

## INTRODUCCIÓN.

En nuestro país se ha incursionado en el estudio del oleaje muy recientemente (2006), por medio de la “Gerencia de Oceanografía” GO la cual pertenece a una rama del “Servicio Nacional de Estudios Territoriales” SNET del “Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales” MARN en El Salvador.

El presente trabajo trata del oleaje el cual es objeto de estudio de la oceanografía. Una definición de oceanografía es: Rama de las ciencias de la tierra que estudia los procesos biológicos, físicos, geológicos y químicos que se dan en los mares y en los océanos, cuyo objetivo principal es el de obtener una descripción lo suficientemente cuantitativa para ser utilizada como herramienta de estudio ó de predicción del futuro con cierto grado de precisión y certeza.

Es por esto que surge este trabajo debido a la necesidad de información, cuyo objetivo principal es el de generar conocimiento en el tema de oleaje en El Salvador. Esto se hará mediante el procesamiento de datos generados por un modelo numérico llamado Wave Watch III desarrollado e implementado por la Administración Nacional de Oceanografía y Atmósfera de los Estados Unidos de América o en sus siglas en inglés NOAA. En esta investigación se utilizarán registros de salida de dicho modelo numérico para un período de 11 años, los cuales contienen información de altura, período y dirección del oleaje, velocidad y dirección del viento. Esta información servirá para lograr una descripción del oleaje característico para dicho período de tiempo (11 años), así como para describir el oleaje característico para cada año y el oleaje característico mensual y/o estacional.

El periodo de 11 años contemplado para el estudio del oleaje comprende los años entre 1997 hasta 2007 y los nodos del modelo que se van a estudiar son los siguientes:

13N-88.75W (a 23 kilómetros de nuestra costa).

13N-90.00W (a 60 km de nuestra costa).

En donde los nodos del modelo son los vértices de los rectángulos que dividen a la tierra en puntos, conformando una malla. En la figura 1 se muestran los nodos del modelo que se van a estudiar.



Figura 1. Ubicación de los dos nodos a estudiar [www.googleearth.com,diciembre 2008].

## CAPITULO 1.- MARCO TEÓRICO DEL OLEAJE.

### 1.1.- DESCRIPCIÓN DEL OLEAJE.

El oleaje son ondas que se desplazan por la superficie de mares y océanos, generadas por el viento, y son el principal agente que moldea las costas. El fenómeno del oleaje es causado por el viento, cuya fricción con la superficie del agua produce un cierto arrastre, dando lugar a la formación de rizaduras en la superficie del agua llamadas ondas. Consiguientemente cuanto mayor es la altura del oleaje, mayor es la cantidad de energía que pueden extraer del viento, de forma que se produce una realimentación positiva.

El comportamiento del oleaje es en forma de ondas, y para describir estas se utiliza la terminología de las ondas físicas, ya que son ondas cuyo medio de transporte ó propagación es el océano y su generación principal como ya se mencionó son los vientos. Esta terminología se puede ver resumida en la Figura 1.1.

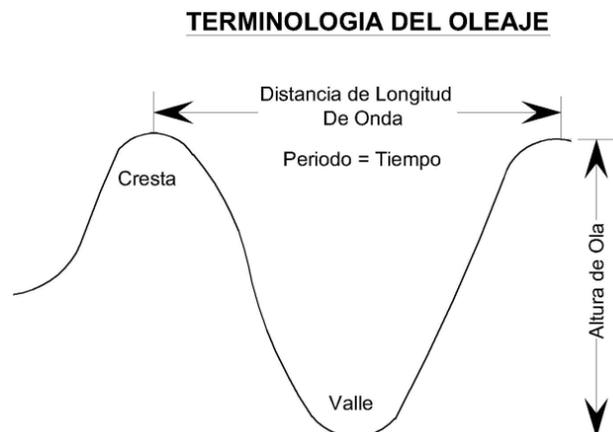


Figura 1.1- Terminología de las olas.

De la figura 1.1 se tiene que a la parte más alta de la onda se le denomina “cresta”, y la parte más profunda de la depresión entre dos ondas consecutivas se llama “valle”. A la distancia horizontal entre dos crestas o entre dos valles se le denomina longitud de onda y a la distancia vertical de altura entre una cresta y un valle se le llama altura de la onda. Esto sirve para entender términos como la amplitud, que es la distancia que la partícula se aparta de su posición media en una dirección perpendicular a la de propagación y esta equivale a

la mitad de la altura de la onda. El período es el tiempo que transcurre entre el paso de dos crestas o dos valles.

Las alturas del oleaje varían de forma aleatoria en el tiempo y el espacio, y las propiedades estadísticas del oleaje, tales como el promedio de las alturas de una muestra de algunos cientos de olas, cambia día a día. El oleaje observado en una localidad es generado por el viento local, tormentas cercanas que sopla en el lugar, así como el viento asociado a tormentas lejanas [www.wikipedia.com,septiembre 2008].

## 1.2.- TEORIA LINEAL DEL OLEAJE.

“La solución de las ecuaciones de movimiento depende de las condiciones de frontera en la superficie, pero las condiciones de frontera en la superficie son las ondas que deseamos calcular. ¿Cómo podemos proceder?

Primero se empieza por asumir que las amplitudes del oleaje en la superficie del agua son infinitamente pequeñas así la superficie es exactamente plana.

Segundo, para simplificar las matemáticas, también se puede asumir que el flujo es bi-dimensional con las ondas viajando en dirección x.

Y tercero, se puede asumir que la fuerza de Coriolis y la viscosidad son despreciables.

Con estas suposiciones, la onda “ $\zeta$ ” viajando sobre la superficie del océano en dirección “x” es:

$$\zeta = a \sin(kx - \omega t) \quad (\text{Ec. 1.1})$$

con

$$\omega = 2\pi f = 2\pi/T; \quad k = 2\pi/L \quad (\text{Ec.1.2})$$

Donde  $\omega$  es la frecuencia de la onda en radianes por segundo, f es la frecuencia de la onda en Hertz (Hz), k es el número de onda en radianes por metro, T es el período de la onda en segundos, L es la longitud de la onda en metros y donde se asume que  $ka = O(0)$ .

Donde k (número de onda) por a (amplitud de onda), sea del orden de cómo es la primera suposición. En la naturaleza lo anterior  $ka = O(0)$ , esa valido porque el orden de “a” es  $10^0$  y el orden de “k” es  $10^{-2}$ .

**Relación de dispersión.** La relación de dispersión surge de una ecuación diferencial. La frecuencia de onda  $\omega$  está relacionada al número de onda “k” por la relación de dispersión:

$$\omega^2 = g k \tanh(kd) \quad (\text{Ec. 1.3})$$

Donde  $d$  es la profundidad del agua y  $g$  es la aceleración de la gravedad.

Se hacen dos aproximaciones que son especialmente útiles.

1. Aproximación de aguas profundas es válida si la profundidad del agua  $d$  es mucho mayor que la longitud de onda  $L$ . En este caso,  $d \gg L$ ,  $kd \gg 1$ , y  $\tanh(kd) = 1$ .
2. Aproximación de aguas poco profundas es válida si la profundidad del agua es mucho menor que la longitud de onda  $L$ . En este caso,  $d \ll L$ ,  $kd \ll 1$ , y  $\tanh(kd) = kd$ .

En la naturaleza “L” es del orden de  $10^2$  y “d” es del orden de  $10^3$  en aguas profundas y  $10^1$  en aguas poco profundas.

Para estos dos límites de la profundidad del agua comparada con la longitud de onda la relación de dispersión se reduce a:

- Relación de dispersión para aguas profundas:

$$\omega^2 = g k, \quad d > L/4 \quad (\text{Ec. 1.4})$$

- Relación de dispersión para aguas poco profundas:

$$\omega^2 = g d k^2, \quad d < L/11 \quad (\text{Ec. 1.5})$$

La longitud y frecuencia de onda están relacionadas a través de la relación de dispersión.

**Velocidad de fase.** La velocidad de fase  $c$  es la velocidad a la cual una determinada fase de la onda se propaga. En un periodo de onda  $T$  la cresta avanza una longitud de onda  $L$  y la velocidad de fase es  $c = L/T = \omega/k$ . Así, la definición de velocidad de fase es:

$$c \equiv \frac{\omega}{k} \quad (\text{Ec. 1.6})$$

La dirección de propagación es perpendicular a la cresta de la onda y en el sentido de las “x” positivas.

Las aproximaciones de aguas profundas y poco profundas para la relación de dispersión dan:

- Velocidad de fase para aguas profundas:

$$c = \sqrt{\frac{g}{K}} = \frac{g}{\omega} \quad (\text{Ec. 1.7})$$

- Velocidad de fase para aguas poco profundas:

$$c = \sqrt{gd} \quad (\text{Ec. 1.8})$$

La velocidad de fase de una onda puede diferir de la velocidad a la cual la energía de onda se propaga.

Las ondas en aguas profundas son dispersivas, ondas de longitud mayor viajan más rápido que ondas de longitud menor, de igual forma por la ecuación 1.7 se puede decir del período: mayor periodo mayor velocidad y viceversa.

**Velocidad de grupo.** El concepto de velocidad de grupo  $c_g$  es fundamental para entender la propagación de ondas lineales y no lineales.

La definición de velocidad de grupo en dos dimensiones es:

$$c_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} \quad (\text{Ec. 1.9})$$

Usando las aproximaciones para la relación de dispersión se obtienen:

- Velocidad de grupo en aguas profundas:

$$c_g = \frac{g}{2\omega} = \frac{c}{2} \quad (\text{Dispersivas}). \quad (\text{Ec. 1.10})$$

- Velocidad de grupo en aguas poco profundas:

$$c_g = \sqrt{gd} = c \quad (\text{No dispersivas}) \quad (\text{Ec. 1.11})$$

Es importante hacer notar que un grupo de ondas en aguas profundas se mueve con una velocidad igual a la mitad de la velocidad con las que avanzan cada una de las ondas que componen el grupo o paquete de ondas. Resultado de lo anterior se observa que mientras el grupo de ondas avanza sobre la superficie del océano, ondas individuales entran y salen del grupo.

**Energía de onda.** La energía de la onda  $E$  en joules por metro cuadrado está relacionada a la diferencia de las mediciones del nivel del mar  $\zeta$  por:

$$E = \rho_w g \langle \zeta^2 \rangle \quad (\text{Ec. 1.12})$$

Donde  $\rho_w$  es la densidad del agua,  $g$  es la gravedad, y los paréntesis denotan un promedio tiempo o espacio. Donde promedio de la onda  $\equiv a \sin(kx - \omega t)$ .

**Altura de onda significativa.** Sí observamos el océano, vemos ondas de varias alturas. Algunas son mucho más altas que otras y otras mucho más pequeñas. Una definición práctica que es a menudo utilizada es la altura del tercio de ondas de mayor altura, conocido como  $H_{1/3}$ . Y se calcula midiendo la altura de la onda en un registro de pocos minutos, por ejemplo al tomar 120 crestas de ondas y registrar sus alturas, se toman las 40

ondas más altas y se calcula el promedio de estas mismas. El valor calculado de estas ondas es el  $H_{1/3}$  del registro.

En un principio el término de altura significativa se le dio al promedio del 30% de ondas de mayor altura, pero esto evolucionó hasta convertirse en el promedio del tercio de ondas de mayor altura, y designada como  $H_S$  o  $H_{1/3}$ .

Más recientemente, la altura de onda significativa es calculada de las mediciones del nivel del mar. Si las frecuencias de las ondas observadas están comprendidas en una banda de frecuencia angosta,  $H_{1/3}$  está relacionada a la desviación estándar de las mediciones del nivel del mar por:

$$H_{1/3} = 4 < \zeta^2 >^{1/2} \quad (\text{Ec. 1.13})$$

Donde  $< \zeta^2 >^{1/2}$  es la desviación estándar de las mediciones del nivel del mar. Esta relación es mucho más útil, y es ahora la forma aceptada para calcular la altura de onda a partir de las mediciones de los sensores de presión, donde  $\zeta = a \cdot \sin(kx - \omega t)$ . [Stewart, 2007: p.271-275]”

### **1.3.- ONDAS Y EL CONCEPTO DE UN ESPECTRO DE ONDA.**

“Si miramos al mar, nos damos cuenta que las ondas en la superficie del mar no son sinusoidales. La superficie aparenta estar compuesta de ondas al azar de varias longitudes y periodos. ¿Cómo podemos describir esta superficie? Las simplificaciones llevan al concepto de espectro de ondas. Los espectros dan la distribución de energía de onda entre diferentes frecuencias y longitudes de onda en la superficie del mar.

El concepto de un espectro está basado en que casi cualquier función  $\zeta(t)$  o  $\zeta(x)$ , pueden ser representados sobre el intervalo  $-T/2 \leq t \leq T/2$  como la suma de series infinitas de las funciones de los senos y cosenos con frecuencias de ondas armónicas:

$$\zeta(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos 2\pi n f t + b_n \sin 2\pi n f t) \quad (\text{Ec. 1.14})$$

donde:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \zeta(t) \cos 2\pi n f t dt, (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (\text{Ec. 1.15})$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \zeta(t) \sin 2\pi n f t dt, (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (\text{Ec. 1.16})$$

$f = 1/T$  es la frecuencia fundamental, y  $nf$  armónicos de la frecuencia fundamental.

La ecuación 1.14 puede ser simplificada usando:

$$\zeta(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} Z_n \exp^{i2\pi n f t} \quad (\text{Ec. 1.17})$$

donde  $Z_n$  es llamada la transformada de Fourier de  $\zeta(t)$ .

El espectro  $S(f)$  de  $\zeta(t)$  es:

$$S(nf) = Z_n Z_n^* \quad (\text{Ec. 1.18})$$

donde  $Z^*$  es el complejo conjugado  $Z$ . Se usan estas formas cuando se describen los cálculos del espectro de ondas oceánicas.

**Muestreo de la superficie del mar.** Al calcular las series de Fourier que representa la superficie del mar, requiere que se obtengan muestras de la altura del nivel del mar  $\zeta = (x, y, t)$  en un área de diez kilómetros durante una hora.

Al digitalizar las salidas del muestreo se obtiene:

$$\zeta_j \equiv \zeta(t_j), t_j \equiv j\Delta$$

$$j = 0, 1, 2, \dots, N - 1, \quad (\text{Ec. 1.19})$$

Donde  $\Delta$  es el intervalo de tiempo entre muestras, y N es el total de muestras. La longitud T del registro es  $T = N\Delta$ .

El registro de onda digitalizado contiene información de ondas en el rango de frecuencias:

$$\frac{1}{T} < f < \frac{1}{2\Delta}, \quad (\text{Ec. 1.20})$$

**Calculo del espectro de onda.** La transformada digital de Fourier  $Z_n$  de un registro de onda  $\zeta_j$  equivalente a la ecuación 1.17 es:

$$Z_n = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} \zeta_j \exp\left[-\frac{i2\pi jn}{N}\right], \quad (\text{Ec. 1.21})$$

$$\zeta_n = \sum_{n=0}^{N-1} Z_j \exp\left[\frac{i2\pi jn}{N}\right], \quad (\text{Ec. 1.22})$$

El espectro  $S_n$  de  $\zeta$ , el cual es llamado periodograma, es:

$$S_n = \frac{1}{N^2} [|Z_n|^2 + |Z_{N-n}|^2], \quad (\text{Ec. 1.23})$$

El periodograma promedio se conoce como el espectro de altura de onda, el cual da la distribución de la varianza de la altura de la onda como función de la frecuencia.

A continuación se presenta un resumen de los pasos para el cálculo de un espectro:

- Digitalizar un segmento de las mediciones de altura onda-altura para obtener los límites de la ecuación 1.20.
- Calcular la transformada de Fourier  $Z_n$ .
- Calcular el periodograma  $S_n$  de la suma de los cuadrados de la parte real e imaginaria de la transformada de Fourier.
- Repetir hasta obtener  $M = 20$  periodogramas.
- Promediar los 20 periodogramas hasta producir un espectro promedio  $S_m$ .
- La función de distribución estadística de la varianza de altura de onda como función de la frecuencia es la  $\chi^2$  con  $2M$  grados de libertad. [Stewart, 2007: p.277-282]”

## CAPITULO 2.- MODELO WAVE WATCH III.

### 2.1.- ECUACIONES DEL MODELO.

“Los componentes o espectros de ondas en aguas con profundidad limitada son generalmente descritas usando varios parámetros de fase y amplitud. Los parámetros de fase son el vector del número de onda  $k$ , el número de onda  $k$ , la dirección  $\theta$  y varias frecuencias. Si los efectos de las corrientes promedio de las olas se considerarán, se hace una distinción entre la frecuencia relativa o intrínseca (en radianes)  $\omega = 2\pi f_r$ , que se observa en un marco de referencia en movimiento, y la frecuencia absoluta (en radianes)  $\omega = 2\pi f_a$ , que se observa en un marco de referencia fijo. La dirección  $\theta$  es perpendicular a la cresta de la onda e igual a la dirección de  $k$ . La teoría lineal del oleaje puede ser aplicada localmente, dando la siguiente relación de dispersión y ecuación tipo Doppler para relacionar los parámetros de fase.

$$\omega^2 = gk \tanh kd, \quad (\text{Ec. 2.1})$$

$$\omega = \sigma + k \cdot U, \quad (\text{Ec. 2.2})$$

donde  $d$  es la profundidad de agua promedio y  $U$  es la velocidad actual.

La variación del espectro  $F$  es una función de todos los parámetros de fase independiente,  $F(k, \sigma, \omega)$ , y además varía en espacio y tiempo  $F(k, \sigma, \omega; x, t)$ . Sin embargo, se asume que los componentes espectrales individuales satisfacen la teoría lineal de oleaje, así la (Ec. 2.1) y (Ec. 2.2) relacionan  $k$ ,  $\sigma$  y  $\omega$ . Con WWATCH el espectro básico es el espectro número de onda-dirección  $F(k, \theta)$ . Las salidas del programa de WWATCH, consiste en el espectro frecuencia-dirección  $F(f_r, \theta)$ . Los diferentes espectros pueden ser calculados de  $F(k, \theta)$  usando las transformaciones Jacobianas.

$$F(f_r, \theta) = \frac{\partial k}{\partial f_r} F(k, \theta) = \frac{2\pi}{c_g} F(k, \theta), \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$$F(f_a, \theta) = \frac{\partial k}{\partial f_a} F(k, \theta) = \frac{2\pi}{c_g} \left(1 + \frac{k \cdot U}{kc_g}\right)^{-1} F(k, \theta), \quad (\text{Ec. 2.4})$$

$$c_g = \frac{\partial \sigma}{\partial k} = n \frac{\sigma}{k}, \quad n = \frac{1}{2} + \frac{kd}{\sin h 2kd}, \quad (\text{Ec. 2.5})$$

En un sentido general, la acción de oleaje  $A \equiv E/\sigma$  es conservadora. Esto hace que el

espectro de densidad de acción del oleaje  $N(k, \theta) \equiv \frac{F(k, \theta)}{\sigma}$  la elección de espectro para el modelo. La propagación del oleaje es descrita por:

$$\frac{DN}{Dt} = \frac{S}{\sigma}, \quad (\text{Ec. 2.6})$$

donde  $D/Dt$  representa la derivada total y  $S$  representa el efecto neto de las fuentes para el espectro  $F$ .

### 2.1.1.- PROPAGACIÓN.

La ecuación anterior (Ec. 2.6) es válida para el vector espectro número de onda  $N(k; x, t)$ . La ecuación de balance para el espectro  $N(k, \theta; x, t)$  como es usada en el programa WWATCH está dado por:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_x \cdot x \cdot N + \frac{\partial}{\partial k} k \cdot N + \frac{\partial}{\partial \theta} \theta \cdot N = \frac{S}{\sigma}, \quad (\text{Ec. 2.7})$$

La ecuación 2.6 es válida para un plano Cartesiano. Para aplicaciones más grandes, esta ecuación es usualmente transferida a una malla esférica, definida por longitud  $\lambda$  y latitud  $\varphi$ , pero manteniendo la definición de variación local:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{\cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \varphi N \cos \theta + \frac{\partial}{\partial \lambda} \lambda N + \frac{\partial}{\partial k} k N + \frac{\partial}{\partial \theta} \theta_g N = \frac{S}{\sigma}, \quad (\text{Ec. 2.8})$$

### 2.1.2.- TÉRMINOS FUENTE.

#### Conceptos generales.

El término fuente neta  $S$  está formado generalmente de tres partes, la interacción viento-oleaje  $S_{in}$ , la interacción no lineal oleaje-oleaje  $S_{nl}$  y el termino de disipación  $S_{ds}$ . En aguas poco profundas hay un proceso adicional a considerar, la interacción oleaje-fondo  $S_{bot}$ . Todo esto define los términos fuentes generales usado en WWATCH como:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot}. \quad (\text{Ec. 2.9})$$

#### Interacciones no lineales (DIA).

Las interacciones no lineales oleaje-oleaje pueden ser modeladas usando las Aproximaciones de Interacción Discretas (DIA). Esta parametrización fue descubierta originalmente para el espectro  $F(f_r, \theta)$ .

Las interacciones no lineales de resonancia ocurren entre cuatro componentes de ondas (cuádruples) con un vector de número de onda  $K_1$  hasta  $K_4$ . En la DIA, se asume que  $K_1 = K_2$ . Entonces las condiciones de resonancia requieren que:

$$\begin{aligned} K_1 + K_2 &= K_3 + K_4, \\ \sigma_2 &= \sigma_1, \\ \sigma_3 &= (1 + \lambda_{nl})\sigma_1, \\ \sigma_4 &= (1 - \lambda_{nl})\sigma_1, \end{aligned} \quad (\text{Ec. 2.10})$$

donde  $\lambda_{nl}$  es una constante.

Las interacciones no lineales son calculadas por considerar un número limitado de combinaciones  $(\lambda_{nl}, C)$ , donde C es una constante de proporcionalidad.

Para un parámetro arbitrario z, el promedio espectral es dado como:

$$z = E^{-1} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} z F(f_r, \theta) df_r d\theta, \quad (\text{Ec. 2.11})$$

$$E = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} F(f_r, \theta) df_r d\theta, \quad (\text{Ec. 2.12})$$

Por razones numéricas, la profundidad relativa promedio es estimada como:

$$kd = 0.75k'd, \quad (\text{Ec. 2.13})$$

donde  $k'$  es definida como:

$$k' = \left(1/\sqrt{k}\right)^{-2}. \quad (\text{Ec. 2.14})$$

### **Interacciones no lineales (WRT).**

El segundo método para calcular las interacciones no lineales en WWATCH es el llamado método Webb-Resio-Tracy (WRT), que se basa en una formulación integral original de seis dimensiones.

La integral describe la tasa de cambio de densidad de la acción de un número de onda particular debido a las interacciones de resonancia entre pares de cuatro números de ondas. Para interactuar estos números de ondas debe satisfacer las siguientes condiciones de resonancia:

$$\begin{aligned} k_1 + k_2 &= k_3 + k_4, \\ \sigma_1 + \sigma_2 &= \sigma_3 + \sigma_4, \end{aligned} \quad (\text{Ec. 2.15})$$

la cual es una versión más general de las condiciones de resonancia de la ecuación 2.10. La tasa de cambio de acción de densidad  $N_1$  a un número de onda  $k_1$  debido a todas las interacciones cuádruples abarcando  $k_1$  está dado por:

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = \iiint G(k_1, k_2, k_3, k_4) \delta(k_1 + k_2 - k_3 - k_4) \delta(\sigma_1 + \sigma_2 - \sigma_3 - \sigma_4) \quad [N_1 N_3 N_4] \quad (\text{Ec. 2.16})$$

donde la acción de la densidad  $N$  es definida en términos del vector del número de onda  $k, N = N(k)$ . El término  $G$  es un complicado acoplador de coeficientes, para el cual las expresiones ya han sido dadas.

Finalmente, la tasa de cambio para un número de onda dado,  $k_1$  es dado por:

$$\frac{\partial N(k_1)}{\partial t} \approx \sum_{i k_3=1}^{n k} \sum_{i \theta_3=1}^{n \theta} k_3 T(k_1, k_3) \Delta k_{i k_3} \Delta \theta_{i \theta_3}, \quad (\text{Ec. 2.17})$$

donde  $n k$  y  $n \theta$  son los números discretos de los números de ondas y direcciones en la malla de cálculo respectivamente.

### Entrada y disipación (WAM-3).

El término fuente de entrada es dado como:

$$S_{in}(k, \theta) = C_{in} \frac{\rho_a}{\rho_w} \max \left[ 0, \left( \frac{28u^*}{c} \cos(\theta - \theta_w) - 1 \right) \right] \sigma N(k, \theta) \quad (\text{Ec. 2.18})$$

donde  $C_{in}$  es una constante,  $\rho_a$  ( $\rho_w$ ) es la densidad del aire (agua),  $u^*$  es la velocidad de fricción del viento,  $c$  es la velocidad de fase  $\sigma/k$  y  $\theta_w$  es la dirección del viento promedio. El término de disipación correspondiente es dado como:

$$S_{ds}(k, \theta) = C_{ds} \sigma \frac{k}{K} \left( \frac{\alpha^*}{\alpha^*_{PM}} \right)^2 N(k, \theta) \quad (\text{Ec. 2.19})$$

donde  $C_{ds}$  es una constante,  $\alpha^*_{PM}$  es el valor de  $\alpha^*$  para un espectro PM.

#### **Entrada y disipación (Tolman y Chalikov).**

El término fuente de entrada es dado como:

$$S_{in}(k, \theta) = \sigma \beta N(k, \theta) \quad (\text{Ec. 2.20})$$

Donde  $\beta$  es un parámetro adimensional de interacción viento-oleaje.

El modelo de ondas toma el viento  $u_r$  a una altura de referencia dada  $z_r$  como su entrada. Excluyendo una capa de superficie delgada ajustada a la superficie del agua, el perfil del viento promedio es casi logarítmico:

$$u_z = \frac{v^*}{k} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \quad (\text{Ec. 2.21})$$

donde  $K = 0.4$  y  $z_0$  es el parámetro de rugosidad.

Los correspondientes términos fuentes de disipación consisten de dos componentes. La (dominante) componente de baja frecuencia está basada en una analogía con disipación de energía debido a la turbulencia,

$$S_{ds,l}(k, \theta) = -2u * hk^2 \varphi N(k, \theta) \quad (\text{Ec. 2.22})$$

Donde h es una determinada escala mezclada de la energía de alta frecuencia contenido en el campo de onda y donde  $\varphi$  es una función empírica contable.

La disipación empírica de alta frecuencia es definida como:

$$S_{ds,h}(k, \theta) = -\alpha_0 \left(\frac{u_*}{g}\right)^2 f^3 \alpha_n^B N(k, \theta) \quad (\text{Ec. 2.23})$$

Donde  $\alpha_n$  es un nivel de energía adimensional de alta frecuencia normalizada, y donde  $\alpha_0$  es una constante empírica.

### **Fricción fondo - mar (JONSWAP).**

Una simple parametrización de la fricción inferior es la empírica, parametrización lineal JONSWAP. Este término fuente puede ser escrito como:

$$s_{bot}(k, \theta) = 2R \frac{n - 0.5}{gd} N(k, \theta) \quad (\text{Ec. 2.24})$$

donde R es una constante empírica, n es el radio de velocidad de fase a velocidad de grupo.

### **2.1.3.- PARÁMETROS DE SALIDA.**

El modelo de ondas provee salidas de los siguientes campos de mallas de los parámetros de onda promedio. Algunos de estos parámetros también pueden ser encontrados en las salidas para los puntos seleccionados.

- Profundidad del agua promedio (m).
- Velocidad actual promedio (vector, m/s).
- Velocidad del viento promedio (vector, m/s).
- La diferencia de temperatura aire-océano (°C).
- Velocidad de fricción  $u^*$  (escalar). La definición depende de la parametrización de los términos de la fuente seleccionada (m/s).

- Altura de onda significativa (m).

$$H_s = 4\sqrt{E}$$

- Longitud de onda promedio (m).
- Periodo de onda promedio (s).
- Dirección de onda promedio (grados, convención meteorológica)

$$\theta_m = a \tan\left(\frac{b}{a}\right)$$

- Extensión direccional promedio (grados).

$$\sigma_\theta = \left[ 2 \left\{ 1 - \left( \frac{a^2 + b^2}{E^2} \right)^{1/2} \right\} \right]^{1/2}$$

- Frecuencia de las olas de mayor energía (Hz).
- Dirección de las olas de mayor energía (grado), definida como la dirección promedio [Tolman, 2002: p.5-24]".

### **CAPITULO 3.- PROCESAMIENTO DE DATOS.**

### 3.1.- PROCESAMIENTO DE DATOS.

#### 3.1.1.- DATOS A PROCESAR.

Como se ha mencionado anteriormente se ha utilizado el modelo numérico Wave Watch III (WW3) de la NOAA. Este modelo divide a la tierra en puntos, conformando una malla o como se le denomina en inglés "GRID", formando pequeños rectángulos que en sus vértices tienen nodos de análisis sobre el cual se obtienen datos, los cuales se encuentran separados en 1 grado en latitud y 1.25 en longitud. En el presente trabajo se proporcionaron los datos de salida de dos puntos del GRID que mejor se adecúan en El Salvador para el análisis que deseamos realizar, los puntos son los nodos 13N 88.75W y 13N 90.00W, estos ya se mencionaron en la introducción y se encuentran detallados en la figura 1.

La información que se proporcionó son salidas del modelo, las cuales se encuentran en formato de texto, separada por comas y ordenadas de la siguiente manera: mes, día, año, hora, altura de oleaje (metros), período del oleaje (segundos), dirección del oleaje (grados), velocidad del viento (m/s) y dirección del viento (grados); como se puede observar en la figura 3.1, que es la forma en que se proporcionó la información. En dicha figura se presenta la información completa para un día en donde se pueden ver las salidas del programa cada 3 horas, conformando así 8 datos por día.

```
MONTH, DAY, YEAR, HOUR, WAVE HEIGHT(M), WAVE PERIOD,
WAVE DIRECTION, WIND SPEED(M/S), WIND DIRECTION
FEB, 01, 1997, 00, 0.3, 3.55, 40.79, 0.960208, 125.676
FEB, 01, 1997, 03, 0.26, 3.55, 41.25, 2.30124, 42.0056
FEB, 01, 1997, 06, 0.22, 5.16, 117.56, 2.80016, 334.625
FEB, 01, 1997, 09, 0.2, 5.19, 117.53, 3.64088, 35.6108
FEB, 01, 1997, 12, 0.18, 5.19, 117.23, 4.36794, 72.6849
FEB, 01, 1997, 15, 0.19, 5.22, 117.31, 5.74674, 63.2119
FEB, 01, 1997, 18, 0.16, 5.65, 158.1, 3.4442, 80.811
FEB, 01, 1997, 21, 0.14, 6.07, 195.98, 0.87784, 132.23
```

Figura 3.1. Formato de datos de salida del modelo WW3.

En la figura 3.1 se puede observar que las direcciones del viento y del oleaje se presentan en formato numérico (0 - 360°). La referencia de cero grados se encuentra en el norte de la

tierra y los grados se miden sucesivamente en dirección horaria como se muestra en la figura 3.2, en esta se puede observar que en 90, 180 y 270 grados se encuentra el Este (E), Sur (S) y Oeste (W) respectivamente. También se ha anexado un ejemplo en dicha figura que muestra como se interpreta un oleaje proveniente con una dirección de 225° ó con una dirección Suroeste (SW).

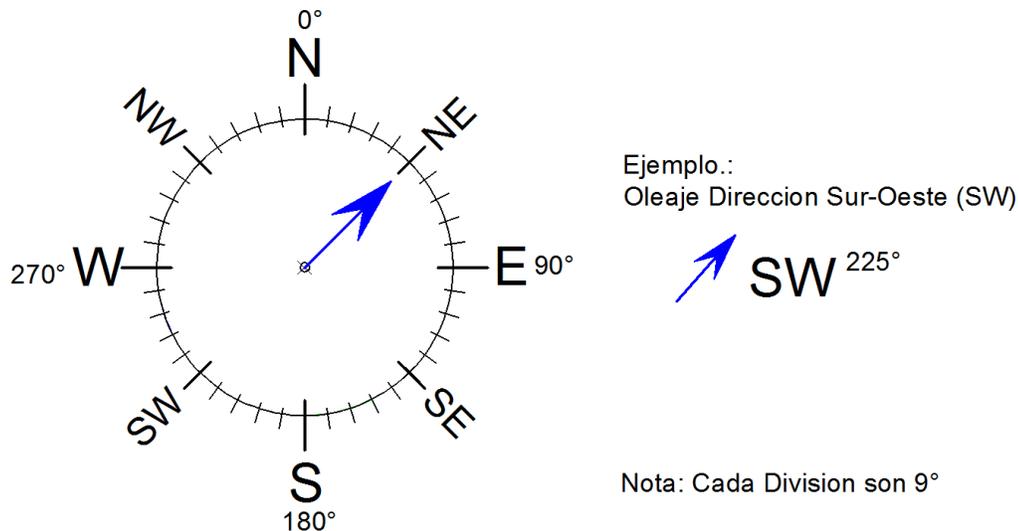


Figura 3.2.- Referencia para dirección del oleaje y velocidad del viento.

Los datos de las salidas del modelo para los dos puntos mencionados anteriormente fueron proporcionados por el Físico Dan Martin, que es uno de los programadores del modelo que actualmente trabaja en la NOAA y administrador de un sitio de información de oleaje que utiliza el modelo WW3 llamado “BuoyWeather”, cuyo sitio web es <http://www.buoyweather.com>.

### 3.1.2.- CARACTERÍSTICAS DE LOS DATOS.

Los datos a analizar tienen ciertas características que se describen a continuación:

- La velocidad del viento que se encuentra en los datos es la velocidad a 10 metros sobre el nivel del mar, debido a que esta es la que afecta el oleaje.
- El modelo global es para mar abierto y sin obstáculos para el viento y resuelve muy bien el oleaje en aguas profundas.

- Valores de datos de "9.999E+20" significa que son valores indefinidos, esto se puede interpretar que en ciertos tiempos y períodos el océano se puede volver tan calmado que el modelo no puede resolver el período o dirección, en pocas palabras valores indefinidos significa un océano calmado.
- Los vientos de huracanes no se podrán apreciar completamente en esta información debido a que los modelos globales no tienen la resolución necesaria para resolver vientos de tormentas tropicales.
- La información que se trabajó se puede verificar y validar en la página web de la NOAA que es <http://polar.ncep.noaa.gov>.
- El modelo utilizado es el global ya que en este se tienen los datos históricos de 11 años.

### **3.1.3.- HERRAMIENTAS UTILIZADAS PARA EL PROCESAMIENTO DE DATOS.**

Para el procesamiento de datos se utilizó un software llamado Matrix Laboratory ó en su abreviatura en inglés MATLAB, versión 2007<sup>a</sup>. El fuerte de este software computacional es que desarrolla algoritmos para automatizar tareas, cuya ventaja es que se puede trabajar la información en formato de matrices y vectores, lo cual es de mucha conveniencia debido a la cantidad de datos, como el formato de los datos a procesar.

Los algoritmos a desarrollar deben cumplir con una serie de requisitos, los cuales se mencionan a continuación:

- Ser capaces de leer matrices de datos en columnas, delimitados por coma y en formato de texto.
- Que sean capaces de realizar procesamientos estadísticos de los datos.

- Que se obtengan salidas visuales de los datos procesados en forma de gráficos que mejor representen los datos para los 11 años, para cada año y por estación seca y lluviosa.
- Generar información no solo visual, pero tabulada de los resultados obtenidos del procesamiento de datos.

El algoritmo principal se encuentra comprendido en el Anexo E.

### **3.1.4.- HERRAMIENTAS ESTADÍSTICAS UTILIZADAS.**

Con la información ordenada se recurrió a utilizar herramientas estadísticas, las cuales generan parámetros sobre las cuales se pueden hacer los respectivos análisis para la descripción del oleaje; donde las herramientas estadísticas utilizadas son las siguientes:

- Media: describe el valor promedio ó media aritmética de un rango de valores.
- Moda: describe el valor más frecuente o repetitivo en un rango de valores.
- Mediana: es el valor medio de una serie de números ó la tendencia central la cual corresponde a la mitad de un grupo de números en una distribución estadística.
- Desviación estándar: media aritmética de los cuadrados de las diferencias.
- Máximo: regresa el valor máximo de un rango de valores.
- Mínimo: regresa el valor mínimo de un rango de valores.
- Percentiles: un valor tal que supera un determinado porcentaje de los miembros de la población.

### **3.1.5.- ANALISIS DE SEÑALES.**

Para el procesamiento de señales se utilizó la transformada rápida de Fourier mediante la utilización de una caja de herramientas de Matlab llamada “TIME SERIES TOOLS” ó herramientas de series de tiempo. Esto se hizo con el fin de realizar periodogramas de energía para la serie de tiempo completa para altura significativa de oleaje y velocidad del viento.

“El registro de oleaje contiene información sobre el oleaje en el rango de frecuencias mostradas en la ecuación 3.1, donde T es la longitud de la serie de tiempo y  $\Delta$  es el intervalo de muestreo entre un dato y el otro. A este valor  $1/2\Delta$  se le denomina frecuencia de Nyquist. Por ende la longitud de toda la serie de tiempo es  $T = N \Delta$ , donde N es el número de datos. [Stewart, 2007: p.281]”

$$\frac{1}{T} < f < \frac{1}{2\Delta} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

En nuestro caso para ambas estaciones, se tiene un intervalo de muestreo de 3 horas lo cual equivale a un intervalo de muestreo de  $\Delta = 10,800$  segundos entre un dato y el otro.

Los periodogramas presentan información de frecuencia vs densidad espectral de potencia, dicha densidad espectral de potencia de una señal, en nuestro caso altura significativa de oleaje y velocidad del viento se interpreta como una función matemática que nos informa de cómo está distribuida la energía de dicha señal sobre las distintas frecuencias de las que está formada. “Intuitivamente, la densidad espectral de potencia nos sirve para identificar periodicidades escondidas en una función de variable discreta (secuencia de números) [Proakis, 2006: p.45]”

## **CAPITULO 4.- RESULTADOS.**

En esta sección se muestran los resultados obtenidos en el procesamiento de datos mediante Matlab, que se presentan a continuación para cada una de las estaciones.

#### 4.1.- RESULTADOS NODO 13N-88.75W.

##### 4.1.1.- RESULTADOS DE SERIES DE TIEMPO COMPLETO (1997-2007).

Las señales obtenidas para el nodo 13N-88.75W se presentan a continuación, para altura significativa del oleaje (metros) en la figura 4.1, dirección del oleaje (grados) en la figura 4.2, período del oleaje (segundos) en la figura 4.3, la velocidad del viento (m/s) en la figura 4.4 y dirección del viento (grados) en la figura 4.5. La referencia para velocidad del viento y dirección del oleaje es la misma de la figura 3.2 explicada en el capítulo 3.

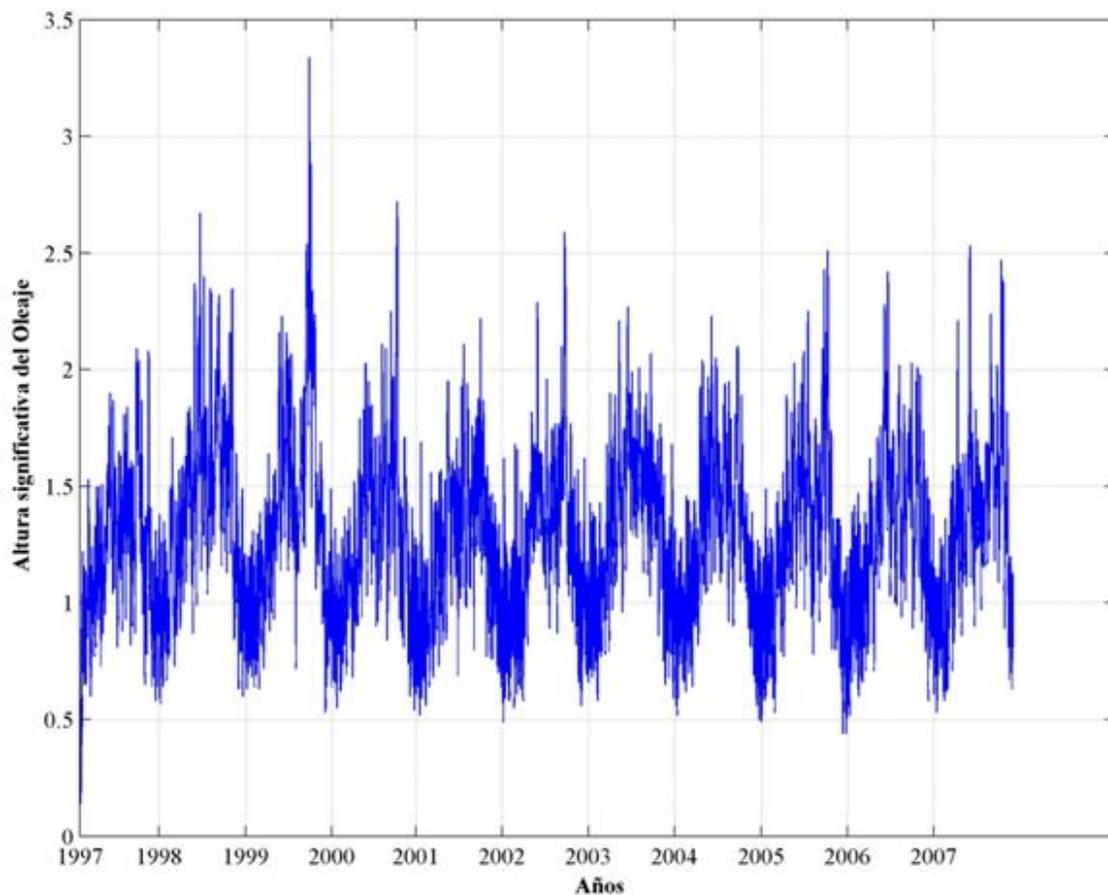


Figura 4.1.- Señal de altura significativa de oleaje (metros) para período de 1997-2007.

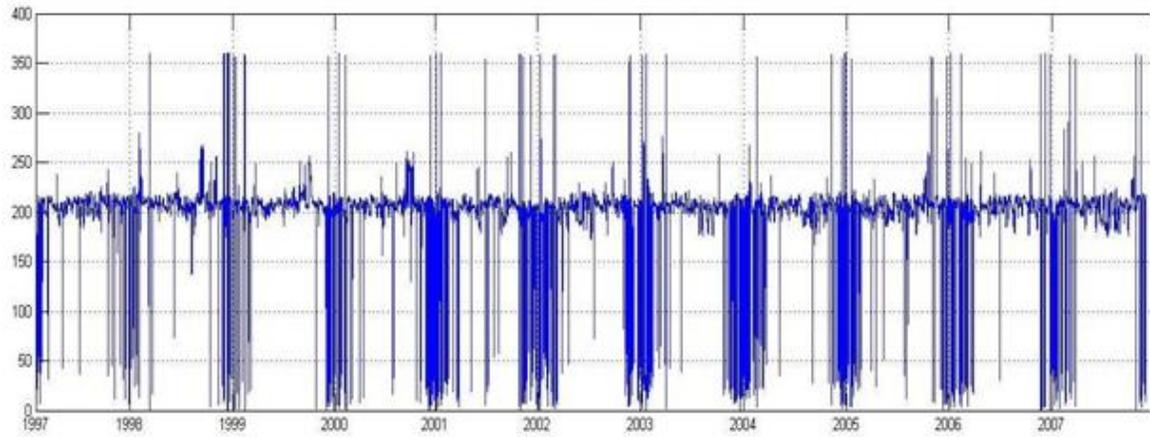


Figura 4.2.- Señal para dirección del oleaje (grados) de 1997-2007.

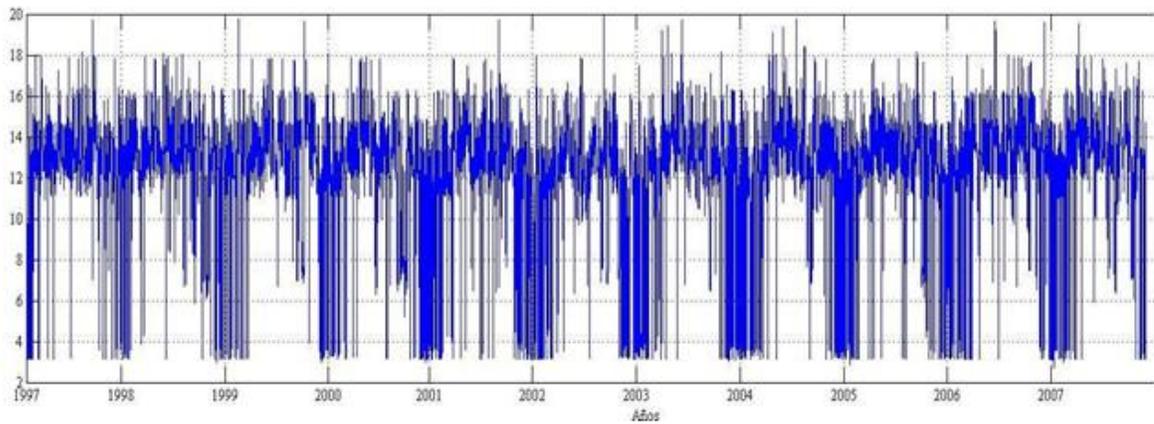


Figura 4.3.- Señal de período del oleaje (segundos) de 1997-2007.

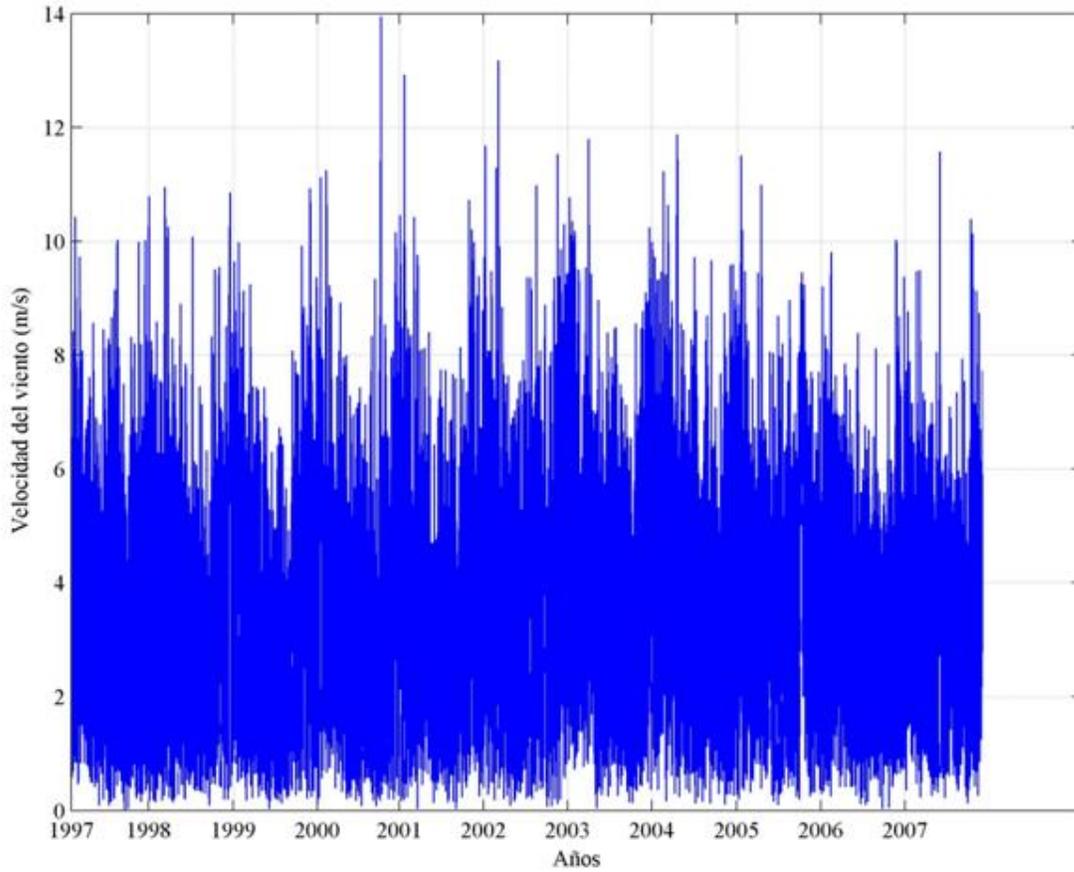


Figura 4.4.- Señal para velocidad del viento (m/s) de 1997-2007.

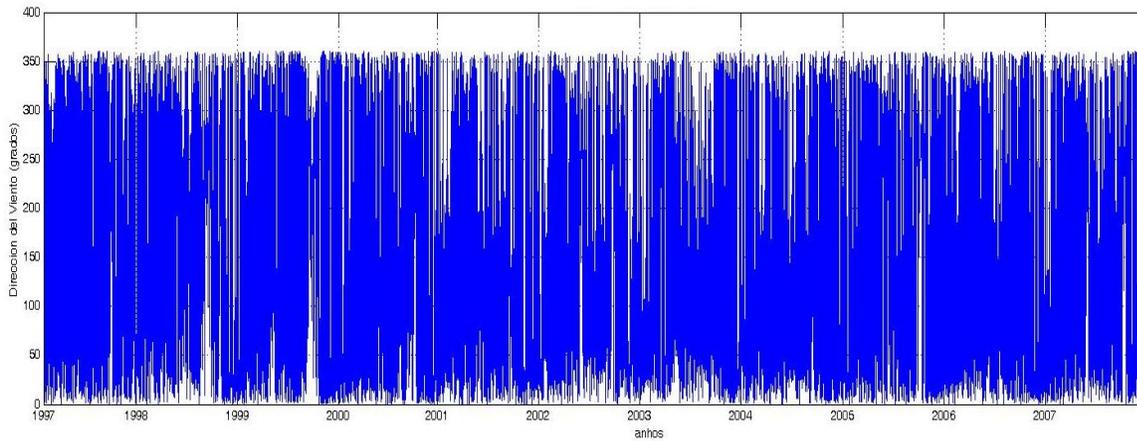


Figura 4.5.- Señal de dirección del viento (grados) para 1997-2007.

#### **4.1.2.- RESULTADOS DE SERIES DE TIEMPO ANUALES.**

Debido a la cantidad de señales anuales se incluyen en el anexo A las señales de altura de oleaje en metros y la velocidad del viento en m/s, los demás datos se trabajaron con las salidas del algoritmo directamente.

#### **4.1.3.- RESULTADOS DE SERIES DE TIEMPO MENSUALES Y ESTACIONALES.**

Para las series de tiempo estacionales se trabajó toda la información directamente de las salidas del algoritmo que se programó en Matlab debido a la cantidad de señales y resultados que se generan. De igual forma para las series de tiempo mensuales.

#### **4.2.- RESULTADOS NODO 13N-90.00W.**

##### **4.2.1.- RESULTADOS DE SERIES DE TIEMPO COMPLETO (1997-2007).**

Las señales obtenidas para el nodo 13N-90.00W se presentan a continuación, para altura significativa del oleaje (metros) en la figura 4.6, dirección del oleaje (grados) en la figura 4.7, período del oleaje (segundos) en la figura 4.8, la velocidad del viento (m/s) en la figura 4.9 y dirección del viento (grados) en la figura 4.10. La referencia para velocidad del viento y dirección del oleaje es la misma de la figura 3.2 explicada en el capítulo 3.

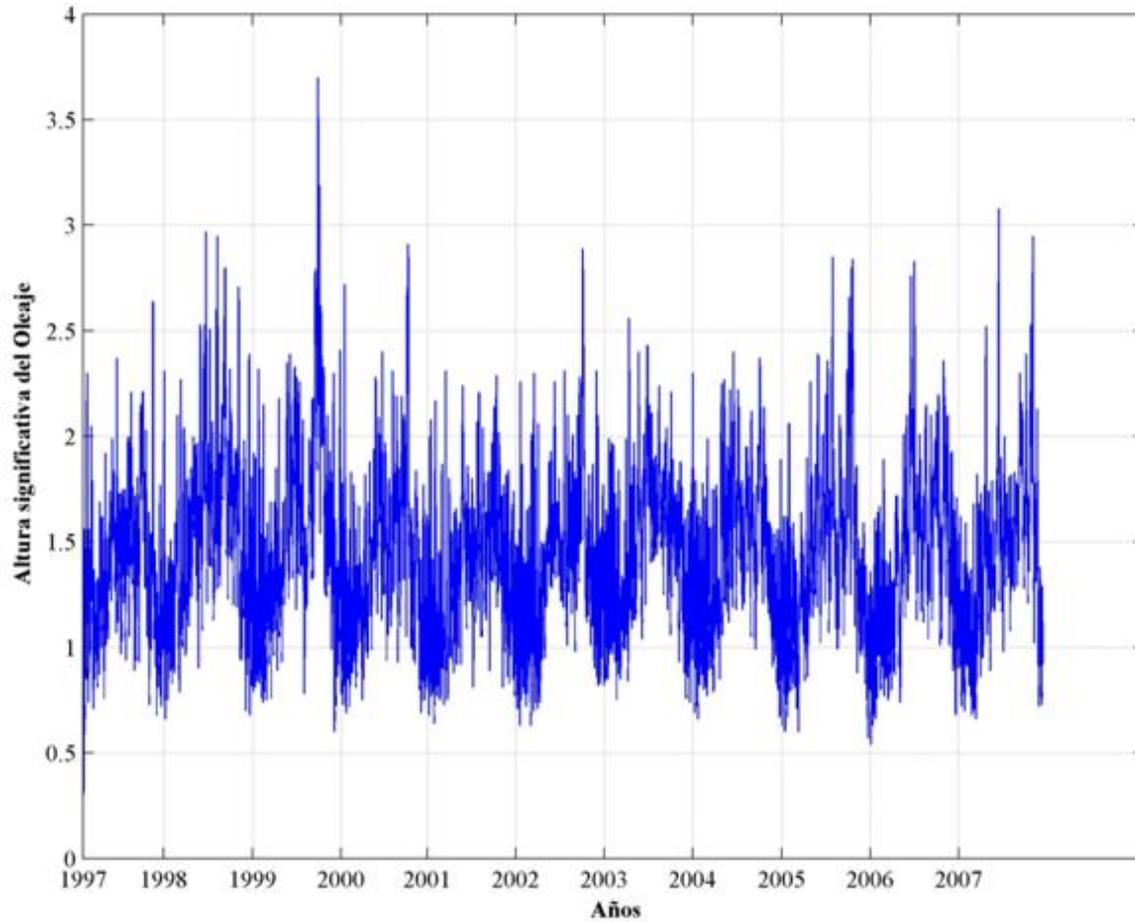


Figura 4.6.- Señal de altura significativa de oleaje (metros) para período de 1997-2007.

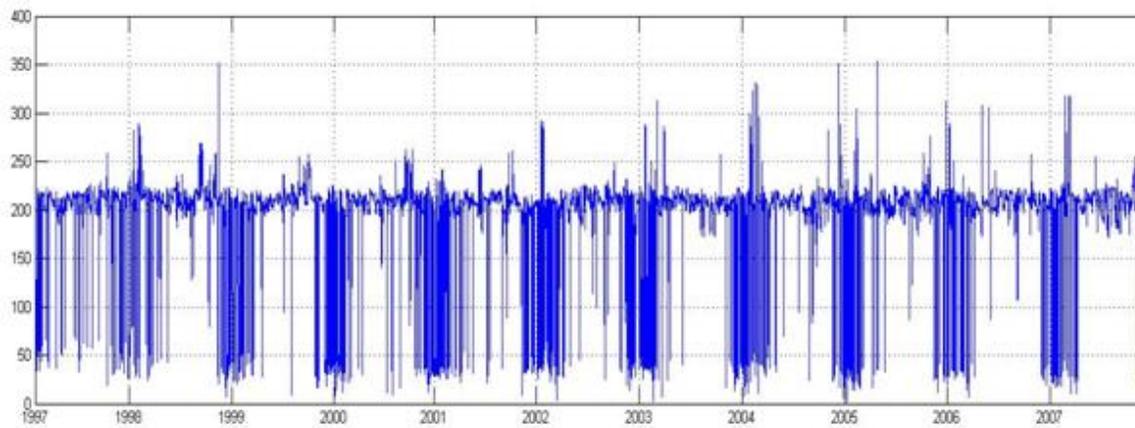


Figura 4.7.- Señal para dirección del oleaje (grados) de 1997-2007.

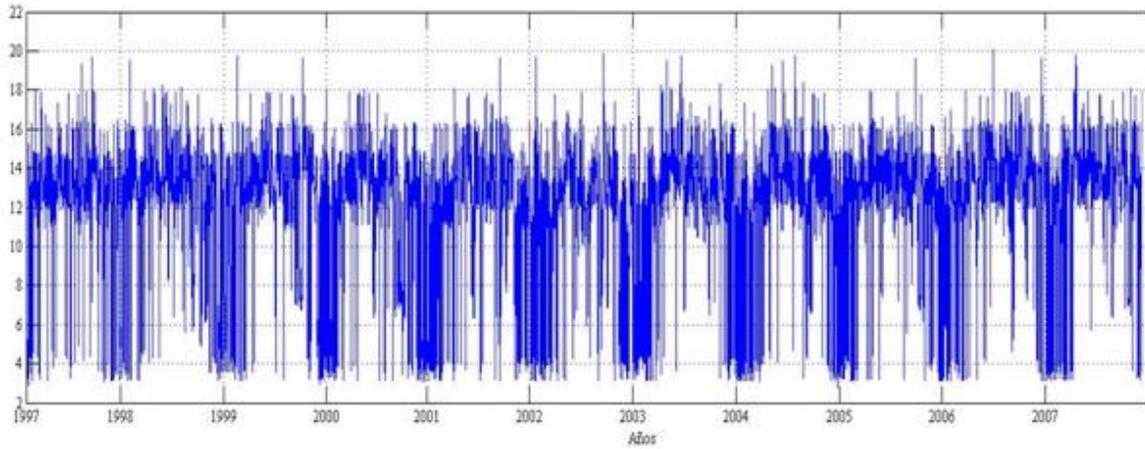


Figura 4.8.- Señal del período del oleaje (segundos) de 1997-2007.

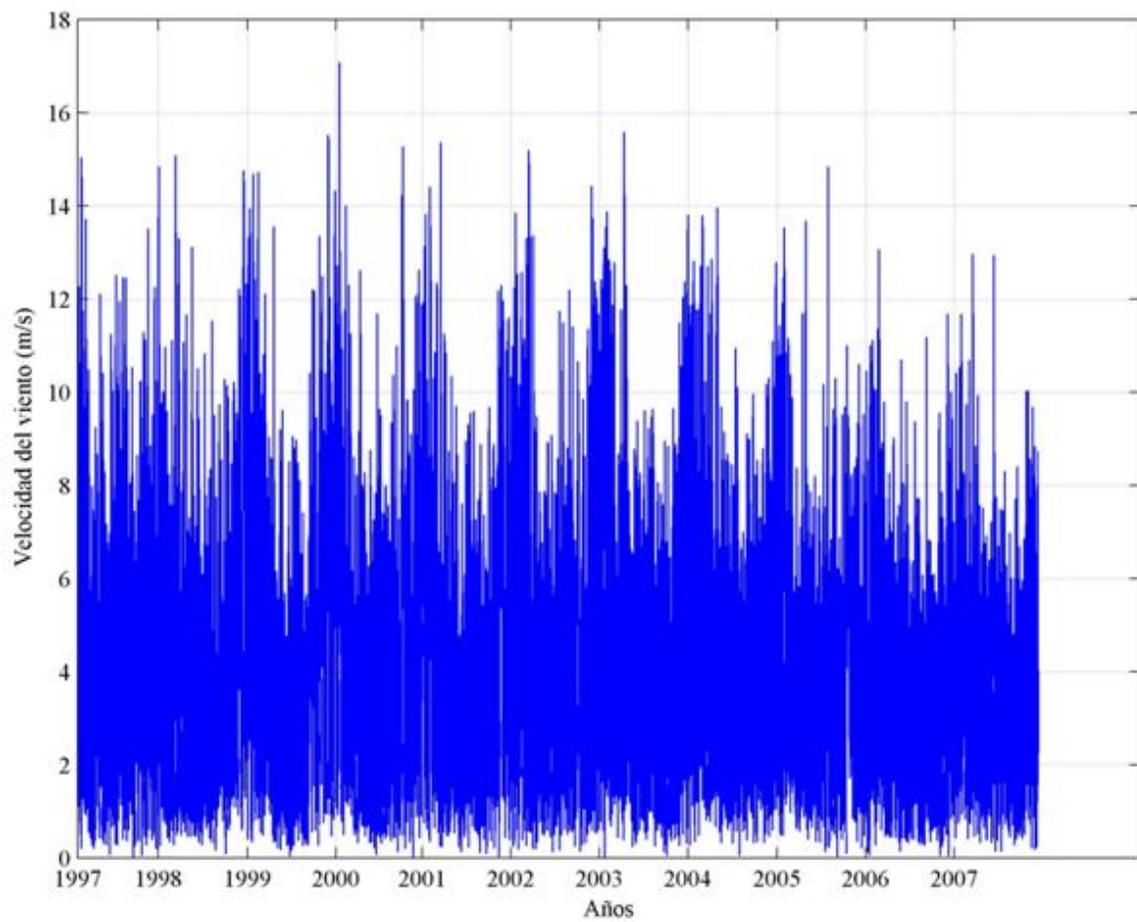


Figura 4.9.- Señal para velocidad del viento (m/s) de 1997-2007.

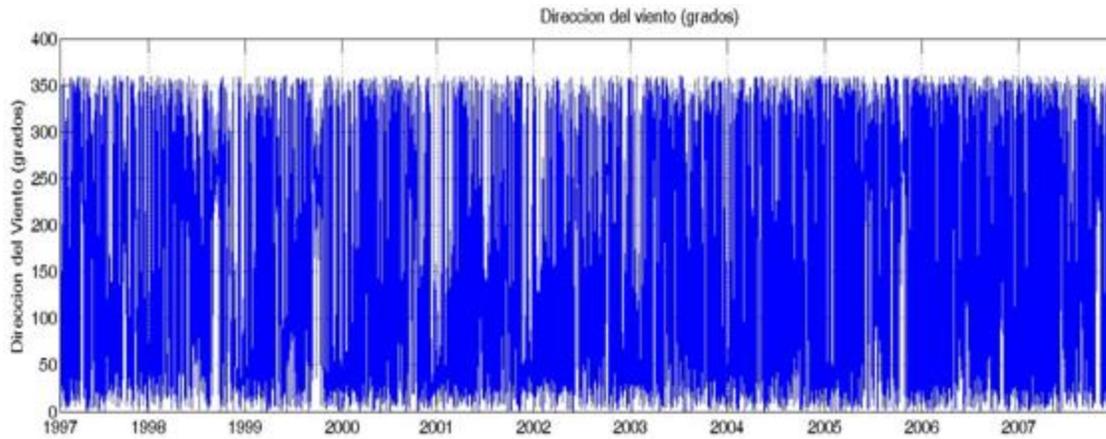


Figura 4.10.- Señal de dirección del viento (grados) para 1997-2007.

#### **4.2.2.- RESULTADOS DE SERIES DE TIEMPO ANUALES.**

Debido a la cantidad de señales anuales se incluyen en el anexo B las señales de altura de oleaje en metros y velocidad del viento en m/s, los demás datos se trabajaron con las salidas del algoritmo directamente.

#### **4.2.3.- RESULTADOS DE SERIES DE TIEMPO MENSUALES Y ESTACIONALES.**

Para las series de tiempo estacionales se trabajó toda la información directamente de las salidas del algoritmo que se programó en Matlab debido a la cantidad de señales y resultados que se generan. De igual forma para las series de tiempo mensuales.



## CAPITULO 5.- ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

Para poder describir mejor el oleaje y poder interpretar los datos, se realizaron análisis estadísticos de las series de tiempo completo, anual y mensual de la altura significativa del oleaje, velocidad del viento, dirección del oleaje, dirección del viento y el período del oleaje. Aunque se discutirá más en profundidad dichas variables, se han elaborado tablas que muestran valores estadísticos de estas, las cuales generalizan la cantidad de datos que se tienen y así poder tener un mejor entendimiento. En resumen se presentan valores estadísticos para la serie de tiempo completa en la tabla 5.1 para el nodo 13N-88.75W y en la tabla 5.2 el nodo 13N-90.00W. De igual forma para dirección del oleaje y viento se utiliza la misma convención de dirección que se detallo en el capítulo 3.

**Tabla 5.1.- Valores estadísticos de toda la serie de tiempo para 13N - 88.75W.**

	<b>promedio</b>	<b>máximo</b>	<b>mínimo</b>	<b>moda</b>	<b>desviación</b>
<i>Altura Significativa del Oleaje (m)</i>	1.2	3.3	0.1	1.2	0.4
<i>Velocidad del viento (m/s)</i>	3.9	13.9	0.0	2.8	2.0
<i>Dirección del oleaje (Grados)</i>	197	360	0	207	44
<i>Dirección del viento (Grados)</i>	138	360	0	45	107
<i>Periodo del oleaje (segundos)</i>	12.5	20.0	2.7	13.4	2.9

**Tabla 5.2.- Valores estadísticos de toda la serie de tiempo para 13N - 90.00W.**

	<b>promedio</b>	<b>máximo</b>	<b>mínimo</b>	<b>moda</b>	<b>desviación</b>
<i>Altura Significativa del Oleaje (m)</i>	1.4	3.7	0.3	1.3	0.4
<i>Velocidad del viento (m/s)</i>	4.6	17.1	0.0	4.2	2.6
<i>Dirección del oleaje (Grados)</i>	192	360	0	212	53
<i>Dirección del viento (Grados)</i>	142	360	0	90	107
<i>Periodo del oleaje (segundos)</i>	12.2	20.1	2.8	13.4	3.3

Para la serie de tiempo anual se presentan los valores estadísticos anuales en la tabla 5.3 para el nodo 13N-88.75W y la tabla 5.4 para el nodo 13N-90.00W. Estas contienen el promedio con la desviación estándar anual para todas las variables, menos para la dirección del viento, esto se debe a que la desviación estándar para esta variable es de 107 grados, esto se puede corroborar en la tabla 5.1 y 5.2 para la dirección del viento, por lo tanto se utilizó la moda para describir esta.

**Tabla 5.3.- Valores estadísticos anuales para 13N-88.75W.**

año	Altura Oleaje (m)		Dirección Oleaje (°)		Periodo Oleaje (seg)		Velocidad Viento (m/s)		Dirección Viento (°)
	Prom.	Desv.	Prom.	Desv.	Prom.	Desv.	Prom.	Desv.	Moda
1997	1.2	0.3	199.8	34.0	12.7	2.5	3.7	1.9	45.0
1998	1.3	0.4	205.6	35.3	12.6	2.7	3.6	2.0	135.0
1999	1.3	0.4	201.1	40.7	12.8	2.7	3.6	2.0	360.0
2000	1.2	0.4	198.9	46.1	12.1	3.0	3.7	2.0	14.0
2001	1.2	0.3	193.8	48.2	12.4	2.9	3.9	2.1	15.5
2002	1.2	0.4	192.0	50.3	11.8	3.1	4.1	2.1	135.0
2003	1.3	0.3	189.3	54.4	12.2	3.3	4.3	2.1	90.0
2004	1.2	0.3	193.4	47.3	12.5	3.0	4.2	2.1	49.4
2005	1.2	0.4	196.9	40.6	12.5	2.7	4.0	1.9	270.0
2006	1.2	0.3	198.2	41.0	12.9	2.7	3.7	1.7	45.0
2007	1.3	0.4	200.1	33.9	12.8	2.7	3.8	1.7	18.4

**Tabla 5.4.- Valores estadísticos anuales para 13N-90.00W.**

año	Altura Oleaje (m)		Dirección Oleaje (°)		Periodo Oleaje (seg)		Velocidad Viento (m/s)		Dirección Viento (°)
	Prom.	Desv.	Prom.	Desv.	Prom.	Desv.	Prom.	Desv.	Moda
1997	1.3	0.3	195.5	45.3	12.4	3.1	4.8	2.6	360.0
1998	1.5	0.4	200.3	49.1	12.4	3.1	4.5	2.7	270.0
1999	1.5	0.5	190.5	56.6	12.3	3.3	4.8	2.9	270.0
2000	1.4	0.4	188.8	59.9	11.7	3.5	4.6	2.7	90.0
2001	1.3	0.3	186.9	56.1	12	3.3	4.6	2.6	45.0
2002	1.4	0.3	184.1	59.2	11.4	3.5	4.8	2.7	90.0
2003	1.5	0.3	184.1	60.2	11.9	3.6	5.1	2.7	360.0
2004	1.4	0.3	189.0	55.5	12.1	3.5	4.8	2.4	38.7
2005	1.4	0.4	198.5	44.2	12.5	2.8	4.4	2.2	33.7
2006	1.4	0.4	196.6	45.0	12.8	2.9	4.1	2.1	26.6
2007	1.4	0.4	200.1	41.6	12.8	3.0	4.1	2.0	196.4

En las tablas 5.5 y 5.6 se encuentran los valores estadísticos por mes para toda la serie de tiempo, que muestra los valores promedios por mes de cada año para la serie de tiempo completa. Las tablas completas mensuales se pueden encontrar en el Anexo C para 13N-88.75W y Anexo D para 13N-90.00W.

**Tabla 5.5.- Valores estadísticos por mes de toda la serie de tiempo para 13N-88.75W.**

VALORES PROMEDIOS POR MES PARA TODA SERIE DE TIEMPO 1997-2007												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec
<b>A</b>	0.9	0.9	1.0	1.2	1.4	1.5	1.4	1.4	1.6	1.5	1.1	0.8
<b>Do</b>	165.2	186.7	197.7	204.3	205.8	206.0	205.2	204.3	209.8	207.9	191.7	154.2
<b>Pe</b>	10.5	11.6	12.5	13.6	13.7	13.4	13.2	13.0	12.8	12.4	11.8	10.6
<b>Vv</b>	4.8	4.3	4.2	3.9	3.4	3.3	3.6	3.3	3.2	3.9	4.2	4.5
<b>Dv</b>	96.6	125.5	151.3	173.2	157.4	153.2	121.6	139.1	173.1	160.6	104.1	86.7

**Tabla 5.6.- Valores estadísticos por mes de toda la serie de tiempo para 13N-90.00W.**

VALORES PROMEDIOS POR MES PARA TODA SERIE DE TIEMPO 1997-2007												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec
<b>A</b>	1.1	1.1	1.2	1.3	1.5	1.7	1.5	1.6	1.7	1.6	1.3	1.0
<b>Do</b>	148.6	175.7	191.5	203.9	207.6	208.3	206.4	205.5	212.7	208.5	180.8	134.2
<b>Pe</b>	9.7	10.9	12.2	13.5	13.7	13.4	13.1	12.9	12.7	12.4	11.4	9.9
<b>Vv</b>	6.0	5.3	4.6	4.3	3.8	3.8	4.1	3.8	3.9	4.6	5.3	5.8
<b>Dv</b>	101.3	129.7	146.7	169.8	151.5	158.2	127.3	138.7	190.0	161.4	109.7	90.3

Donde: A = Altura significativa del oleaje en metros.

Do = Dirección del oleaje en grados.

Pe = Período del oleaje en segundos.

Vv = Velocidad del viento en metros/segundos.

Dv= Dirección del viento en grados.

## 5.1.- ALTURA SIGNIFICATIVA DEL OLEAJE.

### ANÁLISIS DE SERIE DE TIEMPO COMPLETA.

Para la serie de tiempo completa nos podemos referir al capítulo 4 en la figura 4.1 y 4.6 que corresponden a las señales de altura significativa de oleaje anual para ambos nodos de análisis. A simple vista se puede identificar un patrón de comportamiento en la señal de altura significativa de oleaje y claramente se pueden identificar las 11 sub-señales anuales que la componen. Al referirnos en los datos estadísticos tenemos en la tabla 5.1 para el nodo 13N-88.75W un promedio de altura significativa de oleaje promedio de 1.2 metros, un valor máximo de registrado de 3.3 metros y una desviación estándar de 0.4 metros. En la tabla 5.2 correspondiente al nodo 13N-90.00W, tenemos un promedio de altura significativa de oleaje de 1.4 metros, un valor máximo de 3.7 metros y la desviación

estándar es de 0.4 que es idéntica al del nodo anterior. La altura de oleaje mostrada en este trabajo corresponde a la altura significativa que es el promedio de  $1/3$  de la altura más grande de un grupo de olas.

Otra característica de las señales, es que el mes en que se dan mayores alturas de oleaje es en septiembre y le sigue junio. De igual forma al observar ambas señales se puede notar que en la estación lluviosa las alturas de oleaje son mayores a las del promedio de la serie de tiempo completa y en la estación seca las alturas son menores.

Se puede apreciar que los valores de altura significativa de la tabla 5.2 que corresponde al nodo más lejano o aguas profundas (13N-90.00W), son mayores que los valores de la tabla 5.1 que corresponde al nodo más cercano o aguas poco profundas (13N-88.75W). Esto sucede de igual manera al comparar ambas señales de altura significativa de oleaje contenidas en la figura 4.1 y 4.6, donde claramente se puede observar que el nodo más alejado registra alturas significativas mayores en su señal que el nodo cercano.

Esto se debe a que el nodo 13N-90.00W se encuentra sobre el talud continental, la cual es la zona en la que el fondo del mar tiene una profundidad mayor a los 200 metros, por lo que el oleaje no es afectado por la fricción con el fondo del mar, lo cual no disminuye la altura del oleaje por la fricción del fondo (energía potencial). Es por eso que este nodo es representativo para el oleaje en aguas profundas.

El nodo 13N-88.75W es más representativo para el oleaje en aguas poco profundas (cercanas a la costa), debido a que este se encuentra sobre la plataforma continental en donde el fondo del océano se encuentra a una profundidad menor a los 200 metros, por lo cual el oleaje sí es afectado por la fricción con el fondo del mar disminuyendo su energía potencial con una relación de dispersión para aguas poco profundas y valores de velocidad de fase que dependen únicamente de la profundidad del océano. Mientras que a diferencia del nodo 13N-90.00W, en el cual la relación de dispersión y velocidad de fase dependen de la longitud de onda y frecuencia de onda, las cuales no son afectadas por la profundidad del océano.

## ANÁLISIS ANUAL.

Aunque en las tablas 5.3 y 5.4 se presentaron los valores promedio y desviación estándar para ambos nodos por cada año, se presentan en las tablas 5.7 y 5.8 valores estadísticos de altura significativa de oleaje para los nodos 13N-88.75W y 13N-90.00W, adicionalmente en el anexo A y B se encuentran las señales anuales para ambos nodos respectivamente.

De las tablas 5.7 y 5.8 se pueden obtener ciertas características, el valor de la moda que es el valor más frecuente en una serie, coincide casi siempre con el del promedio de altura significativa de oleaje para todos los años y para ambos nodos. Los valores estadísticos para el nodo 13N-90.00W son mayores a los del nodo 13N-88.75W. Para ambos nodos el valor de la desviación estándar se encuentra en un rango de 0.3 a 0.4 metros.

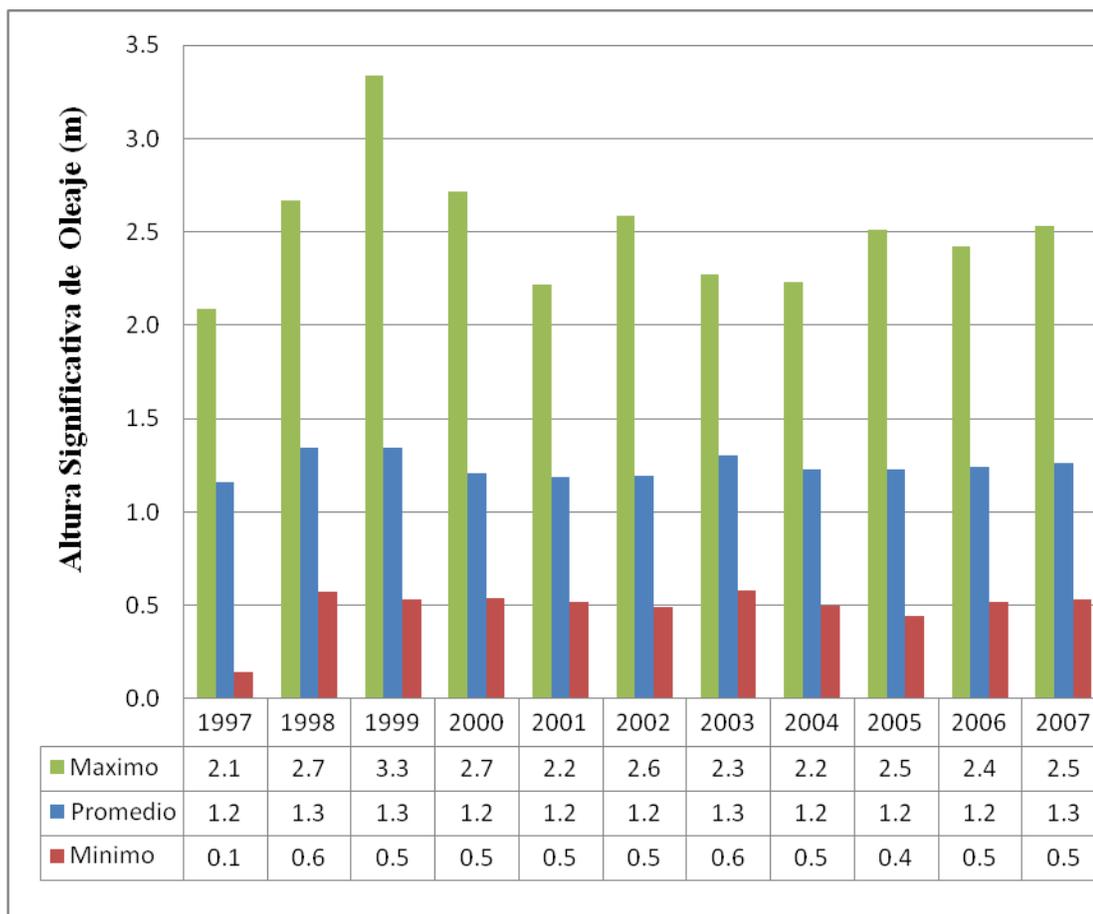
Para facilidad de interpretación de los datos se han generado histogramas para los nodos 13N-88.75W y 13N-90.00W en las figuras 5.1 y 5.2 respectivamente.

**Tabla 5.7.- Estadísticos Anuales para altura significativa de oleaje de 13N-88.75W.**

<b>año</b>	<b>promedio</b>	<b>máximo</b>	<b>min</b>	<b>moda</b>	<b>desviación</b>
<b>1997</b>	1.2	2.1	0.1	1.2	0.3
<b>1998</b>	1.3	2.7	0.6	1.4	0.4
<b>1999</b>	1.3	3.3	0.5	1.3	0.4
<b>2000</b>	1.2	2.7	0.5	1.3	0.4
<b>2001</b>	1.2	2.2	0.5	1.3	0.3
<b>2002</b>	1.2	2.6	0.5	1.2	0.4
<b>2003</b>	1.3	2.3	0.6	1.4	0.3
<b>2004</b>	1.2	2.2	0.5	1.2	0.3
<b>2005</b>	1.2	2.5	0.4	1.1	0.4
<b>2006</b>	1.2	2.4	0.5	1.2	0.3
<b>2007</b>	1.3	2.5	0.5	1.2	0.4

**Tabla 5.8.- Estadísticos Anuales de altura significativa de oleaje para 13N-90.00W.**

año	promedio	máximo	min	moda	desviación
1997	1.3	2.6	0.3	1.4	0.3
1998	1.5	3	0.7	1.4	0.4
1999	1.5	3.7	0.6	1.4	0.5
2000	1.4	2.9	0.7	1.2	0.4
2001	1.3	2.3	0.6	1.3	0.3
2002	1.4	2.9	0.6	1.3	0.3
2003	1.5	2.6	0.7	1.6	0.3
2004	1.4	2.4	0.6	1.4	0.3
2005	1.4	2.9	0.5	1.3	0.4
2006	1.4	2.8	0.7	1.6	0.4
2007	1.4	3.1	0.7	1.5	0.4



**Figura 5.1.- Histograma de estadísticos de altura significativa de oleaje por año para 13N-88.75W.**

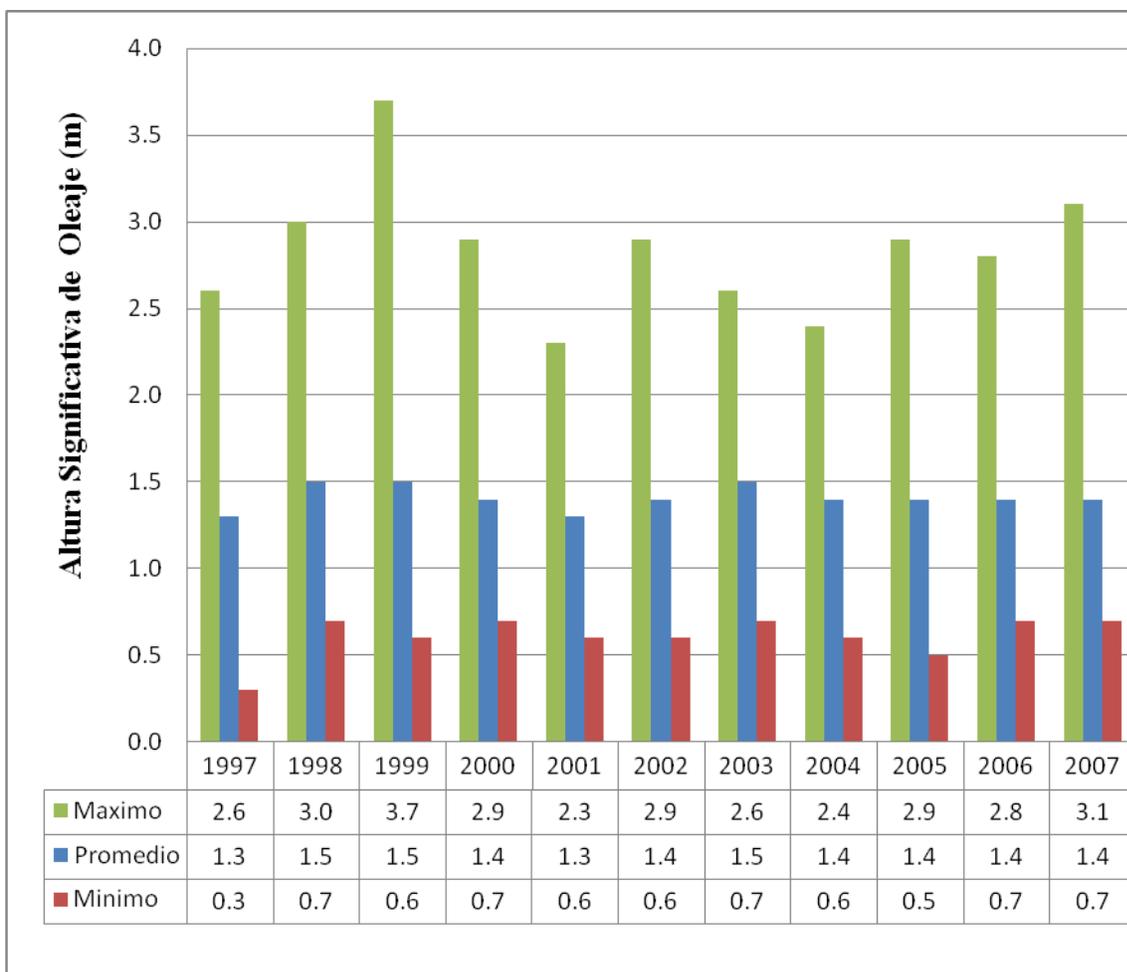


Figura 5.2.- Histograma de estadísticos de altura significativa de oleaje por año para 13N-90.00W.

En base a los histogramas de las figuras 5.1 y 5.2, se puede observar una variación anual de los máximos con una brecha de 3 años, como se observa en los años 1999, 2002 y 2005, donde se dan valores máximos, luego en los años posteriores hasta el 2007 se mantienen las alturas significativas casi constantes. En el año de 1999 se registró el valor máximo, que es de 3.3 metros para el nodo cercano y 3.7 para el nodo más alejado.

Para comparar el oleaje, en el nodo más lejano con el nodo cercano, se han sobrepuestos los promedios de altura significativa anual en la figura 5.3.

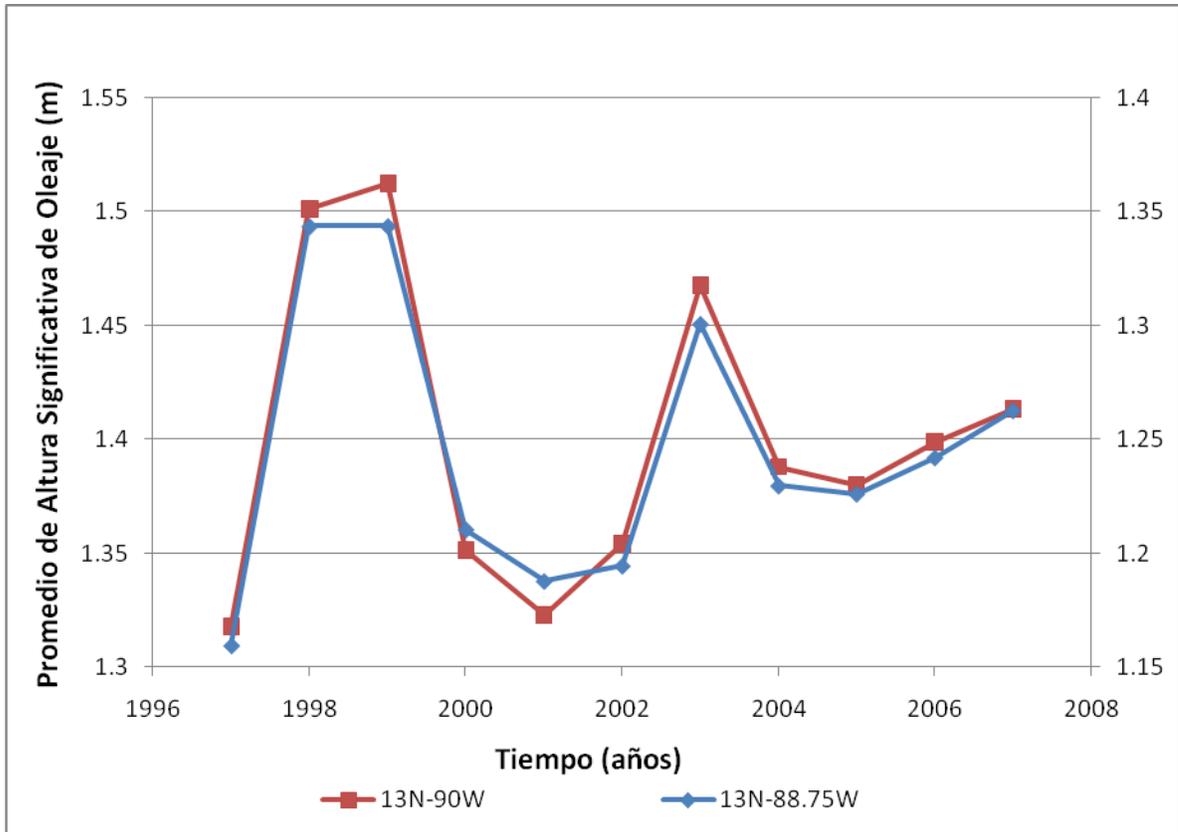


Figura 5.3.- Comparación de promedios de alturas significativas de oleaje para ambos nodos.

#### ANÁLISIS MENSUAL.

Para el análisis mensual se han generado dos diagramas de barra que contienen los promedios de altura significativa del oleaje por mes, desde 1997 hasta 2007, al nodo 13N-88.75W le corresponde a la figura 5.4 al nodo 13N-90.00W la figura 5.5.

Utilizando las figuras mencionadas anteriormente y los valores estadísticos del promedio de altura significativa mensual mostrados en las tablas 5.5 y 5.6, se puede corroborar varias hipótesis planteadas anteriormente. Entre estos, para ambos nodos se tiene que en la estación lluviosa (mediados de mayo a mediados de octubre) los promedios mensuales de altura significativa de cada mes son mayores al promedio de la serie de tiempo completa, que es de 1.2 metros para el nodo 13N-88.75W y 1.4 metros para el nodo 13N-90.00W. Lo mismo ocurre también para los promedios anuales, en que dichos meses el promedio de altura significativa es casi siempre mayor al promedio de altura significativa de oleaje

anual. Mientras que para la estación seca (mediados de octubre a mediados de mayo), los promedios mensuales son menores a los promedios de altura significativa de la serie completa o anual. De igual forma en septiembre, es cuando se dan las mayores alturas significativas de todos los meses, luego le sigue el mes de junio.

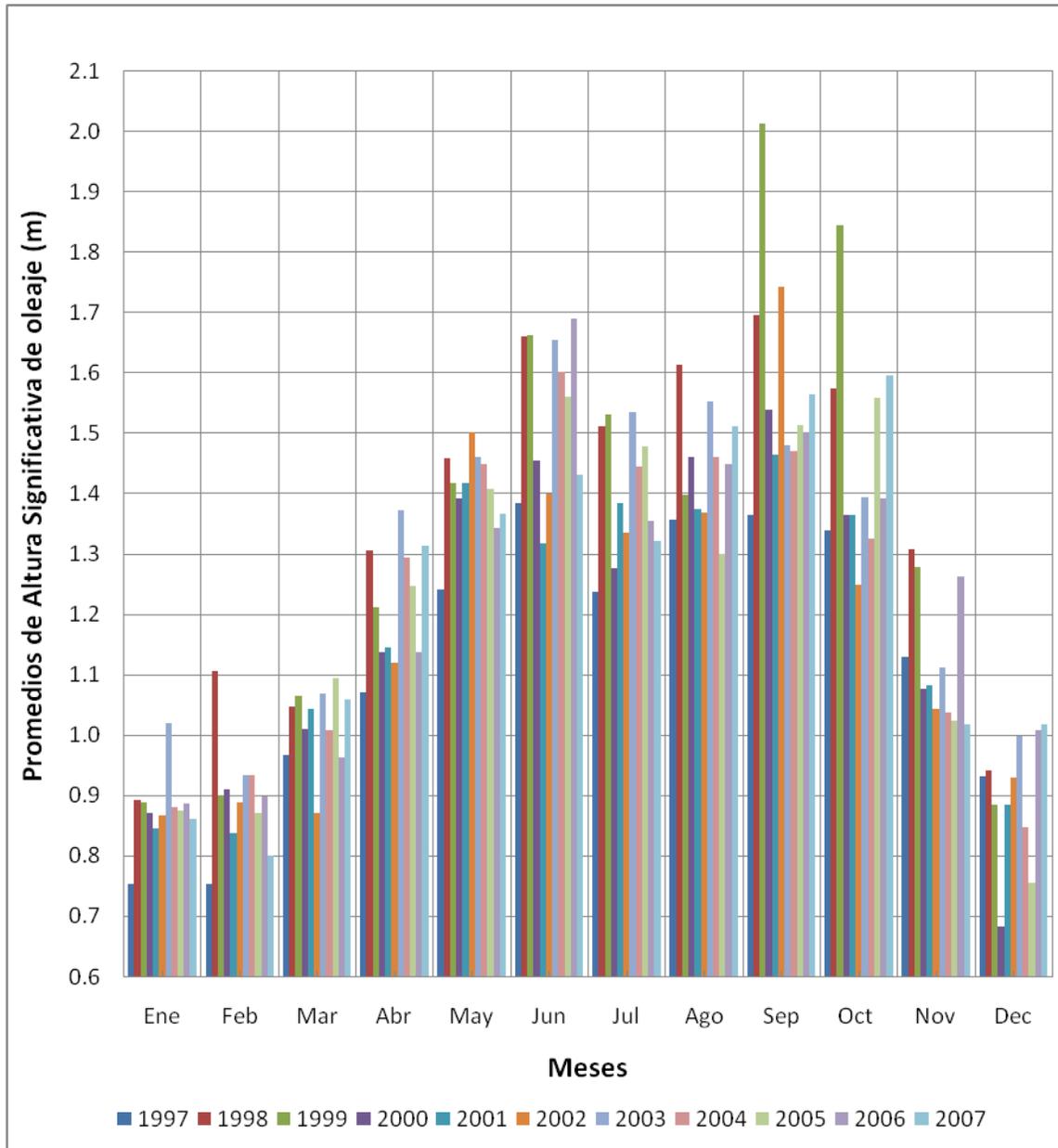


Figura 5.4.- Promedios de altura significativa de oleaje mensual para 13N-88.75W.

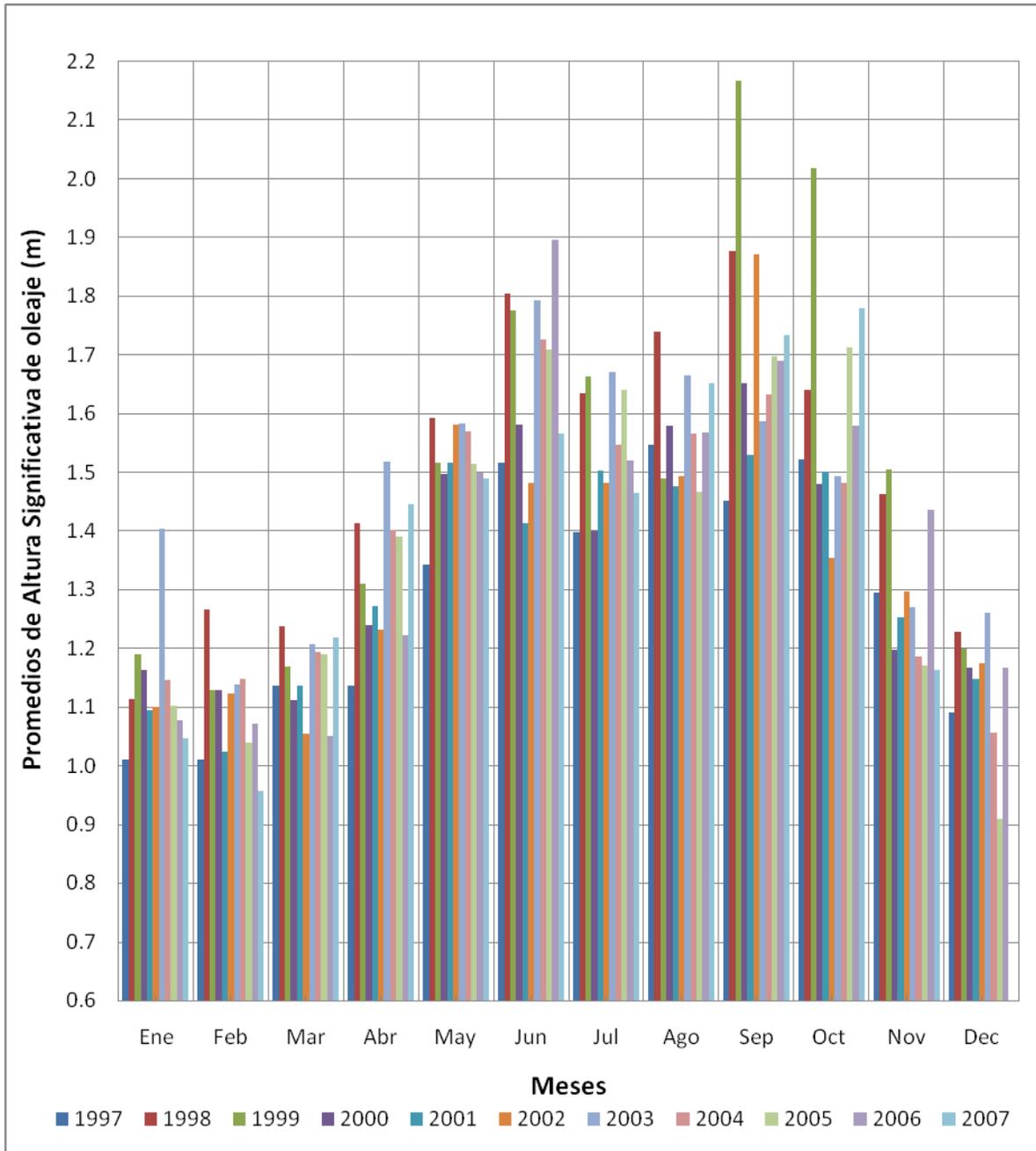


Figura 5.5.- Promedios de altura significativa de oleaje mensual para 13N-90.00W.

Otra característica de la serie de tiempo mensual, es que el mes que tiene menores alturas significativas de oleaje es diciembre. Para el nodo más alejado, los promedios de altura significativa de oleaje son constantes del mes de diciembre a marzo; mientras que en el nodo cercano son enero y febrero. Para la estación seca, el mes de abril tiene los valores de altura significativa mayores para ambos nodos, siguiéndole el mes de noviembre.

En las tablas 5.9 y 5.10, se presentan los estadísticos de la estación seca y lluviosa para los nodos 13N-88.75W y 13N-90.00W respectivamente. Los estadísticos mostrados en dichas tablas, fueron obtenidos a partir de la separación de los meses que conforman la estación seca durante la serie completa de tiempo, de los meses que conforman la estación lluviosa de la serie completa de tiempo.

**Tabla 5.9.- Estadísticos según estación de altura significativa de oleaje para 13N-88.75W.**

Estación	Promedio	Máximo	Mínimo	Moda	Desviación estándar
Seca	1.1	2.9	0.1	1.0	0.3
Lluviosa	1.4	3.3	0.7	1.3	0.3

**Tabla 5.10.- Estadísticos según estación de altura significativa de oleaje para 13N-90.00W.**

Estación	Promedio	Máximo	Mínimo	Moda	Desviación estándar
Seca	1.2	2.7	0.3	1.1	0.3
Lluviosa	1.6	3.7	0.8	1.5	0.3

En las tablas 5.9 y 5.10, se observa que para ambos nodos, los valores estadísticos de altura significativa de oleaje son mayores en la estación lluviosa que en la estación seca. Los máximos valores registrados se registran en ambos casos para la estación lluviosa, en el cual se puede apreciar que ambos valores de moda de la estación lluviosa son mayores al valor promedio de la serie de tiempo total presentado en las tablas 5.1 y 5.2.

De igual forma se comprueba que los valores máximos de oleaje, se dan en la estación lluviosa y no en la seca.

## **5.2.- VELOCIDAD DEL VIENTO.**

Hay que tener en cuenta que la velocidad del viento tiene una función importante en el análisis, porque que dota de Energía Potencial al oleaje, la cual afecta a la altura de oleaje.

## ANÁLISIS DE SERIE DE TIEMPO COMPLETA.

Para la serie de tiempo completa, los valores estadísticos de velocidad de viento que se presentan en las tablas 5.1 y 5.2; se tiene que para el nodo 13N-88.75W la velocidad de viento promedio es de 3.9 m/s y para el nodo 13N-90.00W es de 4.6 m/s, los valores de desviación estándar tienen valores de 2 y 2.6 m/s respectivamente, así como modas de 2.8 y 4.2 m/s respectivamente. En general, así como en la altura significativa del oleaje, los estadísticos de velocidad de viento para el nodo más alejado son mayores que para el nodo cercano a nuestras costas.

De igual forma al observar las señales de velocidad de viento comprendidas en la figura 4.4 para el nodo cercano y la figura 4.9 para el nodo alejado, se puede observar una tendencia central con un rango de velocidades de viento con valores de de 2 a 5.6 m/s para el nodo cercano (13N-88.75W) y de 2.5 a 6 m/s para el nodo alejado (13N-90.00W), que coincide al valor promedio +/- la desviación estándar para ambos nodos.

## ANÁLISIS ANUAL.

Para el análisis anual se han creado dos tablas las cuales contienen los estadísticos anuales, para el nodo 13N-88.75W corresponde la tabla 5.11 y para el nodo 13N-90.00W corresponde la tabla 5.12. De las tablas 5.11 y 5.12 se pueden observar ciertas características, la primera es que los valores promedios anuales del nodo cercano son menores a las del nodo lejano. Los datos de velocidad de viento promedio entre un nodo y el otro tienen distinto comportamiento, por ejemplo en la tabla 5.11 la velocidad de viento promedio crece gradualmente desde 1998 con un valor de 3.6 m/s hasta el 2003 con un valor promedio máximo de 4.3 m/s; mientras que en la tabla 5.12 para el nodo 13N-90.00W, no se da este mismo comportamiento; sin embargo estos coinciden que el año con mayor velocidad de viento promedio fue en el 2003 con un valor de 4.3 m/s para el nodo cercano y 5.1 para el nodo lejano. Otra característica es que los valores máximos no varían tan drásticamente unos con los otros de un nodo a otro.

**Tabla 5.11.- Estadísticos Anuales de la velocidad del viento para 13N-88.75W (m/s).**

<b>año</b>	<b>promedio</b>	<b>máximo</b>	<b>min</b>	<b>moda</b>	<b>desviación</b>
<b>1997</b>	3.7	10.4	0	0.5	1.9
<b>1998</b>	3.6	11	0.1	0.8	2
<b>1999</b>	3.6	10.9	0	1	2
<b>2000</b>	3.7	13.9	0.1	0.2	2
<b>2001</b>	3.9	12.9	0	1.1	2.1
<b>2002</b>	4.1	13.2	0.1	2.2	2.1
<b>2003</b>	4.3	11.8	0	1.1	2.1
<b>2004</b>	4.2	11.9	0.1	1.6	2.1
<b>2005</b>	4	11.5	0.1	2.6	1.9
<b>2006</b>	3.7	10	0	1.5	1.7
<b>2007</b>	3.8	11.6	0.1	3.2	1.7

**Tabla 5.12.- Estadísticos Anuales de la velocidad del viento para 13N-90.00W (m/s).**

<b>año</b>	<b>promedio</b>	<b>máximo</b>	<b>min</b>	<b>moda</b>	<b>desviación</b>
<b>1997</b>	4.8	15	0	2.4	2.6
<b>1998</b>	4.5	15.1	0.1	0.5	2.7
<b>1999</b>	4.8	15.5	0	3.1	2.9
<b>2000</b>	4.6	17.1	0	2.3	2.7
<b>2001</b>	4.6	15.4	0	1	2.6
<b>2002</b>	4.8	15.2	0.1	2.7	2.7
<b>2003</b>	5.1	15.6	0	1.3	2.7
<b>2004</b>	4.8	14	0.1	0.3	2.4
<b>2005</b>	4.4	14.8	0	0.6	2.2
<b>2006</b>	4.1	13.1	0	2.2	2.1
<b>2007</b>	4.1	13	0.1	2.5	2

#### ANÁLISIS MENSUAL.

Para el análisis mensual se presentan dos histogramas en las figuras 5.6 y 5.7, las cuales contienen valores promedios mensuales de velocidad de viento para la serie de tiempo completa en los nodos 13N-88.75W y 13N-90.00W respectivamente. De las figuras se puede corroborar que en diciembre y enero es cuando se dan las mayores velocidades del viento; en este caso, lo reflejan bien los promedios de velocidad de viento en las figuras 5.6 y 5.7. De igual forma podemos hacer referencia a los anexos A y B, donde se encuentran

las señales de velocidad de viento y poder observar lo que se ha mencionado anteriormente.

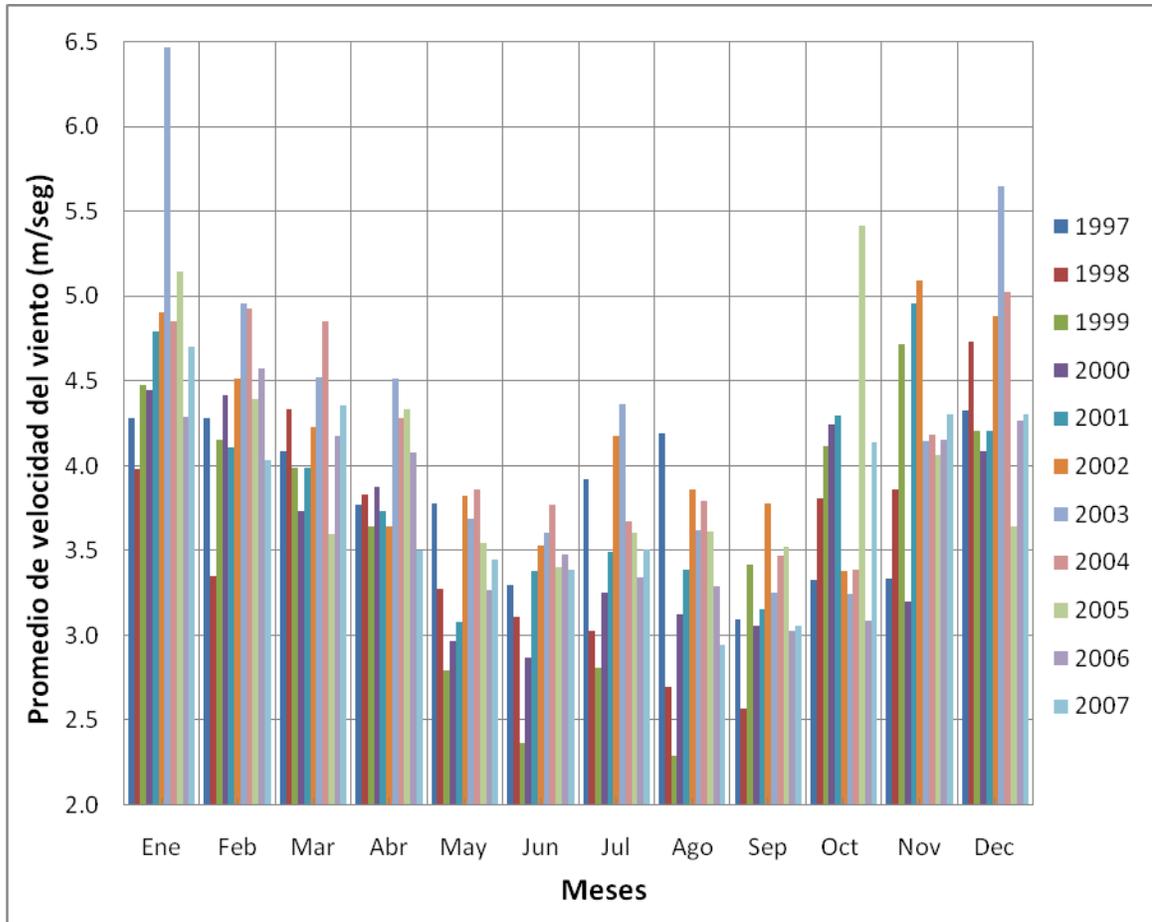


Figura 5.6.- Estadístico de promedio de velocidad del viento para 13N-88.75W.

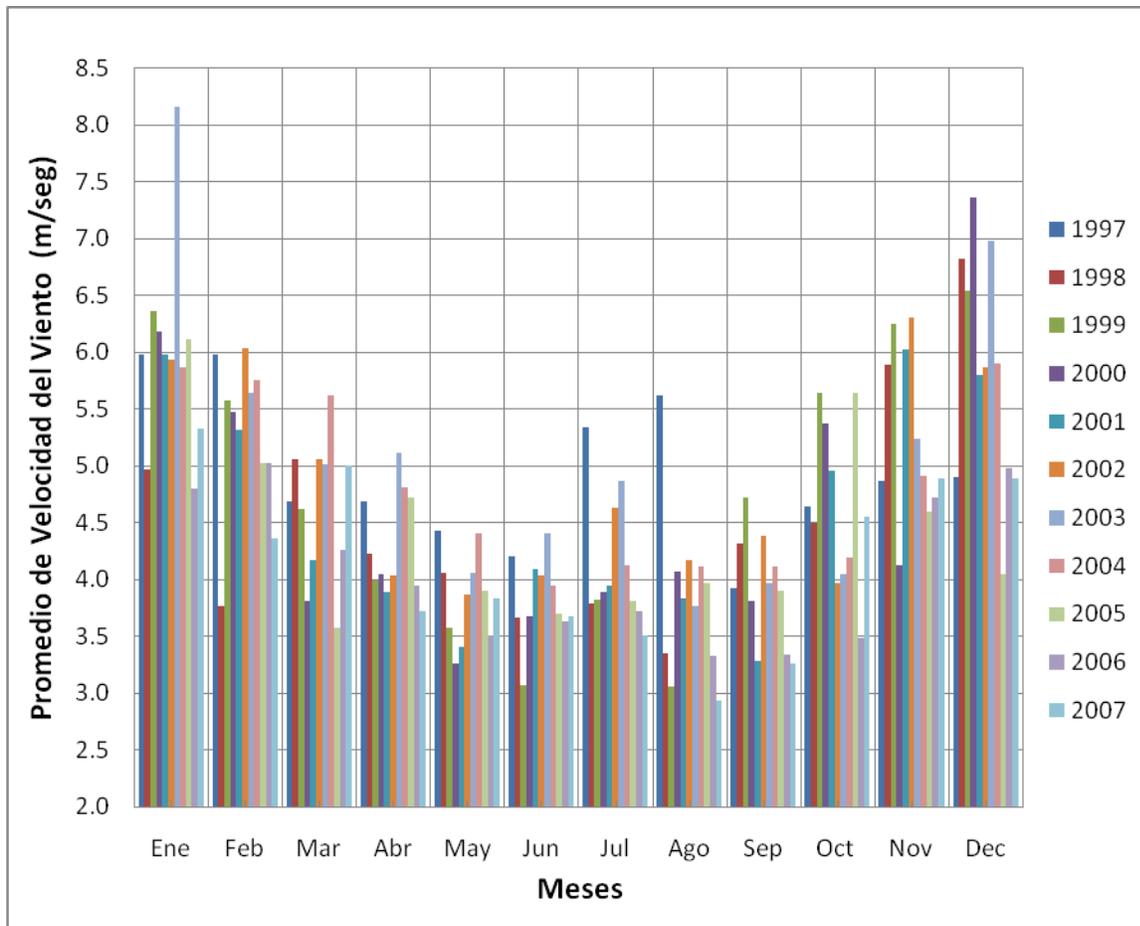


Figura 5.7.- Estadístico de promedio de velocidad del viento para 13N-90.00W.

Se puede apreciar que para los meses de noviembre a marzo (meses que corresponden a la estación seca), se muestran velocidades de viento mayores. Las cuales se pueden corroborar al observar los promedios anuales para la velocidad del viento del nodo 13N-88.75W (3.9 m/s) mostrados en la tabla 5.1 y los promedios mensuales de noviembre a marzo de la figura 5.6. De igual manera en la tabla 5.13 se presentan los estadísticos para la estación seca y lluviosa para la velocidad del viento para el nodo cercano, lo que más llama la atención de la tabla 5.13, es lo que se planteó anteriormente y es que en la estación seca la velocidad del viento promedio es de 4.3 m/s (arriba del promedio anual), mientras que en la estación lluviosa tenemos un promedio de velocidad de 3.5 (abajo del promedio anual). Lo mismo sucede para el nodo 13N-90.00W, al observar el histograma de la figura 5.7, con la tabla 5.2 de los promedios de la serie de tiempo completa y la tabla 5.14 que contiene los estadísticos estacionales.

**Tabla 5.13.- Estadísticos según Estación de la velocidad del viento para 13N-88.75W (m/s).**

<b>Estación</b>	<b>Promedio</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Moda</b>	<b>Desviación estándar</b>
Seca	4.3	13.9	0.1	2.0	2.1
Lluviosa	3.5	12.0	0.0	1.8	1.7

**Tabla 5.14.- Estadísticos según Estación de la velocidad del viento para 13N-90.00W (m/s).**

<b>Estación</b>	<b>Promedio</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Moda</b>	<b>Desviación estándar</b>
Seca	5.2	17.1	0.1	2.4	2.8
Lluviosa	4.0	15.3	0.0	1.3	2.1

Una característica que resalta la atención es que al observar los gráficos de las figuras 5.6 y 5.7, de la velocidad promedio del viento mensual y luego al observar las figuras 5.4 y 5.5, que corresponden a los gráficos de promedio de altura significativa del oleaje mensual, se puede decir que son inversamente proporcional unas de las otras. Esto también se puede observar en los anexos A y B ya que en estos se encuentran las señales anuales para altura significativa del oleaje y velocidad del viento.

Esto comprueba que definitivamente en nuestra estación seca tenemos mayores velocidades de viento pero alturas significativas de oleaje menores, mientras que en la estación lluviosa tenemos alturas significativas de oleaje mayores pero velocidades de viento menores.

Se pueden hacer varias suposiciones sobre este fenómeno y una es que si el aire sopla en dirección al mar de leva, dota de energía cinética a la ola, la cual se combina con la energía potencial que lleva la ola, incrementando la altura y periodo del oleaje, entendiéndose esto como un aporte de energía.

Pero si en su contraparte el viento soplara en dirección contraria, lo que haría es funcionar como un tipo de amortiguador, entendiéndose como una disminución de energía, disminuyendo la altura y período del oleaje. Sin embargo esta solamente es una suposición generalizada ya que hay tantos factores que hay que tomar en cuenta y no entra en el contexto del presente trabajo de graduación.

### 5.3. DIRECCIÓN DEL VIENTO.

#### ANÁLISIS DE SERIE DE TIEMPO COMPLETA.

De los datos estadísticos para dirección del viento de la serie completa contenida en la tabla 5.1, se puede afirmar que la dirección del viento para el nodo 13N-88.75W es de 138 grados (SE), la moda (dirección más frecuente) es de 45 grados (NE), una desviación de 106 grados; la mayoría de las direcciones (promedio  $\pm$  desviación estándar) están en el rango de 32° (NNE) y 244° (WSW). Estos datos estadísticos nos corroboran que la dirección del viento es sumamente variable ya que se encuentra dispersa en un rango de 212°. En todo caso el dato estadístico en el que sí podemos apoyarnos para la descripción de la dirección del viento es la moda, ya que este es el indicador que denota la mayor frecuencia de ocurrencias en una dirección, y por lo tanto con una moda de 45 grados, la dirección predominante es el Noreste (NE). De igual forma para el nodo 13N-90.00W tenemos una moda de 90 grados, por lo cual la dirección predominante es el Este (E).

Al observar la figura 5.8, se puede observar la variabilidad de la dirección del viento a través de los años y no se puede apreciar una tendencia específica de dirección del viento a través de esta representación.

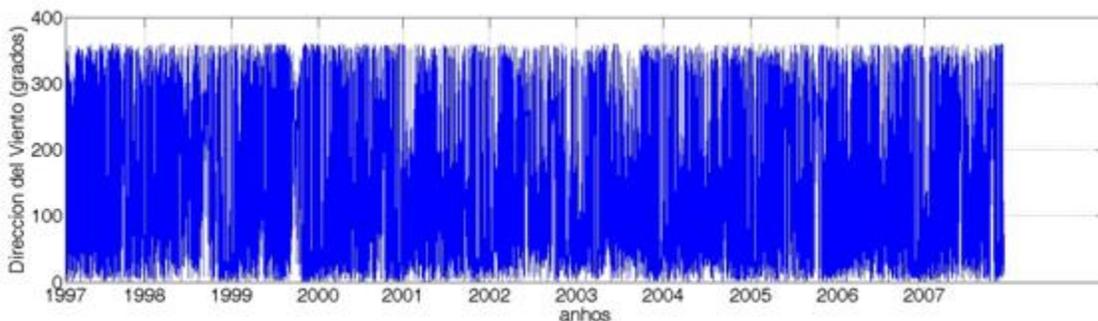


Figura 5.8.- Señal de dirección del viento para 13N-88.75W de la serie de tiempo total.

Debido a la variabilidad en la dirección del viento, se optó por representar la dirección del viento en forma de rosa de viento, simplificada para la serie de tiempo total, la cual se encuentra en las figuras 5.9 y 5.10 para los nodos 13N-88.75W y 13N-90.00W respectivamente. Las direcciones de las flechas representan la dirección del viento tal y como se explicó en el capítulo 3 y se presentó en la figura 3.2. De igual manera se puede

observar que se le han superpuesto flechas indicativas que representan la moda, el promedio con la referencia de +/- la desviación estándar (que nos indica el rango de valores en los que es probable se encuentre la dirección del viento). Claramente se puede corroborar lo expuesto al inicio de esta sección que el promedio no es un valor indicativo para poder caracterizar la dirección del viento. Además la magnitud de las flechas representa la velocidad del viento que está representada además por los círculos concéntricos de la rosa de viento, en la cual el círculo mas exterior representa una velocidad de 15 m/s y el círculo interior a este 10 m/s y así sucesivamente.

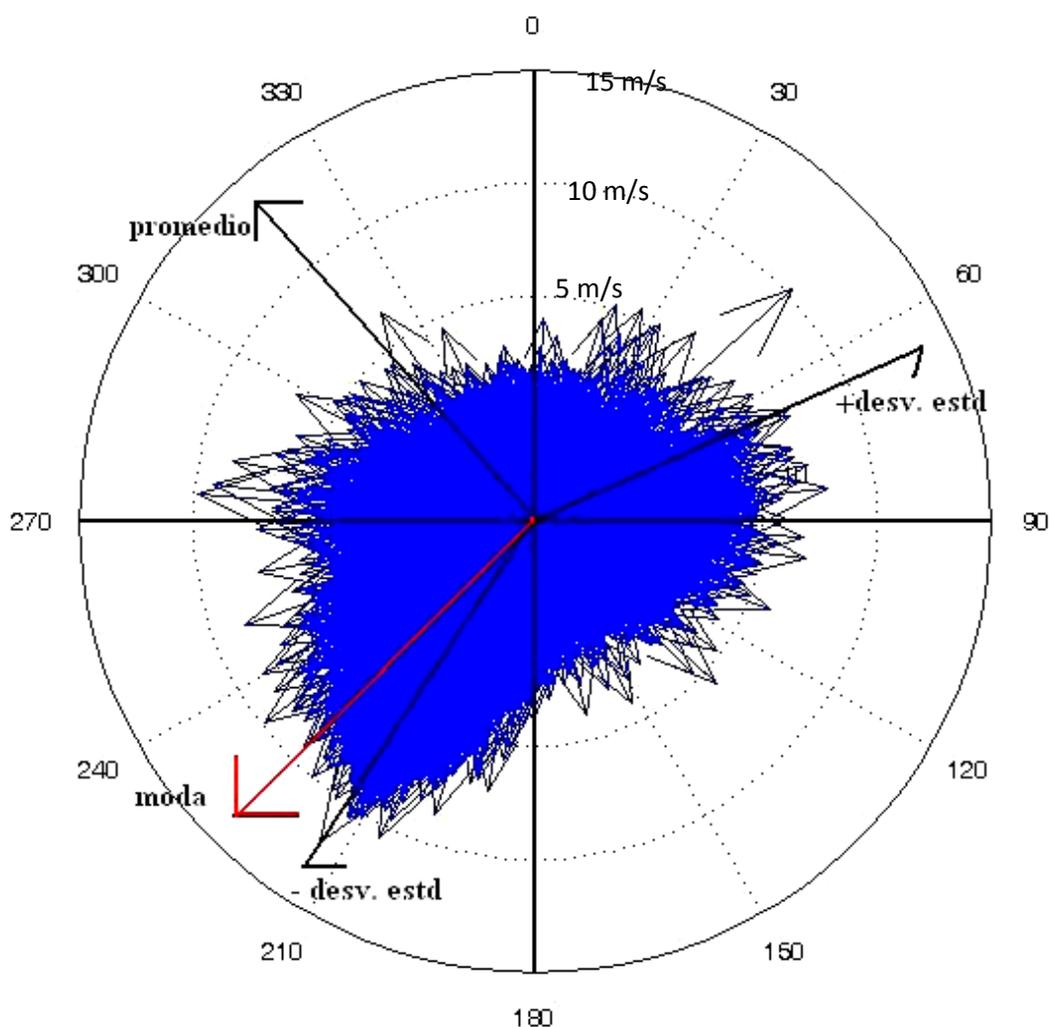


Figura 5.9.- Dirección del viento en forma de rosa náutica para 13N-88.75W.

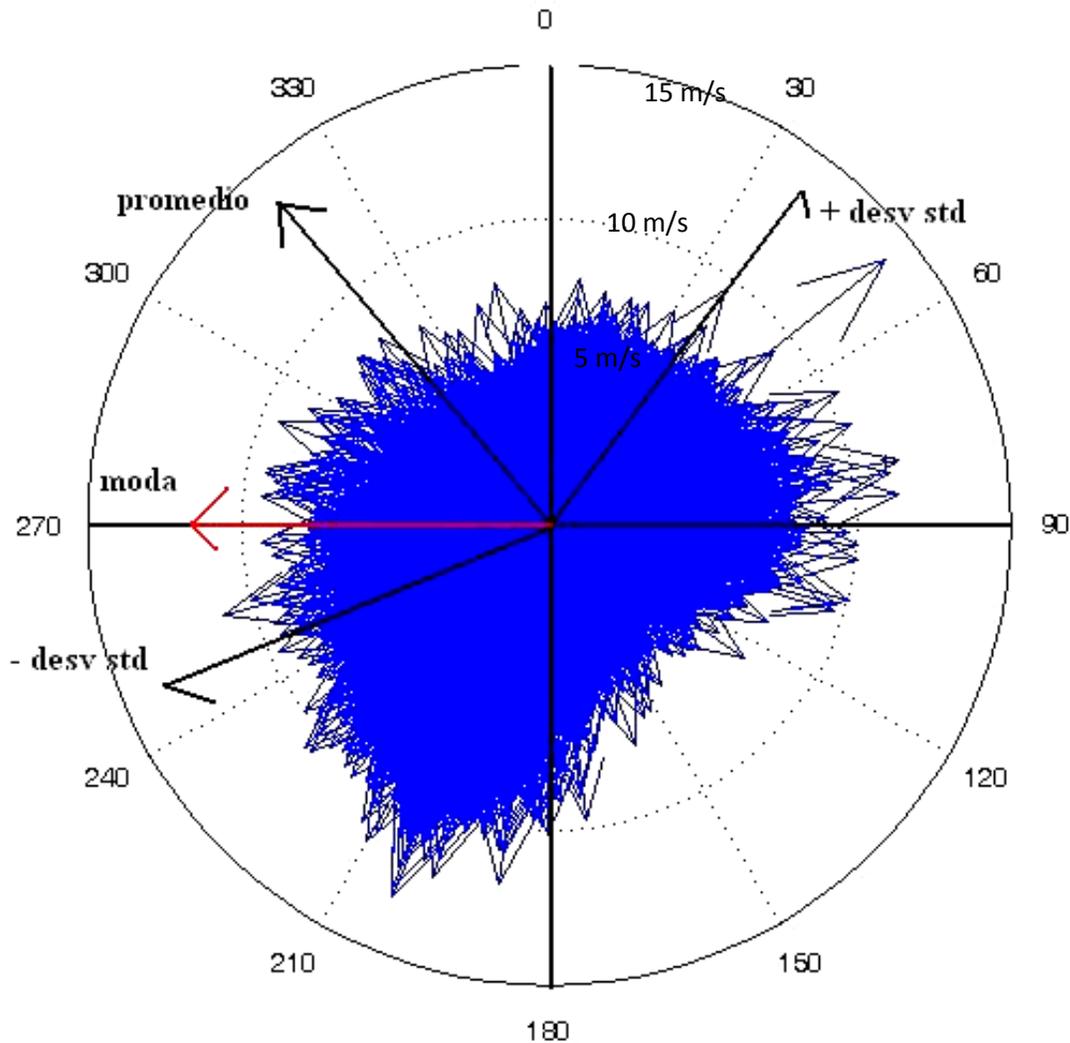


Figura 5.10.- Dirección del viento en forma de rosa náutica para 13N-90W.

#### ANÁLISIS ANUAL.

En las tablas 5.15 y 5.16 se muestran estadísticos anuales para la dirección del viento en ambos nodos, de los cuales el estadístico que describe mejor este fenómeno es la moda ya que la desviación estándar representa más del 75% del promedio. Se puede observar la consistencia a través de los años en un rango de direcciones principalmente de vientos provenientes desde el Norte hasta el Este ( $0^\circ - 90^\circ$ )

Para aguas poco profundas (nodo 13N-88.75W) en 9 de los 11 años analizados la moda fue entre  $360^\circ$  y  $90^\circ$ , es decir vientos provenientes del cuadrante Norte – Este. La excepción fueron los años 1998 y 2002 con moda  $135^\circ$ , es decir vientos provenientes del Sureste.

Para aguas profundas (nodo 13N-90.00W), en 8 de los 11 años analizados la moda (dirección más frecuente) fue entre 360° y 90° (vientos provenientes del cuadrante (Norte – Este). La excepción fueron los años 1998, 1999 y 2007 con moda 270° y 196°, es decir vientos provenientes del Oeste y del Sur.

**Tabla 5.15.- Estadísticos de dirección del viento para 13N-88.75W.**

<b>Año</b>	<b>Promedio</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Moda</b>	<b>Desviación estándar</b>
<b>1997</b>	145	360	0	45	109
<b>1998</b>	161	360	0	135	104
<b>1999</b>	150	360	0	360	112
<b>2000</b>	131	360	0	14	108
<b>2001</b>	120	360	0	16	100
<b>2002</b>	121	360	1	135	95
<b>2003</b>	123	360	0	90	100
<b>2004</b>	127	360	0	27	106
<b>2005</b>	153	360	1	45	110
<b>2006</b>	135	360	0	45	109
<b>2007</b>	153	360	0	18	107

**Tabla 5.16.- Estadísticos de dirección del viento para 13N-90.00W.**

<b>Año</b>	<b>Promedio</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Moda</b>	<b>Desviación estándar</b>
<b>1997</b>	134	360	0	360	99
<b>1998</b>	158	360	0	270	102
<b>1999</b>	141	360	1	270	107
<b>2000</b>	129	360	0	90	105
<b>2001</b>	119	360	0	45	98
<b>2002</b>	123	360	0	90	96
<b>2003</b>	141	360	0	360	109
<b>2004</b>	146	360	0	39	113
<b>2005</b>	167	360	0	34	112
<b>2006</b>	152	360	0	27	112
<b>2007</b>	157	360	1	196	108

#### ANALISIS MENSUAL.

Al analizar los meses de manera individual para la serie de tiempo total, no se encontró tendencia alguna en particular que se destacase. Esto se puede corroborar al referirse a la

figura 5.11 que contiene los promedios mensuales para el nodo 13N-88.75W. Se trabajo con promedios en este histograma, ya que a pesar de tener menor significancia estadística, eran valores mucho más certeros que los expresados para la “moda”, ya que para obtener los valores estadísticos se utilizo la aplicación en Matlab y debido a la gran variabilidad de los datos de dirección del viento en una serie pequeña como lo es un mes en particular, en muchas ocasiones Matlab no encontraba una moda especifica y usaba como valor por defecto el mínimo, que es un valor totalmente falso a lo que pretendemos ilustrar.

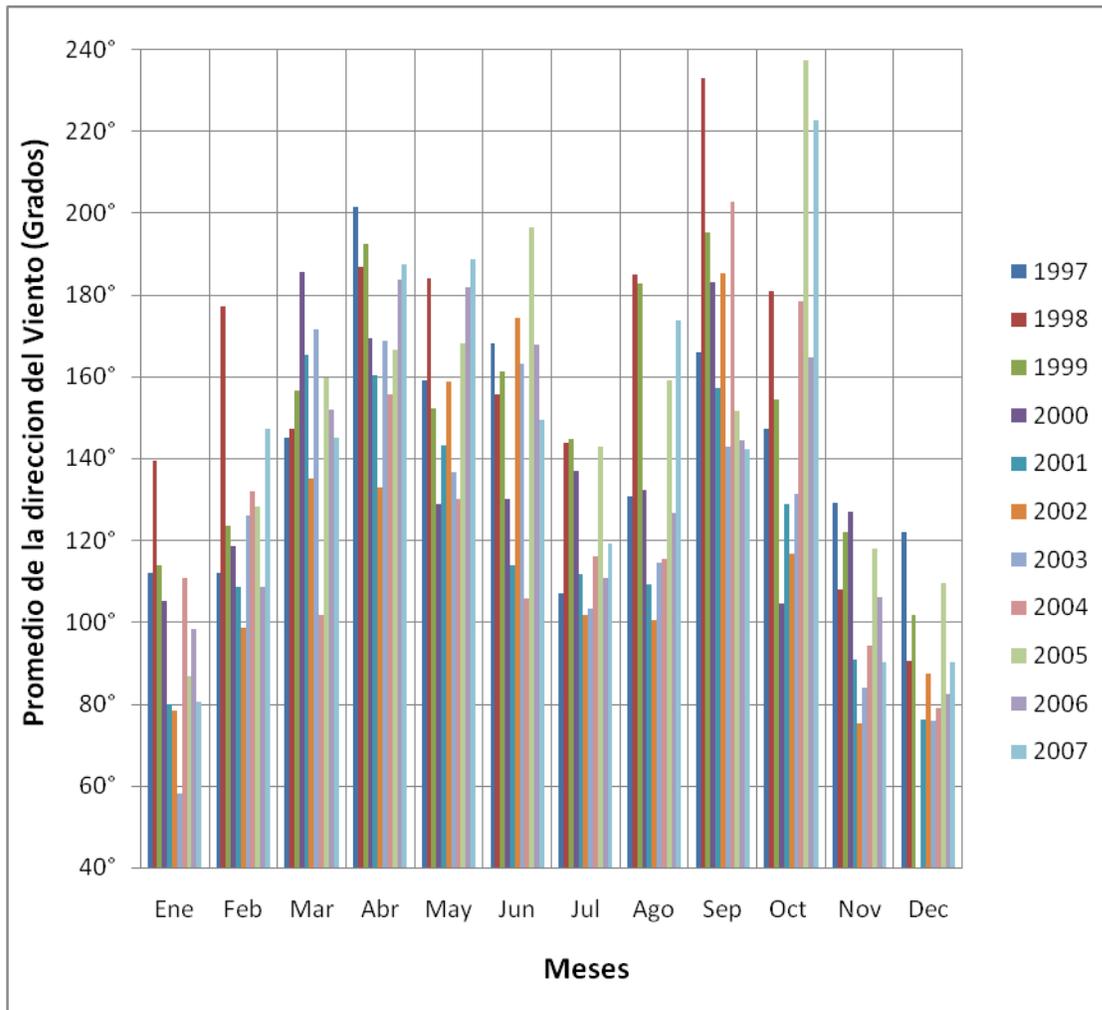


Figura 5.11.- Histograma de promedios de dirección de viento mensuales de toda la serie de tiempo para 13N-88.75W.

Al realizar un análisis estacional de toda la serie de tiempo y separar la estación lluviosa de la seca, se puede observar que la dirección del viento (en términos de la moda) en la estación seca es diferente a la de la estación lluviosa. Esto se puede corroborar en las tablas

5.17 y 5.18 en donde se encuentra información estadística para los nodos 13N-88.75W y 13N-90.00W respectivamente. Al observar ambas tablas se puede apreciar que tanto para aguas poco profundas como profundas la moda para la estación seca fue 45°, es decir vientos provenientes del Noreste (NE) y tanto para aguas poco profundas como profundas la moda para la estación húmeda fue 90°, es decir vientos provenientes del Este. Lo cual se puede profundizar un poco observando la tabla 5.19 que muestra claramente que los meses en los que son mas marcados estos vientos y que por lo tanto se reflejan su comportamiento en la estadística para los meses lluviosos son junio y julio; y en la época seca los meses de enero y febrero.

**Tabla 5.17.- Información estadística estacional para 13N-88.75W de toda la serie de tiempo total.**

Estación	Promedio	Máximo	Mínimo	Moda	Desviación estándar
Seca	122	360	0	45	108
Lluviosa	153	360	0	90	102

**Tabla 5.18.- Información estadística estacional para 13N-90.00W de toda la serie de tiempo total.**

Estación	Promedio	Máximo	Mínimo	Moda	Desviación estándar
Seca	127	360	0	45	107
Lluviosa	157	360	0	90	104

**Tabla 5.19.- Dirección del viento representada por la moda para ambos nodos**

MES	Nodo	
	13N88.75W	13N90.00W

Enero	27	NNE	60	NE
Febrero	45	NE	45	NE
Marzo	9	N	90	E
Abril	6	N	180	S
Mayo	135	SE	90	E
Junio	90	E	90	E
Julio	90	E	63	NE
Agosto	225	SW	153	SE
Septiembre	260	W	9	N
Octubre	315	NW	270	W
Noviembre	14	N	45	NE
Diciembre	20	N	16	N

#### **5.4.- DIRECCIÓN DEL OLEAJE.**

##### **ANÁLISIS DE SERIE DE TIEMPO COMPLETA.**

Para la dirección del oleaje la mejor forma de representarlo es mediante un gráfico en forma de rosa náutica, tal como se representó la dirección del viento en el apartado anterior y como se muestra en las figuras 5.12 y 5.13, en donde la dirección de las flechas es en grados y representa la dirección hacia la cual se dirige el oleaje, el tamaño de las flechas representa la magnitud de altura significativa de las olas.

En ambas figuras se puede observar que los círculos tanto el principal como los inscritos dentro de este nos indican la magnitud de la altura significativa de las olas (en metros), donde al círculo grande le corresponde una velocidad de viento de 4 m, al círculo que se encuentra adentro de este le corresponde una velocidad de viento 3 m y así sucesivamente.

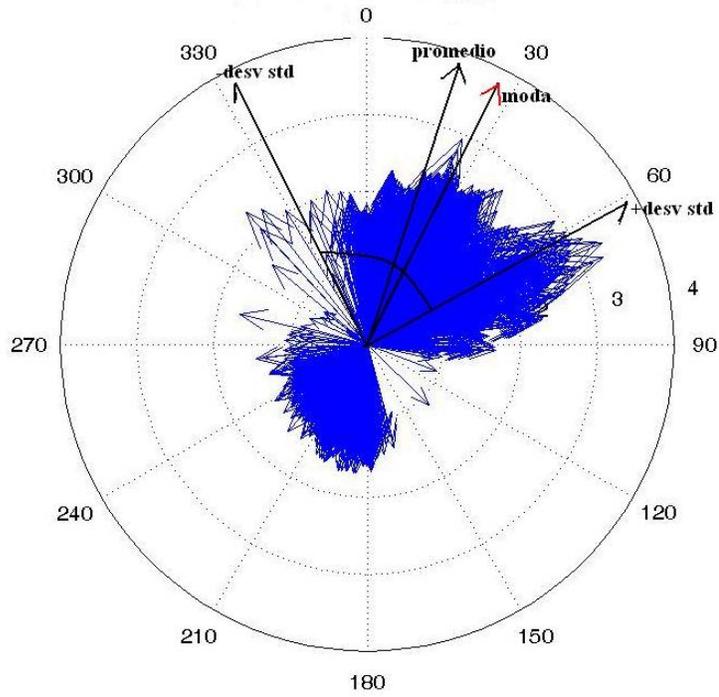


Figura 5.12.- Dirección del oleaje para toda la serie de tiempo total 13N-88.75W.

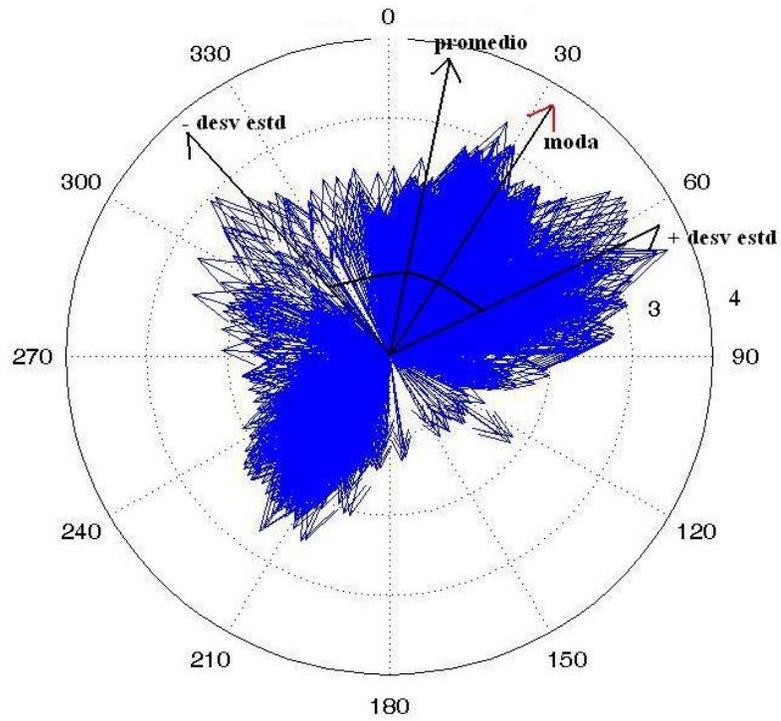


Figura 5.13.- Dirección del oleaje para toda la serie de tiempo total 13N-90.00W.

Al observar la serie de tiempo completa para los años comprendidos entre 1997 y 2007, para el nodo 13N-88.75W, la dirección promedio del cual proviene el oleaje es de 197° (Sur-Suroeste ó SSW), la moda es de 207° que es la misma dirección SSW. Siendo el promedio el dato más significativo debido a la variabilidad constante de la dirección del oleaje, como se puede corroborar en la figura 5.12 que la mayoría de direcciones se encuentran en ese rango, por la saturación de datos en ese sentido. Se observa que la desviación estándar representa menos del 25% del promedio por lo que el estadístico a analizar es el promedio. Tanto en la figura 5.12 como en la figura 5.13, se puede apreciar que hay dos direcciones principales claramente marcadas, que son más bien un rango de direcciones comprendidas de 270° (Oeste) a 180° (Sur) y de 350° (Norte) a 85° (Este), siendo poco común un oleaje proveniente de las direcciones Noroeste (NW) o Sureste (SE).

#### ANALISIS ANUAL.

Para un análisis anual se tiene que el promedio y la moda de la dirección del oleaje se mantienen casi constantes a través de los años, esto se puede observar en la tabla 5.20 y 5.21, que la desviación estándar de la dirección del oleaje es mucho menor que la desviación estándar de la dirección del viento, por lo cual los valores de la dirección de oleaje promedio se pueden tomar como válidos para la descripción, lo cual se comentó ya anteriormente. De todas formas la moda que es el valor más frecuente y el promedio rondan por la misma dirección, la cual es Sur-Suroeste (SSW).

**Tabla 5.20.- Dirección del Oleaje para 13N-88.75W**

<b>Año</b>	<b>Promedio</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Moda</b>	<b>Desviación estándar</b>
<b>1997</b>	200	242	7	207	34
<b>1998</b>	206	360	0	210	35
<b>1999</b>	201	358	0	205	41
<b>2000</b>	199	359	0	207	46
<b>2001</b>	194	359	0	205	48
<b>2002</b>	192	359	0	207	50
<b>2003</b>	189	359	1	209	54
<b>2004</b>	193	360	2	209	47
<b>2005</b>	197	356	0	206	41
<b>2006</b>	198	360	0	203	41
<b>2007</b>	200	359	0	205	34

**Tabla 5.21.- Dirección del Oleaje para 13N-90.00W.**

<b>Año</b>	<b>Promedio</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Moda</b>	<b>Desviación estándar</b>
<b>1997</b>	196	258	19	213	45
<b>1998</b>	200	351	6	212	49
<b>1999</b>	191	258	9	206	57
<b>2000</b>	189	263	8	209	60
<b>2001</b>	187	261	9	210	56
<b>2002</b>	189	263	8	209	60
<b>2003</b>	184	313	2	209	60
<b>2004</b>	189	351	2	211	56
<b>2005</b>	198	353	11	209	44
<b>2006</b>	197	308	7	202	45
<b>2007</b>	200	318	10	210	42

#### ANALISIS MENSUAL.

Para un análisis mensual más detallado se tiene el histograma de la Figura 5.14 que corresponde al nodo 13N-88.75W. En el cual se puede apreciar que los valores promedio de dirección de oleaje mensuales andan por los valores mencionados anteriormente.

En el caso de la estación lluviosa no hay duda que la dirección predominante es la Sur-Suroeste (SSW), sin embargo en la estación seca hay algunas peculiaridades, por ejemplo en noviembre y marzo la dirección promedio es bien similar a la de la estación lluviosa con dirección SSW; de diciembre a enero la dirección promedio ronda por los valores de 150 grados, esto es debido en parte a que en esta época es cuando la dirección del oleaje proviene del rango de 350°(Norte) a 85°(Este) que se muestra en la figura 5.12 que corresponde al nodo 13N-88.75W.

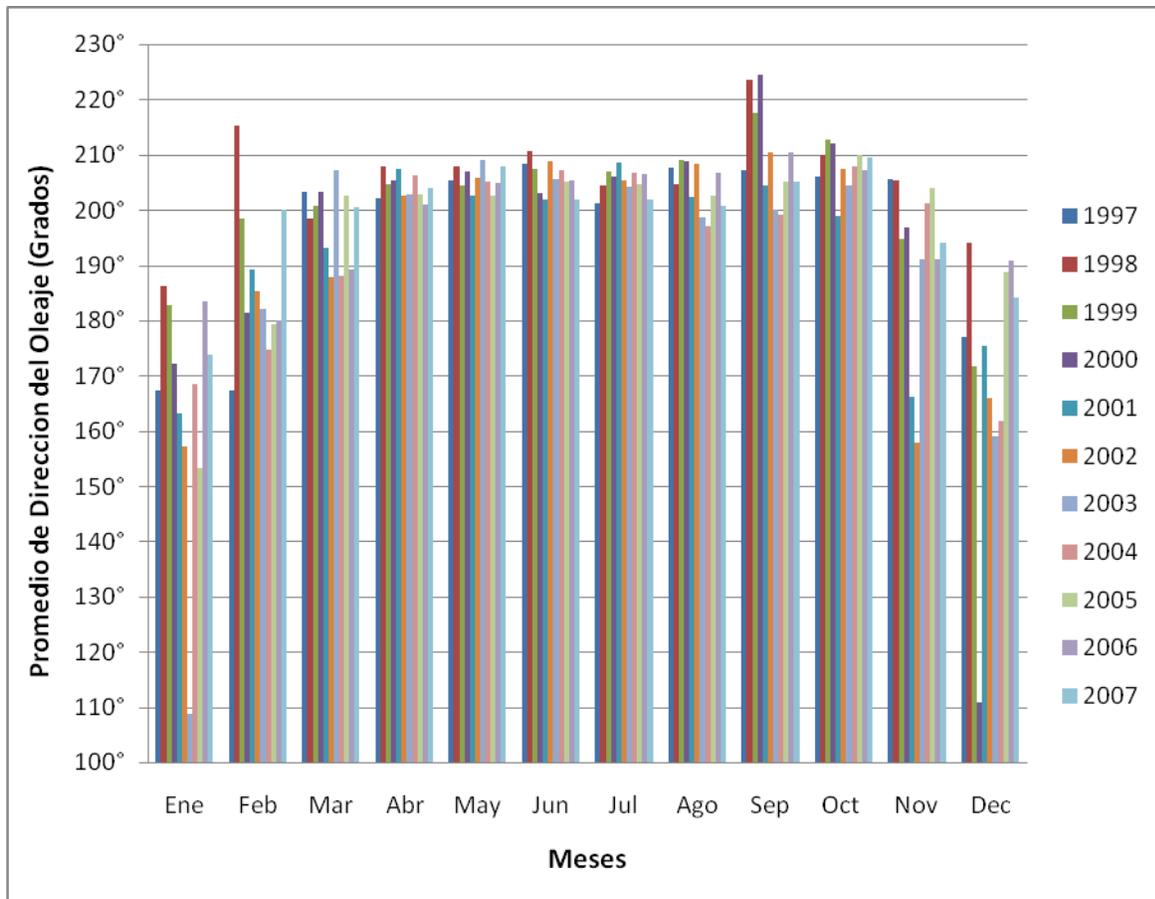


Figura 5.14.- Histograma de promedio de dirección del oleaje para 13N-88.75W.

Para apoyar esta hipótesis tenemos la tabla 5.22 que presenta la dirección desde la cual proviene el oleaje representado por el promedio, en el que claramente se puede ver que la mayoría del oleaje promedio de la serie de tiempo completa por mes, proviene del SSW para ambos nodos, que coincide justamente con el promedio de la dirección del oleaje mostrado en la figura 5.14 para 13N-88.75W. Para el nodo 13N-90.00W no se presenta el histograma del promedio de la dirección del oleaje debido a que es bastante parecido al de la figura 5.14.

**Tabla 5.22.- Dirección del oleaje representada por el promedio para ambas estaciones**

Mes	Nodo			
	13N88.75W		13N90.00W	
Enero	165	SSE	149	SE
Febrero	186	S	175	S
Marzo	198	S	192	S
Abril	204	SSW	204	SSW
Mayo	206	SSW	208	SSW
Junio	206	SSW	208	SSW
Julio	205	SSW	206	SSW
Agosto	204	SSW	206	SSW
Septiembre	210	SSW	213	SSW
Octubre	208	SSW	208	SSW
Noviembre	192	S	181	S
Diciembre	176	S	147	SE

En las tablas 5.23 y 5.24 se detallan los estadísticos de la dirección del oleaje para los nodos 13N-88.75W y 13N-90.00W respectivamente. Para aguas poco profundas y profundas el promedio para la estación seca fue 188° y 175°, es decir oleaje proveniente del sur. Para aguas poco profundas y profundas el promedio para la estación húmeda fue 206° y 208°, es decir oleaje proveniente del Sur-suroeste.

**Tabla 5.23- Dirección del oleaje por estación para 13N-88.75W.**

Estación	Promedio	Máximo	Mínimo	Moda	Desviación estándar
Seca	188	360	0	209	60
Lluviosa	206	354	6	208	13

**Tabla 5.24- Dirección del oleaje por estación para 13N-90.00W.**

Estación	Promedio	Máximo	Mínimo	Moda	Desviación estándar
Seca	175	353	2	211	69
Lluviosa	208	306	9	214	21

## **5.5.- PERÍODO DEL OLEAJE.**

### **ANÁLISIS DE SERIE DE TIEMPO COMPLETA.**

En las señales de serie de tiempo completa, para el período del oleaje se puede observar una tendencia central con valores de período de oleaje mayores a los 10 segundos, como se puede observar en las señales de la serie de tiempo completa correspondientes a las figuras 4.3 y 4.8. Según los datos estadísticos de la serie de tiempo completa mostrada en las tablas 5.1 y 5.2, el período promedio en segundos es de 12.5 y 12.2 para los nodos 13N-88.75W y 13N-90.00W respectivamente.

Los periodos mayores a 10 segundos son caracterizados para el mar de leva, por lo tanto, la mayoría del oleaje o el oleaje predominante se considera como de mar de leva. A partir de esta tendencia central, en las señales del período para ambos nodos mostrado en las figuras 4.3 y 4.8, se puede describir otra característica del período y es que aproximadamente de octubre a marzo se muestran variaciones en este, obteniendo resultados con valores menores a los 10 segundos, llegando a valores mínimos de 2.7 y 2.8 segundos para los nodos 13N-88.75W y 13N-90.00W respectivamente.

Se pueden observar períodos altos para ambos nodos, los cuales andan por el rango de más de 18 segundos, lo cual se considera como un período que sobrepasa el umbral de la SNET mostrado en el anexo F.

### **ANÁLISIS ANUAL.**

En las tablas 5.25 y 5.26 se muestran los estadísticos de períodos del oleaje para los nodos 13N-88.75W y 13N-90.00W respectivamente, en las que claramente se pueden observar que para cada año el período promedio corresponde al de mar de de leva, los cuales son consistentes con los períodos promedios de la serie de tiempo competa, lo cual se respalda con los valores de moda mostrados, en donde la mayoría de valores que más se repiten corresponden a períodos de mar de leva. Esto coincide con la moda que se mantiene en un rango de 12-13.5 segundos para ambos nodos.

**Tabla 5.25.- Estadísticos de períodos anuales para 13N-88.75W (segundos).**

<b>año</b>	<b>promedio</b>	<b>máximo</b>	<b>min</b>	<b>moda</b>	<b>desviación</b>
1997	12.7	19.7	3.1	13.3	2.5
1998	12.6	18.1	3	13.4	2.7
1999	12.8	19.8	3	13.3	2.7
2000	12.1	17.9	3	13.4	3
2001	12.4	19.7	3.1	13.3	2.9
2002	11.8	20	3.1	13.4	3.1
2003	12.2	19.7	3	13.3	3.3
2004	12.5	19.7	3.1	13.4	3
2005	12.5	18.1	2.9	13.4	2.7
2006	12.9	19.6	3.1	13.4	2.7
2007	12.8	19.5	2.7	14.7	2.7

**Tabla 5.26.- Estadísticos de períodos anuales para 13N-90.00W (segundos).**

<b>año</b>	<b>promedio</b>	<b>máximo</b>	<b>min</b>	<b>moda</b>	<b>desviación</b>
1997	12.4	19.7	2.9	12.1	3.1
1998	12.4	19.5	3.1	13.4	3.1
1999	12.3	19.8	3	13.4	3.3
2000	11.7	18	3.1	13.4	3.5
2001	12	19.6	3.1	13.4	3.3
2002	11.4	19.9	3.1	12.2	3.5
2003	11.9	19.7	3.1	13.4	3.6
2004	12.1	19.8	2.8	13.6	3.5
2005	12.5	19.6	3.1	13.3	2.8
2006	12.8	20.1	3.1	13.6	2.9
2007	12.8	19.8	3.1	13.4	3.0

#### ANÁLISIS MENSUAL.

Para el análisis mensual se presentan dos histogramas en las figuras 5.15 y 5.16, que corresponden a los nodos 13N-88.75W y 13N-90.00W respectivamente. En dichas figuras se puede observar que en la estación lluviosa se dan los mayores períodos promedios con valores de 12 segundos, usualmente mayores a los promedios anuales. En la estación seca los valores del período promedio mensuales, usualmente dan valores menores al promedio mensual e incluso del promedio de las series de tiempo completa. Al retomar la estación seca, sobre todo en los meses de diciembre y enero, se registran los períodos más bajos para

ambos nodos. Es interesante notar que en septiembre que es donde se registran las mayores alturas significativas de oleaje no se dan períodos tan altos en comparación a los otros meses de la estación lluviosa.

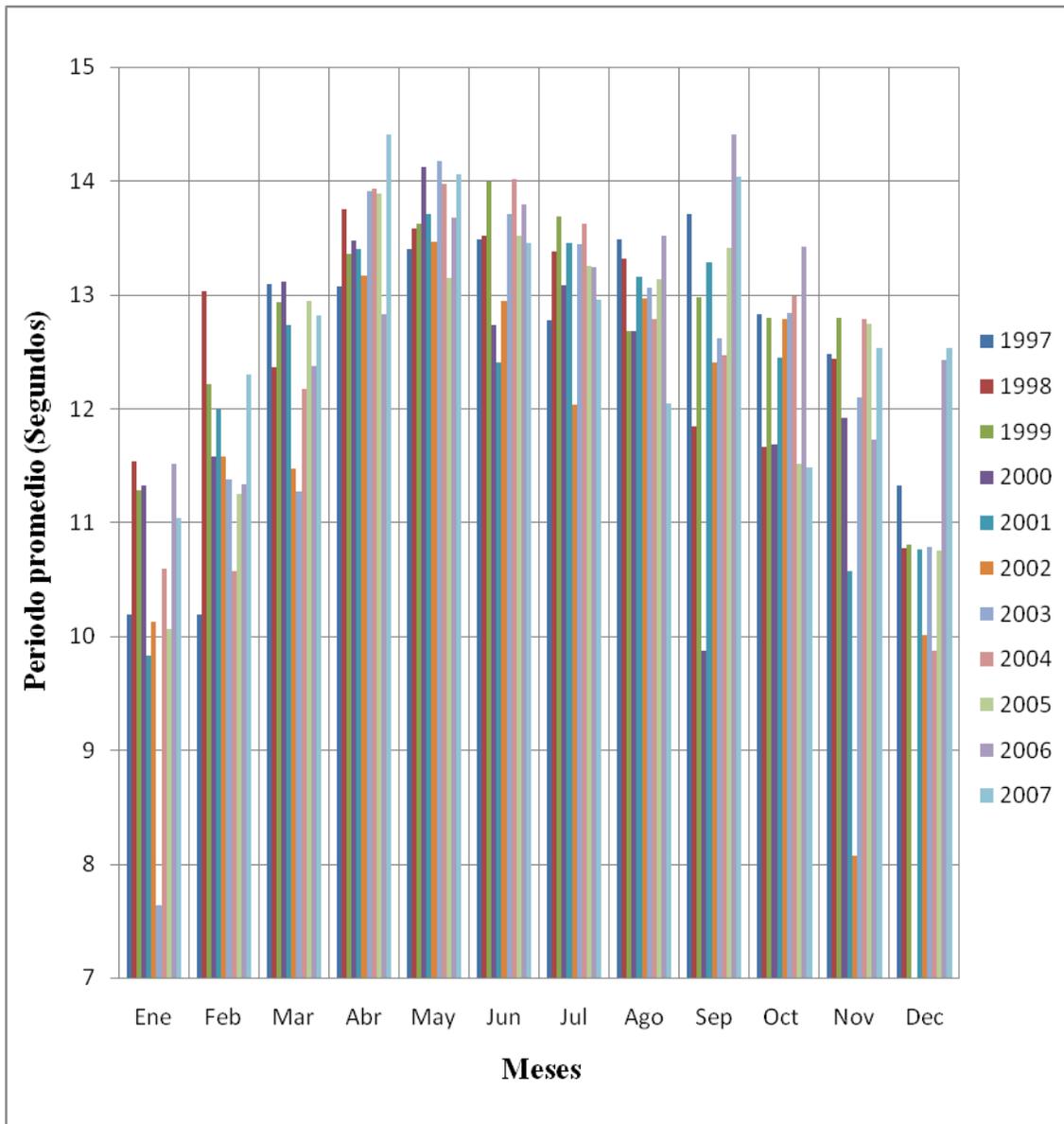


Figura 5.15.- Períodos promedio por mes de toda la serie de tiempo para 13N-88.75W.

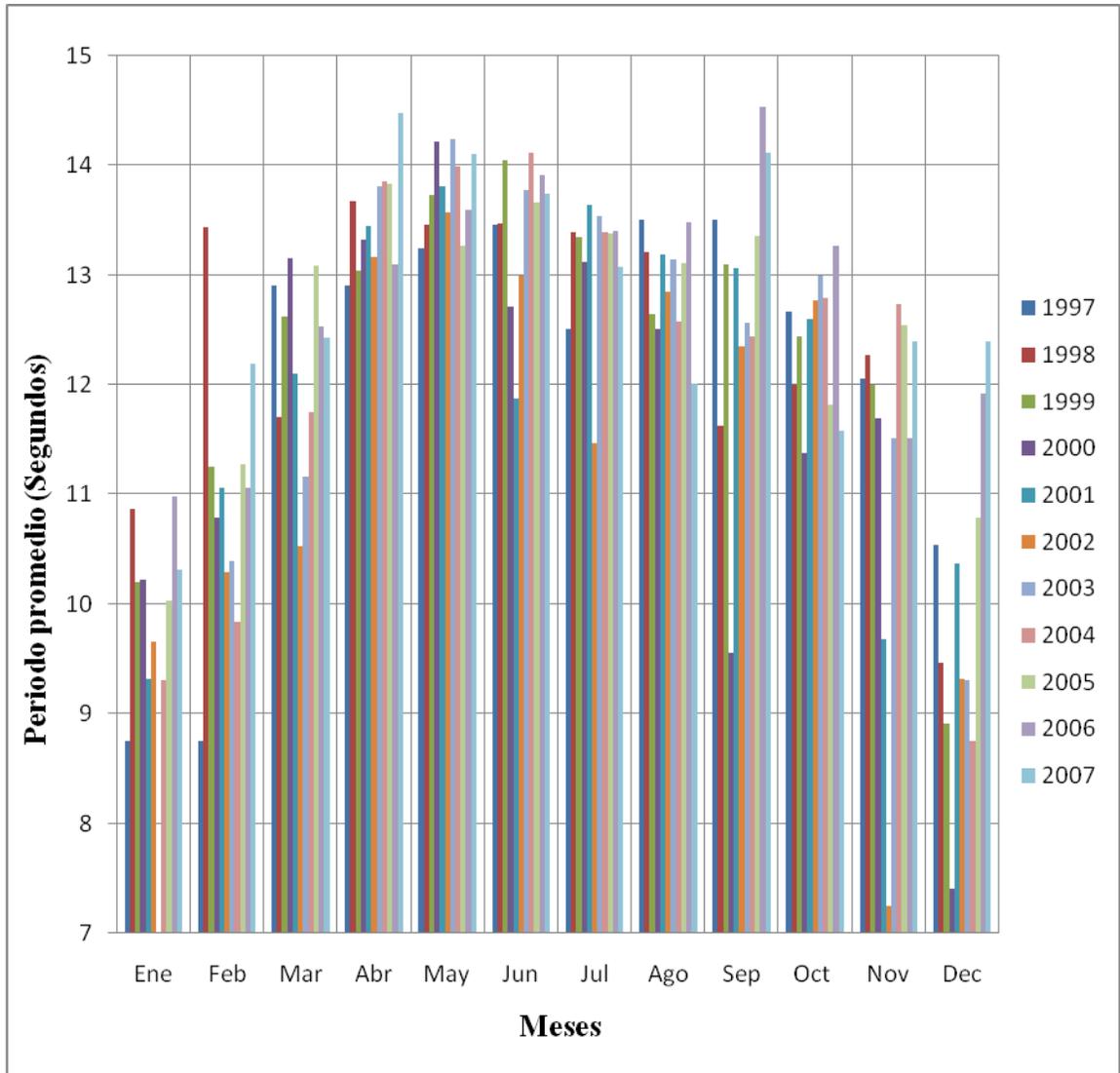


Figura 5.16.- Períodos promedio por mes de toda la serie de tiempo para 13N-90.00W.

Lo mencionado anteriormente se comprueba observando la tabla 5.27 que contiene los estadísticos estacionales para el nodo 13N-88.75W, en donde se tiene que los valores promedios para periodos son más altos para la estación lluviosa con una desviación estándar menor ( $13.3s \pm 2$ ), la cual se encuentra dentro del rango de mar de leva, sin embargo para la estación seca, que posee un promedio de periodos ligeramente menor, pero con una desviación estándar más alta ( $11.6 \pm 3.4$ ), nos inclina a creer que es más probable oleaje con menor periodo durante la estación seca. Se observa lo mismo para el nodo 13N-90.00W detallada en la tabla 5.28.

**Tabla 5.27.- Estadísticos de períodos según estación para 13N-88.75W.**

<b>Estación</b>	<b>Promedio</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Moda</b>	<b>Desviación estándar</b>
Seca	11.6	19.77	2.72	12	3.4
Lluviosa	13.3	20	3.12	13.3	2

**Tabla 5.28.- Estadísticos de períodos según estación para 13N-90.00W.**

<b>Estación</b>	<b>Promedio</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Moda</b>	<b>Desviación estándar</b>
<b>Seca</b>	11.3	19.8	2.8	13.4	3.8
<b>Lluviosa</b>	13.1	20.1	3.12	13.4	2.4

Al relacionar los análisis anteriores con el del período, se puede generalizar que en la estación lluviosa es donde se dan los mayores períodos, lo que significa mayor energía cinética en el oleaje, debido a la magnitud del mar de leva en esa época, porque esos períodos como ya se estuvo mencionando es característico a un período generado por tormentas lejanas o mar de leva, las cuales producen mayores oleajes, es por eso que en nuestra estación lluviosa las alturas significativas de las olas son mayores.

#### **5.6.- ANALISIS DE PERÍODOS FUNDAMENTALES.**

Se elaboraron los periodogramas para la serie de tiempo completa utilizando una caja de herramientas de Matlab llamada “Time Series Tools” o herramientas de serie de tiempo. Los periodogramas para altura significativa de oleaje se muestran en las figuras 5.17 y 5.18 para los nodos 13N-88.75 y 13N-90.00 respectivamente. Así mismo se incluyen los periodogramas de velocidad de viento para dichos nodos en las figuras 5.19 y 5.20 respectivamente.

Todos los periodogramas tienen unidades de “Densidad Espectral de Potencia” en  $m^2/Hz$  en el eje “y”, y en el eje “x” se encuentran las frecuencias fundamentales en ciclos/segundos ó Hz. Se puede observar que todos los periodogramas tienen una frecuencia anual que corresponde a un valor de  $3.2 \text{ E-}08$  Hz. Para convertir frecuencias a unidad de tiempo se obtiene el período T que es la división de “1/f” donde “f” es la frecuencia fundamental y se convierte el período de segundos a horas dividiéndolo entre 3600 y luego para días se divide luego entre 24.

$$Tiempo = \frac{1}{f} * \frac{1}{3600 * 24} = x \text{ dias}$$

De los periodogramas para altura significativa del oleaje, nos interesa la densidad espectral de potencia para la frecuencia anual mencionada anteriormente y consiguientemente para el nodo 13N-88.75W (figura 5.17) tenemos una densidad espectral de potencia de 804.7 m<sup>2</sup>/Hz y para el nodo 13N-90.00W (figura 5.18) le corresponde un valor de 620 m<sup>2</sup>/Hz.

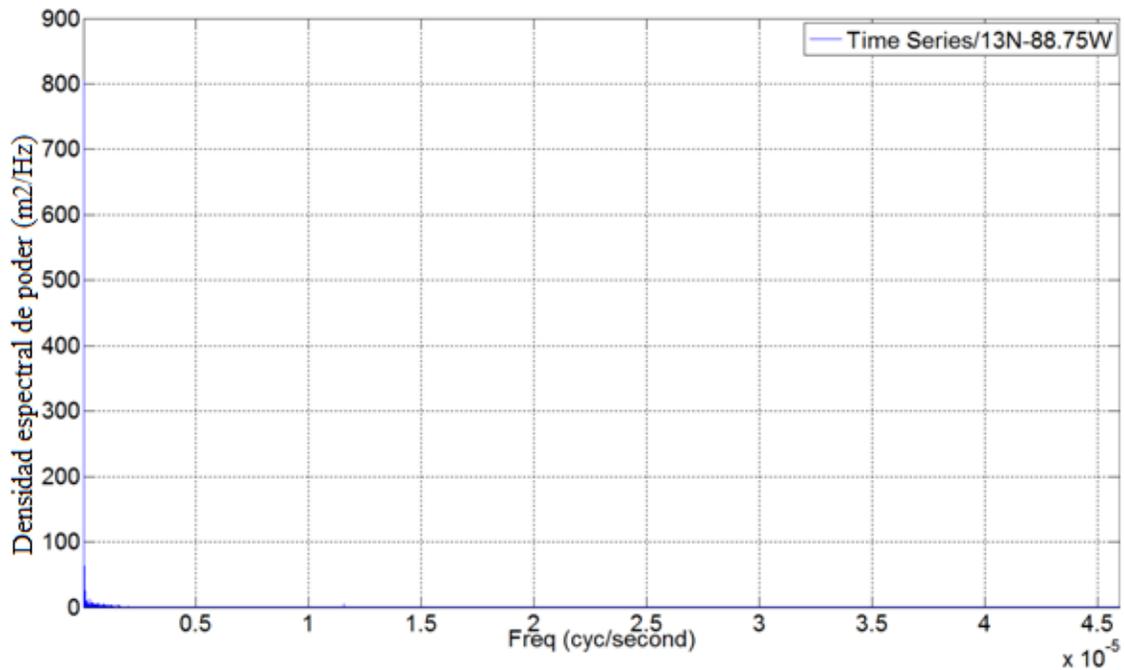


Figura 5.17.- Periodograma de altura de oleaje para 13N-88.75W.

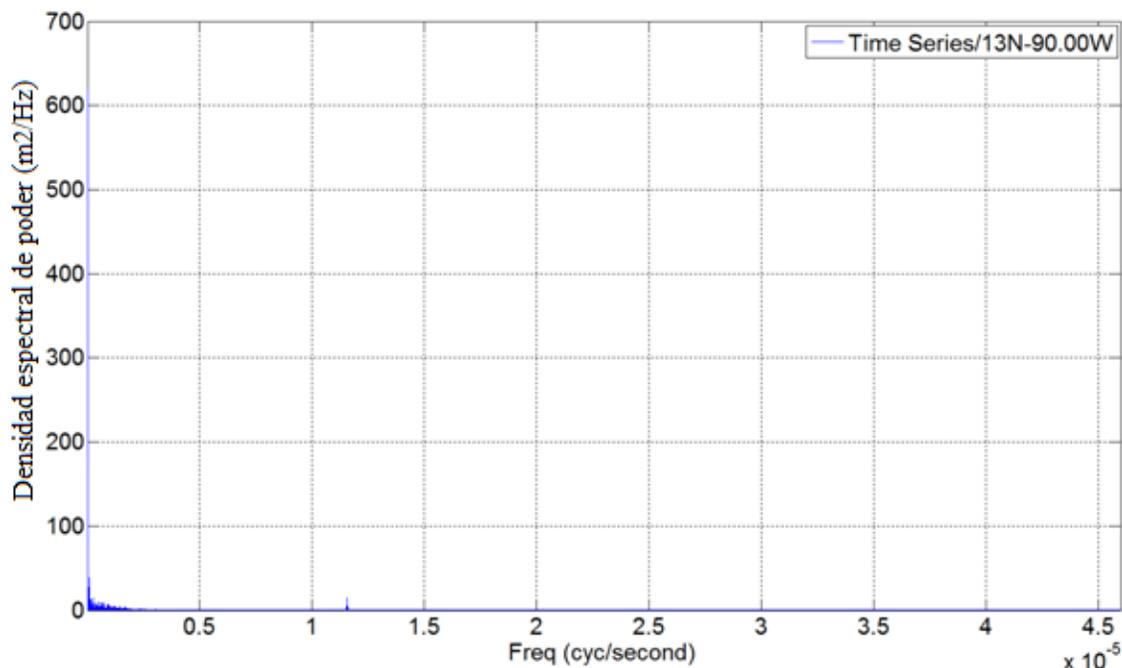


Figura 5.18.- Periodograma de altura de oleaje para 13N-90.00W.

Para los periodogramas de velocidad de viento (figuras 5.19 y 5.20) se han identificado las densidades espectrales de potencia más relevantes con sus respectivas frecuencias, a la figura 5.19 le corresponde la tabla 5.29 y a la figura 5.20 le corresponde la tabla 5.30 para los nodos 13N-88.75 y 13N-90.00W respectivamente. De estas tablas se puede ver que la periodicidad anual para el nodo 13N-88.75W tiene una densidad espectral de potencia de 3,320 m<sup>2</sup>/Hz que corresponde a la frecuencia anual, una densidad espectral de 2,400 m<sup>2</sup>/Hz para una frecuencia correspondiente a la diaria, una densidad espectral de 495 m<sup>2</sup>/Hz para una frecuencia de 12 horas y finalmente 291.2 m<sup>2</sup>/Hz para una frecuencia correspondiente a 8 horas.

**Tabla 5.29.- Energía y Frecuencias para 13N-88.75W de velocidad del viento.**

Densidad espectral de potencia (m <sup>2</sup> /Hz)	Frecuencia (Hz)	Periodicidad
3,320	3.22E-08	Anual
2,400	1.16E-05	24 horas
495	2.31E-05	12 horas
291.2	3.47E-05	8 horas

El nodo 13N-90.00W, tiene una densidad espectral de potencia de 6,610 m<sup>2</sup>/Hz que corresponde la frecuencia anual, una densidad espectral de 6,250 m<sup>2</sup>/Hz para una frecuencia correspondiente a la diaria, una densidad espectral de 200 m<sup>2</sup>/Hz para una frecuencia de 12 horas y finalmente 600 m<sup>2</sup>/Hz para una frecuencia correspondiente a 8 horas.

**Tabla 5.30.- Energía y Frecuencias para 13N-90.00W de velocidad del viento.**

Densidad espectral de potencia (m <sup>2</sup> /Hz)	Frecuencia (Hz)	Periodicidad
6,610	Anual	Anual
6,250	1.16E-05	24 horas
200	2.31E-05	12 horas
600	3.47E-05	8 horas

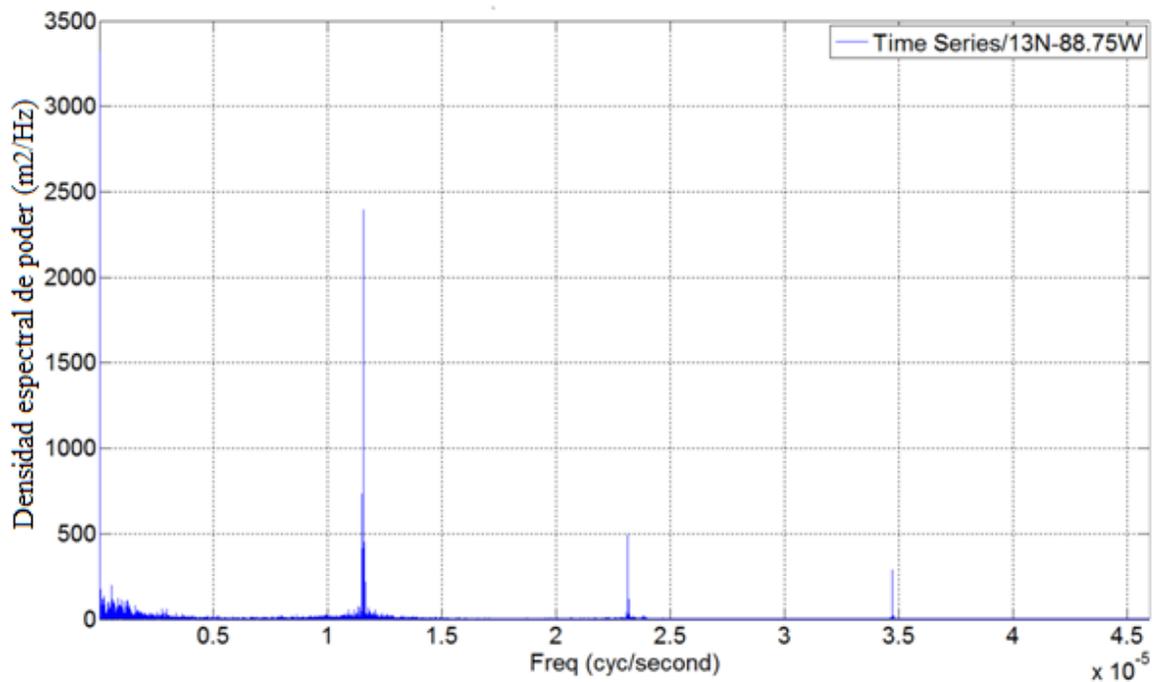


Figura 5.19.- Periodograma de velocidad de viento para 13N-88.75W.

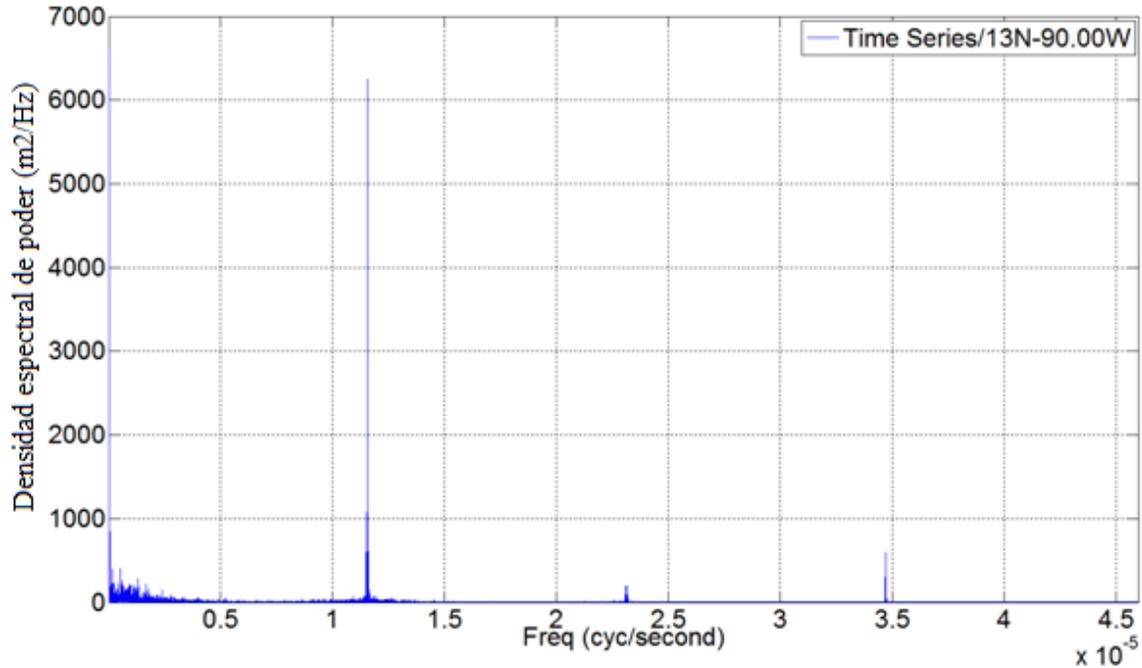


Figura 5.20.- Periodograma de velocidad de viento para 13N-90.00W.

De estos periodogramas se puede observar que la diferencia de densidades espectrales de potencia de altura significativa del oleaje y de la velocidad del viento es bien grande. Para el nodo cercano se tiene una relación de aproximadamente 1:4 con relación a la densidad espectral de potencia de altura significativa/velocidad del viento y para el nodo lejano se tiene una relación aproximada de 1:10.

La proporcionalidad de la densidad espectral de potencia podría estar relacionada a la proporcionalidad de los valores promedio de altura significativa de oleaje y velocidad de viento para la serie de tiempo completa.



## CAPITULO 6. – CONCLUSIONES.

El oleaje se puede caracterizar de dos formas, oleaje en aguas poco profundas y aguas profundas. El oleaje en aguas poco profundas frente a El Salvador está representado por el nodo 13N-88.75N y el oleaje en aguas profundas frente a El Salvador esta representado por la estación 13N-90W. Los parámetros para caracterizar el oleaje y el viento fueron obtenidos de los parámetros utilizados por el SNET encontrados en el anexo F.

El nodo 13° N – 88.75° W representa condiciones en aguas poco profundas (profundidad de la columna de agua menor a 200 m). Este se puede caracterizar de la siguiente manera:

- i. El oleaje tiene las siguientes características promedio: altura significativa,  $1.2 \pm 0.4$  m; período,  $12.5 \pm 2.9$  segundos; dirección,  $197^\circ \pm 44^\circ$ , por lo que se clasifica como de altura pequeña generado por tormentas lejanas localizadas al Sur-suroeste.
- ii. El oleaje tiene períodos de entre 9.6 y 15.4 segundos es decir en su mayoría es mar de leva (período mayor a 10 segundos) de velocidad regular (período entre 8 y 18 segundos).
- iii. El oleaje tiene direcciones entre  $153^\circ$  y  $241^\circ$  es decir en su mayoría proviene del cuadrante Suroeste - Sureste.
- iv. El viento tiene las siguientes características: velocidad del viento,  $3.9 \pm 2.0$  m/s; dirección,  $138^\circ \pm 107^\circ$ , por lo que se clasifica de brisa suave a brisa moderada proveniente de los cuadrantes Suroeste – Sureste y Sureste - Noreste.
- v. El viento tiene velocidades entre 1.9 y 5.9 m/s es decir en su mayoría genera oleaje de altura entre 0.1 y 1.3 m.
- vi. El viento tiene direcciones entre  $31^\circ$  y  $245^\circ$  siendo la más frecuente  $45^\circ$  es decir Noreste.

El nodo 13° N – 90° W representa condiciones en aguas profundas (profundidad de la columna de agua mayor a 200 m).

- i. El oleaje tiene las siguientes características: altura significativa,  $1.4 \pm 0.4$  m; período,  $12.2 \pm 3.3$  segundos; dirección,  $192^\circ \pm 53^\circ$ , por lo que se clasifica como de altura pequeña generado por tormentas lejanas localizadas al Sur-suroeste.

- ii. El oleaje tiene períodos entre 8.9 y 15.5 segundos es decir en su mayoría es mar de leva (período mayor a 10 segundos) de velocidad regular (período entre 8 y 18 segundos).
- iii. El oleaje tiene direcciones entre  $139^\circ$  y  $245^\circ$  es decir en su mayoría proviene del cuadrante Suroeste - Sureste.
- iv. El viento tiene las siguientes características: velocidad del viento,  $4.6 \pm 2.6$  m/s; dirección  $142^\circ \pm 107^\circ$ , por lo que se clasifica de brisa suave a brisa moderada proveniente de los cuadrantes Suroeste – Sureste y Sureste - Noreste.
- v. El viento tiene velocidades entre 2.0 y 7.2 m/s es decir en su mayoría genera oleaje de altura entre 0.1 y 1.3 m.
- vi. El viento tiene direcciones entre  $35^\circ$  y  $249^\circ$  siendo la más frecuente  $90^\circ$  es decir Este.

El oleaje tiene distintas características que varían de la estación seca a la lluviosa. Los meses: mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre corresponden a la estación lluviosa (intervalo de tiempo con mayor precipitación pluvial) y para dicha estación se tiene las siguientes características principales:

- i. En aguas poco profundas (nodo  $13^\circ$  N –  $88.75^\circ$  W) la altura significativa del oleaje es  $1.4 \pm 0.3$  m (promedio mayor al valor promedio de toda la serie: 1.2), el período promedio es de  $13 \pm 2$  segundos, la dirección promedio del oleaje tiene una dirección de  $206 \pm 13^\circ$  proveniente del Sur-Suroeste. La velocidad del viento es  $3.5 \pm 1.7$  m/s (promedio menor al valor promedio de toda la serie: 3.9), la dirección del viento más frecuente es de  $90^\circ$  es decir el Este.
- ii. En aguas profundas (nodo  $13^\circ$  N –  $90^\circ$  W) la altura significativa del oleaje es  $1.6 \pm 0.3$  m (promedio mayor al valor promedio de toda la serie: 1.4), el período promedio es de  $13 \pm 2.4$  segundos, la dirección promedio del oleaje tiene una dirección de  $208 \pm 21^\circ$  proveniente del Sur-Suroeste La velocidad del viento es  $4.0 \pm 2.1$  m/s (promedio menor al valor promedio de toda la serie: 4.6), la dirección del viento más frecuente es de  $90^\circ$  es decir el Este.

La estación seca (intervalo de tiempo con menor precipitación pluvial) son los meses: noviembre, diciembre, enero, febrero, marzo y abril, se tienen las siguientes características principales:

- i. En aguas poco profundas (nodo  $13^{\circ}$  N –  $88.75^{\circ}$  W) la altura significativa del oleaje es  $1.1 \pm 0.3$  m (promedio menor al valor promedio de toda la serie: 1.2), el período promedio es de  $11.6 \pm 3.8$  segundos, la dirección promedio del oleaje tiene una dirección de  $188 \pm 60^{\circ}$  proveniente del Sur. La velocidad del viento es  $4.3 \pm 2.1$  m/s (promedio mayor al valor promedio de toda la serie: 3.9), la dirección del viento más frecuente es de  $45^{\circ}$  es decir el Este.
- ii. En aguas profundas (nodo  $13^{\circ}$  N –  $90^{\circ}$  W) la altura significativa del oleaje es  $1.2 \pm 0.3$  m (promedio menor al valor promedio de toda la serie: 1.4), el período promedio es de  $11.3 \pm 3.4$ , la dirección promedio del oleaje tiene una dirección de  $175 \pm 69^{\circ}$  proveniente del Sur. La velocidad del viento es  $5.2 \pm 2.8$  m/s (promedio mayor al valor promedio de toda la serie: 4.6), la dirección del viento más frecuente es de  $45^{\circ}$  es decir el Este.

En los análisis de los períodos fundamentales se tiene lo siguiente:

- i. Periodograma de altura significativa de oleaje para el nodo 13N-88.75W se tiene que para una periodicidad anual le corresponde una densidad espectral de potencia de  $804.7 \text{ m}^2/\text{Hz}$ . En el periodograma de velocidad del viento, para una periodicidad anual se tiene una densidad espectral de potencia de  $3,320 \text{ m}^2/\text{Hz}$ , para periodicidad diaria le corresponde una densidad espectral de potencia de  $2,400 \text{ m}^2/\text{Hz}$ .
- ii. Periodograma de altura significativa de oleaje para el nodo 13N-90.00W se tiene que para una periodicidad anual le corresponde una densidad espectral de potencia de  $620.0 \text{ m}^2/\text{Hz}$ . En el periodograma de velocidad de viento, para una periodicidad anual se tiene una densidad espectral de potencia de  $6,610 \text{ m}^2/\text{Hz}$ , para periodicidad diaria le corresponde una densidad espectral de potencia de  $6,250 \text{ m}^2/\text{Hz}$ .
- iii. Para nodo 13N-88.75W se tiene una relación de densidad espectral de potencia de 1:4 con respecto a altura significativa de oleaje/velocidad de viento. Para nodo 13N-90.00W se tiene una relación de densidad espectral de potencia de 1:10 con respecto a altura significativa de oleaje/velocidad de viento.



## **CAPITULO 7. – RECOMENDACIONES**

Para proyectos de obras marítimas en aguas poco profundas y en aguas profundas, se recomienda realizarlas en los meses de noviembre a abril, porque es cuando se dan los oleajes más bajos, y en los meses de mayo a octubre es cuando las alturas significativas de las olas son mayores a las del promedio. Consiguientemente a mayor altura de oleaje hay más energía. En el caso de períodos estos andan en rangos promedios de 12 segundos, sin embargo donde se dan menores períodos son en noviembre, diciembre, enero especialmente para obras en aguas profundas.

Es de tener en cuenta la combinación de período y altura de oleaje, ya que estos son de gran importancia, porque que si tenemos olas con gran altura y pequeños períodos puede afectar a pequeñas embarcaciones pesqueras u otras.

El presente trabajo sirve como precedente y punto de partida para trabajos de investigación futuros, utilizando el algoritmo desarrollado como punto de partida, entre estos se puede estudiar lo siguiente:

- Evaluar las precondiciones para eventos de oleaje extremos, se explica un poco de esto en el apartado 7.1.
- Analizar la relación entre los parámetros de viento y altura de oleaje para las series de tiempo completo, anual y estacional. Así como diario para relacionar la brisa marina con la terrestre.
- Construir espectros de energía en base a la generación de distintos periodogramas.

### **7.1.- WAVE WATCH III COMO HERRAMIENTA DE MITIGACIÓN DE EVENTOS DE OLEAJE EXTREMOS.**

Se puede implementar y utilizar el modelo predictivo de WW3 como una herramienta de mitigación para eventos de oleaje extremos, a continuación se presentan un ejemplo el cual comprueba la certeza de predicción que tiene el modelo numérico de WW3.

- **27 de Septiembre de 1999.**

Para el 27 de septiembre de 1999 se produjo un oleaje “extremo” con olas altas que causaron bastantes daños en todas las costas de El Salvador. Según los archivos de la prensa gráfica se declaró alerta roja debido a las crecidas de las olas, las cuales coincidían con una depresión generada al sur de Guatemala que produjeron grandes estragos y un oleaje alto que afectó las costas del país, esto se puede observar en la figura 7.1 de una ola chocando contra un rancho de paja en la orilla de la playa.



Figura 7.1. Oleaje extremo en La Libertad para septiembre 1999 [La prensa Gráfica, [www.laprensagrafica.com](http://www.laprensagrafica.com), 27 de Septiembre 1999]

El modelo WW3 predijo para esa fecha una altura significativa de oleaje de 3.3 m para el nodo 13N-88.75W. En la figura 7.2 se anexa el registro para el mes de septiembre de 1999 en donde se puede observar la altura significativa de oleaje generada. Sin embargo al observar el registro o señal del período para ese mes (figura 7.3) se puede apreciar una peculiaridad y es que antes del 27 de septiembre, el período registrado correspondía a un oleaje generado por mar de leva. Sin embargo como ocurrió dicho fenómeno atmosférico que afectó nuestro país, el oleaje para el 27 de septiembre corresponde al de un mar local con un período promedio diario de 7.7 segundos.

Por ende el oleaje extremo generado en esa fecha fue causado mayormente por un mar local.

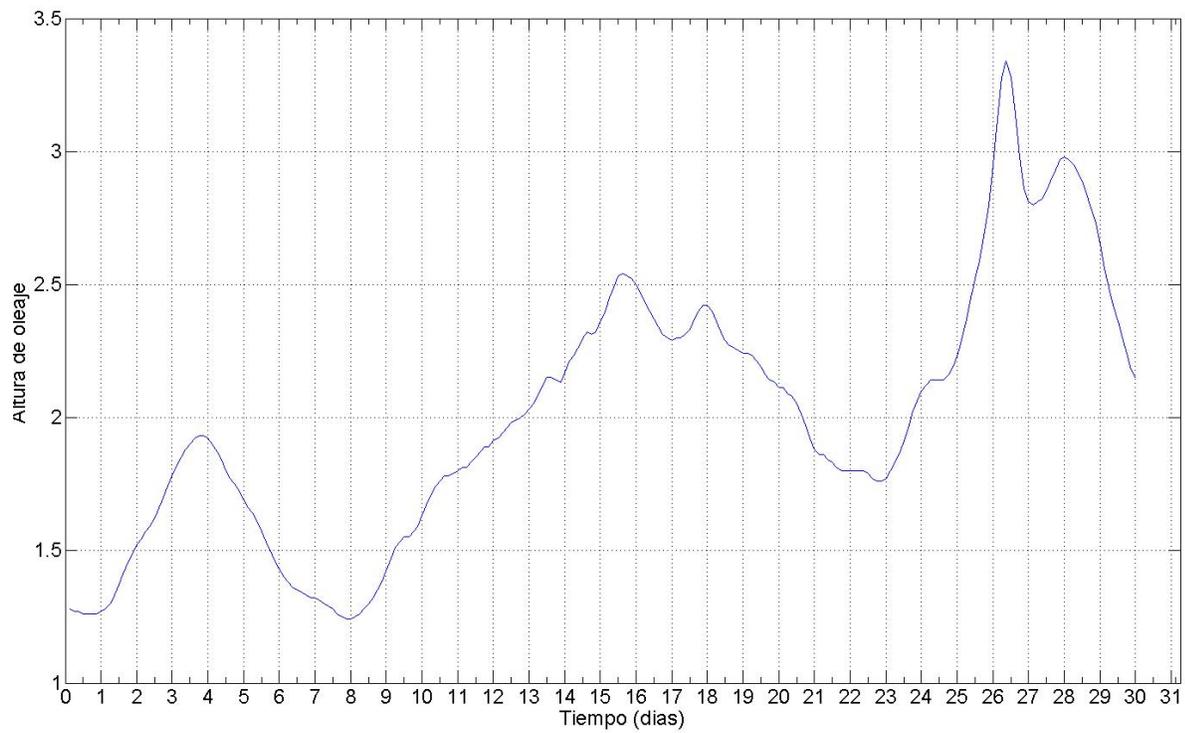


Figura 7.2.- Altura significativa de Oleaje para septiembre de 1999 nodo 13N-88.75W.

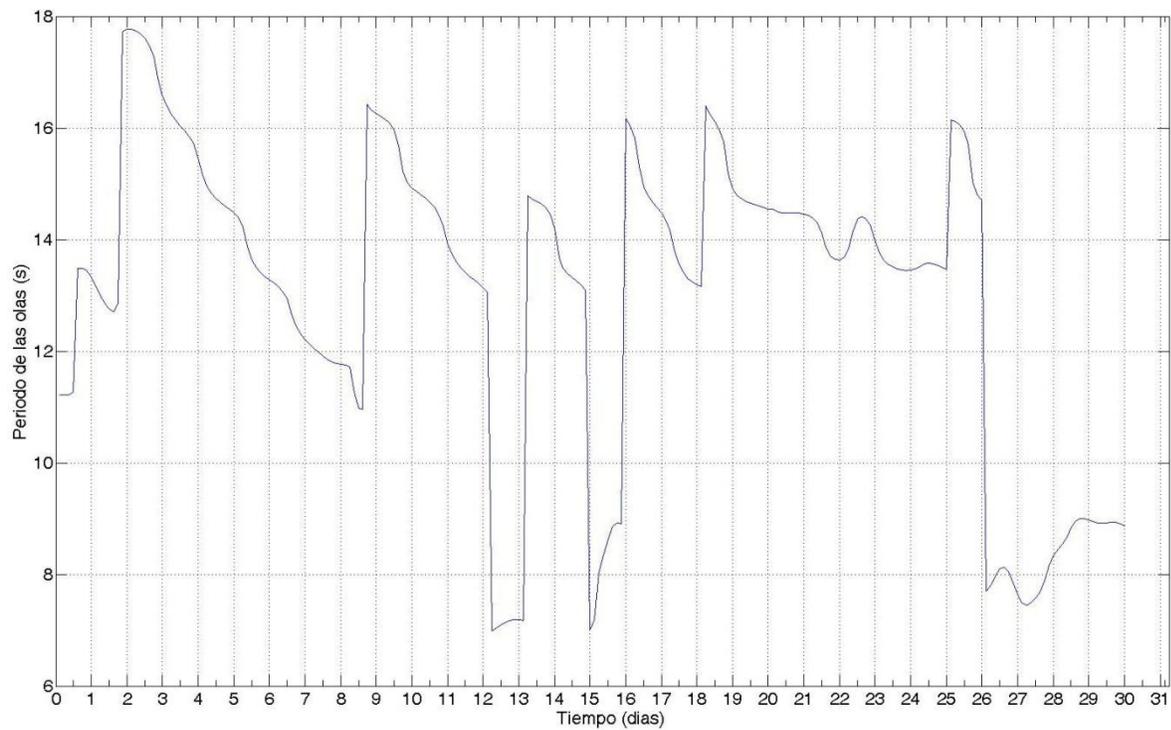


Figura 7.3.- Período para septiembre de 1999 nodo 13N-88.75W.

- **10 de Abril de 2007**

El 10 de abril de 2007 se produjo otro oleaje extremo, las consecuencias de dicho oleaje produjeron daños en el puerto de La Libertad que se muestran en la figura 7.4 que son imágenes obtenidas del archivo de la prensa gráfica para dicha fecha. Además en el artículo del 10 de abril de 2007 se detalla en una declaración dada por el SNET que dicho oleaje fue causado por tormentas lejanas generadas en Nueva Zelanda.



Figura 7.4. Oleaje extremo en La Libertad para abril 2007 [La prensa Gráfica, [www.laprensagrafica.com](http://www.laprensagrafica.com), 10 de Abril 2007]

Según el registro del modelo numérico WW3, para dicha fecha el nodo 13N-88.75W registró una altura significativa de oleaje de 2.2 metros tal y como se puede ver en la figura 7.5, sin embargo la diferencia al ejemplo anterior es que el período para ese día es de 17.32 segundos (promedio diario) y se puede apreciar en la figura 7.6. Este período es característico para mar de leva el cual se corrobora con la información obtenida del archivo de la prensa gráfica de ese día, que era un oleaje generado por tormentas lejanas y con características de un oleaje de mar de leva.

Por ende el oleaje extremo generado en esa fecha fue causado mayormente por un mar de leva.

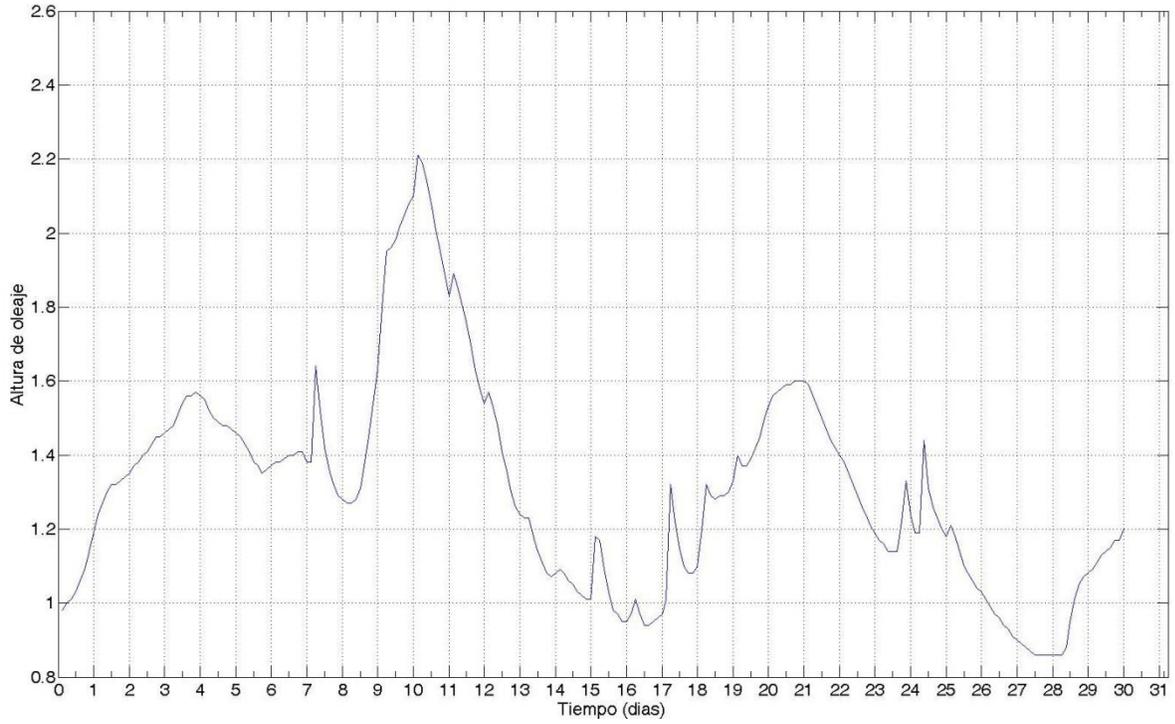


Figura 7.5.- Altura significativa de Oleaje para abril del 2007 nodo 13N-88.75W.

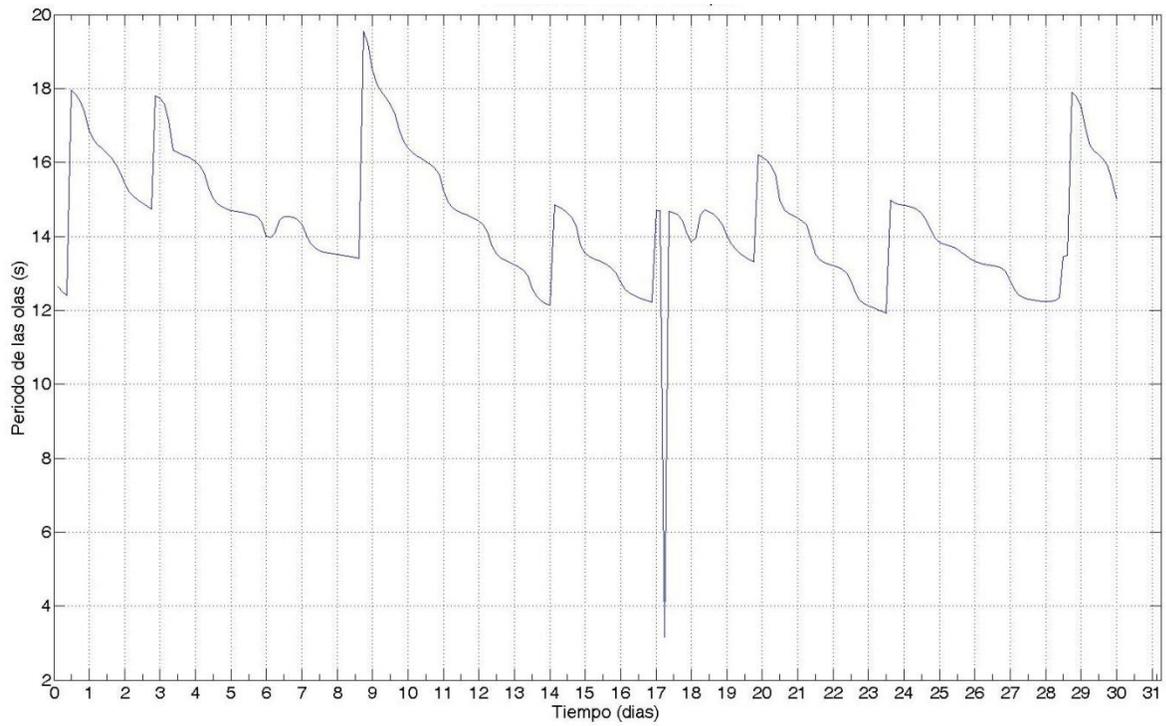


Figura 7.6.- Período para abril del 2007 nodo 13N-88.75W.

Con estos dos ejemplos (y muchos más que se podrían obtener) se puede utilizar el modelo WW3 como herramienta de mitigación de oleaje extremo. Así mismo se pueden continuar otros trabajos de graduación con el fin de evaluar las precondiciones para eventos de oleaje extremos tal y como se ha tratado de hacer en los ejemplos presentado anteriormente.

## GLOSARIO

Altura de onda: es la distancia vertical de altura entre una cresta y un valle.

Amplitud de onda: es la distancia que la partícula se aparta de su posición media en una dirección perpendicular a la de propagación y esta equivale a la mitad de la altura de la onda.

Cresta: es la parte más alta de la onda.

Densidad espectral de potencia: Este describe como la energía o la varianza de una serie de tiempo es distribuida con relación a la frecuencia.

Espectro de onda: es la distribución de energía de onda entre diferentes frecuencias y longitudes de onda en la superficie del mar.

Longitud de onda: es la distancia horizontal entre dos crestas o entre dos valles.

Mar de leva: es el que se genera por tormentas lejanas y tiene características de períodos de oleaje largos.

Oceanografía: Rama de las Ciencias de la Tierra que estudia los procesos biológicos, físicos, geológicos y químicos que se dan en los mares y en los océanos.

Oleaje: son ondas que se desplazan por la superficie de mares y océanos, puestas en marcha por el viento, y son el principal agente de las costas.

Período: es el tiempo que transcurre entre el paso de dos crestas o dos valles.

Periodograma: se conoce como el espectro de altura de onda, el cual da la distribución de la varianza de la altura de la onda como función de la frecuencia.

Valle: es la parte más profunda de la depresión entre dos ondas consecutivas.

Velocidad de fase: es la velocidad a la cual una determinada fase de la onda se propaga.

## REFERENCIAS

Buoy Weather, <http://www.buoyweather.com>.

Oceanografía. Datos del modelo WW3

Geological Sciences, <http://geology.csupomona.edu/drjessey/class/Gsc101/>, octubre 2007.

Oceanografía. Espectros de densidad de potencia.

La prensa gráfica, <http://www.laprensagrafica.com/index.php/el-salvador/archivo.html>, enero 2007.

Oceanografía, desastres. Información de desastres producido por el oleaje.

Oceanógrafo Francisco José Gavidia Medina.

Km 5 ½ Carretera a Nueva San Salvador, Avenida y Colonia Las Mercedes

San Salvador, El Salvador, América Central.

Telefono: (503) 22679594.

Oceanografía. Descripción del oleaje.

Stewart, R.H. [2007], Introduction to Physical Oceanography, Department of Oceanography Texas A&M University.

Oceanografía. Teoría de Oceanografía.

Tolman, H.L. [2002], User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 2.22, 2, 5-24.

Modelo WAVWATCH III. Descripción del modelo.

Wikipedia, <http://www.wikipedia.com>, septiembre 2007.

Oceanografía. Teoría de Oceanografía.

Wikipedia, [http://es.wikipedia.org/wiki/Densidad\\_espectral](http://es.wikipedia.org/wiki/Densidad_espectral), enero 2007.

Oceanografía. Densidad Espectral.

## BIBLIOGRAFÍA

Crowell, B. [2006], Vibrations and Waves, *Light and Matter free introductory physics textbooks*, 3, 47-63.

Gavidia, F. [2007a] Documento para el fortalecimiento de la gestión ambiental en El Salvador. *Diagnóstico de productos y sus aplicaciones en temas de oceanografía que puedan ser demandados por usuarios*.

Gavidia, F. [2007b] Documento para el fortalecimiento de la gestión ambiental en El Salvador. *Plan de capacitación para la obtención de productos en temas de oceanografía*.

La prensa gráfica, <http://www.laprensagrafica.com/index.php/el-salvador/archivo.html>, enero 2007.

Proakis, J.G. [2006], Tratamiento digital de señales, Principios, algoritmos y aplicaciones, *Prentice Hall*.

Staller, A.N. [1960], Physical Geography. *Physical Oceanography*, 7, 230-231.

Stewart, R.H. [2007], Introduction to Physical Oceanography, Department of Oceanography Texas A&M University.

Tolman, H.L. [2002], User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 2.22, 2, 5-24.

Geological Sciences, <http://geology.csupomona.edu/drjessey/class/Gsc101/>, octubre 2007.

Wikipedia, <http://www.wikipedia.com>, septiembre 2007.

Wikipedia, [http://es.wikipedia.org/wiki/Densidad\\_espectral](http://es.wikipedia.org/wiki/Densidad_espectral), enero 2007.