

ACTIVIDAD DE LOS CICLONES TROPICALES SOBRE VENEZUELA (1856-2006)*

Tropical storms activity in Venezuela (1856-2006)

Estatio J. Gutiérrez Q.

RESUMEN:

Un análisis basado en la distribución Poisson ha sido llevado a cabo, para determinar la probabilidad, de que un ciclón tropical incursione en territorio venezolano en una temporada de huracanes promedio. La probable afectación directa producida por este tipo de sistemas sobre la costa nacional es muy baja con magnitudes que alcanzan en los escenarios más adversos 4,9% de probabilidad, debido principalmente a la presencia de una intensa cizalladura vertical, producto de una corriente de chorro en el Caribe en niveles bajos. Los sistemas estudiados se caracterizaron por su formación en latitudes bajas, y presentan un máximo de actividad ciclónica en agosto, así como trayectorias rectilíneas en sentido oeste-noroeste. La costa occidental ha sido la zona más afectada del territorio nacional, comportamiento que tenderá a mantenerse en los próximos años.

PALABRAS CLAVE: Circulación atmosférica, atmósfera, zona costera, proceso aleatorio, comportamiento.

* Recibido: 24-09-2007. Aceptado: 31-10-2007.

ABSTRACT:

An analysis based on the Poisson distribution has been made to determine the probability that a tropical cyclones go into the Venezuelan territory in a mean hurricane season. The probable direct affectation produced by that kind of systems over the national coast is relatively low with magnitudes that reach in the worse scenery 4.9% of probability due mainly to the presence of an intense wind shear product of a low-level Caribbean jet stream. The systems were characterized by its formation in low latitudes, showing a maximum of cyclone activity in august, as well as streight trajectories in direction west-northwest. The occidental coast has been the more affected area in the national territory, tendency that will remain in the oncoming years.

KEY WORDS: Atmospheric circulation, atmosphere, coastal zones, random processes, behaviour.

INTRODUCCIÓN

Los ciclones tropicales son centros calientes de baja presión cuyos vientos asociados que giran de manera ciclónica adquieren velocidades superiores a los 34 nudos. Los ciclones tropicales son clasificados según su intensidad como depresiones tropicales (34 nudos), tormentas tropicales (35-64 nudos) y huracanes (>65 nudos). Los huracanes tienen una clasificación propia denominada escala Saffir-Simpson en donde existen cinco categorías según la velocidad del viento. Un huracán de categoría uno presenta vientos entre 65 y 82 nudos, la categoría dos está comprendida por velocidades entre 83 y 95 nudos, las categorías tres y cuatro por vientos entre 96-113 nudos y 114-134 nudos respectivamente, y finalmente el tope de la clasificación, la categoría

cinco con vientos superiores a los 135 nudos. Estos sistemas, que han registrado una mayor intensificación y longevidad en la cuenca del Atlántico en los últimos años (Klotzbach, 2006), junto con los altos niveles de vulnerabilidad presentes en distintos países son responsables de numerosas pérdidas humanas y materiales. Dicha tendencia está asociada a un calentamiento superficial del Atlántico Norte producto de la intensificación de la circulación termoalina del Atlántico (Klotzbach y Gray, 2006). El Caribe, Centroamérica, México y los Estados Unidos, se han visto mayormente afectados debido a que en las zonas marítimas cercanas, confluyen una serie de factores que favorecen la formación y desarrollo de los ciclones tropicales. Un aspecto importante que influye en su organización e intensificación, además de la temperatura de la superficie marina, es la presencia de anomalías al oeste de los vientos alisios, que bajo este patrón, tienden a debilitarse atenuándose a su vez la cizalladura vertical del viento (De Maria, 1996). Adicionalmente, la actividad ciclónica en los trópicos es inhibida por patrones macroclimáticos como El Niño, cuya ocurrencia está relacionada con fuertes vientos de componente oeste, en los niveles altos de la tropósfera, sobre la cuenca del Caribe y el Atlántico ecuatorial (Gray, 1984) así como la Oscilación Cuasi-Bienal (QBO), que cuando presenta una fase del oeste en la zona comprendida entre 10° N y 15° N el valor absoluto del viento zonal es débil, e influencia positivamente la intensificación de huracanes en desarrollo (Gray *et al.*, 1992).

Desde que se tiene registro, sólo los centros de seis ciclones tropicales han penetrado algún punto del territorio nacional que colinda con el Mar Caribe. Los ojos de los huracanes N° 4 y N° 7 en 1877 y 1892 respectivamente, se desplazaron sobre la península de Paraguaná con vientos mayores a los 95 nudos lo que representa huracanes de carácter intenso. Adicionalmente, los sistemas N° 2 (1933), Alma (1974), Joan (1988) y Bret (1993) tocaron tierra venezolana con fuerza de tormenta tropical principalmente sobre las costas oriental y occidental

(figura 1). A pesar de este comportamiento, existe una afectación indirecta, que es asociada a la modificación de las condiciones meteorológicas de ciertas zonas del país, debido al paso de un ciclón tropical sobre las aguas del Mar Caribe. Las consecuencias de dicho desplazamiento se evidencian principalmente en eventos de precipitaciones fuertes, aumento de la velocidad del viento e/o incremento del oleaje. Ejemplo de ello, lo constituye el paso del huracán Iván en 2005, que produjo una serie de pérdidas materiales en las costas central y oriental debido al fuerte oleaje y, a los intensos vientos registrados.

En esta investigación se presenta un análisis probabilístico que describe la posibilidad de que Venezuela se vea afectada por uno de estos sistemas, empleando la información, tanto de ciclones tropicales que han pasado directamente sobre el país, como de aquellos que se han desplazado sobre el Mar Caribe con vientos que han modificado los patrones atmosféricos en varias regiones del país. Los resultados obtenidos reflejan una probabilidad baja, en el peor escenario de 4,9%, respecto a la incursión en una temporada de huracanes promedio de un ciclón tropical. Sin embargo, los entes encargados del monitoreo y pronóstico meteorológico, deben analizar las condiciones sobre el Mar Caribe próximo a Venezuela, para determinar la posible presencia de factores que favorecerían el paso directo de estos sistemas, como ha ocurrido en el pasado.

METODOLOGÍA EMPLEADA

El análisis estadístico del comportamiento de los ciclones tropicales sobre Venezuela y sus adyacencias, se fundamenta en el empleo de la distribución estadística de Poisson, debido a que el paso de ciclones tropicales sobre una región posee una frecuencia que se ajusta a este tipo de distribución (Klotzbach y Gray, 2005). El procedimiento requirió la contabilización de los ciclones tropicales cuyas

trayectorias estuvieron enmarcadas en un área determinada; así, como la recopilación de las magnitudes de las principales variables que definen al fenómeno, como: velocidad del viento y presión central. Para el desarrollo de este estudio, se ha tomado como fuente de información, la base de datos Hurricane/Tropical Data de la empresa Unisys (2007), la cual se caracteriza por la extensión del período de registro (1851-2006). La investigación fue dividida en dos secciones, en las cuales se analiza la probabilidad del paso de ciclones tropicales y, el comportamiento estadístico de los vientos asociados a dichos sistemas. Finalmente, en la sección de anexos, se presentan algunos cálculos sobre la costa occidental que permiten ilustrar el empleo de la metodología.

DETERMINACIÓN DE LA PROBABILIDAD DEL PASO DE CICLONES TROPICALES SOBRE VENEZUELA

La expresión utilizada para la determinación de la probabilidad fue la siguiente:

$$P = p^x / e^{px}! \quad (1)$$

Donde, P = Probabilidad del paso de ciclones tropicales

p = Ocurrencia de ciclones tropicales en los últimos 151 años

x = Número de ciclones tropicales esperados

x! = Factorial

e = 2,718

El impacto directo de ciclones tropicales sobre las costas venezolanas es un hecho que ha ocurrido pocas veces desde que se tiene registro. Debido al comportamiento antes mencionado, se decidió realizar el cálculo de probabilidad del paso de ciclones tropicales en dos conjuntos de datos diferentes, constituidos por:

- Los de ciclones tropicales que pasaron directamente sobre las costas de Venezuela. Este conjunto de datos está conformado

por los ciclones tropicales: N° 4 (1877), N° 7 (1892), N° 2 (1933), Alma (1974), Joan (1988) y Bret (1993).

- Los ciclones tropicales cuyos vientos asociados han afectado a la costa venezolana. Empleando la expresión para la determinación del radio al que pueden alcanzar vientos de tormenta tropical, huracán y huracán intenso (2) se han localizado aquellos sistemas que afectaron al territorio nacional, a pesar de que sus centros se desplazaron por el Mar Caribe (tabla 1).

Año	Nombre	Año	Nombre	Año	Nombre
1856	2 (H-1)	1901	5 (TT)	1963	FLORA (H-3)
1876	4 (H-1)	1918	2 (H-1)	1971	EDITH (TT)
1878	5 (H-1)	1932	10 (H-1)	1996	CESAR (TT)
1886	6 (H-2)	1938	2 (TT)	2004	EARL (TT)
1887	4 (H-1)	1954	HAZEL (H-3)	2004	IVAN (H-4)
1887	19 (TT)	1955	JANET (H-3)	2005	EMILY (H-4)
1895	5 (H-1)	1961	ANNA (H-2)		

Tabla 1. Ciclones tropicales que afectaron de manera indirecta a Venezuela

(TT: Tormenta Tropical y H: Huracán)

Con la finalidad de desarrollar un análisis detallado sobre el territorio nacional, el área del país próxima al Mar Caribe fue dividida en las siguientes tres regiones; en cada una de las cuales, se determinaron los valores de probabilidad de paso directo e indirecto, probabilidad de vientos sostenidos y períodos de retorno de vientos sostenidos.

- La costa oriental (CO): comprendida entre 60° y 65,5° de longitud oeste y conformada por los estados Anzoátegui, Sucre, Monagas y Delta Amacuro.
- La costa central (CC): comprendida entre 65,5° y 68,2° de longitud oeste y conformada por los estados Miranda, Aragua, Vargas, Carabobo y Distrito Capital.
- La costa occidental (COCC): comprendida entre 68.2° y 71.2° de longitud oeste y conformada por los estados Yaracuy, Falcón y Zulia.

DETERMINACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE VIENTOS SOSTENIDOS

Basados en estimaciones previas del viento recolectadas de la base de datos Hurricane/Tropical Data, con la siguiente expresión es posible determinar el área de extensión del viento a distintas velocidades (Klotzbach y Gray, 2005).

$$V.r^x = \text{Constante (2)}$$

Donde, V= velocidad del viento

r= radio de extensión del viento

Asunciones:

- Para vientos máximos sostenidos con fuerza de tormenta tropical entre 35 y 65 nudos, el radio de extensión del viento se incrementa de forma lineal de 30 a 90 Km.
- Para vientos máximos sostenidos con fuerza de huracán entre 65 y 100 nudos, se asume que $x = -0,5$.
- Para vientos máximos sostenidos con fuerza de huracán intenso mayor a 100 nudos, se asume que $x = -0,65$.

Aplicando la expresión, fueron realizados los cálculos de probabilidad de ocurrencia de vientos con fuerza de tormenta tropical, huracán y huracán intenso, sobre cada una de las tres secciones de la costa venezolana. En primera instancia, se determinó el diámetro total

cubierto por cada una de las intensidades de viento. En otras palabras, son sumados todos los diámetros de viento con cierta intensidad, por ejemplo, de huracán asociados a los ciclones tropicales que han pasado por cada una de las regiones en estudio. Posteriormente, es dividido dicho diámetro total entre la longitud de la costa, dando como resultado la probabilidad anual de que sobre la región se presenten vientos con fuerza de tormenta tropical, huracán o huracán intenso. Adicionalmente, fue determinada la probabilidad de vientos sostenidos sobre el estado Nueva Esparta, para la ciudad de Caracas, zona comprendida entre Catia y Terrazas del Ávila, asumiéndose para esta última que la probabilidad se ve afectada negativamente en un 25% por los efectos del debilitamiento, debido al movimiento del sistema sobre tierra. Es importante recalcar que a partir de este punto, sólo se toma en cuenta la información de los ciclones tropicales que han pasado de manera directa sobre el territorio nacional es decir el primer conjunto definido anteriormente.

DETERMINACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE VIENTOS SOSTENIDOS (PROXIMIDADES)

Con la finalidad de determinar la probabilidad de que vientos de distintas intensidades, se presenten en las cercanías de las zonas seleccionadas, fue utilizada nuevamente la distribución Poisson. Las probabilidades de vientos sostenidos, determinadas anteriormente fueron multiplicadas por un factor, para tomar en cuenta, la incertidumbre de que en los alrededores de las regiones se registren fuertes vientos. Las expresiones utilizadas son las siguientes:

$$\text{Prox} = \text{PV} \times 9 \quad (3)$$

Donde, Prox = Porcentaje anual promedio de estar en las proximidades de un ciclón tropical.

PV= Probabilidad de vientos sostenidos

$$PP = 1 - \text{Prox}^x / e^{\text{Prox}x!} \quad (4)$$

Donde, Prox = Porcentaje anual promedio de estar en las proximidades de un ciclón tropical

x = Número de ciclones tropicales esperados

x! = Factorial

e = 2,718

PERÍODO DE RETORNO DE PROBABILIDAD DE VIENTOS SOSTENIDOS

La probabilidad de que sean registrados vientos de distintas intensidades, sobre una región para distintos períodos de retorno, fue determinada utilizando la distribución binomial, tomando en cuenta las probabilidades climatológicas determinadas anteriormente.

$$PR(a) = 1 - (1 - PV)^a \quad (5)$$

Donde, PR = Probabilidad

a = años

PV = Probabilidad de vientos sostenidos

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de trayectorias

Las trayectorias de los ciclones tropicales, cuya formación se produjo al sur de los 12° N en el Atlántico (figura. 1) reflejan un desplazamiento con muy poca variación latitudinal a medida que se desplazan longitudinalmente, desde su zona de origen, hasta hacer contacto con distintos sectores de la costa venezolana. El huracán N° 2, es el único que desarrolló un movimiento en sentido noroeste pero con un origen en los 9° N, que le permitió atravesar la península de

Paria y tocar a la de Paraguaná en su extremo septentrional, el resto de los sistemas se caracterizaron por sus trayectorias rectilíneas. A estas latitudes, la fuerza de Coriolis adquiere magnitudes que obligan a los ciclones a moverse hacia la derecha del flujo medio (Chan y Gray, 1982) condición que propicia básicamente un movimiento noroeste pronunciado, y situaciones de recurvamiento. Las trayectorias rectilíneas se desarrollan generalmente en entornos donde gobiernan los vientos del este prácticamente en toda la tropósfera, y el recurvamiento no se produce, hasta que vientos zonales positivos penetran la troposfera media y alta en el sector noroeste, próximo al centro del ciclón (Hodanish y Gray, 1993).

Además de las distintas variables atmosféricas que intervienen en el proceso de formación e intensificación de los ciclones tropicales, la temperatura de la superficie del mar es un elemento fundamental. En el caso de los ciclones con trayectorias rectilíneas, la temperatura del mar contribuye a este movimiento cuando el desplazamiento se realiza por zonas donde los gradientes de temperatura son particularmente débiles (Chan *et al*, 1980).

Altas temperaturas en el Caribe por encima de los 26° C y una débil cizalladura vertical del viento (cambio de la dirección y velocidad del viento respecto a la altura) en latitudes inferiores a los 12° N son condiciones que teóricamente explicarían el comportamiento manifestado por estos seis ciclones.

Sin embargo, la tormenta tropical Alma en 1974 se desarrolló dentro de una de las más altas anomalías positivas de cizalladura en los últimos 50 años (Aiyyer y Thorncroft, 2006), situación que evidencia la intervención de otras variables que deben ser tomadas en cuenta.

Las trayectorias de los ciclones tropicales, cuyos vientos asociados afectaron al territorio nacional (figuras 2 y 3) reflejan un comportamiento similar al registrado por los sistemas que penetraron al país. El movimiento rectilíneo se mantiene en cuatro de los seis meses que

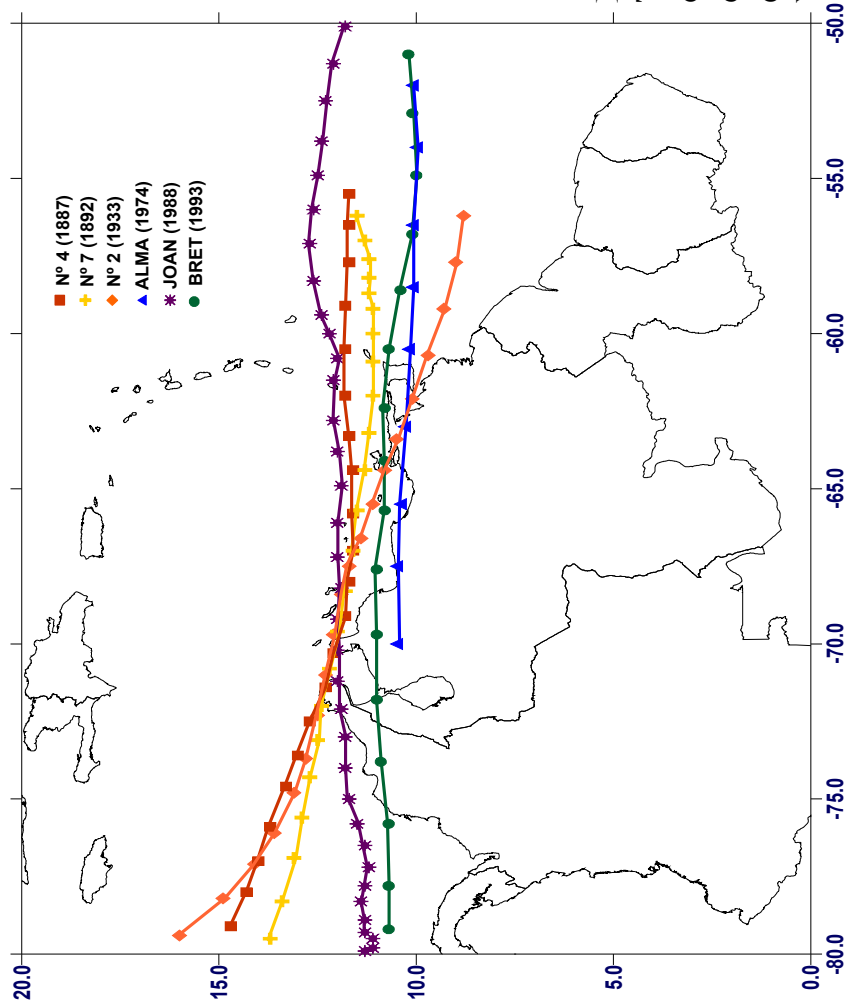


Figura 1.
Trayectorias de los
ciclones tropicales
que han pasado
directamente por
Venezuela

constituyen la temporada de huracanes. El recurvamiento hacia la derecha, experimentado por alguno de los ciclones se produce luego de los 72° N, después de haber atravesado el Caribe, con un movimiento predominantemente oeste-noroeste; incluso en un par de oportunidades, éstas maquinas térmicas giraron hacia la izquierda. Este cambio de un sentido noroeste a uno oeste o suroeste puede ser atribuido al establecimiento de un área de cizalladura vertical positiva en frente del ciclón (Gray *et al*, 1980).

Las trayectorias difieren notablemente del camino habitual que toman los ciclones tropicales durante la temporada de huracanes. Con el fin de apreciar en detalle este comportamiento en las figuras 2 y 3 han sido graficadas en líneas de trazos cortos las trayectorias prevalecientes determinadas por el Centro Nacional de Huracanes en el período Julio-Octubre. En el mes de Julio, existen dos recorridos por los cuales típicamente pasan los ciclones tropicales. El más bajo de ellos se origina en los 14° N en el Caribe central lo que refleja un comportamiento anómalo de los sistemas que incidieron de manera indirecta en Venezuela ya que sus trayectorias se ubicaron en latitudes inferiores a la antes mencionada en donde normalmente los valores de cizalladura vertical son considerablemente altos y una reducción de hasta un 20% del valor climatológico de la cizalladura no sería suficiente para que entrara en el rango que permite el desarrollo de ciclones tropicales (Aiyyer y Thorncroft, 2006). En el mes de Agosto esta anomalía se intensifica ya que el recorrido generalmente se desarrolla en el extremo septentrional del Caribe bordeando el sur de Puerto Rico y República Dominicana.

En este mes el desplazamiento noroeste es aún más acentuado que el resto del período de análisis en donde uno de los sistemas desarrolló un pronunciado cambio de dirección hacia el norte al llegar a las longitudes colombianas después de mantener un sentido franco oeste. Continúa el desplazamiento en sentido norte de las trayectorias prevalecientes para el mes siguiente aún así algunos sistemas transitaron latitudes bajas cercanas a las costas venezolanas.

Figura 2.
Trayectorias de
los ciclones
tropicales que han
afectado de
manera indirecta
a Venezuela en el
mes de junio (Izq.)
y agosto (Der.).

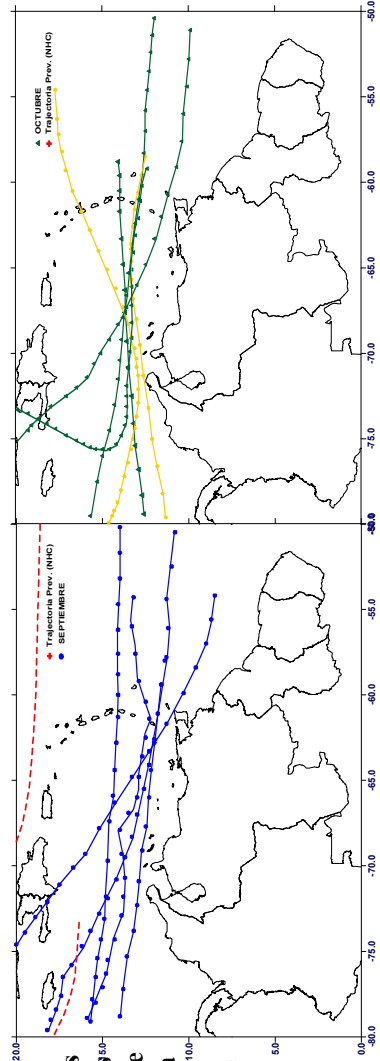
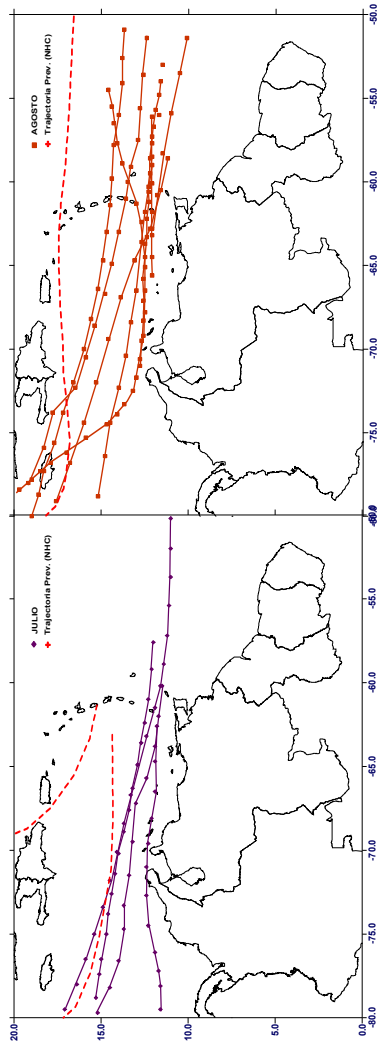


Figura 3.
Trayectorias de los
ciclones tropicales
que han afectado de
manera indirecta a
Venezuela en el
mes de septiembre
(Izq.) y octubre
(Der.).

En octubre la actividad ciclónica se restringe generalmente a la zona del Golfo de México y el Atlántico Norte adyacente a la costa este de los Estados Unidos donde se presentan las condiciones más favorables. Por esta razón, no se observan recorridos prevaletentes sobre el Caribe. En la gráfica correspondiente a este mes, destacan dos ciclones tropicales con coloración distinta, la tormenta tropical N° 19 registrada en la segunda semana de diciembre de 1887 que constituye una fecha fuera del lapso establecido en la temporada de huracanes y el huracán N° 10 con una pronunciada trayectoria suroeste, a su paso por las aguas del Mar Caribe.

La zona de máximo calentamiento que afecta tanto a la superficie continental como a los océanos experimenta un movimiento norte-sur en el transcurso del año. En cierta medida las zonas de temperatura máxima sobre el Mar Caribe y el Atlántico siguen este comportamiento que es secundado por las zonas de origen y desarrollo de ciclones tropicales que dependen de la energía que proporciona la superficie oceánica. Según la figura 4, los ciclones tropicales que pasaron por las proximidades del país fueron mayormente registrados en el mes de agosto con una totalidad de seis sistemas en el período analizado. Este comportamiento puede estar relacionado en cierta medida con un debilitamiento de la corriente de chorro caribeña en ese mes (Wang, 2007) facilitando la convergencia en niveles bajos y disminuyendo la cizalladura en el área.

El desarrollo de cuatro ciclones en el mes de octubre en las adyacencias del país y dos ciclones que pasaron sobre el territorio constituye un punto que requiere un análisis exhaustivo ya que para esta época del año los ciclones tropicales tienden a formarse y a desplazarse por el Golfo de México zona que presenta las temperaturas acordes para el desarrollo de estos sistemas.

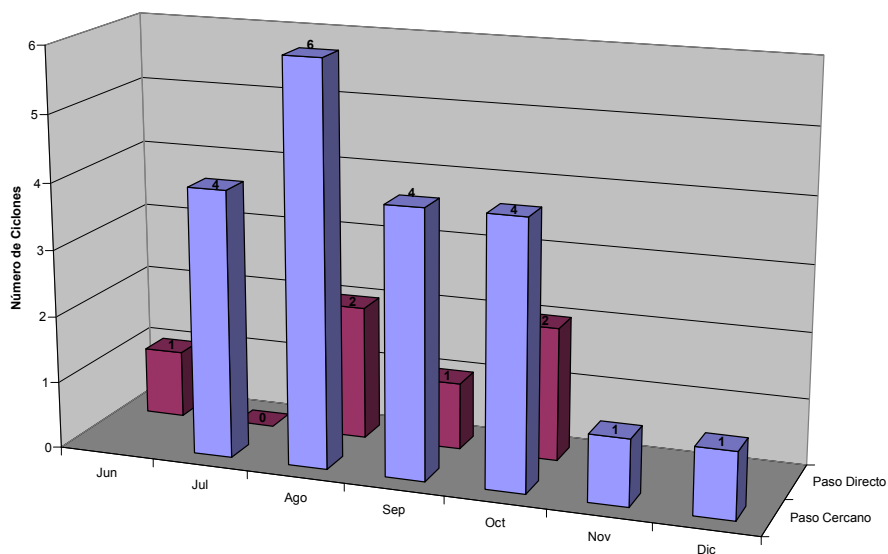


Figura 4. Número de ciclones tropicales que han pasado de forma directa e indirecta sobre Venezuela

DETERMINACIÓN DE LA PROBABILIDAD DEL PASO DE CICLONES TROPICALES SOBRE VENEZUELA

La baja ocurrencia de ciclones tropicales es reflejada nuevamente por los resultados expuestos en la tabla 2 (anexo 1.1) los cuales sirvieron como base para los cálculos posteriores de probabilidad utilizando el modelo de Poisson. En esta parte de la investigación no se discretizan los sistemas según su intensidad, factor que será tomado en cuenta más adelante en el análisis del comportamiento del viento asociado. Como se ha mencionado anteriormente, se han definido dos grupos de estudio para esta sección de la investigación, el primer grupo conformado por los ciclones tropicales que han pasado directamente por Venezuela y el segundo grupo por los sistemas que han pasado por las proximidades del país. Para diferenciar los resultados de ambos grupos presentados

en la figura 5, se colocaron los números uno (1) que corresponde al primer grupo y dos (2) que corresponde al segundo a continuación del nombre de cada región.

La cantidad de sistemas cuyos centros no han pasado directamente sobre algún punto del territorio pero que los vientos originados por los mismos han afectado las costas venezolanas presentan un aumento en la ocurrencia anual de más del 100% respecto al primer grupo en la mayoría de los casos. El incremento más notable se evidencia en la Costa Oriental donde 13 ciclones han sido registrados en los últimos 151 años contrastando con los tres sistemas que han realizado un paso directo por la zona. La totalidad de ciclones correspondientes a este segundo grupo de análisis alcanza la veintena continuando el patrón de afectación sobre el estado Falcón. Sin embargo, la ocurrencia anual en esta zona y en el resto del territorio nacional analizado, está muy por debajo de un ciclón por año donde la costa central su estatus como la región menos afectada con una ocurrencia cercana a cero. En la tabla 2 destaca la ausencia de registros del paso de tormentas tropicales en las cercanías de la costa central. Esta situación puede abordarse desde diferentes puntos de vista. En primera instancia, los ciclones que se desplazan desde el este adquieren una fuerza de huracán o huracán intenso en el área longitudinal correspondiente a la costa central acentuándose su movimiento noroeste. De este modo los sistemas afectarían a la costa oriental en forma de tormenta tropical y posiblemente con intensidad de huracán sobre la región central costera si latitudinalmente no se encuentran muy retirados del área. Por otra parte, existe la posibilidad de que los ciclones tropicales con intensidad de tormenta tropical pasen muy alejados de la costa central pero al aproximarse a la longitud 68° W el sistema se intensifique y los vientos asociados afecten a la costa occidental.

Ocurrencia de Ciclones Tropicales						
Primer Grupo			Segundo Grupo			
	COCC	CC	CO	COCC	CC	CO
T.T.	4	2	2	3	0	4
H.	2	0	1	7	2	7
H.I.	0	0	0	5	2	2
TOTAL	6	2	3	15	4	13
C.T./año	0,040	0,013	0,020	0,099	0,026	0,086

Tabla 2. Cantidad y ocurrencia en los últimos 151 años del paso directo e indirecto de ciclones tropicales sobre las regiones seleccionadas

El análisis probabilístico del paso de ciclones tropicales directamente sobre Venezuela según la distribución Poisson y con una significación estadística de 0,1 refleja que para un año promedio existe menos de 4% de probabilidad (figura 5) de que la zona más expuesta, que es la costa occidental, sea azotada por los embates de un ciclón tropical de cualquier intensidad, es decir, de cada 25 ciclones que se formen en el Atlántico y el Caribe en un año sólo uno pasaría por dicha costa. Por su parte, la probabilidad de que no se produzca un paso directo está por encima del 96%. El promedio anual según el Centro Nacional de Huracanes es de 10,1 sistemas con nombre para la cuenca del Atlántico. Las probabilidades bajan drásticamente cuando se plantea la posibilidad del paso directo de 2 o más ciclones en un mismo año destacándose la región de la costa central en donde existe la menor probabilidad de afectación.

En cuanto al segundo grupo, la probabilidad de que un sistema se desplace por las proximidades del país y afecte de manera indirecta

es de 9% para la costa occidental como valor máximo y 2,6% para la costa central como valor mínimo entre las regiones. La probabilidad de que un sistema se desplace a una latitud en donde la extensión del viento no alcance al territorio nacional se encuentra ente el 91% y 98% dependiendo de la zona a considerar. El paso indirecto de ciclones aumenta respecto al primer grupo específicamente para la costa oriental donde se triplica la magnitud manteniendo aún así valores menores al 10% (figura 5).

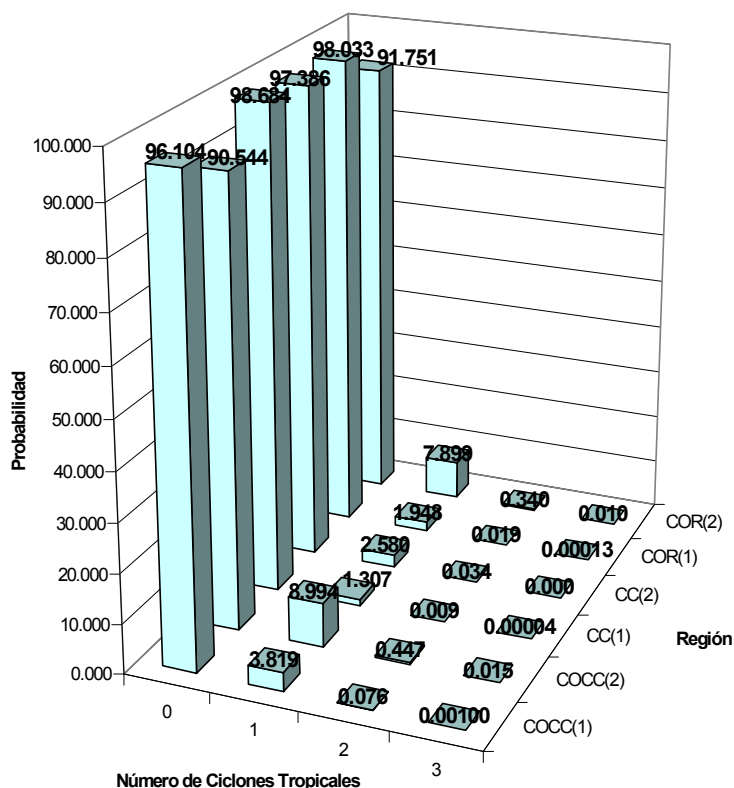


Figura 5. Probabilidad del paso directo e indirecto de uno o varios ciclones tropicales por las distintas regiones según la distribución Poisson

Los valores de probabilidad obtenidos por la distribución Poisson están relacionados con una reducida formación y desarrollo de ciclones tropicales en el Caribe debido principalmente a la intensificación en verano de la corriente de chorro caribeña a bajo nivel asociada con un mínimo de ciclogénesis tropical en el Mar Caribe (Wang, 2007). Sin embargo, existen una serie de factores cuya combinación podrían facilitar la penetración de un sistema tropical en territorio venezolano. El primer elemento a considerar es la formación de una perturbación a baja latitud inmersa en un ambiente con una alta vorticidad ciclónica en superficie (Gray, 1968) que le permitan intensificarse a una categoría de ciclón tropical en una latitud próxima a los 10° N y a una longitud cercana a Venezuela. Una vez formada la perturbación, la presencia de una cuña cuasi-estacionaria en niveles altos y medios sobre el Caribe favorecería la incursión, ya que estos sistemas anticiclónicos en un alto porcentaje son causantes de un prolongado movimiento hacia el oeste de los huracanes formados en latitudes bajas (Klotzbach y Gray, 2006). Una cuña con estas características posicionada al noroeste del ciclón puede generar un constante componente este del viento en la troposfera media que aunado a un movimiento del flujo zonal en altura que no exceda los 5 m/s producirían un desplazamiento constante oeste-noroeste de los ciclones tropicales (Hodanish y Gray, 1993) como el observado en las trayectorias expuestas en la figura 1.

PROBABILIDAD DE VIENTOS SOSTENIDOS

Esta sección se enfoca en un análisis probabilístico de la intensidad de los vientos durante el paso directo del centro de los ciclones tropicales (anexo 2.2), en cada una de las zonas seleccionadas. Los resultados obtenidos dependen de la extensión de la zona de vientos y la longitud de la costa de cada región. La costa occidental presenta la mayor

probabilidad de que en cualquier punto de la misma, sean registrados vientos con intensidad de tormenta tropical (tabla 3). Sin embargo, la probabilidad es tan baja que apenas alcanza 1% para un año promedio. Esta región es secundada por la costa central, cuya probabilidad supera a la costa oriental, a pesar de que en esta última se registraron más ciclones tropicales (tabla 2). Este resultado se explica, porque la costa central posee menor longitud que la costa oriental lo que la hace más propensa a que en cualquier sector enmarcado entre los 65,5° y 68,2° de longitud oeste, sean registrados vientos de tormenta tropical. En cuanto a los vientos con intensidad de huracán, las costas occidental y oriental, únicas que han sido afectadas por este tipo de fenómeno, muestran una reducción en la magnitud de la probabilidad respecto a vientos de menor intensidad, manteniéndose el estado Falcón con la máxima probabilidad, cercana al 0,2%. Ninguna de las regiones ha sido embestida de manera directa por un huracán intenso por tal razón, la probabilidad de vientos sostenidos de esa intensidad es igual a cero.

En este análisis, además de las regiones seleccionadas se incluyen el estado Nueva Esparta (NE) y la ciudad de Caracas (CCS). Para esta última, ha sido considerado el debilitamiento de los vientos asociados a los ciclones tropicales una vez que penetran el continente. Destacan los valores de probabilidad obtenidos para Nueva Esparta, que superan en gran medida las magnitudes presentes en el resto de las regiones incluso, duplicando y triplicando la probabilidad de la costa occidental para tormentas tropicales y, huracanes respectivamente. En cuanto a Caracas (anexo 2.3), el efecto de la continentalidad influye drásticamente, reflejado por una probabilidad muy cercana a cero para vientos de tormenta tropical.

	Probabilidad		
	Viento T.T	Viento H.	Viento H.I.
COCC	1,0207	0,2151	0
CC	0,3402	0	0
COR	0,2476	0,0413	0
NE	1,7802	0,6223	0
CCS	0,0117	0	0

Tabla 3. Probabilidad de vientos sostenidos de distintas intensidades sobre las regiones

(T.T: tormenta tropical, H: huracán y H.I.: huracán intenso)

La información probabilística contenida en la tabla 3, referente a los vientos sostenidos de distintas intensidades, fue empleada para determinar la probabilidad de los vientos asociados a ciclones tropicales en las proximidades de la costa venezolana (anexo 3.1) en una temporada de huracanes promedio. Las cercanías de la costa occidental registran la mayor probabilidad de vientos con intensidad de tormenta tropical entre las tres zonas seleccionadas, con una magnitud de 8,8% (Tabla 4) valor que casi se duplica para el estado Nueva Esparta. Esta magnitud es acompañada por un 5,4% de probabilidad de que vientos con intensidad de huracán se desarrollen en cualquier punto cercano a este estado en un año promedio. Las costas central y oriental, así como la ciudad de Caracas, presentan muy bajas probabilidades, debido principalmente a los altos valores de cizalladura vertical existentes en el Caribe central (Aiyyer y Thorncroft, 2006) destacándose un valor de 0,1%, para el área metropolitana.

	Probabilidad	
	Viento T.T	Viento H.
COCC	8,777	1,917
CC	3,016	0
COR	2,204	0,371
NE	14,804	5,447
CCS	0,106	0

Tabla 4. Probabilidad de vientos sostenidos de distintas intensidades en las proximidades de las regiones (T.T: tormenta tropical y H: huracán)

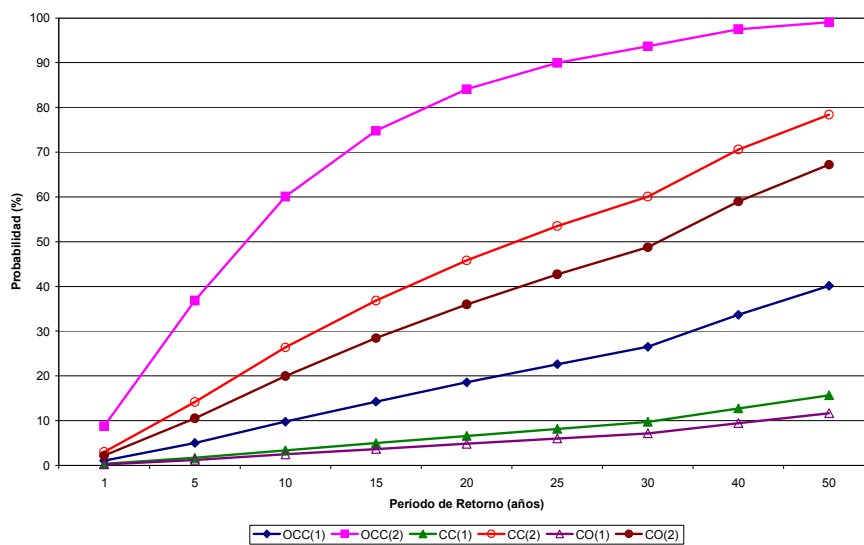


Figura 6. Probabilidad del paso directo e indirecto de una tormenta tropical por las regiones identificadas, en distintos períodos de retorno

PERÍODO DE RETORNO DE PROBABILIDAD DE VIENTOS SOSTENIDOS

La probabilidad de que vientos con intensidad de tormenta tropical y huracán sean registrados en cada una de las regiones seleccionadas, fue determinada para varios períodos de retorno. El centro de un huracán de fuerte intensidad no ha pasado directamente por el territorio nacional desde que se tiene registro, por tal razón, no es posible el cálculo de los períodos de retorno para este tipo de sistema. Los valores de probabilidad relacionados con los períodos de retorno, dependen de la probabilidad anual de vientos sostenidos de los dos tipos de intensidades asociados a los ciclones que han pasado sobre Venezuela. Adicionalmente fueron determinados los períodos de retorno para los vientos sostenidos en las proximidades de la costa venezolana.

Como fue mencionado anteriormente, la zona más propensa al desarrollo de vientos asociados a sistemas tropicales es la costa occidental y, en consecuencia, las probabilidades obtenidas aplicando una distribución binomial (anexo 4.1), con una significación estadística de 0,1, aumentan de manera más pronunciada con el tiempo, en relación con el resto del territorio nacional, presentándose un 60% de probabilidad de ocurrencia en los próximos 10 años, para vientos de tormenta tropical en la cercanías de esta región (figura 6). La tendencia de las probabilidades de las dos regiones restantes, es similar para los vientos sostenidos con afectación directa e indirecta, presentándose en este último grupo, una pendiente más pronunciada, lo que se traduce en mayor probabilidad conforme transcurre el tiempo, pudiéndose alcanzar valores entre 65 y 99% en los próximos 50 años, lo que representa siete veces la probabilidad de que sean registrados de manera directa, vientos de tormenta tropical en el mismo período.

Las probabilidades de que vientos con intensidad de huracán se experimenten directamente dentro de un período de 50 años no sobrepasan el 18% (figura 7) para las costas occidental y oriental. En

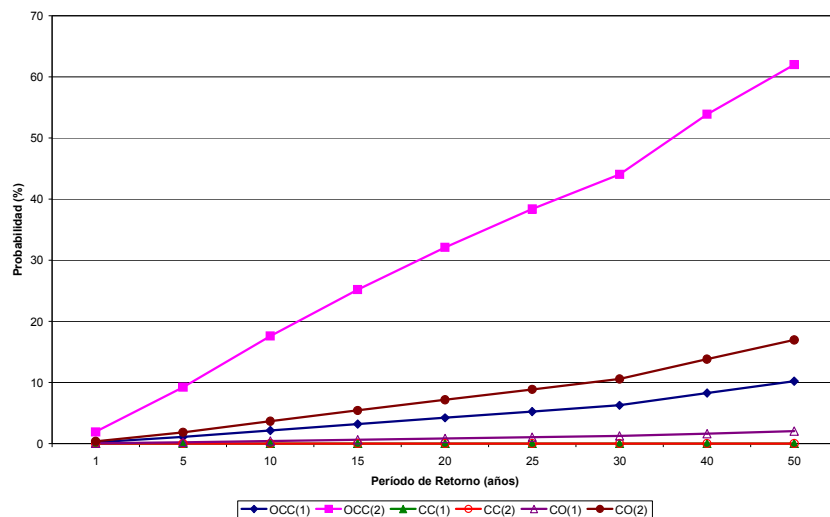


Figura 7. Probabilidad del paso directo e indirecto de un huracán por las regiones identificadas, en distintos períodos de retorno

esta última las magnitudes están cercanas a cero. La tendencia más pronunciada se desarrolla en las proximidades de la costa occidental, con poco más de 60% de probabilidad acumulada en la totalidad del período analizado.

CONCLUSIONES

El análisis estadístico muestra una muy baja probabilidad del paso del centro de un ciclón tropical sobre las costas venezolanas, debido a la baja tasa de sistemas que han pasado sobre Venezuela. Sin embargo, existe la posibilidad de que se conjuguen las condiciones necesarias para que esto se produzca. La inhibición de la actividad ciclónica asociada principalmente con la intensa cizalladura vertical que se observa en el Caribe, está relacionada con la presencia de un jet de bajo nivel en los

Alisios (Molinari *et al*, 2000). Este fenómeno incrementa el flujo divergente de humedad superficial en el Caribe, suprimiendo procesos como la convección, la precipitación y la formación de ciclones tropicales (Wang, 2007).

Los ciclones tropicales, que han influido de manera directa o indirecta en las condiciones meteorológicas del territorio nacional, se caracterizaron por originarse en latitudes bajas, respecto a las típicas áreas de formación, las cuales muestran una gran relación con las regiones de mínima o cero cizalladura vertical del viento zonal, (Gray 1968) en los meses que conforman la temporada de huracanes. Adicionalmente, los sistemas desarrollaron trayectorias básicamente rectilíneas en dirección noroeste o franco norte y, en algunos casos recurvando hacia la izquierda experimentando un descenso en latitud.

La costa occidental ha sido la zona más afectada por el paso directo de ciclones tropicales, principalmente por su mayor prolongación septentrional y, por la intensidad que adquieren los sistemas al llegar a ella después de un recorrido que generalmente comienza al occidente de los 80° W. En el futuro, esta área será la más propensa, tanto al desplazamiento directo, y en sus adyacencias, de una tormenta tropical o huracán, según lo refleja el análisis de los períodos de retorno.

El desarrollo de cuatro ciclones en el mes de octubre que se equipara a la suma registrada en otros meses, donde la zona de máximo calor se encuentra en proceso de intensificación y ascenso, constituye un punto que requiere un mayor análisis, ya que para esta época del año las tormentas y ciclones tropicales tienden a formarse y desplazarse por el Golfo de México, zona que presenta las temperaturas del mar acordes para el desarrollo de estos sistemas.

A pesar de que las estadísticas reflejen probabilidad climatológica de que un sistema tropical se acerque e incluso pase sobre las costas venezolanas, es necesario realizar el análisis de las condiciones meteorológicas antes y en el transcurso de cada temporada de

huracanes, con la finalidad de determinar con ayuda de distintas herramientas, el grado de incertidumbre que posea ese análisis estadístico. La probabilidad de que en una temporada en específico un ciclón tropical pase sobre Venezuela, va a depender del comportamiento de una serie de variables ambientales; aún así, las magnitudes probabilísticas presentadas en este estudio dan una idea del comportamiento del fenómeno sobre el país, con base en lo registrado hasta el momento.

Las condiciones meteorológicas durante la temporada de huracanes varían constantemente. Este comportamiento trae como consecuencia que las probabilidades de incidencia también varíen periódicamente. Como es posible apreciar en los pronósticos realizados regularmente por el Centro Nacional de Huracanes y la Universidad de Colorado, en algunas ocasiones difieren notablemente en relación con el comportamiento medio. Esta situación hace necesario que se desarrolle un sistema de pronóstico estadístico en Venezuela, que sea alimentado por distintas variables atmosféricas que permitan determinar con cierto tiempo de anticipación, cual será el efecto que tendrán las distintas temporadas de huracanes sobre el territorio nacional. Este tipo de información es de mucha utilidad para los entes relacionados con la meteorología y la mitigación de desastres, de modo que puedan estar preparados para temporadas activas.

REFERENCIAS BIBIOGRÁFICAS

- Aiyyer, A. & Thorncroft, C. (2006). Climatology of vertical wind shear over the Tropical Atlantic. *Journal of Climate*, vol. 19. 12:2969-2983.
- Chan, J & Gray, W. (1982). Tropical cyclone movement and surrounding flow relationship. *Monthly Weather Review*, vol. 110. 1354-1374.
- Chan, J., Gray, W., Kidder, S.(1980). Forecasting tropical cyclone turning motion from surrounding wind and temperature fields. *Monthly Weather Review*, vol. 108. 778-792.

- De Maria, M. (1996). The effect of vertical shear on tropical cyclone intensity change. *J. Atmos. Sci.*, vol. 53, 2076-2088.
- Gray, W. (1968). Global view of the origin of tropical disturbances and storms. *Monthly Weather Review*, vol. 96. 10:669-700.
- Gray, W. (1984). Atlantic seasonal hurricane frequency. Part II: Forecasting its variability. *Monthly Weather Review*, vol. 112. 1669-1683.
- Gray, W., Landsea, C., Mielke, P., Berry, K. (1992) Predicting Atlantic seasonal hurricane activity 6-11 months in advance. *Weather and Forecasting*, vol. 7. 440-455.
- Hodanish, S. & Gray, W. (1993). An observational analysis of tropical cyclone recurvature. *Monthly Weather Review*, vol. 121. 2665-2689.
- Klotzbach, P. (2006). Trends in global tropical cyclone activity over the past twenty years (1986-2005). *Geophysical Research Letters*, vol. 33, L10805.
- Klotzbach, P. & Gray, W. (2006). Causes of the unusually destructive 2004 Atlantic basin hurricane season. *BAMS*, vol 87. 10:1325-1333.
- Klotzbach, P. & Gray, W. (2005). United States landfall probability webpage. *27th conference on hurricane and tropical meteorology*, 10A.1
- Molinari, J., Vallaro, P., Skubis, S., Dickinson, S. *et al.* (2000). Origins and mechanisms of eastern Pacific tropical cyclogenesis: A case of study. *Monthly Weather Review*, vol. 128. 125-139.
- Unysis. (2007). Unysis weather hurricane. Documento en línea. Disponible en: <http://weather.unysis.com/hurricane/> [Consultado 2007, mayo 25].
- Wang, C. (2007). Variability of the Caribbean low-level jet and its relation to climate. *Clim Dyn*, 29:411-422.

Estatio José Gutiérrez Quevedo. Ing. Hidrometeorologista. (UCV).
Docente en las áreas de Estadística para Ingenieros, Meteorología General e Instrumentos y Observación. Desempeña labores de investigación en el área del modelaje meteorológico en el Departamento de Ingeniería Hidrometeorológica y el proyecto PROCEDA del Departamento de Ingeniería Hidrometeorológica y el Instituto de Mecánica de Fluidos. UCV. Pasante del Centro de Pronósticos Hidrometeorológicos de CVG EDELCA. Ponente en congresos nacionales e internacionales: México, Colombia y Cuba. Correo electrónico: estatio@yahoo.com.

ANEXOS

1. Determinación de la probabilidad del paso de ciclones tropicales sobre Venezuela

1.1. Cálculo de Probabilidad del paso directo de un ciclón tropical por la Costa Occidental:

$$P = p^x / e^{px}$$

p = número de ciclones/período de registro

$$p = 6/151$$

$$p = 0,04; x = 1$$

$$P = (0,04)^1 / e^{0,04 \cdot 1}$$

$$P = 0,03819 \text{ ó } 3,82\%$$

2. Determinación de la probabilidad de vientos sostenidos

2.1. Cálculo del radio de extensión del viento:

A través de la expresión (2) y las distintas asunciones se determinó la tabla 5 que relaciona la velocidad con la extensión del viento.

Velocidad (nudos)	Radio T.T (km)	Radio H. (km)	Radio H.I. (km)
35	30		
40	40		
45	50		
50	60		
55	70		
60	80		
65	90	30	
70	104.38	34.79	
75	119.82	39.94	
80	136.33	45.44	
85	153.91	51.30	
90	172.54	57.51	
95	192.25	64.08	
100	213.02	71.01	30
105	226.39	76.54	32.34
110	243.20	82.22	34.74
115	260.43	88.05	37.20
120	278.07	94.02	39.72
125	296.12	100.12	42.30
130	314.55	106.35	44.94
135	333.38	112.71	47.63
140	352.58	119.21	50.37
145	372.16	125.82	53.17
150	392.10	132.57	56.01

Tabla 5. Velocidad y extensión de los vientos con intensidad de tormenta tropical (T.T.), huracán (H.) y huracán intenso (H.I.)

A continuación se presenta un ejemplo con la velocidad del viento registrada durante el paso del huracán Iván en las cercanías de la costa occidental. Velocidad (COCC)= 140 nudos (corresponde a la categoría de huracán intenso $x=-0,65$)

Determinación de la extensión de los vientos de tormenta tropical:

$$\begin{aligned}V_1 \cdot r_1^{-0,65} &= V_0 \cdot r_0^{-0,65} \\ \text{Donde, } V_1 &= 140 \\ V_0 &= 100 \\ r_0 &= 213,02 \\ r_1^{0,65} &= (V_1/V_0) \cdot r_0^{0,65} \\ r_1 &= (140/100)^{1,54} \cdot 213,02 \\ r_1 &= 352,58 \text{ km.}\end{aligned}$$

Determinación de la extensión de los vientos de huracán:

$$\begin{aligned}V_1 \cdot r_1^{-0,65} &= V_0 \cdot r_0^{-0,65} \\ \text{Donde, } V_1 &= 140 \\ V_0 &= 100 \\ r_0 &= 71,01 \\ r_1^{0,65} &= (V_1/V_0) \cdot r_0^{0,65} \\ r_1 &= (140/100)^{1,54} \cdot 71,01 \\ r_1 &= 119,21 \text{ km.}\end{aligned}$$

Determinación de la extensión de los vientos de huracán intenso:

$$\begin{aligned}V_1 \cdot r_1^{-0,65} &= V_0 \cdot r_0^{-0,65} \\ \text{Donde, } V_1 &= 140 \\ V_0 &= 100 \\ r_0 &= 30 \\ r_1^{0,65} &= (V_1/V_0) \cdot r_0^{0,65} \\ r_1 &= (140/100)^{1,54} \cdot 30 \\ r_1 &= 50,37 \text{ km.}\end{aligned}$$

2.2 Cálculo de probabilidad de vientos sostenidos

Año	Nombre	Viento(kts)	T.T. Rad.(Km)	H. Rad.(Km)
1982	7	85	153.91	51.30
1933	2	50	60	
1974	ALMA	35	30	
1988	JOAN	50	60	
1993	BRET	40	40	
1877	4	90	172.54	57.51
		Radio Total (km)	516.45	108.82
		Diámetro Total (km)	1032.90	217.63

Tabla 6. Velocidad, radio de extensión y radio de extensión total de viento asociado a los ciclones tropicales que pasaron sobre la costa occidental

Una vez calculado el diámetro de extensión total y con la longitud aproximada de la costa occidental (1012 km.) se procedió a determinar la probabilidad anual de ocurrencia de vientos sostenidos con intensidad de tormenta tropical y huracán, en algún punto de la costa.

$$PV=DT/LC$$

Donde, DT =diámetro de extensión total

LC= longitud de la costa

$$PV= 1032,9/1012= 1,02 \%$$

2.3. Cálculo de probabilidad de vientos sostenidos sobre Caracas

En primera instancia fue calculada una relación entre la longitud de la costa central y la longitud de Caracas:

$$R= 19 \text{ km}/411,5 \text{ km}=0,046$$

$$P=P(CC) \times R$$

$$P=0,34 \times 0,046=0,016$$

Para tomar en cuenta el debilitamiento, por efectos de la continentalidad, el valor de probabilidad fue multiplicado por un factor de 0,75

$$P=0,016 \times 0,75=0,012$$

3. Determinación de la probabilidad de vientos sostenidos (proximidades)

3.1. Probabilidad de vientos sostenidos de tormenta tropical en las proximidades de la costa occidental.

$$\text{Prox} = \text{PV} \times 9$$

$$\text{Prox} = 0,0102 \times 9 = 0,0918$$

$$\text{PP} = 1 - \text{Prox}^x / e^{\text{Prox} \cdot x!} \text{ Donde } x = 0$$

$$\text{PP} = 1 - (0,0918^0 / e^{0,0918 \cdot 1}) = 1 - (0,9122)$$

$$\text{PP} = 0,0877 \text{ ó } 8,77\%$$

4. Período de retorno de probabilidad de vientos sostenidos

4.1. Probabilidad de vientos sostenidos para cinco años de período de retorno sobre la costa occidental.

$$\text{PR}(a) = 1 - (1 - \text{PV})^a$$

$$\text{PR}(5) = 1 - (1 - 0,0102)^5$$

$$\text{PR}(5) = 1 - (0,9898)^5$$

$$\text{PR}(5) = 0,05 \text{ ó } 5\%$$

