



**UNIVERSIDAD DE ORIENTE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES**  
**DEPARTAMENTO DE FÍSICA**



**DETERMINACIÓN Y CALIBRACIÓN DE MODELOS**  
**ANALÍTICOS PARA MEJORAR EL PRONÓSTICO DE**  
**HURACANES**

**Tesis presentada en opción al grado científico de Master en Ciencias Físicas**

Autor: Lic. Humberto Lázaro Varona González

Tutores: Dr. Omar Gerardo Lizano Rodríguez

Dr. Francisco Palacios Fernández

Consultante: Lic. Guillermo Puente González

**SANTIAGO DE CUBA**  
**2012**

Determinación y calibración de modelos analíticos para  
mejorar el pronóstico de huracanes

**Autor:**

Lic. Humberto L. Varona González

**Tutor:**

Dr. Omar G. Lizano Rodríguez

Dr. Francisco Palacios Fernández

**Consultante:**

Lic. Guillermo Puente González

3 de Julio de 2012

## DEDICATORIA

- A Yeshua Hamashiaj. Rey de reyes. Rey de los Judíos y de los Gentiles. León de Judá.
- A la memoria de mi Papá, que siempre soñó que yo fuera profesional y nunca pudo disfrutar de ese momento.
- A mi Mamá, por ser la más dedicada a mi y la más sacrificada para que yo pueda avanzar en mi vida profesional.
- A mis Hijos Laysún, Humberto e Ismael, que no entienden nada de lo que está escrito aquí.
- A todos mis verdaderos amigos.

## AGRADECIMIENTOS

- Al Dios Padre, a Jesús el Cristo Redentor y al Espíritu Santo.
- A mi Madre e Hijos, por su amor y su paciencia.
- A Guillermo Puente González, alias Macuto, por ser mi padre científico, por formarme como investigador en todo momento y sobre todo por su amistad.
- A Fidel Guerrero, a Yurimiler Leyet, a Pedro Mariño, a Ernesto Govea y a Juan Guillaron por sus buenos consejos, su gran ayuda y apoyo, por ser mis amigos.
- A Raudel por darme impulso para que avanzara en todo momento en esta investigación.
- A Arquímedes Ruiz, alias Chachá, por su gran ayuda, que sin ella no hubiera podido avanzar rápidamente en esta investigación. Por su apoyo y amistad.
- A Dayanis Montero Borges, por su ayuda y apoyo incondicional en todo momento.
- A Lolita, por su apoyo y dedicación en los momentos difíciles.
- A mi tutor Omar G. Lizano Rodríguez, por su ayuda incondicional, por formarme como investigador y por su amistad.
- A mi tutor Francisco Palacios por su constante ayuda y apoyo.
- A mis amigos, por su apoyo en todos los buenos instantes y en los malos también.
- Y para que nadie se disguste: A TODOS LOS QUE ME AYUDARON.



## RESUMEN

En el presente trabajo se investigaron los modelos existentes sobre la estructura de los huracanes que pasan sobre el Atlántico Norte, el mar Caribe y el Golfo de México, encontrándose que no existe un modelo que determine satisfactoriamente la estructura de un huracán. Todos los modelos, excepto el de Collins y Viehnaman, solo tienen en cuenta el radio de vientos máximos y no el radio del ojo, que es el que delimita las velocidades nulas dentro del ojo, ni el radio de la última isobara cerrada que delimita a partir de qué distancia del centro del huracán se empiezan a desorganizar los vientos. El modelo de Collins y Viehnaman delimita las velocidades nulas dentro del ojo hasta un tercio del radio de vientos máximos, pero al comprobarse esto experimentalmente, no arrojó buenos resultados. Se revisaron la mayoría de los modelos que tienen validez actual para determinar el campo de velocidades, el campo de presiones y el campo de olas generados por huracanes casi estacionarios y en movimiento.

Se analizaron las trayectorias de varios huracanes y los datos experimentales de las estaciones meteorológicas situadas en las boyas de la NOAA y en tierra del NSSL, también fueron revisadas imágenes de luz visible e IR tomadas desde los satélites GOES-12, GOES-EAST, QuikSCAT, Terra y Aqua, el transbordador espacial Atlantis y la estación espacial internacional.

Finalmente, se creó un modelo de estructura de huracán que tiene en cuenta el radio del ojo, el radio de vientos máximos y el radio de la última isobara cerrada. Se reformularon los modelos para determinar el campo de velocidades, de presiones y de olas teniendo en cuenta el modelo nuevo de la estructura. El modelo del perfil de la presión atmosférica se acota para presiones menores o iguales que el valor de la presión en la última isobara cerrada y en el modelo de olas se llegaron a dos expresiones analíticas a partir del modelo USACE para estimar de una forma más simple el campo de olas de un huracán casi estacionario, también se formularon ecuaciones para determinar la altura de olas y el periodo en un punto fuera del radio de vientos máximos para un huracán en movimiento.

## **ABSTRACT**

In this paper investigate the existing models about hurricane's structure that pass over the North Atlantic, the Caribbean Sea and the Mexican Gulf and we found that there is no any satisfactory model that determine the structure of a hurricane. Every models except the Collins-Viehnaman's model, only take into account the maximum wind radii and not the eye's radii, wich determine the null speed inside the eye, neither the radii of the last closed isobar that delimits the distance were from the wind begin to disorganize. The Collins-Viehnaman's model delimits the null speed inside the eye to one third of maximum wind radii but when we prove this experimentally, the results were not good. We analyze the majority of the actual valid models to determine the speed's field, the pressure's field and wave's field generated by quasi stationary and moving hurricane.

Trajectories of several hurricanes was examined and the experimental data of the weather stations placed in the NOAA's buoys and on land of the NSSL, also visible light images and IR was analyzed, these was captured from the satellites GOES - 12, GOES - EAST, QuikSCAT, Terra and Aqua, the transborder espacial Atlantis and the international space station.

Finally, a structure model was created that has in calculation the eye's radii, the maximum winds radii and the last isobar's radii closed. The models to determinate the velocities, pressures and wave fields was reformulated having in account structure's new model. The model of the atmospheric pressure's profile it is delimited for smallest pressures or equals that the closed value of the pressure in the last isobar and they obtain two analytical expressions in the waves model starting from the USACE's model to estimate of a more simple form the waves field of a quasi stationary hurricane, also equations was formulated to determine the waves height and the period in a point out of the maximum winds radii for a moving hurricane

# Índice

Introducción	1
<b>1. Formación, estructura y modelos empíricos</b>	<b>5</b>
1.1. Origen y evolución	5
1.1.1. Evolución de un huracán	7
1.2. Características principales	9
1.3. Efectos asociados	11
1.4. Estructura de un huracán	11
1.4.1. Estructura Física	12
1.4.2. Huracán anular	13
1.4.3. El lado derecho del huracán	15
1.4.4. Modelos de estructura de huracán	15
1.4.5. Modelos matemáticos	16
1.5. Modelos del campo de velocidades del viento y del campo de presiones	17
1.5.1. Modelos de predicción de la velocidad del viento	18
1.5.2. Asimetría en el campo de viento	21
1.5.3. Modelos de predicción del campo de presiones	21
1.6. Modelo de predicción del oleaje	22
1.7. Pronóstico	27
1.7.1. Costos y beneficios del mejoramiento de los pronósticos	28
1.7.2. Selección del método de pronóstico	28
1.7.3. Pronósticos cuantitativos	29

1.7.4.	Pronóstico de series de tiempo . . . . .	29
1.7.5.	Estimación de las componentes de una serie de tiempo . . . . .	33
<b>2.</b>	<b>Materiales y métodos</b>	<b>34</b>
2.1.	Imágenes de satélites . . . . .	34
2.2.	Herramientas computacionales . . . . .	36
2.3.	Determinación de la estructura de un huracán . . . . .	37
2.4.	Ajustes de curvas y superficies . . . . .	37
2.5.	Simulaciones de los campos de velocidades y de presiones . . . . .	37
2.6.	Descomposición de series de tiempo de $V_{Max}$ y $P_o$ . . . . .	39
2.7.	Correlación de Pearson . . . . .	39
2.7.1.	Error standard de estimación . . . . .	41
2.8.	Correlación por rangos de Spearman . . . . .	42
2.9.	Coefficiente de determinación . . . . .	43
2.9.1.	Coefficiente de determinación ajustado . . . . .	43
2.10.	Análisis de los residuos . . . . .	44
<b>3.</b>	<b>Modelo de huracán</b>	<b>45</b>
3.1.	Modelo de predicción del campo de presiones . . . . .	45
3.2.	Estructura de un huracán . . . . .	47
3.3.	Modelo de predicción del campo de velocidades . . . . .	52
3.4.	Modelo de predicción del oleaje . . . . .	55
3.4.1.	Modelo de Olas para un huracán cuasiestacionario . . . . .	55

3.4.2.	Modelo de Olas para un huracán en movimiento . . . . .	57
3.4.3.	Modelo simple de olas . . . . .	59
3.4.4.	Relación entre $H_s$ y $T_s$ . . . . .	60
3.4.5.	Modelo de olas y relación entre $H_s$ y $T_s$ cuando $H_s > 3$ m . . . . .	60
3.4.6.	Relación entre $T_s$ y $T_a$ . . . . .	62
3.4.7.	Otras formas para estimar $T_a$ . . . . .	62
3.5.	Utilización de Censur 1 en el pronósticos de las series de tiempo de $V_{Max}$ y de $P_o$ . . . . .	64
3.5.1.	Análisis de las series de $V_{Max}$ y de $P_o$ para el huracán Ike. . . . .	65
3.5.2.	Análisis de las series de $V_{Max}$ y de $P_o$ para el huracán Igor. . . . .	66
3.5.3.	Análisis de las series de $V_{Max}$ y de $P_o$ para los huracanes Gustav, Dean, Ida, Dennis e Iván. . . . .	67
3.5.4.	Mejoramiento del pronóstico de las series de $V_{Max}$ y $P_o$ . . . . .	68
	Conclusiones	76
	Recomendaciones	77
	Bibliografía	78

# Introducción

En el océano Atlántico Norte, la temporada de huracanes [64] se extiende desde el 1 de junio hasta el 30 de noviembre, en ese período son observados alrededor de 100 perturbaciones ciclónicas con potencialidad de desarrollo, pero de ellos, como promedio 10 alcanzan el estadio de tormenta tropical y solo seis se convierten en huracán. Al comienzo de la temporada ciclónica, el Caribe occidental y el golfo de México son las principales zonas de formación; en julio y agosto las formaciones ocurren hacia el Este y ya a comienzos de septiembre muchos de los huracanes se originan tan al Este como los mares alrededor de las islas de Cabo Verde, muy cercanas al continente africano, y en octubre una gran parte de los ciclones nacen nuevamente en el Caribe y el golfo de México.

Generalizando, se tiene que en un año típico, sobre las aguas cálidas de los trópicos se forman alrededor de 80 tormentas tropicales, las que afectan a unos 50 países y causan aproximadamente 20000 muertes y daños económicos valorados en unos 10 mil millones de dólares.

En la actualidad en muchos países las muertes debidas a los huracanes han disminuido considerablemente, entre otras cosas, gracias a los avances alcanzados en el estudio y la predicción de estos fenómenos, los avisos oportunos sobre la aproximación de los huracanes y las evacuaciones precisas.

Cuando los huracanes se forman en el Atlántico Norte, vienen desde Este y generalmente pasan por el Norte de Oriente o entre el Sur de Oriente y el Norte de Jamaica o por el Sur de Jamaica. La zona de estudio de esta investigación comprende el Atlántico Norte, el Caribe y el Golfo de México. De las trayectorias de huracanes que pasan por Cuba oriental, 2 de las más probables están en nuestra zona de estudio.

Con la experiencia de haber enfrentado más de 30 huracanes en las 2 últimas décadas, nuestro país siempre está vigilante y prevenido en las temporadas ciclónicas como parte de una estrategia nacional para la reducción de desastres. Tal memoria histórica constituye una herramienta importante frente a estos inevitables fenómenos naturales, cuya susceptibilidad está condicionada por la ubicación geográfica de Cuba en el Caribe y su insularidad.

En los últimos 7 años, está fresco el recuerdo del Iván en el 2004, el Dennis en el 2005, el Dean en el 2007, e Ida en el 2009, que aunque directamente no pasaron sobre nuestro territorio, se sufrieron pérdidas materiales; y más fresco aún está Ike en el 2008 que si atravesó a nuestro

país y produjo cuantiosas pérdidas materiales. Las enseñanzas históricas y las medidas contra las catástrofes son como savia dentro de las actividades que se acometen para reducir las brechas en función de minimizar los daños por los meteoros.

Nuestro país no escatima en prepararse y adelantarse a la ocurrencia de algún ciclón tropical, pues proteger a las personas y a la infraestructura socioeconómica es una prioridad nacional del sistema de la Defensa Civil.

Los modelos de velocidad de los vientos huracanados tienen uno o dos perfiles, los de un perfil tienen una sola ecuación que permite determinar la velocidad del viento hasta cualquier punto por muy alejado que esté del centro; el de dos perfiles tiene dos ecuaciones, una que permite estimar la velocidad del viento en cualquier punto para distancias menores que el radio de vientos máximos y otra para calcular la velocidad del viento a cualquier distancia a partir del radio de vientos máximos. Ambos tipos de modelos parten desde el centro de huracán sin tener en cuenta que para distancias menores que el radio del ojo la velocidad del viento es cero. La estructura del huracán está mal concebida, no tienen en cuenta que en realidad el perfil del viento es a partir del radio del ojo hasta el radio de vientos máximos o hasta el radio de la última isobara cerrada, en dependencia si es un modelo de uno o dos perfiles, además tampoco tienen en cuenta que a partir del radio de la última isobara cerrada el campo de viento se vuelve más desorganizado a medida que nos alejamos.

En el caso de los modelos de presión atmosférica, todos los modelos empíricos son simétricos, ninguno de ellos tienen en cuenta que la presión atmosférica está limitada por el valor de la presión en la última isobara cerrada, o sea, el campo de presiones solo puede determinarse hasta ésta presión. En cuanto a los modelos de olas es necesario reformularlos teniendo en cuenta todo lo mencionado con anterioridad.

Todo esto se puede completar utilizando modelos de series de tiempo para pronosticar la velocidad de los vientos máximos o la presión en el centro del ojo, que son, junto a la latitud geográfica y al radio de vientos máximos, los parámetros fundamentales para realizar una caracterización completa de las magnitudes físicas asociadas a un huracán.

En la ciencia moderna el pensamiento humano llega tanto al conocimiento dialéctico, a la concepción dialéctica del conocimiento, que se manifiesta especialmente en la relación dialéctica de la verdad absoluta y la verdad relativa, de lo racional y lo empírico, de lo abstracto y lo concreto, del punto de partida y el resultado, del postulado y la demostración, como a la comprensión dialéctica de la realidad objetiva [36].

La verdad relativa capta aquel lado o aspecto presente en el conocimiento integrado por los elementos finitos del mismo, que reproducen al objeto sólo de manera parcial y aproximada, en tanto expresión de un determinado grado o nivel histórico logrado por el conocimiento. Lo relativo de la verdad nos evidencia que todo conocimiento se corresponde con el objeto siempre de manera incompleta e inexacta, que es susceptible de ser completado, precisado o incluso refutado.

Esto nos indica la estrecha correlación existente entre la verdad absoluta y la relativa. Todo conocimiento verdadero posee aspectos absolutos y relativos. Lo anterior responde al hecho de que lo absoluto de la verdad viene dado por la acumulación y suma de las verdades relativas, a la vez que lo relativo de la verdad es absoluto en el sentido de que refleja un contenido objetivo de manera adecuada.

Las verdades consideradas absolutas en una época determinada pueden convertirse en relativas posteriormente, lo que no implica que dejen de ser correctas y sean erróneas [61].

En muchos casos los modelos empíricos se vuelven bastantes inexactos, pero no significan que pierdan validez, solo pasan a ser verdad relativa al tiempo en que se formularon, su exactitud se puede mejorar un muchos casos volviendo a estimar sus coeficientes para un número mayor de datos experimentales.

Si se define un modelo para determinar la estructura de un huracán que se asemeje más a la realidad y a partir de éste se reformulan los modelos de los campos de velocidades, de presiones y de olas; y además se demuestra que las velocidad de vientos máximos y la presión central de un huracán pueden ser estimadas con fiabilidad a partir de modelos de series de tiempo, entonces aumentaría la exactitud del pronósticos de los huracanes y ésto nos llevaría a minimizar las pérdidas humanas y materiales.

Por todo lo antes dicho se diseñan un conjunto de investigaciones en virtud de mejorar la precisión de los pronósticos, que tiene como objetivo: Reformular los modelos para mejorar la estimación de las magnitudes físicas asociadas a un huracán.

Y con los siguientes objetivos particulares:

1. Crear un modelo para definir la estructura de un huracán que se asemeje más a la realidad.
2. Reformular los modelos para la estimación de los campos de vientos, presiones y olas.



3. Probar la eficiencia de método X11 para el pronóstico de las series temporales de velocidad máxima del viento, y de la presión atmosférica en el ojo.

Este trabajo está estructurado en 3 capítulos, el capítulo I, "Formación, estructura y modelos empíricos", se abordan los tópicos básicos encaminados a ubicar la situación actual sobre los modelos existentes sobre la estimación de las magnitudes físicas asociadas a los huracanes y del pronóstico de series de tiempo con X11; en el capítulo II, "Materiales y métodos", se muestran las metodologías estadísticas empleadas para la determinación de los nuevos modelos matemáticos y los materiales utilizados para la realización de este trabajo, como son los datos experimentales de las magnitudes físicas asociadas a un huracán y de imágenes de satélites y por último en el capítulo III, "Modelos de huracán", se exponen los resultados de nuevos modelos para estimar los campos de velocidades del viento, de presiones y de olas generadas por un huracán y su comparación con otros modelos existentes.

# 1. Formación, estructura y modelos empíricos

Un Ciclón tropical [64] es un ciclón no frontal de escala sinóptica, de núcleo caliente, que se origina sobre aguas tropicales o subtropicales, dotado de convección profunda organizada y circulación cerrada de los vientos de superficie alrededor de un centro bien definido. Un Huracán [64] es un ciclón tropical en el que el viento medio máximo en superficie (velocidad media en un minuto) es de  $118 \text{ km/h}$  o superior.

En el Atlántico los conocemos como Huracanes, en gran parte del Pacífico como Tifones, en las Islas Filipinas y China como Baguíos, en Australia como Willy-Willies y en el océano Indico como Ciclones[10]. Todos ellos son miembros de una misma familia de fenómenos meteorológicos de seria repercusión ambiental, económica y social. Aunque en violencia son superados por los tornados, cubren un área mucho mayor, se desplazan sobre mayores distancias y duran mucho más, de modo que su efecto destructivo supera por mucho a los del tornado. Es la más peligrosa y destructiva de todas las tormentas en la Tierra.

En general, cubre un área mayor que las tormentas ordinarias que constituyen nuestro tiempo meteorológico, pero no puede igualar a la furia concentrada de un tornado, combina violencia y área de acción para generar devastación a lo largo de una extensa trayectoria, sus vientos pueden alcanzar más de  $300 \text{ km/h}$  ( $83 \text{ m/s}$ ) y algunas veces desprende un aluvión de tornados de sus bordes. Lo que hace a un huracán muy peligroso es el fuerte viento, las grandes olas que se acumulan en el mar, las inundaciones por intensas lluvias y los deslaves en zonas montañosas. Los ejemplos registrados hasta el presente hablan elocuentemente de su poder destructivo material y humano.

## 1.1. Origen y evolución

Como las temperaturas del mar tienen que estar a más de  $26,7 \text{ }^\circ\text{C}$ , los huracanes se van a formar en diferentes lugares en diferentes meses del año, por lo general en la época más calurosa. Los huracanes ocurren en todas las áreas oceánicas tropicales excepto el Atlántico Sur y el Pacífico Sur en las costas de América.

El huracán necesita mucho océano para cobrar fuerza y para nutrirse, se mueve con la rotación de la tierra hacia el Oeste, esto implica que muchas veces se va a formar donde pueda correr sin ser interrumpido y debilitado por tierra firme. La mayoría de los huracanes que nacen en el Caribe y el golfo de México por lo general se mueven hacia el Norte y hacia el

Nordeste. Hay ondas tropicales formándose todo el tiempo, pero no todas tienen condiciones y el espacio para cobrar fuerza

Se sabe que la principal fuente de energía proviene del calor latente de vaporización del agua. Para que el mar pueda liberar una cantidad suficiente de calor se necesita que se desarrolle un proceso de convección en la atmósfera, asociado al movimiento ascendente del aire y con giro ciclónico en el plano horizontal; es decir, se necesita una combinación apropiada en los procesos dinámicos y termodinámicos del océano y de la atmósfera, para la formación y desarrollo de los huracanes. Conforme los rayos del sol inciden sobre la superficie oceánica, el aire húmedo se calienta y se eleva, favoreciendo una reducción en la presión atmosférica y una circulación ciclónica alrededor del núcleo cálido del sistema. El aire en ascenso se expande y se enfría, favoreciendo la condensación del vapor de agua y liberando grandes cantidades de calor latente al medio ambiente, retroalimentando al sistema. Las principales condiciones para la formación de huracanes son las siguientes:

1. Suficiente energía latente del océano. La principal fuente de energía para la formación y desarrollo de un huracán es el calor que extrae del océano. Cuando la temperatura superficial del mar, es mayor de  $26,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  se propicia una diferencia de temperaturas entre el agua y el aire que genera gran transferencia de calor latente y sensible del océano a la atmósfera. Cuando el huracán se desplaza por regiones de temperaturas menores de  $26,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la pérdida de energía es grande y el huracán tiende a disiparse. Esta es una de las razones por las que no se observa nacimiento de huracanes sobre las regiones dominadas por corrientes oceánicas frías, como la corriente de Perú en América del Sur. La influencia del océano, según han indicado algunos autores, puede extenderse hasta los 60 m o hasta la profundidad donde la temperatura tenga el valor de  $26,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
2. Fuerte vorticidad relativa en niveles superficiales. Se ha observado que los ciclones tropicales solo se forman en regiones donde existe movimiento ciclónico y convergencia de los vientos en la atmósfera baja. Mientras más grande sea el movimiento giratorio (vorticidad) del aire, mayor potencial de formación para huracanes (o mayor ciclogénesis). Esto favorece una alta convergencia y un mayor movimiento ascendente de las masas de aire.
3. Fuerte efecto de Coriolis. El mayor número de huracanes se forman entre los  $10$  y  $15^{\circ}$  de latitud Norte, donde el efecto de Coriolis se hace importante en el giro natural del movimiento de las parcelas de aire. Este factor es muy importante para la formación de huracanes, pues sirve como condición inicial en el giro ciclónico del viento en las zonas de convergencia.

4. Débil cizalladura vertical del viento horizontal entre la baja y alta troposfera. Se ha podido observar que la mayor cantidad de huracanes se forman en regiones de débil cizalladura vertical del viento. A mayor cizalladura vertical se tendrá una mayor turbulencia e inestabilidad dinámica que propiciará una gran disipación (o ventilación) de las nubes cúmulos. Esto hará que el calor (latente y sensible) dispuesto para alimentar la perturbación sea distribuido en una mayor área (o volumen) y en consecuencia la energía disponible por unidad de volumen será menor y se tendrán menores probabilidades de tener desarrollo de la perturbación a huracán. En caso contrario, es decir, si el cizalladura vertical del viento es débil, entonces se podrá tener una gran energía potencial para alimentar el desarrollo del huracán. Por otro lado, al aumentar el contenido de vapor de agua por unidad de volumen, entonces esto dará por consecuencia una disminución gradual en la presión superficial que ha su vez generará una mayor convergencia y vorticidad ciclónica (mecanismo desestabilizador).
5. Suficiente gradiente vertical de temperatura. En general, en regiones de convección intensa, en donde se forman nubes de tipo cumulonimbus, se tendrá un gradiente vertical de temperatura, entre los niveles troposféricos altos y los bajos, lo cual permite un transporte continuo de calor de la superficie del mar a niveles superiores en la troposfera. Por supuesto que, mientras mayor sea este gradiente, significará que la atmósfera estará ganando calor y energía potencial para alimentar el desarrollo del huracán.
6. Alto contenido de vapor de agua en la baja y mediana troposfera. Cuando la región de la troposfera media se encuentra con un alto contenido de humedad (humedad relativa mayor que 70 %), se favorece la presión baja superficial que, a su vez, favorece el movimiento vertical y la formación de convección.

La génesis de ciclones tropicales, no solo depende de las características oceánicas y atmosféricas, sino que también los continentes pueden tener una influencia importante. La interacción del viento con las montañas, puede dar como resultado un fenómeno conocido como ondas de sotavento, donde conforme el aire pasa la montaña, se va generando un giro en el viento.

### **1.1.1. Evolución de un huracán**

Se han utilizado varios términos para describir la evolución de un huracán, Frank en [21] propuso los siguientes:

**Nacimiento o génesis(depresión tropical [64]):** Primero se forma una depresión atmosférica, que se caracteriza porque el viento empieza a aumentar en superficie con una velocidad máxima media (en 1 Min) de  $62 \text{ km/h}$ ; las nubes comienzan a organizarse y la presión atmosférica desciende.

**Desarrollo (tormenta tropical [64]):** La depresión tropical crece y adquiere la característica de tormenta tropical, lo que significa que el viento continúa aumentando a una velocidad máxima entre  $63$  y  $117 \text{ km/h}$  inclusive, las nubes se distribuyen en forma de espiral y empieza a formarse un ojo pequeño, casi siempre en forma circular y la presión puede reducirse a menos de  $1000 \text{ hPa}$ . En esta fase es cuando recibe un nombre.

**Madurez o intensificación (huracán):** Se intensifica la tormenta tropical y adquiere una característica de huracán, es decir, el viento alcanza el máximo de velocidad, pudiendo llegar hasta  $370 \text{ km/h}$ , y el área nubosa puede abarcar una extensión entre los  $500$  y  $900 \text{ km}$  de diámetro, produciendo extensas precipitaciones. El ojo [64] del huracán cuyo diámetro varía entre  $20$  y  $60 \text{ km}$ , es un área de calma libre de nubes.

Con condiciones favorables, generalmente los huracanes se intensificarán e iniciarán un movimiento de traslación hacia el Oeste o Nordeste, hasta que se modifiquen las condiciones, lo que causará que altere su curso y pierda fuerza, como sucede al acercarse a tierra o a zonas de aguas frías. Una vez que el huracán se ha organizado (inicio de circulación sobre un centro), hay algunos indicadores que nos muestran su estado, el equivalente a sus “signos vitales” [24]:

- Presión mínima central: cuanto más baja es la presión, más intensa es la tormenta, tiene un centro mejor definido y causa una mayor sobreelevación de mar.
- Velocidad de rotación: Velocidad máxima de sus vientos cerca del centro. Se dividen en vientos sostenidos y en ráfagas (instantáneos). Conforme se alejan del centro bajan sus velocidades.
- Velocidad de traslación: Velocidad con la que el centro de la tormenta se mueve sobre una ruta aparente, en base a esta velocidad y dirección podemos aproximar el tiempo que le tomará llegar a un sitio.
- Precipitación: Cantidad de lluvia que cae en la zona más intensa de la tormenta.
- Diámetro del ojo: Las tormentas de gran intensidad desarrollan un centro de rotación definido por un anillo de nubosidad, donde el centro se mantiene despejado, el tamaño y comportamiento de este anillo nos indica la organización del huracán.

- Bandas de alimentación: Espirales de nubosidad que giran en torno al centro del huracán, son más evidentes en tormentas fuertes y contienen gran cantidad de lluvia.
- La zona más intensa de los huracanes corresponde con su parte superior derecha o Cuadrante 1, que es donde se concentra la mayor cantidad de lluvia.

Las tormentas tropicales se catalogan en base a la velocidad máxima de su viento, en base a la escala Saffir Simpson, que se emplea desde los años 70 (tabla 1).

Tabla 1: Escala de intensidad de huracanes (Saffir- Simpson)

Categoría	Velocidad del viento ( <i>km/h</i> )
1	118 - 153
2	154 - 177
3	178 - 209
4	210 - 250
5	Más de 250

**Disipación (fase final):** El huracán es mantenido y nutrido por el cálido océano hasta que se adentra en aguas más frías o hasta que entra en tierra firme, situación ésta última en la que el huracán pierde rápidamente su energía y empieza a disolverse debido a la fricción que causa su traslación sobre el terreno.

## 1.2. Características principales

Los huracanes constituyen una clase especial de grandes sistemas de vientos en rotación y poseen características únicas de circulación (figura 1), completamente distintas de los sistemas ciclónicos típicos de latitudes medias y de los tornados de escala menor, de las trombas marinas y de los remolinos de polvo.

Los huracanes se forman y se intensifican cuando están situados sobre océanos tropicales o subtropicales en ambos hemisferios, donde la fuerza de Coriolis es suficientemente fuerte para que se inicie el movimiento de rotación alrededor del centro de baja presión y cuyas temperaturas de la superficie del agua sea de  $26,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  o más cálidas. Las regiones matrices no son estables en cuanto a su ubicación, ya que ésta obedece a la posición de los centros de máximo calentamiento marítimo, los que a su vez están influidos por las corrientes frías

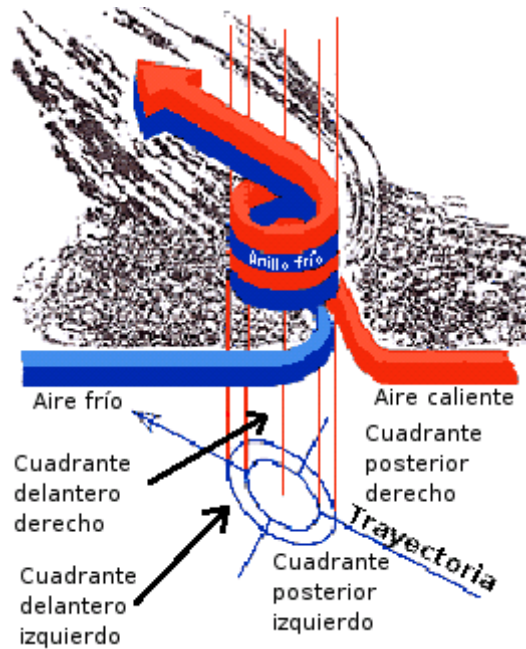


Figura 1: Circulación ciclónica

y la contracorriente cálida ecuatorial. Además no se mantienen por si mismos sobre tierra, independientemente de la temperatura superficial.

Tienen un núcleo central cálido, se desarrollan en entornos de débil cizalladura del viento y su parte central se inclina solo ligeramente. Los vientos más fuertes se dan en los niveles bajos, donde el contacto con la superficie terrestre origina una fuerte disipación por rozamiento. Esta disipación aumenta con la potencia de orden dos de la velocidad del viento y por esta razón los huracanes pueden ser muy destructivos.

El rozamiento induce en el huracán limitaciones de masa; el flujo hacia el interior en niveles bajos se dirige hacia arriba en las nubes las nubes que forman la pared del ojo, rodeando primero el centro y luego hacia afuera en los niveles superiores. La circulación radial necesaria hacia adentro, hacia arriba y hacia afuera, precisa que las nubes que constituyen la pared del ojo mantengan un gradiente vertical condicionalmente inestable.

Son una combinación notablemente complicada de procesos mixtos de temperatura y humedad. En estos procesos físicos se tienen interacciones de los sistemas nubosos con los océanos y con las superficies terrestres sobre las que se mueven estos ciclones tropicales.

Los huracanes de mayor intensidad mantienen en las paredes del ojo una convección más profunda; esto se realiza en primer lugar situando la mayor parte del calentamiento

(condensación) en el núcleo interior justamente en la pared del ojo y, en segundo lugar, por las corrientes ascendentes de la pared de ojo en los niveles superiores.

### 1.3. Efectos asociados

Los efectos asociados a los huracanes podemos dividirlos en dos tipos:

**Directos:** Los eventos asociados de manera directa al paso de un huracán son los vientos y las lluvias que acompañan a las bandas de nublados. Durante un huracán pueden caer un promedio de 150 a 250 mm de lluvia en un día, aunque pueden llegar a ser mayores [13].

**Indirectos:** La marejada ciclónica, el oleaje, las inundaciones y deslizamientos son fenómenos asociados a eventos indirectos [55].

Las pérdidas por los efectos asociados a los huracanes, no necesariamente son proporcionales a la categoría del mismo, en la historia se han encontrado como tormentas tropicales han causado más muertes en determinadas áreas, Centroamérica, por ejemplo, que huracanes de categoría 3 en otras. Lo anterior se explica, en gran medida, por los inapropiados planes de alerta y mitigación de las regiones.

### 1.4. Estructura de un huracán

Las condiciones oceánicas en el Caribe están cambiando constantemente, tales como: el aumento de la temperatura de la superficie del mar, el aumento del nivel del mar y los patrones de circulación de las aguas [49]. Las proyecciones de las condiciones atmosféricas y oceánicas que se citan en [20] para los próximos años en el Caribe, podrían producir más frecuentemente las condiciones propicias para que se produzcan ciclones tropicales [19, 9]. De manera que la probabilidad de ser impactados directamente por un huracán podría aumentar, por éstas razones, es muy importante conocer las características de los huracanes.

El huracán tiene un centro que es más cálido que el aire que lo rodea. Recibe su energía de la condensación del vapor de agua. El vapor (originado por la evaporación del mar) comienza a expandirse y a ascender rápidamente, este vapor se condensa, liberándose gran cantidad de energía y originándose enormes nubes (que pueden sobrepasar los 15000 m de altura) y





Figura 2: Nubes originadas por la condensación del vapor

abundantes lluvias. Estos fenómenos son claramente distinguibles en las imágenes satelitales (figura 2).

En la zona inferior de los huracanes (hasta los  $3000\text{ m}$ ) el aire es succionado hacia el centro de éste. En los niveles medios hay circulación ciclónica de aire ascendente (gira alrededor del centro) y en la parte superior del huracán, sobre los  $6000\text{ m}$  aproximadamente, el aire se mueve hacia afuera.

#### 1.4.1. Estructura Física

Todos de los autores proponen la siguiente estructura para un huracán:

**Ojo:** Es un área de relativa calma en el centro de un huracán, que se extiende desde el nivel del mar hasta niveles altos de la atmósfera y está rodeado por una pared de nubes cumulonimbus (figuras 3 y 4). El ojo es lo que más llama la atención al observar el huracán desde un satélite. Mientras mayor es el huracán tiende a ser más nítido su ojo, salvo que se formen nubes altas que impidan su visualización. Su diámetro puede medir entre  $20$  y  $60\text{ km}$  y su tamaño no siempre es proporcional a la magnitud del huracán, aunque los más grandes se han visto en huracanes de categoría 4 [50].

**Pared del ojo:** Es la densa pared de nubes cumulonimbus que rodea al ojo (figuras 3 y 4). Allí se encuentran dos fuerzas opuestas: la fuerza del aire que se mueve hacia el centro y la fuerza centrífuga, hacia afuera. En la pared del ojo se registran los vientos más intensos y allí se originan los tornados. La presencia del ojo y la pared diferencian al

huracán de una tormenta tropical (que no tiene ojo y cuyos vientos son menos intensos como hemos visto anteriormente).

**Bandas de lluvias en espiral:** Las bandas de lluvia externas del huracán (cuyos vientos a menudo alcanzan intensidad de huracán o de tormenta tropical) pueden extenderse a varios cientos de kilómetros del centro (figura 3). Estas densas bandas de cumulonimbus, que rotan lentamente en espiral en sentido opuesto al de las agujas del reloj en el hemisferio norte, pueden medir de unos pocos kilómetros a docenas de kilómetros de ancho y de 80 *km* a más de 450 *km* de longitud. A veces, estas bandas y el ojo quedan ocultos por las nubes altas (los cirrus de los cumulonimbus) lo que hace difícil su seguimiento a través de las imágenes satelitales. Las bandas de lluvia del huracán Andrew (1992) sólo se extendían a 160 *km* del ojo, en tanto que las del huracán Gilbert (1988) se extendían a más de 800 *km*.



Figura 3: Estructura de un huracán

#### 1.4.2. Huracán anular

Un huracán anular es un ciclón tropical que presenta un gran ojo simétrico rodeado por un desarrollado anillo de intensa convección y que no es propenso a fluctuaciones de intensidad relacionadas con el ciclo de reemplazo de las paredes del ojo que se observan normalmente en los ciclones tropicales intensos. Los huracanes anulares pueden identificarse fácilmente a través de las imágenes satelitales, puesto que carecen de las bandas de lluvia en forma de espiral características de los sistemas tropicales. Además, este tipo de huracanes tiende a mantener su intensidad, incluso cuando se encuentran en un medio hostil que favorecería la

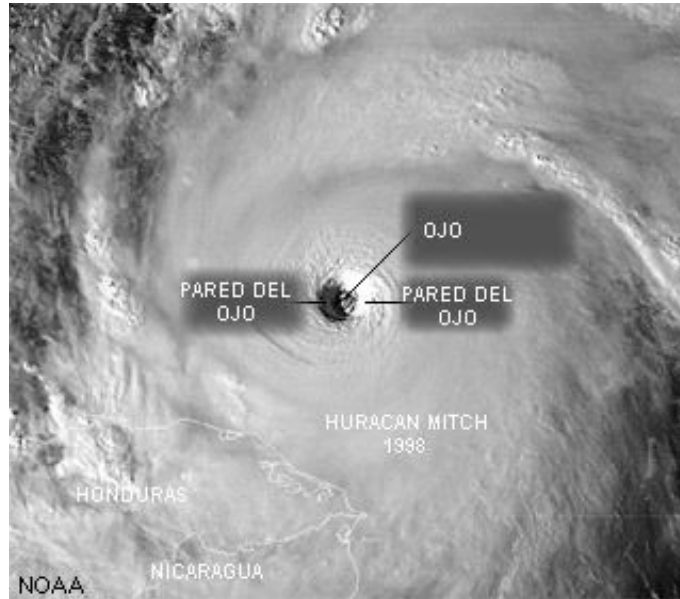


Figura 4: Imágen satelital del Ojo y la pared del ojo de un huracán

disipación de cualquier otro ciclón, como una temperatura de la superficie del mar inferior a  $26,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  o a la presencia de cizalladura del viento. Los meteorólogos han comenzado a conocer hace poco este fenómeno, por lo que se conoce muy poco sobre sus tendencias y se presentan dificultades para elaborar su pronóstico.



Figura 5: Imágen satelital del huracán anular Isabel

Los huracanes anulares son axisimétricos [35], es decir, muy circulares en apariencia y no presentan bandas en forma de espiral, como lo hace cualquier otro ciclón tropical. Se debilitan más lentamente que los sistemas no anulares de intensidad similar luego de alcanzar su pico de intensidad máxima y no se ven afectados tanto por las variaciones diurnas como por los demás sistemas tropicales. Presentan una intensidad del viento superior a los  $155\text{ km/h}$ . Sin embargo, sólo presentan estas características durante una parte de su vida.

Las estadísticas muestran que frecuentemente se subestiman las velocidades del viento de un huracán anular después de su pico de intensidad. Este error ocurre porque este tipo de huracán mantiene su intensidad por un tiempo mayor al considerado normal para estos sistemas ciclónicos. Los huracanes anulares son muy raros. Menos del 1% de los ciclones tropicales del océano Atlántico pueden clasificarse como huracanes anulares, aunque muchos pueden exhibir sus características. Son igualmente raros, pero más frecuentes en el océano Pacífico oriental ,alrededor del 3%.

### 1.4.3. El lado derecho del huracán

Como regla general el lado derecho del huracán (relativo a la dirección de su desplazamiento) es la parte más peligrosa del mismo debido a que a su velocidad se le suma la velocidad de la corriente de viento (figura 6) en el cual éste está embebido. La mayor intensidad de los vientos en el lado derecho aumenta el nivel de la marejada ciclónica. También en esta zona suele ser más común que se formen tornados. En los huracanes del Caribe, el área de vientos más fuertes se encuentra en la parte superior derecha o cuadrante 1, ya que al Nordeste se encuentra el anticiclón del Atlántico Norte y el gradiente de presión es mayor. En el hemisferio Sur, el máximo está en la parte inferior derecha o cuadrante 2. En los huracanes que se forman al Oeste de México no es fácil detectar un máximo de vientos, debido a que estos huracanes no se acercan demasiado al anticiclón del Pacífico.

### 1.4.4. Modelos de estructura de huracán

Los parámetros principales en la estructura de un huracán son el radio de ojo  $R$  (se mide en  $km$ ), que es la distancia entre el centro del ojo del huracán y el borde interior de la pared

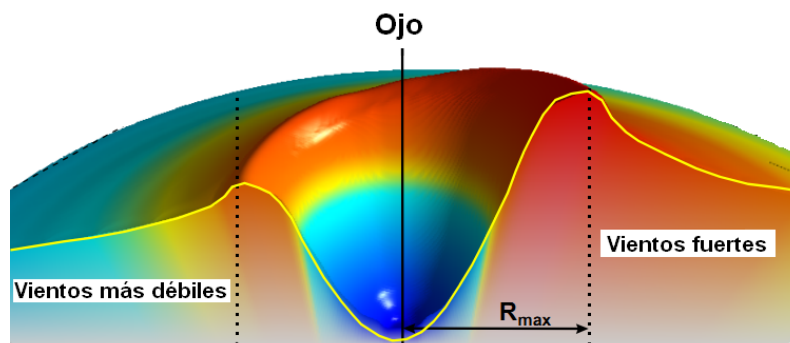


Figura 6: Asimetría del campo de vientos

del ojo (figura 7); y el radio de vientos máximos  $R_{Max}$  (se mide en  $km$ ), que se define como la distancia entre el centro del ojo del huracán y su banda de los vientos más fuertes (figura 7). Se considera un parámetro importante en dinámica atmosférica y el pronóstico [32].

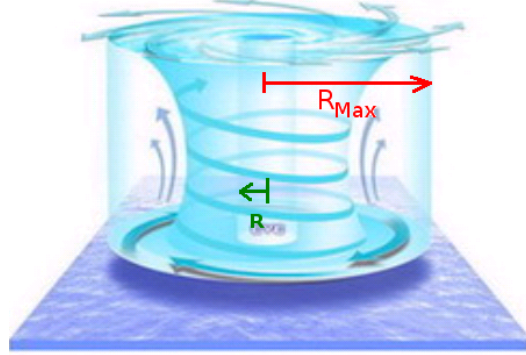


Figura 7: Representación de  $R$  y  $R_{Max}$

Ni  $R_{Max}$ , ni  $R$  son parámetros incluidos en los registros de NOAA (Administración Nacional de la Atmósfera y el Océano), son valores pocos reportados, usualmente se determinan con vuelos de reconocimiento de aviones caza huracanes, con software procesando imágenes IR de satélites o de radares o estimados a través de modelos matemáticos.

#### 1.4.5. Modelos matemáticos

Entre los modelos matemáticos utilizados en la actualidad tenemos:

1. Kossin et al:

$$R_{Max} = 2,8068 + 0,8361R \quad (1)$$

donde  $R$  se determina a partir de imágenes de satélites IR obtenidas de la NOAA utilizando software y midiendo las distancia entre isotermas en el tope de la nube que cubre el ojo del huracán a lo largo de los cuatro puntos cardinales: Norte, Este, Sur y Oeste; según está descrito en [37].

2. Vickery et al:

$$R_{Max} = e^{(2,636 - 5,086 \cdot 10^{-5} \Delta P + 3,94899 \cdot 10^{-2} \varphi)} \quad (2)$$

donde:

$\Delta$  es el gradiente de la presión y se define como  $\Delta P = P_n - P_o$

$P_n$  Es la presión atmosférica normal, 1013  $hPa$ .

$P_o$  Es la presión en el ojo del huracán en  $hPa$ .

$\varphi$  Es la latitud geográfica en grados

Este modelo fue desarrollado por Vickery et al en el 2000 [74] y se caracteriza por tener un buen ajuste de los datos medidos en la cuenca del Atlántico, además de estar recomendado por Landsea et al [41] en el proyecto de reanálisis de la NOAA.

3. Vickery y Wadhera:

$$R_{Max} = \mathbf{E}^{(3,015-6,291 \cdot 10^{-5} \Delta P^2 + 0,0337\varphi)} \quad (3)$$

Desarrollado para todos los huracanes por Vickery y Wadhera en el 2008 [75], en este modelo se tuvieron en cuenta los datos del nivel de vuelo más los datos de H\*Wind, para una  $P_o < 980 hPa$ .

4. Willoughby y Rhan [77]:

$$R_{Max} = 46,29 \mathbf{E}^{(-0,0153V_{Max} + 0,0166\varphi)} \quad (4)$$

donde:

$V_{Max}$  es la velocidad de vientos máximos

5. Silva et al [66]:

$$R_{Max} = 0,4785P_o - 413,01 \quad (5)$$

6. Portela y Salas (1988)

$$R_{Max} = 0,456 (P_o - 900) + 0,685\varphi + 6,4 \quad (6)$$

Determinado con datos de los aviones de reconocimiento [58].

## 1.5. Modelos del campo de velocidades del viento y del campo de presiones

Entre los modelos de vientos más utilizados para el estudio de un huracán se encuentran los modelos de vientos paramétricos donde se estiman la velocidad del viento  $V_r$  y la presión atmosférica  $P_r$  en función de la distancia  $r$  (se mide en  $km$ ) a partir del centro del ojo del huracán, estos modelos están basados en la información proporcionada en los boletines meteorológicos de la NOAA, como son la posición del ojo (longitud  $\lambda$  y latitud  $\varphi$ ),  $V_{Max}$ ,

$P_o$  y de otros parámetros estimados a partir de modelos matemáticos (acápite 1.4.5), como  $R_{Max}$ .

Estos parámetros son importantes tanto para la simulación del oleaje asociado a los huracanes [78], como para los modelos de pronóstico de las trayectoria de los huracanes, y de alguna manera, para orientar las formulaciones de políticas públicas nacionales sobre la prevención o la mitigación de los desastres naturales, todo esto requiere la utilización de un modelo de huracán que pueda dar una descripción completa de la variación espacial y temporal del campo de velocidades y del campo de presiones lo más exacto posible, este es uno de los problemas, según [67], que está lejos de resolverse y uno de los factores de errores en el pronóstico de olas y marejadas de tormenta.

### 1.5.1. Modelos de predicción de la velocidad del viento

Los modelos de viento dan una descripción completa de la variación espacial del campo de viento generado por un huracán. En la actualidad los modelos de vientos más utilizados son los paramétricos que solo necesitan de los parámetros reportados en los boletines de la NOAA.

1. SPLASH [34]. El perfil de viento de este modelo está dado por:

$$V_r = V_{Max} \left( \frac{2R_{Max}r}{R_{Max}^2 + r^2} \right) \quad (7)$$

donde:

$V_r$  es la velocidad del viento a una distancia  $r$

2. Collins - Viehnaman [14], según se presentó en [60], su perfil de viento está dado por:

$$V_r = \begin{cases} 0 & \text{para } r < \frac{1}{3}R_{Max} \\ 1,5V_{Max} \left( \frac{r}{R_{Max}} - \frac{1}{3} \right) & \text{para } \frac{1}{3}R_{Max} \leq r < R_{Max} \\ \left( \frac{V_{Max}}{C_1 r^k} \right) \log \left( \frac{R_{Max}}{C_2 r^m} \right) & \text{para } r \geq R_{Max} \end{cases} \quad (8)$$

donde:

$C_1 = 3,354$ ,  $C_2 = 1,265 \times 10^{-3}$ ,  $k = -0,15128$  y  $m = 1,607$  son constantes empíricamente ajustadas.

3. NWS (Servicio Nacional del Tiempo de E.U.), incluido en el informe de la NOAA como NWS23 [54] y su perfil está dado por:

$$V_r = \begin{cases} V_{max} \operatorname{sen}^c \left( \frac{\pi r}{2R_{Max}} \right) & \text{para } r < R_{Max} \\ V_{max} \left( 1 - 1,3\mathbb{E}^{-a \left( \frac{r - R_{Max}}{R_{Max}} \right)^b} \right) & \text{para } r > R_{max} \end{cases} \quad (9)$$

donde:

$a = 0,00622$ ,  $b = 1,39$  y  $c = 5/7$  son constantes ajustadas empíricamente con datos de huracanes.

4. Vórtice de Rankine [18]:

$$V_r = \begin{cases} V_{max} \left( \frac{r}{R_{Max}} \right) & \text{para } r < R_{Max} \\ V_{Max} \left( \frac{R_{Max}}{r} \right) & \text{para } r > R_{max} \end{cases} \quad (10)$$

5. Vórtice de Rankine modificado [57]:

$$V_r = \begin{cases} V_{max} \left( \frac{r}{R_{Max}} \right)^b & \text{para } r < R_{Max} \\ V_{Max} \left( \frac{R_{Max}}{r} \right)^b & \text{para } r > R_{max} \end{cases} \quad (11)$$

donde:

$b = 0,5$  es el parámetro de forma sugerido por Phadke en [57].

6. Modelo de combinado de Lizano [44, 43, 46]:

Según Lizano en [44] el modelo de Collins [14] produce una velocidad del viento comparable con lo observado para  $r > R_{Max}$  y el de Jelesnianski [34] para  $r < R_{Max}$ , hizo la combinación de ellos para producir un nuevo perfil de viento producido por:



$$V_r = \begin{cases} V_{Max} \left( \frac{2R_{Max}r}{R_{Max}^2 + r^2} \right) & \text{para } r < R_{Max} \\ \left( \frac{V_{Max}}{C_1 r^k} \right) \log \left( \frac{R_{Max}}{C_2 r^m} \right) & \text{para } r > R_{Max} \end{cases} \quad (12)$$

donde:

$$C_1 = 3,354, C_2 = 1,265 \times 10^{-3}$$

$k = 0,095$  y  $m = 1,575$  son constantes empíricamente ajustadas utilizando los datos del huracán Camille.

## 7. Holland [30]:

La ecuación del modelo de Holland fue tomada de [22]

$$V_r = 0,8 \left\{ \left[ \frac{B}{\rho_a} \left( \frac{R_{Max}}{r} \right)^B \Delta P E^{-\left( \frac{R_{Max}}{r} \right)^B} + \left( \frac{rf}{4} \right)^2 \right]^{0,5} - \left( \frac{rf}{2} \right) \right\} \quad (13)$$

donde:

$\rho_a$  es la densidad del aire (considerada constante,  $\rho_a = 1,15 \text{ kg/m}^3$ ).

$f$  es el parámetro de Coriolis y se define como:

$$f = 2\omega \text{sen}(\varphi) \quad (14)$$

$\omega = 0,2618 \text{ rad/h}$  es la velocidad angular de la tierra

$B$  es el parámetro de forma, que siguiendo la recomendación de Young y Burchell [79] se puede determinar como:

$$B = 1,5 + (980 - P_o)/120 \quad (15)$$

$B$  también puede expresarse en función de  $R_{Max}$  según Powell et al en [59] como:

$$B = 1,881 - 0,00557R_{Max} - 0,01295\varphi \quad (16)$$

y en función de  $V_{Max}$  también según Powell et al en [59] como:

$$B = 0,886 + 0,0177V_{Max} - 0,0094\varphi \quad (17)$$

### 1.5.2. Asimetría en el campo de viento

Cuando el huracán se desplaza, su velocidad de traslación se suma vectorialmente a los vectores de la velocidad del viento, esto hace que mirando en la dirección de traslación, los vientos sean más fuertes a la derecha, esto produce una asimetría en el campo de viento que es simulada con la inclusión de un término más en las ecuaciones (7), (8), (9), (10), (11) y (12). La expresión dada para la ecuación (8) es:

$$V'_{Max} = 0,885(63,36\Delta P^{\frac{1}{2}} - 0,5Rf) + V_f \quad (18)$$

donde:

$V'_{Max}$  es la velocidad del viento en  $m/s$ .

$V_f$  es la velocidad de traslación del huracán en  $m/s$ .

$$V_{Max} = V'_{Max} \left( 1 - 0,5V_f \frac{(1 - \cos \phi)}{V'_{Max}} \right) \quad (19)$$

donde:

$\phi$  es la ángulo entre el vector de la velocidad del viento y el vector de la velocidad de traslación de la tormenta.

La expresión que recomienda [70] para calcular la velocidad del viento máximo de huracanes, utiliza  $V_f/2$  en vez de  $V_f$  en la ecuación (18). En modelos del NWS trata la asimetría del viento con una expresión diferente:

$$V'_{Max} = 0,9(67,3\Delta P^{\frac{1}{2}} - 0,5Rf) + 1,5V_f \cos \phi \quad (20)$$

### 1.5.3. Modelos de predicción del campo de presiones

Las variaciones de presión atmosférica causan la elevación del nivel del mar en áreas de bajas presiones y la disminución del nivel del mar en áreas de altas presiones. Para poder estimar en cuanto se eleva el nivel del mar debido al descenso de la presión atmosférica en los huracanes, debemos conocer como se comporta ésta a partir centro del ojo del huracán

donde la presión es mínima. Schloemer [63, 53, 25, 48] suministró una expresión ampliamente utilizada, la cual relaciona la presión y la distancia radial desde el centro de un huracán [51]:

$$P_r = P_o + \Delta P \mathcal{E}^{-\left(\frac{R_{Max}}{r}\right)} \quad (21)$$

Holland en [30, 31] también determinó una expresión para estimar la presión en el interior y la periferia de un huracán:

$$P_r = P_o + \Delta P \mathcal{E}^{-\left(\frac{A}{r^B}\right)} \quad (22)$$

donde:

$A$  al igual que  $B$  es un parámetro de forma y según [76] se determina por:

$$A = 0,0696 + 0,00049V_{Max} - 0,0064\varphi \quad (23)$$

Holland también llegó en [30] a una relación entre  $R_{Max}$ ,  $A$  y  $B$

$$R_{Max} = A^{\frac{1}{B}} \quad (24)$$

Sustituyendo la ecuación (24) en la ecuación (22), obtenemos:

$$P_r = P_o + \Delta P \mathcal{E}^{-\left(\frac{R_{Max}}{r}\right)^B} \quad (25)$$

La cual es muy similar a la expresión de Schloemer.

## 1.6. Modelo de predicción del oleaje

Las actividades que se desarrollan en zonas costeras o marítimas como la pesca, el transporte y tránsito marítimo, la explotación petrolera, las operaciones en puertos, los estudios de erosión costera y la construcción de estructuras, entre otras, requieren información del

oleaje, que en la mayoría de los casos no está disponible. Es por ello que el tema de los modelos que permitan representar el fenómeno de la dinámica del oleaje han sido ampliamente estudiados por muchos autores.

El oleaje es el conjunto de alteraciones producidas en la superficie del mar por la actuación continuada del viento sobre una superficie o área marítima (longitud del fetch,  $L_f$ ) durante un cierto periodo de tiempo; siempre y cuando dicho fenómeno dé como resultado una gama de ondas aleatorias, de forma más o menos irregular y con diversas direcciones de propagación, éste se caracteriza igual que todas las ondas por una altura, un periodo y una longitud de onda. El oleaje se caracteriza específicamente por las siguientes magnitudes:

**Longitud de la ola ( $L_o$ ):** Distancia horizontal entre dos crestas consecutivas de una onda monocromática o regular.

**Altura de la ola significativa ( $H_s$ ):** Parámetro geométrico - estadístico representativo del oleaje, definido, a partir de discretizar un registro de oleaje en olas individuales, como la media aritmética de las alturas de ola del tercio de olas más altas del registro.

**Periodo de la ola significativa ( $T_s$ ):** Parámetro geométrico-estadístico representativo del oleaje, definido, a partir de discretizar un registro de oleaje en olas individuales, como la media aritmética de los periodos asociados al tercio de olas más altas del registro.

**Periodo pico de la ola ( $T_p$ ):** Periodo para el cual la función de densidad espectral alcanza su máximo valor. Es el inverso de la frecuencia dominante del espectro.

Aparte del análisis determinístico del oleaje basado en la teoría de ondas, conceptos como el espectro de frecuencias, y de ola significativa, entre otros permitieron explicar la irregularidad y variabilidad del oleaje desde el punto de vista estadístico y por lo tanto sentaron la base para la aparición de los actuales modelos de generación de oleaje.

Las primeras técnicas de pronóstico y generación de oleaje se desarrollaron durante y después de la segunda guerra mundial, éstas usaban modelos simples basados en relaciones empíricas entre variables dependientes como la altura de la ola significativa, el periodo de ola, etc., con variables independientes como la velocidad del viento, profundidad, etc. Bretschneider en [7, 8] desarrolló por primera vez una relación semiempírica para el pronóstico del oleaje que permite relacionar  $H_s$  y  $T_s$ , con la velocidad del viento en superficie, la distancia sobre la cual actúa el viento ( $L_f$ ) y la profundidad del agua.

Se presenta de forma resumida un modelo que se ha implementado para explicar el

fenómeno de generación de oleaje producido por vientos de huracán, este modelo corresponde a relaciones empíricas entre las variables que definen los patrones medios del oleaje en función de  $V_{Max}$  y  $P_o$ , si se hace un tratamiento estadístico de estas variables, es posible estimar a partir de modelos paramétricos a  $H_s$  y a  $T_p$  de las olas producidas por un huracán [23, 16, 78, 79, 3].

El modelo de Young [78] fue desarrollado basado en el concepto de fetch y en las relaciones de crecimiento del oleaje limitado por la longitud del fetch, JONSWAP [28]. La altura de la ola significativa y el periodo pico son estimados mediante las ecuaciones (26) y (27).

$$\frac{gH_s}{V_{Max}^2} = 0,0016 \left( \frac{gL_f}{V_{Max}^2} \right)^{0,5} \quad (26)$$

$$\frac{gT_p}{2\pi V_{Max}} = 0,045 \left( \frac{gL_f}{V_{Max}^2} \right)^{0,33} \quad (27)$$

Donde  $L_f$  es la longitud del fetch (en  $km$ ) y se estima según Young [78] mediante  $L_f = r - R_{Max}$ , y  $r$  es la distancia en  $km$ , entre el centro del huracán  $C$  y el punto de referencia  $P_{ref}$  (figura 8).

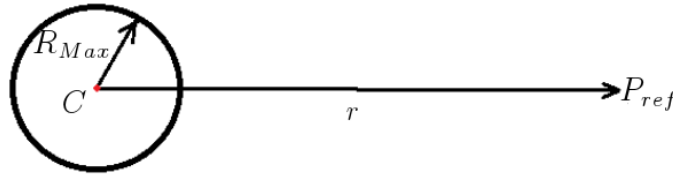


Figura 8: Representación de parámetros para el cálculo del fetch.

Partiendo del modelo paramétrico del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos [70] para un huracán moviéndose, las siguientes ecuaciones pueden ser usadas para obtener  $H_s$  y  $T_p$  en profundidades indefinidas:

$$H_s = 5,03 \mathbf{E}^{\left(\frac{R_{max}\Delta P}{4700}\right)} \left[ 1 + \frac{0,29\xi V_f}{\sqrt{U_r}} \right] \quad (28)$$

$$T_p = 8,6 \mathbf{E}^{\left(\frac{R_{max}\Delta P}{9400}\right)} \left[ 1 + \frac{0,145\xi V_f}{\sqrt{U_r}} \right] \quad (29)$$

donde:

$\xi$  Coeficiente que depende de la velocidad de avance del huracán y del incremento de la longitud del fetch, para un huracán cuasiestacionario  $\xi = 1$ .

$$U_r = 0,865V_{Max} + 0,5V_f \quad (30)$$

En este modelo  $\Delta P$  está en *mm de Hg*.

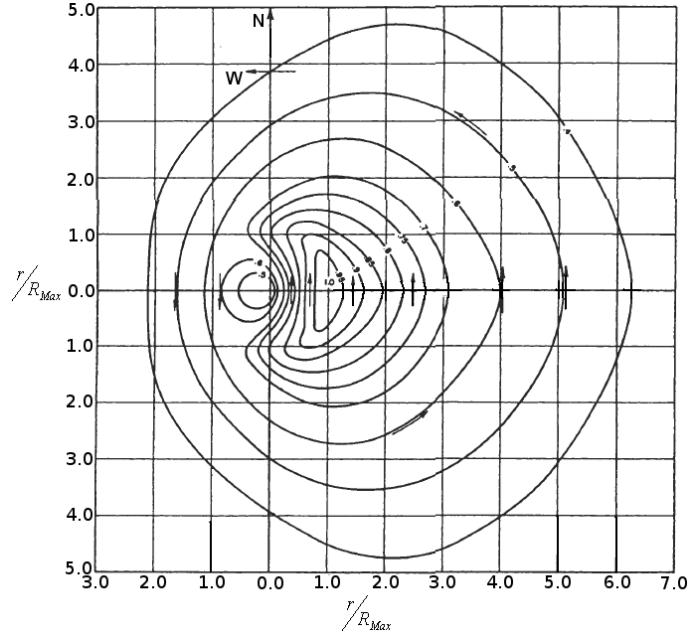


Figura 9: Isolíneas de la altura relativa de olas significativas  $H_r / H_s$  generadas por un huracán cuasiestacionario.

Los valores de  $H_s$  y  $T_p$  son para  $r = R_{Max}$ . Para la determinación de la altura de la ola significativa en un punto alejado del huracán ( $r$ ), se calcula  $H_s$  por la ecuación (28), la distancia entre el centro del huracán y el punto de estudio ( $r$ ), el ángulo ( $\beta$ ) formado entre el vector  $\vec{r}$  y el vector con dirección N, entonces utilizando la figura 9 y a partir del origen nos movemos una distancia  $r / R_{Max}$  con el ángulo  $\beta$  y determinamos según la isolínea correspondiente el valor relativo de la altura de ola ( $\widehat{H}_r$ ), por último, calculamos la altura de la ola en el punto de interés  $H_r$  a través de la siguiente relación:

$$\frac{H_r}{H_s} = \widehat{H}_r \quad (31)$$

Para una rápida estimación se puede utilizar la ecuación simple (32) expuesta por [33].

$$H_s = 0,2(P_n - P_o) \quad (32)$$

La aproximación dada por la ecuación (33) está dada en [70] y relaciona el periodo con la altura de las olas.

$$T_s = 12,1 \sqrt{\frac{H_s}{g}} \quad (33)$$

Basados en el análisis de regresión múltiple, Kumar et al en 2003 [38] da las expresiones empíricas (34) y (35) para estimar también  $H_s$  y  $T_s$  teniendo en cuenta que el huracán se mueve a una velocidad  $V_f$ .

$$H_s = 0,61 \Delta P^{0,69} V_f^{5,43 \cdot 10^{-3}} R_{Max}^{1,43 \cdot 10^{-5}} \quad (34)$$

$$T_s = 4,125 \Delta P^{0,288} V_f^{3,24 \cdot 10^{-3}} R_{Max}^{1,63 \cdot 10^{-5}} \quad (35)$$

Donde  $\Delta P = P_n - P_o$ , para éste estudio  $P_n$  fue tomado como 1012  $hPa$ , basado en el estudio de [71] del paso de ciclones por la Bahía de Bengala.

Kumar et al en 2001 [39] teniendo en cuenta 32 ciclones que pasaron a lo largo de la costa de la India en el periodo comprendido entre mayo de 1961 y noviembre de 1982, encontraron una relación empírica ecuación (36) cuando las olas alcanzan una altura mayor de 3  $m$ . Su periodo pico  $T_p$  se estima utilizando la expresión (37).

$$H_s = 0,25 V_{Max} \quad (36)$$

$$T_p = 4,5 H_s^{0,48} \quad (37)$$

## 1.7. Pronóstico

En estadística, un experimento aleatorio es aquel que bajo el mismo conjunto aparente de condiciones iniciales, puede presentar resultados diferentes, es decir, no se puede predecir el resultado exacto de cada experiencia particular. En la teoría de la probabilidad, un proceso estocástico es un concepto matemático que sirve para caracterizar una sucesión de variables aleatorias que evolucionan en función de otra variable, generalmente el tiempo. Cada una de las variables aleatorias del proceso tiene su propia función de distribución de probabilidad y, entre ellas, pueden estar correlacionadas o no. Cada variable o conjunto de variables sometidas a influencias o impactos aleatorios constituye un proceso estocástico.

Un proceso estocástico se puede definir equivalentemente de dos formas diferentes: como un conjunto de realizaciones temporales y un índice aleatorio que selecciona una de ellas o como un conjunto de variables aleatorias  $Z_t$ , indexadas por un índice  $t$ , dado que  $t \in \tau$ , con  $\tau \subseteq \mathbb{R}$ ;  $\tau$ , puede ser continuo si es un intervalo (el número de sus valores es ilimitado) o discreto si es numerable (solamente puede asumir determinados valores). Las variables aleatorias  $Z_t$ , toman valores en un conjunto que se denomina espacio probabilístico, un ejemplo de esto son las series temporales.

Una serie temporal o cronológica es una secuencia de datos, observaciones o valores, medidos en determinados momentos del tiempo, ordenados cronológicamente y, normalmente, espaciados entre sí de manera uniforme. El análisis de series temporales comprende métodos que ayudan a interpretar este tipo de datos, extrayendo información representativa, tanto referente a los orígenes o relaciones subyacentes como a la posibilidad de extrapolar y predecir su comportamiento futuro. De hecho uno de los usos más habituales de las series de datos temporales es su análisis para predicción y pronóstico. Existen dos métodos para el tratamiento de series temporales: descomposición clásica (Census) o modelización por componentes (X11, X11 ARIMA y X12 ARIMA) [17, 65] y ARIMA según la metodología de Box y Jenkins [6]. Por ejemplo de los datos climáticos, la serie de la velocidad del viento [73], las series pluviométricas y de evaporación [72], las series de la temperatura del aire, etc; resulta difícil imaginar una rama de las ciencias en la que no aparezcan datos que puedan ser considerados como series temporales.



### 1.7.1. Costos y beneficios del mejoramiento de los pronósticos

Los costos en que se incurren según [27], como son la adquisición del equipo y programas de cómputo, el gasto de la organización en tiempo de personal, el precio del personal asalariado que recolectará los datos, el monitoreo del proceso y la interpretación de los resultados, deben enfrentarse contra el valor de la disminución del error a evaluar los procedimientos del pronóstico. Esto obliga al pronosticador a ponderar las probables mejoras en la precisión, como una función de los gastos en pronósticos.

### 1.7.2. Selección del método de pronóstico

No es fácil encontrar encontrar reglas sencillas mediante las cuales el pronosticador pueda seleccionar el método que le permita lograr el nivel de precisión deseado. Según [2] los métodos de pronóstico se dividen en tres categorías: cualitativos, proyección histórica y casuales, sin embargo, en [47] hacen otra división también en tres grupos: cuantitativos, cualitativos e impredecibles. Por lo tanto no se espera que el analista examine todos los métodos posible, los compare y evalúe.

Básicamente las elecciones se hacen teniendo en cuenta los siguientes cuatro factores:

- Concepciones previas del pronosticador. Esto es en base a su experiencia si únicamente se conoce un método, ese será el que se use. Si se invirtió mucho tiempo en el aprendizaje de un método complicado, es probable que ese esfuerzo influya indebidamente en la elección.
- ¿Cómo se empleará el pronóstico? El enfoque seleccionado tendrá que responder a la interrogante que se pretende pronosticar.
- Complejidad y facilidad de comprensión. Se debe facilitar el empleo del modelo, es difícil considerar un modelo si éste es demasiado complicado para el que toma las decisiones. También se rechazará un modelo que no incluya aquellos elementos que el encargado de la toma de decisiones juzga importante.
- Pruebas de comparación. Si se toma en serio la tarea de selección, se desarrollarán paralelamente algunos métodos y se probará su utilidad para el pronóstico. Este trabajo incluirá pruebas de comparación y tal como se ha mencionado, en este análisis no se realizarán todas las alternativas posibles.

### 1.7.3. Pronósticos cuantitativos

En [47] mencionan que los pronósticos cuantitativos pueden aplicarse cuando existan las siguientes condiciones:

- Información disponible acerca del pasado.
- La información puede ser cuantificada.
- El patrón de comportamiento de la información en el pasado, continuará en el futuro.

Los métodos cuantitativos presentan dos características:

- Se expresan en notación matemática, por lo tanto, establecen un registro no ambiguo sobre la forma de cómo se hace la predicción, esto permite una comunicación clara sobre el pronóstico entre aquellos a quienes interesa, además proporciona una oportunidad de hacer modificaciones sistemáticas y mejorar la técnica del pronóstico.
- Mediante el uso de computadoras, un modelo se puede basar en una cantidad importante de datos, por el ejemplo, el comportamiento y los registros horarios de la velocidad y dirección del viento, la presión atmosférica, la temperatura del mar y del aire, las altura y el periodo dominante de olas, etc, durante años, no se podría construir sin computadoras y modelos cuantitativos.

### 1.7.4. Pronóstico de series de tiempo

Estos modelos generan pronósticos mediante la extrapolación del comportamiento anterior de los valores de una variable que interese. Los modelos de series de tiempo se refieren a la medición de una variable en el tiempo a intervalos iguales (figura 10). El objetivo de la identificación histórica es determinar un patrón en su comportamiento que posibilite la proyección futura de la variable deseada. En éste trabajo solamente trataremos el método X11 y los métodos derivados.

En un análisis de series de tiempo pueden distinguirse cuatro componente básicos [11, 56]:

**Tendencia ( $T_t$ ):** Representa los movimientos a más largo plazo de la serie, el cual puede ser considerado como el valor en torno al cual se mueven las demás componentes. Se caracteriza por un movimiento suave, uniforme y lento. Es representada por cualquier función

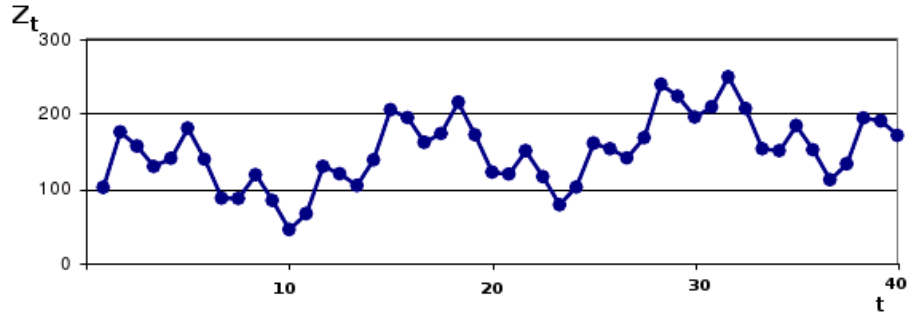


Figura 10: Serie de tiempo.

matemática, usualmente monótona. Recoge el efecto de los factores causales más estables de los que ejercen su influencia a largo plazo y sistemáticamente (figura 11a).

**Estacionalidad ( $S_t$ ):** Esta componente es el resultado de las fluctuaciones periódicas que se presentan regularmente en la serie durante sub-intervalos de un período dado. Aunque esta componente entraña una repetición regular, no excluye la posibilidad de que su configuración varíe gradualmente en el transcurso del tiempo. Los factores que en ella se reflejan tienen un comportamiento más inestable que los que rigen en la tendencia (figura 11b), por eso resulta de tanta importancia un estudio correcto de esta componente, en particular cuando se quieren hacer pronósticos a corto plazo, es decir, pronósticos de momentos del tiempo cercano a la última información disponible de la serie.

Los principales factores que motivan la existencia de la estacionalidad en las series temporales son clasificables en dos grandes grupos: factores objetivos y factores subjetivos.

Los factores objetivos son esencialmente de índole natural, tales como las influencias climáticas, así como las variaciones del calendario, entre otras y los factores subjetivos son aquellos que de una forma u otra dependen del hombre, entre ellos se destacan las decisiones institucionales (determinación de días festivos o feriados), vacaciones de los trabajadores, hábitos de consumo (compras de fin de año, Día de las Madres, etc.)

**Ciclos ( $C_t$ ):** Está caracterizado por oscilaciones con periodicidad no fija y relativamente largas. Refleja aquella parte de la serie determinada por movimientos ondulatorios alrededor de la tendencia, con una forma generalmente no regular en amplitud y periodo (figura 11c).

**Errores aleatorios ( $I_t$ ):** Esta componente recoge todo el comportamiento no sistemático de la serie (movimiento irregular), los cuales son aleatorios o debidos a factores de alta influencia pero de naturaleza esporádica (figura 11d) como pueden ser los conflictos internacionales

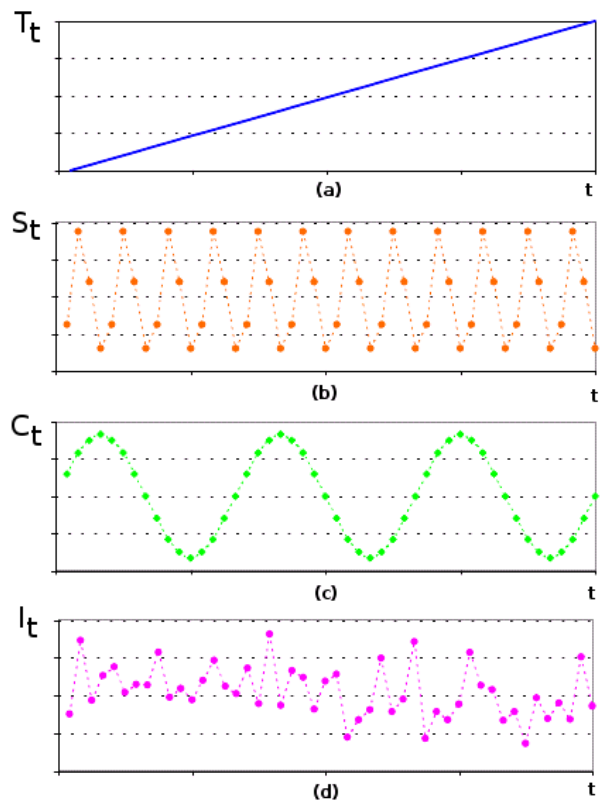


Figura 11: Componentes de una serie temporal.

o las sequías, por citar algunos ejemplos. El carácter aleatorio de estos factores o de su aparición hace prácticamente imposible su estudio y pronóstico rigurosos, por lo que se le da un trato de variable aleatoria para poder estimar su valor central y calcular límites de confianza para su desenvolvimiento futuro.

Lo que se busca en series de tiempo es identificar la magnitud y la forma de cada uno de los componentes basándose en los datos disponibles del pasado, estos componentes (con excepción de la componente de errores aleatorios), se proyectan hacia el futuro. Si sólo queda un componente aleatorio pequeño y el patrón persiste en el futuro, se obtendrá un pronóstico confiable.

A la forma en que se combinan estas componentes para dar lugar a la serie original se le llama modelo X11. Dentro del enfoque clásico, se pueden hallar los siguientes modelos [40] que expresan los valores de la serie relacionados con las componentes antes descritas:

X11 (Census 1) considera dos modelos de descomposición:

Aditivo

$$Z_t = T_t + S_t + C_t + I_t \quad (38)$$

donde:

$I_t$  Es la componente irregular que agrupa todas las otras fluctuaciones más o menos erráticas que no son tomadas en cuenta en las componentes precedentes.

Multiplicativo

$$Z_t = T_t \cdot S_t \cdot C_t \cdot I_t \quad (39)$$

Además X11 ARIMA propone:

Log-Aditivo

$$\log Z_t = \log T_t + \log S_t + \log C_t + \log I_t \quad (40)$$

X12 ARIMA agrega a estos tres modelos:

## Pseudoaditivo

$$Z_t = T_t \cdot (S_t + C_t + I_t) \quad (41)$$

El problema central que se presenta en la investigación de una serie temporal es la identificación de sus componentes, de forma tal que puedan ser aisladas y estimadas por separado.

El primer paso en el análisis de series de tiempo consiste en graficar la serie, lo cual permite detectar componentes esenciales de la serie y datos atípicos [6, 12, 42]. Un dato atípico se debe a una observación de la serie que corresponde a un comportamiento anormal del fenómeno, sin incidencias futuras, o a un error de medición. Se debe determinar desde fuera si un punto dado es un dato atípico o no. Si se concluye que lo es, se debe omitir o reemplazar por otro valor interpolado antes de analizar la serie.

### **1.7.5. Estimación de las componentes de una serie de tiempo**

La estimación de estas componentes exige primeramente la adopción de un modelo y a partir de él ir estimando componente a componente, eliminando su efecto cada vez que una es estimada. El orden de estimación más difundido es el siguiente: primero la estacionalidad, después la tendencia; seguidamente los ciclos (si se van a estudiar) y finalmente se procede a un análisis de los residuos (perturbaciones aleatorias).

Es necesario señalar varias limitaciones que presenta el análisis de una serie de tiempo por esta vía. Lo primero es la no independencia entre las cuatro componentes. Así por ejemplo, un movimiento estacional inusualmente fuerte puede precipitar o al menos agravar un desarrollo cíclico, el cual a su vez puede distorsionar la estacionalidad. Otra limitación se refiere a la dificultad de separar convincentemente el ciclo de la tendencia o de las perturbaciones aleatorias, lo que aumenta la incertidumbre sobre la calidad de las estimaciones. Por eso, más que una estimación de las componentes, se obtiene una aproximación a ellas.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Imágenes de satélites

Se utilizaron imágenes en las bandas de luz visibles e IR, tomadas por el satélite GOES-12 con resoluciones de 4 *km* y 1 *km* (<http://www.nnvl.noaa.gov/members/images/>). Imágenes tomadas a 370 *km* de altura por el astronauta M. Edward Fincke de la Estación Espacial Internacional. Fotografías tomada por integrantes de la expedición 8 de la Estación Espacial Internacional, el 27 de marzo de 2004. Imágenes tomadas por el sensor MODIS de los satélites Terra y Aqua de la NASA. Imágenes tomadas por el transbordador espacial Atlantis el 18 de septiembre de 2006 con una cámara digital equipada con una lente de 28 mm. Imágenes tomadas por en satélite GOES-EAST Atlantic de 12 *km* de resolución en las bandas de luz visible (<http://www.goes.noaa.gov/browsat2.html>) e IR (<http://www.goes.noaa.gov/browsat.html>) y de Tropical Atlantic Imagery (<http://www.ssd.noaa.gov/imagery/tatl.html>) de los huracanes Noel, Omar y Paloma.

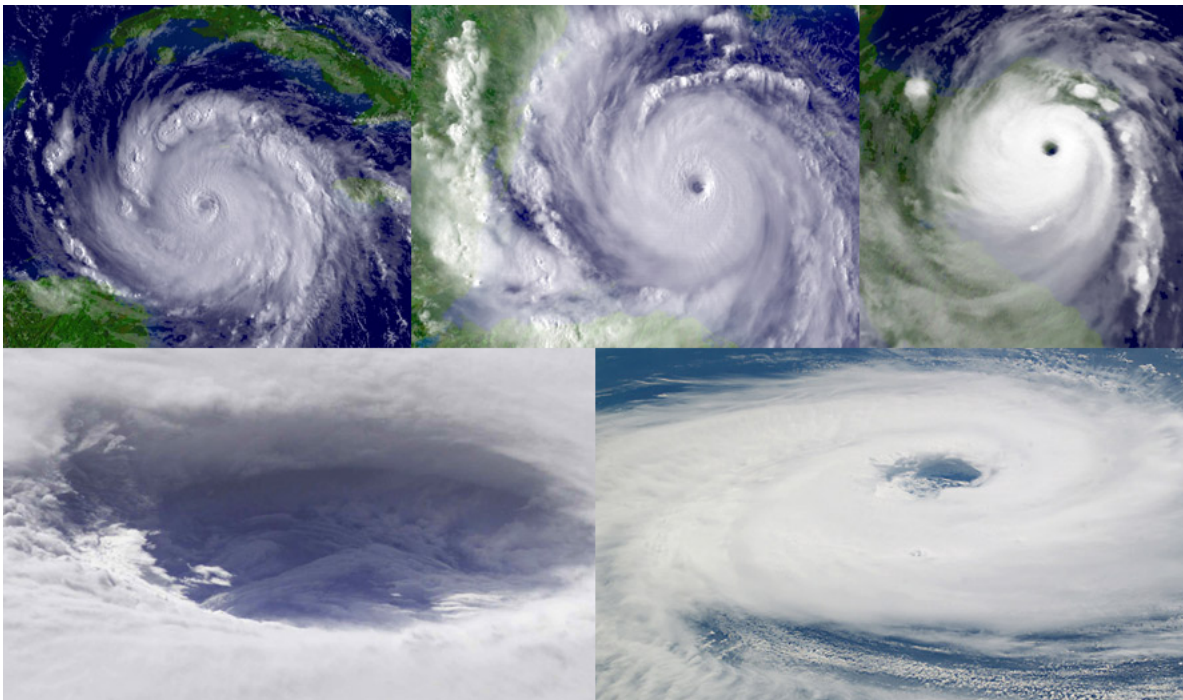


Figura 12: Imágenes de huracanes tomadas de vuelos espaciales y satélites. Arriba: huracán Dean. Abajo izquierda: huracán Iván. Abajo derecha: huracán Katrina.

También se descargaron imágenes IR de satélites de la NOAA de <http://www.ssd.noaa.gov/goes/east/carb/>, correspondientes a los huracanes Paula (11 - 15/Noviembre/2010),

Richard (20 - 26/Noviembre/2011) y Earl (30/Agosto - 3/Septiembre/2010), estas se actualizan cada 15 minutos.

También fueron analizadas imágenes descargadas de internet, del sitio de QuikSCAT, <http://manati.orbit.nesdis.noaa.gov/datasets/QuikSCATData.php>, que corresponden las mediciones de la velocidad y dirección del viento sobre la superficie del océano realizadas por el escaterómetro del satélite QuikSCAT. Este satélite le da seguimiento especial a los huracanes, las imágenes obtenidas fueron del campo de viento correspondiente a los huracanes Chantal, Dean (imagen ejemplo en la figura 14), Dennis, Emily, Iris, Isidore, Iván (imagen ejemplo en la figura 13), Lili, Earl, Gustav, Ida, Dolly, Félix, Hanna, Ike, Noel, Omar y Paloma.

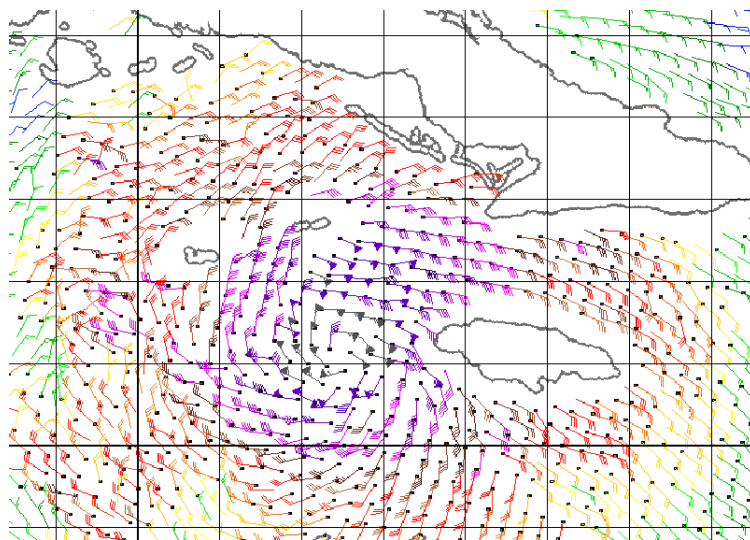


Figura 13: Imagen del campo de viento correspondiente al huracán Iván el 9 de noviembre de 2004 a las 23:38Z.

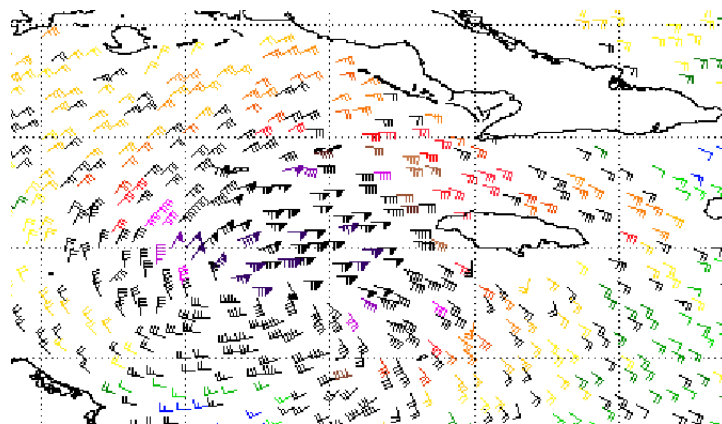


Figura 14: Imagen del campo de viento correspondiente al huracán Dean el 20 de agosto de 2007 a las 15:12Z.



## 2.2. Herramientas computacionales

Las herramientas computacionales utilizadas fueron:

**Typhoon 2.07:** Simulador del campo de la velocidad del viento, del campo de presiones y el campo de olas producidos por huracanes utilizando los modelos empíricos expuestos en el acápite 1.5, desarrollado por H. L. Varona en 2010.

**SATVECT 2.01:** Obtención de valores de magnitudes físicas a partir de imágenes de satélites, radares o mapas y generación de mallas de cálculo, desarrollado por E. Arbois y H. L. Varona en 2011. <http://satvect.blogspot.com/>.

**Prophet 1.03:** Identificación y Pronóstico de series temporales, desarrollado por Ilias, H. L. Varona y G. Puente en 1999.

**Forecast 1.01:** Sistema para el Pronóstico de Series de Tiempo y Análisis de las Residuos, desarrollado por R. Torres, G. López, H. L. Varona y G. Puente en 2006.

**QCAD 2.0.5.0 CE:** Para visualizar los archivos de salida del Typhoon en formato DXF, desarrollado por RibbonSoft en 2008.

**gnuplot:** Para graficar y hacer ajustes de los datos experimentales, desarrollado por T. Williams, C. Kelley y otros en 2007.

**scilab 4.1.2:** Sistema de cálculos matemáticos, desarrollado por Consortium Scilab (INRIA, ENPC) en 2007.

**qtplot 0.9.6.2:** Sistema para el procesamiento y graficado de datos experimentales y ajustes de curvas, desarrollado por Ion Vasilief en 2008.

**R 2.7.1:** Paquete estadístico, desarrollado por The R Foundation for Statistical Computing en 2008.

**GeoMap 1.00:** Sistema para la Georreferenciación y Vectorización de Imágenes de Satélites, de Radares y de Mapas, desarrollado por O. Cuba y H. L. Varona en 2008.

### Otras herramientas desarrolladas por H. L. Varona en 2010

- from-ndbc: Convertidor de archivos obtenidos del NDBC.
- from-nssl: Convertidor de archivos obtenidos del NSSL.

- ARC2MAP: Convertidor de archivos de línea de costa en formato Arc/Info a formato MAP.
- ARC2BLN: Convertidor de archivos de línea de costa en formato Arc/Info a formato BLN del Surfer.
- DrawbaseMap: Convertidor de archivos de línea de costa en formato Arc/Info a formato DXF.
- vector2dxf: Crea mapas del campo de viento producido por huracanes.
- xyz2dxf: Crea mapas a partir de datos experimentales y teóricos medidos y calculados en boyas, radiosondeos y estaciones terrestres.

### 2.3. Determinación de la estructura de un huracán

Los datos experimentales de  $\lambda$ ,  $\varphi$ ,  $P_o$ ,  $V_{Max}$ ,  $R_{Max}$ ,  $R$ , presión de la última isobara cerrada ( $P_i$ ) y radio de la última isobara cerrada ( $R_i$ ) obtenidos en los vuelos de reconocimientos se descargaron de [ftp://rammftp.cira.colostate.edu/demaria/ebtrk/ebtrk\\_atlc.txt](ftp://rammftp.cira.colostate.edu/demaria/ebtrk/ebtrk_atlc.txt) correspondientes a todos los huracanes que pasaron en la zona del Atlántico Norte, el Caribe y el golfo de México entre los años 1998 hasta el 2010.

Todas la imágenes fueron procesadas en SATVECT, con este se georeferenciaron las imágenes obtenidas de la NOAA a partir de las cuales se determinó  $R$ .

### 2.4. Ajustes de curvas y superficies

Todos los ajustes de curvas y de superficies se realizaron con la ayuda del qtiplot y el gnuplot las cuales tienen una implementación del método no lineal de mínimos cuadrados con el algoritmo de Marquardt - Levenberg.

### 2.5. Simulaciones de los campos de velocidades y de presiones

En las simulaciones del comportamiento del campo de velocidades del viento y del campo de presiones se utilizó el software Typhoon, el levantamiento de la línea de costa escala

1:70000 que se necesita como entrada, se descargo de internet del National Geophysical Data Center hospedado en <http://rimmer.ngdc.noaa.gov/mgg/coast/getcoast.html>.

Los datos experimentales de las magnitudes físicas necesarias para las simulaciones se descargaron de National Data Buoy Center (NDBC) hospedado en <http://www.ndbc.noaa.gov/hmd.shtml> y de National Severe Storms Laboratory (NSSL) hospedado en <http://data.nssl.noaa.gov/dataselect/internet.html>. El listado de las boyas utilizadas está en la tabla II y su ubicación geográfica está representada en la figura 15.

Tabla II: Listado de las boyas utilizadas

Boya	Propietario	Longitud	Latitud
41043	NDBC	-64,966	21,061
CHAV3	NOAA's National Ocean Service	-64,920	18,335
42001	NDBC	-89,658	25,888
42002	NDBC	-93,666	25,790
42055	NDBC	-94,046	22,017
42056	NDBC	-85,059	19,874
42057	NDBC	-81,501	16,834
42058	NDBC	-75,064	15,093
42059	NDBC	-67,472	15,054
SMKF1	NDBC	-81,110	24,627
42003	NDBC	-85,612	26,044
41046	NDBC	-70,863	23,836
41047	NDBC	-71,491	27,469
PLSF1	NDBC	-82,773	24,693
SPGF1	NDBC	-78,994	26,704

De los archivos descargados del NDBC se seleccionaron los datos meteorológicos standard, que contienen la velocidad ( $V_r$ ) y dirección del viento, la altura de la ola significativa ( $H_s$ ), el periodo dominante de la ola ( $T_p$ ), el periodo medio de todas las olas durante 20 minutos ( $T_a$ ), la dirección del oleaje y la presión al nivel de la mar ( $P_r$ ).

Se utilizaron los datos de las trayectorias de los huracanes relacionados en la tabla III y su trayectoria se muestra en la figura 16. Estas trayectoria fueron descargadas de dos fuentes, Unisys Weather alojado en <http://weather.unisys.com/hurricane/> y de la base de datos HURDAT del NHC Data Archive hospedado en <http://www.nhc.noaa.gov/pastall.shtml> y ambas contienen las posición del huracán ( $\lambda$ ,  $\varphi$ ), fecha, hora UTC ( $Z$ ),  $V_{Max}$ ,  $P_o$  y el estado de la tormenta, además HURDAT proporciona la velocidad de traslación de la tormenta  $V_f$ .

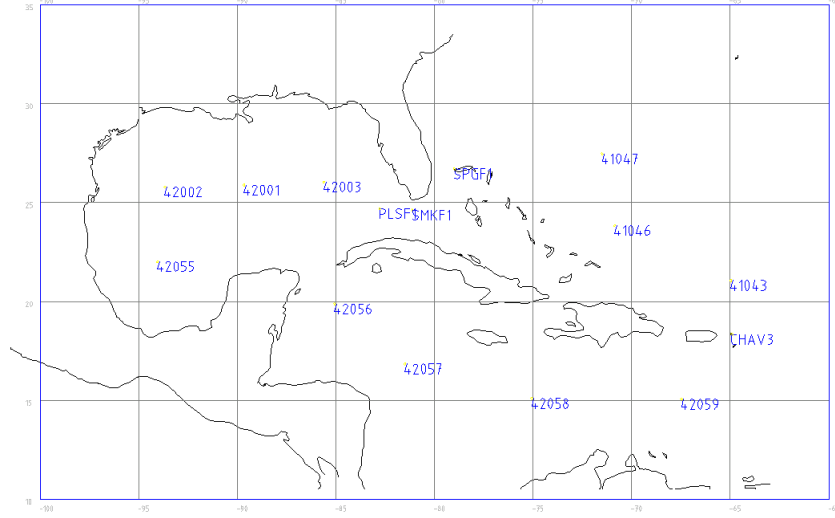


Figura 15: Ubicación geográfica de las boyas.

## 2.6. Descomposición de series de tiempo de $V_{Max}$ y $P_o$ .

Para probar si se podía pronosticar  $V_{Max}$  y  $P_o$  mediante el método X11 (Census 1) utilizamos el procedimiento de descomposición estacional propuesto por [47] y lo aplicamos a los huracanes cuyo nombres tienen un asterisco en la tabla III.

## 2.7. Correlación de Pearson

En estadística, el coeficiente de correlación de Pearson es un índice que mide la relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas, en otras palabras, el coeficiente de correlación de Pearson mide qué tan bien la curva de regresión se ajusta a los datos muestrales. A diferencia de la covarianza, la correlación de Pearson es independiente de la escala de medida de las variables. [68] plantea en que una de las ecuaciones más utilizadas en la práctica para calcular el coeficiente de correlación de Pearson es:

$$R_{Pe} = \frac{n \sum y_{mue} \cdot y_{est} - \sum y_{mue} \sum y_{est}}{\sqrt{[n \sum y_{mue}^2 - (\sum y_{mue})^2] [n \sum y_{est}^2 - (\sum y_{est})^2]}} \quad (42)$$

Donde:

$y_{mue}$  Son los valores muestrales.

$y_{est}$  Son los valores estimados por la ecuación de regresión.

Tabla III: Huracanes utilizados para la simulación.

Huracán	Fecha inicio	Hora Inicio	Fecha final	Hora final
Gustav*	25/Agosto/2008	15Z	1/Septiembre	9Z
Dean*	16/Agosto/2007	3Z	23/Agosto	3Z
Ida*	4/Noviembre/2009	15Z	10/Noviembre	15Z
Ike*	6/Septiembre/2008	0Z	14/Septiembre	9Z
Igor*	16/Septiembre/2010	15Z	21/Septiembre	21Z
Dennis*	5/Julio/2005	9Z	10/Julio	0Z
Iván*	6/Septiembre/2004	3Z	16/Septiembre	3Z
Paloma	6/Noviembre/2008	6Z	9/Noviembre	12Z
Omar	13/Octubre/2008	6Z	18/Octubre	6Z
Félix	1/Septiembre/2007	0Z	5/Septiembre	0Z
Earl	25/Agosto/2010	12Z	4/Septiembre	19Z
Dolly	20/Julio/2008	12Z	24/Julio	18Z
Noel	28/Octubre/2007	12Z	2/Noviembre	18Z
Hanna	28/Agosto/2008	12Z	7/Septiembre	0Z

$n$  Es el número de mediciones.

El coeficiente de correlación,  $R_{Pe}$ , presenta valores entre  $-1$  y  $+1$ .

Interpretación:

- Cuando  $R_{Pe}$  es próximo a 0, no hay correlación lineal entre las variables. La muestra está muy dispersa o bien no forma una línea recta. No se puede trazar una recta de regresión. Pero esto no necesariamente implica que las variables son independientes: pueden existir todavía relaciones no lineales entre las dos variables.
- Cuando  $R_{Pe}$  es cercano a 1, hay una buena correlación positiva entre las variables según un modelo lineal y la recta de regresión que se determine tendrá pendiente positiva, será creciente.
- Si  $R_{Pe} = 1$ , existe una correlación positiva perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables denominada relación directa: cuando una de ellas aumenta, la otra también lo hace en proporción constante.
- Cuando  $R_{Pe}$  es cercano a  $-1$ , hay una buena correlación negativa entre las variables según un modelo lineal y la recta de regresión que se determine tendrá pendiente negativa: es decreciente.

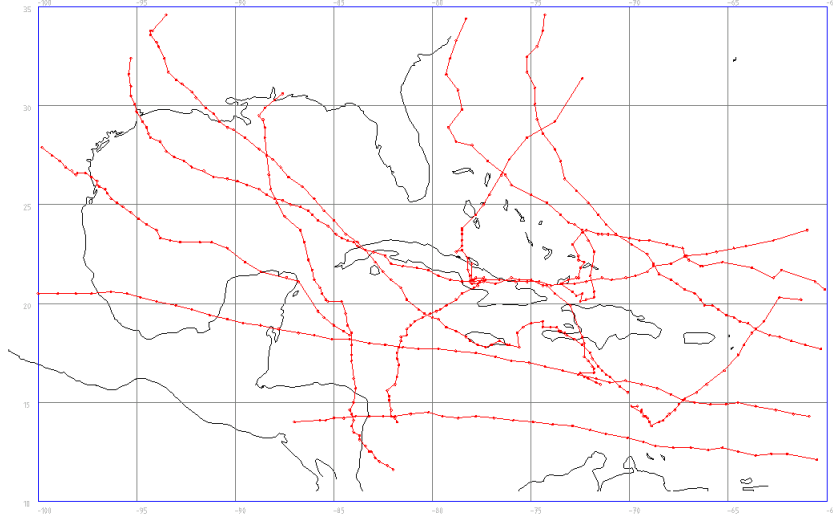


Figura 16: Trayectoria de los huracanes Dean, Earl, Gustav, Ida, Dolly, Félix, Hanna, Ike, Noel, Omar y Paloma.

- Si  $R_{Pe} = -1$ , existe una correlación negativa perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables llamada relación inversa: cuando una de ellas aumenta, la otra disminuye en proporción constante.

### 2.7.1. Error standard de estimación

Una vez calculado el valor del coeficiente de correlación interesa determinar si tal valor obtenido muestra que las variables están relacionadas en realidad o tan solo presentan dicha relación como consecuencia del azar. En otras palabras, nos preguntamos por la significación de dicho coeficiente de correlación, por lo tanto debemos determinar si dicho coeficiente es estadísticamente significativo, para dicha determinación se aplica una prueba basada en la distribución de la  $t$  de student.

El error standard de estimación ( $E_r$ ) está definido por la ecuación:

$$E_r = \sqrt{\frac{1 - R_{Pe}^2}{n - k - 1}} \quad (43)$$

donde  $n$  es el tamaño muestral y  $k$  es la cantidad de variables independientes en el modelo.

$$R_{Pe} > E_r \cdot t_{n-k-1} \quad (44)$$

Entonces, si se cumple la relación (44) para una  $t$  de Student con  $n - k - 1$  grados de libertad, diremos que el coeficiente de correlación es estrictamente significativo. El nivel de significancia ( $\alpha$ ) viene dado por la decisión que adoptemos al buscar el valor en la tabla de la  $t$  de Student. Todo lo antes dicho es válido solo para  $n \geq 20$ .

## 2.8. Correlación por rangos de Spearman

La correlación de Spearman, o por rangos, se basa en reemplazar los valores originales, de dos variables, por números enteros positivos, comenzando del 1 en adelante, que correspondan a su ordenamiento de menor a mayor magnitud (rangos). Para ello, los valores reales de cada una de las variables son ordenados de menor a mayor, por separado y reemplazados por los rangos correspondientes [26]. Según [62] la correlación de Spearman siempre utiliza la misma escala para los rangos de las observaciones de dos variables cualquiera, por ejemplo, a  $X$  (variable independiente) y a  $Y$  (variable dependiente) se le asignarían los rangos  $(1, 2, 3, \dots)$ , el coeficiente de correlación por rangos de Spearman se determina mediante la expresión:

$$R_{sp} = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (Rx_i - Ry_i)^2}{n(n^2 - 1)} \quad (45)$$

Donde:

$Rx_i, Ry_i$  Son los rangos de las variables  $X$  e  $Y$ .

$n$  Es el número de pares  $(X, Y)$ .

El tamaño de la muestra influye en que durante el ordenamiento en rango puedan existir empates. Para estos casos la ecuación (45) no es aplicable, en su lugar debe aplicarse la siguiente ecuación:

$$R_{sp} = \frac{S_x + S_y - \sum_{i=1}^n (Rx_i - Ry_i)^2}{2\sqrt{S_x S_y}} \quad (46)$$

Donde:

$$S_x = \frac{n(n^2 - 1)}{12} - L_x; \quad S_y = \frac{n(n^2 - 1)}{12} - L_y$$

$L_x$  y  $L_y$  son las sumas de los empates de las variables independiente y dependiente respectivamente, y se calculan como:

$$L_x = \frac{\sum_{j=1}^{N_{Rx}} n_{Rx_j} (n_{Rx_j}^2 - 1)}{12}; \quad L_y = \frac{\sum_{k=1}^{N_{Ry}} n_{Ry_k} (n_{Ry_k}^2 - 1)}{12}$$

$N_{Rx}$  y  $N_{Ry}$  Son el número total de empates de las variables independiente y dependiente respectivamente.

Las ecuaciones (45) y (46) son unas definiciones alternativas, muy cómodas, de la correlación de Spearman. El estadístico correlación por rangos de Spearman no está influenciado por valores extremos de X o de Y, al revés de lo que ocurre con la correlación lineal o de Pearson [62].  $R_{sp}$  se interpreta de la misma forma que  $R_{Pe}$ .

Por último comparamos el valor de  $R_{sp}$  calculado a través de las ecuaciones (45) o (46) con respecto a los valores críticos de la tabla de  $R_{sp}$  en función del  $\alpha$  deseado, entonces si el valor de  $R_{sp}$  calculado es mayor que el valor crítico de  $R_{sp}$  diremos que es estrictamente significativo.

## 2.9. Coeficiente de determinación

Es el cuadrado del coeficiente de correlación y se considera que el modelo ajusta mejor en la medida en que más se acerque al valor de la unidad.

$$R_d = R_{Pe}^2 \tag{47}$$

### 2.9.1. Coeficiente de determinación ajustado

Este incluye en su cálculo el tamaño muestral y el número de términos; su valor no aumenta necesariamente al introducirle más términos a la ecuación.

$$R_a = R_d - \frac{k(1 - R_d)}{n - k - 1} \tag{48}$$



donde  $n$  es el tamaño muestral y  $k$  es la cantidad de variables independientes en el modelo.

## 2.10. Análisis de los residuos

En general no conocemos la forma en que se generan los valores de las variables dependientes, todos los modelos que ajustemos son en alguna medida provisionales y su ajuste a los datos experimentales debe ser objeto de análisis. La forma más natural de examinar el ajuste consiste en considerar los residuos [15, 29, 4, 5, 52, 69].

El error para la  $i$ -ésima unidad se define como:

$$E_i = Y_{t_i} - Y_{e_i} \quad (49)$$

Para que el ajuste sea bueno tiene que cumplirse la relación (50) y como segundo criterio que la desviación standard de  $E_i$  sea pequeña.

$$\frac{1}{n} \sum E_i \rightarrow 0 \quad (50)$$

### 3. Modelo de huracán

#### 3.1. Modelo de predicción del campo de presiones

En la tabla IV se muestran los resultados de la comparación entre los modelos expuestos anteriormente en el acápite 1.5.3 y se observa muy claramente que el modelo de Schloemer es el que más se aproxima a los datos experimentales, siendo el valor medio de los residuos un orden menor que el resto de los modelos.

Tabla IV: Resultados de la comparación de los modelos de perfiles de presión de un huracán.

	Schloemer	Holland			
		Young y Burchell	Powell et al ( $R_{Max}$ )	Powell et al ( $V_{Max}$ )	Willoughby y Rahn
Valor medio de los residuos ( $hPa$ )	0,26	4,40	3,32	3,91	5,04
Desviación standard de los residuos ( $hPa$ )	3,59	3,91	3,48	3,61	4,01

Con el propósito de mejorar mucho más el modelo de Schloemer, se realizó una calibración de éste utilizando los datos experimentales tomados de las boyas mediante un ajuste lineal por mínimos cuadrados, obteniéndose la ecuación (51).

$$P'_r = 0,9378P_r + 62,3311 \quad (51)$$

Donde  $P'_r$  es la presión atmosférica calibrada en función de  $P_r$ . El coeficiente de determinación ajustado fue 0.47, el cual es estrictamente significativo para un nivel de significancia de 0,05, después se volvió a realizar el análisis de los residuos siendo su valor medio 0,05  $hPa$ , disminuyéndose en otro orden, lo que mejora aún más la estimación de  $P_r$ . Como físicamente la presión atmosférica en el centro del ojo del huracán es igual a  $P_o$ , la ecuación (51) solo es válida para  $r > 0$ .

En la tabla V se muestra la relación lineal utilizando el coeficiente de correlación de Pearson, de la latitud, la velocidad de vientos máximos, la presión atmosférica en el ojo y el

Tabla v: Relación lineal entre  $P_i$ ,  $\varphi$ ,  $V_{Max}$ ,  $P_o$  y  $R_{Max}$ .

	$\varphi$	$V_{Max}$	$P_o$	$R_{Max}$
$P_i$	0,37	-0,27	0,36	0,16
$P_o$	0,38	-0,93	1,00	0,24

radio de vientos máximos con la presión atmosférica en la última isobara cerrada  $P_i$ , podemos notar muy claramente que  $P_i$  tiene una dependencia lineal con  $\varphi$ ,  $V_{Max}$ ,  $P_o$  y  $R_{Max}$ .

Se conoce que existe una relación entre  $P_o$  y  $V_{Max}$ , [1] y la mayoría de los autores reportan que esta dependencia es cuadrática, pero en la tabla v podemos observar que hay una dependencia lineal muy fuerte, para determinar cual de las dos era mejor efectuamos un ajuste por mínimos cuadrados lineal y otro cuadrático, a partir de los cuales se obtuvieron las ecuaciones (52) y (53).

$$V_{Max} = -0,5017P_o + 5,3185 \cdot 10^2 \quad (52)$$

$$V_{Max} = -2,0129 \cdot 10^{-3}P_o^2 + 3,3262P_o - 1,2872 \cdot 10^3 \quad (53)$$

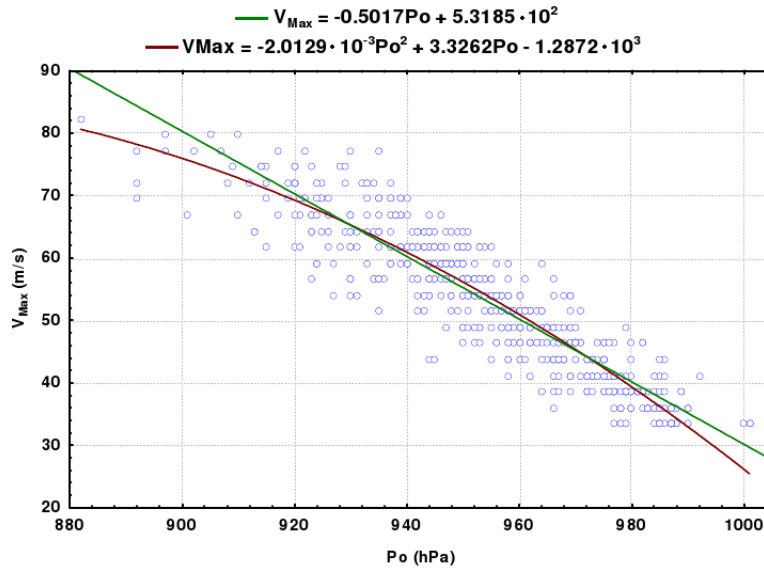


Figura 17: Ajustes de  $V_{Max}$  en función de  $P_o$ .

Como se muestra en la tabla VI, ambos coeficientes de correlación son muy similares

diferenciándose solamente en la tercera cifra decimal, realizando un análisis de los residuos se obtuvo un orden de diferencia por debajo para el ajuste lineal en el valor medio de los residuos, la desviación estándar de ambos es muy similar, lo cual nos dice que el ajuste lineal es mejor que el cuadrático. En la figura 17 se muestra la similitud entre ambos ajustes.

Tabla VI: Comparación entre un ajuste lineal y uno cuadrático de  $V_{Max}$  y  $P_o$ .

Ajuste	Coefficiente de correlación	Valor medio de los residuos (m/s)	Desviación standard de lo residuos (m/s)
Lineal	0,920	$8,03 \cdot 10^{-3}$	4,39
Cuadrático	0,925	$5,23 \cdot 10^{-2}$	4,25

Quedando demostrada que la relación de  $P_o$  con  $V_{Max}$  y observando en la tabla v que la dependencia lineal de  $P_i$  con  $P_o$  es más fuerte que la dependencia lineal de  $P_i$  con  $V_{Max}$  y que la dependencia lineal de  $P_i$  con  $\varphi$  y con  $P_o$  es más del doble que la dependencia de  $P_i$  con  $R_{Max}$  buscamos una ecuación que ajustara  $P_i$  únicamente en función de  $\varphi$  y  $P_o$ , encontrando que la ecuación (54) fue la que mejor ajustó, con un coeficiente de determinación múltiple ajustado de 0,27, que es estrictamente significativo para un nivel de significancia de 0,05 y un valor medio de los residuos de  $5,49 \cdot 10^{-3} hPa$ , la desviación standard de los residuos fue de  $2,27 hPa$ . En la figura 18 se muestra el ajuste lineal de  $P_i$ . Quedando finalmente que la ecuación (51) es válida para  $P_r \leq P_i$ .

$$P_i = 3,2653 \cdot 10^{-2} P_o + 0,1379\varphi + 976,2204 \quad (54)$$

### 3.2. Estructura de un huracán

Para determinar la estructura interna de un huracán se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson con un nivel de significancia de 0,05, en la tabla VII mostramos el resultado de la dependencia lineal entre  $\varphi$ ,  $V_{Max}$ ,  $P_o$ ,  $R_{Max}$  y  $R$ , donde se aprecia muy claramente que existe una dependencia lineal entre todas estas variables, según las ecuaciones (52) y (53) existe

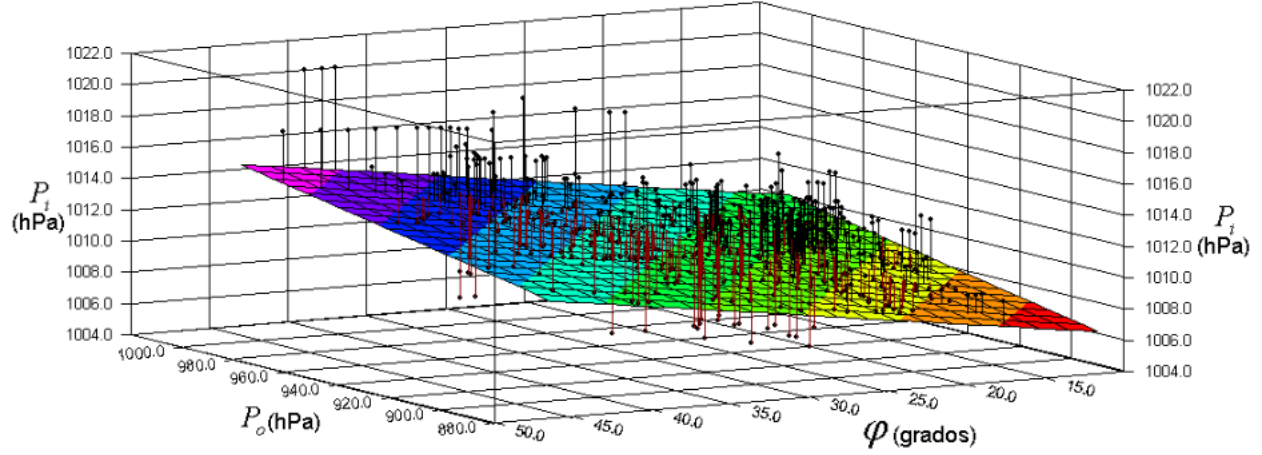


Figura 18: Función de estimación de  $P_i$

dependencia entre  $P_o$  y  $V_{Max}$  por lo que podemos eliminar a  $P_o$  o a  $V_{Max}$ , por último vemos que la mejor relación lineal es entre  $R_{Max}$  y  $\varphi$  por lo que procedimos a encontrar un modelos de la forma  $R_{Max} = f(P_o, \varphi)$ , obteniéndose la ecuación (55).

Tabla VII: Matriz de correlación cruzada entre  $\varphi$ ,  $V_{Max}$ ,  $P_o$ ,  $R_{Max}$  y  $R$ .

	$\varphi$	$V_{Max}$	$P_o$	$R_{Max}$	$R$
$\varphi$	1,00	-0,45	0,38	0,49	0,38
$V_{Max}$	-0,45	1,00	-0,93	-0,29	-0,10
$P_o$	0,38	-0,93	1,00	0,24	0,05
$R_{Max}$	0,49	-0,29	0,24	1,00	0,62
$R$	0,38	-0,10	0,05	0,62	1,00

$$R_{Max} = 6,5544 \cdot 10^{-2} P_o + 1,0329 \varphi - 50,6576 \quad (55)$$

El coeficiente de determinación múltiple ajustado fue de 0,21 que es estrictamente significativo para un nivel de significancia de 0,05. En la figura 19 podemos apreciar que la mayoría de los datos experimentales están muy cerca de la superficie de ajuste.

Por último comparamos mediante un análisis de los residuos al modelos descrito por la ecuación (55) con los modelos más reportados por la literatura (tabla VIII) obteniéndose que el promedio de los residuos del modelo propuesto es uno o dos órdenes menor que la mayoría de los modelos, excepto el modelo de [74] que está en el mismo orden, aunque el promedio de los residuos del modelo propuesto tiende mucho más rápido a cero y la desviación standard

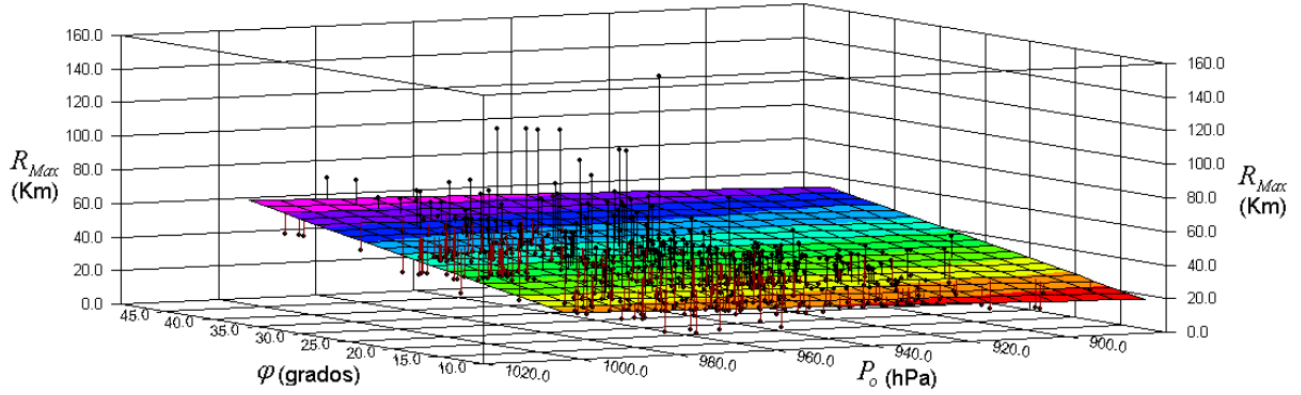


Figura 19: Función de estimación de  $R_{Max}$

es menor, lo cual concluye que es mucho más exacto que los todos los restantes modelos.

Tabla VIII: Comparación del modelo propuesto con los más reportados.

	Propuesto	Vickery et al.	Willoughby y Rahn	Silva et al.	Portela y Salas	Vickery y Wadhwa	Kossin et al.
Promedio de los Residuos ( $km$ )	-0,17	-0,87	4,78	-7,52	-11,68	-1,89	16,10
Desviación standard de los residuos ( $km$ )	15,25	16,35	15,41	16,81	16,38	16,92	14,30

Para completar la estructura de interna de un huracán solo nos resta determinar a  $R = f(R_{Max})$ , como la dispersión de ambos radios es muy grande mediante el análisis exploratorio de datos aplicamos un filtrado de datos y seleccionamos todos los datos que están entre el percentil 10 y el 90. La tabla VII muestra de forma muy clara que hay una dependencia lineal entre ambas variables, esto significa que un ajuste puede ser lineal o no lineal con una mejor correlación, buscando la curva que mejor se ajustara a los datos experimentales encontramos que:

$$R = 49,3136 \left( 1 - e^{-1,6511 \cdot 10^{-2} R_{Max}} \right) \quad (56)$$

Siendo el coeficiente de determinación ajustado 0,41, que es estrictamente significativo

para un nivel de significancia de 0,05, comparando éste con el representado en la tabla VII vemos que tiene una mejor correlación que el ajuste lineal. El error estándar de estimación fue de 8,06 km . Para corroborar este resultado se aplicó un análisis de los residuo obteniéndose que el valor promedio de los errores fue de 0,79 km . En la figura 20 se representan gráficamente el ajuste obtenido y los datos experimentales.

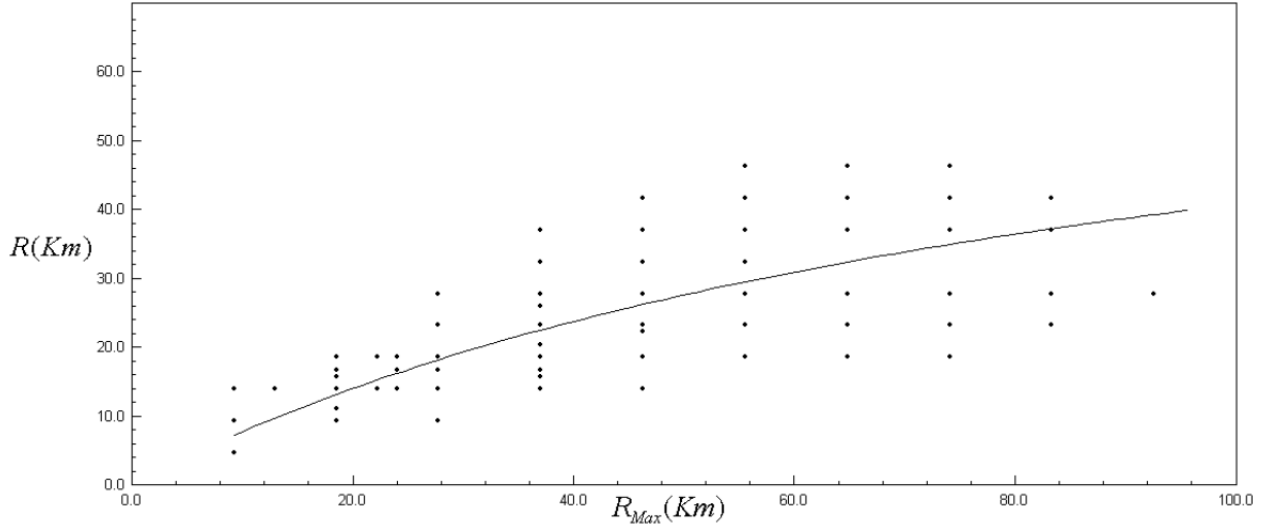


Figura 20: Función de estimación de  $R$  en función de  $R_{Max}$

Para terminar con la estructura de los huracanes buscamos un modelo para determinar el radio de la última isobara cerrada ( $R_i$ ) ya que el campo de viento de circulación general es hasta la ultima isobara cerrada, los vientos son tangenciales a la isobara; para esto se analizó la dependencia lineal de  $R_i$  con  $\varphi$ ,  $V_{Max}$ ,  $P_o$ ,  $R_{Max}$  y  $P_i$  mediante el coeficiente de correlación por rangos de Spearman (tabla IX), donde se aprecia que  $R_i$  tiene dependencia lineal con todas las magnitudes, teniendo en cuenta que  $P_o$  esta relacionada con  $V_{Max}$  y con  $P_i$  y  $\varphi$  mediante las ecuaciones (52), (53) y (54) respectivamente, entonces solo nos quedaría buscar una ecuación en funcion solamente de  $P_o$  y  $R_{Max}$ .

Tabla IX: Dependencia lineal de  $R_i$  con  $\varphi$ ,  $V_{Max}$ ,  $P_o$ ,  $R_{Max}$  y  $P_i$ .

	$\varphi$	$V_{Max}$	$P_o$	$R_{Max}$	$P_i$
$R_i$	0,13	0,16	-0,28	0,16	-0,12

Se obtuvo la ecuación (57) con un coeficiente de determinación múltiple ajustado de 0,12,

éste es estrictamente significativo para un nivel de significancia de 0,05, en la figura 21 se muestra la comparación entre el modelo obtenido y los datos experimentales. Este modelo también fue probado mediante un análisis de los residuos, obteniéndose un valor promedio de los residuos de 0,02 *km* y una desviación standard de 98,2 *km*.

$$R_i = 1,4043R_{Max} - 1,6906P_o + 1951,6 \quad (57)$$

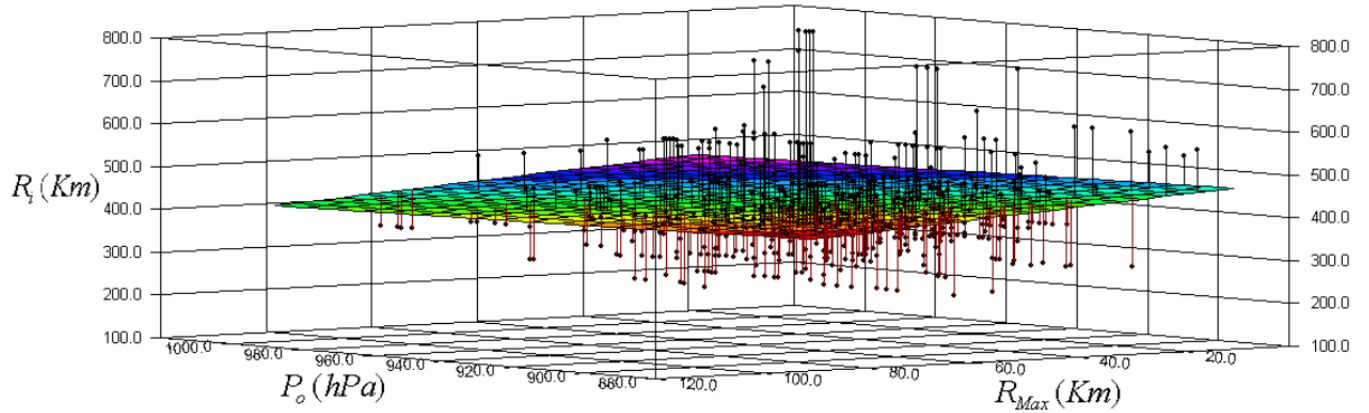


Figura 21: Ajuste de  $R_i$ .

Haciendo un análisis de la estadística básica de los valores experimentales de  $R_i$  (tabla x) podemos apreciar que la desviación standard de los residuos es menor que el valor mínimo experimental de  $R_i$ .

Tabla x: Estadística básica de los valores experimentales de  $R_i$ .

	Promedio ( <i>km</i> )	Mínimo ( <i>km</i> )	Máximo ( <i>km</i> )	Desviación standard ( <i>km</i> )
$R_i$	387,1	185,2	787,1	104,8

Quedando finalmente la estructura de un huracán como se muestra en la figura 22, donde  $R$ ,  $R_{Max}$  y  $R_i$  se determinan por las ecuaciones (56), (55) y (57) respectivamente.



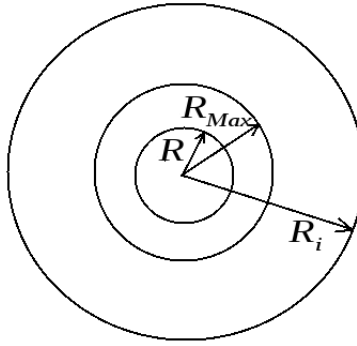


Figura 22: Estructura de un huracán.

### 3.3. Modelo de predicción del campo de velocidades

La velocidad del viento ( $V_r$ ) dentro de un huracán aumenta con la distancia  $r$ , desde  $R$  hasta llegar a  $R_{Max}$ , donde alcanza su máxima velocidad ( $V_{Max}$ ) y a medida que nos alejamos en  $r$ , a partir de  $R_{Max}$  disminuye. Para el interior del ojo hay una calma relativa ( $V_r = 0$ ). Teniendo en cuenta esto para la determinación del campo de velocidades del viento lo hemos dividido en dos zonas según la estructura definida en la figura 22.

Para encontrar un modelo que se ajustara al comportamiento de  $V_r$  en la zona de  $R$  a  $R_{Max}$  se calculó la relación lineal de  $V_r$  con  $V_{Max}$ ,  $P_o$ ,  $r$ ,  $R_{Max}$  y  $r/R_{Max}$  mediante el coeficiente de correlación por rangos de Spearman con un nivel de significancia de 0,05, cuyos resultados mostramos en la tabla XI.

Tabla XI: Dependencia lineal de  $V_r$  con  $V_{Max}$ ,  $P_o$ ,  $r$ ,  $R_{Max}$  y  $r/R_{Max}$ .

	$V_{Max}$	$P_o$	$r$	$R_{Max}$	$\left(\frac{r}{R_{Max}}\right)$
$V_r$	0,48	-0,43	0,16	-0,12	0,41

Podemos observar que hay una buena dependencia lineal de  $V_r$  con  $V_{Max}$ ,  $P_o$  y  $r/R_{Max}$ , como  $V_{Max}$  y  $P_o$  están relacionadas mediante las ecuaciones (52) y (53) buscamos una ecuación que ajustó a  $V_r$  en función únicamente de  $V_{Max}$  y de la razón  $r/R_{Max}$ , como resultado de esto se obtuvo la ecuación (58).

$$V_r = 0,2573 V_{Max} \left( \frac{r}{R_{Max}} \right)^{0,2230} + 11,6884 \quad (58)$$

El coeficiente de determinación múltiple ajustado fue de 0,19 (estrictamente significativo para un nivel de significancia de 0,05) y el error standard de 5,9  $m/s$ , también se realizó un análisis de los residuos en el cual su promedio fue de  $1,9 \cdot 10^{-4} m/s$ .

De manera muy similar a la anterior, se buscó un modelo que se ajustara al comportamiento de  $V_r$  en la zona  $r > R_{Max}$ , también se calculó la relación lineal de  $V_r$  con  $V_{Max}$ ,  $P_o$ ,  $r$ ,  $R_{Max}$  y a diferencia de la anterior, con  $R_{Max}/r$ , mediante el coeficiente de correlación por rangos de Spearman con un nivel de significancia de 0,05, cuyos valores se muestran en la tabla XII.

Tabla XII: Dependencia lineal de  $V_r$  con  $V_{Max}$ ,  $P_o$ ,  $r$ ,  $R_{Max}$  y  $\left(\frac{R_{Max}}{r}\right)$ .

	$V_{Max}$	$P_o$	$r$	$R_{Max}$	$\left(\frac{R_{Max}}{r}\right)$
$V_r$	0,47	-0,08	-0,52	0,23	0,63

Se observa que hay una buena dependencia lineal de  $V_r$  con  $V_{Max}$ ,  $r$ ,  $R_{Max}$  y  $R_{Max}/r$ , como la dependencia de  $V_r$  con  $R_{Max}/r$  es mucho más fuerte que con  $r$  y  $R_{Max}$  buscamos una ecuación que ajustó a  $V_r$  en función únicamente de  $V_{Max}$  y de la razón  $R_{Max}/r$ , como resultado de esto se obtuvo la ecuación (59).

$$V_r = 0,6641 V_{Max} \left( \frac{R_{Max}}{r} \right)^{0,9181} + 7,4748 \quad (59)$$

El coeficiente de determinación múltiple ajustado fue de 0,34, que es estrictamente significativo para un nivel de significancia de 0,05 y el error standard de 3,6  $m/s$ , también se analizaron los residuos y su promedio fue de  $2,7 \cdot 10^{-4} m/s$ .

En la mayoría de las imágenes visibles e IR de los huracanes estudiados el ojo estaba bien definido por el patrón nuboso, lo que muestra una simetría en el campo de velocidades del viento y lo contrario es observado a medida que nos alejamos de  $R_{Max}$  (figura 12), se observa

una asimetría en el campo de velocidades del viento, por esto se decidió buscar un modelo que tuviera en cuenta la asimetría de los vientos (acápite 1.5.2). Se tomó  $V_f > 1,66 \text{ m/s}$ . En la tabla XIII mostramos la dependencia lineal de  $V_r$  con  $V_{Max}$ ,  $P_o$ ,  $r$ ,  $V_f$ ,  $R_{Max}$ ,  $\left(\frac{R_{Max}}{r}\right)$  y  $\left(\frac{2r R_{Max}}{r^2 + R_{Max}^2}\right)$ , donde observamos que la dependencia de  $V_r$  con  $\left(\frac{R_{Max}}{r}\right)$  es menor que la de  $V_r$  con  $\left(\frac{2r R_{Max}}{r^2 + R_{Max}^2}\right)$ , entonces buscamos una ecuación de  $V_r$  en función de  $V_{Max}$ ,  $V_f$  y  $\left(\frac{2r R_{Max}}{r^2 + R_{Max}^2}\right)$ , obteniéndose la ecuación (60).

Tabla XIII: Dependencia lineal de  $V_r$  con  $V_{Max}$ ,  $P_o$ ,  $r$ ,  $R_{Max}$ ,  $V_f$ ,  $\left(\frac{R_{Max}}{r}\right)$  y  $\left(\frac{2r R_{Max}}{r^2 + R_{Max}^2}\right)$  para  $V_f > 1,66 \text{ m/s}$ .

	$V_{Max}$	$P_o$	$r$	$R_{Max}$	$V_f$	$\left(\frac{R_{Max}}{r}\right)$	$\left(\frac{2r R_{Max}}{r^2 + R_{Max}^2}\right)$
$V_r$	0,53	-0,17	-0,55	0,33	0,27	0,46	0,60

$$V_r = 0,5612 V_{Max} \left(\frac{2r R_{Max}}{r^2 + R_{Max}^2}\right) + 0,8324 V_f \quad (60)$$

El coeficiente de determinación múltiple ajustado fue de 0,20 (estrictamente significativo para un nivel de significancia de 0,05) y el error standard de  $4,2 \text{ m/s}$ . Para validar los modelos obtenidos (ecuaciones (58), (59) y (60)) se comparó con los modelos expuestos en el acápite 1.5.1 mediante un análisis de los residuos y utilizando los datos experimentales de las boyas (tabla II y figura 15) durante el paso de los huracanes Dean, Gustav, Ike, Félix y Paloma. La tabla XIV muestra que el modelo propuesto mediante la combinación de las ecuaciones (58) y (59) ofrece mejores resultados que los demás modelos, con un promedio de los residuos de  $0,19 \text{ m/s}$  y una desviación standard de  $4,12 \text{ m/s}$ , que es la menor de todas. El otro modelo propuesto mediante la combinación de las ecuaciones (58) y (60) arroja mejores resultados que todos los demás modelos pero más malo que el modelo SPLASH. Como físicamente el campo de velocidades del viento es asimétrico, éste último modelo debería arrojar mejores resultados que el resto, pero debido a que en las simulaciones con Typhoon se obtuvieron los valores hasta  $r = 500 \text{ km}$  y es a partir de esta distancia que el campo de viento empieza a desorganizarse, observe en la tabla X que el valor experimental máximo de  $R_i = 787,1 \text{ km}$ . Esto fue corroborado analizando con GeoMap y SATVECT las imágenes obtenidas de

QuikSCAT.

Tabla XIV: Comparación de los modelos de viento propuestos con los modelos existentes de predicción de viento.

	SPLASH	Collins Viehnaman	Rankine	Rankine Modificado	Lizano	Propuesto	Propuesto ( $V_f$ )
Valor medio ( $m/s$ )	0,28	-2,02	5,58	3,82	-2,26	0,19	1,07
Desviación Standard ( $m/s$ )	6,74	7,50	5,69	5,60	7,85	4,12	4,47

En la tabla XIV no aparece la comparación con el modelo expuesto por [30] porque en [45] se compara este modelo y el modelo de combinado [43] con datos experimentales obtenidos en las boyas 42001, 42040, 42039, 42036, 41009 y 41010 durante el paso de los huracanes George (septiembre 1998), Denis (agosto 1999), Bertha (julio 1996), Floyd (septiembre 1999) y Opal (1995), en dicha comparación el modelo de combinado arrojó un mejor resultado.

### 3.4. Modelo de predicción del oleaje

#### 3.4.1. Modelo de Olas para un huracán cuasiestacionario

Con el objetivo de facilitar el uso de la figura 9, debido a que es simétrico respecto al eje  $Y$  se buscaron solo dos expresiones analíticas, una para el cuarto cuadrante (caracteriza todo el lado izquierdo del gráfico) y otra para el primer cuadrante (caracteriza todo el lado derecho del gráfico). Este gráfico se dividió en secciones desde  $0^\circ$  hasta  $90^\circ$  y desde  $270^\circ$  hasta  $348.75^\circ$ , barriendo toda la parte superior de la figura 9 cada  $11.25^\circ$ , quedando dividido en 17 direcciones, para cada una se obtuvo una ecuación de la forma la ecuación (61).

$$\frac{H_r}{H_{Max}} = A e^B \left( \frac{r}{R_{Max}} \right) \quad (61)$$

Esta ecuación es válida para  $r > R_{Max}$ .  $H_{Max}$  es la altura de la ola en  $R_{Max}$  determinada

por la ecuación (28) y  $H_r$  es la altura de ola calculada a la distancia  $r$  desde centro del huracán.

En las tablas XV y XVI se muestran los coeficientes  $A$  y  $B$  para los lados derecho e izquierdo respectivamente, para todos los casos el coeficiente de correlación fue de 0,99 para un nivel de significancia de 0,01 y siendo en todos los casos estrictamente significativos.

Tabla XV: Coeficientes  $A$  y  $B$  para el lado derecho.

Dirección (°)	$A$	$B$	Coefficiente de correlación	Error standard
0,0	1,0345	-0,2473	0,99	0,0072
11,25	1,0595	-0,2291	0,99	0,0065
22,5	1,0495	-0,1924	0,99	0,0117
33,75	1,0944	-1,1894	0,99	0,0080
45,0	1,1401	-0,1895	0,99	0,0081
56,25	1,1413	-0,1805	0,99	0,0071
67,5	1,1840	-0,1828	0,99	0,0073
78,75	1,1854	-0,1765	0,99	0,0054
90,0	1,1745	-0,1696	0,99	0,0082

Teniendo en cuenta todo esto, procedimos a simplificar aún más, se promediaron los coeficientes  $A$  y  $B$  para ambos lados, quedando que para el lado derecho los coeficientes  $A$  y  $B$  son iguales a 1,1181 y  $-0,1952$  respectivamente; y para el lado izquierdo  $A$  y  $B$  son iguales a 0,9458 y  $-0,3365$  respectivamente.

Tabla XVI: Coeficientes  $A$  y  $B$  para el lado izquierdo.

Dirección (°)	$A$	$B$	Coefficiente de correlación	Error standard
348,75	0,9719	-0,2574	0,99	0,0130
337,5	0,9050	-0,2582	0,99	0,0162
326,25	0,9348	-0,2970	0,99	0,0031
315,0	0,9390	-0,3273	0,99	0,0010
303,75	0,9348	-0,3507	0,99	0,0031
292,5	0,9383	-0,3774	0,99	0,0029
281,25	0,9688	-0,4082	0,99	0,0024
270,0	0,9458	-0,3365	0,99	0,0040

Finalmente se pueden escribir la ecuación (62) para el lado derecho y la ecuación (63) para

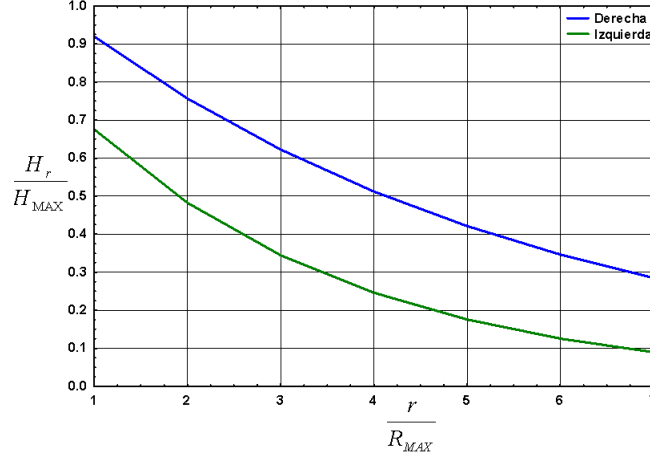


Figura 23: Campo de olas generados por un huracán según las ecuaciones (62) y (63).

el lado izquierdo. En la figura 23 se muestra el comportamiento del campo de olas generado por un huracán según las ecuaciones (62) y (63), siendo mucho más fácil de determinar  $H_r$ .

$$\frac{H_r}{H_{Max}} = 1,1181 E^{-0,1952 \left( \frac{r}{R_{Max}} \right)} \quad (62)$$

$$\frac{H_r}{H_{Max}} = 0,9458 E^{-0,3365 \left( \frac{r}{R_{Max}} \right)} \quad (63)$$

Se comprobaron experimentalmente ambas ecuaciones utilizando los datos de las mediciones de la altura de las olas en las boyas 42059, 42057 y 42056 durante el paso de los huracanes Dean y Paloma, obteniéndose un 7% y un 35% de error para el lado derecho e izquierdo respectivamente, haciendo la misma comprobación utilizando la figura 9 se obtuvo un 5% y un 31% para el lado derecho e izquierdo respectivamente.

### 3.4.2. Modelo de Olas para un huracán en movimiento

Para llegar a un modelo que sirva para determinar  $H_s$  y  $T_s$  y que tenga en cuenta a  $V_f$ , nos centramos las ecuaciones (34) y (35), después de tratar de calibrar estas ecuaciones para nuestra área geográfica nos dimos cuenta que no se ajustaban, entonces probamos varias combinaciones de  $H_s$  y  $T_s$  en función de  $P_o$ ,  $V_{Max}$ ,  $R_{Max}$ ,  $L_f$  y  $V_f$  teniendo en cuenta su dependencia lineal (tabla XVII), observamos que  $H_s$  y  $T_s$  tienen buena dependencia lineal con

el resto de las magnitudes.

Tabla XVII: Dependencia lineal de  $H_s$ ,  $T_s$  y  $T_a$  con  $P_o$ ,  $V_{Max}$ ,  $R_{Max}$ ,  $L_f$  y  $V_f$ .

	$P_o$	$V_{Max}$	$R_{Max}$	$L_f$	$V_f$
$H_s$	-0,29	0,20	0,25	-0,61	0,22
$T_s$	-0,38	0,36	0,18	-0,43	0,12
$T_a$	-0,34	0,30	0,17	-0,47	0,12

Obteniendo el mejor ajuste para la ecuaciones (64) y (65) con unos coeficientes de determinación múltiples ajustados de 0,25 y 0,21 respectivamente, ambos son estrictamente significativos para un nivel de significancia de 0,05.

$$H_s = 6,6246 P_o^{-0,246} V_f^{5,87 \cdot 10^{-2}} R_{Max}^{0,275} \quad (64)$$

$$T_s = 0,1639 V_{Max}^{0,448} V_f^{8,0 \cdot 10^{-2}} R_{Max}^{0,628} \quad (65)$$

Comparando estos modelos con los de las ecuaciones (34), (35), (26) y (27) vemos que el promedio de los residuos tiene cuatro órdenes de diferencia (tabla XVIII, ajustándose mucho mejor a nuestra área de estudio.

Tabla XVIII: Comparación de modelos para estimar  $H_s$  y  $T_s$ .

	$H_s$ propuesto (m)	Ecuación (34) (m)	Ecuación (26) (m)	$T_s$ propuesto (s)	Ecuación (35) (s)	Ecuación (27) (s)
Promedio de los residuos	$1,8 \cdot 10^{-4}$	-4,7	3,2	$-3,9 \cdot 10^{-4}$	-2,8	8,1
Desviación standard	2,0	2,3	2,0	2,3	2,5	2,7

### 3.4.3. Modelo simple de olas

Buscando un modelo mucho más simple para estimar  $H_s$ , encontramos una relación que solo depende de  $L_f$  y de  $V_r$ .  $L_f$  es fácilmente determinable puesto que los boletines meteorológicos incluyen la posición geográfica del huracán y  $V_r$  puede ser medido con un anemómetro o puede ser calculado mediante las ecuaciones descritas en el acápite 1.5.1 o las ecuaciones (59) o (60).

Realizando una análisis de regresión múltiple obtuvimos la ecuación (66) con un coeficiente de determinación múltiple ajustado de 0,62 (estrictamente significativo para un nivel de significancia de 0,05), también se validó mediante un análisis de los residuos utilizando datos experimentales de las boyas durante el paso de los huracanes estudiados, siendo el promedio de los residuos  $2,2 \cdot 10^{-2}$  m, estando dos órdenes por debajo de los modelos descritos por la ecuaciones (34), (35), (26) y (27). En la figura 24 mostramos la superficie de regresión correspondiente a la ecuación (66) y a los datos experimentales que utilizamos para obtenerla.

$$H_s = 0,3 V_r L_f^{1,2 \cdot 10^{-3}} \quad (66)$$

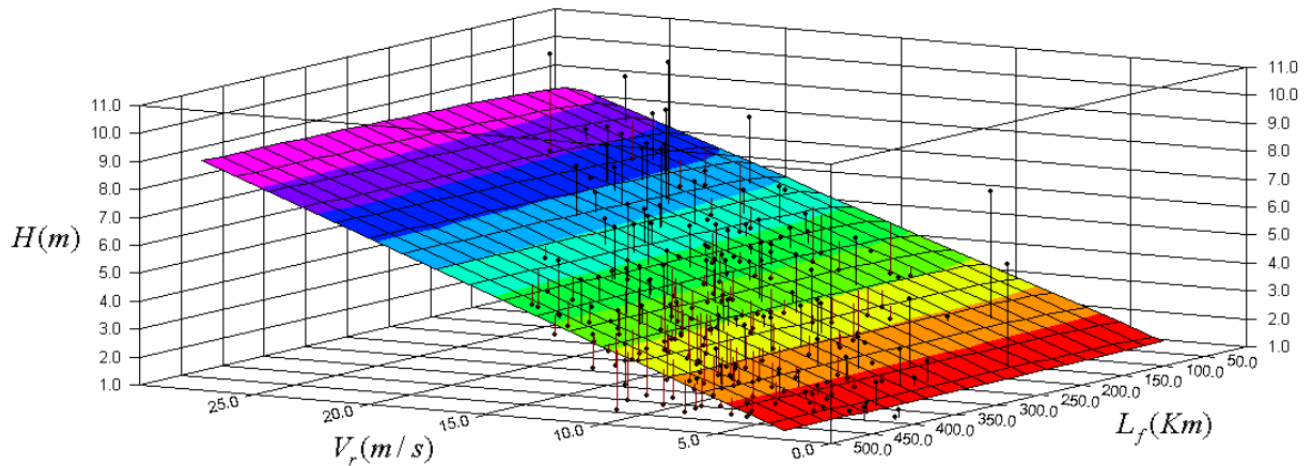


Figura 24: Ajuste de  $H_s$  en función de  $L_f$  y de  $V_r$ .



### 3.4.4. Relación entre $H_s$ y $T_s$

Según está descrito por [70],  $H_s$  y  $T_s$  están relacionados por la ecuación (33), utilizando los datos experimentales la calibramos obteniendo la ecuación (67) con un coeficiente de determinación de 0,23, que es estrictamente significativo para un nivel de significancia de 0,05.

$$T_s = 15,65 \sqrt{\frac{H_s}{g}} \quad (67)$$

Tabla XIX: Comparación de modelos para estimar  $T_s$  en función de  $H_s$ .

	Modelo propuesto Ecuación (67) (s)	Ecuación (33) (s)
Promedio de los residuos	0,24	2,40
Desviacion standard	2,30	2,20

Comparando esta ecuación con la (33) mediante un análisis de los residuos mostrado en la tabla XIX, vemos que en el modelo calibrado el promedio de los residuos está en un orden por debajo lo que reafirma que es mucho mejor que el descrito en [70], esto también lo podemos observar en el gráfico representado en la figura 25.

### 3.4.5. Modelo de olas y relación entre $H_s$ y $T_s$ cuando $H_s > 3$ m

Según [39], cuando la  $H_s > 3$  m,  $H_s$  y  $T_s$  se pueden estimar mediante las ecuaciones (36) y (37). Para comprobar si es aplicable a nuestra zona geográfica graficamos  $V_{Max}$  vs  $H_s$  (figura 26) y esto nos permitió conocer inmediatamente que no existía ninguna correlación posible de la ecuación de [39] para calcular  $H_s$ , esta ecuación se puede escribir de forma general como  $H_s = A_1 V_{Max}^{A_2}$ , donde [39] consideró  $A_2 = 1$ .

Como nuestros datos experimentales no están distribuidos linealmente buscamos un ajuste con  $A_2 \ll 1$  y encontramos a la ecuación (68) con un coeficiente de determinación ajustado de 0.01, como es tan pequeño probamos su significancia mediante la relación (44) quedando

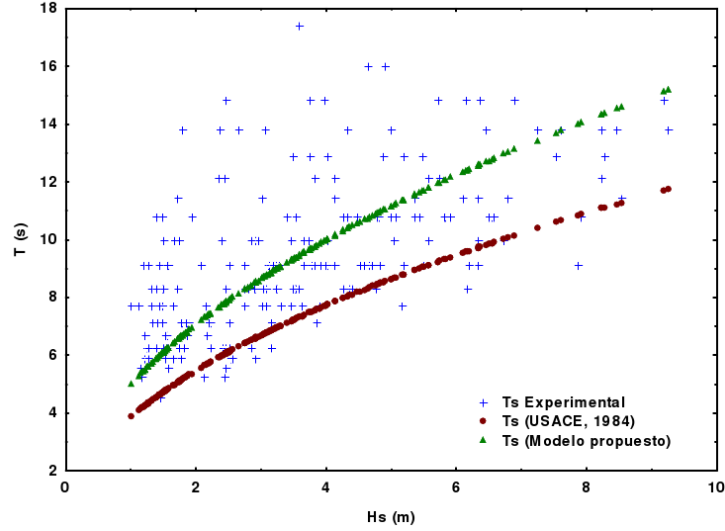


Figura 25: Ajuste de  $T_s$  en función de  $H_s$ .

que no era estrictamente significativo para ningún nivel de significancia de la tabla  $t$  de Student. Por lo que éste modelo no es aplicable a nuestra zona de estudio.

$$H_s = 1,5957 V_{Max}^{0,303} \quad (68)$$

Trantando de probar si la ecuación (37) si se ajustaba a área geográfica nuestra, graficamos  $T_s$  vs  $H_s$  (figura 27) y nos percatamos que la distribución de los valores experimentales es muy dispersa, la curva del modelo de [39] no parece ajustar estos datos, entonces buscamos una nueva curva de regresión ajustando solamente los coeficiente, obteniéndose la ecuación (69). El coeficiente de determinación ajustado fue de 0.19, siendo estrictamente significativo para un nivel de significancia de 0,05.

$$T_p = 6,235 H_s^{0,2926} \quad (69)$$

Para ganar en seguridad sobre ambos ajustes se realizó un análisis de los residuos, en la tabla XX se muestra que el modelo descrito por la ecuación (69) caracteriza mucho mejor el periodo de las olas mayores de 3 m que el propuesto por [39]. Hay una diferencia de cuatro órdenes en el promedio de los residuos entre ambos modelos.

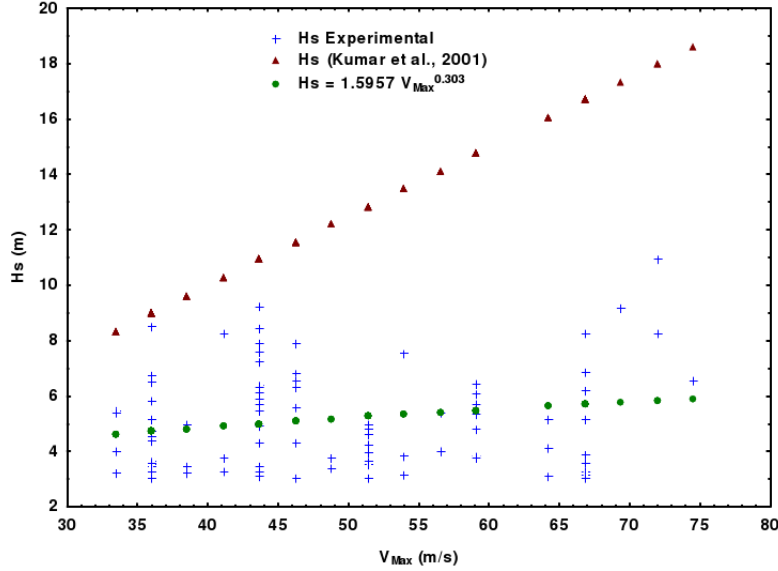


Figura 26: Ajuste de  $H_s$  en función de  $V_{Max}$  para  $H_s > 3$  m.

### 3.4.6. Relación entre $T_s$ y $T_a$

Se determinó la dependencia lineal de  $T_a$  con  $T_s$ , el coeficiente de correlación de Pearson fue de 0.83 lo que permitió encontrar la ecuación lineal (70) con un coeficiente de determinación ajustado de 0.69 (estrictamente significativo para un nivel de significancia de 0,05). El promedio de los residuos entre la ecuación (70) y los datos experimentales fue de  $2 \cdot 10^{-5}$  y su desviación standar de 0,8 s. En la figura 28 se muestra el ajuste lineal y los datos experimentales.

$$T_a = 0,4345 T_s + 2,4611 \quad (70)$$

### 3.4.7. Otras formas para estimar $T_a$

Debido a la buena correlación entre  $T_a$  y  $T_s$  y para complementar los modelos de estimación de  $T_s$ , buscamos modelos alternativos a las ecuaciones (67), (65) y (69) para estimar a  $T_a$ . Se obtuvieron como resultado las ecuaciones (71), (72) y (73).

Ecuación que relaciona a  $H_s$  con  $T_a$ :

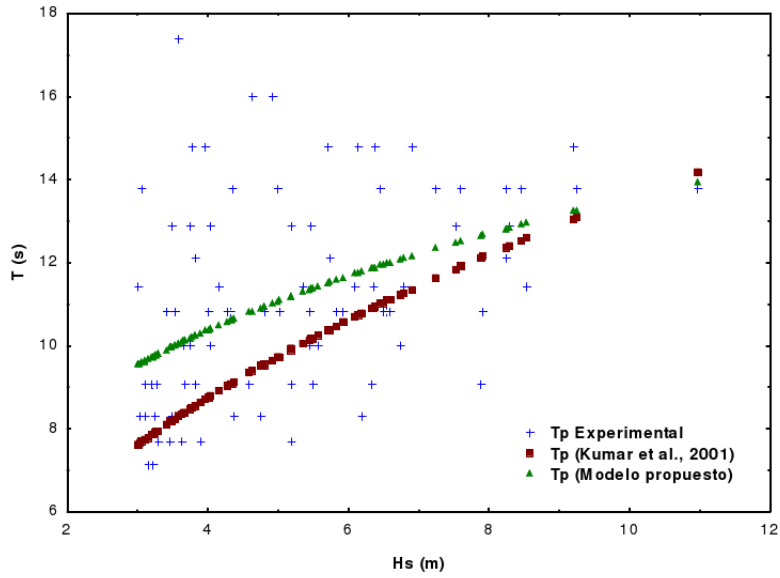


Figura 27: Ajuste de  $T_s$  en función de  $H_s$  para  $H_s > 3$  m.

Tabla xx: Comparación de modelos para estimar  $T_s$  en función de  $H_s$  para  $H_s > 3$  m.

	Modelo propuesto Ecuación (69) (s)	Ecuación (37) (s)
Promedio de los residuos	$-3,1 \cdot 10^{-4}$	5,2
Desviacion standard	2,2	3,4

$$T_a = 10,92 \sqrt{\frac{H_s}{g}} \quad (71)$$

Ecuación para determinar  $T_a$  de un huracán en movimiento:

$$T_a = 0,4359 V_{Max}^{0,2934} V_f^{7,11 \cdot 10^{-2}} R_{Max}^{0,4186} \quad (72)$$

Relación para determinar  $T_a$  en función de  $H_s$  para las olas mayores de 3 m :

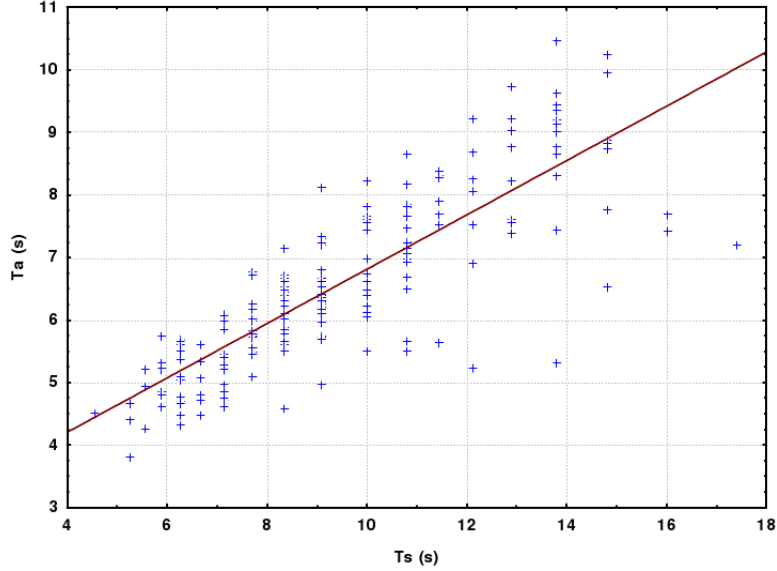


Figura 28: Ajuste de  $T_a$  en función de  $T_s$ .

$$T_a = 4,2614 H_s^{0,358} \quad (73)$$

En la tabla XXI se aprecia muy claramente que todos los modelos son buenos, fueron probados por la relación (44) siendo estrictamente significativos para un nivel de significancia de 0,05, el promedio de los residuos de todos tienden a cero y su desviación standard oscila entre 0,8 y 1,3 s. En las figuras 29 y 30 también nos muestran la buena correlación que existe entre  $T_a$  y  $H_s$ .

### 3.5. Utilización de Census 1 en el pronósticos de las series de tiempo de $V_{Max}$ y de $Po$ .

Para demostrar que se puede pronosticar las series de tiempo de  $V_{Max}$  y de  $Po$  utilizando la descomposición de series por X11 (Census I), se tomaron los datos históricos de las trayectorias de los huracanes Ike e Igor. Escogimos el modelo aditivo (ecuación (38)) por ser el más sencillo a la hora de determinar sus componentes. Como las mediciones de  $V_{Max}$  y de  $Po$  son realizadas cada 3 horas, tomamos la estacionalidad como 8, ya que son 8 mediciones diarias. Como las series que analizaremos son de corto periodo (Ike, 8 días y 9 horas e Igor, 5 días y 6 horas) no se pueden obtener las componentes  $T_t$  y  $C_t$  separadas, entonces ajustaremos el modelo aditivo según la ecuación (74).

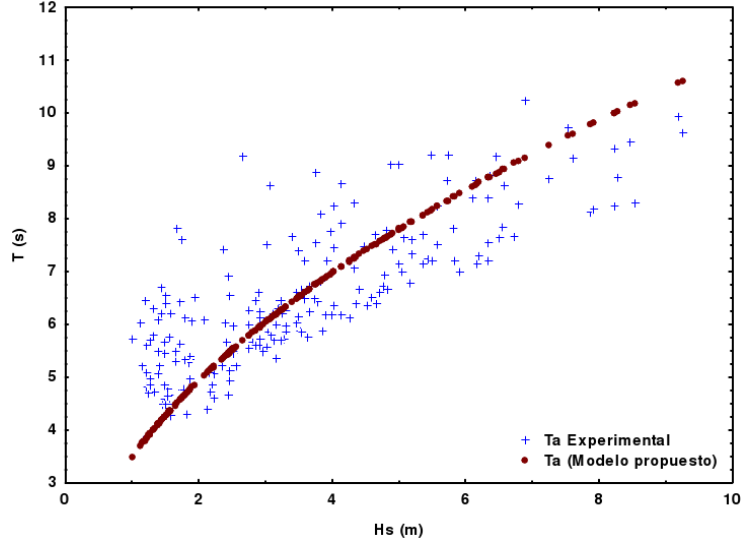


Figura 29: Ajuste de  $T_a$  en función de  $H_s$ .

$$Z_t = TC_t + S_t + I_t \quad (74)$$

Donde:

$$TC_t = T_t + C_t \quad (75)$$

### 3.5.1. Análisis de las series de $V_{Max}$ y de $P_o$ para el huracán Ike.

Se aplicó la descomposición de la serie de  $V_{Max}$  y de  $P_o$  del huracán Ike utilizando el modelo de la ecuación (74). En la figura 31 podemos ver que la diferencia entre la serie original y la pronosticada es muy pequeña.

De forma muy similar como ocurre para la serie de  $V_{Max}$ , en la comparación de la serie original de  $P_o$  con la pronosticada (figura 33) se observa también muy poca diferencia.

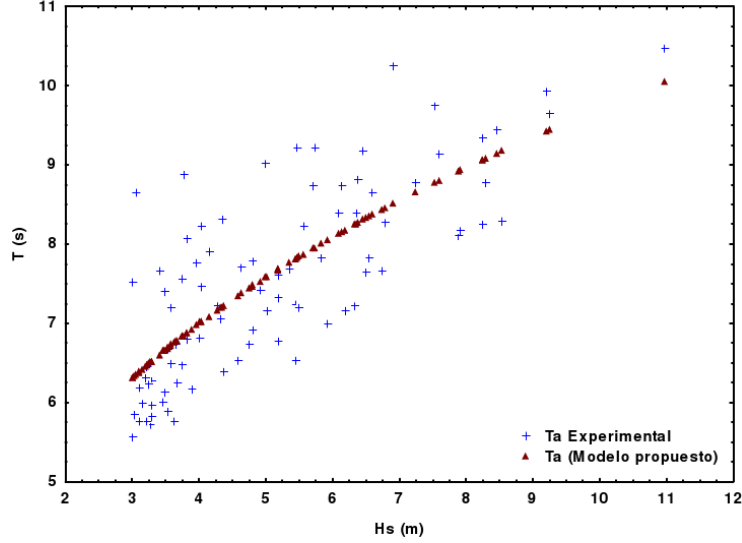


Figura 30: Ajuste de  $T_a$  en función de  $H_s$  para  $H_s > 3m$ .

Analizando las figuras 32 y 34 que corresponden a las series de los residuos de  $V_{Max}$  y de  $P_o$  y a sus histogramas de frecuencia absoluta se puede ver que el promedio en ambas series de residuos tiende a cero lo que nos lleva a que ambas series nos dan un pronóstico muy bueno. En la serie de los residuos de  $V_{Max}$  los residuos oscilan entre  $-2,6 m/s$  y  $3,5 m/s$  (tabla XXII) y en la de  $P_o$  oscilan entre  $-3,3 hPa$  y  $3,7 hPa$ . Si observamos los histogramas de los residuos en el intervalo de  $-0,5$  a  $0,5$  notamos que en este rango se encuentran la mayor cantidad de valores para ambas series, siendo la frecuencia en este intervalo  $50,72\%$  para la serie de  $V_{Max}$  y  $36,23\%$  para la serie de  $P_o$ . Ambos histogramas de frecuencias se ajustan a una distribución normal en la cual la serie de  $V_{Max}$  es una curva leptocúrtica y la de  $P_o$  es mesocúrtica, además como existe un orden de diferencia entre el promedio de los residuos (tabla XXII) podemos decir que es más exacto pronosticar a  $V_{Max}$  y estimar a  $P_o$  mediante la ecuación (52) o la ecuación (53) para el caso de huracán Ike.

### 3.5.2. Análisis de las series de $V_{Max}$ y de $P_o$ para el huracán Igor.

Aplicando el mismo procedimiento que para el huracán Ike a los datos de la trayectoria del huracán Igor obtuvimos resultados muy parecidos. En la figura 35 podemos ver que la diferencia entre la serie original y la pronosticada es muy pequeña. De forma muy similar como ocurre para la serie de  $V_{Max}$ , en la comparación de la serie original de  $P_o$  con la pronosticada (figura 37) se observa también muy poca diferencia entre la serie original y la pronosticada.

Analizando las figuras 36 y 38 que correspondientes a las series de los residuos de  $V_{Max}$

Tabla XXI: Comparación de modelos para estimar  $T_a$ .

	$T_a$ Ecuación (70)	$T_a$ Ecuación (71)	$T_a$ Ecuación (72)	$T_a$ Ecuación (73)
Coefficiente de determinación ajustado	0,69	0,47	0,16	0,58
Promedio de los residuos (s)	$2,0 \cdot 10^{-5}$	0,18	$7,6 \cdot 10^{-5}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$
Desviación standard de los residuos (s)	0,8	1,0	1,3	0,8

y de  $P_o$  y a sus histogramas de frecuencia absoluta apreciamos que el promedio en ambas series de residuos tiende a cero, en la serie de  $V_{Max}$  mucho más rápido que en la de  $P_o$ , hay un orden de diferencia (tabla XXIII) por lo que podemos realizar pronósticos buenos con cada una de ellas. En la serie de los residuos de  $V_{Max}$  los residuos oscilan entre  $-1,5 \text{ m/s}$  y  $3,0 \text{ m/s}$  (tabla XXIII) y en la de  $P_o$  oscilan entre  $-3,0 \text{ hPa}$  y  $2,6 \text{ hPa}$ . En el intervalo de  $-0,5$  a  $0,5$  de los histogramas vemos que se encuentran la mayor cantidad de valores para ambas series, siendo la frecuencia  $66,66 \%$  y  $45,45 \%$  para la serie de  $V_{Max}$  y  $P_o$  respectivamente.

Al igual que para el huracán Ike ambos histogramas de frecuencias se ajustan a una distribución normal en la cual la serie de  $V_{Max}$  también es una curva leptocúrtica y la de  $P_o$  es mesocúrtica. Aquí también podemos decir que es más exacto pronosticar a  $V_{Max}$  y estimar a  $P_o$  utilizando la ecuación (52) o la ecuación (53).

### 3.5.3. Análisis de las series de $V_{Max}$ y de $P_o$ para los huracanes Gustav, Dean, Ida, Dennis e Iván.

También fueron analizadas las series de  $V_{Max}$  y de  $P_o$  correspondientes a los huracanes Gustav, Dean, Ida, Dennis e Iván alcanzándose los resultados que se muestran en la tabla XXIV. Los promedios de los residuos tienen el mismo orden para todos los huracanes y su desviación standard para la  $V_{Max}$  osciló entre  $1,4$  y  $2,3 \text{ m/s}$  y para  $P_o$  osciló entre  $1,5$  y  $3,2 \text{ hPa}$ . Esto nos permite utilizar el método Census 1 para hacer pronósticos de las series de la



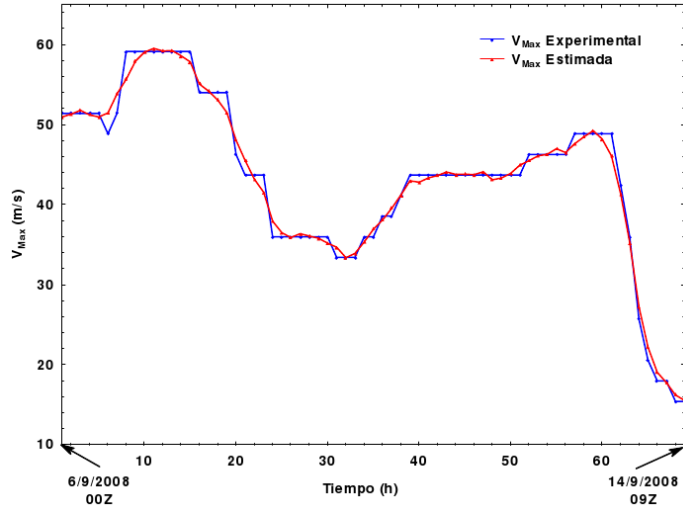


Figura 31: Comparación de las serie original y la pronosticada de  $V_{Max}$  del huracán Ike.

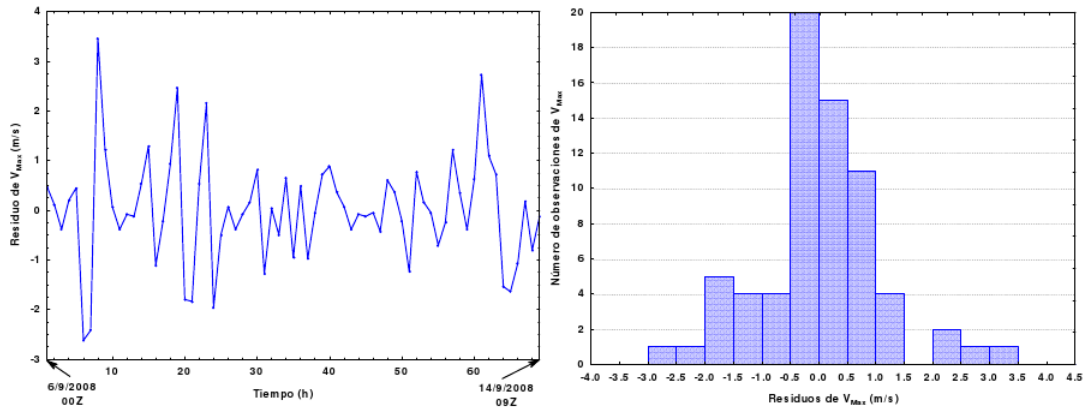


Figura 32: Residuos entre la serie original y la pronosticada de  $V_{Max}$  del huracán Ike.

$V_{Max}$  y de  $P_o$  de los huracanes con bastante exactitud.

### 3.5.4. Mejoramiento del pronóstico de las series de $V_{Max}$ y $P_o$ .

Con el propósito de hacer más exacto el pronóstico de las series de  $V_{Max}$  y  $P_o$  se realizó un suavizamiento utilizando el mismo procedimiento que [73]. Para cada una de las series se hizo una regresión lineal entre la serie original y la pronosticada por el método de Census 1, obteniéndose un mejoramiento para todas las series.

En las figuras 39 y 40 se muestra el resultado de la regresión lineal aplicada a todas las series, donde la correlación es excelente para los cuatro casos, el coeficiente de determinación ajustado osciló entre 0,98 y 0,99, siendo todos estrictamente significativos para un nivel de

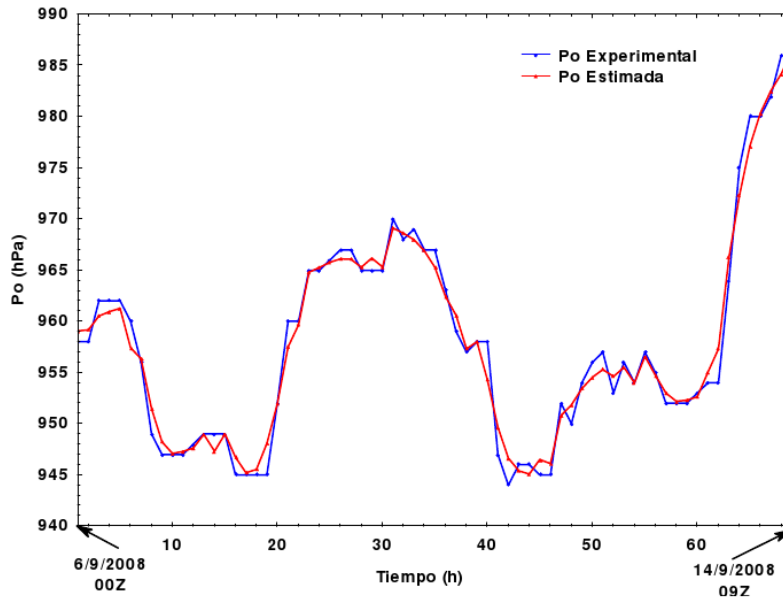


Figura 33: Comparación de las serie original y la pronosticada de  $P_o$  del huracán Ike.

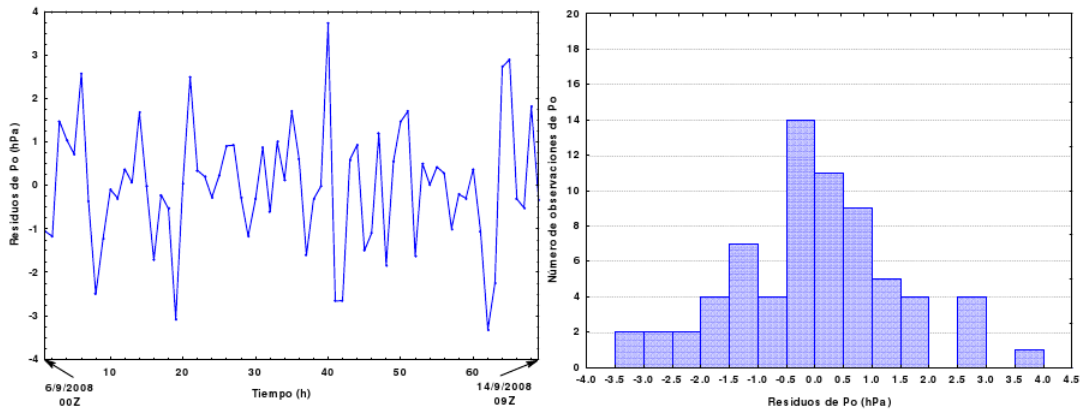


Figura 34: Residuos entre la serie original y la pronosticada de  $P_o$  del huracán Ike.

significancia de 0,05 (tabla xxv).

Tabla XXII: Comparación de los residuos para las series de  $V_{Max}$  y de  $P_o$  correspondientes al huracán Ike.

	Residuos de $V_{Max}$ (m/s)	Residuos de $P_o$ (hPa)
Mínimo	-2,6	-3,3
Máximo	3,5	3,7
Promedio de los Residuos	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$
Desviación standard	1,1	1,4

Si comparamos los promedios de los residuos de las series suavizadas (tabla XXV) con los de las series pronosticadas, tablas XXII y XXIII, podemos ver que para el caso del huracán Ike disminuyen los promedios de los residuos en un orden cuando se suavizan, por lo contrario, en el caso de huracán Igor los promedios de los residuos se mantienen en el mismo orden y las desviaciones standard prácticamente no varían.

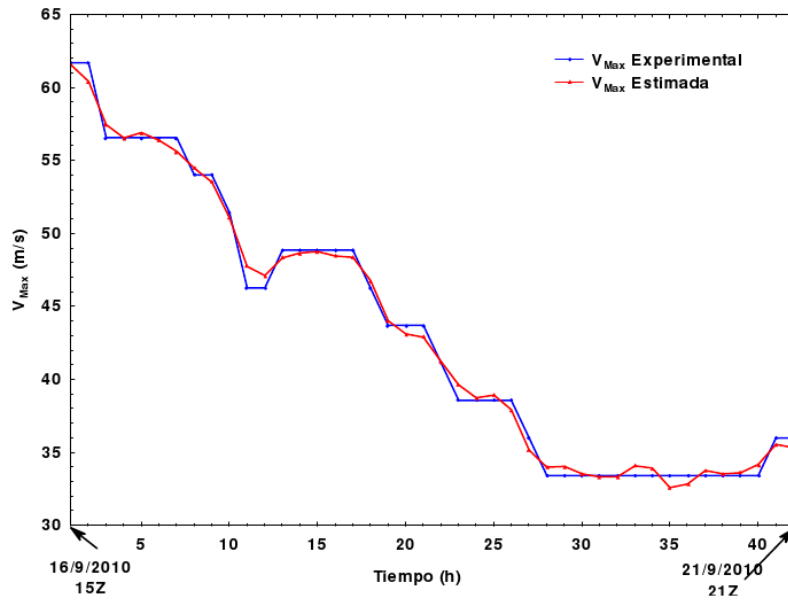


Figura 35: Comparación de la serie original y la pronosticada de  $V_{Max}$  del huracán Igor.

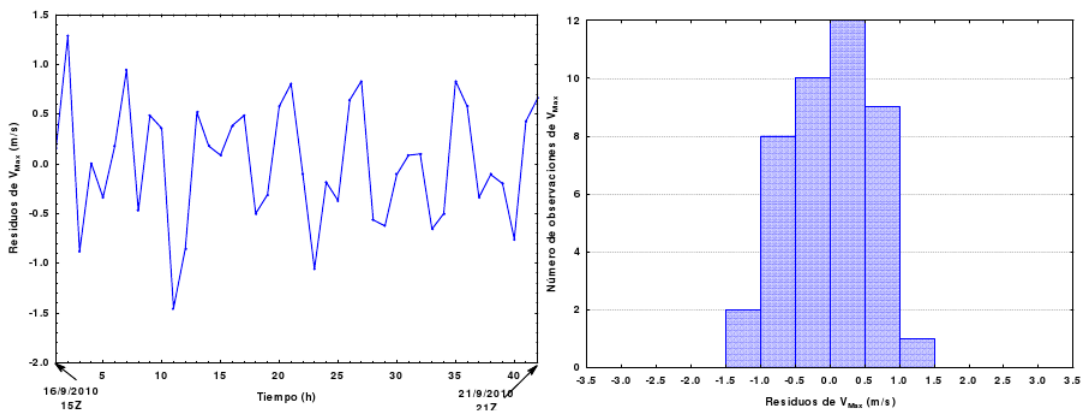


Figura 36: Residuos entre la serie original y la pronosticada de  $V_{Max}$  del huracán Igor.

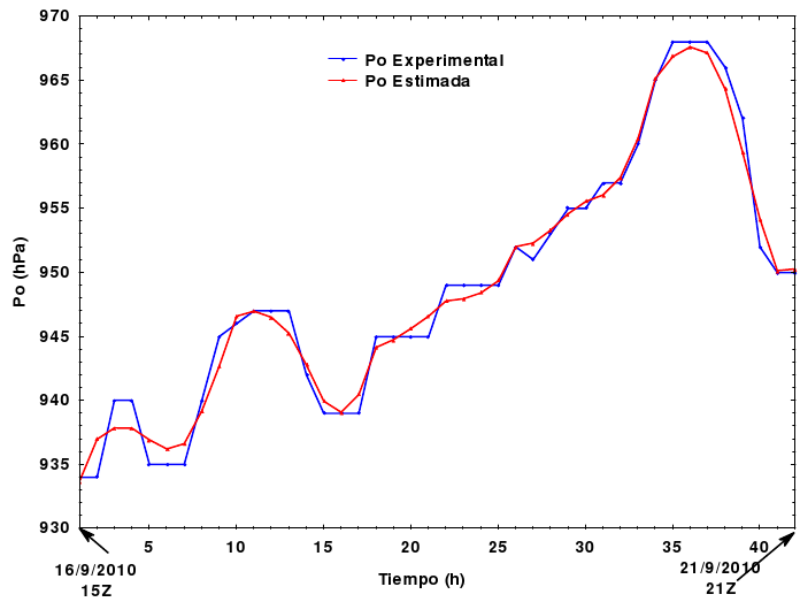


Figura 37: Comparación de las serie original y la pronosticada de  $P_o$  del huracán Igor.

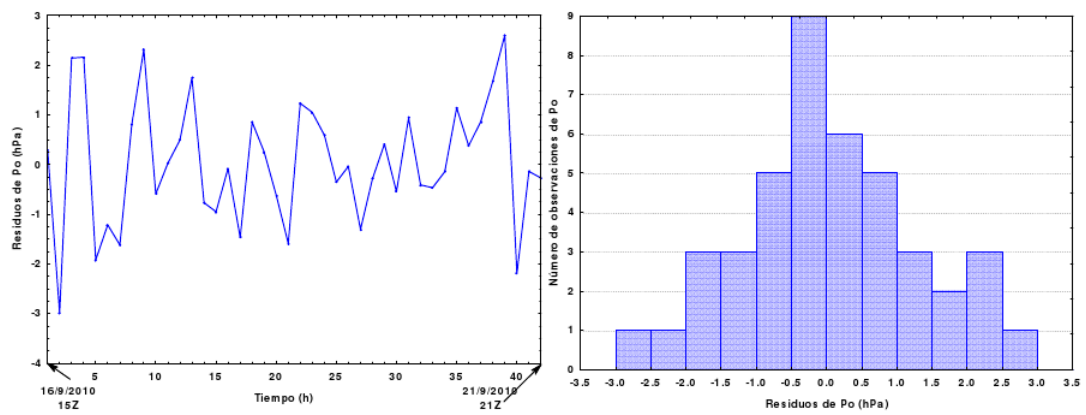


Figura 38: Residuos entre la serie original y la pronosticada de  $P_o$  del huracán Igor.

Tabla XXIII: Comparación de los residuos para las series de  $V_{Max}$  y de  $P_o$  correspondientes al huracán Igor.

	Residuos de $V_{Max}$ (m/s)	Residuos de $P_o$ (hPa)
Mínimo	-1,5	-3,0
Máximo	1,3	2,6
Promedio de los Residuos	$6,2 \cdot 10^{-3}$	$5,2 \cdot 10^{-2}$
Desviación standard	0,6	1,3

Tabla XXIV: Comparación de los residuos para las series de  $V_{Max}$  y de  $P_o$  correspondientes a los huracanes Gustav, Dean, Ida, Dennis e Iván.

Huracán		Residuos de $V_{Max}$ (m/s)	Residuos de $P_o$ (hPa)
Gustav	Promedio de los Residuos	$-2,3 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$
	Desviación standard	1,5	1,6
Dean	Promedio de los Residuos	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$4,3 \cdot 10^{-2}$
	Desviación standard	1,7	3,2
Ida	Promedio de los Residuos	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$2,1 \cdot 10^{-2}$
	Desviación standard	1,4	1,5
Dennis	Promedio de los Residuos	$-3,7 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$
	Desviación standard	2,3	2,5
Iván	Promedio de los Residuos	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$-1,9 \cdot 10^{-2}$
	Desviación standard	1,4	1,9

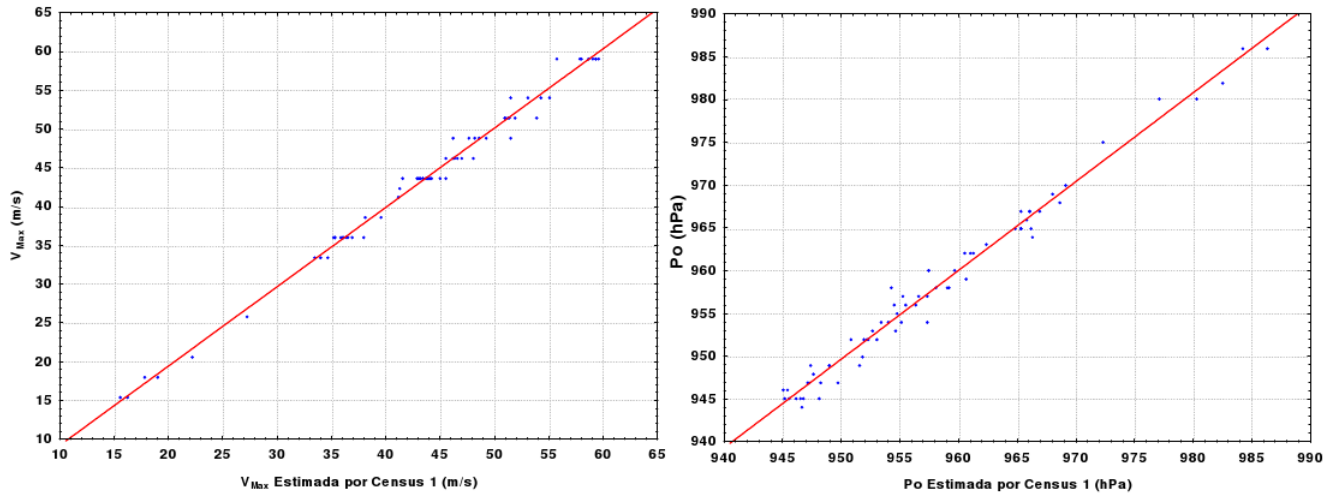


Figura 39: Suavizamiento de las series de  $V_{Max}$  y  $P_o$  del huracán Ike.

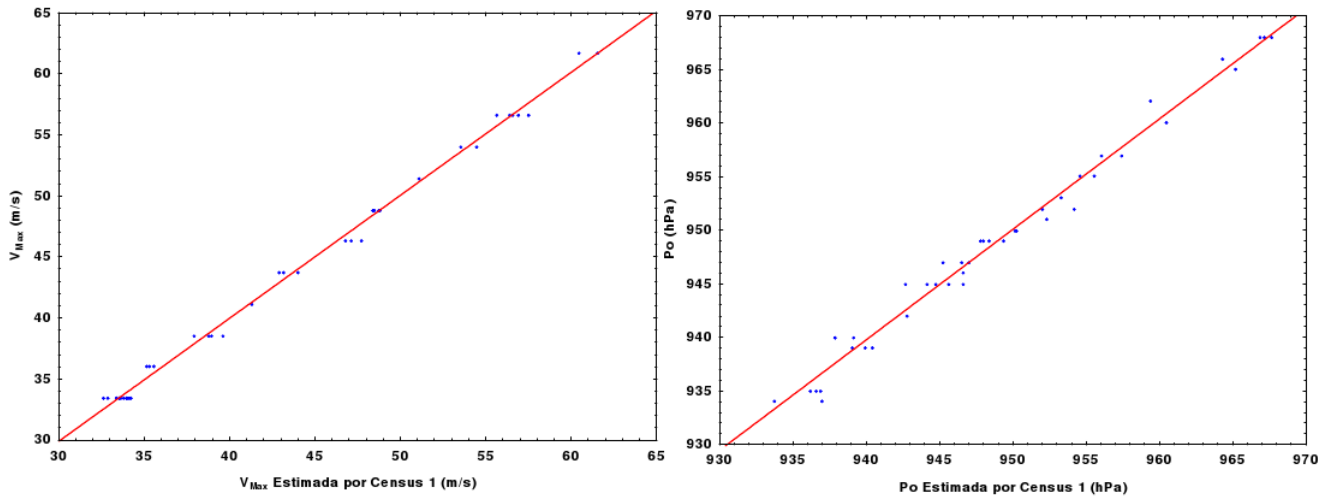


Figura 40: Suavizamiento de las series de  $V_{Max}$  y  $P_o$  del huracán Igor.

Tabla xxv: Comparación de los residuos para las series de  $V_{Max}$  y de  $P_o$  correspondientes a los huracanes Ike e Igor.

	Ike		Igor	
	$V_{Max}$ ( $m/s$ )	$P_o$ ( $hPa$ )	$V_{Max}$ ( $m/s$ )	$P_o$ ( $hPa$ )
Coeficiente de determinación Ajustado	0,99	0,98	0,99	0,98
Promedio de los residuos	$7,0 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$3,7 \cdot 10^{-2}$
Desviación standard	1,1	1,4	0,6	1,2



## Conclusiones

1. Se creó un modelo para determinar la estructura de un huracán teniendo en cuenta únicamente los parámetros reportados en los boletines meteorológicos, a través de los cuales se determinan  $R$ ,  $R_{Max}$  y  $R_i$ .
2. Se reformularon los modelos para determinar los campos de vientos, presiones y olas. En el caso del viento se da un modelo para determinar  $V_r$  entre  $R$  y  $R_{Max}$ , y dos modelos, uno simétrico y otro asimétrico para determinar  $V_r$  para distancias mayor que  $R_{Max}$ . El modelo del campo de presiones está acotado para  $P_r < P_i$  y también se dan varios modelos de olas para huracanes cuasiestacionario y en movimiento.
3. Se probó la eficiencia del método X11 (Census 1), modelo aditivo, para pronosticar  $V_{Max}$  y  $P_o$  dando buenos resultados. No siempre se mejoró el pronóstico después de realizar el suavizamiento.

## Recomendaciones

1. Probar éstos modelos para realizar pronósticos de huracanes en la próxima temporada ciclónica.
2. Utilizar todos éstos modelos para realizar las simulaciones numéricas del comportamiento espacial de olas durante el paso de huracanes por la costa sur oriental de Cuba.

## Referencias

- [1] C. E. Avelar. Modelos de huracán para la estimación de pérdidas. 2007.
- [2] R. H. Ballou. *Business Logistics Management*. Prentice-Hall, 4 edition, 1998.
- [3] J. D. Banton. Parametric models and methods of hindcast analysis for hurricane wave. Master's thesis, IHE/Alkyon, 2002.
- [4] V. Barnett and T. Lewis. *Outliers in Statistical Data*. Wiley, New York, 1978.
- [5] D. A. Belsley, E. Kuh, and R. E. Welsch. *Regression Diagnostic: Identifying Influential Data and Sources of Collinearity*. Wiley, New York, 1980.
- [6] G. E. Box, G. M. Jenkins, and G. C. Reinsel. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*, pages 1.5, 2.3, 3.1, 3.5, 4.2, 5.1, 5.3, 5.6, 7.4, 7.5, 7.7, 7.8, 8.2. Prentice-Hall, NJ, 3rd edition, 1994.
- [7] C. Bretschneider. Revised wave forecasting relationships. Proceedings of 2nd Coastal Engineering Conference. *American Society of Civil Engineering*, 1952.
- [8] C. Bretschneider. Revisions in wave forecasting: deep and shallow water. Proceedings of 6nd Coastal Engineering Conference. *American Society of Civil Engineering*. New York, 1958.
- [9] A. S. Broccoli and S. Manabe. Will global warming increase the frequency and intensity of tropical cyclones? *Geophysical Research Letters*, 17(11):1917–1920, 1990.
- [10] Luis Capurro. Huracanes, tifones, baguíos, willy-willies y ciclones. *Avance y Perspectiva*, 20:221, August 2001.
- [11] C. Chatfield. *Time-Series Forecasting*, page 22–24. Chapman and Hall/CRC, 2000.
- [12] C. Chen and L. M. Liu. Forecasting time series with outliers. *J. Forecasting*, (12):13–35, 1993.
- [13] T. Chuy, G. Puente, et al. Alertasantiago: Ciencia y comunidad en la gestión de los riesgos naturales, una responsabilidad compartida. CD-ROM, 2009.
- [14] J. L. Collins and J. Viehnaman. A simplified empirical model for hurricane wind fields. Paper No. OTC 1346. *Offshore Technology Conference*, 1971.

- [15] R. D. Cook and S. Weisberg. *Residuals and Influence in Regression*. Chapman and Hall, New York, 1982.
- [16] C. K. Cooper. Parametric models of hurricane - generated winds, waves and currents in deep water. *Proceedings of 20th Annual OTC, Houston, Texas, USA.*, page 475–484, 1998.
- [17] E. B. Dagum. *The X11 ARIMA seasonal adjustment method*. Catalogue No. 12-564E. Statistics Canada, 1980.
- [18] C. E. Depperman. Notes on the origin and structure of philippine typhoons. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 28:399–404, 1947.
- [19] K. A. Emanuel. The dependence of hurricane intensity on climate. *Nature*, pages 326,483, 1987.
- [20] W. Fernández. Cambios climáticos, el calentamiento global. *Tecnología en Marcha*, 11(2):11–22, 1991.
- [21] W. M. Frank. *Tropical Cyclones Formation*, chapter 3, page 53–90. A Global View of Tropical Cyclones (R. L. Elsberry). Office of Naval Research, 1985.
- [22] E. Gica and M. H. Teng. Numerical simulation of storm surge generated by hurricane Iwa in Hawaii. *15th ASCE Engineering Mechanics Conference*. Columbia University, 2002.
- [23] Y. Goda. On the methodology of selecting design wave height. *Proceedings of 21st International Conference in Coastal Engineering*, page 899–913, 1988.
- [24] E. Gray. *Guía de preparación ante Huracanes 2011*. TECNOCEANO, 2011.
- [25] Griffith C. Y. Wang. Sea-level pressure profile and gusts within a typhoon circulation. *Monthly Weather Review*, 106:954–960, March 1978.
- [26] J. P. Guilford and B. Fruchter. *Métodos y problemas especiales de correlación*. McGraw-Hill, 1984.
- [27] J. E. Hanke and A. G. Reitsch. *Pronóstico en los negocios*. Prentice-Hall, 5th edition, 1996.
- [28] K. Hasselmann et al. Measurements of wind wave growth and swell decay during the joint north sea wave project. Technical Report A8(12), Hydrogr Z, Dutch, 1973.

- [29] D. M. Hawkins. *Identigication of Outliers*. Chapman and Hall, London, 1980.
- [30] G. J. Holland. An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes. *Monthly Weather Review*, 108:1212–1218, 1980.
- [31] Greg J. Holland. A revised model for radial profiles of hurricane winds. *Monthly Weather Review*, 138:4393–4401, December 2010.
- [32] S. A. Hsu and Adele Babin. Estimar el radio de vientos máximos vía el satélite durante el huracán Lili (2002) sobre el golfo de México. 2007.
- [33] S. A. Hsu, M. F. Martin, B. W. Blanchard, et al. An evaluation of the usace’s deep water wave prediction techniques under hurricane conditions during georges in 1998. *Journal of Coastal Research*, 16(3):823–829, 2000.
- [34] C. P. Jelesnianski. SPLASH (Special Program to List Amplitudes of Surges from Hurricane); Part II: General tracks and variant storm conditions. *NOAA, Tech. Memo. NWS TDL-52*, 1974.
- [35] John A. Knaff, James P. Kossin, and Mark DeMaria. Annular hurricane. *Weather and Forecasting*, 18:206, 2002.
- [36] K. Kosik. *Dialectica de lo concreto. Estudios sobre los problemas del hombre y el mundo*. Grijalbo, México, 1967. <http://primariasregionsur.wikispaces.com/file/view/Dialcreto.pdf>.
- [37] James P. Kossin et al. Estimating hurricane wind structure in the absence of aircraft reconnaissance. *Weather and Forecasting*, 22:89–101, February 2007.
- [38] V. S. Kumar, S. Mandal, and K. A. Kumar. Estimation of wind speed and wave height during cyclones. *Ocean Engineering*, (30):2239–2253, 2003.
- [39] V. S. Kumar, S. Mandal, A. M. Manish, S. P. Rupali, et al. Estimation of wind speeds and wave heights from tropical cyclones during 1961 to 1982. Technical Report NIO/TR-3/2001, National Institute of Oceanography, Goa, India, 2001.
- [40] D. Ladiray and B. Quenneville. *Desestacionalizar con el método X-11*, page 20–28. Laboratoire de Méthodologie du Traitement des Données. Université Libre de Bruxelles, Belgique, 2001.
- [41] Ch. Landsea et al. Re-analysis project documentation for 1851-1910 alterations and addition to the hurdat database. *Hurricane Research Division, Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory*, 2003.

- [42] J. Ledolter. The effect of additive outliers on the forecasts from arima models. *J. Forecasting*, (5):231–240, 1989.
- [43] Omar G. Lizano. *Modelo de predicción de olas generadas por huracanes en el Mar Caribe*. PhD thesis, Universidad de Puerto Rico, 1988.
- [44] Omar G. Lizano. Un modelo de viento ajustado a un modelo de generación de olas para el pronóstico durante huracanes. *Geofísica*, 33:75–103, 1990.
- [45] Omar G. Lizano. Simulación de oleaje de huracán usando modelos de viento paramétrico en un modelo de olas de tercera generación. *Boletín Científico CIOH*, (24):36–47, 2006.
- [46] Omar G. Lizano et al. Evaluación de modelos numéricos de tercera generación para el pronóstico de oleaje en Centroamérica y México. *Top. Meteor. Oceanogr.*, 8(1):40–49, 2001.
- [47] S. Makridakis, S. C. Wheelwright, and R. J. Hyndman. *Forecasting: Methods and Applications*. John Wiley & Sons, 3rd edition, 1998.
- [48] M. Matsui, T. Ohkuma, and Y. Tamura. Evaluation of temporal design wind speeds using typhoon model and empirical wind characteristics. *The 7th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering. Taiwan*, November 2009.
- [49] G. A. Maul. *Climate Change in the Intra-Americas*, page 389. Edward Arnold, London, 1993.
- [50] F. R. Medina. *Educación ante situaciones de riesgo*. Impresos Comerciales Hernández, San Pedro Sula. Honduras, 2001.
- [51] T. S. Murty. Storm surges, meteorological ocean tides. *Canadian Bulletin of Fisheries and Aquatic Sciences*, page 212, 1984.
- [52] R. H. Myers. *Classical and Modern Regression with Applications*. PWS-KENT Pub. Co., Boston, 1990.
- [53] V. A. Myers. Characteristics of U. S. hurricanes pertinent to levee design for Lake Okeechobee. Technical Report 32, U. S. Weather Bureau. Hydromet., 1954.
- [54] NOAA. Meteorological criteria for standard project hurricane and probable maximum hurricane windfields, gulf and east coast of the United States. Technical Report NWS23, 1979.

- [55] J. C. Ortiz et al. Estudio del oleaje generado por el huracán joan en las costas caribe colombiana en 1988, incluyendo a la isla andrés. *Revista de la Sociedad Colombiana de Física*, 40(2), 2008.
- [56] W. M. Persons. Indices of business conditions. *Review of Economic Statistics*, (1):1919, 5-107.
- [57] A. C. Phadke et al. Modeling of tropical cyclone wiinds and waves for emergency management. *Ocean Engineering*, 30:553–578, 2003.
- [58] M. Portela and I. Salas. Sobre la determinación del radio en la zona de viento máximo en los ciclones tropicales. *III Simposium Internacional de Meteorología Tropical*, page 192–194, May 1985.
- [59] Mark D. Powell et al. State of florida hurricane loss predicction model: Atmospheric science component. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 93:651–674, 2005.
- [60] K. Puri and B. Pearce. Numerical hindcasting of storm generated waves Users Manual. *Departments of Mathematics and Civil Engineering, University of Maine*, 1981.
- [61] G. Ramos. *Actividad, Conocimiento y Ciencia*. Universidad de Matanzas, Cuba, 2000. <http://www.bibliociencias.cu/gSDL/collect/libros/index/assoc/HASH01cc/3de4edc1.dir/doc.pdf>.
- [62] M. Salinas. *Modelos de Regresión y Correlación*, volume 9. Ciencia y Trabajo, 143-145 edition, September 2007.
- [63] R. W. Schloemer. Analysis and synthesis of hurricane winds over lake okechobee. hydrometeorological rep. 31. *U.S. Weather Bureau, Department of Commerce and Army Corps of Engineering*, page 39, 1954.
- [64] Secretaría de la OMM. Documento técnico no. 494. programa de ciclones tropicales. (PCT-30):1–1–1–3, 2009.
- [65] J. Shiskin, A. Young, and J. C. Musgrave. The x11 variant of the census method ii seasonal adjustment program. Technical Report 15, Bureau of the census, 1967.
- [66] R. Silva et al. Oceanographic vulnerability to hurricanes on the mexican coast. 2002.
- [67] R. J. Sobey. Hurricane wind waves - A discrete spectral model. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 112(3), 1986.

- [68] M. R. Spiegel. *Probabilidad y Estadística. Teoría y 760 problemas resueltos*. Schaum. McGraw-Hill, 1976.
- [69] A. F. Trocóniz. *Modelos Lineales*. Serv. Ed. UPV/EHU, Bilbao, 1987.
- [70] USACE. *Shore Protection Manual*, volume I, page 3–81–3–84. U. S. Army Coastal Engineering Research Center, Washington D. C., 1984.
- [71] M. J. Varkey. A method for computation of surface wind fields of storms from surface isobars. Technical Report NIA/TR-2/85, National Institute of Oceanography, Goa, India, 1985.
- [72] H. L. Varona. Análisis de las variaciones de la densidad del agua de mar en la salinas de joa y frank país. *Ciencia en su PC*, VI(4), 1998.
- [73] H. L. Varona and G. Puente. Pronóstico del viento aplicando un modelo estocástico. *Ciencia en su PC*, VI(4), 1998.
- [74] Peter J. Vickery. Simulation of hurricane risk in the u.s. using empirical track model. *Journal of Structural Engineering*, 126(10):1222–1237, 2000.
- [75] Peter J. Vickery and Dhiraj Wadhwa. Statistical model of holland pressure profile parameter and radius to maximum winds of hurricanes from flight-level pressure and H\*Wind data. *Journal of Applied Meteorology*, 47:2497–2517, 2008.
- [76] H. E. Willoughby and M. E. Rhan. The climatology of hurricane wind profile. *26th Conference on Hurricane and Tropical Meteorology, Session 10D, Tropical Cyclones Observations and Structure V*, May 2004.
- [77] H. E. Willoughby and M. E. Rhan. Parametric representation of the primary vortex. part i: Observations and evaluation of the holland (1980) model. *Monthly Weather Review*, 132:3033–3048, December 2004.
- [78] I. R. Young. Parametric hurricane wave prediction model. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 114(5):637–652, 1988.
- [79] I. R. Young and G. P. Burchell. Hurricane generated waves as observed by satellite. *Ocean Engineering*, 23(8):761–776, 1996.