-54.

