



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN  
INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA

INFLUENCIA DEL POLVO AFRICANO EN LOS HURACANES  
DEL ATLANTICO: UN ANALISIS CON ONDELETA

T E S I S

Que para obtener el grado de

**MAESTRO EN INGENIERIA  
INGENIERIA ELECTRICA: ORIENTACION  
INSTRUMENTACION  
P R E S E N T A :**

**JOSE BENITO TRANGOL CURIPE**

Director de Tesis

DR. VICTOR MANUEL VELASCO HERRERA

MEXICO, D.F. 2008





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Francisco García Ugalde

Secretario: Dr. Boris Escalante Ramírez

Vocal: Dr. Víctor Manuel Velasco Herrera

1 Suplente: Dr. Jorge Pérez Peraza

2 Suplente: Dr. Mauro Valdés Barrón

Lugar o Lugares donde se realizo la tesis:

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

**TUTOR DE TESIS**  
VICTOR MANUEL VELASCO HERRERA

-----

## *Agradecimientos*

*A mis Padres Francisco Trangol y Adelina Curipe, que son las personas más maravillosas y el regalo más hermoso que me ha dado la vida, gracias por todo lo que me han dado, los quiero mucho.*

*A mis queridas hermanas Ximena y Jeka, gracias por el apoyo y ayuda que me han brindado siempre.*

*Jorge Peña, por ser un excelente amigo y compañero de esta aventura que nos ha llevado a lugares donde nunca pensamos estar, gracias por el apoyo y ayuda.*

*A todos los grandiosos amigos que he conocido Pablo, Alex, David, Bolivia, Litta, Carolina, Ken, Omar, Edgar, Cristian, Silvana, Jay, Paco y a todos los que han compartido algún momento de su vida conmigo, a este querido país el cual me ha regalado una grata estancia y a la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme ser parte de ella.*

*A ti sin duda que me has enseñado tu humildad, bondad, alegría y amor que son las cosas más hermosas que un ser humano puede regalar, te quiero mucho Selma*

*A todos los Doctores que estuvieron presentes en este proceso que lleve a cabo, en especial a mi tutor al Dr. Víctor M. Velasco H.*

# Índice

Pág.

Introducción.....	1
Capítulo 1 Polvo Africano.....	3
1.1 Introducción.....	4
1.2 Tamaño de la Partículas.....	4
1.3 Principales tipos de partículas Atmosféricas.....	5
1.4 Efectos sobre el Clima.....	7
1.5 Interacción Aerosol Nubes.....	8
1.6 Desierto del Sahara.....	9
1.7 Orígenes del Sahara.....	9
1.8 Fenómenos naturales: Intrusiones de masa de aire Africano.....	10
1.9 Los desiertos en las próximas décadas.....	12
Capítulo 2 Huracanes.....	14
2.1 Introducción.....	15
2.2 Que son y cómo se forman los Huracanes.....	15
2.3 Elementos presentes para que se forme un huracán.....	16
2.4 Evolución de un Ciclón Tropical .....	17
2.5 Escala de los Huracanes Saffir-Simpson.....	19
2.6 Clasificación de las Categorías.....	19
2.7 Ojo del Huracán.....	23
2.8 Pared del Ojo.....	24
2.9 Banda en Espirales.....	25
2.10 Presión y vientos.....	25
2.11 Huracanes en el Golfo de México y en pacifico mexicano.....	27
Capítulo 3 Wavelet.....	28
3.1 Introducción.....	28
3.2 Historia del Analisis Ondeleta.....	29
3.3 Señales.....	31
3.4 Series de Fourier.....	32
3.5 Transformada de Fourier.....	32
3.6 Transformada Corta de Fourier (STFT) o Ventana de Gabor.....	35
3.7 Transformada Ondeleta .....	37
3.8 Transformada continua Ondeleta (CTW).....	39
3.9 Variable de Escala a y Traslación b.....	41
3.10 Funciones Ondeletas Madres.....	45
3.11 Transformada Ondeleta Discreta (DTW).....	50
3.12 Transformada Cross- Ondeleta .....	51
3.13 Transformada Ondeleta de Coherencia.....	51

3.14	Cono de Influencia.....	53
<b>Capitulo 4</b>	<b>Análisis de Datos.....</b>	<b>55</b>
4.1	Introducción.....	55
4.2	Base de Datos.....	57
4.3	Tormentas de polvo Africanas.....	57
4.4	Temperatura Superficial del océano Atlántico.....	59
4.5	Grafica de las Tormentas de polvo y las Temperaturas Superficiales.....	59
4.6	Ondeleta entre la Temperatura y las Tormentas de polvo.....	60
4.7	Huracanes.....	61
4.8	Base de Datos de los Huracanes.....	62
4.9	Análisis Ondeleta .....	64
4.10	Figuras Ondeleta .....	65
4.11	Transformada Ondeleta.....	69
	Conclusiones.....	78
	Referencias.....	80

## Índice de Figuras

Figura 1.1 Interacción entre el material particulado atmosférico y el clima, considerando la influencia del factor antropogénico (Según Arimoto, 2001).....	7
Figura 1.2 Formación de partículas atmosféricas secundarias a partir de núcleos de condensación en las nubes.....	9
Figura 1.3 Tormenta de polvo.....	10
Figura 2.1 Serie de imágenes del huracán Floyd 1999.....	18
Figura 2.2 Temperatura observada en la superficie del mar.....	21
Figura 2.3 Huracán Katrina y la Temperatura superficial del mar.....	22
Figura 2.4 Huracán Floyd.....	22
Figura 2.5 Ojo del Huracán.....	24
Figura 2.6 Pared del ojo del Huracán.....	24
Figura 2.7 Bandas de espirales del Huracán Katrina.....	25
Figura 2.8 Presión atmosférica y viento en el ojo del Huracán.....	26
Figura 2.9 Intensidad del huracán según la altura.....	27
Figura 3.1 Señal Continúa.....	31
Figura 3.2 Señal Discretas.....	31
Figura 3.3 Señal estacionaria de contenido de 50, 100 y 200 Hz.....	33
Figura 3.4 Espectro de frecuencia de la señal estacionaria.....	33
Figura 3.5 Suma de tres Señales en el tiempo.....	34
Figura 3.6 Transformada de Fourier de las tres Señales sumadas.....	34
Figura 3.7 Aplicación de la ventana en el análisis de la señal.....	35

Figura 3.8, Se muestra una función ventana de tipo gaussiana, la función de color rojo, muestra la ventana localizada en un tiempo $t_1$ , la de color azul en $t_2$ , y la de color verde en $t_3$ .....	36
Figura 3.9 Resolución Tiempo-Frecuencia Dependiendo del tamaño de la ventana.....	37
Figura 3.10 Descomposición simple.....	38
Figura 3.11 Árbol de descomposición simple.....	39
Figura 3.12 Plano tiempo-frecuencia para la transformada Ondeleta.....	41
Figura 3.13 Diferencia entre la STFT y la CWT.....	42
Figura 3.14 Escalado y traslación de la CWT.....	43
Figura 3.15 Análisis de la Ondeleta madre con un valor de escalamiento.....	44
Figura 3.16 Análisis de la Ondeleta madre con un valor de escalamiento mayor.....	44
Fig. 3.17 Forma de cálculo de la transformada Ondeleta para un valor de $a= 0.0001$ de la función madre y distintos valores de $t$ .....	45
Fig. 3.18 Forma de cálculo de la transformada Ondeleta para un valor de $a= 0.004$ de la función madre y distintos valores de $t$ .....	45
Figura 3.19 Ondeleta Haar.....	46
Figura 3.20 Ondeleta Mexican Hat.....	47
Figura 3.21 Ondeleta Daubechies de orden 6.....	47
Figura 3.22 Ondeleta Coiflet de orden 5.....	48
Figura 3.23 Ondeleta Symmlet de orden 6.....	48
Figura 3.24 Ondeleta Gaussiana de orden 1.....	49
Figura3.25 Ondeleta Morlet.....	49
Figura 3.26 Transformada Cross-Ondeleta entre las Tormentas Tropicales y la Tormentas de Polvo.....	52
Figura 3.27 Cono de Influencia.....	53

Figura 4.1 Temperaturas en el atlántico.....	56
Figura 4.2 Tormenta de polvo.....	58
Figura 4.3 Temperatura superficial del Océano Atlántico.....	59
Figura 4.4 Temperatura y Tormenta de Polvo.....	60
Figura 4.5 Ondeletas de las temperaturas y tormentas de polvo.....	60
Figura 4.6 Cantidad de Huracanes categoría 3 y mayores en rojo, total de huracanes en el atlántico en azul.....	63
Figura 4.7 Ondeleta Tormenta de polvo y Huracanes Categoría 1.....	65
Figura 4.8 Ondeleta Tormentas de Polvo y Huracán Categoría 2.....	65
Figura 4.9 Ondeleta Tormentas de Polvo y Huracán Categoría 3.....	66
Figura 4.10 Ondeleta Tormentas de Polvo y Huracán Categoría 4.....	67
Figura 4.11 Ondeleta Tormentas de Polvo y Huracán Categoría 5.....	68
Figura 4.12 Ondeleta Tormentas de Polvo y Tormentas Tropicales.....	68
Figura 4.13 Ondeleta Tormentas de Polvo y Sub-Tormentas.....	69
Figura 4.14 Ondeleta entre Las Tormentas de Polvo y Huracanes categoría 1.....	70
Figura 4.15 Ondeleta entre Las Tormentas de Polvo y Huracanes categoría 2.....	71
Figura 4.16 Ondeleta entre Las Tormentas de Polvo y Huracanes categoría 3.....	72
Figura 4.17 Ondeleta entre Las Tormentas de Polvo y Huracanes categoría 4.....	73
Figura 4.18 Ondeleta entre Las Tormentas de Polvo y Huracanes categoría 5.....	74
Figura 4.19 Ondeleta de las Tormentas de Polvo y las Tormentas Tropicales.....	75
Figura 4.20 Ondeleta entre Las Tormentas de Polvo y Sub Tormentas.....	76

## Índice de Tablas

Tabla 1.1 Grandes Desiertos de la Tierra.....5

Tabla 4.1 Base de datos de los huracanes en cantidades anuales y por categorías.....62

# Introducción

A fines del siglo XIX comenzaba a gestarse el inicio de una teoría matemática. Joseph Fourier establecía que una función podía ser representada como la suma, de series de senos y cosenos. La transformada de Fourier constituye una herramienta mediante la cual podemos obtener información sobre cómo está distribuida la energía de una señal a través de sus distintas componentes de frecuencia, es decir, podemos conocer todas las componentes de frecuencia existentes en la señal y sus respectivos aportes energéticos. Todo lo anterior se puede resumir diciendo que la transformada de Fourier tiene una perfecta resolución en frecuencia lo que la hace una herramienta muy útil para el análisis de señales estacionarias. Sin embargo, ella no puede ser aplicada con el objeto de obtener información precisa de cuándo o dónde las diferentes componentes de frecuencia se encuentran en la señal como es el caso de señales no estacionarias cuyo contenido espectral varía con el tiempo. Estas señales cuya amplitud varía en forma rápida y abrupta en el tiempo o señales cuyo contenido de frecuencia es variable de un instante de tiempo a otro, no son analizadas a fondo mediante la transformada de Fourier, debido a ciertas limitaciones de este análisis en el campo tiempo - frecuencia. Para mejorar el análisis se implementó la transformada corta de Fourier, la cual consistía en analizar la señal por parte, aplicándole una ventana de ancho variable, la cual se desplaza en el tiempo hasta cubrir la señal por completa.

Es en estos términos de análisis es donde entra en juego una nueva herramienta matemática llamada Ondeleta o Transformada Ondeleta

La transformada Ondeleta es el resultado de un gran número de investigaciones y constituye una técnica de análisis reciente. Inicialmente un geofísico francés llamado Jean Morlet investigaba un método para modelar la propagación del sonido a través de la corteza terrestre. Como alternativa a la transformada de Fourier, Morlet utilizó un sistema basado en una función prototipo, que cumpliendo ciertos requerimientos matemáticos y mediante dos procesos denominados dilatación o escalamiento y translación, formaba un set de bases que permitían representar las señales de propagación con la misma robustez y versatilidad

que la transformada de Fourier, pero sin sus limitaciones. Las características propias de la transformada Ondeleta nos otorgan la posibilidad de representar señales en diferentes niveles de resolución, representar en forma eficiente señales con variaciones de peak abruptos, analizar señales no estacionarias permitiéndonos saber el contenido en frecuencia de una señal y cuando estas componentes de frecuencia se encuentran presentes en la señal.

El análisis Ondeleta es la herramienta que se utilizo en este trabajo de tesis, el análisis se utilizo para estudiar ambas señales y se trabajo con la llamada Ondeleta de coherencia, esta técnica nos entregara la información de la relación que existe entre ambas señales, también nos dará la evolución de la periodicidad en el tiempo, lo cual es muy importante ya que es una información que proporciona este análisis por las características de la transformada Ondeleta y su llamada función madre.

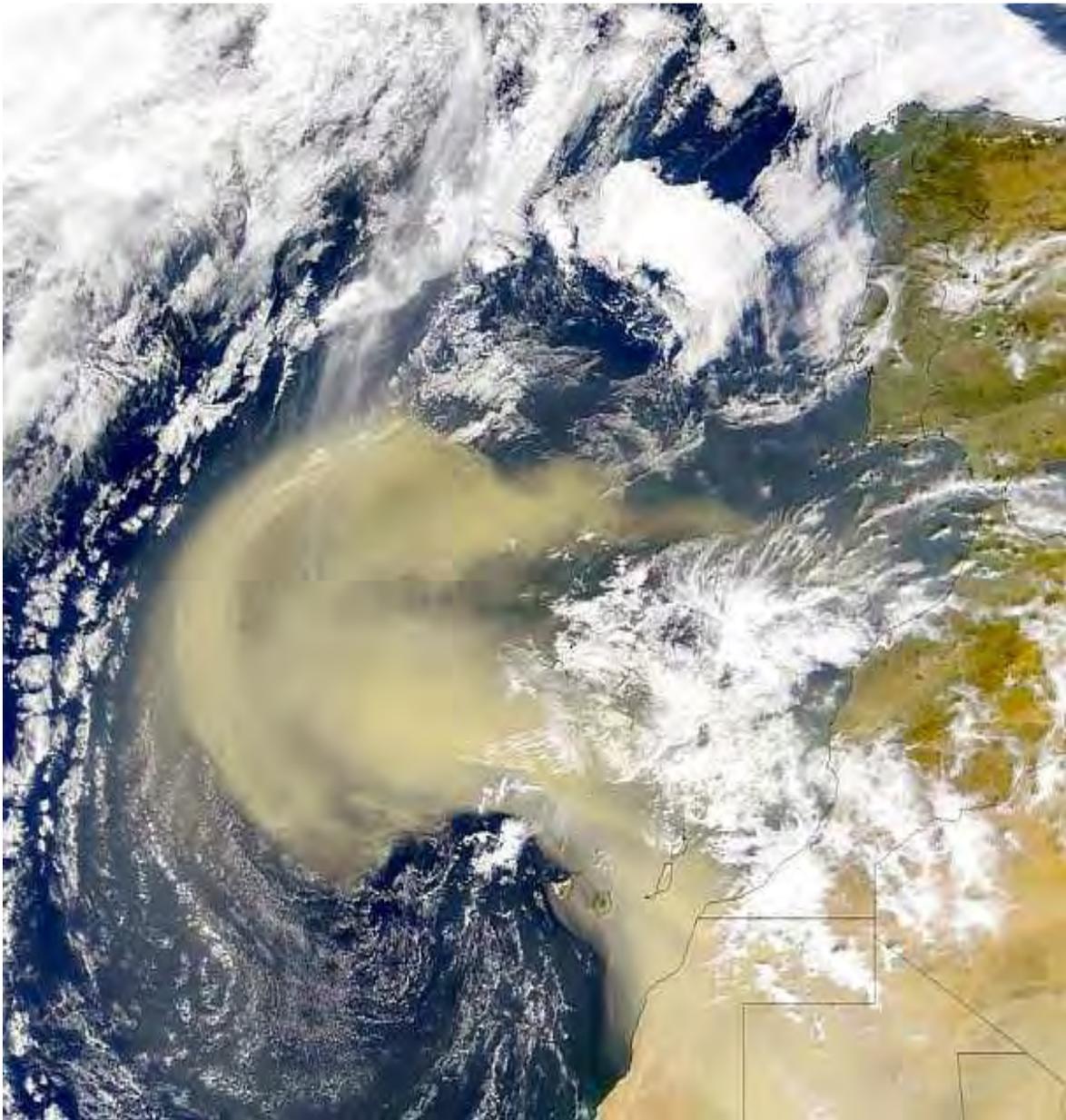
El análisis Ondeleta será utilizado para buscar alguna relación entre las tormentas de polvo africanas y los huracanes que afectan al Océano Atlántico.

Las tormentas de polvo, es un tema de gran interés en el mundo científico ya que con la tecnología actual se puede observar su trayectoria y formación, con esto podremos analizar y entender su impacto en el medio ambiente. Diferentes trabajos de han efectuado sobre las tormentas de polvo en cuanto a su formación e impacto, pero ninguno de ellos ha realizado un estudio del impacto sobre otros fenómenos naturales; tales como los huracanes, sus diferentes categorías y con Ondeleta. El presente trabajo de investigación se refiere al tema de la influencia del polvo africano en los huracanes del Atlántico. En el último período se han registrado mediciones del polvo africano en algunos países de América: Costa Rica, Nicaragua, Honduras y últimamente en Cuba. Encontrar una relación con los huracanes tiene un impacto importante, ya que la actividad de las tormentas de polvo podrían ayudar a predecir la temporada de huracanes en el atlántico que afectan cada año al Caribe y a las costas mexicanas.

La base de datos de este trabajo de investigación, fue la recopilación de casi 40 años de información de los huracanes que han impactado en el atlántico caribeño desde la NOAA (National Oceanic And Admospheric, y la serie de datos de las tormentas de polvo fue recopilada y facilitada por el Professor of Marine and Atmospheric Chemistry, Investigador y Director of Cooperative Institute for Marine and Atmospheric Studies, Joseph Prospero.

# Capítulo 1

## Polvo Africano



## 1.1 Introducción

Los desiertos se caracterizan por ser áreas con escasa precipitación y consecuentemente su cobertura vegetal es reducida o inexistente. Presentan una variable distribución geográfica, encontrándose en áreas de bajas y altas latitudes, en el interior de los continentes, en las orlas litorales e incluso en zonas de elevada altura. Los desiertos fríos situados en latitudes medias presentan una problemática específica, diferente a la de los desiertos de las zonas cálidas, ya que están afectados por la actividad de los procesos periglaciares (zona de la tierra que durante todo el año tiene temperaturas bajas).

Las partículas que se encuentran en la atmósfera se denominan material particulado atmosférico y se define como un conjunto de partículas sólidas y/o líquidas (a excepción del agua pura) presentes en suspensión en la atmósfera [Mészáros, 1999]. Generalmente, el término aerosol atmosférico se utiliza como sinónimo de partículas atmosféricas, aunque esta definición no es estricta. Es necesario considerar que el término material particulado atmosférico es un concepto amplio que engloba tanto las partículas en suspensión como las partículas sedimentables (diámetro  $> 20 \mu\text{m}$ ), caracterizadas por un corto tiempo de residencia en la atmósfera (varias horas).

Como resultado de esta variabilidad de fuentes y transformaciones, el material particulado atmosférico consiste en una mezcla compleja de compuestos de naturaleza orgánica e inorgánica con diferentes distribuciones granulométricas y composición química, ambas condicionadas por la composición de los gases que las rodean. Los niveles de material particulado atmosférico se suelen expresar en forma de concentración de masa o número de partículas por unidad de volumen de aire ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$  o  $\text{n}/\text{cm}^3$ ).

La contaminación atmosférica por material particulado se define como la alteración de la composición natural de la atmósfera como consecuencia de la entrada en suspensión de partículas, ya sea por causas naturales o por la acción del hombre [Mészáros, 1999]. La presencia de las partículas en la atmósfera, así como su posterior deposición, puede generar efectos tanto en el clima, en los ecosistemas como en los seres vivos [Aitken, 1880; Dockery et al., 1993; Schwartz, 1994 y 1996; Dockery y Pope, 1996; Arimoto, 2001].

## 1.2 Tamaño de la partícula

El diámetro de las partículas atmosféricas en suspensión varía desde nanómetros hasta decenas de micras. Generalmente se identifican diferentes rangos de tamaños de partícula denominados “modas”, que están relacionados en su mayoría con el mecanismo de formación de las partículas: nucleación, Aitken, acumulación y moda gruesa [Warneck, 1988; EPA, 1996; Seinfeld y Pandis, 1998]. En general, la granulometría y la composición química del material particulado suelen ser características del foco emisor. La denominación de las partículas incluidas en determinados rangos granulométricos varía en función del ámbito de estudio, ya sea en ciencias atmosféricas o en epidemiología y calidad

del aire. Así, se denomina “partículas finas” en ciencias atmosféricas a aquellas partículas de diámetro  $< 1 \mu m$ , mientras que en epidemiología esta definición abarca hasta las partículas de diámetro  $< 2.5 \mu m$ . Consecuentemente, en estudios epidemiológicos se hace referencia a partículas gruesas a partir de  $2.5 \mu m$  de diámetro, mientras que en ciencias de la atmósfera se consideran gruesas las partículas de diámetro  $> 1 \mu m$ .

### 1.3 Principales tipos de partículas atmosféricas.

El material particulado mineral de origen natural constituye la fracción mayoritaria en cuanto a masa del aerosol atmosférico [44% de las emisiones globales a nivel terrestre, Duce, 1995; IPCC, 1996]. La emisión de partículas minerales se genera por medio de la acción de los vientos sobre la superficie terrestre, en forma de emisiones fugitivas. La mayor emisión a escala global de este tipo de partícula se produce en regiones áridas o semi-áridas, que se concentran en las latitudes comprendidas aproximadamente entre  $10-35^{\circ}N$  (donde se incluyen el Norte de África, Oriente Medio y Asia Central, [Prospero et al., 2002]. En zonas áridas ubicadas fuera de estas latitudes como Australia o los desiertos de Atacama (Chile) o Kalahari (Botswana) no se registra la emisión significativa de material particulado mineral [Prospero, 1999]. Según Prospero [1999 y 2002], la emisión de partículas minerales en regiones como Chad o los desiertos del Sahara y Sahel (todas ellas situadas entre  $10-35^{\circ}N$ ) es debida a que éstas se ubican en cuencas topográficas en las que se acumula el material particulado resultante de los procesos erosivos en las épocas de mayor precipitación. Durante los períodos de sequía, estos depósitos generados se ven expuestos a elevadas temperaturas y a la circulación de masas de aire, que inducen su inyección en la atmósfera. Aunque la mayor emisión de material particulado mineral se produce en áreas desérticas como las anteriormente mencionadas, es importante resaltar que ésta es también significativa a escala local en regiones semi-áridas como el Sudeste de la Península Ibérica.

<b>Grandes Desiertos de la tierra</b>		
<b>Se Consideran los mayores a 5000 Km<sup>2</sup></b>		
<b>Nombre (Lugar y País)</b>	<b>Superficie en Km<sup>2</sup> Totales</b>	<b>Superficie en Km<sup>2</sup> Parciales</b>
<b>Sahara , África del norte</b>	9.100.000	
- Libia NE, del Sahara		1.680.000
- Nubia, E del Sahara		260.000
<b>Australiano, Australia</b>	1.550.000	
- Gran Desierto de Arena		414.000
- Gran Desierto Victoria		329.000
- Desierto de Gibson		220.000
<b>Arabigo, Asia</b>	1.300.000	
Rub'al-Khall Arabia		647.000

Sirio Norte de Arabia		324.000
An Nafud		130.000
<b>Gobi, Asia</b>	1.040.000	
- Takil-Makan, SinKiang, Republica Popular China		320.000
Sonora, America del Norte	310.000	
Karakun, Turquestan, Ex URSS	300.000	
Kalahari, Botswana	260.000	
Thar, India-Pakistan	260.000	
Kyzyl Kum, Turquestan, Ex URSS	225.000	
Atacama, Chile	180.000	
Nanib, Nanibia	162.000	
Mohave, América del Norte	65.000	
Dasht-E-Lut, E de Irán	52.000	
Dasht-E-Kavitz, N de Irán	47.000	
Negev, Sde Israel	12.800	
Sechura, Perú	12.000	
Colorado, Estado de California-USA	5.200	

Tabla 1.1 Grandes Desiertos de la Tierra

La distribución granulométrica de este tipo de partícula una vez emitidas en el área fuente es relativamente constante, y se concentra principalmente en tres modas de diámetros 1.5, 6.7 y 14.2  $\mu m$ , respectivamente [Alfaro et al., 1998]. Estas partículas se caracterizan por su granulometría gruesa. La abundancia relativa de partículas dentro de cada una de las modas depende de la velocidad del viento, de modo que a bajas velocidades se produce la resuspensión de las partículas de mayor diámetro, mientras que al incrementar la velocidad se emiten las partículas de menor diámetro. Al margen de la velocidad del viento, la emisión de las partículas de origen mineral depende de la superficie del suelo, de la humedad y la cobertura vegetal entre otros factores [Marticorena et al., 1997].

Otras partículas en el medio ambiente son el Aerosol marino con el 38 % de las emisiones globales a nivel terrestre, IPCC, 1996. Es la que producen las burbujas de aire que llegan a la superficie del océano y la agitación de la superficie de los mares y océanos por acción del viento.

Los compuestos S, son los que emiten aproximadamente el 7-10% de las emisiones globales a nivel terrestre [IPCC, 1996]. Son generalmente partículas de origen secundario, ya que no son emitidos directamente a la atmósfera sino que se generan mayoritariamente como resultado de la oxidación de precursores gaseosos (principalmente SO<sub>2</sub>).

Compuestos de N son el 2-5% de las emisiones globales a nivel terrestre [IPCC, 1996]. Al igual que los sulfatos, son de origen mayoritariamente secundario y provienen de la reacción de precursores gaseosos naturales y antropogénicos.

Compuestos C, Los compuestos carbonosos representan aproximadamente el 2-5% de las emisiones globales a nivel terrestre [IPCC, 1996]. Comprenden una amplia variedad de especies naturales y antropogénicas de composición y estructura diversa, cuya característica común es la presencia de C en su composición.

En cuanto a las partículas de carbono antropogénico de origen secundario, aproximadamente el 50% proviene de la evaporación de gasolina, la gasolina líquida y las emisiones de los vehículos [Watson et al., 2001]. Asimismo, contribuyen a los niveles de OM la fabricación y manipulación de pinturas y disolventes.

#### 1.4 Efectos sobre el clima.

Multitud de estudios tratan de evaluar la influencia de diversos procesos climáticos sobre la emisión y flujos de material particulado atmosférico a escala global. Sin embargo, es necesario considerar la influencia de las mencionadas partículas atmosféricas sobre el clima, ya que la retro-alimentación es un factor de gran importancia en el sistema Tierra-atmósfera [Arimoto, 2001], Figura 1.1. Muestra la interacción de las partículas atmosféricas, estas juegan un papel fundamental en la regulación del clima del planeta, ya que ejercen un cierto grado de influencia sobre la formación de nubes y el balance radiativo global. El material particulado atmosférico posee la capacidad de dispersar y absorber radiación de onda larga y corta, y consecuentemente puede llegar a perturbar el balance energético del sistema Tierra-atmósfera [IPCC, 2001].

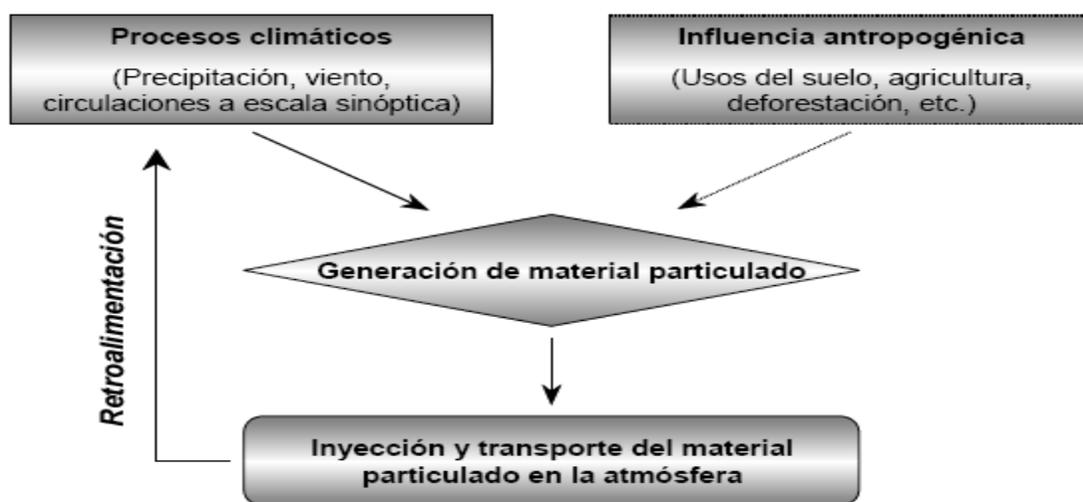


Fig.1.1 Interacción entre el material particulado atmosférico y el clima, considerando la influencia del factor antropogénico [Arimoto, 2001].

## 1.5 Interacción aerosol-nubes

Las partículas atmosféricas actúan como núcleos de condensación para la formación de nubes, ya que la sobresaturación en las nubes no es suficiente para iniciar la nucleación homogénea [Mészáros, 1999, Figura 1.2]. De esta manera, las propiedades físicas y químicas de las partículas que se encuentran en suspensión durante la formación de las nubes, junto con los factores ambientales, determinan la estructura de las nubes (tamaño y concentración de las gotas de agua). Dado que la estructura de la nube determina su vida media, su capacidad para formar precipitación y sus propiedades ópticas, es posible concluir que el material particulado atmosférico desempeña un papel significativo en la regulación del ciclo del agua [Aitken, 1880].

A su vez, las nubes pueden ser una fuente de material particulado ya que constituyen un medio adecuado para la transformación gas-partícula [Wurzler et al., 2000]. Una vez formadas las partículas, si la nube se evapora éstas permanecerán en suspensión. Por el contrario, si se produce la precipitación estas partículas serán lavadas de la atmósfera por el proceso conocido como “in-cloud scavenging” (Figura 1.2). De forma complementaria se produce el “below-cloud scavenging”, proceso por el cual las partículas atmosféricas en suspensión son retiradas de la atmósfera por la vía húmeda.

Por último, las partículas atmosféricas pueden ejercer una importante influencia de forma indirecta sobre el clima a través de la modificación del albedo de las nubes [Wurzler et al., 2000]. La formación, estructura, vida media y capacidad de precipitación de las nubes depende de la presencia y la composición de los núcleos de condensación (con frecuencia sulfatos, debido a su mayor tiempo de residencia atmosférico). Por lo tanto, éstos pueden influir sobre la cantidad y el volumen de nubes, lo cual repercute en la extensión de la superficie terrestre cubierta por nubes y finalmente, en el albedo. Este es un efecto indirecto, y como tal, difícil de cuantificar.

Las tormentas de polvo que se generan en la tierra y en diferentes latitudes son importantes para la retroalimentación con el clima en la tierra, en el caso del presente trabajo de investigación, solo tomaremos las tormentas de polvo que se generan en África por su posible influencia en los huracanes y tormentas tropicales del océano atlántico.

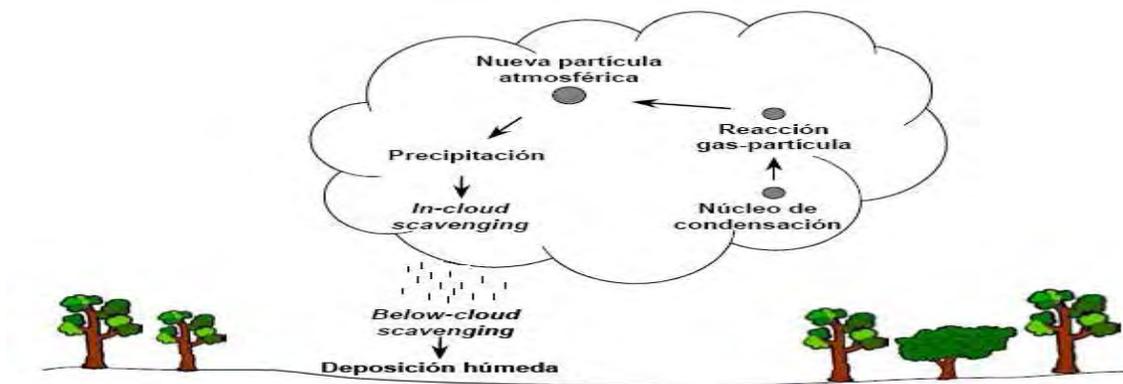


Fig. 1.2 Formación de partículas atmosféricas secundarias a partir de núcleos de condensación en las nubes.

El desierto más grande de la tierra es el Sahara, y sus tormentas de polvo llegan al Atlántico, estas analizaremos para saber su grado de influencia en los huracanes del Atlántico.

## 1.6 Desierto del Sahara

El Sahara es el desierto más grande del mundo, se extiende en África desde la costa atlántica hasta el Mar Rojo, pero se suele considerar unido a los desiertos de Arabia y de la India, formando lo que ha sido denominado "El Gran Desierto Paleártico".

El Sahara posee grandes cordilleras y llanuras de piedra y arena que constituyen enormes extensiones de dunas arenosas. Un calor sofocante va seguido a veces de un frío intenso, desatándose vientos muy violentos cargados de polvo y arena que barren el suelo arrastrando todo cuanto no está sólidamente sujeto y secando la vegetación. Estos vientos son seguidos por largos períodos de calmas absolutas. En el gran desierto se hallan los lugares más calurosos de la tierra, se han comprobado temperaturas de hasta 76°C y 58°C a la sombra pero por la noche se enfría con rapidez lo que provoca una muy marcada amplitud térmica. La humedad relativa suele ser inferior al 10% y en algunos lugares la lluvia cae una vez cada 10 años. Los vientos son principalmente los Alisios del nordeste y del oeste en lugares más próximos al Atlántico.

## 1.7 Orígenes del Sahara

El Sahara es un desierto sencillamente porque la lluvia que registra no llega a equilibrar la evaporación originada por los rayos solares y por la transpiración de las plantas que extraen agua de los lugares donde se halla almacenada. Las precipitaciones son inferiores a los 225 mm por año y en inmensas zonas no llegan a los 150 mm, mientras que la evaporación

anual que se registra en la superficie es de 2.100 a 2.400 mm, si lloviera durante el verano el agua se evaporaría aún más rápidamente.

El Sahara es una planicie de rocas antiguas, siendo las rocas más antiguas de la tierra, sobre las que se han depositado enormes masas de areniscas y calizas, los sedimentos de los mares cretácicos. Pero enormes extensiones de arenas y areniscas no son de origen marino, pues el mar nunca cubrió la parte oriental del Sahara, por lo que su origen es el propio desierto. La estructura geológica del Sahara es una serie de masas elevadas que encierran hondonadas sin salida y que reciben la denominación de cubetas cerradas. En desiertos como el Sahara, los ríos que van a parar a depresiones cerradas depositan gran cantidad de barro y arena y, el hecho de que las depresiones permanezcan cerradas, es prueba de que un clima árido ha reinado allí durante períodos de tiempo muy largo.

### **1.8 Fenómenos naturales: intrusiones de masas de aire africano**

El material particulado crustal con origen en el Norte de África puede ser transportado a muy largas distancias, hasta 3000-4000 km, [Carlson y Prospero, 1972; Prospero, 1999], y ejercer una importante influencia sobre la visibilidad y la composición de la deposición húmeda. Las lluvias y nevadas rojas registradas en multitud de zonas de Europa por procesos de lavado de masas de aire africanas son ampliamente conocidas, así como la reducción de la visibilidad en el continente europeo y en zonas del atlántico ecuatorial debido al polvo norteafricano [Ávila et al., 1997; Prospero, 1999; Ávila y Rodá, 2002].



Fig.1.3 Tormenta de polvo

A escala global, la fracción mineral es el componente mayoritario del aerosol atmosférico [IPCC, 1996]. El transporte de material crustal requiere de procesos previos de

resuspensión masiva de polvo en zonas áridas, como las presentes en el Norte de África, Oriente próximo o Asia central. En otras zonas desérticas como los desiertos de Atacama o Australia no se dan estos procesos de resuspensión masiva de polvo, ni de transporte a larga distancia. Las áreas exportadoras de partículas crustales tienen como característica común el acumular grandes cantidades de material crustal de granulometría muy fina, debido a la erosión de zonas áridas en épocas de lluvia torrencial [Prospero, 1999]. En la estación seca este material fino queda expuesto a los procesos de resuspensión.

El Norte de África posee bastas zonas desérticas que se consideran ejemplos típicos de áreas desérticas calientes donde la lluvia es extremadamente escasa (1/100 días registra precipitación durante unas pocas horas en el sector Oeste del Sahara, y 2/1000 días en el sector Este, [Dubief, 1977]). Estos ambientes de humedad relativa extremadamente baja (~10%) y temperaturas estivales muy altas (60-65°C) son escenarios muy favorables para la resuspensión masiva de grandes cantidades de material particulado. Así el calentamiento de la superficie durante el día provoca fuertes turbulencias térmicas verticales que alcanzan altitudes de hasta 4000 m, [Dubief, 1977] seguidas de períodos de gran estabilidad inducidos por las inversiones térmicas nocturnas. Esta alternancia impide que las partículas resuspendidas e inyectadas en capas altas sedimenten, y así alcancen períodos de residencia atmosférica de semanas o de meses formando la denominada “niebla o bruma seca” del Sur del Sahara y Sahel, y del Sahara occidental en verano. Este escenario constituye una fuente muy importante de emisiones de material particulado crustal, que es posteriormente transportado a largas distancias. [Carlson y Prospero 1972], [Prospero y Carlson 1972], [Prospero 1999], [Duce 1995], [Rodríguez et al. 2001] y [Prospero et al. 2002].

El transporte de polvo norteafricano hacia el Atlántico Norte tropical y subtropical está asociado a procesos de escala sinóptica y presenta una marcada estacionalidad [Swap et al., 1996]. Los vientos de componente Este en la baja troposfera libre sobre el Noroeste de África y el océano Atlántico a latitudes tropicales favorecen el transporte hacia el continente americano. Por el contrario, las intrusiones de masas de aire con elevada carga de polvo norteafricano en el Sur de Europa se producen con menor frecuencia, y están asociadas a escenarios meteorológicos específicos [Rodríguez et al., 2001].

Este transporte se produce sobre océanos y continentes principalmente en la troposfera libre, aunque en áreas cercanas al foco emisor la capa límite se ve también afectado en determinadas épocas del año. La extensión vertical del polvo alcanza de 1 a 4.5 km. El transporte a larga distancia (3000 a 4000 km) se ve favorecido en la troposfera libre por dos factores. El primero es el aumento de la velocidad del viento con la altura, y el segundo es la menor incidencia en altura de los procesos de lavado de las masas de aire [Prospero, 1999].

La granulometría de las partículas transportadas por estos procesos varía mucho en función del área fuente (en el caso de el norte de África; los desiertos del Sahel o del Sahara) y de la

situación del área receptora respecto al foco emisor. Así en episodios de transporte de partículas hacia el continente americano la moda granulométrica dominante, debido a la segregación durante el transporte, es la de acumulación 0.1-1.0  $\mu m$ , [ Prospero y Carlson, 1981], mientras que los episodios africanos registrados en el Mediterráneo en verano, o en Canarias en la época invernal, suelen afectar mayoritariamente a la fracción gruesa 1-25  $\mu m$ , [Rodríguez et al., 2001].

Las principales regiones emisoras de material particulado mineral se encuentran en el Hemisferio Norte, en concreto en el denominado dust belt (“cinturón de polvo”) que comprende el Norte de África, Oriente Próximo, y Asia central y oriental hasta China [Prospero et al., 2002]. No obstante, dentro de esta región las variaciones espaciales y temporales de los procesos emisores de partículas son elevadas. En una publicación difundida por la "NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center", los datos publicados representan la variación latitudinal de la zona de máxima temperatura superficial sobre el Norte de África, las mayores temperaturas superficiales en Noviembre-Diciembre se registran sobre el océano, y van ascendiendo latitudinalmente hasta alcanzar el desierto del Sahara en Julio y Agosto. El aumento de la temperatura incrementa la potencia de los procesos convectivos en superficie, con lo que se logra una mayor inyección vertical del material particulado. Finalmente, una vez que el material particulado se encuentra en suspensión es necesario el desarrollo de situaciones meteorológicas específicas que favorezcan el transporte hacia la Península Ibérica y Canarias. Entre los diferentes agentes meteorológicos con influencia en este transporte destacan el anticiclón del Norte de África, centros de bajas presiones ubicados frente a la costa Oeste de la Península Ibérica y Canarias, y sistemas de altas presiones de limitada intensidad ubicados al Oeste de la cuenca mediterránea [Rodríguez et al., 2001].

### **1.9 Los desiertos en las próximas décadas**

Los efectos de los cambios en los regímenes de precipitaciones y temperaturas debidos al cambio del medio ambiente mundial variarán muchísimo de una región a otra, pero es probable que donde más se sientan sean en las márgenes de los desiertos y en las áreas montañosas desérticas, ya que es en éstas donde están ubicados los principales pastizales áridos. Dado que los desiertos responden más a los pulsos climáticos que a las condiciones medias, incluso cambios moderados en las precipitaciones y las temperaturas pueden producir efectos graves al modificar la intensidad y la frecuencia de los períodos extremos y creando, así, efectos catastróficos para las plantas, los animales y los medios de subsistencia de los seres humanos. [PNUMA 2006]

Se prevé que el cambio climático afecte menos a la cantidad total de agua disponible, y más al régimen hídrico general y a los períodos de disponibilidad de agua en los desiertos. Los desiertos y los márgenes de los desiertos son particularmente vulnerables a los déficit de humedad en el suelo derivados de las sequías, que se han vuelto más graves en las últimas

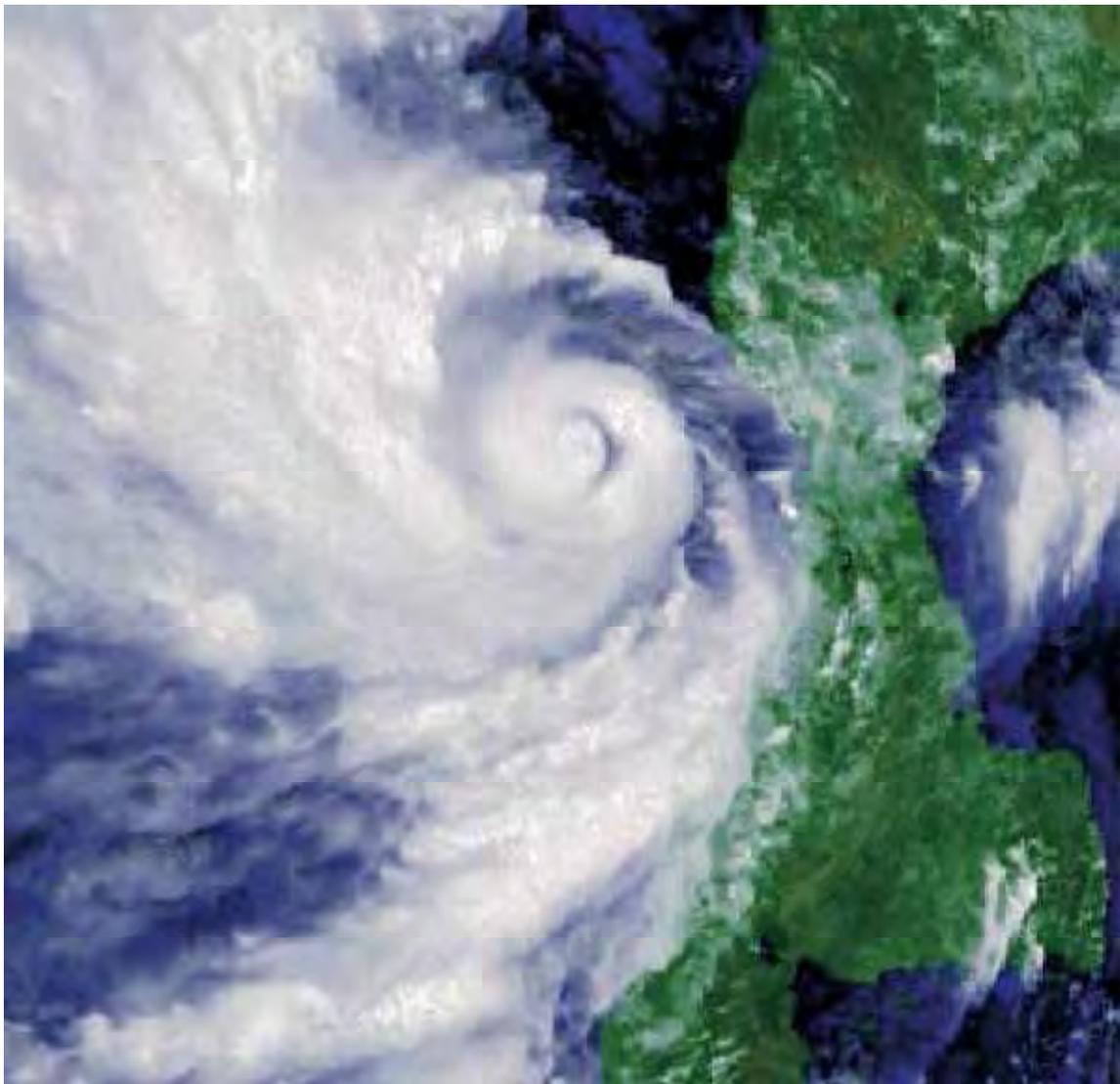
décadas, y se prevé que sean incluso más intensas y frecuentes en el futuro. Por el contrario, se espera que las inundaciones disminuyan en cantidad pero sean más intensas, en cuyo caso se infiltrará menos humedad en los suelos y la escorrentía y los sedimentos arrastrados se concentrarán en las depresiones, haciendo más pronunciada la falta de uniformidad de los ecosistemas desérticos. [PNUMA 2006]

Los desiertos alimentados por la fusión de la nieve o del hielo, tales como los desiertos de Asia central y las zonas bajas de los Andes, serán particularmente vulnerables al cambio climático. A medida que disminuya el volumen de la capa de nieve, los regímenes fluviales en vez de ser glaciares se convertirán en pluviales y, como resultado de ello, seguramente durante un tiempo aumentará la escorrentía y luego disminuirá. Las mayores descargas se trasladarán de los meses estivales, cuando la demanda es mayor, a la primavera y el invierno, con graves repercusiones potenciales para la agricultura local. Con el crecimiento de la población en los desiertos y las correspondientes aspiraciones de un mejor nivel de vida, muy probablemente aumentará la demanda de agua en las zonas urbanas en expansión. Es probable que la calidad de los recursos hídricos, tanto superficiales como subterráneos, siga deteriorándose a causa de los productos agroquímicos, principalmente plaguicidas y fertilizantes utilizados en la agricultura de riego, y la creciente salinidad del caudal de retorno. [PNUMA 2006]

La intrusión del agua marina en las aguas subterráneas ocasionada por el aumento en el nivel del mar resultante del calentamiento mundial puede llegar a deteriorar aún más la calidad de los acuíferos subterráneos. Los márgenes de los desiertos, los oasis y los terrenos de regadío dentro de los desiertos tienen un mayor potencial biológico y están sujetos a una creciente presión demográfica y, por lo tanto, tienden a constituir puntos problemáticos potenciales de degradación. La utilización de la tierra continuará intensificándose en los márgenes de los desiertos, mientras que la expansión de las tierras de cultivo a los desiertos será limitada, salvo cuando se utilicen sistemas de riego. En los desiertos continuará aumentando el pastoreo del ganado y la tala de madera para leña, pero se concentrará principalmente en las áreas de montañas y en los márgenes de los desiertos. [PNUMA 2006]

## Capítulo 2

# Huracanes



## **2.1 Introducción**

Los huracanes son considerados uno de los fenómenos meteorológicos más asombrosos de nuestro planeta. Fuertes vientos, nubes de gran tamaño e intensas tormentas se unen para avanzar por el océano y alcanzar tierra firme, arrasando con todo a su paso, árboles caídos, daños en edificios, cambios en el paisaje natural y víctimas fatales, son solo algunas de las consecuencias que estos pueden generar, las que, en su totalidad, son impredecibles.

Muchas veces, y debido a la gran intensidad que alcanzan, los vientos que pueden superar los 300 kilómetros por hora, son catalogados como verdaderos desastres naturales. Pueblos enteros desaparecieron bajo la fuerza de los impetuosos vientos. Ningún artefacto logra, hasta el día de hoy, contrarrestar su fuerza; el hombre se ha transformado en un simple espectador de lo que sucede cada vez que se desarrolla un huracán.

Los ciclones tropicales son los únicos desastres naturales a los cuales se les asigna un nombre, estos nombres se conocen mucho antes de que ocurran estos eventos, a diferencia de otros fenómenos naturales como los terremotos, tornados e inundaciones. Gilberto, Paulina, Mich e Isidoro, por nombrar a los más recientes, son ejemplos que recuerdan una imagen muy particular, por los daños severos que ocasionaron. Estos fenómenos presentan características comunes, aunque cada uno muestra rasgos particulares [Hernández, 2001].

La destrucción causada por los huracanes en el Caribe y Centro América es una fuerza que ha modificado la historia y que lo seguirá haciendo en el futuro en esta región. El peligro nace de una combinación de factores que caracterizan a las tormentas ciclónicas tropicales: elevación del nivel del mar, vientos violentos, y fuerte precipitación.

Por su ubicación, un ejemplo sobre esto, es la Península de Yucatán es afectada de modo directo o indirecto por la mayoría de los huracanes que se forman en el Caribe Occidental. Los huracanes pueden tener fácilmente el largo de la península como diámetro de modo que prácticamente cualquier huracán que se forme afecta en mayor o menor medida la costa oriental de la península. [Wilson, 1980, en Pereira, et al 2000].

## **2.2 Que son y cómo se forman los Huracanes**

"Ciclón tropical" es el término científico para una circulación meteorológica cerrada, que se desarrolla sobre aguas tropicales. Estos sistemas a gran escala, no frontales y de baja presión, ocurren en todo el mundo sobre zonas que se conocen como "cuencas tropicales de ciclones" [NOAA, 1987].

La palabra huracán tiene su origen en religiones indígenas de las civilizaciones antiguas. Los mayas nombraron a su dios de la tormenta Hunraken. La gente Taino, una cultura del Caribe, llamaba Huracán a un Dios que consideraban maligno. Hoy en día, a los huracanes no se les considera fuerzas malignas pero si se les considera uno de los fenómenos más

poderosos de la naturaleza. Debido a su gran fuerza, cuentan con un gran potencial de pérdida de vidas y daños materiales.

Los huracanes son fenómenos de turbulencia causados por una corriente de aire caliente que se forma en el verano en el trópico y que va al polo norte compensando la diferencia en temperatura entre el Ecuador y el Polo. Una contra corriente del norte al sur, compensa la diferencia en presión. Esta circulación de vientos norte sur y sur norte a nivel del hemisferio norte, en conjunto con la circulación diaria de la tierra que causa los vientos alisios, son los principales factores desde el punto de vista de los vientos para crear situaciones que pueden formar ciclones. Otro condicionante para la formación de un huracán es la temperatura de la superficie del océano, como fuente de energía para dar forma al fenómeno, la cual debe ser mayor o igual a 27°C. En estas condiciones, es la columna de aire caliente y húmedo originada en el océano la que se convierte en el núcleo alrededor del cual giran los vientos y forma posteriormente el “ojo” del huracán [Pereira, et al. 2000]. Tiene que haber ciertos elementos presentes para que se forme un huracán.

### **2.3 Elementos presentes para que se forme un huracán.**

- 1- Presión;** Presencia o preexistencia de una zona de convergencia en los niveles bajos y baja presión superficial, de escala sinóptica.
- 2- Temperatura superiores a los 27<sup>0</sup> C (80 F);** A esta temperatura, el agua del océano se está evaporando al nivel acelerado requerido para que se forme el sistema. Es ese proceso de evaporación y la condensación eventual del vapor de agua en forma de nubes el que se libera la energía que le da la fuerza al sistema para generar vientos fuertes y lluvia. Y como en las zonas tropicales la temperatura es normalmente alta, constantemente originan el siguiente elemento necesario.
- 3- Humedad;** Como el huracán necesita la energía de evaporación como combustible, tiene que haber mucha humedad, la cual ocurre con mayor facilidad sobre el mar, de modo que su avance e incremento en energía ocurre allí más fácilmente, debilitándose al llegar a tierra firme.
- 4- Viento;** La presencia de viento cálido cerca de la superficie del mar permite que haya mucha evaporación y que comience a ascender sin grandes contratiempos, originándose una presión negativa que arrastra al aire en forma de espiral hacia el adentro y arriba, permitiendo que continúe el proceso de evaporación. En los altos niveles de la atmosfera los vientos deben estar débiles para que la estructura se mantenga intacta y no se interrumpa este ciclo.

- 5- GIRO o Spin;** La rotación de la tierra eventualmente le da movimiento en forma circular a este sistema, en el que comienza a girar y desplazarse como un gigantesco trompo. Este giro se realiza en sentido contrario al de las manecillas del reloj en el hemisferio norte, y en sentido favorable en el hemisferio sur.

Todas las depresiones tropicales que crecen y derivan en huracanes, se originan prácticamente bajo las mismas condiciones y conservan las mismas características meteorológicas a lo largo de la vida. Las diferencias físicas que se pueden presentar de un evento a otro radican en las velocidades que cada evento puede alcanzar y el tiempo que estas se pueden mantener

Un huracán es una perturbación que se produce en regiones tropicales donde las aguas del océano son relativamente cálidas (temperaturas alrededor de los  $27^{\circ}\text{C}$ ). Se caracteriza por un gran centro de baja presión, en torno al cual el aire gira a gran velocidad abarcando una extensión de varios cientos de kilómetros. Los huracanes tienen una anatomía y una clasificación propia, que depende de la intensidad de los vientos, de la presión atmosférica y de los daños potenciales que puede causar.

#### **2.4 Evolución de un ciclón Tropical.**

Puede ser dividida en las cuatro etapas siguientes:

**Nacimiento (depresión tropical).** Primero se forma una depresión atmosférica, que se caracteriza porque el viento empieza a aumentar en superficie con una velocidad máxima (media en un minuto) de 62 km/h o menos; las nubes comienzan a organizarse y la presión desciende hasta cerca de las 1000 hpa (hectopascales).

**Desarrollo (tormenta tropical).** La depresión tropical crece o se desarrolla y adquiere la característica de tormenta tropical, lo que significa que el viento continúa aumentando a una velocidad máxima de entre 63 y 117 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 se reduce a menos de 1000 hpa.

Es esta fase es cuando recibe un nombre correspondiente a una lista formulada por la Organización Meteorológica Mundial (Comité de Huracanes). Antiguamente, cada ciclón se denominaba con el nombre del santo del día en que se había formado o había sido observado. Cabe aclarar que si un ciclón ocasiona un impacto social y económico importante a un país, el nombre de ese ciclón no volverá a aparecer en la lista.

**Madurez (huracán).** Se intensifica la tormenta tropical y adquiere la característica de Huracán, es decir, los vientos alcanzan el máximo de la velocidad, pudiendo llegar a 370 km/h, y el área nubosa se expande obteniendo su máxima extensión entre los 500 y 900 km de diámetro, produciendo intensas precipitaciones. El ojo del huracán cuyo diámetro varía

entre 24 a 40 km, es un área de calma libre de nubes. La intensidad del ciclón en esta etapa de madurez se gradúa por medio de la escala de Saffir-Simpson.

**Disipación (Fase Final).** La presión en el centro del sistema comienza a aumentar y los vientos decrecen paulatinamente acompañados por una debilitación del sistema. En esta etapa los ciclones que penetran a tierra se convierten en ciclones extratropicales.

Un factor central en el fin de un huracán es la falta de sustento energético que le proporcionan las aguas cálidas. Otro es que al llegar a tierra, el rozamiento con la superficie irregular del terreno causa ensanchamiento nuboso del meteoro y provoca su detención y disipación en fuertes lluvias. Otro factor es que el huracán se encuentre con una corriente fría.

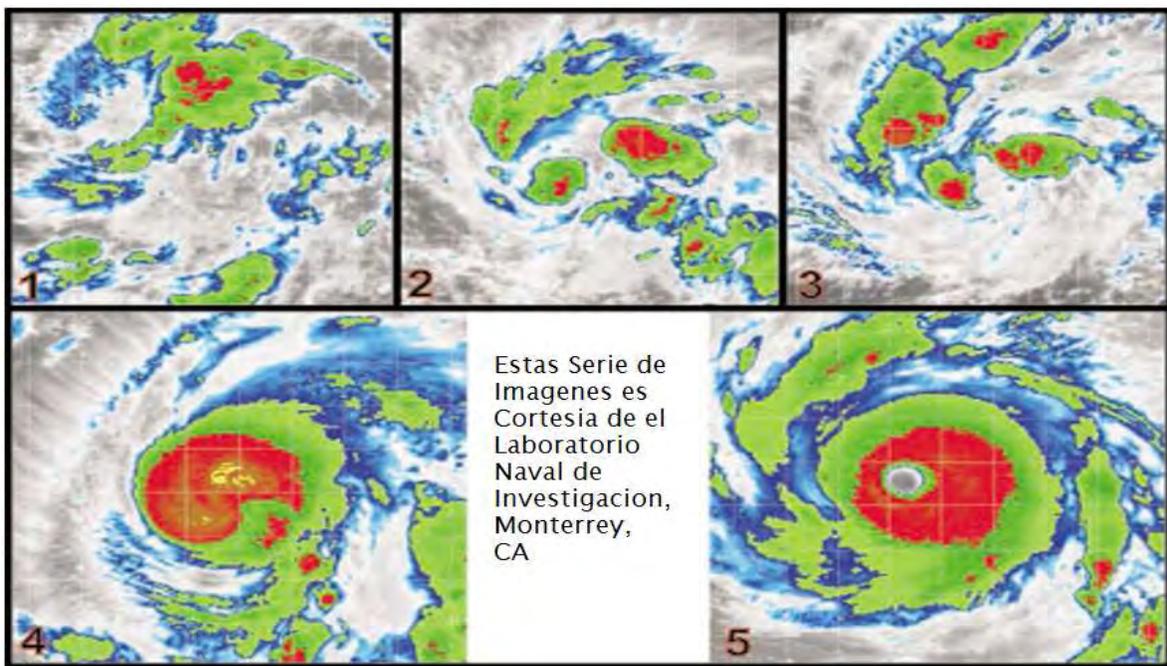


Fig.2.1 Serie de imágenes del huracán Floyd 1999. Estas imágenes fueron tomadas en un período de 6 días, durante las etapas de desarrollo de un huracán en 1- vemos una buena disturbacion tropical que favorece una depresión Tropical, 12 horas después en la figura 2, vemos una depresión tropical que continua con su intensificación. En la figura 3, el huracán Floyd se ha intensificado en una tormenta tropical, en las figuras 4 se puede ya observar a Floyd como un huracán categoría 1 y en la figura 5 se observa ya como categoría 4.

Cada año se desarrollan un promedio de 10 tormentas tropicales en el Océano Atlántico, el Caribe o el Golfo de México, 6 de las cuales llegan a convertirse en huracanes. En un período de tres años, la costa de los Estados Unidos recibe un promedio de cinco huracanes, dos de los cuales se consideran huracanes mayores. Los ciclones tropicales algunas veces son conducidos por vientos débiles y erráticos, lo que hace aún más difícil pronosticarlos.

Las advertencias publicadas actualmente han mejorado considerablemente lo cual ha disminuido las muertes en los Estados Unidos [CEES]

## 2.5 Escala de huracanes Saffir-Simpson

En 1969, la Organización de Naciones Unidas solicitó la evaluación de los daños generados por el paso de los huracanes en un determinado tipo de viviendas. A partir de ello, el ingeniero norteamericano Herber Saffir y el entonces director del Centro Nacional de Huracanes de Estados Unidos, Robert Simpson, desarrollaron una escala de medición para calificar los daños potenciales que puede provocar un huracán, considerando la presión mínima, los vientos y la marea tras su paso.

La escala de huracanes Saffir-Simpson es una clasificación del 1 al 5 basada en la intensidad de un huracán. Esta escala efectúa un cálculo de los daños potenciales a propiedades. Los huracanes y tifones de categoría 3 o más son considerados huracanes mayores debido al potencial de pérdida de vidas y daños materiales. Las tormentas con categoría 1 y 2 también son peligrosas y requieren medidas preventivas. El término “Súper Tifón” es utilizado al oeste del Pacífico del Norte para describir ciclones tropicales con vientos de más de 150 millas por hora.

## 2.6 Clasificación de las Categorías

- a) **Categoría 1:** el daño ocasionado por estos huracanes es mínimo. Los vientos solo alcanzan velocidades que van desde los 119 a los 153 kilómetros por hora, mientras que las marejadas no superan los 1,5 metros. Entre los trastornos más visibles está la caída de algunos arbustos y otros árboles de escaso tamaño, así como el desprendimiento de algunas estructuras que no fueron bien aseguradas.
- b) **Categoría 2:** provoca daños moderados, ya que los vientos van desde los 154 a los 177 kilómetros por hora y las marejadas pueden, fácilmente, llegar hasta los 2,4 metros. Derriba algunos árboles, daña letreros y avisos publicitarios y destruye, en forma parcial, techos, puertas y ventanas. Es posible, además, que las carreteras, caminos y edificaciones cercanas a la costa se inunden, por la subida de las aguas.
- c) **Categoría 3:** los vientos, entre 178 y 209 kilómetros por hora, y las marejadas, que superan los 3,5 metros, ocasionan daños extensos. Árboles de varios metros de altura y con raíces bastante firmes, se elevan por los aires, mientras las casas rodantes son, fácilmente, removidas de sus lugares habituales. Además, las grandes construcciones de la franja costera sufren un gran deterioro por el aumento del nivel de las aguas y también por la cantidad de escombros arrastrados, que chocan contra

ellas. Si se detecta un huracán de estas características, es probable que se proceda a evacuar a la gente que vive en los sectores más cercanos al mar, trasladándola a sectores interiores.

- d) **Categoría 4:** daños extremos. Los vientos van desde 210 hasta 250 kilómetros por hora, y las marejadas superan los cinco metros en su avance a tierra firme. Se produce el colapso total de los techos; algunas paredes se desploman y los terrenos bajos se inundan. El agua de la costa avanza con facilidad unos diez kilómetros hacia el interior, lo que provoca la urgente evacuación de la población.
- e) **Categoría 5:** los huracanes de este rango son considerados devastadores. Los vientos alcanzan velocidades superiores a 250 kilómetros por hora y las marejadas superan los 5,4 metros de la categoría anterior. En las zonas azotadas por huracanes pertenecientes a esta categoría, se produce casi un colapso total de las edificaciones, la vegetación e, incluso, las rutas de evacuación.

Un huracán se forma a partir de una tormenta tropical, y es formalmente identificado como tal, asignándole un nombre, cuando el viento cerca de la superficie supera los 120 Km/h. La energía que requiere un huracán para mantener su actividad proviene de la liberación de calor que se produce en el proceso de condensación del vapor de agua que se evapora desde la superficie del océano, formando nubosidad e intensa precipitación. Cuando un huracán entra en el continente pierde rápidamente intensidad al detenerse el proceso de fuerte evaporación desde la superficie. Un huracán bien desarrollado posee un núcleo central sin nubosidad, ni viento, de un diámetro entre 10 y 50 kilómetros, donde el aire desciende. Esta región se denomina el ojo del huracán. Los vientos asociados a un huracán pueden a veces exceder los 250 Km/h. La vida de un huracán puede variar desde unos pocos días hasta varias semanas.

El huracán funciona como una máquina de vapor, con aire caliente y húmedo proveyendo su combustible. Cuando los rayos del sol calientan las aguas del océano, el aire húmedo se calienta, se expande y comienza a elevarse como lo hacen los globos de aire caliente. Mas aire húmedo reemplaza ese aire y comienza ese mismo proceso de nuevo. La rotación de la tierra eventualmente le da movimiento en forma circular a este sistema, el que comienza a girar y desplazarse como un gigantesco trompo. Como en todo ciclón, este giro se realiza en sentido horario en el hemisferio sur y antihorario en el hemisferio norte.

La temporada de huracanes da principio cuando el ecuador climático se mueve en dirección de los polos llevando consigo altas temperaturas que calientan el aire y el agua de mar, dando lugar de esta forma al surgimiento de una zona de baja presión. Esto ocurre generalmente entre los meses de mayo y noviembre.

Uno de los estudios más recientes sobre la formación de huracanes, señala como causa la violenta circulación de aire en ellos y la transformación de la energía calórica liberada al condensarse el vapor de agua contenido en el aire que asciende desde la superficie en un área muy extensa. Tal condición implica el disponer de una adecuada provisión de calor latente, y de algún mecanismo que inicie y mantenga el movimiento vertical ascendente requerido para producir la condensación del vapor y con ello la liberación de ese calor latente. Estas condiciones se satisfacen cuando la temperatura del agua de mar en una área específica es igual o superior a  $27^{\circ}\text{C}$ , cuando la distancia de las misma a cualquier costa o isla es superior a 400 Km, y cuando dentro de esa misma región existe convergencia asociada a cualquier perturbación, sea onda tropical, vaguada polar, línea o zona intertropical de convergencia. La inestabilidad condicional, es un estado atmosférico, que favorece la formación de un huracán en una región potencial; se ha encontrado una clara relación entre la presencia de la inestabilidad y los meses favorables para la formación de los ciclones tropicales.

La temperatura en el océano y la alta humedad relativa en la media y baja troposfera son también requerimientos para el desarrollo del huracán. En la siguiente figura se muestra un mapa de la temperatura superficial del mar para el verano en el hemisferio norte. El amarillo, la naranja, y los colores rojos demuestran las temperaturas del agua bastante calientes para sostener huracanes ( $> 26.5^{\circ}\text{C}$ ).

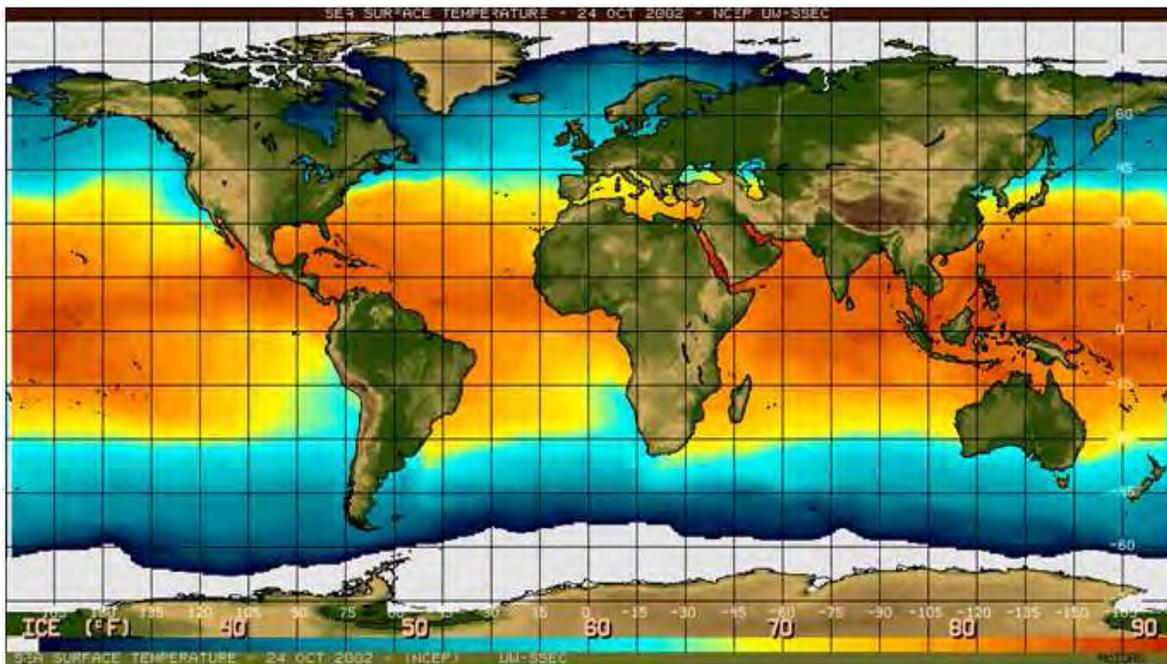


Fig.2.2 Temperatura observada en la superficie del mar

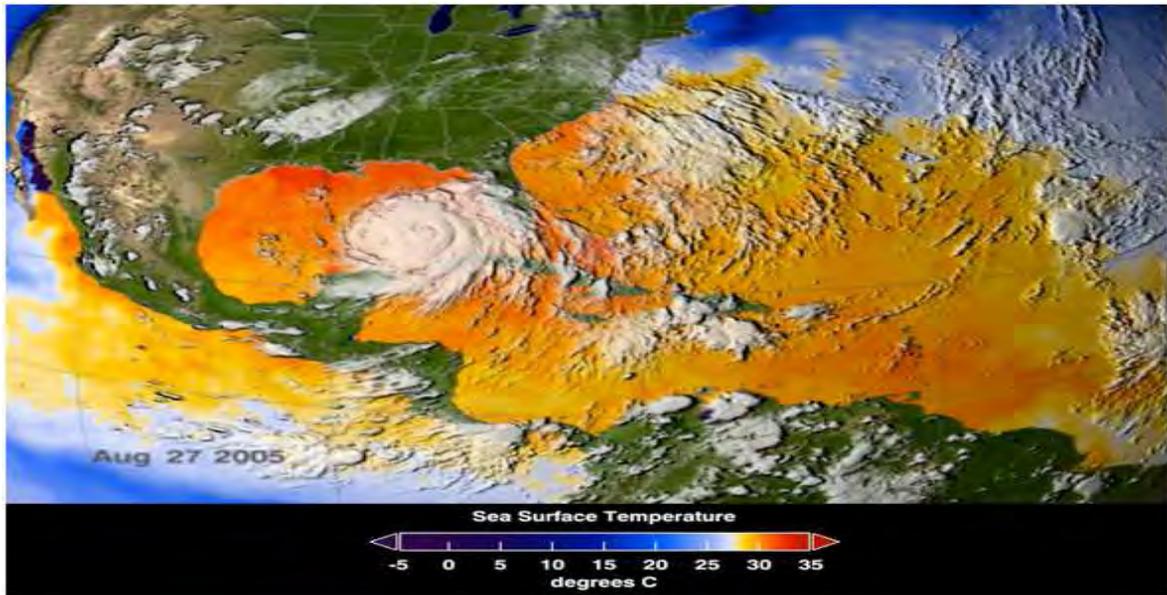


Fig.2.3 Huracán Katrina y la Temperatura superficial del mar

Otra condición necesaria para la organización de la circulación dentro de la región en la que se producen ascensos de aire y la liberación de calor latente de vaporización, es que ocurran en una latitud superior a  $5^{\circ}$ , puesto que en una latitud inferior el efecto organizador de coriolis (giro de la tierra), tiene valores muy bajos.

Es por ello que los ciclones se forman y se intensifican cuando están situados sobre océanos tropicales o subtropicales en ambos hemisferios, en donde la fuerza de rotación de la tierra es suficientemente fuerte para que se inicie el movimiento de rotación alrededor del centro de baja presión y cuyas temperaturas de agua a nivel de superficie son los son de  $27^{\circ}$  o más cálidas.

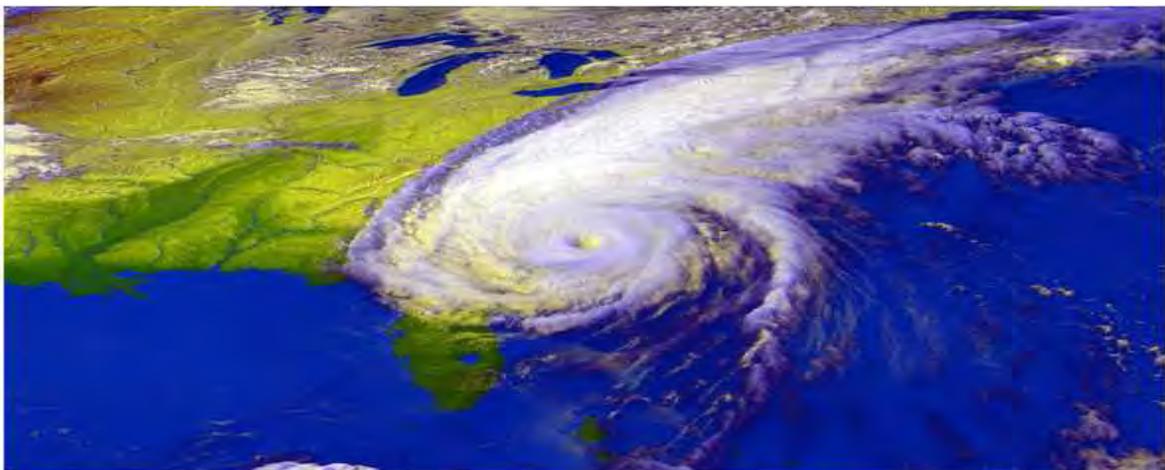


Fig.2.4 Huracán Floyd [Imagen de NOAA].

## Características Principales de los ciclones tropicales.

Los ciclones se forman y se intensifican cuando están situados sobre océanos tropicales o subtropicales en ambos hemisferios, en donde la fuerza de rotación de la tierra (Coriolis) es suficientemente fuerte para que se inicie el movimiento de rotación alrededor del centro de baja presión y cuyas temperaturas de agua a nivel de la superficie son de 27° 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 de California y la contracorriente cálida ecuatorial en el Océano Pacífico, así como por la deriva de las ramificaciones de la corriente cálida del "Gulf Stream". Además, no se mantienen por sí mismos sobre tierra, independientemente de la temperatura superficial.

### **2.7 El ojo del Huracán.**

La característica más reconocible encontrada dentro de un huracán es el ojo. Se encuentran en el centro y tiene entre los 10-40 km en diámetro. El ojo es el foco del huracán, el punto sobre el cual el resto de la tormenta rota y donde se encuentra la presión superficial más baja y donde se encuentra la tormenta.

Los cielos están a menudo claros sobre el ojo y los vientos son relativamente ligeros. Es realmente la sección más tranquila en cualquier huracán.

El ojo es tan tranquilo porque los vientos superficiales ahora más fuertes convergen hacia el centro y nunca lo alcanzan. La fuerza de coriolis desvía el viento levemente lejos del centro, haciendo al viento rotar alrededor del centro del huracán, dejando el centro exacto con calma.

El ojo llega a ser visible cuando parte del aire en ascenso en la pared del ojo es forzado hacia el centro de la tormenta en vez de hacia fuera donde va la mayor parte. Este aire viene desde adentro hacia el centro de todas las direcciones. Esta convergencia hace que el aire se hunda realmente en el ojo. Este hundimiento crea un ambiente caliente, evaporando las nubes dejando un área clara en el centro.

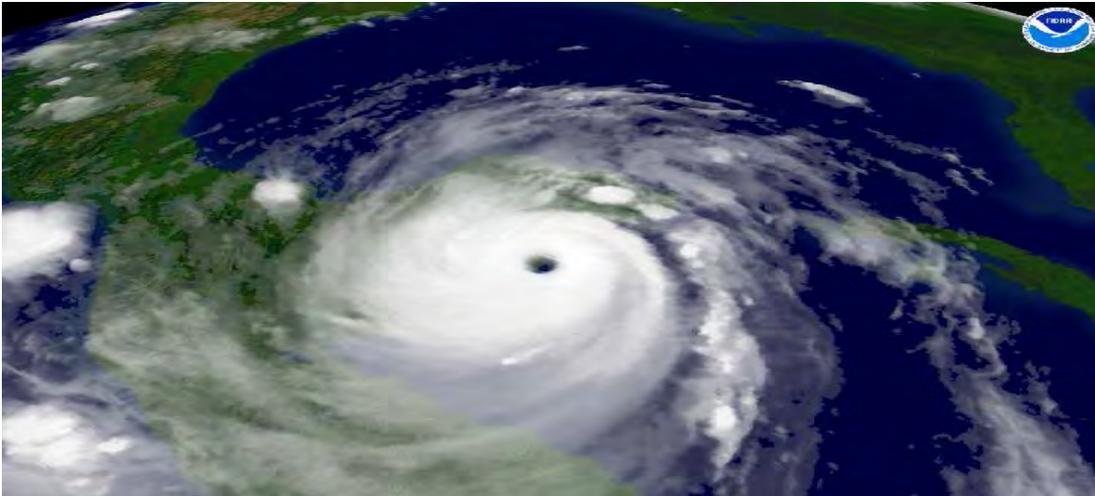


Fig.2.5 Ojo del Huracán (Fotografía NOAA)

## 2.8 Pared del Ojo

Localizado justo fuera del ojo esta la pared del ojo. Este es el sitio dentro de un huracán donde la mayoría de los vientos son dañinos y se encuentra la lluvia más intensa.

Las paredes del ojo se llaman como tal porque a menudo el ojo es rodeado por una pared vertical de nubes. La pared del ojo puede verse en la imagen 2.6, como el anillo grueso que rodea el ojo. En la superficie, los vientos están irrumpiendo hacia el centro de un huracán forzando el aire hacia arriba en el centro. La convergencia en la pared del ojo es tan fuerte que el aire se levanta más rápidamente y con más fuerza que en cualquier otro lugar del huracán. Así, el transporte de humedad del océano y la producción de calor latente se maximiza

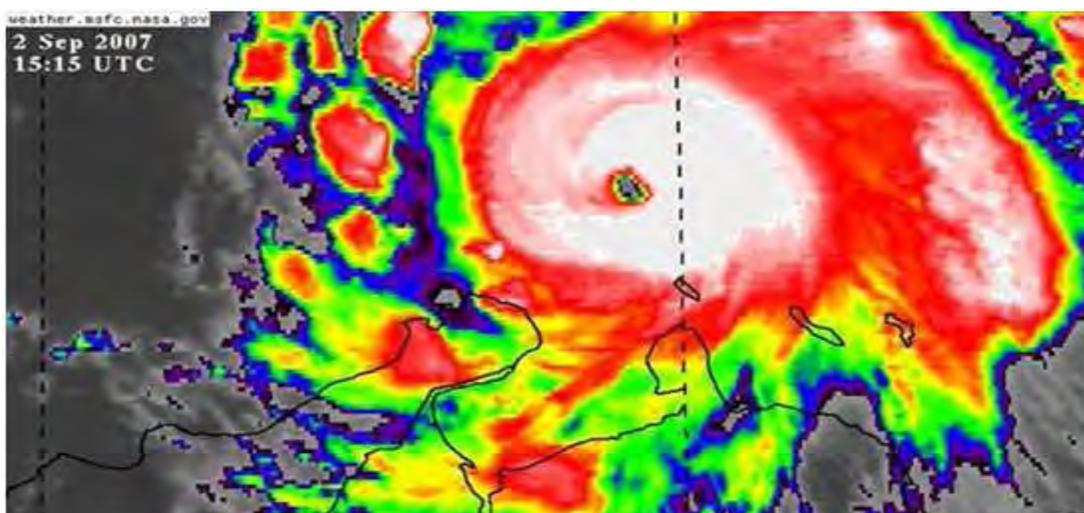


Fig.2.6 Pared del ojo del Huracán.

## 2.9 Bandas en espirales.

Las bandas espirales tienen una radiación hacia fuera de la pared del ojo uno puede ver una estructura con bandas dentro de las nubes. Estas nubes se llaman bandas de lluvia en espiral (o bandas en espiral).

Hay algunas veces espacios dentro de estas bandas donde no se encuentra ninguna lluvia. De hecho, si uno viajara entre el borde externo del huracán a su centro, uno iría progresivamente de lluvia ligera a una lluvia intensa repetidamente con cada período de precipitación siendo más intensa y más duradera hasta alcanzar el ojo. Igualmente se puede observar lo mismo en sentido contrario desde su centro hacia los bordes. Fig. 2.7.

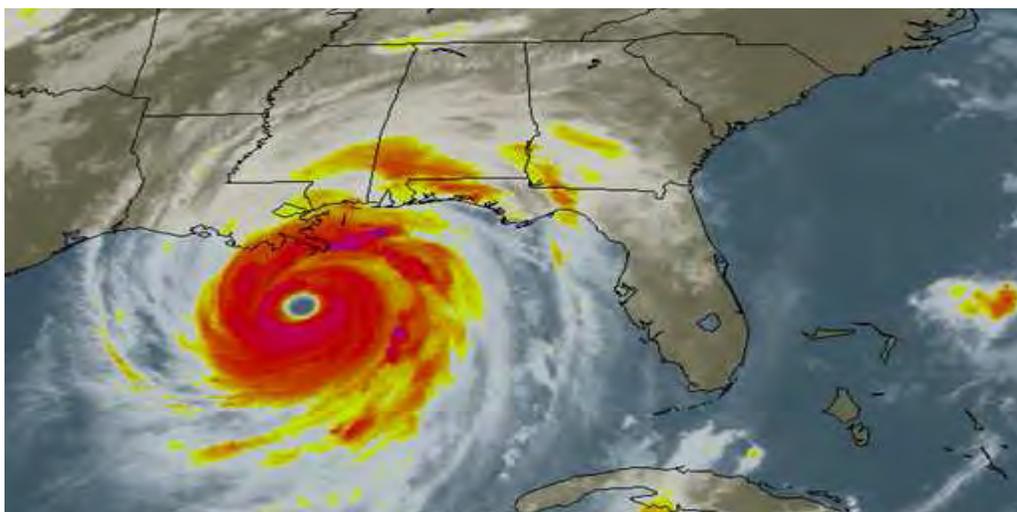


Fig.2.7 Bandas de espirales del Huracán Katrina

## 2.10 Presión y vientos

La presión atmosférica y la velocidad del viento cambian a través del diámetro de un huracán. Para demostrar, el diagrama abajo muestra un perfil de la velocidad del viento (azul) y de presión superficial (roja) a través de un huracán. Entre 100-200 kilómetros del ojo, los vientos son demasiado rápidos para calificar como una tormenta tropical. La presión atmosférica aquí todavía será relativamente alta comparada con el centro de la tormenta cerca de 990 a 1010 milibares. Sin embargo, la presión baja gradualmente y la velocidad del viento crece hasta llegar cerca de la pared del ojo. Es solamente durante los últimos 50 a 100 kilómetros que los grandes cambios ocurren en la presión y velocidad del viento.

La presión comienza a bajar más rápidamente mientras que la velocidad del viento aumenta simultáneamente. Dentro de la pared del ojo, la velocidad del viento alcanza su máximo

pero dentro del ojo, los vientos llegan a ser ligeros e incluso tranquilo. La presión superficial continúa cayendo a través de la pared del ojo y dentro del centro del ojo, donde se encuentra la presión más baja. Saliendo del ojo, la velocidad del viento y la presión aumentan rápidamente. La velocidad del viento alcanza otra vez un máximo en la pared opuesta del ojo, y después comienza rápidamente a disminuir. Los perfiles del viento y de la presión dentro de un huracán son simétricos, así que un aumento rápido en los vientos y presión a través de la pared del ojo seguida por un lento aumento en la presión y asimismo disminuye la velocidad del viento.

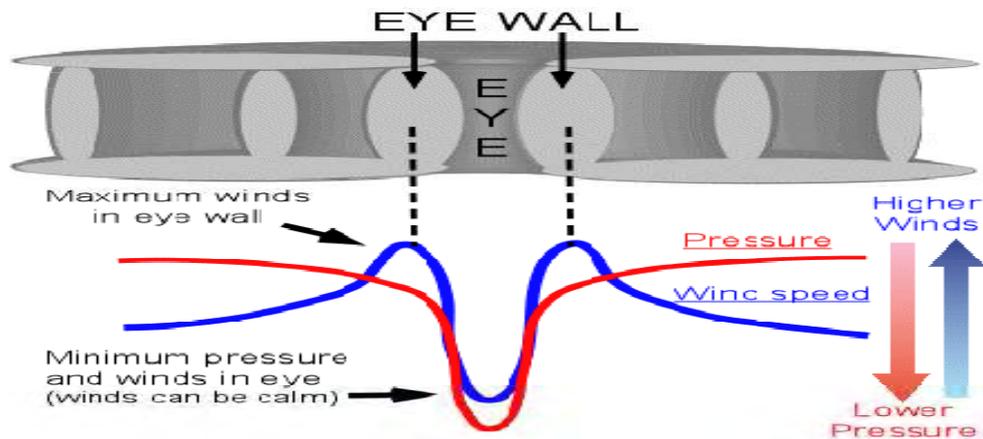


Fig.2.8 Presión atmosférica y viento en el ojo del Huracán

Otro resultado que han arrojado las investigaciones, es que los huracanes van perdiendo intensidad según la altura. En la siguiente figura se muestra el huracán Erin y muestra como pierde intensidad con la altura.

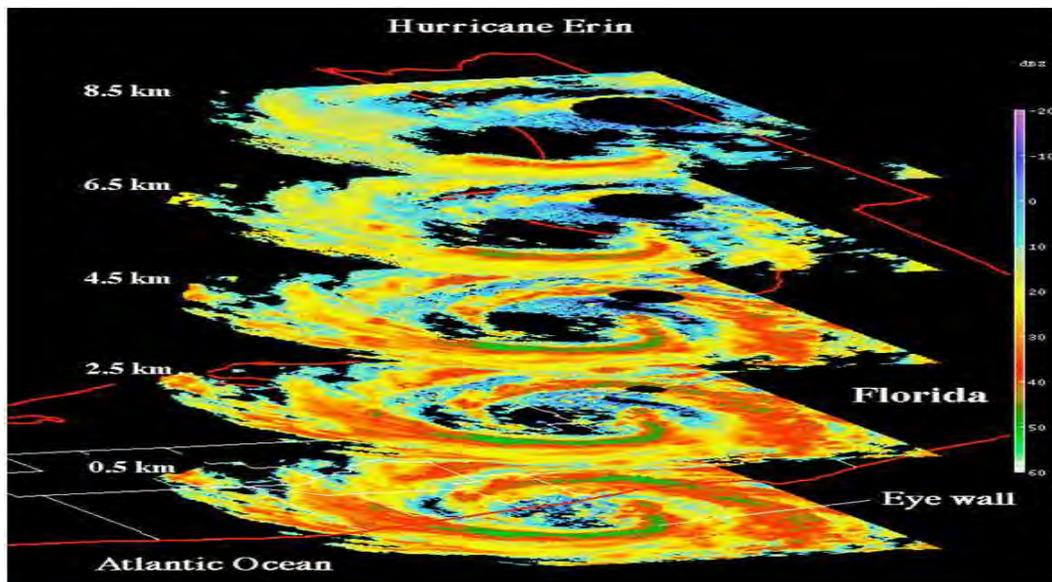


Fig.2.9 Intensidad del huracán según la altura.

## 2.11 Huracanes en el Golfo de México y en el Pacífico Mexicano.

Un examen de las trayectorias de los ciclones tropicales muestra que no hay zona costera de México que esté libre de la amenaza de las depresiones tropicales, que en muchos casos llegan a la intensidad de huracán. En el Golfo de México y en el Pacífico el litoral del país es vulnerable a los efectos de las tormentas tropicales, aunque su comportamiento en ambos litorales es algo diferente. Las depresiones que se generan en el sudeste de México, específicamente en el Banco de Campeche, se dirigen generalmente hacia el norte, mientras que las del Caribe viajan hacia el oeste hasta tocar las costas de América Central o las de la Península de Yucatán. Cuando la atraviesan se disipan, pero no lo suficiente como para quedar anulados, debido a lo angosto de la península, de modo que al llegar al Golfo de México encuentran nuevamente el agua cálida que los realimentan, recuperan su furia y continúan su obra destructora.

En un estudio sobre la actividad de las depresiones en el Atlántico Norte durante la primera mitad del siglo pasado, algunos investigadores encontraron que más del 78% de las ocurridas en el Golfo de México tuvieron lugar a partir de 1932, y sólo un 36% ha alcanzado la fuerza de huracán; la duración de estas depresiones ha sido de 4.4 días y la de los huracanes de 2.2 días. La forma cerrada del Golfo condiciona su corta duración y baja frecuencia, ya que las tormentas se encuentran en poco tiempo con tierra y se disipan. La Península de Yucatán es el área más afectada por las depresiones y del total mencionado anteriormente un 46% afectó a la península. En las dos últimas décadas se ha incrementado la frecuencia e intensidad de los huracanes en esta región; se deben destacar el Gilberto en 1988 y el Mitch en 1998, en septiembre y octubre respectivamente. [Capurro, 2001].

# Capítulo 3

## Ondeleta

### 3.1 Introducción

La caracterización, el análisis y la síntesis de las señales; y los sistemas que las manipulan juegan un papel fundamental en la ingeniería de las tecnologías de la información. Ejemplos de sistemas son el teléfono, la radio, la televisión, equipos de control para navegación y muchos otros más.

El tratamiento de señales por medio de sistemas basados en procesadores digitales es de gran interés debido a su versatilidad y a la capacidad de manejar simultáneamente señales de muy diversos orígenes.

En la actualidad, el procesamiento digital de señales ha tenido un gran desarrollo debido al avance en la tecnología de circuitos electrónicos que han permitido el manejo de señales de una manera económica, confiable y precisa. Además, la flexibilidad otorgada por los sistemas digitales en sus aspectos hardware-software, esto ha permitido que una gran cantidad de funciones que anteriormente se realizaban con una circuitería analógica dedicada a cada función específica, se realicen actualmente de manera digital, utilizando como base un hardware fijo (procesador) y confeccionando el software a la medida de acuerdo con la aplicación requerida, lo cual utiliza un mismo hardware en una infinidad de aplicaciones, variando únicamente el software.

El análisis de señales con Ondeleta ha ido adquiriendo cada vez mayor importancia en los trabajos de investigaciones que se desarrollan actualmente por sus diferentes aplicaciones y tipo de análisis que se puede lograr con su forma de trabajo, las características propias de las Ondeletas nos otorgan la posibilidad de representar señales con diferente resolución, analizar señales con peak abruptos, analizar señales no estacionarias permitiéndonos saber su contenido frecuencial y en qué momento se presentan estas componentes. Esto la hace una herramienta de análisis muy importante y es la que aplicaremos en este trabajo para analizar las señales con las cuales trabajaremos.

Este capítulo se hace un análisis global utilizando la transformada de Fourier y la teoría Ondeleta en la cual está basada esta tesis.

### 3.2 Historia del Analisis Ondeleta

Los orígenes de las Ondeletas son cercanos al nacimiento de la teoría de Fourier. En 1909 Alfred Haar descubrió la primera Ondeleta, que consiste de un breve impulso positivo, seguido de otro negativo. Posteriormente, en 1981, Jean Morlet, geofísico francés e ingeniero petrolero, Morlet buscaba petróleo y para ello necesitaba producir inicialmente vibraciones y analizar los ecos resultantes, cuyas frecuencias se correlacionaban con el grosor de las diferentes capas existentes bajo tierra. El fin era la discriminación de señales de características muy diferentes en tiempo y frecuencia, las cuales poseían, generalmente, componentes de alta frecuencia con una duración temporal mucho menos que la de las de baja frecuencia. Morlet generó unas determinadas funciones, comprimiéndolas en tiempo para obtener funciones de frecuencia más elevada, o expandiéndolas para obtener funciones de baja frecuencia. Las funciones también se desplazaron, con lo que se obtuvieron funciones dependientes de dos parámetros: localización temporal y grado de compresión o escala. Estas funciones se diferenciaban fundamentalmente de la transformada de Fourier estándar en que para las altas frecuencias eran muy estrechas, y lo contrario sucedía para las bajas frecuencias, ya que estas se mantenían siempre invariables. Morlet descubre que estas versiones dilatadas y trasladadas de una “base” (la cual se conoce actualmente como Ondeleta Morlet), permitían representar las señales de propagación en el tiempo como una combinación lineal de dichas funciones base con la misma robustez y versatilidad que las series de Fourier, pero sin sus limitaciones en periodos no estacionarios.

Unos años después, Alex Grossmann, físico teórico especializado en mecánica cuántica, reconoció ciertas similitudes entre el trabajo de Morlet, y construyó una fórmula de inversión exacta para la transformada de Morlet.

Morlet obtuvo la respuesta que deseaba de Alex Grossmann, un físico del Centre de Physique Théorique de Marsella. Grossmann trabajó con Morlet durante un año para confirmar que las ondas se podían reconstruir a partir de sus descomposiciones en Ondeletas. De hecho, las transformaciones de Ondeletas resultaron funcionar mucho mejor que las transformaciones de Fourier, porque eran mucho menos susceptibles a pequeños errores de cómputo. Un error o un truncamiento indeseados de los coeficientes de Fourier pueden transformar una señal suave en una muy oscilatoria o viceversa; las Ondeletas evitan tales consecuencias.

En 1985, Yves Meyer, matemático Francés, observó el trabajo desarrollado por J. Morlet y A. Grossmann, así como su fórmula de reconstrucción, y se dio cuenta de que era un redescubrimiento de la fórmula que Alberto Calderón había introducido en la década de 1960 en el análisis armónico. Entusiasmado con esta nueva área de aplicación del análisis armónico, Meyer se contactó con J. Morlet y A. Grossmann, fue el principio de la interacción entre los analistas armónicos puros y los investigadores aplicados, lo cual beneficiaría a ambas comunidades. Meyer estaba especialmente interesado en las series de Ondeletas. Meyer construyó una base de Ondeletas ortonormales con muy buenas propiedades de localización temporal y en frecuencia. Posteriormente generalizó su construcción a N dimensiones junto con Pierre Gilles Lemarié, un analista armónico, estudiante de Meyer. Unos meses después, P. G. Lemarié y G. Battle, físico matemático que trabajaba en teoría cuántica de campos, construyeron, independientemente y con

técnicas completamente diferentes, bases de Ondeletas con funciones de spline, con un mejor decrecimiento que las Ondeletas de Y. Meyer, al precio de pérdidas de regularidad.

En la década de 1970, A. Croisier, D. Esteban y C. Galland descubrieron los filtros especulares en cuadratura, con los cuales se cancelaba el error en la reconstrucción. En 1983, M. Smith y T. Barnwell, por un lado, y F. Mintzer, por otro, descubrieron unos filtros especulares en cuadratura que daban una reconstrucción exacta y que eran, además, el tipo de filtros que los investigadores en la búsqueda de bases de Ondeletas ortonormales redescubrirían unos cuantos años después, desde un punto de vista completamente diferente.

Un descubrimiento aislado hecho por Denis Gabor tendría un impacto importante en lo que sería después el análisis de señales. En 1946, Gabor adaptó la transformada de Fourier utilizando un proceso llamado “ventaneado”, el cual consiste en descomponer las señales en partes de tiempo-frecuencia, también conocidas como frecuencias de Gabor. De esta manera, al aplicar una función en el tiempo, llamada “ventana”, se hizo posible obtener el espectro de frecuencia para un intervalo de tiempo con una longitud previamente establecida, pudiendo incluso obtener un espectro casi instantáneo de la señal si se considera una longitud de la ventana lo suficientemente pequeña.

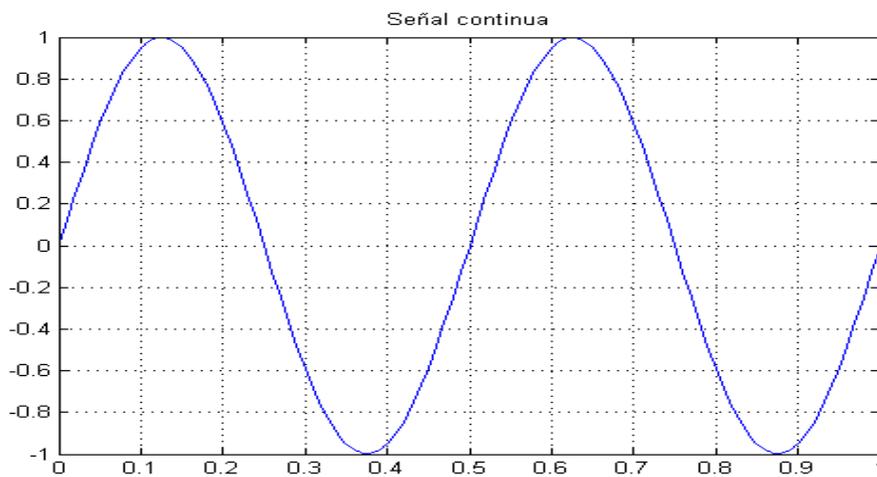
En 1986 S. Mallat por entonces en la Universidad de Pennsylvania, ideó una estructura similar para la expansión en Ondeletas. Junto con Meyer, asentó todas las bases matemáticas del análisis de multiresolución, con lo cual se simplificó la tarea de construcción de bases ortonormales de Ondeleta, y que permitía el cálculo de una descomposición Ondeleta de una función desde su aproximación a más fina escala hasta la más gruesa.

Stéphane Mallat, vinculó la teoría de Ondeletas a la literatura existente sobre codificación de subbandas y filtros de duplicación de cuadratura, que son las versiones de las Ondeletas de la comunidad de procesamiento de imágenes. La idea del análisis multiresolución (es decir, la observación de señales a distintas escalas de resolución). Mallat, en colaboración con Meyer, demostró que las Ondeletas están implícitas en el proceso del análisis multiresolución.

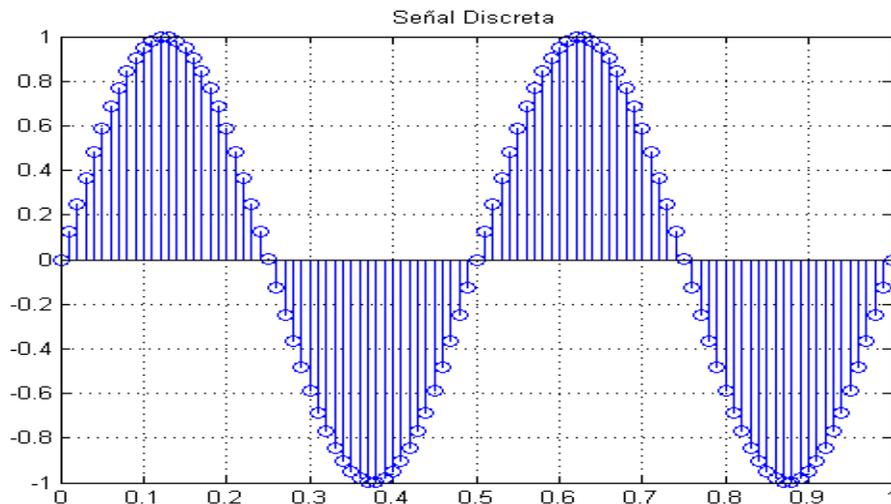
En 1987, cuando Ingrid Daubechies, durante su trabajo en los laboratorios AT&T Bell, descubrió una clase completamente nueva de Ondeletas, que no sólo eran ortogonales (como las de Meyer) sino que también se podían implementar mediante sencillas ideas de filtrado digital, de hecho, mediante cortos filtros digitales. Las nuevas wavelets eran casi tan sencillas de programar y utilizar como las Ondeletas de Haar, pero eran suaves, sin los saltos de las wavelets de Haar. Los procesadores de señales disponían ahora de una nueva herramienta: es una manera de descomponer datos digitales en contribuciones de diversas escalas. Al combinar las ideas de Daubechies y Mallat, se disponía de una transformación ortogonal y sencilla que se podía calcular rápidamente en las modernas computadoras digitales.

### 3.3 Señales

Una señal es una función de una o más variables. Atendiendo a los valores que pueden tomar estas variables, las señales se clasifican en dos grupos: señales analógicas y señales discretas. Las señales analógicas son función de una o varias variables reales, y las señales discretas o secuencias, son función de una o varias variables que únicamente pueden tomar valores enteros. Ejemplos de señales de dominio real son las señales de voz (presión en función al tiempo), imagen (brillo en función de la posición  $x$  y  $y$ ), o la temperatura en función a la altura. Ejemplos de señales discretas son el índice de la bolsa (valor en función del día), el número de autos en circular por una calle en un día, y todas las señales que son el resultado de tomar muestras o valores de señales de dominio continuo en instantes determinados.



3.1 Señal Continúa.



3.2 Señal Discreta.

### 3.4 Series de Fourier.

El matemático francés Joseph Fourier (1768 - 1830). Establece en 1807, en el Instituto de Francia que: cualquier señal periódica puede ser representada por una serie de sumas trigonométricas en senos y cosenos relacionadas armónicamente, se representa mediante la siguiente fórmula:

$$f(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos kt + b_k \sin kt)$$

Los coeficientes  $a_0$ ,  $a_k$  y  $b_k$  se calculan de la siguiente manera.

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) dt ; a_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(kt) dt ; b_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin(kt) dt$$

La representación de Fourier de una función periódica, representa la función como la suma de componentes sinusoides que tienen diferentes frecuencias. La componente senoidal de frecuencia  $\omega_n = n\omega_0$  se denomina la  $n$ -ésima armónica de la función periódica. La primera armónica comúnmente se conoce como la componente fundamental porque tiene el mismo período de la función y  $\omega_0 = 2\pi f_0 = 2\pi/T$  siendo la frecuencia angular fundamental.

### 3.5 Transformada de Fourier.

En la Ingeniería usualmente se representan las señales mediante funciones en el ámbito del tiempo  $f(t)$ , o alternativamente, en el dominio de la frecuencia  $F(W)$ , a través de la transformada de Fourier. Ambas representaciones contienen exactamente la misma información sobre la señal, respondiendo a enfoques distintos y complementarios.

La transformada de Fourier, en esencia, descompone o expande una señal o función en senos y cosenos de diferentes frecuencias cuya suma corresponde a la señal original, es decir, es capaz de distinguir las diferentes componentes de frecuencia de la señal, y sus respectivas amplitudes. La transformada de Fourier de una función del tiempo  $f(t)$ , se define como:

$$F(W) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt$$

y su Transformada inversa como:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(W) e^{i\omega t} d\omega$$

Una de las grandes limitantes de la transformada de Fourier es que debe trabajar con señales estacionarias, es decir, la señal no debe cambiar a través del tiempo, otra limitante de la transformada de Fourier es que sólo proporciona el contenido espectral de la señal y no su localización temporal de las componentes espectrales.

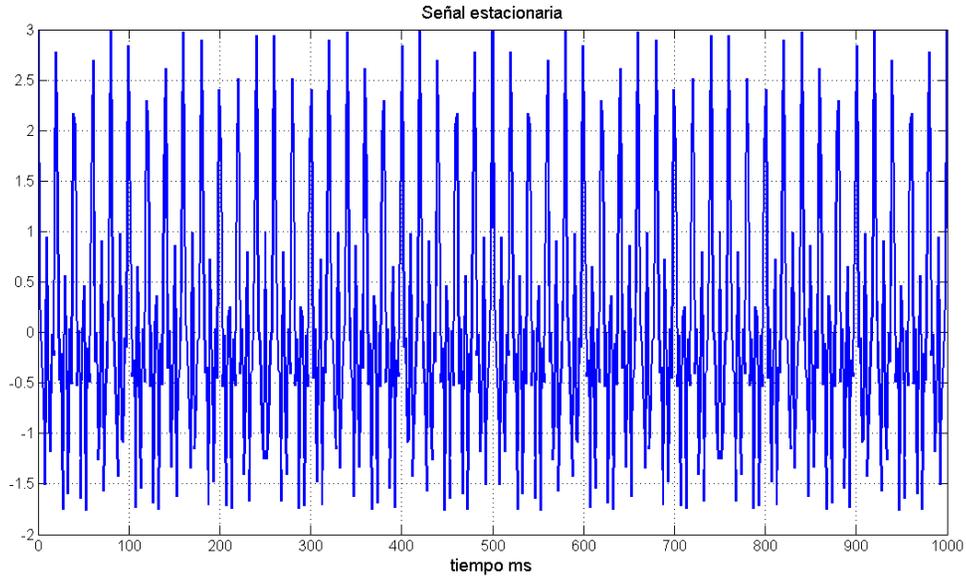


Fig. 3.3 Señal estacionaria de contenido de 50, 100 y 200 Hz

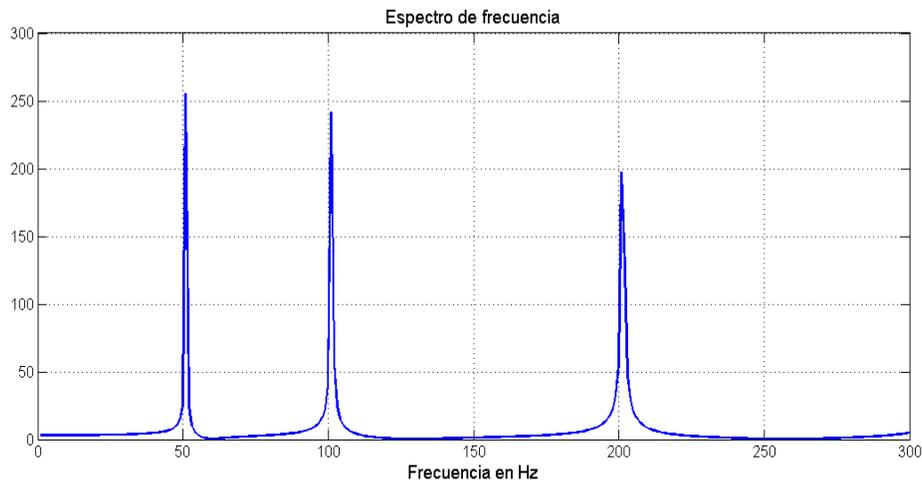
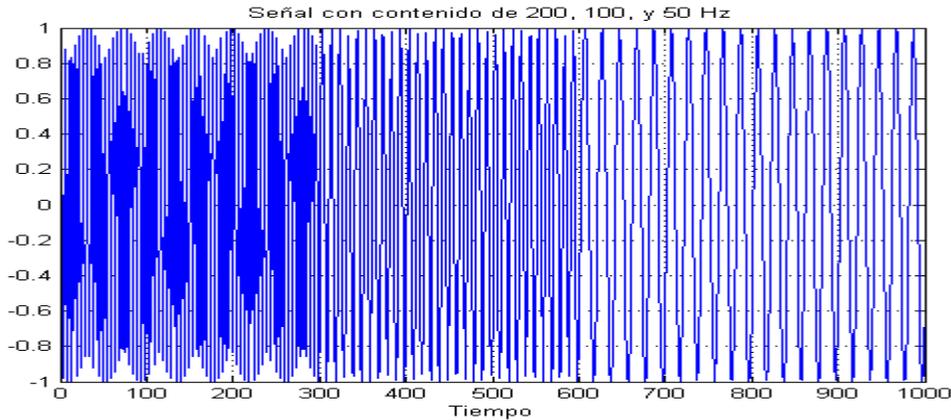
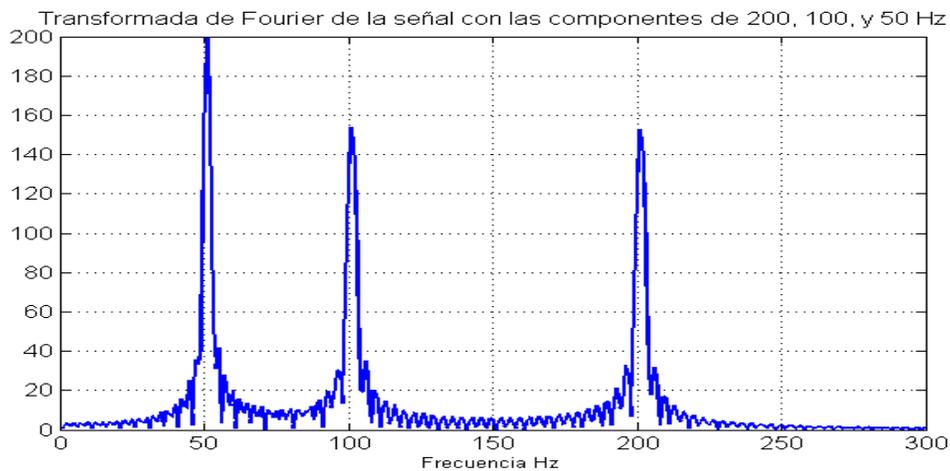


Fig.3.4 Espectro de frecuencia de la señal estacionaria



3.5 Suma de tres Señales en el tiempo, con componentes de 50, 100 y 200 Hz.



3.6 Transformada de Fourier de las tres Señales sumadas.

En la figura 3.3, podemos ver una señal estacionaria con 3 componentes de frecuencia 50, 100 y 200 Hz. En la figura 3.4 podemos ver su transformada de Fourier, en esta grafica podemos apreciar la eficiencia de la transformada de Fourier ya que esta nos muestra la localización frecuencial de las componentes de frecuencia que se encuentran presentes en la señal. En la figura 3.5 tenemos una señal no estacionaria con las mismas 3 componentes que aparecen en diferentes tiempo, al aplicar la transformada de Fourier podemos ver el espectro de las 3 componentes presenten, pero no tenemos su localización temporal, la transformada de Fourier sólo nos proporciona información espectral sin poder darnos información temporal de las tres señales que aparecieron en diferentes tiempos. Cabe mencionar que para señales estacionarias no es importante ya que la señal esta todo el tiempo sin sufrir alteraciones, pero para señales no estacionarias esta información es muy importante, ya que nos dará información de los cambios que pueda sufrir una señal en el tiempo

### 3.6 Transformada Corta de Fourier (STFT) o Ventana de Gabor

La transformada de Fourier tiene una perfecta resolución en frecuencia lo que hace de la transformada una herramienta muy útil para el análisis de señales estacionarias. Sin embargo, ella no puede ser aplicada con el objeto de obtener información precisa de cuándo o dónde las diferentes componentes de frecuencia se encuentran en la señal como es el caso de señales quasi - estacionarias o no estacionarias cuyo contenido espectral varía con el tiempo. En otras palabras, la transformada de Fourier posee una muy pobre resolución en tiempo.

Una clase de representaciones tiempo-frecuencia ampliamente difundida en el ámbito del procesamiento de señales se basa en el empleo de ventanas temporales, esto es de funciones suaves y bien localizadas en un intervalo. La ventana  $g(t)$ , enmarca una porción de la señal y permite aplicar localmente la Transformada de Fourier. De este modo, se releva la información en frecuencia localizada temporalmente en el dominio efectivo de la ventana. Desplazando temporalmente la ventana se cubre el dominio de la señal obteniéndose la completa información tiempo - frecuencia de la misma. La representación matemática de la Transformada corta de Fourier se representa de la siguiente manera:

$$STFT(\tau, w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(t - \tau)e^{-iwt} dt$$

Asumiendo que la ventana real  $g(t)$ , está bien localizada en un intervalo centrado en  $t = 0$ , de longitud  $\Delta_t$ , y que su transformada  $G(w)$ , está también localizada en una banda centrada en  $w = 0$ , de ancho  $\Delta_w$ , las ventanas desplazadas y moduladas  $g(t - \tau)e^{-iwt}$ , son funciones elementales bien localizadas en el dominio conjunto tiempo - frecuencia. Cada función elemental se localiza en el rectángulo centrado en el punto  $(\tau, w)$ , de dimensión  $\Delta_t \Delta_w$ . Fig. 3.5

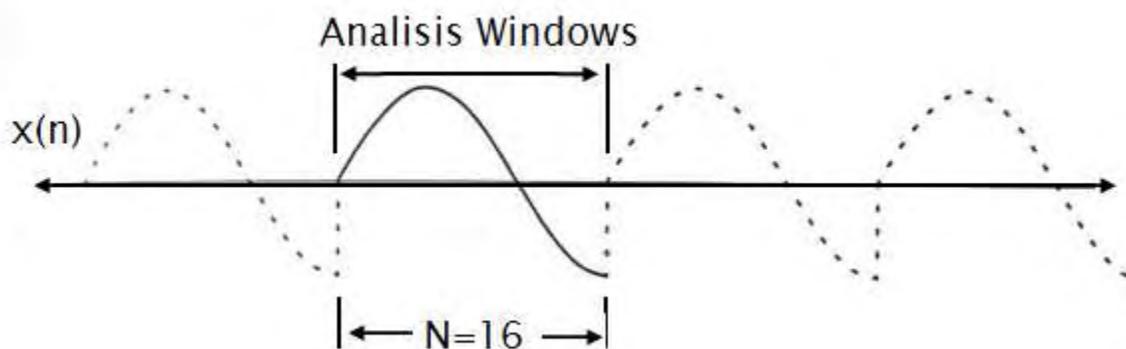


Fig.3.7 Aplicación de la ventana en el análisis de la señal

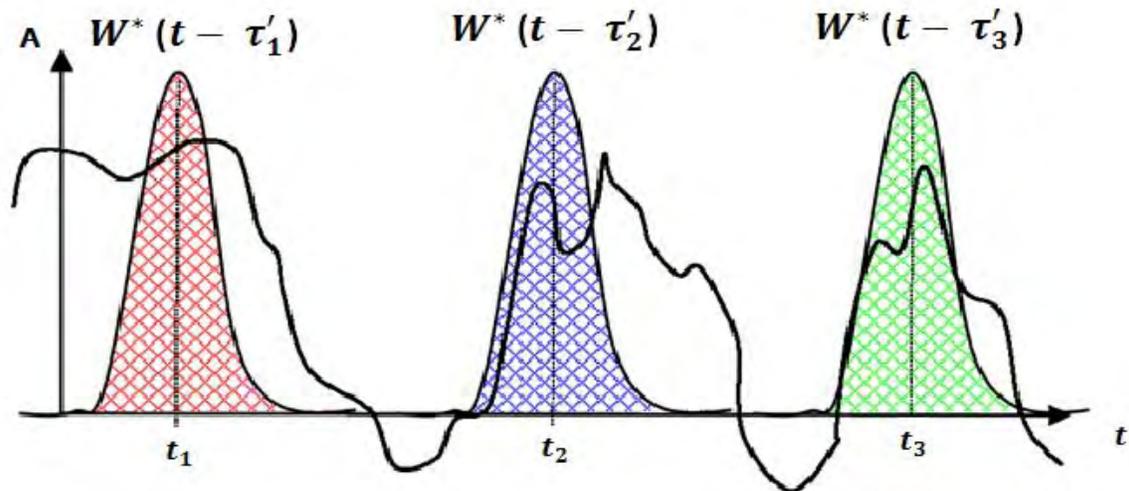


Fig. 3.8, Se muestra una función ventana de tipo gaussiana, la función de color rojo, muestra la ventana localizada en un tiempo  $t_1$ , la de color azul en  $t_2$ , y la de color verde en  $t_3$ . Estas ventanas corresponden a tres transformadas de Fourier, en tres tiempos distintos, por lo tanto se obtendrá una mejor representación tiempo frecuencia de la señal

Por tanto el conjunto de valores  $STFT(\tau, w)$ , nos da un completo mapa en el dominio tiempo-frecuencia que despliega la información de la señal. Más aún, ésta puede recuperarse con la fórmula de inversión:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} STFT(\tau, w) e^{iwt} d\tau dw$$

Ahora bien, el soporte de la ventana constituye un parámetro de gran importancia ya que a través de esta podemos establecer el grado de resolución tanto de tiempo como de frecuencia que deseemos. Si nuestra ventana es muy angosta analizaremos una porción muy pequeña de la señal lo que nos permite tener una buena resolución en tiempo pero una mala resolución en frecuencia ya que conoceremos sólo una mínima fracción del espectro total existente en la señal. Por otro lado, si nuestra ventana es muy ancha tendremos una buena resolución en frecuencia pero una mala resolución en tiempo, una ventana de ancho infinito es nada más y nada menos que la transformada de Fourier Clásica, por lo tanto un defecto de la STFT es que no puede entregar una buena resolución tanto en tiempo como en frecuencia de manera instantánea ya que el soporte de la ventana es fijo. La raíz de este problema se basa en el Principio de Incertidumbre de Heisenberg [Pedersen F. 1999] [Polikar, R. 1996], el cual establece que es imposible conocer una representación exacta tiempo - frecuencia de una señal, es decir, no podemos saber qué valor de frecuencia existe en un instante de tiempo determinado, sólo podemos conocer que componentes de frecuencia existen dentro de un intervalo de tiempo determinado. Fig. 3.6

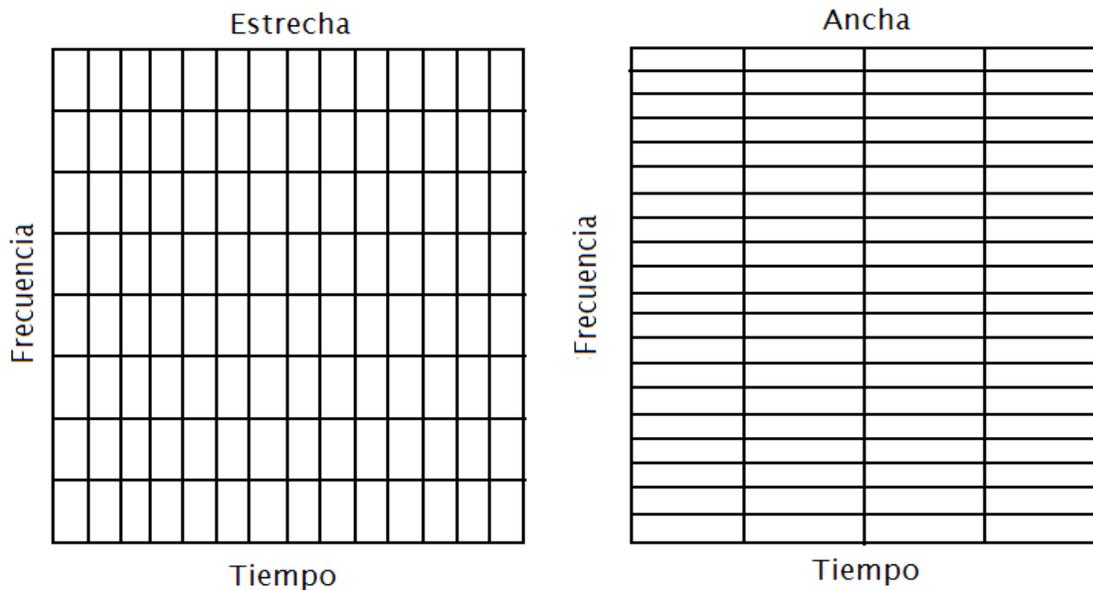


Fig. 3.9 Resolución Tiempo-Frecuencia Dependiendo del tamaño de la ventana

En la figura 3.9, se muestran dos diferentes tipos de ventanas para la STFT, por una lado tenemos una ventana con mejor resolución en el tiempo, pero como consecuencia tendremos una pobre resolución en la frecuencia, en el segundo caso, tenemos una ventana con una mejor resolución en la frecuencia, pero una pobre resolución en el tiempo.

### 3.7 Transformada Ondeleta

El objetivo del análisis de una señal es el de disponer de una transformación que represente la señal en el campo de las frecuencias y en el del tiempo, simultáneamente. El análisis estándar de Fourier descompone una señal en las componentes de frecuencias y determina la potencia relativa de cada una. Este procedimiento no brinda información acerca de cuándo la señal exhibe una característica particular y por lo tanto en aquellos casos donde la señal no es estacionaria se pierde información valiosa al ignorar las anomalías locales.

En el caso del estudio de las tormentas de arena, la señal no es estacionaria, con algunas perturbaciones producidas por eventos no estacionales o atmosféricos tales como la acción del viento.

El análisis de Ondeleta es una herramienta matemática que descompone una señal temporal en suma de diferentes señales temporales denominadas funciones Ondeletas hijas. Cada una de estas tiene diferentes escalas en diferentes niveles de resolución obtenidos mediante escalado y dilatación de una determinada función matemática temporal denominada función Ondeleta madre. Esto permite el análisis de la señal con diferentes niveles de detalle, característica que da lugar al Análisis Multirresolución o MRA.

El MRA proporciona alta resolución en el tiempo y baja en frecuencia con señales de alta frecuencia mientras que ofrece baja resolución temporal y alta resolución en frecuencia con señales de baja frecuencia. Esto la convierte en una herramienta válida en sistemas de medida y análisis de calidad de energía para caracterizar eventos y transitorios de distorsión analizando una zona particular de la forma de onda y para medir contenido armónico analizando zonas más amplias. Permite superar algunas de las limitaciones del análisis de Fourier sin embargo debemos remarcar que la limitación en la resolución tiempo-frecuencia expresada en el Principio de Incertidumbre es insalvable cualquiera que sea la herramienta matemática que empleemos.

Para lograr realizar un análisis multirresolución debemos hacer pasar la señal por una serie de filtros, descomponiendo la señal, obteniendo bandas de frecuencias de la señal, con esto podremos realizar el análisis con diferentes niveles de detalle, este proceso se denomina descomposición.

Para obtener esas bandas de frecuencias, la señal temporal pasa por una serie de filtros paso bajo y paso alto para conseguir descomponer la señal, de forma que se obtiene en el dominio del tiempo una serie de muestras que corresponden a una banda de frecuencias. Esta descomposición mediante los filtros paso-alto, HP, y paso-bajo, LP, fracciona el espectro en dos bandas. A la salida del filtro LP tenemos una señal en el dominio del tiempo cuyo espectro está confinado entre 0 Hz y la mitad del espectro de la señal analizada. A su vez, la salida del filtro HP es una señal en el dominio del tiempo cuyo espectro está confinado entre la mitad del espectro y la frecuencia máxima de la señal. Este límite superior es la mitad de la frecuencia de muestreo.

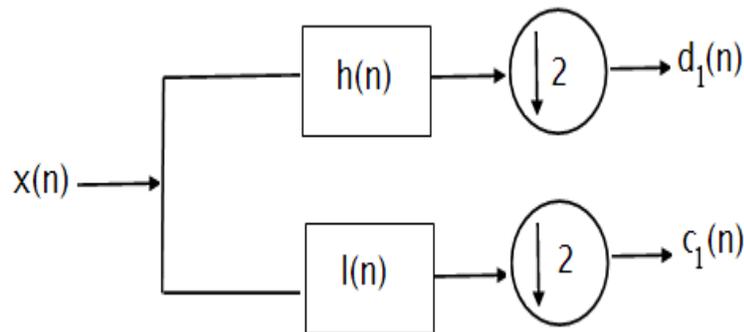


Fig. 3.10 Descomposición simple

La salida del filtro paso-alto da los detalles de las componentes de alta frecuencia y mientras que la salida del filtro paso-bajo da las componentes de baja frecuencia. Esta salida puede ser de nuevo descompuesta en el siguiente nivel de descomposición. De este modo obtenemos lo que se denomina árbol simple de descomposición Ondeleta.

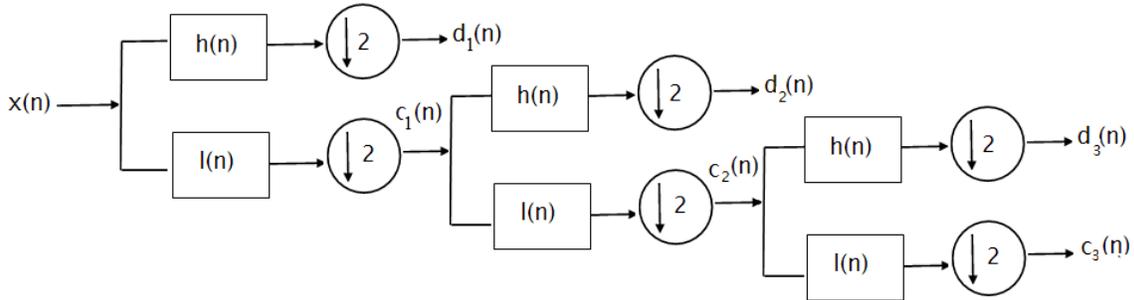


Fig. 3.11 Árbol de descomposición simple.

En las bandas con coeficientes de detalle ( $d(n)$ ), podemos aplicar de nuevo la descomposición simple, de este modo estaremos diferenciando detalles más finos de entre otros detalles, es decir variaciones de mayor frecuencia de entre otras de frecuencia más baja. De este modo se consigue una descomposición completa de la señal en bandas homogéneas. Esta descomposición de la salida de todos los filtros de niveles intermedios se denomina paquete de transformada Ondeleta.

### 3.8 Transformada Ondeleta Continua (CTW por sus siglas en ingles)

Una alternativa a la Transformada de Gabor es la de utilizar ventanas moduladas, de dimensión variable, ajustada a la frecuencia de oscilación. Más preciso, que mantenga un mismo número de oscilaciones en el dominio de la ventana. Esto sugiere, naturalmente, contar con una única ventana modulada y generar una completa familia de funciones elementales mediante sus dilataciones o contracciones y traslaciones en el tiempo [S. Mallat, 1998]

La transformada Ondeleta constituye una técnica que ha sido propuesta por los investigadores como una poderosa herramienta en el análisis sobre el comportamiento local de una señal. Al igual que la STFT, esta transformada utiliza una función ventana que encuadra una señal dentro de un intervalo y focaliza el análisis sólo en ese segmento de la señal.

La transformada continua Ondeleta intenta expresar una señal  $f(t)$ , continua en el tiempo, mediante una expansión de términos o coeficientes proporcionales al producto interno entre la señal y diferentes versiones escaladas y trasladadas de una función prototipo  $\psi(t)$ , más conocida como Ondeleta madre. Asumiendo que tanto la señal como la nueva función  $\psi(t)$ , son de energía finita, entonces podemos definir.

$$CWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$

Como se puede observar arriba han aparecido dos nuevas variables  $a$  y  $b$ . La variable  $a$  controla el ancho o soporte efectivo de la función madre  $\psi$ , y la variable  $b$  nos da la ubicación en el dominio del tiempo de  $\psi$ .

Donde  $a \neq 0$ , y  $b$  son los parámetros de escala y de traslación. Se preserva la energía de las funciones mediante un factor de normalización.

La variable  $a$ , puede ser vista como  $a = \frac{f}{f_0}$  donde  $f_0$  denota la frecuencia central de la Ondeleta. De esta manera tendremos que la ecuación anterior se puede expresar también de la siguiente manera:

$$CTW(b, f) = \sqrt{\left| \frac{f}{f_0} \right|} \int h\left(\frac{f}{f_0}(x - b)\right) f(x) dx \quad ; a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0$$

Ahora bien, para que este análisis sea posible y además para poder lograr una perfecta reconstrucción de la señal a partir de la transformada, la función  $\psi(t)$ , debe cumplir con la condición de admisibilidad [Chui, C. K. 1997] de la cual se desprende que:

$$\Psi(0) = 0$$

Donde  $\Psi = \Psi(w)$ , corresponde a la transformada de Fourier de  $\psi(t)$ . El cumplimiento de esta condición significa que el valor medio de  $\psi$  es igual a cero, lo que a su vez implica obligatoriamente que  $\psi$ , tenga valores tanto positivos como negativos, es decir, que sea una onda. Además como  $\psi$  es una función que esta “ventaneada” la señal sobre un intervalo de tiempo dado por  $a$  alrededor de un punto  $t = b$ , se observa intuitivamente que  $\psi$  es de soporte compacto, es decir,  $\psi$  es una onda definida sobre un intervalo de tiempo finito, y esto es porque de su nombre Ondeleta. El hecho que se cumpla  $\Psi(0) = 0$ , significa implícitamente que  $\Psi(w)$ , debe tener un rápido decaimiento cuando  $w$  tiende a cero, lo que nos hace pensar que  $\psi$  es una función ventana pasabanda en el dominio de la frecuencia (ya que al menos en la frecuencia 0 se detiene).

Esta transformada permite la representación de la señal  $f(t)$ , en el plano tiempo – escala. La variable escala lleva en si la información de la dilatación y la contracción de la señal, pero podría verse desde otro punto de vista donde lo que cambia es la frecuencia y con ello al dilatarse la frecuencia se reduce y al contraerse la frecuencia aumenta. Aquí es donde se pueden ver las características de las Ondeletas, para obtener la información de la señal y conocer sus componentes de frecuencia.

En el dominio del tiempo el análisis es más sencillo ya que la variable de traslación tiene la información de tiempo, pues nos indica en qué lugar del eje del tiempo se encuentra la Ondeleta. Fig. 3.12

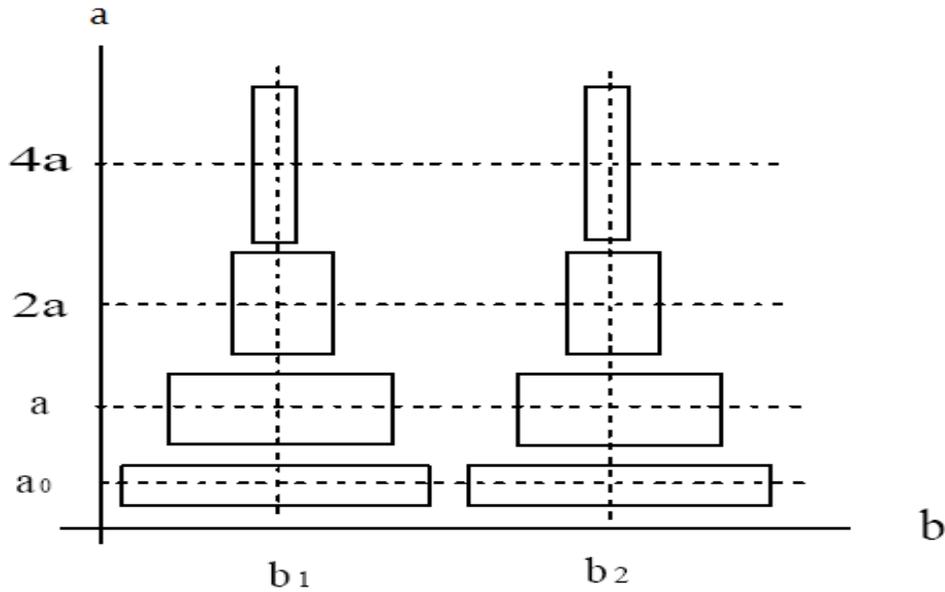


Fig. 3.12 Plano tiempo-frecuencia para la transformada Ondeleta.

Donde la escala se define como:

$$Escala = \frac{1}{Frecuencia}$$

### 3.9 Variables de escala $a$ y traslación $b$

Mediante la variable de escala nosotros podemos comprimir ( $|a| < 1$ ), o dilatar ( $|a| > 1$ ), la función madre  $\psi(t)$ , nos dará el grado de resolución con el cual estaremos analizando la señal. Por definición la Transformada Ondeleta Continua es más una representación tiempo-escala que una representación tiempo-frecuencia. En particular, para valores pequeños de  $a$  la CWT obtiene información de  $f(t)$ , que está esencialmente localizada en el dominio del tiempo mientras que para valores grandes de  $a$  la CWT obtiene información de  $X(W)$  que está localizada en el dominio de la frecuencia. En otras palabras, para escalas pequeñas la CWT nos entrega una buena resolución en el dominio del tiempo mientras que para escalas grandes la CWT nos entrega una buena resolución en el dominio de la frecuencia. Cuando  $a$  cambia, tanto la duración como el ancho de banda de la Ondeleta  $\psi$  cambian, pero su forma se mantiene igual. En lo anteriormente dicho se encuentra la diferencia principal entre la CWT y la STFT, ya que la primera ocupa ventanas de corta duración para altas frecuencias y ventanas de larga duración para bajas frecuencias mientras que la STFT ocupa una sola ventana con la misma duración tanto para altas frecuencias como para bajas frecuencias.

Según los valores de  $b$  la función se traslada sobre el eje temporal hasta una determinada zona de la forma de onda. .

Un valor bajo de  $a$  genera una Ondeleta hija comprimida en el dominio del tiempo y permite representar detalles de variaciones rápidas de  $f(t)$ , es decir variaciones de alta

frecuencia que se representarían en bandas frecuenciales anchas. Es decir, a una alta resolución temporal, un intervalo de tiempo pequeño, le corresponde una resolución frecuencial baja. Recíprocamente, un valor alto de  $a$  genera una Ondeleta hija expandida en el dominio del tiempo y representa detalles de variaciones lentas de  $f(t)$ , es decir variaciones de baja frecuencia que se representarían en bandas de frecuencia estrechas. Así, a una resolución temporal baja, una porción de tiempo amplia, le corresponde una resolución frecuencial alta.

De este modo, con el análisis MRA, obtenemos una representación de variaciones rápidas en el dominio del tiempo en bandas de frecuencia grandes y de poca resolución y viceversa, a variaciones lentas le corresponden a bandas de frecuencia estrechas y de alta resolución.

La variable  $b$ , controla la ubicación de la función en el espacio de tiempo permitiéndonos deslizar  $\psi(t)$ , sobre el intervalo de tiempo en el que se haya definido  $f(t)$ . Un punto importante es que la función Ondeleta  $\psi$  se traslada cubriendo toda la señal para cada valor de  $a$ , es decir, si la escala escogida es pequeña habrán más traslaciones de  $\psi$  que si la escala escogida es grande. Por lo tanto, la variable  $b$  nos da la cantidad por la cual  $\psi\left(\frac{t}{a}\right)$ , ha sido trasladada en el dominio del tiempo.

La continuidad de la CWT reside en que tanto la variable de escala como la variable de traslación varían en forma continua. Sin embargo, en términos de cálculo computacional es imprescindible discretizar la transformada, y la suposición más lógica es que tanto los valores de escala como traslación sean discretos.

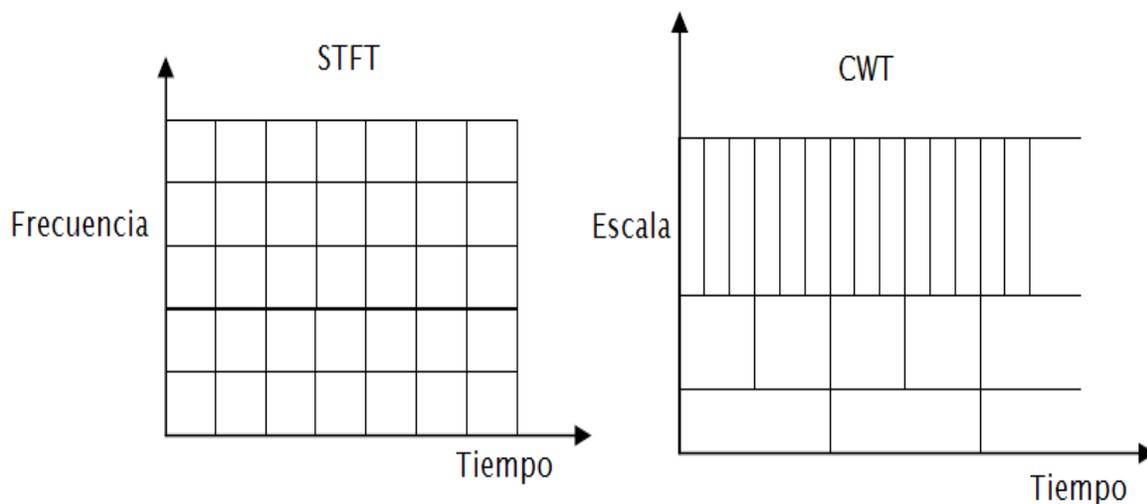


Fig.3.13 Diferencia entre la STFT y la CWT

En la figura 3.13, se muestran las diferencias entre la STFT y la CWT, en la grafica de la STFT podemos ver claramente que, por más que nos movamos en el plano tiempo frecuencia siempre tendremos el mismo recubrimiento local, en la CWT al movernos entre

diferentes escalas, tendremos un recubrimiento diferente del plano. Eso si manteniendo constante el área recubierta. [Janer 1998].

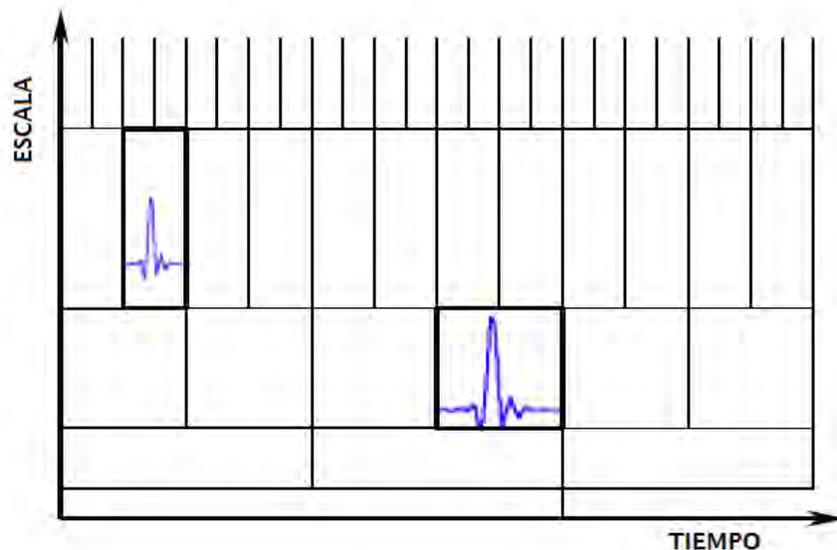


Fig.3.14 Escalado y traslación de la CWT

En la figura 3.11 se aprecian las operaciones básicas de escalado y traslación, estas definen el enrejado Tiempo-Escala. En caso de tener una buena resolución temporal, la Ondeleta madre, representada en el eje inferior, se estrecha, con lo que se pierde resolución en la frecuencia. Si la Ondeleta madre se ensancha, se pierde resolución temporal, pero se gana en la frecuencia. Así, variando la anchura y desplazándola por el eje temporal, se calcula el valor correspondiente a cada celda. [Fernández 2002].

La transformada Ondeleta consiste en calcular un índice de semejanza entre la señal que está siendo analizada, y la Ondeleta madre que se esté utilizando.

El proceso de cálculo de la transformada Ondeleta puede ser descrito en cuatro pasos como:

- Tomar una Ondeleta Madre
- Dados los valores del escalamiento y traslación, calcular el coeficiente  $CWT$ , mediante las ecuaciones de la Ondeleta ( $CWT$ ), que represente la correlación entre la Ondeleta Madre y la sección de la señal bajo análisis. Cuando mayor sea este número, mayor es la similitud, con lo cual es interesante resaltar que los resultados dependerán por tanto de la forma de la Ondeleta.
- Desplazar la Ondeleta en el eje del tiempo de la señal que se esté estudiando, y repetir los pasos anteriores hasta que se haya cubierto la totalidad de la señal
- Dar un nuevo valor al parámetro escalar  $a$  en la Ondeleta madre, y repetir los pasos anteriores. Los pasos se repiten dependiendo cada análisis.

Ejemplo.

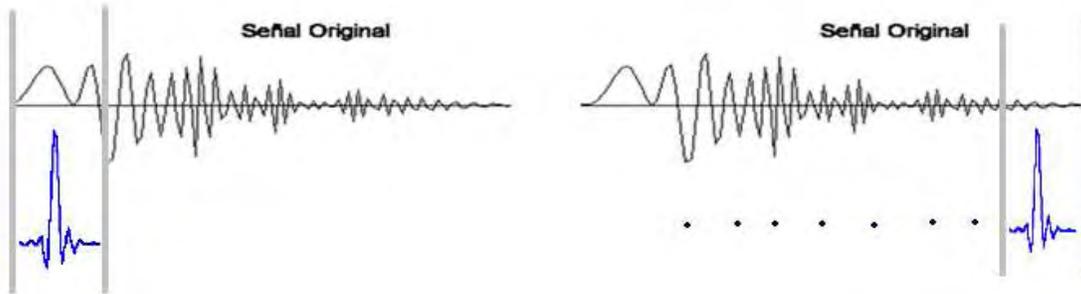


Fig. 3.15 Análisis de la Ondeleta madre con un valor de escalamiento

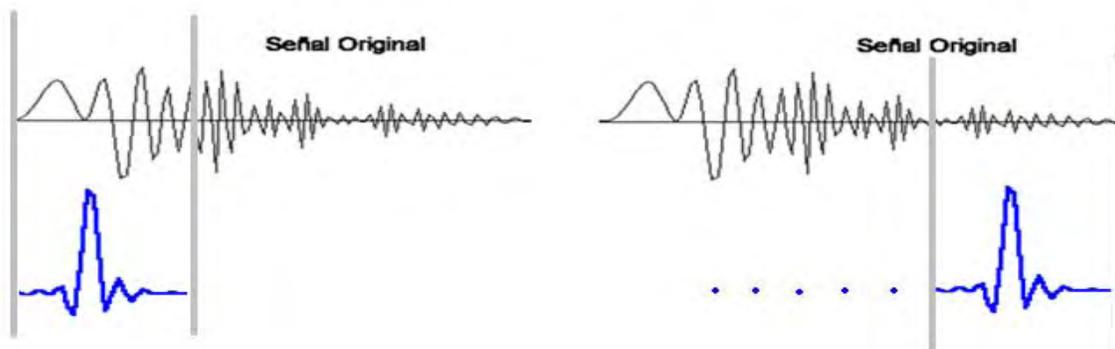


Fig. 3.16 Análisis de la Ondeleta madre con un valor de escalamiento mayor

Ejemplos de aplicación de la transformada Ondeleta

En esta sección se explicara cómo trabaja la Ondeleta en una señal  $f(t)$ , la Ondeleta madre se puede escoger de las existentes, algunas de ellas se nombraron anteriormente, tendremos que dar un valor al parámetro de escala, comprimiendo o expandiendo a la ondeleta madre, ( $a < 1$  comprimida;  $a > 1$  expandida).

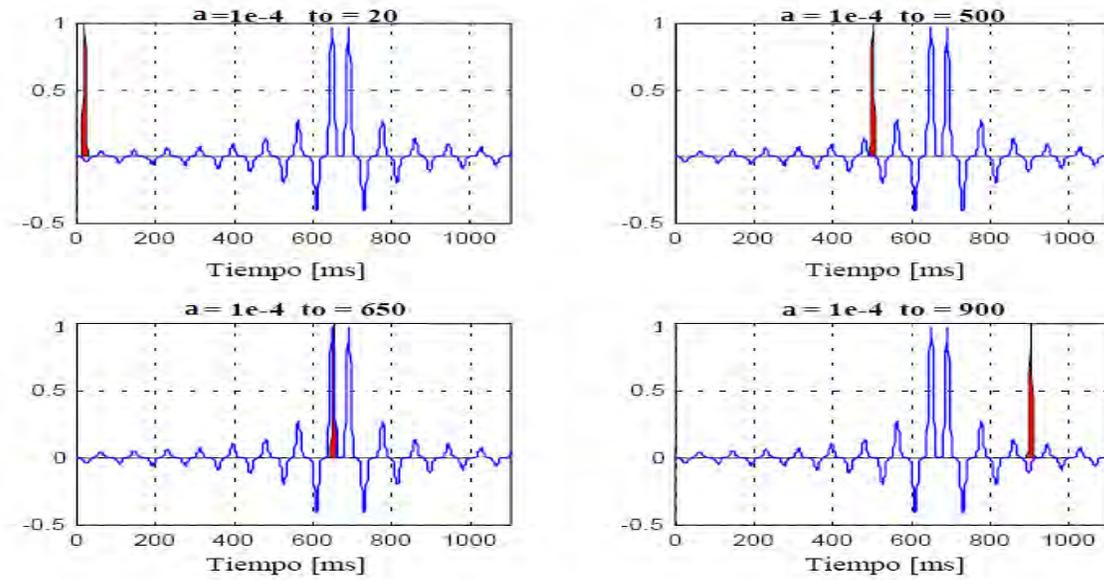


Fig. 3.17 Forma de cálculo de la trasformada Ondeleta para un valor de  $a = 0.0001$  de la función madre y distintos valores de  $t$ .

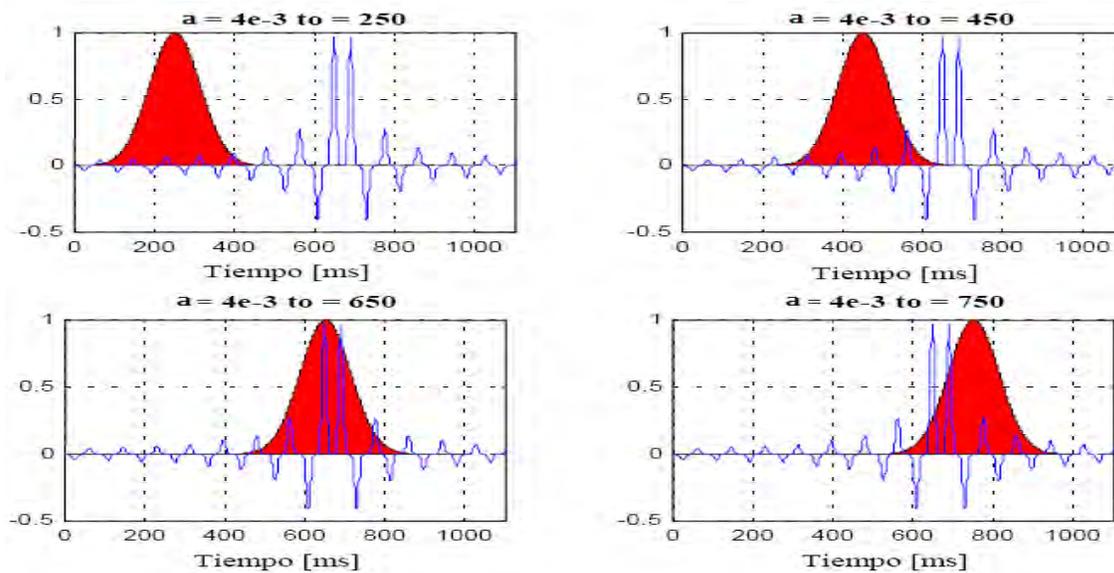


Fig. 3.18 Forma de cálculo de la trasformada Ondeleta para un valor de  $a = 0.004$  de la función madre y distintos valores de  $t$ .

### 3.10 Funciones Wavelets madres

Dentro de las Wavelets más famosas y utilizadas podemos citar la Haar que es la más simple y la más antigua, y se describe de la siguiente forma.

$$h(x) = \begin{cases} 1; & 0 \leq x < \frac{1}{2}, \\ -1; & \frac{1}{2} \leq x < 1, \\ 0; & \text{Otro Valor.} \end{cases}$$

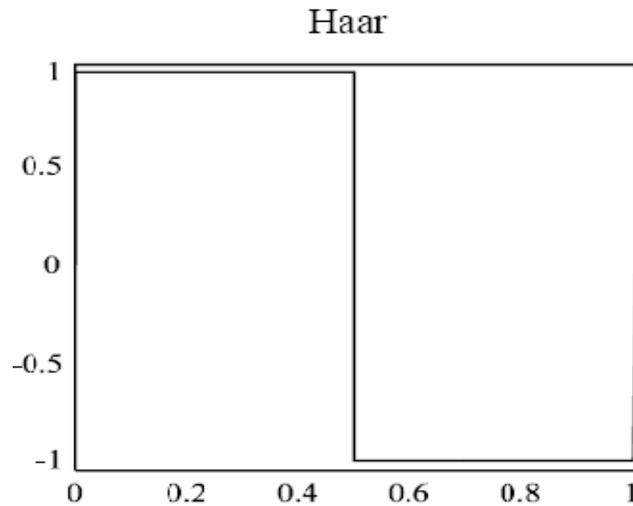


Fig. 3.19 OndeletaHaar.

En la figura 3.19, podemos ver que efectivamente es una Ondeleta sencilla. Sin embargo es muy utilizada para análisis de señales usando transformadas discretas y continuas. Tiene un solo momento de desvanecimiento.

Otra Ondeleta muy utilizada en el análisis de señales es la Mexican hat. Cuyo nombre proviene de la forma que describe su gráfica que está definida por:

$$mexh = \frac{2(1 - x^2)e^{-\frac{x^2}{2}}}{\pi^{1/4} \sqrt{3}}$$

Esta Ondeleta es la segunda derivada de la función de densidad de probabilidad Gaussiana. Como veremos en la figura 3.20 es simétrica, característica que le permite examinar a las señales de modo simétrico y lineal en la fase, igual que la Haar. No todas son simétricas pero también se utilizan en los análisis dependiendo del objetivo que se quiera lograr con ellas.

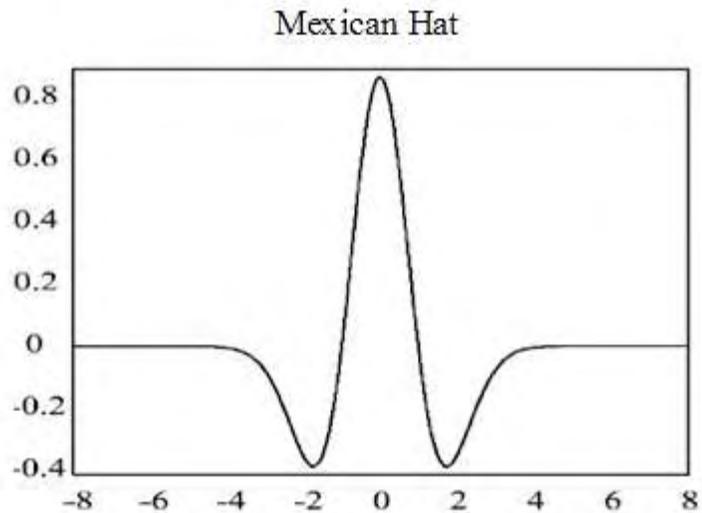


Fig. 3.20 Ondeleta Mexican Hat.

Otra Ondeleta es la Daubechies que puede tener un orden  $N$ , dependiendo del número de momentos de desvanecimientos que se deseen,  $N$  es un entero positivo y denota el numero de coeficientes de filtro que tiene esa Wavelet; por ejemplo la Daubechies de orden 1 [se escribe db 1] es la Ondeleta Haar que hemos visto anteriormente.

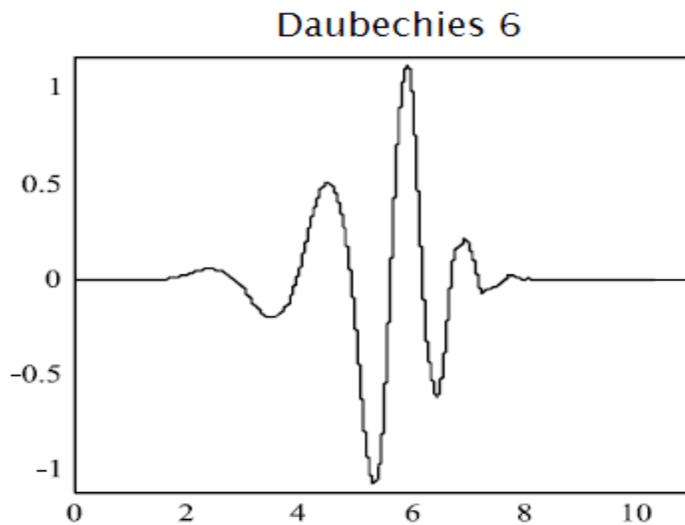


Fig. 3.21 Ondeleta Daubechies de orden 6.

Una Ondeleta con mayor número de momentos de desvanecimientos es la Coiflet, cuya gráfica se muestra en la figura 3.22. Para cada orden diferente de la Ondeleta se tienen  $2N$  momentos de desvanecimientos. Puede ser simétrica o asimétrica dependiendo del orden  $N$  de la Ondeleta con que se trabaje.

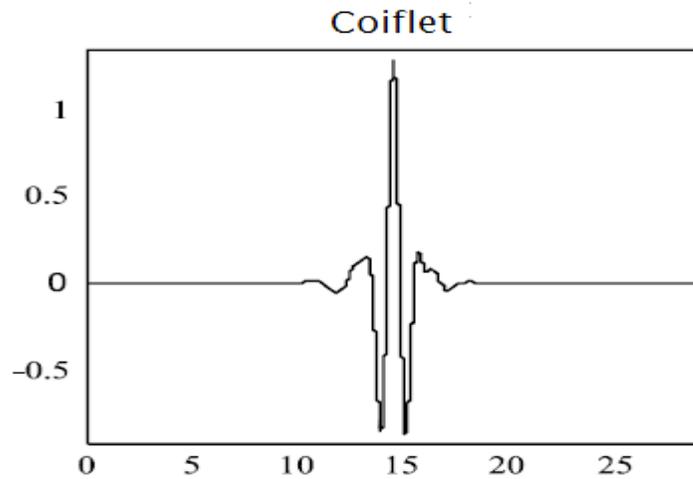


Fig. 3.22 Ondeleta Coiflet de orden 5.

La Ondeleta Symmlet posee las características de ortogonalidad y biortogonalidad y también permite realizar las transformadas continua y discreta de Wavelet. Posee la cualidad de tener diferentes órdenes, de este modo podemos ver en la figura 3.23, la Ondeleta Symmlet de orden 6 [se escribe Sym6].

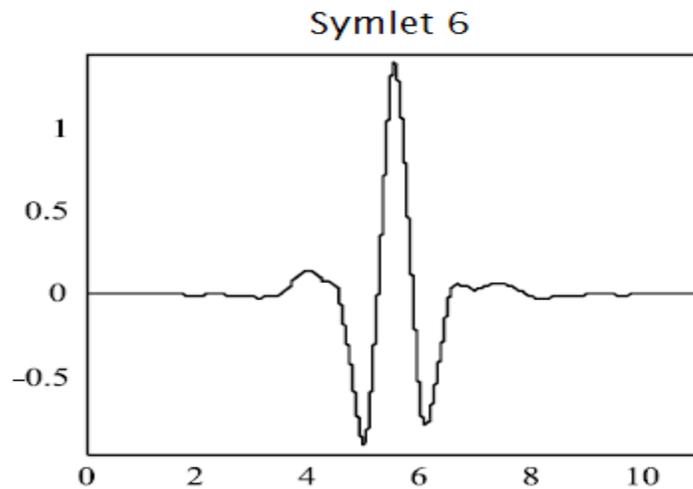


Fig. 3.23 Ondeleta Symmlet de orden 6.

La Ondeleta Gaussiana es otra muestra muy común de estas funciones finitas. Esta se define como la derivada de la función de densidad de probabilidad y matemáticamente se define como:

$$gaus(x, n) = Cn \frac{d}{dx} (e^{-x^2}, n)$$

Donde  $C_n$  es una constante determinada por  $2 - \text{norm de gaus}(x, n) = 1$ . Con esta Ondeleta solo es posible realizar la transformada continua de Ondeleta y puede ser simétrica o asimétrica según el valor de  $n$ .

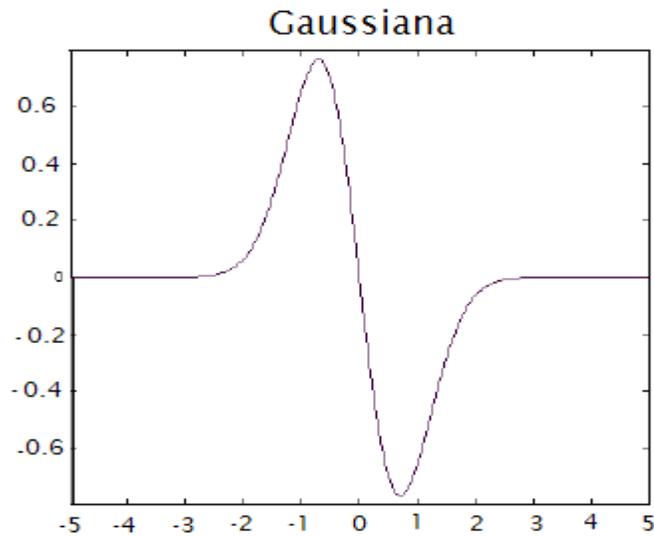


Fig. 3.24 Ondeleta Gaussiana de orden 1.

Una de las Ondeleta más utilizada es la denominada Morlet, cuya expresión para definirla es la siguiente:

$$\text{morl}(x) = e^{-\frac{x^2}{2}} \cos(5x)$$

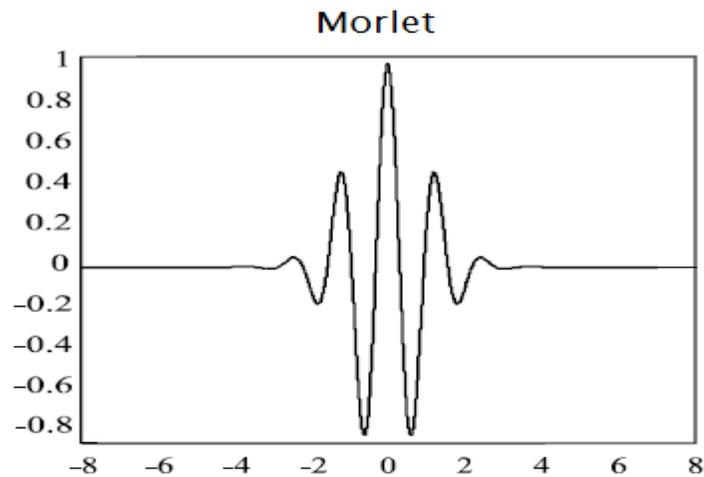


Fig. 3.25 Ondeleta Morlet.

### 3.11 Transformada Ondeleta Discreta

La Transformada de Fourier, la de Gabor o la Ondeleta Continua, y muchas otras, pertenecen a la clase de las llamadas Transformadas Integrales Continuas. Las mismas, como hemos visto, mapean la información de la señal dada  $f(t)$  en un espacio definido por los correspondientes parámetros variando en rangos continuos, predisponiéndola al análisis y a la interpretación.

En líneas generales, los cálculos integrales deben aproximarse con sumatorias sobre redes discretas razonablemente finas. Se discretizan tanto los parámetros, como los puntos de reconstrucción. Eventualmente se recurren a técnicas de interpolación.

Discretizar los parámetros, equivale a discretizar la transformada. Esto es, reemplazar el mapeo continuo de información por un espectro, conjunto finito o numerable de valores.

En casos muy especiales, es posible discretizar los parámetros, de modo que los valores de la transformada discretizada puedan computarse eficientemente y la información contenida en ellos sea razonablemente manejable. Más preciso, de modo que exista una fórmula sumatoria de reconstrucción, numéricamente estable. Entonces, tenemos una Transformada Discreta. Esta ya no es simplemente una aproximación de la continua, sino que nos da una nueva forma de analizar y sintetizar la información.

El diseño de una versión discreta de la Transformada Wavelet, esencialmente consiste en definir una apropiada red discreta de parámetros  $\{(a_j; b_{jk})\}$ , de escalas y traslaciones, respectivamente. De modo que la familia de Ondeletas  $\psi_{a_j; b_{jk}}$  sea admisible. En general, constituye un problema difícil caracterizar aquellas wavelets que definen una Transformada Discreta [J. J. Benedetto and M. W. Frazier, 1994].

Actualmente contamos con varias clases de Ondeletas admisibles. Mencionando algunas como la Ondeleta Daubechies, Ondeleta Morlet y otras más.

En general, esas clases se asocian a la red diádica.

$$a_j = 2^{-j} ; b_{jk} = 2^{-j}k ; j, k \in \mathbb{Z}$$

Bajo esta elección de los parámetros, tendremos entonces la usual expresión para las Ondeletas:

$$\psi_{jk}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k) \quad j, k \in \mathbb{Z}$$

Asumiendo que la Ondeleta madre real y una señal  $f(t)$  de energía finita la Transformada Discreta asociada se define como:

$$DW_{\psi^f}(j, k) = \langle f, \psi_{jk} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi_{jk}(t)dt$$

A partir de las mismas consideraciones que en el caso continuo, vemos ahora que las Wavelets  $\psi_{jk}(t)$  están localizadas en el intervalo centrado en  $(t_0 + k)2^{-j}$ , de longitud  $2^{-j}\Delta_t$  y en la banda bilateral  $0 < 2^j w_1 \leq |w| \leq 2^j w_2$  de ancho  $2^j \Delta_w$ , estas bandas representan una partición en niveles o en octavas del dominio de las frecuencias.

### 3.12 Transformada Cross-Ondeleta (XWT por sus siglas en Ingles)

Dadas dos series de tiempo  $x_n$  e  $y_n$ , con sus respectivas transformadas Ondeleta,  $W_n^x(s)$  y  $W_n^y(s)$ , se puede definir el espectro Cross-Ondeleta como:

$$W_n^{xy} = W_n^x(s)W_n^{y*}(s)$$

Donde \* denota la conjugación compleja de  $W_n^y(s)$ , y se define la energía Cross-Ondeleta como  $|W^{xy}|$ . El argumento complejo  $arg(W^{xy})$ , puede ser interpretado como la fase relativa local entre  $x_n$  e  $y_n$ , en el espacio tiempo-frecuencia. La distribución teórica de la energía Cross-Ondeleta de las dos series de tiempo con energía espectral  $P_k^x$  y  $P_k^y$  está representada como [Torrence and Compo (1998)].

$$\frac{|W_n^x(s) W_n^{y*}(s)|}{\sigma_x \sigma_y} \Rightarrow \frac{Z_v(p)}{v} \sqrt{P_k^x P_k^y}$$

Donde  $\sigma_x$  y  $\sigma_y$ , es la respectiva desviación estándar, para  $v = 1$ . Ondeleta Real,  $Z_1(95\%) = 2.182$ , mientras que para  $v = 2$ . Ondeleta Compleja.  $Z_2(95\%) = 3.999$ .

La Transformada Ondeleta de una serie de tiempo representa la varianza, la Transformada Cross-Ondeleta de dos series de tiempo representa la covarianza de estas señales. Por lo tanto la Cross-Ondeleta nos da información de que tan relacionadas están las energías de ambas señales.

### 3.13 Transformada Ondeleta de Coherencia

La Cross-Ondeleta nos revela zonas de alta energía común entre dos series de tiempo, la Ondeleta de Coherencia es otra útil herramienta en el análisis de dos series de tiempo. La Cross-Ondeleta de Coherencia puede ser definida como la proporción de los Cross-

espectros, el producto de los espectros de cada serie y puede ser pensado como la correlación local entre dos  $CWT_s$  y se define como [Torrence and Compo (1998)]:

$$R_n^2(s) = \frac{|S(s^{-1}W_n^{XY}(s))|^2}{S(s^{-1}|W_n^X(s)|^2) \cdot S(s^{-1}|W_n^Y(s)|^2)}$$

$S$  representa el suavizado tanto en escala como en tiempo.

La diferencia de fase es útil para poder relacionar la fase entre ambas series de tiempo  $x_n$  e  $y_n$ . La fase de ambas señales varía en función a la frecuencia. La fase de una serie de tiempo  $\phi_x$ , se relaciona con la fase de la otra serie de tiempo  $\phi_y$ , y se calcula la diferencia de fase entre ambas  $\phi_{xy}$ . La diferencia de fase es definida como:

$$\phi_{xy} = \tan^{-1} \left( \frac{\Im\{W_n^{xy}\}}{\Re\{W_n^{xy}\}} \right) ; \text{ con } \phi_{xy} \in [-\pi, \pi]$$

Las flechas que se ven en la gráfica de la Transformada Cross-Ondeleta de Coherencia, representan la relación de fase entre las dos señales. Las flechas que apuntan hacia la izquierda indican anti-fase, y las flechas que apuntan hacia la derecha indican en fase.

La zona encerrada por un borde negro que se encuentra en rojo nos indica la relación de energía que existe entre las dos señales. En la gráfica 3.19 vemos la alta relación de energía que existe entre el polvo africano y las tormentas tropicales, en el período de un año.

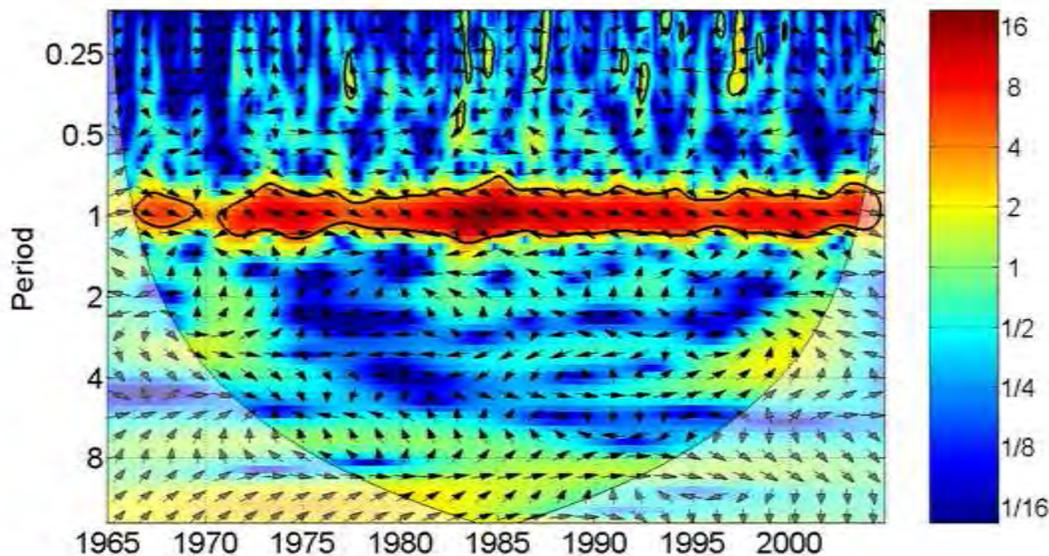


Fig.3.26 Transformada Cross-Ondeleta entre las Tormentas Tropicales y las Tormentas de Polvo

### 3.14 Cono de Influencia

El cono de influencia nos permitirá limitar los efectos de borde, los cuales son originados al principio y al final de cada serie de tiempo, esto debido a que la serie de tiempo o señal que estemos trabajando es finita. La solución a estos efectos, es rellenar el final de la serie de tiempo con ceros, antes de hacer la transformada Ondeleita y removerlos posteriormente [Torrence et al. 1998]. El cono de influencia nos permitirá obtener un nivel de confianza del 95% en los datos analizados.

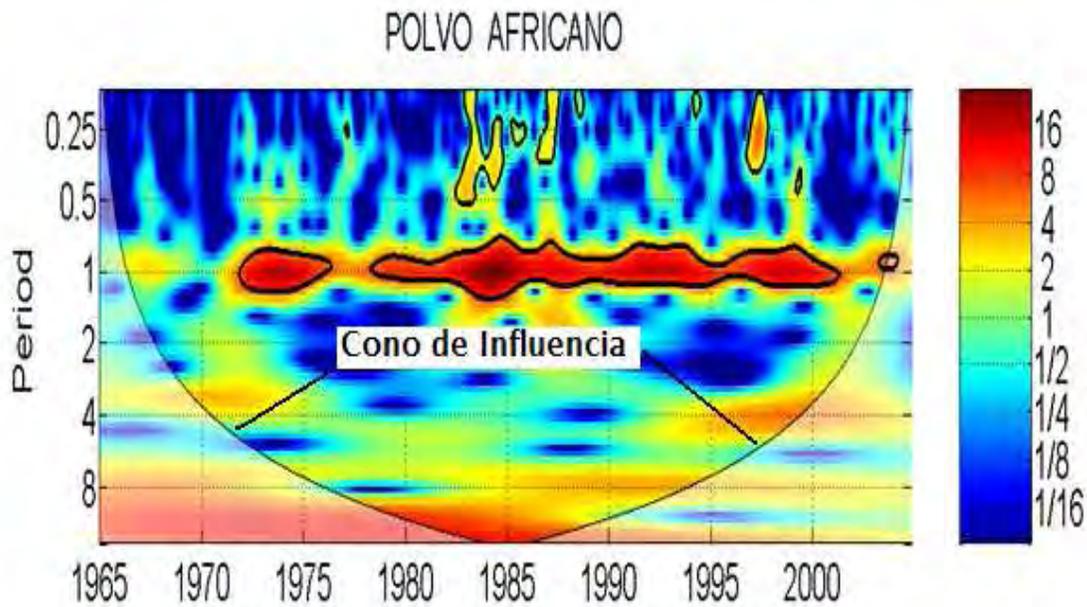


Fig.3.27 Cono de Influencia

La serie de tiempo del ruido rojo está definida como [Torrence et al. 1998].

$$x(t) = ax(t - \Delta t) + (1 - a^2)^{\frac{1}{2}} \varepsilon(t)$$

Donde  $x$  es una variable estandarizada,  $a$  se encuentra en un intervalo entre cero y uno, mide el grado de memoria en el cual se conservan los estados anteriores,  $\varepsilon$  es un número al azar dibujado de una distribución normal estandarizada y  $\Delta t$ , es el intervalo de tiempo entre puntos de datos.

Es espectro de ruido rojo es [Torrence et al. 1998]:

$$P_k = \frac{1 - \alpha^2}{1 + \alpha^2 - 2\alpha \cos(2\pi k/N)}$$

Donde  $k = 0 \dots N/2$ , es el índice de frecuencia, si  $\alpha = 0$  solo queda el espectro del ruido rojo blanco. Este espectro de ruido rojo nos permitirá obtener una confianza del 95% en el espectro global Ondeleta.

# Capítulo 4

## Análisis de Datos

### 4.1 Introducción

En el presente capítulo se analizaron los resultados obtenidos de las series de tiempo de los huracanes y tormentas tropicales que se han formado en el Atlántico a partir del año 1965. De la misma forma se analizaron los datos con las tormentas de polvo que se generan en el Norte de África específicamente en el Desierto del Sahara.

El desarrollo de este trabajo de investigación, es dar inicio a un tema de trabajo sobre la relación que puedan tener los huracanes del Atlántico norte con las tormentas de polvo generadas en el Norte Africano, como una variable que influya de alguna manera en los huracanes que afectan al Atlántico Caribeño.

Los satélites de la NASA han proporcionado evidencias que el efecto de enfriamiento del polvo fue responsable de una tercera parte de la caída en las temperaturas superficiales del mar en el Atlántico Norte entre junio de 2005 y 2006, posiblemente, contribuyendo a la diferencia en actividad de huracanes entre las dos estaciones.

El calor almacenado en las superficies cálidas del Océano se sabe que suministra de combustible a los huracanes, generando tormentas más fuertes y más frecuentes, durante la estación de los huracanes del 2006; sin embargo, las temperaturas superficiales del mar en el Atlántico Norte seguían siendo relativamente frescas y la estación generó solamente 5 huracanes, comparados con los 15 de 2005, donde la superficie del océano fue más cálida.

El polvo aerotransportado del Sahara sobre el Atlántico fue probablemente responsable de gran parte de la caída de la temperatura, bloqueando eficientemente la luz del sol al alcanzar la superficie del océano. El polvo causó entre un 30 % a un 40 % de la caída en la temperatura superficial del mar entre junio de 2005 y 2006. El equipo divulgó estos

resultados en American Geophysical Union's Geophysical Research Letters [William Lau y Kyu-Myong Kim del Centro del vuelo Espacial de Goddard de la NASA].

Este hecho proporciona la primera estimación cuantitativa del papel del polvo en el refrescamiento del Atlántico Norte y llama la atención sobre el polvo como un factor en la influencia potencialmente importante de la actividad de los huracanes [William Lau y Kyu-Myong Kim].

En una investigación publicada al inicio de 2007, Lau sugirió que el polvo del Sahara bloqueaba la luz del sol antes de alcanzar el océano, causando que la superficie del océano se refrescara e hizo que 2006 tuviera una estación de huracanes mucho más débil que la del 2005. Las temperaturas superficiales del mar en junio 2006 estaban más frescas que un año antes en el Atlántico Norte, donde las tormentas de polvo de África pudieron parar el calentamiento de la superficie del océano por el sol. Esta visión global creada por datos desde junio de 2006 muestra, figura 4.1, donde estaban frescas las temperaturas superficiales del mar (azul) y las regiones donde eran cálidas (rosado ligero).

Para investigar el acoplamiento de la temperatura superficial del mar y el polvo, [Lau y Kim], calcularon el patrón de refrescamiento que el polvo del Sahara debe producir en las temperaturas superficiales del mar por el efecto de bloqueo y compararon los resultados con los patrones observados de temperatura. El equipo de la NASA, primero recogió datos del Centro Nacional para la Predicción Ambiental para descubrir cuánta energía solar incorpora la atmósfera de la tierra y alcanza la superficie de la tierra libre de la influencia del polvo; sin embargo, la energía incidente sobre el tope de la atmósfera no toda sobrevive en el viaje al atravesar la atmósfera: una porción es absorbida o reflejada por el polvo y las nubes.

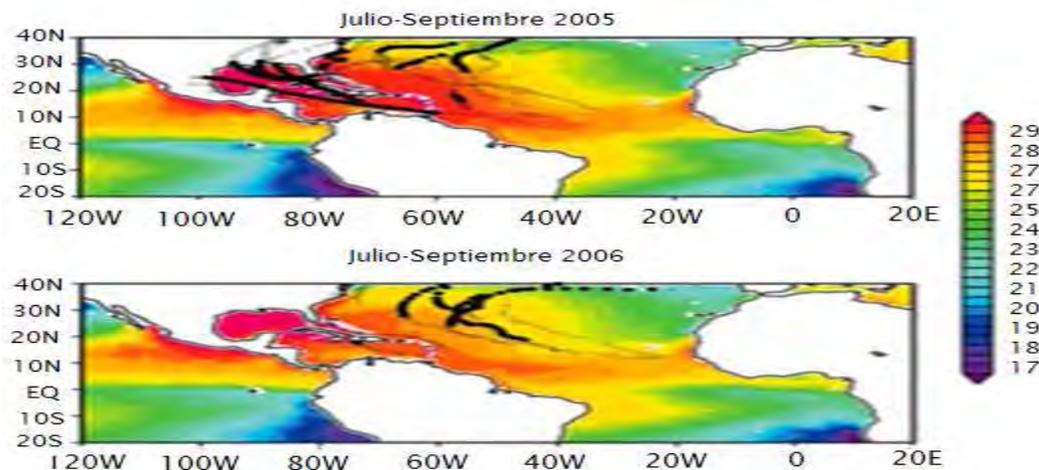


Fig.4.1 Temperaturas en el atlántico. En la parte superior se puede apreciar las mayores temperaturas entre el período Julio-Septiembre 2005, en comparación al mismo período pero en el año 2006.

Los científicos dedican cada vez más atención al impacto medioambiental del polvo, después de haberse constatado que, en algunos años, muchos millones de toneladas de arena se levantan del Desierto de Sahara y cruzan flotando el Océano Atlántico, a veces en tan sólo cinco días.

#### **4.2 Base de Datos**

La base de datos de la producción de huracanes en la historia fue recopilada por la NOAA [National Oceanic And Atmospheric], esta serie de tiempo cuenta con casi 40 años de información de huracanes.

La base de datos de las tormentas de polvo fue recopilada y facilitada por el investigador Joseph M. Prospero, quien es Professor of Marine and Atmospheric Chemistry, Director of Cooperative Institute for Marine and Atmospheric Studies (1990 - presente). La información de las tormentas de polvo fue facilitada por contacto personal del Dr. Víctor Velasco [quien es investigador de la UNAM] con el investigador Prospero.

La serie de tiempo de las temperaturas fue recopilada de la NOAA, y cuenta con información desde el año 1979 hasta el 2004.

#### **4.3 Tormentas de polvo africanas.**

Gracias al desarrollo de la tecnología satelital, que permite observar desde el espacio la formación de las nubes de polvo y su posterior desplazamiento, los científicos abrieron el camino para avanzar en esas investigaciones. Cada año llegan a América y Europa grandes cantidades de partículas de polvo en forma de nubes procedentes del desierto del Sahara, que emergen del Continente Africano y son transportadas en dirección oeste hacia esta región por el flujo de los vientos alisios.

Los satélites son la única herramienta para monitorear desde el espacio los patrones de la transportación de polvo por el atlántico. Recientes estudios basados en el satélite Meteosat/Visible light Spectrometer (VIS) y el Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS). Han demostrado que existe una relación entre las sequías en Sahel, las emisiones de polvo en Sahel y la exportación de polvo en el Atlántico [Moulin y Chiapello, 2004].

Los valores obtenidos de las tormentas de polvo, son proporcionadas por extensas mediciones que se han efectuado en barbados, con mediciones continuas desde agosto del 1965 [Prospero and Lamb, 2003], sumando los largos períodos de operación de los satélites TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) y Meteosat, estos han entregado datos adecuados para investigar la variabilidad del polvo africano, ambos satélites tienen que ser combinados para monitorear las tormentas de polvo [Chiapello y Moulin, 2002; Moulin y Chiapello, 2004]. A estos satélites se les tuvo que desarrollar un algoritmo para que pudiera diferenciar entre tormentas de polvo y nubes en el medio ambiente. El algoritmo ha sido evaluado diariamente para hacer comparaciones con los datos de la Red Robótica de

Aerosoles y haciendo una comparación climatológica con METEOSAT y Total Ozone Mapping Espectrómetro de datos a través de una porción del Atlántico Norte [Evan et al., 2006a, 2006].

El polvo del Sahara se levanta cuando el aire cálido del desierto choca con el aire más fresco de la región de Sahel - justo al sur del Sahara. Mientras que las partículas ascendentes se remolinan, los vientos alisios intensos comienzan a soplar hacia el oeste en el Atlántico Norte.

Las tormentas de polvo en el Sáhara provocan que se eleven a la atmósfera grandes cantidades de polvo y arena que, suspendidos, logran viajar grandes distancias mucho más allá del desierto, logrando alcanzar Europa o América. Por lo general una vez que ocurre una tormenta de polvo (se diferencia de la de arena cuando el tamaño de la partícula es menor de cien micras), este elemento al ser más ligero sube hasta alturas de 5 a 7 kilómetros. Una parte de estas nubes puede avanzar por la zona de las islas Canarias y afectar a España, Portugal y Gran Bretaña, mientras las otras se mueven por el Atlántico y llegan al mar Caribe, aproximadamente a los seis días de registrada la tormenta].

Si bien otros desiertos como el de Gobi, en Asia, tributan también polvo a la atmósfera, el del Sahara es el que tiene mayor incidencia sobre el hemisferio occidental.

Para el análisis de las tormentas de polvo se trabajó con una serie de datos que se inician en el año 1965 hasta el año 2004. En la gráfica de la figura 4.2, se muestran las concentraciones de polvo en el Atlántico.

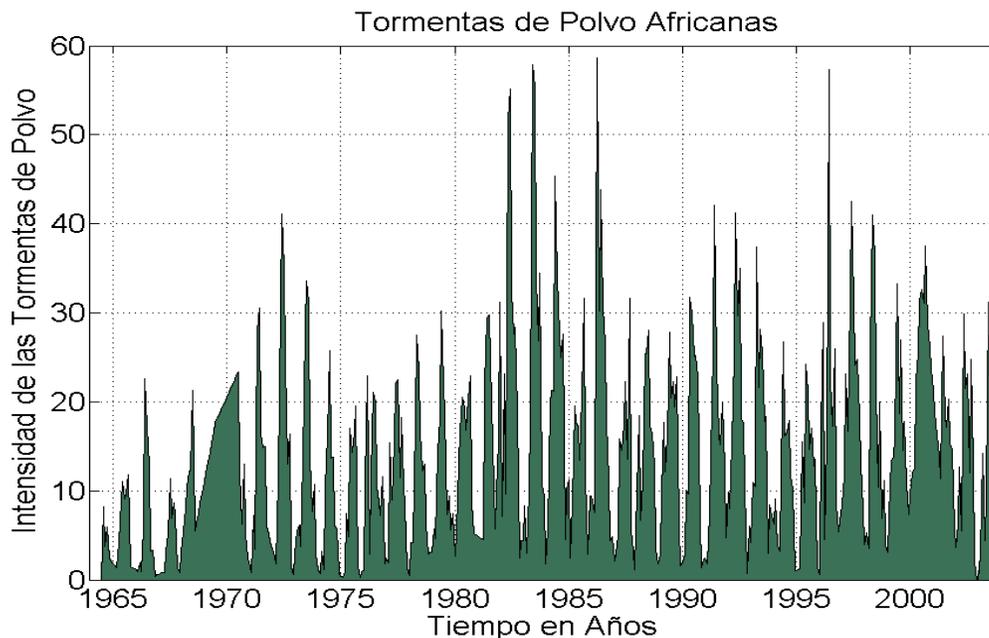


Fig.4.2 Tormenta de polvo

#### 4.4 Temperatura superficial del Océano Atlántico.

Un parámetro interesante para medir la influencia de las tormentas de polvo en los huracanes del Atlántico, es sin duda la temperatura de la superficie del Océano Atlántico, ya que este factor es muy importante en la generación de huracanes.

A continuación se muestra la gráfica 4.3 de las temperaturas del Océano Atlántico, la serie de datos se inicia en el año 1979. Los datos fueron adquiridos de la NOAA

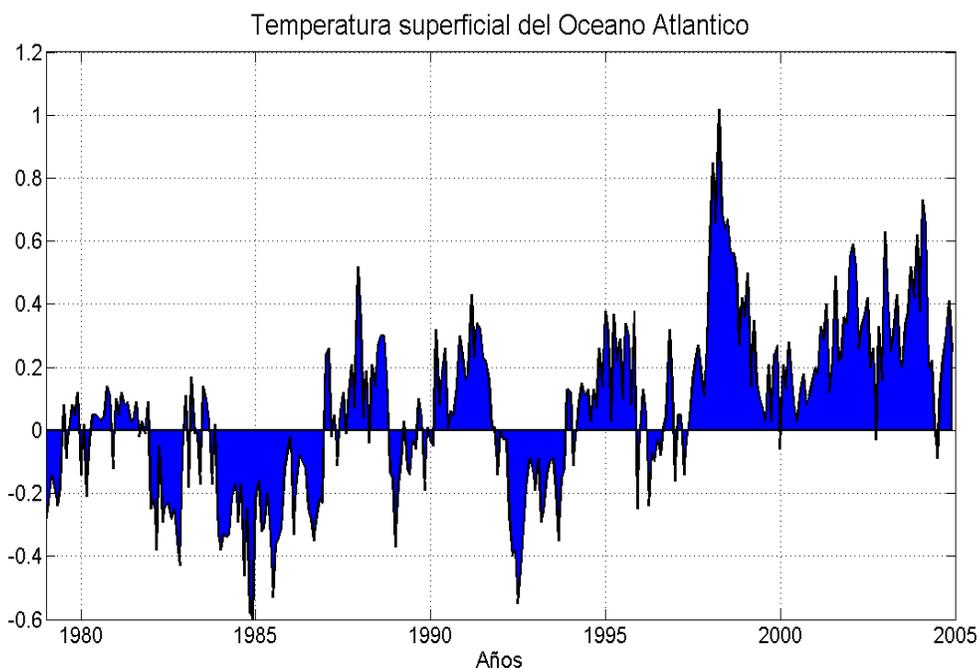


Fig.4.3 Temperatura superficial del Océano Atlántico

#### 4.5 Gráfica de las Tormentas de polvo y las Temperaturas Superficiales

En la gráfica 4.4, se presentan las señal de la temperatura superficial del océano y la señal de las tormentas de arena, en este caso el análisis comparativo se inicia desde al año 1979 hasta el 2004, se puede observar que el polvo es un factor en el enfriamiento de las aguas superficiales del océano atlántico, excepto en el período de 1998-2004, que ambas señales aumentaron la intensidad de las tormentas de polvo y las temperaturas superficiales del Océano Atlántico.

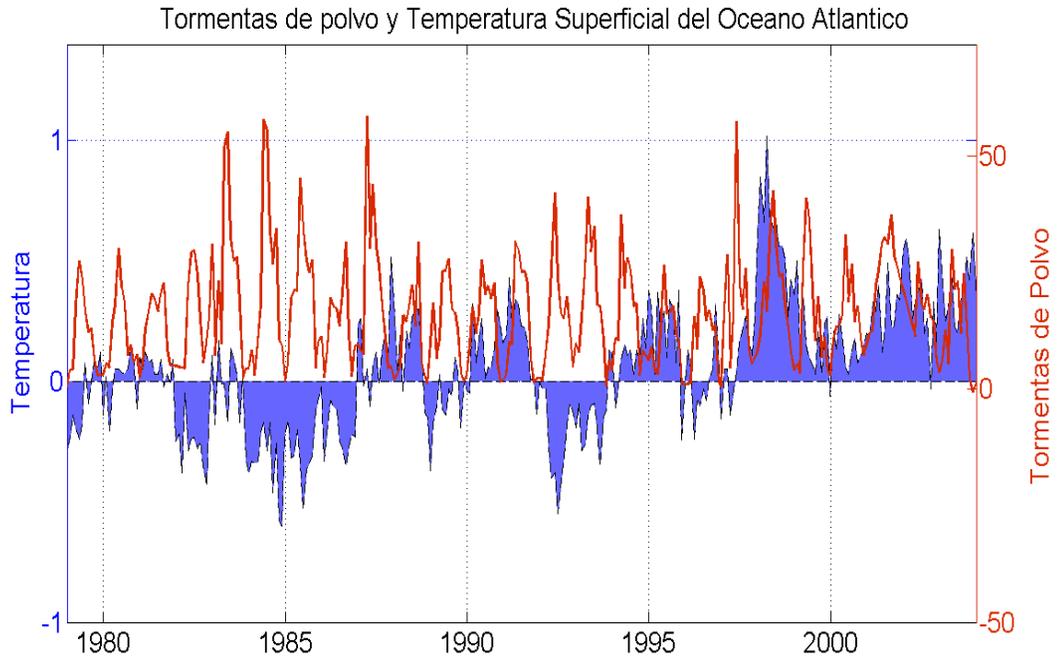


Fig.4.4 Temperatura y Tormenta de Polvo

#### 4.6 Ondeleta entre la temperatura y las tormentas de polvo

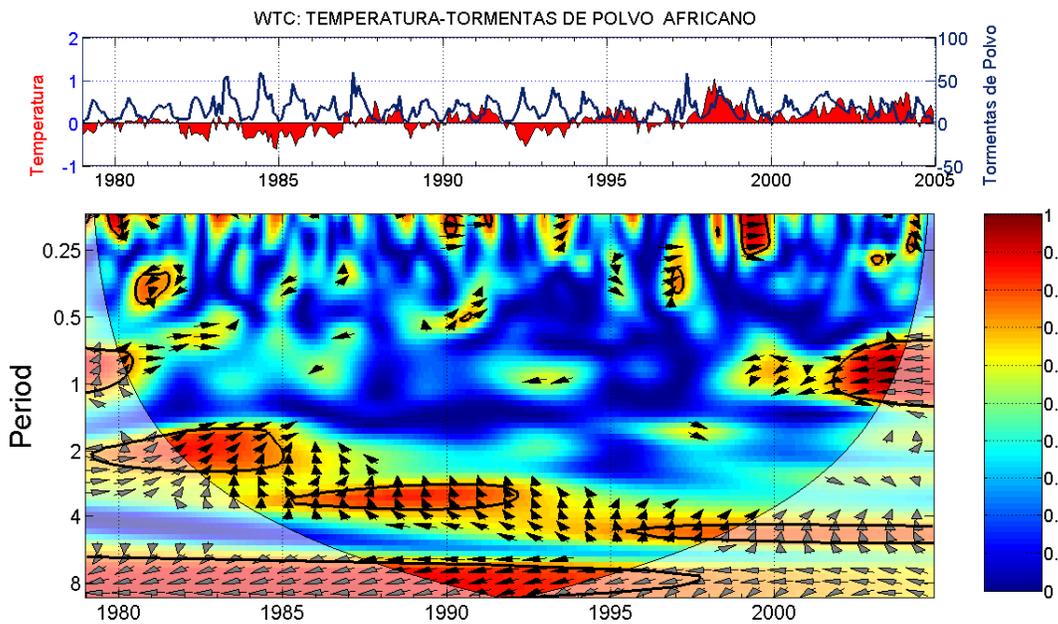


Fig.4.5 Ondeleta de las temperaturas y tormentas de polvo

En la gráfica que se presenta en la figura 4.5, se presenta el espectro Ondeleta, en la parte superior se pueden observar ambas señales juntas, la temperatura y las tormentas de polvo, ambas señales son analizadas en el período de tiempo entre los años 1979 y 2004. En el espectro Ondeleta se aprecia que antes del período de 0.8 años, la coherencia entre la temperatura y las tormentas de polvo, es intermitente y la fase es variable, estando en algunos puntos en fase y en otros en antifase. En el período de 0.8 años se aprecia una coherencia alta que esta sobre el nivel de confianza del 95%, esta se ubica entre los años 1979-1981, la relación de fase es no lineal, las flechas están en dirección de 90°, en el mismo período se ubica una segunda zona importante de coherencia que se ubica entre los años 2002-2005, la zona que se encuentra encerrada por la circunferencia de color negra, indica que existe una buena coherencia, y en esta zona ambas señales están en antifase. En el período de 2 años, tenemos otra zona que esta sobre los niveles de confianza, que está entre los años 1979-1985, en esta zona la relación de fase es no lineal, la zona que se encuentra en el período de 3.5 años, se ubica entre los años 1985-1992, con una relación de fase no lineal. La zona que aparece entre los años 1986-2005, se ubica en el período de 4.1 años, y la relación de fase es no lineal. La zona que aparece cerca del período de 11 años aproximadamente, se encuentra casi en toda la zona temporal de análisis, está entre los años 1979-1998, esta se encuentra encerrada por la circunferencia negra que indica que esta sobre el nivel de confianza del 95 %, con un valor de coherencia de valor 1, la zona que está entre los años 1998-2005, que no se encuentra sobre el nivel de confianza, tiene un valor de coherencia de 0.6 aproximadamente. La relación de fase entre ambas señales es en anti fase, en casi todo el tiempo de análisis. Por medio del análisis Ondeleta es que podemos ver en la grafica de las tormentas de polvo con las temperaturas superficiales del mar que existe un periodo de 11 años que nos muestra que existe una coherencia alta entre ambas señales y que se encuentran en antifase, esto nos puede estar diciendo que las tormentas de polvo o las temperaturas superficiales están siendo moduladas por otro fenómeno que tiene un periodo de 11 años.

#### **4.7 Huracanes.**

Los huracanes nacen en las aguas del Atlántico, en las cercanías de la Costa Oeste de África. Allí se agrupan las tormentas eléctricas y, en determinadas oportunidades, por razones que aún nadie ha podido entender por completo, se unen hasta formar tormentas

El lugar de nacimiento de los huracanes se encuentra muy cerca del desierto del Sahara, cuyas tormentas de polvo soplan su contenido sobre la región donde se originan los huracanes.

En el presente trabajo se recopilaron los datos de los huracanes que se han formado en el océano atlántico desde el año 1965 hasta el año 2004, la clasificación se realizó mensualmente y por categoría de huracanes, tormentas tropicales y sub tormentas.

#### 4.8 Base de Datos de los Huracanes.

En la siguiente tabla se presenta la cantidad de huracanes que se han formado en el atlántico desde el año 1965 hasta el 2004, la tabla muestra la cantidad de huracanes de las distintas categorías de huracanes que se han formado en cada año que se presenta, al final muestra el total de cada categoría y la clasificación es la siguiente: [Obtenida de la NOAA]

Categoría 5 = 5, Categoría 4= 4, Categoría 3 = 3, Categoría 2 = 2, Categoría 1 = 1

Tormentas Tropicales = TT, Sub Tormentas = ST

Año	5	4	3	2	1	TT	ST	Total
1965	0	1	0	1	2	2	0	6
1966	0	1	2	0	4	4	0	11
1967	1	0	0	1	4	2	0	8
1968	0	0	0	0	4	3	0	7
1969	1	0	5	2	4	6	0	18
1970	0	0	2	1	2	5	0	10
1971	1	0	0	1	4	7	0	13
1972	0	0	0	1	2	1	3	7
1973	0	0	1	0	3	3	1	8
1974	0	1	1	1	1	3	4	11
1975	0	1	2	2	1	2	1	9
1976	0	0	2	2	2	2	2	10
1977	1	0	0	0	4	1	0	6
1978	0	2	0	1	2	6	0	11
1979	1	1	0	1	2	3	1	9
1980	1	0	1	3	4	2	0	11
1981	0	1	2	1	3	4	1	12
1982	0	1	0	0	1	3	1	6
1983	0	0	1	0	2	1	0	4
1984	0	1	0	1	3	7	1	13
1985	0	1	2	0	4	4	0	11
1986	0	0	0	1	3	2	0	6
1987	0	0	1	0	2	4	0	7
1988	1	2	0	0	2	7	0	12
1989	2	0	0	2	3	4	0	11
1990	0	0	1	2	5	6	0	14
1991	0	1	1	1	1	4	0	8
1992	1	0	0	2	1	2	1	7
1993	0	0	1	1	2	4	0	8
1994	0	0	0	1	2	4	0	7
1995	0	3	2	2	4	8	0	19
1996	0	2	4	0	3	4	0	13
1997	0	0	1	0	2	4	1	8
1998	1	1	1	4	3	4	0	14
1999	0	5	0	3	0	4	0	12
2000	0	2	1	1	4	6	1	15

2001	0	2	2	1	4	6	0	15
2002	0	1	1	1	1	8	0	12
2003	1	1	1	1	3	9	0	16
2004	1	3	2	1	2	5	1	15
Total	13	34	40	43	105	166	19	

Tabla 4.1 Base de datos de los huracanes en cantidades anuales y por categorías

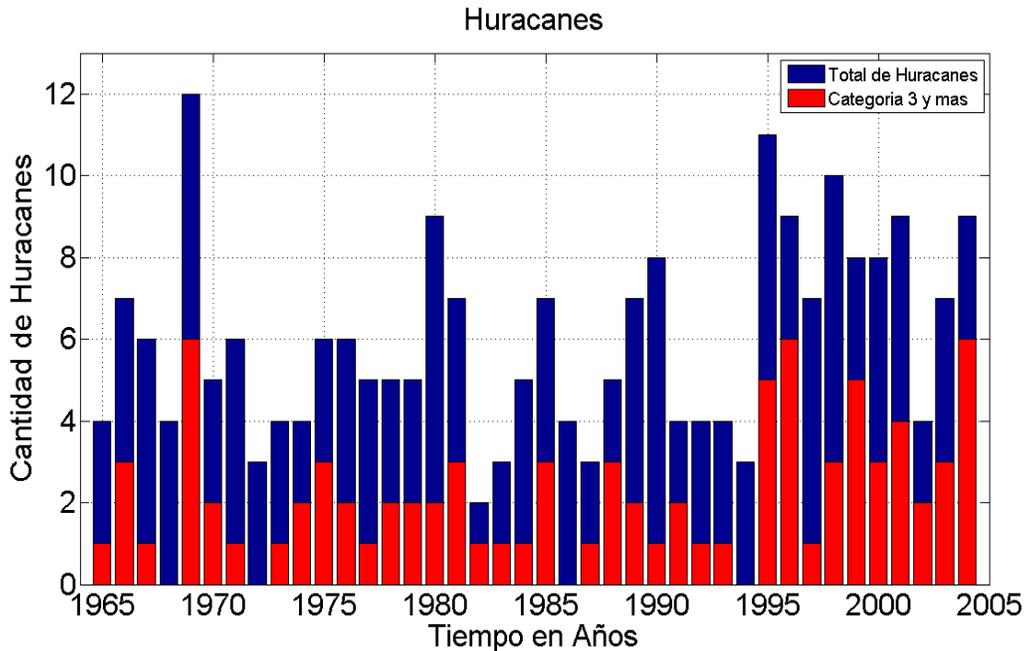


Fig.4.6 Cantidad de Huracanes categoría 3 y mayores en rojo, total de huracanes en el atlántico en azul

La gráfica de la figura 4.6, nos muestra la cantidad de huracanes que se han formado en el Atlántico desde el año 1965 hasta el año 2004. Las barras de color rojo nos muestran la cantidad de huracanes de categoría 3 o más, las barras de color azul nos muestran las cantidades de huracanes de categorías 1 y 2 que se han formado en el Atlántico, ambas sumadas nos da el total de huracanes que se han formado en el Océano Atlántico Caribeño de cada año. Como se puede apreciar en la gráfica la cantidad de huracanes de mayor categoría ha ido en aumento, siendo los últimos años desde 1995 los períodos con mayor cantidad de huracanes en todas sus categorías y en las categorías mayores. En los años 1969, 1995 y 2004, se han registrado la mayor cantidad de huracanes de mayor categoría, en los años 1969 y 1995, se han registrado la mayor cantidad de huracanes en total. (12 y 11, respectivamente).

## 4.9 Análisis Ondeleta.

En las figuras 4.7 - 4.13 se puede ver el espectro Ondeleta con las distintas categorías de huracanes, tormentas tropicales y sub tormentas.

En la parte superior de todas las gráficas se puede observar el espectro Ondeleta de las tormentas de polvo y en la parte inferior el espectro Ondeleta los huracanes, tormentas tropicales y subtormentas.

En el espectro Ondeleta se pueden observar zonas que se encuentran encerradas por un perímetro negro, esto significa que tienen una alta concentración de energía, sobre el 95 % de nivel de confianza. Esta sobre el nivel de ruido rojo, las zonas que se encuentran en color azul, significa ausencia de energía, como lo indica el código de color que se ubica a un lado derecho del espectro Ondeleta.

Para realizar la transformada Ondeleta se utilizó la Ondeleta madre Daubechies, por entregarnos mayor detalles en periodicidades.

La figura 4.7, muestra el espectro Ondeleta del polvo Africano con los huracanes de categoría 1, se observa un período en el año 1, este período tiene una pequeña zona de inicio y se ubica entre los años 1972-1976, la segunda gran zona se ubica entre los años 1979-2001. Se observa que este período se encuentra sobre el nivel de ruido rojo y se ubica sobre el nivel de confianza al estar encerrado por una circunferencia de color negro.

El espectro Ondeleta de los huracanes categoría 1, nos muestra un fuerte período en 1 año, con una energía que está por el nivel de confianza, estas zonas en el período de 1 año, se encuentran entre los años 1967-1974, 1976-1982, 1984-1991, 1994-1998 y la última zona que está entre los años 2000-2003. Existen zonas antes del período de 1 año, pero son intermitentes.

En la figura 4.8, en la parte inferior se muestran a los huracanes de categoría 2, y el espectro Ondeleta nos muestra que existe una concentración de energía antes del período de 1 año, pero son intermitentes excepto en el período aproximadamente de 0.5 años, y se ubican entre los años 1975-1977, 1991-1992 y 1999-2000. La mayor concentración de energía y que está sobre el nivel de confianza se ubica en el período de 1 año, y estas zonas se encuentran entre los años 1975-1977, 1979-1982, 1990-1994 y 1998-2003. Existe un período en la señal de los huracanes de categoría 2, que se ubica en el período de año 5, y la zona donde se concentra la energía está ubicada entre los años 1976-1982, se puede observar que esta zona tiene menor energía, como lo indica el código de color que se ubica a un lado derecho del espectro Ondeleta, pero la zona mencionada está en los niveles de confianza.

#### 4.10 Figuras Ondeleta

##### Ondeleta Tormenta de polvo y Huracanes Categoría 1

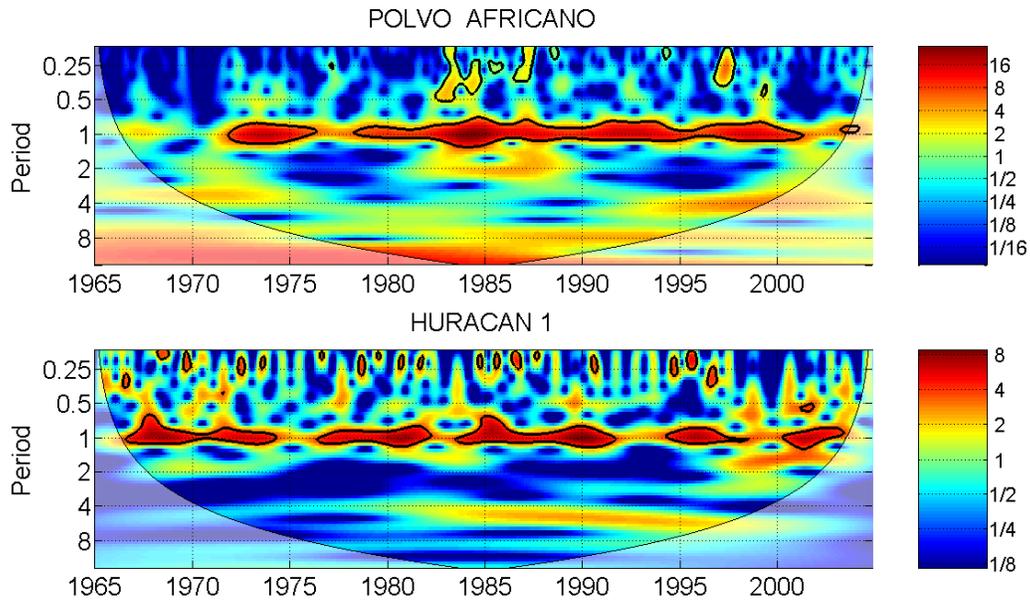


Fig.4.7 Ondeleta Tormenta de polvo y Huracanes Categoría 1

##### Ondeleta Tormenta de polvo y Huracanes Categoría 2

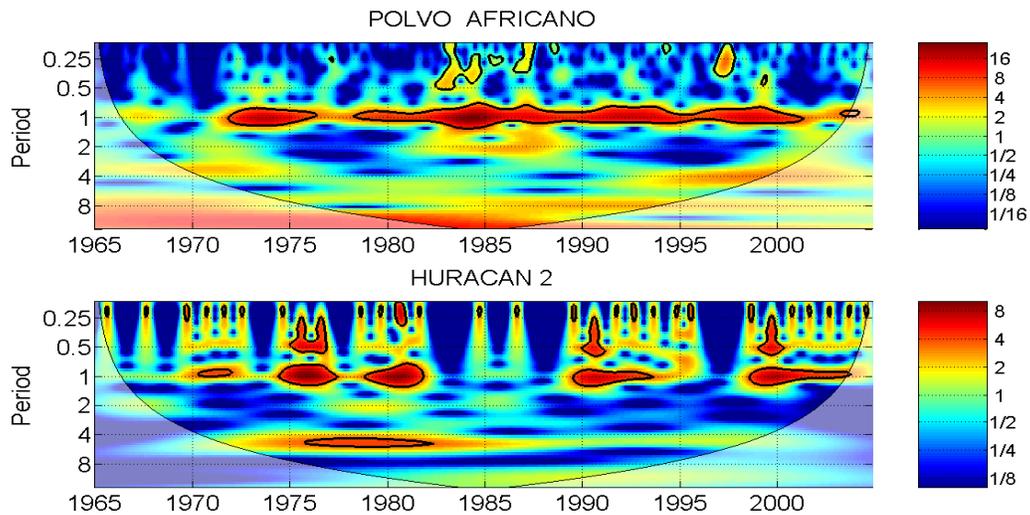


Fig.4.8 Ondeletas Tormentas de Polvo y Huracán Categoría 2

En la parte baja de la figura 4.9, se observa el espectro Ondeleta de los huracanes de categoría 3, en esta gráfica la concentración de energía se ubica en el período 0.5 y 1 año, en el período de 0.5 años se ubica una zona entre los año 1969-1971, esta zona se encuentra

en posición vertical, ya que se puede ver que ocupa zonas del período de 1 año. Otra zona es la que se encuentra en los años 1975-1977 y una pequeña zona ubicada entre los años 1995-1996. El período de 1 año nos muestra las zonas que están entre los años, 1974-1977 y 1995-1998.

En la figura 4.10, se observa en la parte inferior los huracanes de categoría 4. Podemos observar que no existen muchas zonas con concentración de energía hasta el año 1995. Existen dos períodos con mayor concentración de energía en los 0.5 y 1 año. El período de 0.5 años ubica sus zonas con mayor energía entre los años 1995-1997 y 1999-2003. El período de 1 año ubica cercanamente su concentración de energía entre los años 1995-1998 y seguidamente entre los años 1998-2004. Y son las zonas donde se concentra la mayor cantidad de energía. Antes de esos años encontramos concentraciones de energía de manera intermitente.

### Ondeleta Tormenta de polvo y Huracanes Categoría 3

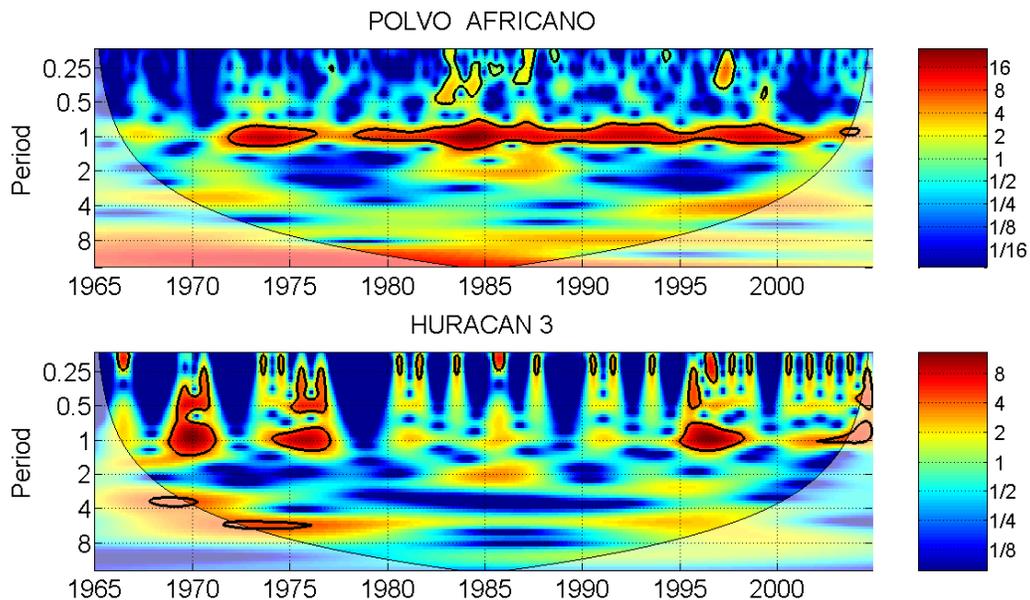


Fig.4.9 Ondeletas Tormentas de Polvo y Huracán Categoría 3

## Ondeletas Tormenta de polvo y Huracanes Categoría 4

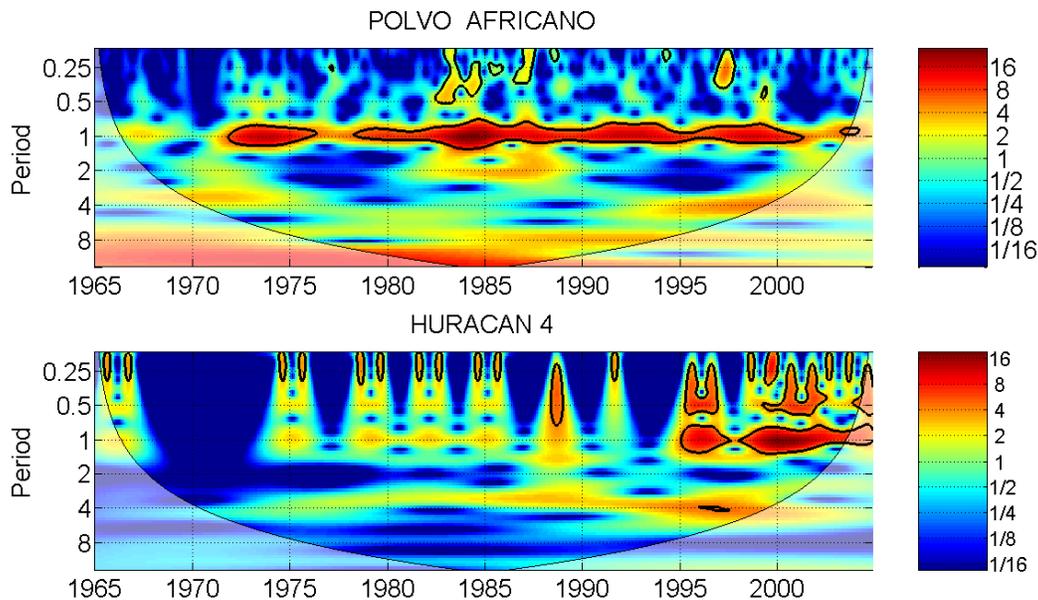


Fig.4.10 Ondeletas Tormentas de Polvo y Huracán Categoría 4

La figura 4.11, nos muestra a los huracanes de categoría 5 y se observa una menor cantidad de energía en toda la zona temporal de análisis, se debe tomar en cuenta, la cantidad de huracanes de esta categoría, en la tabla 4.1, se muestran las cantidades de huracanes de cada uno de ellos y se puede observar que la cantidad de estos huracanes de categoría 5 es la menor y por lo tanto la cantidad de zonas con concentración de energía deben ser menores, y es como se observa en el espectro Ondeleta .

Este espectro muestra períodos que se ubican aproximadamente en los 0.5 años y estas zonas se ubican entre los años 1967-1972, 1977-1981, 1989-1993, 1997-1998 y una última zona que esta ente los años 2003-2004. En esta gráfica es difícil encontrar zonas predominante en la concentración de energía, ya que son los huracanes que se han formando en menor cantidad. Al final se ve un período más claro que se está en el año 11 aproximadamente, ubicada entre los años 1975-1985, y tiene menor energía que las otras zonas, como lo muestra la el código de color.

En la figura 4.12, se muestra el espectro de las tormentas tropicales, en esta gráfica se observa un fuerte período que predomina la concentración de energía, este período es de 1 año y las zonas con mayor concentración de energía se encuentran entre los años 1968-1975, 1978-1980, 1985-2004.

## Ondeleta Tormenta de polvo y Huracanes Categoría 5

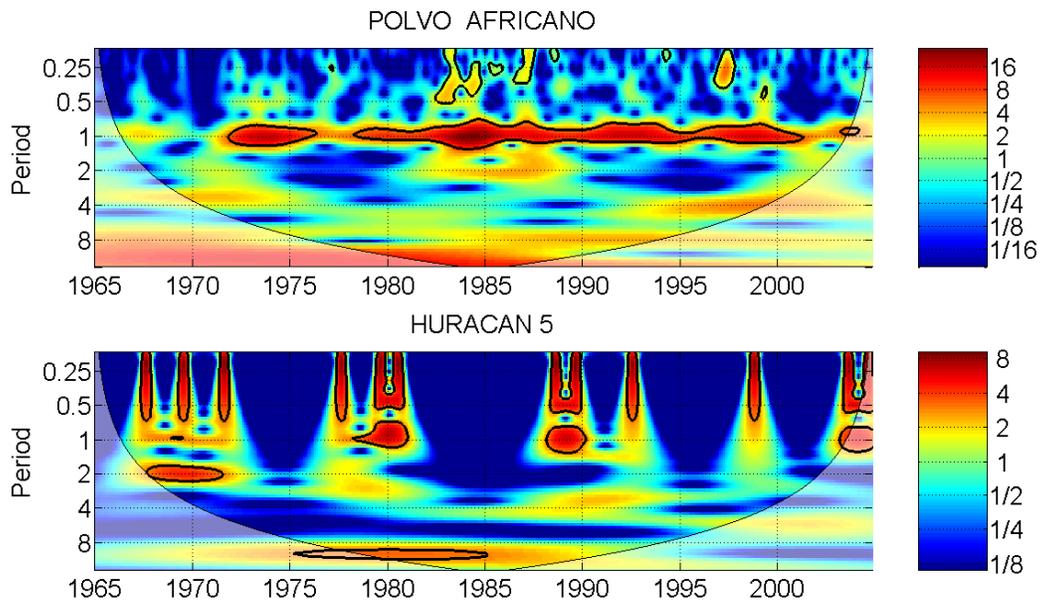


Fig.4.11 Ondeleta Tormentas de Polvo y Huracán Categoría 5

## Ondeleta Tormenta de polvo y Tormentas Tropicales

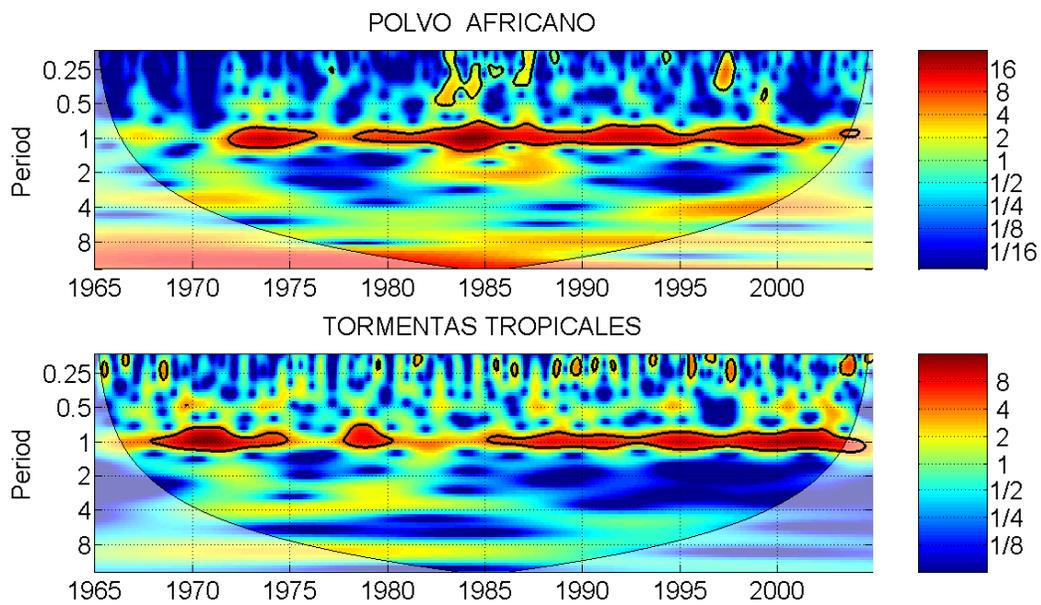


Fig.4.12 Ondeleta Tormentas de Polvo y Tormentas Tropicales

En la gráfica 4.13, se muestra el espectro de las subtormentas que se formaron en el Atlántico, en la gráfica se muestra la poca concentración de energía en toda la zona temporal de análisis, se observa una zona que cubre los períodos desde 0.25 hasta los 2 años, esta zona se ubica entre los años 1972-1977. La zona que se observa con mayor concentración de energía es la que se ubica en el período de 11 años aproximadamente y se ubica entre los años 1965-1984. Parte de esta zona se encuentra fuera del cono de influencia, pero existe una zona que se encuentra dentro la zona del cono de influencia.

#### Ondeleta Tormenta de polvo y SubTormenta

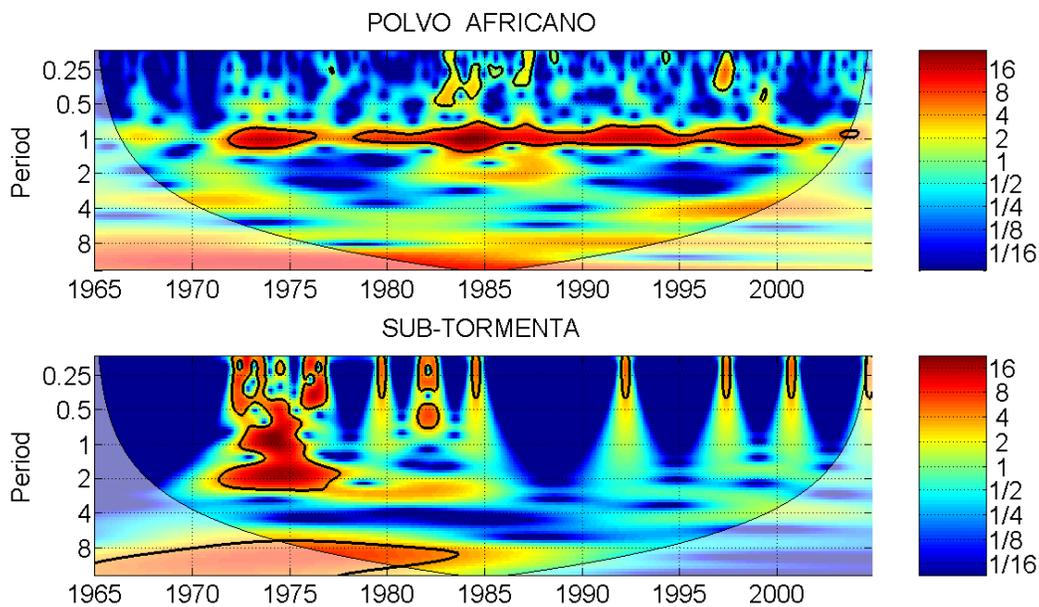


Fig.4.13 Ondeleta Tormentas de Polvo y Sub Tormentas

#### 4.11 Transformada Ondeleta

En las gráficas siguientes se presentaran una serie de relaciones entre las tormentas de polvo con todas las categorías de huracanes, tormentas tropicales y sub tormentas.

En las gráfica s que se presentaran ahora se verá cual es la relación de energía de ambas señales con la Ondeleta de coherencia, además se conocerá su relación de fase entre el las tormentas de polvo, las distintas categorías de huracanes, tormentas tropicales y sub tormentas.

a-) Ondeleta entre Las Tormentas de Polvo y Huracanes categoría 1

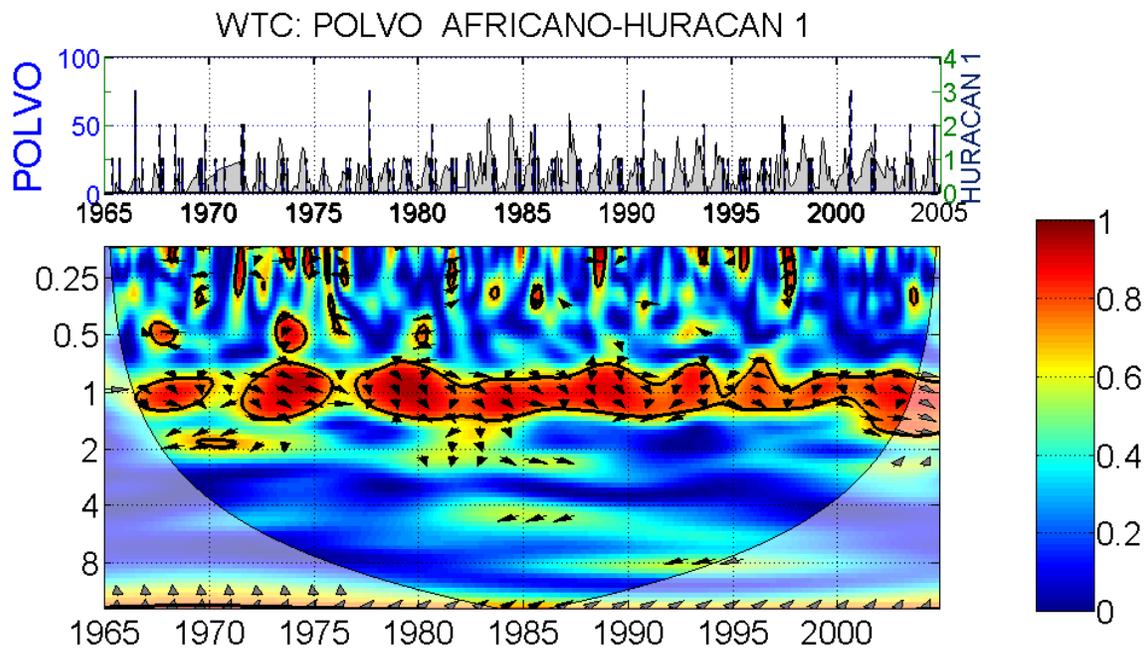


Fig. 4.14 Ondeletaentre Las Tormentas de Polvo y Huracanes categoría 1

En la figura 4.14, se presenta el espectro Ondeleta de las dos series de tiempo, las tormentas de polvo y los huracanes de categoría 1. En la parte superior de la gráfica se pueden observar ambas series de tiempo juntas. La gráfica de área gris, es la serie de tiempo de las tormentas de polvo que se inician desde el año 1965 hasta el 2004, la segunda en forma de pulsos, que acusan presencia, son las cantidades de huracanes categoría 1 que se formaron desde el año 1965 hasta el 2004.

En el espectro Ondeleta se pueden observar zonas que se encuentran encerradas por un perímetro negro, esto significa que tienen una alta relación de energía, 95 % de nivel de confianza. Las zonas que se encuentran en color azul, significa que no existe relación entre ambas señales y que el valor de coherencia esta cerca del valor cero o es cero, el valor de la coherencia se puede observar en el código de color a un lado derecho del espectro Ondeleta.

Las zonas que se encuentran encerradas por un perímetro de color negro, son los períodos de tiempo en el cual el nivel de confianza está sobre el 95 % de la relación de ambas señales. Las zonas que están sobre el nivel de confianza, contienen flechas que indican la relación de fase de ambas señales. Cuando la flecha esta en sentido horizontal derecha, indica que ambas señales están en fase, cuando está en sentido horizontal izquierda,

significa que se encuentran en anti fase, esto indica que tienen una relación lineal. Cuando las flechas están en dirección de  $90^\circ$  o  $270^\circ$  (dirección abajo y hacia arriba), significa que ambas señales tienen una relación no lineal.

En el espectro Ondeleta de la figura 4.14 se aprecia un fuerte período de 1 año, que se inicia por el año 1967 en el cual el nivel de confianza está sobre el 95 %, luego por el año 1970 la relación cae bajo el 95% del nivel de confianza y es por eso que también deja de estar encerrado por la circunferencia de color negro. En 1977, aparece un largo período que está en el nivel de confianza y el valor de la coherencia está aproximadamente o tiene valor 1. En el período de 1 año se observa una primera zona que está entre los años 1967 y 1970 y su relación de fase es no lineal. En la segunda zona la relación está en fase y se ubica entre los años 1972 y 1976, y la relación entre ambas señales se aproxima bastante a una relación de fase, si se observa la gráfica de arriba de la figura 4.14, se observa que ambas señales están en fase, La última gran zona que se ubica entre los años 1977-2004, nos muestra una gran zona que se encuentra sobre el 95% de confiabilidad y su relación de fase es no lineal, antes del período de 1 año se encuentran zonas que están sobre el 95% del nivel de confianza pero son intermitentes, la fase es variable.

Las manchas azules que se ven en la gráfica y como lo indica el código de color que se ubica a un lado derecho del espectro Ondeleta, prácticamente no existe relación de coherencia de ambas señales y su valor es cero prácticamente.

#### b-) Ondeleta entre Las Tormentas de Polvo y Huracanes categoría 2

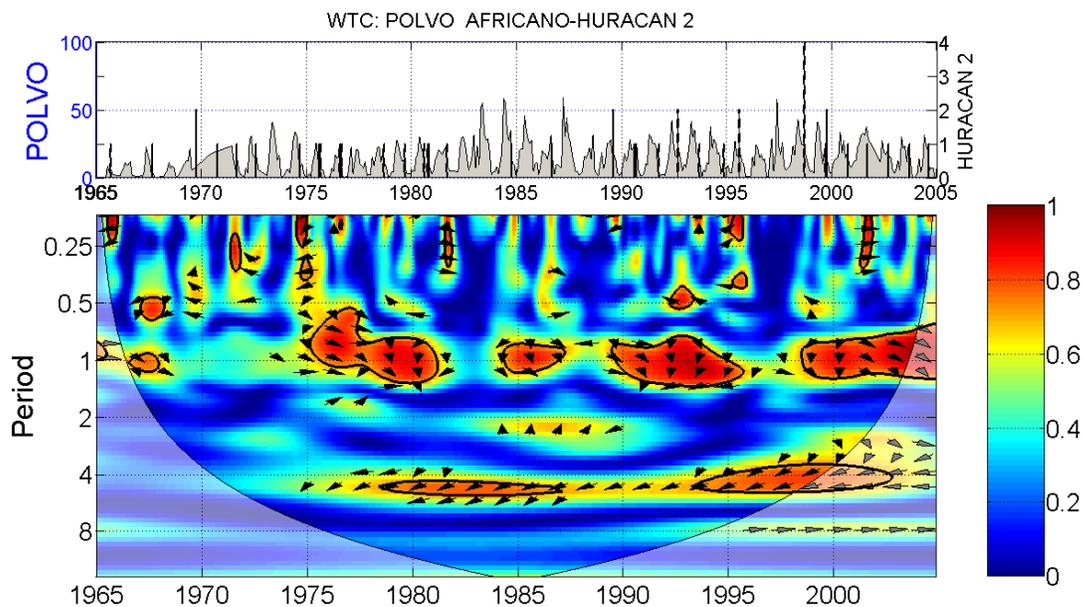


Fig. 4.15. Ondeleta entre Las Tormentas de Polvo y Huracanes categoría 2

El espectro Ondeleta de las tormentas de polvo con los huracanes de categoría 2 se muestra en la figura 4.15, al igual que la anterior en la parte superior de la gráfica se presentan ambas señales juntas. El espectro Ondeleta que se muestra en la parte inferior de la gráfica se puede observar un período en 1 año, las zonas que tienen un nivel de confianza sobre el 95% están entre los períodos 1975-1981, 1984-1987, 1990-1996 y 1998-2004. En estas zonas la relación de fase es no lineal ya que las flechas no están en sentido horizontal (izquierda o derecha). Es posible observar también un período en el año 5, en este período las zonas nacen entre los años 1979-1987 y 1994-2003, la relación de fase parece alcanzar la relación de antifase, pero no alcanza a estar en esta relación completamente, por lo que se presume, una relación no lineal. En el período de 5 años encontramos una zona que no se encuentra encerrada por el perímetro negro, y es porque no alcanza a estar por encima del nivel de confianza, y se ubica entre los años 1987-1994, en esta zona la coherencia tiene un valor de 0.6 aproximadamente. Las zonas que se encuentran sobre el nivel de confianza tienen un valor de coherencia de valor 1. Antes del período de un año podemos encontrar zonas que están encerradas por el perímetro negro pero son intermitentes y la fase es variable.

c-) Ondeleta entre Las Tormentas de Polvo y Huracanes categoría 3

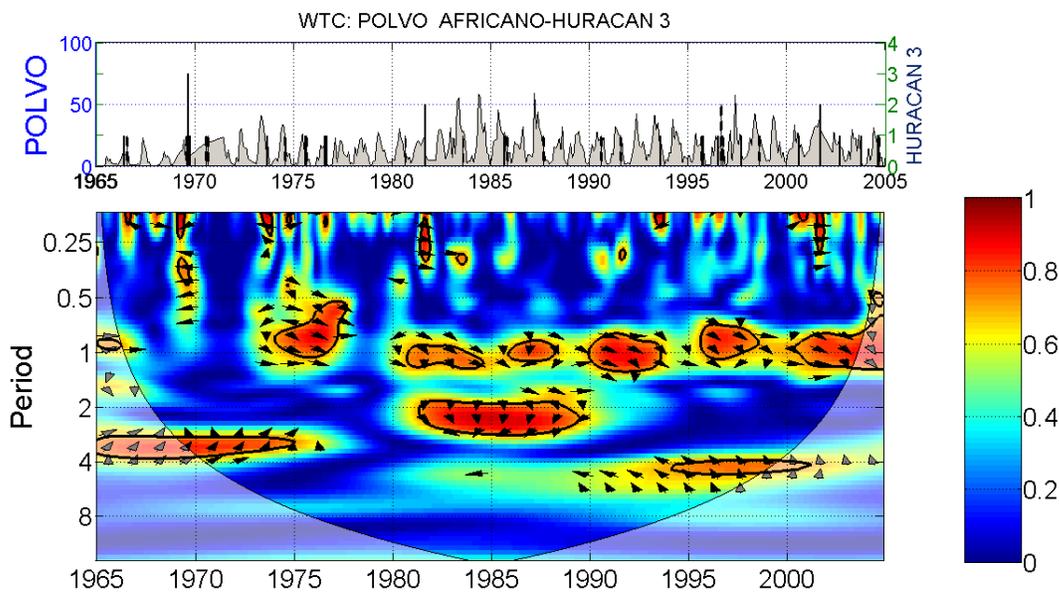


Fig. 4.16. Ondeleta entre Las Tormentas de Polvo y Huracanes categoría 3

En la gráfica de la figura 4.16, se presenta el espectro Ondeleta entre las tormentas de polvo y los huracanes de categoría 3, en el espectro Ondeleta, se observa un período que está entre el medio año y 1 año, esta zona se ubica entre los años 1974-1977, tienen una

relación de fase no lineal. En el período de 1 año tenemos otras zonas importantes que están entre los años 1981-1984, 1986-1988, 1990-1994, 1996-1998 y 2000-2005, en estas zonas la relación de fase es confusa, es una relación no lineal. En el período de 2 años podemos encontrar otra zona que esta sobre el nivel de confianza y que se encuentra entre los años 1982-1989, la relación es no lineal ya que se observa que las flechas de relación de fase están en dirección de  $270^\circ$ , cerca del período de 4 años encontramos otra zona importante que se ubica entre los años 1965-1975 y la relación de fase es no lineal, en el período de 4 años aproximadamente encontramos una relación de ambas señales que está entre los años 1994-2001 y su relación de fase es no lineal. Cerca de la zona antes mencionada se ubica una coherencia que esta fuera del nivel de confianza y aparece de color amarillo y su valor de coherencia se ubica aproximadamente por el valor 0.6. Las zonas que se encuentran encerradas por un perímetro negro son la zonas en la cual la coherencia es alta y o tiene el valor máximo, según la gráfica de valores de coherencia que muestra el código de color a un lado derecho del espectro Ondeleta.

d-) Ondeleta entre Las Tormentas de Polvo y Huracanes categoría 4

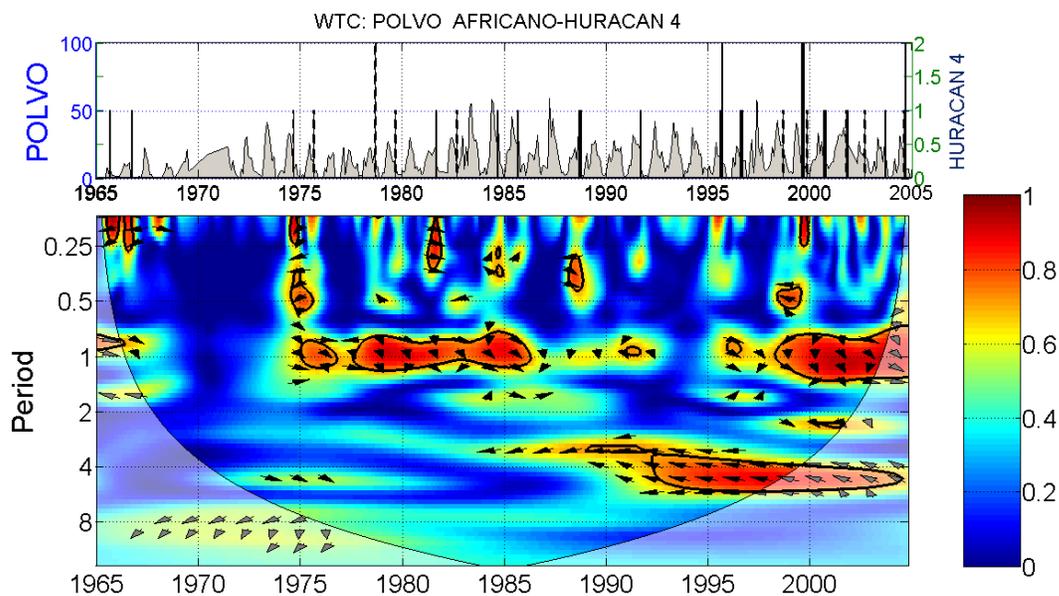


Fig.4.17 Ondeleta entre Las Tormentas de Polvo y Huracanes categoría 4

En la gráfica de la figura 4.17, se observa el Espectro Ondeleta de las tormentas de polvo con los huracanes de categoría 4, en la parte superior de la figura 4.17, se observan ambas señales juntas, y se puede ver claramente que entre los años 1967-1975, no existe relación entre ambas señales ya que en ese período de tiempo no se registraron huracanes de categoría 4, y es por ese motivo que en el espectro Ondeleta se ve una zona entre los mismos años de color azul que nos indica valor de coherencia cero.

Antes del período de 1 año en el espectro Ondeleta se observan algunas zonas que se encuentran sobre el nivel de confianza, pero son intermitentes y su relación de fase es variable ya que la zona que se encuentra entre los períodos de 0.25 y 0.5 años, y cerca del año 1982, muestra una relación de fase y la que se encuentra en el período de 0.5 años, en el año 1999, muestra una relación de anti fase.

En el período de 1 año se observa una zona que está en los niveles de confianza, y se ubica entre los años 1975-1977, 1978-1986 y 1998-2004. Tienen un valor de coherencia alto, de valor 1, pero su relación de fase es no lineal. En el período de 4.5 años se observa una gran zona que se ubica entre los años 1985-2004, pero la zona que se encuentra entre los años 1985-1992, no está sobre el nivel de confianza, la zona que se encuentra sobre el nivel de confianza se ubica posterior a esta zona, y se ubica entre los años 1992-2004, en el mismo período y se encuentran en anti fase ya que las flechas están apuntando en sentido horizontal izquierdo. Su valor de coherencia es de valor 1.

e-) Ondeleta entre Las Tormentas de Polvo y Huracanes categoría 5

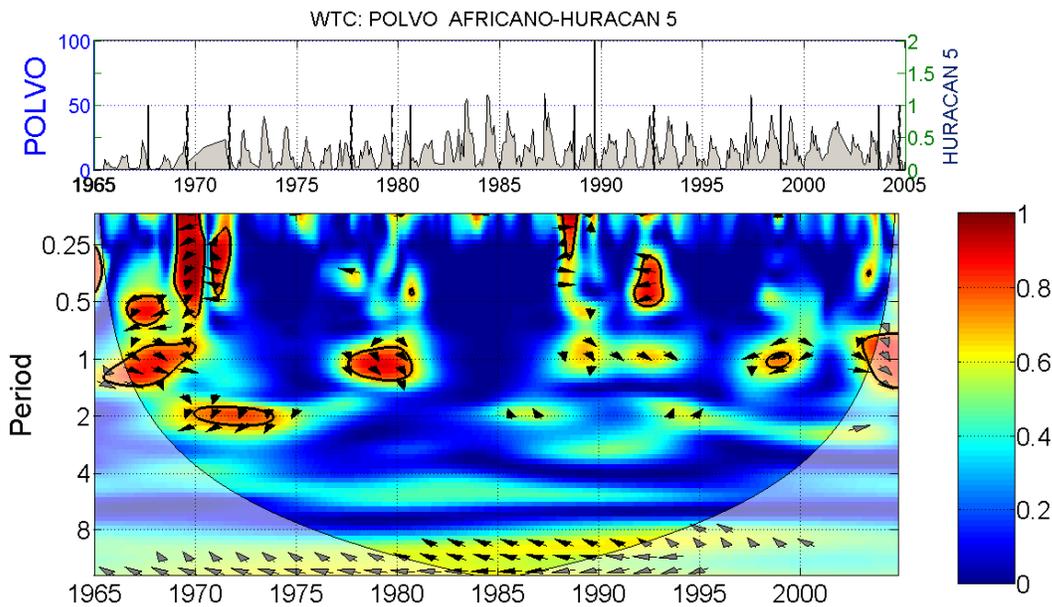


Fig.4.18 Ondeleta entre Las Tormentas de Polvo y Huracanes categoría 5

En la figura 4.18, se presenta la el espectro Ondeleta de las tormentas de polvo con los huracanes de categoría 5. En la tabla 4.1, se presentan las cantidades de huracanes de categoría 5 que se han generado en el océano atlántico y son los que menor cantidad tienen en la historia, y es por este motivo, por el cual aparecen más zonas azules en el espectro Ondeleta, esto nos indica que no existe coherencia entre ambas señales. En la gráfica superior de la figura 4.18, se aprecian ambas señales juntas. Los pulsos acusan presencia de

huracanes de categoría 5, la amplitud nos dice la cantidad de huracanes que se formaron y se observa una menor cantidad de huracanes en comparación a las demás categorías. Por tal motivo se observan más zonas de color azul que en los casos anteriores

Existe una zona de coherencia que se encuentra sobre el nivel de confianza que se ubica en los períodos de 0.25 y 0.5 años y se ubica entre los años 1969-1971. En esta zona la relación de fase es no lineal, otra zona que se ubica en el período de 0.5 años, ubicada entre los años 1967-1969, y su relación de fase es no lineal. Existe una zona entre los períodos de año 0.25 y 0.5 años, ubicada entre los años 1991-1993 que se encuentra sobre los niveles de confianza y presenta relación de fase lineal en anti fase, en el período de 1 año encontramos zonas ubicadas entre los años 1965-1970, 1977-1981, 1997-1999, estas están sobre el nivel de confianza y su relación de fase es no lineal, en este mismo período encontramos una zona entre los años 1989-1994, pero esta no se encuentra sobre los niveles de confianza, su valor de coherencia esta por el valor 0.6 y su relación de fase es no lineal.

En el período de 11 años aproximadamente encontramos una zona que se extiende desde los años 1965-2000, y no se encuentra sobre los niveles de confianza, con valor de coherencia de 0.6 aproximadamente y su relación de fase es lineal en anti fase. Una parte de ella se encuentra dentro del cono de influencia y está entre los años 1980-1990.

f-) Ondeleta entre Las Tormentas de Polvo y las Tormentas Tropicales

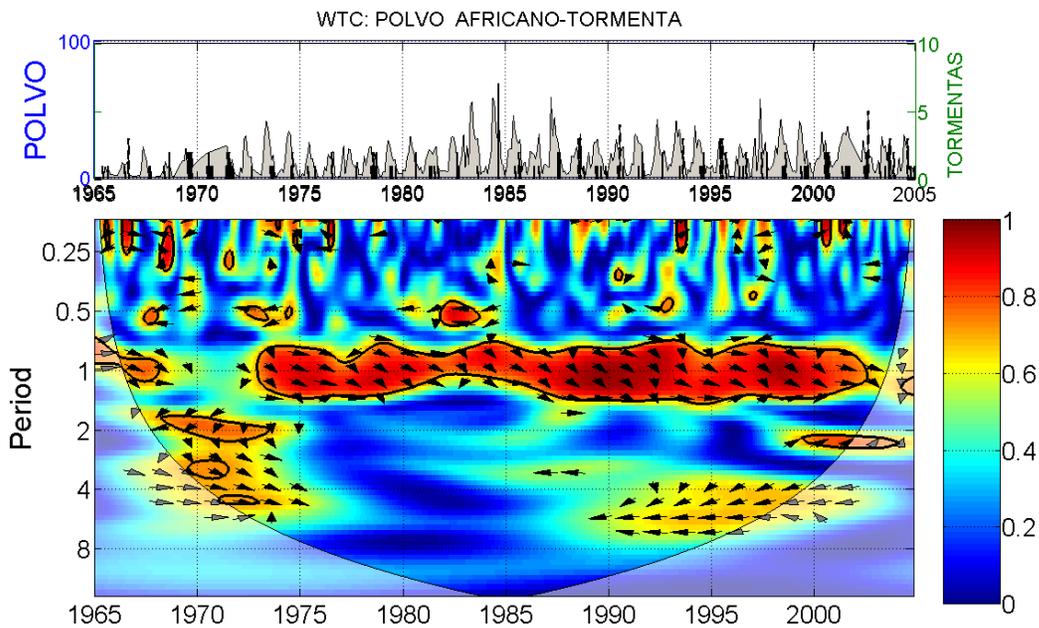


Fig.4.19 Ondeleta de las Tormentas de Polvo y las Tormentas Tropicales

En la gráfica de la figura 4.19, se observa, las tormentas de polvo con las tormentas tropicales, como se muestra en la tabla 4.1, la cantidad de tormentas tropicales es la mayor en comparación con los huracanes y sus categorías y las sub tormentas. En la gráfica

superior se muestran ambas gráficas, tormentas de polvo y tormentas tropicales. En esta gráfica se puede observar cierto grado de modulación de las tormentas de polvo sobre las tormentas tropicales.

En el espectro Ondeleta antes del período de 1 año podemos observar zonas que se encuentran sobre el nivel de confianza de manera intermitente, con una relación de fase variable.

En el período de 1 año podemos encontrar una pequeña zona que se encuentra entre los años 1965-1968, con una relación de fase no lineal, luego encontramos un gran período ubicada entre los años 1973-2003, esta está sobre los niveles de confianza y tiene una relación de fase no lineal.

En el período de 2 años, tenemos una zona ubicada entre los años 1967-1974, en el período de los 2.5 años tenemos una zona con valor de coherencia de 1, entre los años 1999-2003, en el período de 3 años a lo largo de los años 1967-1973, encontramos una zona con valor de coherencia de 0.7, esta última zona y las anteriores mencionadas tienen una relación de fase no lineal. En los 4 años de período encontramos una zona que no se encuentra sobre el nivel de confianza pero con un valor de coherencia de 0.7, y ambas señales están en fase. En el período de los 6 años aproximadamente entre los años 1990-2002, encontramos otra zona que se encuentra bajo los niveles de confianza, con un valor de coherencia de 0.7 aproximadamente y están en anti fase ambas señales.

#### g-) Ondeleta entre Las Tormentas de Polvo y Sub Tormentas

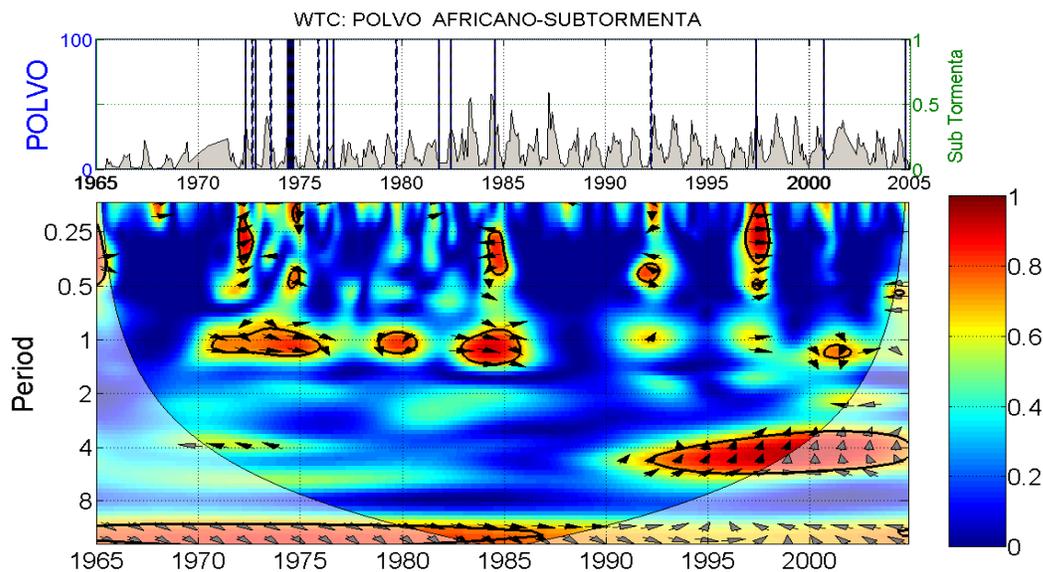


Fig.4.20 Ondeleta entre Las Tormentas de Polvo y Sub Tormentas

La gráfica de la figura 4.20, nos muestra el espectro Ondeleta de las tormentas de polvo con las sub tormentas que se han generado en el océano atlántico. En la gráfica del espectro Ondeleta se puede observar la primera zona que se encuentra entre los años 1965-1970, en la cual no existe prácticamente coherencia entre ambas señales, y es la segunda menor cantidad, siguiendo a los huracanes de categoría 5.

Antes del período de 1 año podemos observar zonas que se encuentran sobre el nivel de confianza, pero son intermitente, pero se encuentran algunas zonas de interés como la que se encuentra en el período de 0.25 y 0.5 años, entre los años 1972-1973, en la cual su relación de fase es no lineal, la segunda zona es la que se encuentra entre los años 1984-1985, se encuentran en relación lineal en anti fase, las flechas están en dirección horizontal-izquierda. Otra zona en este mismo período se ubica entre los años 1997-1998, con una relación lineal en fase, las flechas están en dirección horizontal-derecha. Todas estas zonas se encuentran sobre el nivel de confianza.

El período de 4 años encontramos una zona que se ubica entre los años 1992-2004, esta se encuentra sobre el nivel de confianza y la relación de fase es no lineal ya que las flechas están en dirección de  $90^\circ$ , parte de esta zona se encuentra dentro del cono de influencia. La última gran zona que se encuentra en el período de 11 años y se presenta a lo largo de todo el tiempo de análisis, parte de zona se encuentra dentro del cono de influencia y ambas señales están en fase, entre los años 1965-1986, pareciera existir una relación lineal en fase, en el mismo período entre los años 1990-2004, tenemos una relación no lineal y se encuentra fuera de los niveles de confianza, con un valor de coherencia de 0.6 aproximadamente.

# Conclusiones

En el presente trabajo se pudieron encontrar resultados que indican que las tormentas de polvo pueden ayudar a mitigar la producción de huracanes en el océano atlántico caribeño:

- Al generarse una tormenta de polvo, esta produce toneladas de partículas que se suspenden en el ambiente y viajan por el atlántico hasta llegar al Caribe, al generarse esta tormenta, evita que mayor cantidad de los rayos del Sol penetren y lleguen a la superficie del mar, reflejando los rayos al espacio nuevamente, este efecto produce una baja en las temperaturas superficiales del Océano Atlántico, este hecho es muy importante. Para que se genere un huracán deben existir temperaturas apropiadas en la superficie del océano. Por lo tanto las tormentas de polvo estarían mitigando la cantidad de huracanes que se afectan al océano atlántico al limitarle un factor que debe estar presente a la hora de generarse un huracán.
- Gracias al análisis Ondeleta es que podemos ver un periodo de 11 años en la grafica 4.5 con las características que se mencionaron, este es un importante beneficio, ya que con esta información se podría ampliar el análisis, y buscar alguna relación con otro fenómeno como la actividad solar que tiene los mismos 11 años de periodo, podría ser que estos 11 años estén modulando a las tormentas de polvo o a los huracanes, este es una aporte muy importante que el análisis Ondeleta nos entrega, al usar la Ondeleta madre Morlet, ya que esta nos entrega la evolución de la periodicidad en el tiempo.
- Las graficas de Ondeletas de las tormentas de polvo con los huracanes de mayor categoría podemos ver que nos muestran mayores zonas con valor de coherencia cercanas al valor cero, La coherencia muestra que cuando hay mayor actividad de las tormentas de polvo, hay menor cantidad de huracanes de mayor categoría (3, 4 y 5). Esto estaría mostrando una anticorrelación entre ambas señales, es decir a mayor cantidad de tormentas de polvo existe menor cantidad de huracanes, esta relación la

enseña la grafica ondeleta al mostrarnos mayores zonas de coherencia con valores cercanos al cero. Esto nos dice que la actividad de huracanes de mayores categorías es mitigada por la actividad de las tormentas de polvo.

- En el espectro Ondeleta se puede observar un cierto grado de modulación de las tormentas de polvo con las tormentas tropicales, existen zonas donde la cantidad de tormentas tropicales está influenciada por la actividad de tormentas de polvo, esto puede ayudar a desarrollar futuros trabajos de investigación para desarrollar sistemas de predicción de tormentas tropicales.
- Las tormentas de polvo presentan un interesante trabajo a futuro ya que no solo tiene una relación directa con los huracanes, también tiene una importancia a nivel mundial, en trabajos que se han realizado en el mundo científico se han podido percatar que el polvo es un fenómeno muy importante para el futuro climatológico de la tierra. En los últimos años el estudio de las nubes de polvo generadas por las tormentas del desierto, principalmente las del Sahara, cobró especial interés en el mundo, debido a la posible influencia de ese elemento contaminante del aire sobre el clima, salud y otros ecosistemas.

Por lo tanto estamos presentes ante unos de los fenómenos naturales más impactantes y que podría tener un rol fundamental en los futuros cambios climáticos que pueda sufrir la tierra.

## Referencias

1. Aitken, J. 1880. On dust, fogs, and clouds. Proceedings of the Royal Society of Edinburgh (1880-1881) 11(108):14-18; 122-126.
2. AMBIENTES DESÉRTICOS, Universidad Nacional de Lujan, Geología general.
3. Arimoto, H.; Oishi, T.; Nishijima, M.; Kinumi, T. Tetrahedron Lett, "Affinity of a Vancomycin-polymer with Bacterial Surface Models", 2001, 42, 3347-3350
4. Ávila, A., Queralt, I. y Alarcón, M. 1997. Mineralogical composition of African dust delivered by red rains over northeastern Spain. *Journal of Geophysical Research* 102:21977-21996
5. Benedetto J. J. and M. W. Frazier, Wavelet, Mathematics and Applications. Boca Raton: CRC Press, 1994.
6. BOSSAK BRIAN H., "Early 19th Century U.S. Hurricanes: A Gis Tools And Climate Analysis", THE FLORIDA STATE UNIVERSITY COLLEGE OF SOCIAL SCIENCES, A Dissertation submitted to the Department of Geography in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, 2003.
7. Brian D. Hahn and Daniel T. Valentine, "Essential MATLAB for Engineers and Scientists", Butterworth-Heinemann, 2007.
8. Burkhard Buttkus "Spectral Analysis and Filter Theory In Applied Geophysics", Hannover, Germany, Springer, 2000.
9. Capurro Luis, Investigador Titular Departamento de recursos del mar de la unidad Mérida Cinvestav, "Huracanes, Tifones, Baguios, Willy-Willies y Ciclones".
10. Castro Fernández Rosa María de Tesis de Doctorado "Análisis de la Teoría de Ondículas orientada a las aplicaciones en Ingeniería Eléctrica", E.T.S.I. Industriales Dpto. De Ingeniería Eléctrica, Madrid 2002.
11. Carlson Toby N., Joseph M. Prospero, "The Large-Scale Movement of Sahara Air Outbreaks over the Northern Equatorial Atlantic", March 1972.
12. Carlson Toby N., "Atmospheric Turbidity in Sahara Dust Outbreaks as Determined by analyses of Satellite Brightness Data", December 1978.
13. Carmona Rene, Wen-Liang Hwang, Bruno Torresani, "Practical Time Frequency Analysis; Gabor and Wavelet Transforms With an Implementation in S", San Diego; Academic, 1998.
14. Chiapello Isabelle, Cyril Moulin, Joseph M. Prospero, "Understanding the long-term variability of African dust transport across the Atlantic as recorded in both Barbados surface concentrations and large-scale Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) optical thickness", JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 110, D18S10, doi:10.1029/2004JD005132, 2005.
15. CHUI, C. K., Wavelets: A Mathematical Tool for Signal Processing, SIAM, Filadelfia, 1997.

16. C. K. Chui and Jianzhong Wang “A Study of Asymptotically Optimal Time-Frequency Windows of Scaling Functions and Wavelets”, *Annals of Numerical Mathematics* 4, 193-216, 1997
- Jan E. Odegard and Ivan W Selesnick “Introduction to Wavelet and Wavelet Transform” Upper Saddle River, New York. Prentice Hall, 1998.
17. Díaz Juan P., Francisco J. Expósito, Carlos J. Torres, Félix Herrera, Joseph M. Prospero, Maria C Romero, “Radiative Properties of Aerosol in Sahara Dust Outbreaks Using Ground-Based and Satellite Data: Applications to Radiative forcing”, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 106, NºD16, Pages 18,403-18,416, 2001.
18. Diego García Ramón Ignacio, Tesis Doctoral Universidad de Cantabria “ANÁLISIS WAVELET APLICADO A LA MEDIDA DE ARMÓNICOS, INTERARMÓNICOS Y SUBARMÓNICOS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA”, Octubre, 2006.
19. Dockery DW, Pope, CAIII, Xu, X., Spengler JD, et al (1993). An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. *N. Engl. J. Med.* 329:1753-1759.
20. Dwight F. Mix, Kraig J. Olejniczak “Elements of Wavelets for Engineers and Scientists”, Wiley-Interscience, Hoboken, New Jersey. 2003
21. EOS, Transactions, American Geophysical Union “Counting Atlantic Tropical Cyclones Back to 1900”, Vol. 88, Nº 18, My 2007.
22. Eric J. Holweg, *Mariner’s Guide for Hurricane Awareness in the North Atlantic Basin* Meteorologist Tropical Analysis and Forecast Branch Tropical Prediction Center National Weather Service National Oceanic and Atmospheric Administration, 2000.
23. Elsner James B., A. Birol Kara “Hurricanes of the North Atlantic Climate and Society”, New York, Oxford University, 1999.
24. Evan Amato T., Jason Dunion, Jonathan A. Foley, Andrew K. Heidinger and Christopher S. Velden, “New evidence for a relationship between Atlantic tropical cyclone activity and African dust outbreaks”, *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 33, L19813, doi:10.1029/2006GL026408, 2006.
25. Fernández Pablo, Álvaro Fuentes, “Procesamiento Digital de Señales Acústicas utilizando Wavelets.”, Instituto de Matemáticas UACH.
26. Graps Amara, “An Introduction to Wavelets”.
27. Grinsted A., J. C. Moore, and S. Jevrejeva, “Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series”, *Nonlinear Processes in Geophysics* (2004) 11: 561–566 SRef-ID: 1607-7946/npg/2004-11-561, 2004.
28. Hasan Abul Siddiqi “Applied Functional Analysis: Numerical Methods, Wavelet Methods, and Image Processing”, New York, M. Dekker, 2004.
29. Liang-Gee Chen “Design of Wavelet Transform Analysis, Architecture And Design Example”, London, Imperial College, 2007.
30. Lizano Omar G., Walter Fernández, “Algunas Características de las Tormentas Tropicales y de los Huracanes que atravesaron o se formaron en el Caribe adyacente a Costa Rica durante el período 1886-1988”, Enero 1996.
31. Lokenath Debnath “Wavelet Transforms And Their Applications”, University of Texas, USA, Birkhauser, 2002.
32. Lorenz Edward N. “Designing Chaotic Models”, *JOURNAL OF THE ATMOSPHERIC SCIENCES*, VOLUME 62, October 2004.

33. Lorenz Edward N., “Deterministic Nonperiodic Flow”, JOURNAL OF THE ATMOSPHERIC SCIENCES, Volume 20, January 1963.
34. Lorenz Edward N., “Can Chaos and Intransitivity Lead to Interannual Variability?”, Tellus 1990, 42A, 378-389, June 1989.
35. Mallat Stephane G. “Wavelet Tour of Signal Processing”, San Diego; Academic, 1999
36. Marchand Patrick, O. Thomas Holland, Graphics and GUIs with Matlab Third Edition, CHAPMAN & HALL/CRC, 2003.
37. Marticorena, B., Bergametti, G., Gillette, D. and Belnap, J., 1997. Factors controlling threshold friction velocity in semiarid and arid areas of the United States. *J. Geophys. Res.* 102 D19, pp. 23277–23287
38. Mendoza Blanca, Virginia García, Víctor M. Velasco, “Frequency and Duration of Historical Droughts from the 16<sup>th</sup> centuries en the Mexican Maya Lands, Yucantan Peninsula”, March 2007.
39. Michalak Arthur E., “Properties and influences of the Saharan air layer on tropical cyclogenesis”, Submitted 17 December 2004.
40. Moore John, Aslak Grinsted, and Svetlana Jevrejeva, “Waveletlag regression analysis of Atlantic tropical cyclones and snow cover and their dependence on ENSO and Atlantic thermohaline variability”, 1 Arctic Centre, University of Lapland, 96101 Rovaniemi, Finland.
41. Muhs Daniel R., James R. Budahn, Joseph M. Prospero and Steve N. Carey, “Geochemical evidence for African dust inputs to soils of western Atlantic islands: Barbados, the Bahamas, and Florida”, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 112, F02009, doi: 10.1029/2005JF000445, 2007.
42. Organización Meteorológica Mundial Documento Técnico “Programa de Ciclones Tropicales” Informe N° PCT-30, SECRETARÍA DE LA ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL GINEBRA-SUIZA.
43. Pedersen, F., Introduction to Joint Time Frequency Analysis, Departamento de Tecnología y Comunicación, Universidad de Aalborg, Dinamarca, 1999.
44. Polikar, R., The Wavelet Tutorial, Centro de Computación, Universidad Estatal de Iowa, U.S.A, 1996.
45. Pollock D.S.G., “A Handbook of Time-Series Analysis, Signal Processing and Dynamics”, Academic Press, 1999
46. Prospero Joseph M., CASE STUDY “Saharan Dust Impacts and Climate Change” Oceanography Vol. 19, No. 2, June 2006.
47. Prospero Joseph M., “Long-term measurements of the transport of African mineral dust to the Southeastern United States: Implications for regional air quality”. *Journal of Geophysical Research* 104(D13):15,917–15,927, 1999.
48. Prospero Joseph, M., and P.J. Lamb, “African droughts and dust transport to the Caribbean: Climate change implications”, *Science* 302:1,024–1,027. 2003.
49. Prospero Joseph M., Peter J. Lamb, “African Droughts and Dust Transport to the Caribbean: Climate Change Implications”, *Science* Vol. 302, November 2003.
50. Resumen ejecutivo, Perspectivas de los Desiertos del mundo, PNUMA, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente Oficina Regional para America Latina, Junio 2006.

51. Qu John J., Xianjun Hao, Wanting Wang, Lingli Wang, and Menas Kafatos, “A Study of African Dust Storm and Its Effects on Tropical Cyclones over Atlantic Ocean from Space”, 0-7803-9050-4/05/ IEEE, 2005.
52. Risk Management Solutions “Special Report Hurricane Season Outlook 2007”, 2007.
53. Schumaker Larry, Glenn Webb “Recent Advances in Wavelet analysis” Boston Massachusetts; Academic. 1994.
54. Seinfeld J. H. and Pandis S. N. (1998) Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change, J. Wiley, New York.
55. STRANG, G., Wavelets and dilation equations: A brief introduction, SIAM Rev. 31(4), 1989, 1 pp. 614 - 627
56. Torrence Christopher and Gilbert P. Compo “A Practical Guide to Wavelet Analysis”, Volume 79, Number 1, 1998.
57. Torres Juan G., “Los desiertos albergan ricos ecosistemas”, Universidad Nacional de Piura
58. Tun de Dzul Fernando, Heyden Manzanilla-Domínguez “Los Huracanes: Su Impacto en la Península de Yucatán en los Últimos 100 años”, El colegio de la Frontera Sur Unidad Chetumal, 2005.
59. Una guía de preparación Departamento de Comercio de los Estados Unidos (U.S. Department of Commerce) Administración Nacional del Océano y la Atmósfera (NOAA, por sus siglas en inglés) Servicio Nacional de la Meteorología (National Weather Service), “Huracanes La Furia de la Naturaleza”, 2001.
60. Valdes Galicia J. F., V. M. Velasco, “Variations of Mid-Term Periodicities in Solar activity Physical Phenomena”, Science Direct, Febrero 2007.
61. Vergara González E. P., F. Alba Elías, M. Castejón Limas, F. J. Martínez de Pisón, “SAHARAN DUST OUTBREAK INFLUENCE TO PM10 LEVELS IN LOGROÑO AREA, (SPAIN)”, UNIVERSIDAD DE LA RIOJA.
62. Vinay K. Ingle, John Proakis “Digital Signal Processing Using Matlab” by Brooks/Cole Publishing company 2000.
63. Walker James S., “Fourier Analysis and Wavelet Analysis”, NOTICES OF THE AMS, VOLUME 44, Number 6.
64. Wurzler et al., 2000 S. Wurzler, T.G. Reisin and Z. Levin, Modification of mineral dust particles by cloud processing and subsequent effects on drop size distributions, *Journal of Geophysical Research* 105 (2000) (D4), pp. 4501–4512
65. Young Randy K “Wavelet Theory and its Applications”. Boston, Kluner Academic, 1993.

## Referencias de Internet

1. [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/hurricanes/features/index.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/hurricanes/features/index.html)
2. <http://www.nhc.noaa.gov/>
3. <http://www.giss.nasa.gov/research/briefs/>
4. <http://weather.unisys.com/hurricane/atlantic/index.html>
5. [http://modis.gsfc.nasa.gov/gallery/individual.php?db\\_date=2008-03-06](http://modis.gsfc.nasa.gov/gallery/individual.php?db_date=2008-03-06)
6. <http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/A1.html>
7. <http://www.bsc.es/projects/earthscience/DREAM>
8. <http://www-corma.stanford.edu/~unjung/mylec/WTpart1.html>
9. <http://davis.wpi.edu/~matt/courses/wavelets/>
10. <http://www.cmap.polytechnique.fr/~mallat/book.html>
11. <http://www.oas.org/usde/publications/Unit/ oea65s/ch17.htm#referencias>
12. <http://cees.tamtu.edu/cees/main.ssi>
13. <http://www.fema.gov/index.shtm>