UCAB Universidad Católica ANDRES BELLO

EL NIÑO OSCILACIÓN SUR (ENOS) Y SU RELACIÓN CON LOS HURACANES EN EL ATLÁNTICO Y CON LA CONFORMACIÓN DE ÉSTOS COMO POTENCIALES AMENAZAS PARA LAS COSTAS VENEZOLANAS

Ing. Rafael Bécemberg

Trabajo de ascenso presentado ante la

Universidad Católica Andrés Bello para optar

al grado de profesor agregado

Caracas, Enero de 2013

RESUMEN

El fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENOS), se puede considerar como la más importante variabilidad climática interanual que se tiene identificada en los actuales momentos, debido a los efectos que tiene sobre las condiciones meteorológicas tanto en las cercanías como en sitios muy distantes de su lugar de origen, especialmente sobre parámetros como la temperatura del agua, corrientes marinas, patrones de viento, régimen de precipitaciones, y en general sobre actividades económicas y humanas, siendo de hecho, responsable de una gran parte de los cambios que ocurren año tras año en los climas locales de numerosas regiones del mundo.

En este trabajo se trató de encontrar posibles relaciones entre la ocurrencia de fenómenos como el ENOS y la mayor o menor formación de huracanes, cuestionándose al mismo tiempo la fiabilidad del índice utilizado actualmente para caracterizar y clasificar a las temporadas de huracanes en el Atlántico (Índice ECA).

Igualmente se buscó establecer la existencia o no de tendencias en las características que las temporadas de huracanes en el Océano Atlántico y el Mar Caribe vienen mostrando en los últimos años, y su posible relación con eventos ENOS, así como su influencia y probabilidad de afectación sobre el litoral norte de la República Bolivariana de Venezuela, a los fines de determinar si realmente pueden considerarse como amenazas naturales para esa área marino-costera en la cual se ha venido concentrando en los últimos años diversos estudios y mediciones tendientes a la extracción y explotación futura de gas.

Finalmente, se analizan las bondades de la metodología propuesta por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos con la cual, y sin necesidad de implementar modelos matemáticos globales o locales, se pueden estimar valores de altura de ola en un determinado punto de interés a partir de las condiciones de viento generadas por un huracán que transita cerca del área de interés. La validación se realizó, comparando los datos calculados a través de la mencionada metodología, contra datos reales medidos en el sitio de analizado.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS 9

1.1 OBJETIVOS DEL TRABAJO 10

2. PREDICCIÓN NUMÉRICA DEL TIEMPO Y LAS ECUACIONES DE LA ATMÓSFERA . 12

2.1 PREDICCIÓN NUMÉRICA DEL TIEMPO 12

2.2 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA PREDICCIÓN NUMÉRICA 13

2.3 ECUACIONES DE MOVIMIENTO DEL SISTEMA EN COORDENADAS INERCIALES 15

2.4 ECUACIONES DEL VIENTO GEOSTRÓFICO 18

3. EL NIÑO OSCILACIÓN DEL SUR (ENOS). BREVE RESEÑA HISTÓRICA Y CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES 19

3.1 BREVE RESEÑA HISTÓRICA 19

3.2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES 24

3.2.1 Fase cálida del ciclo ENOS ("El Niño") 24

3.2.2 Fase fría del ciclo ENOS ("La Niña") 27

4. AÑOS DONDE SE PRESENTA EL FENÓMENO DE EL NIÑO Y DONDE SE PRESENTA EL FENÓMENO DE LA NIÑA. CUANTIFICACÓN DEL FENÓMENO 29

4.1 SELECCIÓN DEL ÍNDICE ONI PARA IDENTIFICAR CUANTITATIVAMENTE EL FENÓMENO DE "ELNIÑO-OSCILACIÓN DEL SUR" ENOS 32

4.1.1 Cambios relacionados con el cálculo del índice oceánico El Niño 32

4.1.2 Base de datos del índice ONI de la NOAA 33

5. TEMPORADA DE HURACANES EN EL ATLÁNTICO NORTE 34

5.1 ASPECTOS GENERALES 34

5.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE UNA TEMPORADA DE HURACANES "PROMEDIO Ó TÍPICA" 36

5.2.1 Trayectorias promedios por mes de los huracanes 36

5.3 BASE DE DATOS UTILIZADA, Y SUS LIMITACIONES 40

6. ÍNDICES DE CUANTIFICACIÓN DE LA INTENSIDAD DE LAS TEMPORADAS DE LOS CICLONES TROPICALES 41

7. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS TEMPORADAS DE HURACANES EN EL ATLÁNTICO NORTE 44

7.1 INTENSIDAD DE LAS TEMPORADAS DE HURACANES 44

7.2 ANÁLISIS DECADAL DE LA ACTIVIDAD CICLÓNICA 47

7.3 FRECUENCIA EN LA OCURRENCIA DE TEMPORADAS DE HURACANES DE ALTA INTENSIDAD 51

7.4 CUESTIONAMIENTO AL ÍNDICE ECA COMO PARÁMETRO BASE PARA CLASIFICAR A LAS TEMPORADAS DE HURACANES 52

8. RELACIÓN ENTRE LA OCURRENCIA DE EVENTOS "EL NIÑO" O "LA NIÑA" Y LA INTENSIDAD DE LA TEMPORADA DE HURACANES EN EL ATLÁNTICO 56

8.1 CORRELACIÓN ENTRE EL PROMEDIO ANUAL Y LOS VALORES MENSUALES DEL ÍNDICE ONI 56

8.2 SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN DE EVENTOS "EL NIÑO" Y "LA NIÑA" 58

9. DISTINTAS AMENAZAS NATURALES QUE PUEDEN AFECTAR EL LITORAL COSTERO VENEZOLANO 62

9.1 TSUNAMIS Y MARES DE FONDO ("SWELLS") 62

9.2 REVISIÓN HISTÓRICA DE LAS TRAYECTORIAS DE LOS HURACANES. 67

9.3 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA INFLUENCIA DE LOS HURACANES SOBRE LAS COSTAS VENEZOLANAS 68

10. CÁLCULO DE ALTURAS DE OLEAJE EN UNA DETERMINADA LOCALIZACIÓN PRODUCIDA POR UN HURACÁN Y COMPARACIÓN CON MEDICIONES REALES ... 72

10.1 MODELOS PARAMÉTRICOS 72

10.2 METODOLOGÍA SUGERIDA POR EL "SHORE PROTECTION MANUAL, DEL U.S ARMY COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER" 74

10.3 VALIDACIÓN DEL MÉTODO DE CÁLCULO DEL "SHORE PROTECTION MANUAL, DEL U.S ARMY COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER" 76

11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 80

11.1 CONCLUSIONES 80

11.2 RECOMENDACIONES 83

12. ANEXOS 84

12.1 ÍNDICES UTILIZADOS PARA IDENTIFICAR Y DEFINIR CUANTITATIVAMENTE AL FENÓMENO DE EL NIÑO-OSCILACIÓN DEL SUR (ENOS) Y ESCALA DE SAFFIR-SIMPSON 85

12.1.1 Regiones "Niño" 85

12.1.2 Identificación cuantitativa de El Niño y La Niña basándose en la temperatura del Océano Pacífico 86

12.1.3 Identificación cuantitativa de El Niño y La Niña basado en el nivel del mar e el Pacífico 94

12.1.4 Clasificación de los eventos ENOS según su intensidad 94

12.1.5 Índices complementarios de variables del sistema climático relacionados con el ENOS 95

12.1.6 Escala de Saffir-Simpson 97

12.2 BASE DE DATOS HISTÓRICA DE Q UINN Y NEAL DE EVENTOS CLIMÁTICOS "EL NIÑO" DESDE 1500 98

12.3 BASE DATOS DEL INDICE ONI DE LA NOAA 103

12.4 DATOS RELEVANTES DE LAS TEMPORADAS DE HURACANES EN EL ATLÁNTICO, OBTENIDOS A PARTIR DE LA BASE DE DATOS HURDAT 104

12.5 CUANTIFICACIÓN DE LA INTENSIDAD DE LAS TEMPORADAS DE LOS CICLONES TROPICALES. ENERGÍA CICLÓNICA ACUMULADA 106

12.6 ESTADÍSTICAS GENERALES DE LAS TEMPORADAS DE HURACANES EN EL ATLÁNTICO Y DEL ÍNDICE ECA. LAPSO 1851-2011 108

12.7 PERTURBACIONES SOBRE MEDICIONES REALES DE OLEAJE DEBIDO A LA INFLUENCIA DE "MARES DE FONDO", TORMENTAS TROPICALES Y HURACANES 110

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Sistema de coordenadas cartesianas y su relación con la superficie terrestre..... 17
Figura 3.1 Distribución espacial de las principales teleconexiones termométricas globales asociadas a la ocurrencia del fenómeno ENOS. 23
Figura 3.2 Distribución espacial de las principales teleconexiones pluviométricas globales asociadas a la ocurrencia del fenómeno ENOS. 23
Figura 3.3 Modelo esquemático del régimen global de vientos conjuntamente con la posición de la zona de convergencia intertropical. 25
Figura 3.4 Modelo convectivo, de temperatura del mar y de surgencia, bajo condiciones de "El Niño", "La Niña" y condición neutra. 26
Figura 3.5 Esquema de las variaciones que ocurren en la profundidad de la termoclina y en el Nivel Medio del Mar, bajo condiciones Neutras, de El Niño y de La Niña. 28
Figura 4.1 Eventos "El Niño" para el período 1525-1987. 31
Figura 4.2 Eventos "El Niño" para el período 1900-1987. 31
Figura 4.3 Promedio de la temperatura superficial del mar en la región Niño 3.4 para períodos base de 30 años. 33
Figura 5.1 Hitos en los sistemas de observación de ciclones tropicales en el Atlántico tropical. 35
Figura 5.2 Zonas de origen y trayectorias promedio de fenómenos meteorológicos en la cuenca Atlántica para el mes de Junio. 37
Figura 5.3 Zonas de origen y trayectorias promedio de fenómenos meteorológicos en la cuenca Atlántica para el mes de Julio. 37
Figura 5.4 Zonas de origen y trayectorias promedio de fenómenos meteorológicos en la cuenca Atlántica para el mes de Agosto. 37
Figura 5.5 Zonas de origen y trayectorias promedio de fenómenos meteorológicos en la cuenca Atlántica para el mes de Septiembre. 38
Figura 5.6 Zonas de origen y trayectorias promedio de fenómenos meteorológicos en la cuenca Atlántica para el mes de Octubre. 38
Figura 5.7 Zonas de origen y trayectorias promedio de fenómenos meteorológicos en la cuenca Atlántica para el mes de Noviembre. 38
Figura 5.8 Promedio histórico de ocurrencia de fenómenos meteorológicos en la cuenca Atlántica (1851-2012) 39
Figura 7.1 Promedio histórico de ocurrencia de fenómenos meteorológicos en la cuenca Atlántica (1944-2012) 48
Figura 7.2 Distribución temporal de ocurrencia de fenómenos meteorológicos en la cuenca Atlántica. Período 1851-2012 48
Figura 7.3 Velocidad promedio de todos los eventos ocurridos en cada temporada de huracanes. Período 1950-2011 49
Figura 7.4 Promedios anualizados del índice ECA. 1851-2011 54
Figura 8.1 Correlación matemática entre el índice ONI del mes de Junio y el índice ONI promedio anual. Lapso 1950-2011 57
Figura 8.2 Correlación matemática entre el índice ONI promedio de los meses de Mayo, Junio y Julio, y el índice ONI promedio anual. Lapso 1950-2011 58
Figura 9.1 Relación entre la magnitud y la distancia focal de terremotos submarinos y la ocurrencia y tamaño de tsunamis asociados 63
Figura 9.2 Tsunamis en el Mar Caribe. Lapso: 1492-2000 64
Figura 9.3 Acceso de oleajes extremos a las costas venezolanas, provenientes del Atlántico Norte 65
Figura 9.4 Trayectorias de todos los ciclones tropicales documentados para el Atlántico Norte (1851-2012) y el Pacífico Oriental (1949-2012). 67
Figura 9.5 Trayectorias de todos los huracanes mayores documentados para el Atlántico Norte (1851-2012) y el Pacífico Oriental (1949-2012). 67
Figura 9.6 Trayectorias de los ciclones tropicales que han pasado a menos de 90 millas náuticas del punto de coordenadas Lat. 11,75° N y Long. 64° O. Lapso 1851-2012..... 68

Figura 10.1 Máximo valor de H_mo en un huracán como función de Vmáx. y la velocidad de avance de la tormenta. 73
Figura 10.2 Isolíneas normalizadas de altura significativa del oleaje para huracanes de movimiento lento 75
Figura 10.3 Trayectoria de distintos fenómenos meteorológicos que han pasado a menos de 65 millas náuticas de la ubicación de la boya oceanográfica. 76
Figura 10.4 Boya Oceanográfica. Mediciones de viento, oleaje y corrientes para el momento del paso del huracán "Dean" cerca del área de mediciones 79
Figura 10.5 Boya Oceanográfica. Mediciones de viento, oleaje y corrientes para el momento del paso de la tormenta tropical "Félix" cerca del área de mediciones 79
Figura 12.1 Regiones Niño en el Océano Pacífico ecuatorial. Fuente: IRI (2007) 85
Figura 12.2 Ubicación relativa de las variables empleadas en el cálculo del índice multivariado ENOS, MEI. Fuente: Wolter y Timlin (1998) 94
P+ y P- : (Presiones). Diferencia de presión al nivel del mar, en el sitio más occidental y más oriental del Pacífico ecuatorial, respectivamente. 94
U (Anomalía de la componente zonal del viento). V+ y V-, Anomalía de la componente meridional del viento (viento del sur, positivo, y viento del norte, negativo). 94
S_A: Ubicación media de la temperatura de la superficie del mar y de la anomalía de la temperatura del aire. 94
C: Anomalía de la nubosidad en la región Niño 4. 94
T: Taití; D: Darwin. 1,2,3,4: Regiones Niño 1+2, 3, y 4 respectivamente. 94
Figura 12.3 Recopilación de diferentes índices utilizados para caracterizar eventos "El Niño". Fuente: http://www.research.noaa.gov/climate/t_elnino.html y modificada por el autor 96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Clasificación de modelos numéricos según su escala espacial 14
Tabla 3.1 Alteraciones oceánicas y atmosféricas generadas por el fenómenos ENOS en el Pacífico ecuatorial 21
Tabla 3.2 Manifestaciones climáticas y ecológicas globales, relacionadas con la ocurrencia del ENOS 22
Tabla 5.1 Evolución promedio de una temporada de huracanes en la cuenca Atlántica (1944-2012) 39
Tabla 6.1 Índices de huracanes para diferentes exponentes de la velocidad máxima del viento42
Tabla 7.1 Evolución de la temporada de huracanes y estadísticas del número y tipo de eventos ocurridos. Período 1851-2012 44
Tabla 7.2 Evolución de la temporada de huracanes y estadísticas del número y tipo de eventos ocurridos. Período 1851-1904 (hasta antes de la utilización del telégrafo) 45
Tabla 7.3 Evolución de la temporada de huracanes y estadísticas del número y tipo de eventos ocurridos. Período 1905-1943 (hasta antes de comenzar los reconocimientos aéreos) 45
Tabla 7.4 Evolución de la temporada de huracanes y estadísticas del número y tipo de eventos ocurridos. Período 1944-1965 (entre el inicio de los reconocimientos aéreos y el uso de satélites) 46
Tabla 7.5 Evolución de la temporada de huracanes y estadísticas del número y tipo de eventos ocurridos. Período 1966-2012 (a partir del uso de satélites) 46
Tabla 7.6 Evolución de la temporada de huracanes y estadísticas del número y tipo de eventos ocurridos. Período 2000-2012 47
Tabla 7.7 Cambios por décadas en la actividad ciclónica en el Atlántico Norte para cada componente del índice ECA 47
Tabla 7.8 Comparación de la actividad ciclónica en el Atlántico Norte para períodos de tiempo específicos de acuerdo con cada componente del índice ECA 48
Tabla 7.9 Promedio por décadas de la velocidad del viento generada por cada evento meteorológico ocurrido en el Atlántico durante las temporadas de huracanes 49
Tabla 7.10 Análisis por décadas de las diferentes tipos de temporadas de huracanes de acuerdo con su índice ECA 51
Tabla 7.11 Evolución de la relación entre "huracanes mayores" y "huracanes menores" 52
Tabla 7.12 Caracterización de los eventos meteorológicos de acuerdo con su intensidad y persistencia. Décadas de 1980-1989 y 2000-2009 53
Tabla 7.13 Análisis estadístico de las temporadas de huracanes correspondientes a los lapsos 1980-1989 y 2000-2009 54
Tabla 8.1 Cronología de eventos "El Niño" y "La Niña". Lapso: 1950-2011. 59
Tabla 8.2 Promedio anual del índice ONI y características importantes de las temporadas de huracanes en el Atlántico. Lapso 1950-2011 60
Tabla 8.3 Relación entre el promedio anualizado del índice ONI y características primarias de las temporadas de huracanes en el Atlántico 60
Tabla 9.1 Tsunamis históricos que han afectado a Venezuela, 1498-2007. 64
Tabla 9.2 Estadísticas generales de los huracanes que pasaron cerca de las costas venezolanas 69
Tabla 9.3 Relación entre el paso de un evento meteorológico por debajo de la Lat. 13º 15' y las características generales de la temporada de huracanes 70
Tabla 9.4 Relación entre la frecuencia con la que pasa un huracán cerca de las costas venezolanas y el valor del índice ONI para el mes en que ocurre el paso del huracán 71
Tabla 10.1 Oleajes de tormenta generados por fenómenos meteorológicos 78
Tabla 12.1 Regiones o zonas Niño y sus dimensiones e índices asociados 85
Tabla 12.2 Clasificación de eventos del ENOS según su intensidad 95
Tabla 12.3 Cuadro resumen de los diferentes Índices utilizados para caracterizar y cuantificar los eventos ENOS ("El Niño" o "La Niña" 96
Tabla 12.4 Escala de Saffir-Simpson 97

1. *INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS*

Es indudable el interés existente en la actualidad sobre el fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENOS), hecho que se ve reflejado en la gran cantidad de artículos publicados sobre lo que se podría considerar como la más importante variabilidad climática interanual que se tiene identificada en los actuales momentos, dados los efectos que dicho fenómeno tiene sobre las condiciones meteorológicas, tanto en las cercanías como en sitios muy distantes de su lugar de origen, especialmente sobre la temperatura, corrientes marinas, patrones de viento, régimen de precipitaciones, y en general sobre actividades económicas y humanas, siendo de hecho, responsable de una gran parte de los cambios que ocurren año tras año en los climas locales de numerosas regiones del mundo.

En términos sencillos, El ENOS (ó ENSO por *El Niño Southern Oscillation* por sus siglas en inglés) puede definirse como el calentamiento anormal del Océano Pacífico ecuatorial conjuntamente con bajas presiones atmosféricas en el Pacífico Sur, frente a las costas del norte del Perú, Ecuador y sur de Colombia, y siendo un evento globalizado, sus efectos producen anomalías climáticas en diferentes partes del mundo, las cuales interconectan regiones del planeta ampliamente separadas (Glantz 1994), pudiendo manifestarse dichas anomalías en forma de severas sequías, inundaciones y huracanes.

Estas interconexiones funcionan con consecuencias similares u opuestas de forma tal de que mientras en Indonesia, Australia o el sudeste Africano, "El Niño" puede significar fuertes sequías acompañadas de grandes incendios forestales, y en Centroamérica y el Caribe también se registran sequías moderadas, en la costa oeste de Estados Unidos, ó en Perú y Ecuador, "El Niño" está asociado a temporales de lluvia de gran intensidad que pueden generar inundaciones y deslizamientos de tierra, mientras que en la costa Noreste de Estados Unidos se tendrán inviernos más templados de lo normal y temporadas de huracanes más leves.

En términos estrictamente técnicos, "El Niño" se refiere al componente oceánico del sistema "El Niño/Oscilación del Sur", mientras la Oscilación del Sur se refiere a la componente atmosférica y el ENOS al sistema acoplado, pero en la práctica, "El Niño" es utilizado con frecuencia para referirse a todo el sistema. (NOAA 1) y hoy por hoy, es reconocido por la fuerte influencia que tiene en los cambios climáticos que ocurren anualmente sobre La Tierra, teniéndose que desde su epicentro en el Pacífico tropical, un evento "El Niño" modifica las corrientes marinas, el campo de vientos alisios, los sistemas de lluvias, así como las trayectorias usuales de las tormentas alrededor del mundo.

Aún hoy en día, se desconoce cual es el factor o factores que sirven como catalizadores para que se genere un ciclo ENOS, sin embargo, numerosas investigaciones han podido identificar los signos ó señales que preceden a la aparición de uno de estos eventos en sus componentes oceánica y atmosférica, y si bien es cierto que los distintos episodios cálidos y fríos del ciclo ENOS pueden ser muy distintos unos de otros, las investigaciones actuales están enfocadas hacia obtener una mejor comprensión del fenómeno y las interacciones existentes entre la atmósfera, la cual conforma un fluido con una estructura altamente dinámica, y el océano que es un medio de más lenta evolución.

Para ello se han desarrollado diversos modelos numéricos y estadísticos de ambos sistemas (atmósfera y océano), cuya utilización conjunta con datos satelitales tiene como objetivo principal la predicción de futuros eventos ENOS, y con ello, la minimización de los potenciales daños asociados a su ocurrencia.

En este trabajo, aún cuando se aporta información matemática relacionada con los modelos climáticos y meteorológicos que sirven para hacer predicciones del tiempo y por ende, la predicción de fenómenos como el ENOS, no se desarrolla ningún tipo de modelo matemático específico, estando el trabajo enfocado hacia áreas como: encontrar posibles

relaciones entre la ocurrencia de fenómenos como el ENOS y la mayor o menor formación de huracanes en el Atlántico y el Mar Caribe.

Igualmente se trató de establecer la existencia o no de tendencias en las características que las temporadas de huracanes en el Océano Atlántico y el Mar Caribe vienen mostrando en los últimos años, y su posible relación con eventos ENOS, así como su influencia y probabilidad de ocurrencia sobre el litoral norte de la República Bolivariana de Venezuela, en el cual se ha venido concentrando en los últimos años diversos estudios y mediciones tendientes a la extracción y explotación futura de gas, a los fines de determinar si realmente pueden considerarse como amenazas naturales para el área marino-costera de la República Bolivariana de Venezuela.

En este sentido se analizará una metodología propuesta por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, a través de la cual se predicen condiciones en un punto a partir de las condiciones originadas por un huracán en otro punto distante, y los resultados obtenidos serán comparados con mediciones reales en el sitio, permitiendo a través de la comparación de ambos grupos de datos (los pronosticados y los realmente medidos), medir la "bondad" y precisión de la metodología, a los fines de poder utilizarla en ausencia de modelos matemáticos, como una herramienta eficaz y sencilla para analizar diferentes escenarios hipotéticos que se puedan plantear en las áreas de interés, escenarios que por lo general conforman "amenazas naturales" al medio costero circundante. Específicamente se analizará y compararán las alturas del oleaje que se pronostiquen con la mencionada metodología, con respecto a las alturas de oleaje medidas.

1.1 OBJETIVOS DEL TRABAJO

Los objetivos que persiguió el desarrollo de este trabajo, sin que el orden en que se nombran esté asociado a su importancia, fueron:

a) Establecer si las metodologías e índices utilizados actualmente para identificar la ocurrencia o no de un evento ENOS (tanto eventos cálidos como "El Niño", como los eventos fríos como "La Niña", son totalmente adecuadas, o si por el contrario, son tan variadas que dificultan tanto el estudio del fenómeno en si, como el tener una única base de datos confiable.

   En tal sentido, se hizo una revisión bibliográfica bien detallada de los diferentes índices y fuentes, actualmente utilizados para la caracterización del fenómeno, de forma tal de seleccionar uno de ellos, en base al cual realizar los diferentes análisis contenidos en este trabajo. La escogencia del índice no obedece necesariamente a que el autor lo considere el "mejor o más representativo de los índices", sino a la factibilidad de tener suficientes registros históricos con los cuales trabajar.

   Una vez escogido el índice que se serviría para determinar la presencia de eventos "El Niño", "La Niña", o condiciones neutras, se procedió a hacer una revisión de la data histórica disponible de las anomalías de la temperatura superficial mar (1950 hasta el presente) en las regiones utilizadas para categorizar a los eventos ENOS.

b) Revisión bibliográfica de diferentes índices de cuantificación existentes para evaluar la intensidad de las temporadas de huracanes, tanto el índice ECA (Índice de energía ciclónica acumulada) utilizado por la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), como diferentes índices reportados en la literatura.

   Como parte de esta actividad se evidencia la poca fiabilidad del índice ECA para caracterizar las temporadas de huracanes y se termina definiendo un índice que se llamó "Índice de temporada" que permite hacer análisis más específicos sobre la intensidad de la temporada de huracanes, al ser analizados por separado los distintos

factores que intervienen en el proceso, lo cual permite a su vez evaluar la sensibilidad que pueda experimentar el comportamiento general de las temporadas de huracanes ante cambios individuadles en cada uno de estos factores.

c) De acuerdo con lo expuesto en el párrafo precedente, se analiza el comportamiento general de las temporadas de huracanes en el Atlántico Norte, desde el punto de vista de la variabilidad temporal de su intensidad y de la frecuencia de ocurrencia de temporadas más intensas de lo normal, a los fines de fijar una posición concluyente acerca de si la intensidad de las temporadas de huracanes ha venido realmente aumentando en los últimos años.

   Para ello se revisó la data histórica disponible (Base de datos HURDAT) de las trayectorias y características principales que han seguido los ciclones tropicales y huracanes (desde 1851 hasta el presente), específicamente en la cuenca del Atlántico, de forma tal de obtener estadísticas generales y para períodos de tiempo específicos, de acuerdo con las limitaciones y calidad que tenga la información contenida en la base de datos utilizada, haciéndose la evaluación y análisis estadísticos de la intensidad de las temporadas de huracanes, a partir del análisis de los diferentes componentes en los cuales se dividió el índice ECA.

d) Cuantificar la probabilidad de que un evento meteorológico (ciclón tropical o huracán) pase cerca de las costas venezolanas, y a través del análisis temporal de ocurrencia de dichos eventos, determinar si dicha probabilidad ha permanecido sin cambios, o por el contrario, si ha experimentado cambios (aumentos o disminuciones) importantes, en especial en los últimos años.

e) Determinar si el paso de ciclones tropicales o huracanes cerca del litoral norte de la República Bolivariana de Venezuela, tiene o no, algún tipo de relación con la ocurrencia de eventos ENOS ("El Niño" o "La Niña).

f) Validar una metodología propuesta por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos con la cual, y sin necesidad de implementar modelos matemáticos globales o locales, se pueden estimar valores de altura de ola en un determinado punto de interés con una precisión aceptable, a partir de las condiciones de viento generadas por un huracán que transita cerca del área de interés. La validación se realizó, comparando los datos calculados a través de la mencionada metodología, contra datos reales medidos en el sitio de análisis.

2. *PREDICCIÓN NUMÉRICA DEL TIEMPO Y LAS ECUACIONES DE LA ATMÓSFERA*

En esta sección se hace una breve descripción y presentación de las ecuaciones generales que sirven para caracterizar la dinámica atmosférica, a los fines de ofrecer una visión general de la complejidad subyacente en los modelos que involucran la predicción numérica del tiempo.

2.1 PREDICCIÓN NUMÉRICA DEL TIEMPO

Aún cuando en este trabajo no se desarrolla ningún modelo predictivo, si se realizó una investigación sobre el proceso de formulación de los mismos, en diversos libros de meteorología dinámica.

Holton (1992), define a la Meteorología Dinámica como el estudio de los diferentes movimientos de la atmósfera, asociados con el tiempo y el clima, teniéndose que para todos esos movimientos, la naturaleza molecular discreta de la atmósfera puede ser ignorada, y en consecuencia la atmósfera puede ser considerada como un medio fluido continuo, o "*continuum*", teniéndose a su vez que un punto de ese "*continuum*" se considera como un elemento de volumen muy pequeño si se le compara con el volumen de la atmósfera bajo consideración, pero que todavía contiene un gran número de moléculas.

Kalnay (2003) aborda el hecho de que en el presente, el pronóstico diario del tiempo está basado en una actividad conocida como "*Numerical Wheather Prediction* (*NWP*)". El *NWP* es la simulación numérica del comportamiento de la atmósfera basado en la física y la dinámica de ella, pero afirma que ese hecho es "sólo la mitad de la historia", ya que las condiciones iniciales de las simulaciones deben estar basadas necesariamente en observaciones, las cuales no son perfectas, siendo incluso algunas de ellas peores que las pronosticadas por el *NWP*, por lo que se debe realizar "la asimilación de los datos", que no es más que el proceso de preparar las condiciones iniciales requeridas para hacer la predicción numérica del tiempo, logrando la mejor combinación de observaciones y pronósticos.

En cualquier caso, se tiene que la predicción numérica del tiempo pasa necesariamente por el desarrollo e implementación de un modelo matemático compuesto por ecuaciones diferenciales parciales, con las cuales se pretende reflejar las leyes generales de la física que rigen a la atmósfera terrestre.

Estos modelos, conocidos como modelos climáticos y meteorológicos, aplican a la atmósfera las ecuaciones de la dinámica de fluidos, de la física y de la química, y dado que la atmósfera conforma un sistema no permanente y no uniforme, para poder predecir sus cambiantes características (el estado del tiempo), los sistemas de ecuaciones representativos deben resolverse sobre un amplio espectro de puntos del sistema (atmósfera en este caso), cubriéndola tanto vertical como horizontalmente.

Si estas simulaciones se realizan durante un período prolongado de tiempo, puede estimarse tanto el estado promedio del sistema como su variabilidad intrínseca (vale decir: el clima), pudiéndose con ello hacerse pronósticos del tiempo a corto plazo, así como plantear y analizar escenarios hipotéticos, observando como reacciona el sistema a distintos tipos de cambios (análisis de sensibilidad) o forzamientos, como lo pudieran ser por ejemplo: variaciones en la energía emitida por el sol, aumentos de la concentración de gases de efecto invernadero, o cambios importantes en el uso de la superficie terrestre.

El crecimiento exponencial en el avance en la predicción numérica del tiempo ha ido de la mano del desarrollo de grandes y poderosas computadoras.

Según Lezaun (2003), la capacidad de cálculo de las computadoras utilizadas en meteorología se ha ido incrementando desde 3000 operaciones/segundo (IBM 701) en 1955, a 2,5 millones de operaciones/segundo (CDC 6600) en 1966, a 7000 millones de operaciones/segundo (Cray C98) en el año 1991, hasta los 100 mil millones de operaciones/segundo (Fujitsu VPP 5000) instalado en Météo-France a finales de 1999.

No obstante, esta relación se está agotando, ya que los modelos numéricos han alcanzado un grado de desarrollo tal, que las nuevas mejoras deben enfocarse hacia nuevas investigaciones y no dirigirse solamente hacia el aumento de la potencia del computador.

Para concluir, el mismo Lezaun aborda el incremento en la calidad de los pronósticos, teniéndose que en 1954 las previsiones que se hacían con el modelo barotrópico (ver aparte 2.2) para un plazo de 24 horas es equivalente a las que se realizaban en 1995 en el Centro Europeo de Predicciones Meteorológicas a medio plazo, para un período de 6 días.

2.2 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA PREDICCIÓN NUMÉRICA

La evolución histórica de la predicción numérica está ligada fundamentalmente a la disminución de las hipótesis necesarias tendientes a simplificar el sistema de ecuaciones diferenciales parciales (EDP) que conforman el modelo matemático a los fines de que sea resuelto con más facilidad.

Ello da origen a diferentes tipos de modelos, tales como:

Modelos barotrópicos: Son los modelos más simples y fueron desarrollados para trabajar en los años 40 en las primeras computadoras. Están basados en lo que se conoce como la "hipótesis barométrica" consistente en suponer que las superficies isobáricas o de presión constante coinciden con las superficies de densidad constante, de forma tal que el gradiente isobárico de temperatura es cero y el viento geostrófico no varía con la altura.

Esta aproximación permitió hacer predicciones cerca del nivel de la atmósfera en el que la divergencia del viento es igual a cero (aproximadamente a 500 hPa.), predicciones que naturalmente arrojaban resultados normalmente alejados de la realidad.

Modelos baroclinos: En los años 60, el aumento en la potencia de cálculo de las nuevas computadoras permitió la aparición de modelos menos restrictivos y simplificados que los modelos barotrópicos, conocidos como modelos baroclinos, en los cuales se considera una atmósfera baroclina en la que las superficies isobáricas e isopícnicas no coinciden, por lo que el gradiente isobárico de temperatura es distinto de cero y el viento geostrófico varía con la altura, pero sólo en módulo y no en dirección.

Los resultados obtenidos, si bien eran mejores que los obtenidos con los modelos barotrópicos, eran también claramente insuficientes para ser utilizados en la predicción diaria del tiempo.

Modelos de ecuaciones primitivas: En la década de los setenta, con el continuo crecimiento de la capacidad de cálculo de las computadoras, se volvieron a "relajar" las hipótesis restrictivas existentes hasta los momentos, dando origen a la utilización de los llamados modelos de ecuaciones primitivas(que aún cuando utilizaban las ecuaciones diferenciales parciales simplificadas, mantenían las variables que eran directamente observables (temperatura, humedad y componentes del viento), a diferencia de los modelos previos que se basaban en el uso de la vorticidad y la divergencia del viento, las cuales posteriormente eran convertidas en valores de componentes del viento y temperatura. Este tipo de modelos consideraban ya una completa estructura vertical de la

atmósfera y se convirtieron en los primeros modelos numéricos que arrojaban resultados lo suficientemente buenos como para ser utilizados en la predicción diaria del tiempo por parte de los servicios meteorológicos.

En la actualidad, todos los modelos numéricos operativos de importancia en el mundo son modelos en ecuaciones primitivas, llegándose a un nivel en el cual está comprobado que las diferencias existentes entre los datos reales y los pronosticados no tienen su origen en deficiencias relacionadas con la formulación de las ecuaciones diferenciales envueltas, sino en la forma en que éstas son discretizadas y resueltas.

Un primer problema surgía con las resoluciones espaciales, tanto horizontal (Δx) como vertical (Δy) del elemento de integración, mientras que el segundo problema estaba relacionado con la discretización temporal (Δt).

Las soluciones adoptadas para paliar estos dos (2) efectos (celdas de cálculo más pequeñas y resueltas a intervalos de tiempo Δt más pequeños), han sido las que han marcado la pauta y la evolución de los modelos numéricos de predicción del tiempo durante al menos los últimos 25 años, y se han visto favorecidas por el incremento de la capacidad de cálculo de los nuevos y más poderosos ordenadores.

Modelos de mesoescala: Es evidente que el aumento de la resolución horizontal y vertical de los modelos matemáticos gracias a la utilización de ordenadores de mayor capacidad de cálculo, se traduce en sustanciales mejoras en la representación que se pueda hacer de la orografía de la superficie de la Tierra dentro del modelo, y dado que el efecto de la orografía es muy importante en la atmósfera, los resultados numéricos que se obtengan mejorarán sustancialmente en la medida en que se pasa de celdas de resoluciones de 100 Km. a celdas de resolución de 20 e incluso 10 Km.

No obstante, se ha verificado que la utilización de celdas menores a 10 Km. no mejora sustancialmente los resultados y que la hipótesis hidrostática incluída en los modelos de ecuaciones primitivas comienza a perder su validez, al tiempo que ciertos esquemas de parametrizaciones físicas deben ser reformulados a los fines de adaptarlos a celdas con resoluciones cercanas a los 5 Km.

A este tipo de modelos que utilizan resoluciones de más de 5 Km., y que ya no incluyen la hipótesis hidrostática en su formulación, se les suele llamar modelos de mesoescala, los cuales aún están en fase de investigación, y cuyo desarrollo definitivo conforma el gran reto de la predicción numérica del presente y años venideros.

En la Tabla 2.1 se presentan diferentes tipos de modelos matemáticos, clasificados de acuerdo al tamaño de la escala de los problemas que se quieren modelar.

Tabla 2.1 Clasificación de modelos numéricos según su escala espacial

Tipo de modelo	Dominio Típico		Resolución horizontal Típica
	Horizontal	Vertical	
Microescala	200 x 200 m^2	100 m	5 m
Mesoescala (urbanos)	100 x 100 km^2	5 km	1 km
Regionales	1000 x 1000 km^2	10 km	10 km
Sinópticos (continentales)	3000 x 3000 km^2	20 km	100 km
Globales	65000 x 65000 km^2	20 km	500 km

Fuente: Seinfeld y Pandis, 1998.

2.3 ECUACIONES DE MOVIMIENTO DEL SISTEMA EN COORDENADAS INERCIALES

No es objeto de este trabajo el hacer una descripción detallada de las ecuaciones utilizadas para caracterizar el movimiento atmosférico, ni las técnicas numéricas usadas para resolverlas, no obstante, si se considera necesario hacer una breve presentación al respecto.

En un sistema de referencia inercial, la aplicación de la segunda ley de Newton sobre un "pequeño" elemento de fluido se expresa según:

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + \sum_{j=1}^{3} v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i} - g\delta_{i3} + f_{ri} \quad \text{con} \quad i = 1, 2, 3 \tag{2.1}$$

Donde

$\vec{v} = (v_1, v_2, v_3)$ es la velocidad, ρ es la densidad y p es la presión. El primer miembro de esta ecuación representa la derivada de la velocidad, mientras que el segundo término representa la suma de las fuerzas que actúan sobre el elemento de fluido sobre el que se realiza el análisis diferencial, de tal forma que el término:

$-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i}$ representa la fuerza producida por las diferencias de presión

$-g\delta_{i3}$ toma en cuenta la fuerza gravitatoria

mientras que $\vec{fr} = (f_{r1}, f_{r2}, f_{r3})$ toma en cuenta las fuerzas de rozamiento que el resto del sistema ejerce sobre el elemento de fluido analizado.

Por otra parte, la ley de conservación de la masa postula que "*la masa de un elemento de fluido, cuando se sigue en su movimiento, se conserva*", que matemáticamente se representa a través de la denominada ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \sum_{j=1}^{3} v_j \frac{\partial p}{\partial x_j} = -\rho \operatorname{div}(\vec{v}) \tag{2.2}$$

Además, a partir de las leyes termodinámicas descubiertas por Robert Boyle (1627-1691), Jacques Charles (1746-1823) y Joseph Louis Gay-Lussac (1778-1850), se encontró que para gases en los que la densidad es pequeña, el producto de la presión por el volumen es prácticamente proporcional a su temperatura (lo que equivale a considerar el gas como un gas perfecto), por lo que si se considera que la atmósfera es aire seco que se comporta como un gas perfecto, se obtiene la siguiente relación entre la densidad (ρ), la presión (p) y la temperatura absoluta (T):

$$p = \rho R T \tag{2.3}$$

la cual es conocida como la ecuación de estado de los gases perfectos, donde R es la denominada constante de los gases para el aire seco, la cual se puede calcular mediante la ley de Dalton, teniendo en cuenta los diferentes gases que constituyen el aire así como

sus respectivas proporciones, y que puede ser objeto de refinamiento a los fines de tener en cuenta la humedad del aire.

Igualmente, si se hace un balance de energía (primer principio de la termodinámica) en un elemento de fluido atmosférico donde se tenga en cuenta la ley de estado anterior, se obtiene la siguiente relación matemática:

$$C_p\left(\frac{\partial T}{\partial t}+\sum_{j=1}^{3} v_j \frac{\partial T}{\partial x_j}\right)=\frac{RT}{p}\left(\frac{\partial p}{\partial t}+\sum_{j=1}^{3} v_j \frac{\partial p}{\partial x_j}\right)+Q \qquad (2.4)$$

donde T es la temperatura absoluta, C_p es el calor específico a presión constante del aire seco, y Q es el aporte de calor por unidad de masa.

Finalmente se tiene la ecuación correspondiente a la concentración de vapor de agua, expresada según:

$$\frac{\partial q}{\partial t}+\sum_{j=1}^{3} v_j \frac{\partial q}{\partial x_j}=Q' \qquad (2.5)$$

donde q es la humedad específica y Q' el aporte de vapor de agua por unidad de masa, mientras que los términos $\vec{fr}$, Q y Q' representan las fuentes y los sumideros de cantidad de movimiento, de calor y de vapor de agua respectivamente, los cuales si no son tomados en cuenta dan origen a un sistema de ecuaciones representativo de una atmósfera adiabática y sin rozamiento (equivalente a hacer la hipótesis de que el sistema es aislado), que constituye la parte dinámica del modelo.

Si $\vec{fr}$, Q y Q' son conocidos, se tiene que las ecuaciones 2.1 a 2.5 conforman un sistema de siete (7) ecuaciones con siete (7) incógnitas (la densidad, las tres componentes de la velocidad, la presión, la temperatura y la humedad específica) que conjuntamente con las condiciones iniciales y de contorno, se puede resolver mediante modelos y técnicas numéricas.

No obstante todavía existe un problema que se debe resolver, conformado por el hecho de que las ecuaciones del movimiento de los fluidos (ecuaciones 2.1 a 2.5) presentadas en los párrafos previos sólo son válidas para un sistema de coordenadas inercial, mientras que en meteorología se utilizan como referencia sistemas ligados a la superficie de la Tierra, lo cual supone que se deben hacer alteraciones a la formulación original de las ecuaciones de movimiento.

Las alteraciones son dos (2): una debida a la rotación terrestre (fuerza de Coriolis), y la otra asociada a la forma esférica de la Tierra, lo cual hace que se tengan que reescribir las ecuaciones en un nuevo sistema de coordenadas, que pueden ser coordenadas cartesianas o coordenadas esféricas.

Por lo general se utilizan las coordenadas cartesianas cuando se considera que la curvatura de la Tierra es pequeña, y las coordenadas esféricas cuando no se pueda despreciar esa curvatura.

Luego, las ecuaciones meteorológicas del movimiento en un sistema de coordenadas cartesianas (*x,y,z*) ligado a la superficie terrestre, se pueden expresar de acuerdo con lo mostrado en la Figura 2.1.

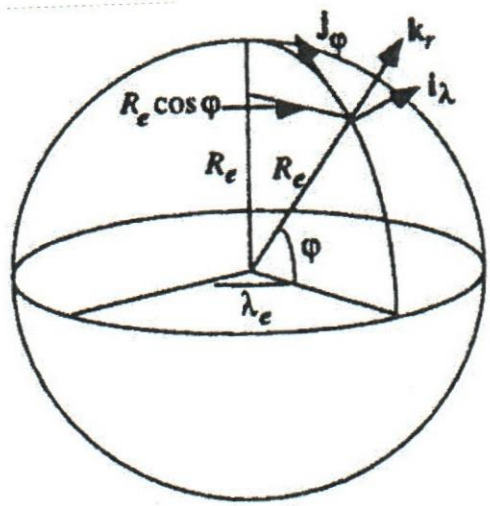


Figura 2.1 Sistema de coordenadas cartesianas y su relación con la superficie terrestre

donde la coordenada *x* es la distancia medida sobre un paralelo terrestre (positiva al este), la coordenada *y* es la distancia medida sobre un meridiano terrestre (positiva hacia el norte), y *z* es la altura sobre la superficie terrestre.

Si se designan por *u* a la componente del viento en la dirección *x*, por *v* a la componente en la dirección *y*, y por *w* a la componente en la dirección *z*, se reescriben las ecuaciones (2.1 a 2.5) en función de estas nuevas variables, y se hace un análisis del orden de magnitud de los distintos términos de las ecuaciones, a los fines de despreciar los términos que tengan menor influencia de acuerdo con la escala de los fenómenos meteorológicos que se quieran estudiar, se obtiene para latitudes medias del hemisferio norte y a escala sinóptica, el siguiente sistema simplificado:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + fv + f_{rx} \quad , \tag{2.6}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + fu + f_{ry} \quad , \tag{2.7}$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -gp, \tag{2.8}$$

$$p = \rho RT, \tag{2.9}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u\frac{\partial \rho}{\partial x} + v\frac{\partial \rho}{\partial y} + w\frac{\partial \rho}{\partial z} = -\rho\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right), \tag{2.10}$$

$$C_p\left(\frac{\partial T}{\partial t}+u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}+w\frac{\partial T}{\partial z}\right)=\frac{RT}{p}\left(\frac{\partial p}{\partial t}+u\frac{\partial p}{\partial x}+v\frac{\partial p}{\partial y}+w\frac{\partial p}{\partial z}\right)=Q \tag{2.11}$$

$$\frac{\partial q}{\partial t}+u\frac{\partial q}{\partial x}+v\frac{\partial q}{\partial y}+w\frac{\partial q}{\partial z}=Q' \ , \tag{2.12}$$

Donde (2.6) y (2.7) son las ecuaciones básicas de la conservación del momento de la meteorología dinámica, (2.8) es la ecuación hidrostática, (2.9) la ecuación de estado, (2.10) representa la ecuación de continuidad o de conservación de la masa, (2.11) la ecuación de la primera ley de la termodinámica y (2.12) es la ecuación del vapor de agua.

El término $f = 2\Omega sen\varphi$ en las ecuaciones (2.6) y (2.7), donde Ω es la velocidad de rotación de la Tierra y φ la latitud, se denomina parámetro de Coriolis.

Las ecuaciones 2.6 a 2.12 conforman básicamente el sistema propuesto por V.Bjerknes (1904) a principios del siglo XX y que intentó resolver L.F.Richardson (1922) a finales de los años 1910, y constituyen una variante de las denominadas ecuaciones de Navier-Stokes.

2.4 ECUACIONES DEL VIENTO GEOSTRÓFICO

Los términos principales de las ecuaciones (2.6) y (2.7) para movimientos atmosféricos de gran escala, están representados generalmente por el gradiente de presión y el término de Coriolis. Si se considera que el movimiento es no acelerado (lo que equivale a tomar en cuenta sólo esos términos), y se desprecian los términos asociados a las fuerzas de rozamiento f_r, se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$v=\frac{1}{\alpha f}\frac{\partial p}{\partial x} \ , \tag{2.13}$$

$$u=\frac{1}{\alpha f}\frac{\partial p}{\partial y} \ , \tag{2.14}$$

donde α es la latitud de la tierra; las cuales se denominan ecuaciones de viento geostrófico, ya que representan el hipotético resultado de un perfecto balance entre la fuerza ocasionada por la rotación de la Tierra (fuerza de Coriolis) y la fuerza del gradiente de presión.

3. *EL NIÑO OSCILACIÓN DEL SUR (ENOS). BREVE RESEÑA HISTÓRICA Y CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES*

3.1 BREVE RESEÑA HISTÓRICA

A lo largo de cientos de años pescadores artesanales de Paita, sector ubicado en la costa Norte del Perú, se habían percatado de la existencia de una contra-corriente caliente que anualmente llegaba desde el Norte, la cual por algún tiempo se sobreponía a las aguas frías de la corriente de Humboldt que se desplazan hacia el Norte.

A finales del siglo XIX, esa corriente recurrente se conocía como Corriente del Niño, ó solamente El Niño, dado a que normalmente hacía su aparición alrededor de Navidad, debiendo aclararse que éste no es el mismo evento "El Niño" que se conoce hoy en día y que se asocia a fuertes cambios climáticos.

Por otra parte, en la India, se sabía que ocasionalmente las lluvias monzónicas fallaban, y cuando lo hacían generaban un caos de grandes dimensiones, razón por la cual personas como el inglés Henry Blanford (Director General del departamento de Meteorología de la India) y su sucesor, Gilbert Walker, se avocaron a tratar de encontrar alguna explicación que tuviera sustentación científica, teniendo Walker el mérito de haber sido capaz de establecer correlaciones estadísticas entre diferentes sistemas climáticos.

Estimulado por las observaciones realizadas por el meteorólogo sueco Hugo Hildebrand, el cual determinó la existencia de una correlación inversa de la presión atmosférica entre Buenos Aires y Sidney, Walker comenzó a comparar y correlacionar información numérica de diferentes lugares del mundo, luego de lo cual describió alrededor de 1920 (Walker 1923) la existencia de tres (3) aparentes balancines en la presión atmosférica y en la precipitación, en los cuales se presentaba el hecho de que un incremento en una región del mundo coincidía con un decremento en otra.

Los primeros dos (2) balancines: "La Oscilación del Atlántico Norte", entre las regiones de los Azores e Islandia, y "La Oscilación del Pacífico Norte", entre las Islas Hawái y Alaska, no terminaban de explicar la variabilidad en la ocurrencia de los monzones de la India, hecho que trató de explicar a través del tercer "balancín".

En Walker y Bliss (1930 y 1932) se observa cada pocos años, que las condiciones atmosféricas usuales a través del Pacífico se invertían. Con su punto de pivoteo ubicado cerca de la línea de cambio de fecha (longitud 180°), las normalmente presiones altas del Este, caían al mismo tiempo que las presiones bajas del Oeste subían.

Para distinguirla de los otros dos (2) ciclos climáticos, Walker le dio el término "Oscilación del Sur", la cual es un enlace de sistemas barométricos en el Océano Pacífico, que controla las variaciones de presión superficial, vientos, temperatura y precipitaciones en los trópicos de esta cuenca oceánica: Horel y Wallace (1981), Yarnal (1985), Yarnal y Kiladis (1985), Ramage (1986), Deser y Wallace (1987), Allan (1988), Enfield (1992), Díaz y Kiladis (1992), Quinn y Neal (1992).

Walker también observó que cuando en la India se presentaban temporadas de monzones con intensidad inusualmente bajas, este hecho con mucha frecuencia estaba asociado a fuertes sequías en Australia, Indonesia, sectores de África y la India, haciendo notar además, que al mismo tiempo en el Oeste de Canadá se presentaban temporadas invernales menos frías de lo normal.

Esto constituyó la primera sugestión de que las condiciones climáticas entre regiones distantes de la Tierra estaban de alguna forma entrelazadas.

Sin embargo no fue sino hasta finales de la década de los 60 y principios de los 70, cuando Jacob Bjerknes, asociando tanto las observaciones de los pescadores peruanos como las de Walker, descubrió los mecanismos físicos que relacionan el anómalo calentamiento del océano (principal manifestación de "El Niño") con la "Oscilación del Sur", y estableció una conexión directa entre los dos (2) grandes sistemas que intervienen en este fenómeno climático: el componente oceánico, y el componente atmosférico.

De acuerdo con Bjerknes (1966 y 1969), el debilitamiento de los flujos de viento provenientes del este en el Pacífico ecuatorial oriental, conjuntamente con presiones anómalamente bajas en el Pacífico oriental y anormalmente altas en el Pacífico occidental, reduce el afloramiento de aguas frías y sirve como catalizador para el incremento de la temperatura superficial del mar: Horel y Wallace (1981), Rasmusson y Carpenter (1982 y 1983), Yarnal (1985), Yarnal y Kiladis (1985), Deser y Wallace (1987).

Es a partir de este momento cuando, dada la estrecha relación interrelación entre "El Niño" como componente oceánico y la "Oscilación del Sur" como elemento atmosférico, se comienza a hablar de "El Niño-Oscilación del Sur", utilizando el acrónimo ENOS ó por sus siglas en inglés ENSO ("*El Niño-Southern Oscillation*").

Este término propuesto por Rasmusson y Carpenter (1982) se ha generalizado al momento de referirse y hablar del fenómeno climático anómalo en sentido global.

Su influencia se proyecta más allá del océano Pacífico Tropical a través de teleconexiones que modifican los patrones del tiempo atmosférico, oscilando entre dos (2) fases: una fase fría y una fase cálida que dependen de la fuerza o debilidad de los vientos alisios (MacPhaden et al., 2006).

Kao y Yu (2009) hablan inclusive de dos (2) tipos diferentes de ENOS en el océano Pacífico Tropical. Uno en el Pacífico Oriental, y otro en el Pacífico Central los cuales son analizados a través de un método que combinando una función empírica ortogonal con un análisis de regresión lineal permiten analizar por separado, la estructura, evolución y teleconexión de ambos tipos de ENOS.

También es bien conocida su relación con las fluctuaciones de los niveles de agua (Amarasekera et al, 1997), la variabilidad en las precipitaciones: Ropelewsky y Halper, (1987), Aceituno y Montesinos (1992), Schongart y Junk (2007), Chavasse y Seoane, (2009), así como alteraciones en el régimen de caudales de ríos ubicados en las cuencas tropicales: García y Mechoso (2005) y Marengo et al (2010).

Pui et al (2012) afirman que aunque la relación entre las precipitaciones estacionales globales y grandes modos climáticos, en particular el fenómeno de "El Niño-Oscilación del Sur (ENOS)", ha sido objeto de esfuerzos significativos y permanentes, realmente se sabe poco acerca de cómo el carácter de los acontecimientos individuales de precipitación varía como una función de cada uno de estos modos de clima, por lo cual estudian el cambio en la ocurrencia de las precipitaciones, en la intensidad y en el tiempo entre tormentas, tanto a escala diaria como escalas menores de tiempo, en el Este de Australia, en función de los índices ENOS, del dipolo del océano Indico (IOD) y del modo anular del Sur (SAM), enfocándose en los meses de la estación fría, teniendo los resultados obtenidos importantes implicaciones tanto en la forma de manejar los recursos hídricos, como en la forma en que los modos climáticos de gran escala se incluyen dentro de los modelos de precipitación, de forma tal de captar mejor la variabilidad interanual y a escalas de tiempo mayores.

Por otra parte Girishkumar y Ravichandran (2012) estudiaron la influencia de "El Niño-Oscilación del Sur (ENOS)" sobre la actividad ciclónica tropical (frecuencia, localización de origen e intensidad) en la Bahía de Bengala durante el principal pico de la temporada de

ciclones tropicales (Octubre-Diciembre) para el período 1993-2010, y encontraron que durante el principal pico de la temporada de ciclones tropicales, la energía ciclónica acumulada estaba inversamente correlacionada con la anomalía de la temperatura superficial del mar en la región Niño 3.4 (Ver Anexo 12.1 donde se explica ampliamente el término), mientras que bajo el régimen de "La Niña" el número de ciclones tropicales extremos, con velocidades del viento superiores a 64 nudos que equivale a huracanes grado 1 o superiores en la escala de Saffir-Simpson (ver Anexo 12.1.6), se incrementaban significativamente durante el principal pico de la temporada, teniéndose que "La Niña" representa la componente "fría" del ciclo del ENOS siendo sus procesos de formación inversos a los de "El Niño", tanto a nivel oceánico como a nivel atmosférico, así como sus consecuencias.

Valiente (1999), presenta resúmenes de las alteraciones oceánicas y atmosféricas generadas por el ENOS, tanto las circunscritas al ámbito del Pacífico ecuatorial (Tabla 3.1), como a nivel global a través de teleconexiones que modifican los patrones del tiempo atmosférico, oscilando entre dos (2) fases: una fría y una fase cálida que dependen de la fuerza o debilidad de los vientos alisios (Tabla 3.2).

Tabla 3.1 Alteraciones oceánicas y atmosféricas generadas por el fenómenos ENOS en el Pacífico ecuatorial

Manifestación (Efecto)	Ámbito geográfico afectado
Calentamiento de la temperatura superficial del mar.	Océano Pacífico ecuatorial central y costas occidentales de América entre 30° N y 30° S (Con mayor incidencia en el litoral Peruano)
Incremento de las precipitaciones, tormentas tropicales e inundaciones.	Océano Pacífico ecuatorial central e islas de este sector del Pacífico.
Presencia de aguas cálidas y aparición de especies animales típicas del ámbito tropical.	Costas de Sudamérica, especialmente de Perú.
Reducción en la concentración de nutrientes.	Océano Pacífico ecuatorial y costa de América entre 30° N y 30° S (Con mayor incidencia en el litoral Peruano).
Incremento de precipitaciones, inundaciones	Costa Norte de Perú y sur de Ecuador.
Sequías y disminución del número de tormentas y ciclones tropicales.	Indonesia, norte y este de Australia y Melanesia.
Incrementos de la temperatura del aire.	Costa oeste de Sudamérica entre 5° y 35° sur.
Disminución de la población de anchoveta y otras especies autóctonas.	Costa de Perú.
Reducción de precipitaciones.	Costa pacífica de América Central.
Reducción en la población de aves marinas.	Costas peruanas e islas del Pacífico ecuatorial.

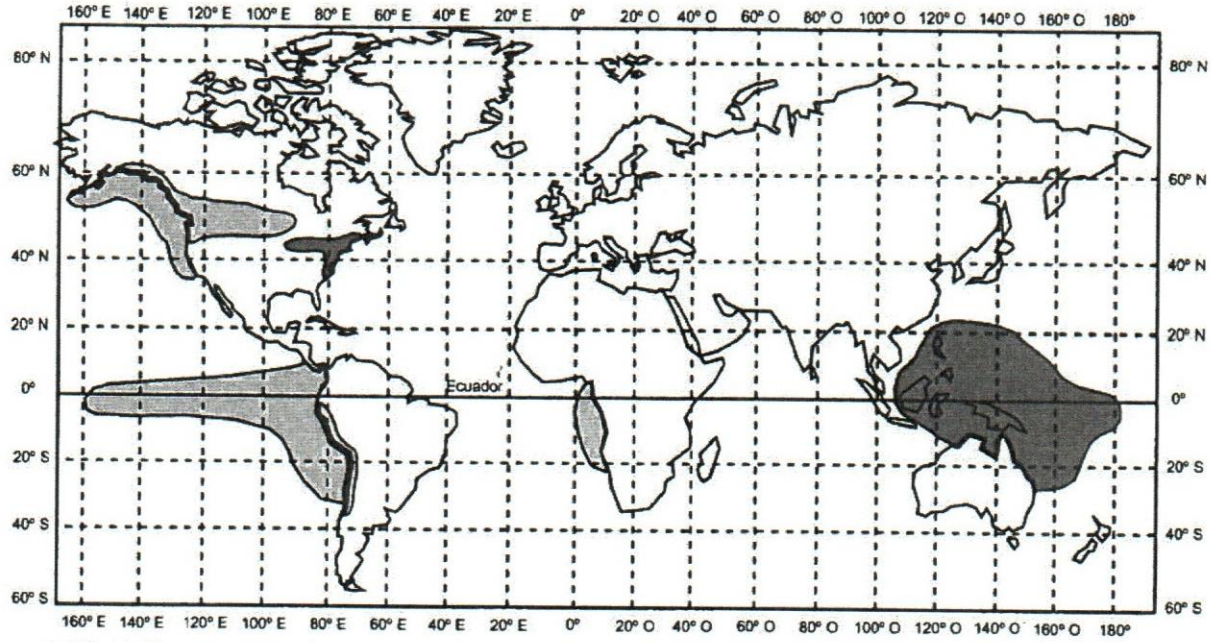
Fuente: Valiente, 1999.

Tabla 3.2 Manifestaciones climáticas y ecológicas globales, relacionadas con la ocurrencia del ENOS

Manifestación (Efecto)	Ámbito geográfico afectado
Sequía.	Altiplano del sur de Perú y noroeste de Bolivia.
Incremento de precipitaciones y mayor número de tormentas e inundaciones.	Sur de Estados Unidos (sudoeste y sudeste) y Norte de México (en especial el noroeste).
Descenso de precipitaciones, sequías y menor número de ciclones tropicales.	Mar Caribe.
Reducción de precipitaciones.	Amazonas brasileño.
Incremento de precipitaciones, aumento de tormentas y mayor entrada de sistemas frontales.	Litoral central de Chile.
Reducción de precipitaciones y eventuales sequías.	Noreste de Brasil.
Reducción de precipitaciones.	Venezuela y Colombia.
Incremento de la temperatura superficial del mar.	Altas latitudes del océano Pacífico oriental (Costa noroeste de Estados Unidos, Canadá y Alaska).
Reducción de fauna marina autóctona (peces y aves), y sustitución por especies de aguas cálidas.	Costa pacífica del nordeste de Estados Unidos y Canadá.
Crisis de la industria pesquera del salmón.	Costa pacífica del nordeste.
Reducción de precipitaciones invernales.	Islas Hawái.
Debilitamiento de la temporada de monzones, con eventuales sequías.	India y sudeste de Asia.
Incremento de precipitaciones.	Extremo sur de la India, Sri Lanka y océano Índico circundante.
Incremento de precipitaciones.	Sur de Brasil y norte de Argentina.
Aumento de temperaturas durante el invierno boreal.	Norte de Estados Unidos, sur de Canadá y Alaska.
Incremento de la temperatura superficial del mar.	Atlántico sud-ecuatorial, litoral de Guinea Meridional.
Fuerte sequía.	Sahel y Sahara occidentales.
Descenso de precipitaciones, sequía.	Extremo sudeste de África y Madagascar.
Reducción de precipitaciones.	Nordeste de China y sudeste de Mongolia.
Reducción de precipitaciones y sequía.	Meseta de Etiopía (extensible a Somalia y Yemen en casos de sequías severas).
Aumento de precipitaciones.	Extremo oriental de África ecuatorial (Kenia, Tanzania).
Incremento de precipitaciones.	Europa occidental (excepto mitad oeste de la Península Ibérica) e Islas Británicas.

Fuente: Valiente, 1999.

Adicionalmente, se presentan las Figuras 3.1 y 3.2 donde se esquematizan las teleconexiones termométricas (temperatura) y pluviométricas (precipitaciones) respectivamente, que a nivel global tiene el fenómeno del ENOS, tanto sobre continentes, como sobre océanos.

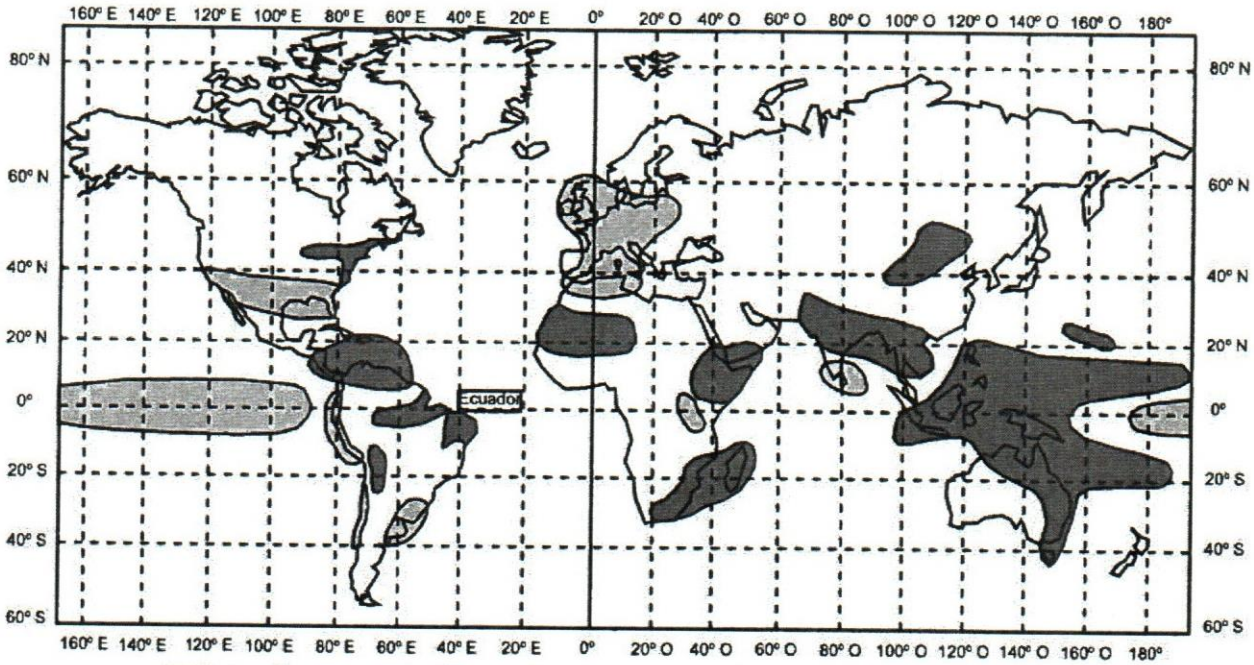


Región con aumento de temperatura del aire o de calentamiento oceánico.

Región de enfriamiento oceánico o con descenso de temperatura del aire.

NOTA: Pese a que la mayoría de teleconexiones pluviométricas comportan aumentos o descensos termométricos en función de si las desviaciones de precipitación son negativas o positivas, respectivamente, en este mapa tan sólo se muestran las variaciones de temperatura más destacables.

Figura 3.1 Distribución espacial de las principales teleconexiones termométricas globales asociadas a la ocurrencia del fenómeno ENOS.



Región con aumento de precipitaciones (y eventuales inundaciones).

Región con descenso pluviométrico (y eventuales sequías).

Figura 3.2 Distribución espacial de las principales teleconexiones pluviométricas globales asociadas a la ocurrencia del fenómeno ENOS.

Fuente de ambas figuras: Valiente, 1999.

3.2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

Actualmente, diversas investigaciones de índole oceanográfica y meteorológica demuestran la existencia de eventos climáticos de escala global relacionados con las interacciones inestables entre dos (2) grandes sistemas: el oceánico y el atmosférico.

Uno de los eventos de interacción océano-atmósfera de mayor importancia, es el conocido en el medio científico con el nombre de "El Niño-Oscilación del Sur (ENOS)", comúnmente conocido como "El Niño", que no debe confundirse con la corriente estacional cálida que los pescadores peruanos denominan "la corriente de El Niño" y que se desplaza a lo largo de la costa de Ecuador y Perú (Glantz, 1996) y (Voituriez y Jacques, 2000), la cual se desarrolla todos los años a partir del mes de Diciembre aproximadamente, enfrentando y desplazando a la corriente fría de Humbotld (Glantz, 1996).

Por otra parte, un evento ENOS no se desarrolla de forma periódica, haciendo su aparición a intervalos irregulares que oscilan aproximadamente entre los 3 y 7 años, destacándose que durante los años en los que se manifiesta la fase cálida del ciclo ENOS, existe un fortalecimiento de "la corriente de El Niño".

De manera muy resumida, "El Niño Oscilación del Sur (ENOS)", corresponde a un evento climático que de forma natural se desarrolla en el océano Pacífico ecuatorial central, consistente de dos (2) fases: una cálida y una fría, teniéndose que las consecuencias socioeconómicas de las perturbaciones climáticas asociadas a la variabilidad del ciclo ENOS pueden llegar a ser catastróficas (Maturana et al, 2004).

Ambas fases generan notables y variados cambios en el clima global de La Tierra, parte de cuyos efectos pueden apreciarse en las Tablas 3.1 y 3.2 y en las Figuras 3.1 y 3.2.

Aunque hasta los momentos no se conoce a ciencia cierta cuál o cuales son las condiciones que fungen como catalizadores para activar el comienzo de un ciclo ENOS, las continuas investigaciones han identificado algunos de los signos que preceden al surgimiento de uno de estos eventos en sus componentes oceánica y atmosférica.

Se tiene entonces que la componente oceánica del ciclo ENOS se caracteriza por la aparición de fuertes anomalías positivas (durante la fase cálida) o negativas (si se está en la fase fría) de la temperatura superficial del mar, estando las anomalías positivas de la temperatura asociadas al hundimiento de la termoclina y reducción de la surgencia costera, teniéndose el efecto contrario si las anomalías fuesen negativas.

Por otra parte, la componente atmosférica del ciclo ENOS está relacionada con fluctuaciones interanuales cuasi-sincrónicas de dos (2) sistemas de presión a gran escala: el sistema de baja presión atmosférica superficial situado sobre el lado oeste del océano Pacífico ecuatorial, y el sistema de alta presión atmosférica superficial (anticiclón) ubicado en los subtrópicos orientales del Pacífico Sur.

3.2.1 Fase cálida del ciclo ENOS ("El Niño")

La fase cálida del ENOS, conocida como "El Niño", se manifiesta por un debilitamiento a gran escala de la intensidad de los vientos alisios y por un aumento en la temperatura superficial del mar (TSM) en el océano Pacífico ecuatorial del este central, que se manifiesta a través de anomalías positivas de la TSM, que se obtienen por la diferencia entre el valor observado y la media climatológica del lugar donde se realice la medición.

Adicionalmente se pueden observar presiones atmosféricas a nivel del mar muy por encima de los valores normales en el lado Oeste del Pacífico tropical y en algunas

regiones del océano Índico, y por el contrario, presiones atmosféricas a nivel del mar inusualmente bajas hacia el sureste del Pacífico tropical.

Vientos Alisios: Los vientos superficiales que soplan sobre los océanos en cada uno de los hemisferios, pueden ser agrupados en tres (3) grupos principales:

- Vientos alisios: Los cuales se mueven entre los 0° y 30° de latitud.
- Vientos dominantes del oeste: Cuya acción se concentra entre los 30° y 60° de latitud.
- Vientos polares del oeste: Cuya influencia está restringida al cinturón entre los 60° y 90° de latitud.

Cerca del ecuador terrestre, y en ambos hemisferios, los alisios del noreste para el hemisferio norte y alisios del sureste en el hemisferio sur, convergen hacia un área conocida como la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), tal como se muestra en la Figura 3.3.

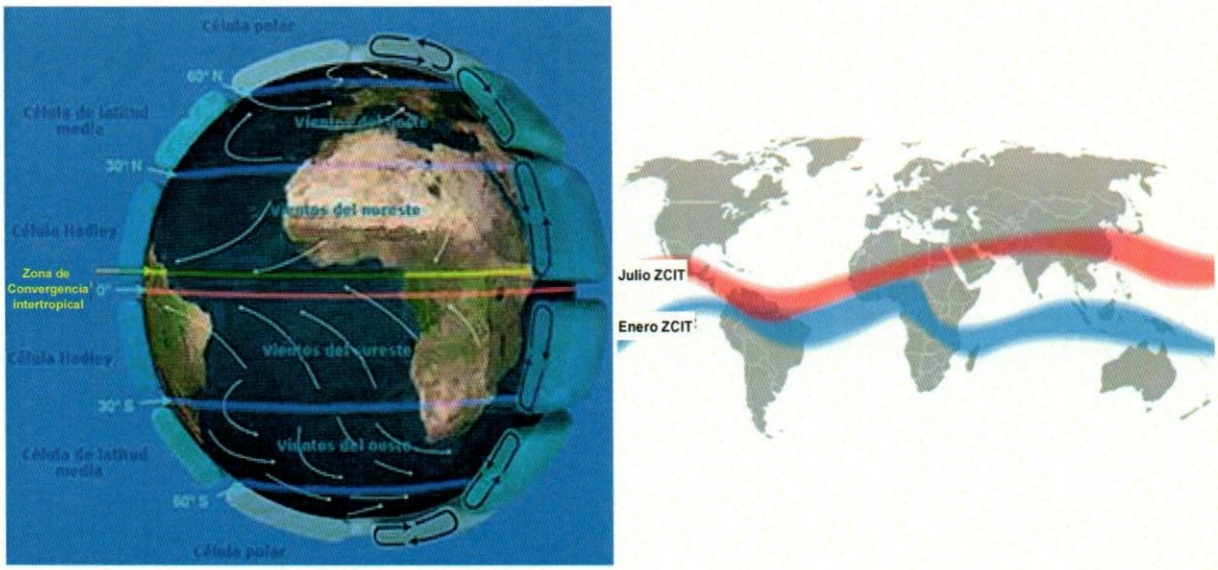


Figura 3.3 Modelo esquemático del régimen global de vientos conjuntamente con la posición de la zona de convergencia intertropical.

Fuente: Imágenes en línea, modificadas por el autor.

Luego de converger, los vientos alisios se dirigen en general, desde el Este (América del Sur), hacia el Oeste (Indonesia), teniéndose que durante el desarrollo de un evento "El Niño", se pueden producir cambios tanto en la intensidad como en la dirección de los vientos, hasta tal punto que puede haber una inversión total de la dirección y tener vientos que soplan desde el Oeste hacia el Este (ver Figura 3.4). Esta condición débil de los alisios genera una disminución de la surgencia ecuatorial, lo cual a su vez facilita la aparición de anomalías positivas de la temperatura superficial del mar.

Presión atmosférica: Los patrones cíclicos de calentamiento y enfriamiento de la atmósfera que se desarrollan tanto en el centro como en el Este del Pacífico, coexisten con cambios relevantes de la presión atmosférica a nivel medio del mar.

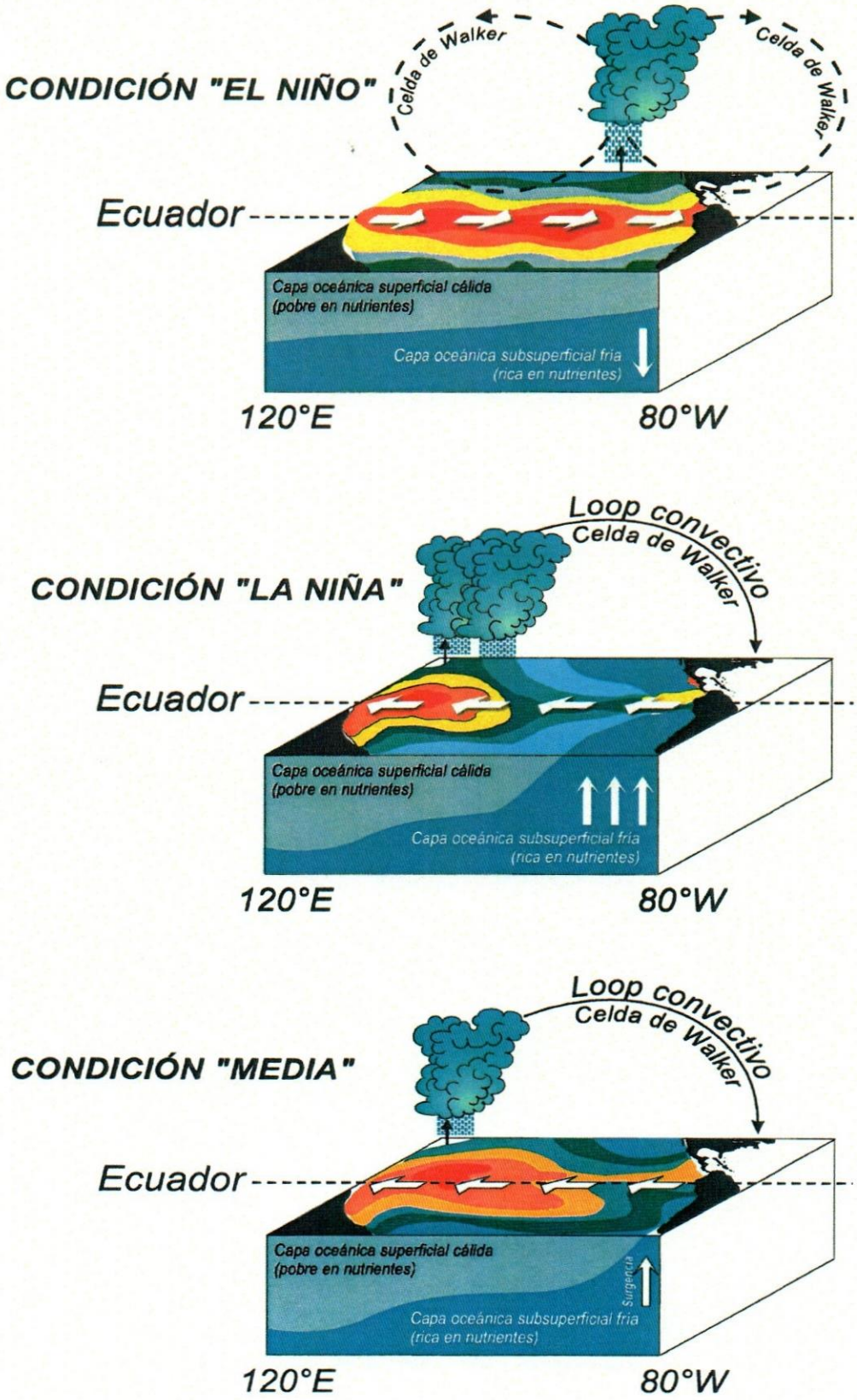


Figura 3.4 Modelo convectivo, de temperatura del mar y de surgencia, bajo condiciones de "El Niño", "La Niña" y condición neutra.

Fuente: Maturana et al, 2004.

Estas diferencias de presiones apreciadas ya desde hace más de ochenta (80) años por Walker, corresponden a la denominada "Oscilación del Sur (OS)", teniéndose que cuando la presión atmosférica aumenta en el lado Este del Pacífico (descendiendo en consecuencia en el lado Oeste) se afirma que la OS está en su fase positiva (La Niña), mientras que por el contrario, cuando el gradiente de la presión atmosférica cambia de sentido (es mayor en el Oeste y menor en el Este), se está en presencia de un evento "El Niño" y la OS está en su fase negativa.

Precipitación: En el lado Oeste del Pacífico tropical existe una gran reserva de calor asociada al "agua de mar caliente", que con temperaturas superficiales del orden de 28° C -29° C conforman lo que comúnmente se conoce como "poza cálida". En esta región del océano es donde se transfiere la mayor cantidad de energía entre el sistema oceánico y el atmosférico debido a la condensación del vapor de agua en conglomerados nubosos, dando origen a la llamada "Celda de Walker" que corresponde a una celda de circulación atmosférica que se desarrolla sobre el Pacífico ecuatorial y que conforma un "*loop*" o ciclo caracterizado por un flujo hacia el Oeste en superficie (vientos alisios), ascenso en el Pacífico ecuatorial occidental, flujo hacia el Este en los niveles altos de la troposfera, y descenso (subsidencia) distribuida a lo largo de toda la zona ecuatorial ubicada al Este de la región de ascenso.

Temperatura superficial del mar y termoclina: A lo largo de la franja ecuatorial, el océano tropical se compone de tres (3) capas: una somera (poca profunda) que se caracteriza por su calidez y buena mezcla; otra profunda, fría y estratificada, y una capa intermedia denominada "termoclina", donde la temperatura del agua disminuye bruscamente con la profundidad.

En el Pacífico occidental ecuatorial, la termoclina se ubica aproximadamente a 200 m. de profundidad, hecho que facilita la acumulación de aguas cálidas en el sector oceánico próximo a Indonesia, mientras que por el contrario, en el Pacífico oriental ecuatorial la posición a la que típicamente se encuentra la termoclina es a 50 m. por debajo de la superficie del mar, debido al fenómeno de surgencia. Un esquema típico de lo expresado anteriormente se presenta en la Figura 3.5.

Nivel del mar y surgencia: Bajo condiciones normales, la influencia de los vientos alisios en el Pacífico ecuatorial, genera una corriente conocida como Corriente Ecuatorial, la cual induce un cambio de pendiente en el nivel del mar, manifestado en un ascenso cercano a 40 cm en el borde occidental del Pacífico, en relación con el borde oriental.

Durante la fase cálida del ciclo ENOS, el nivel del mar se incrementa en el área cercana a las costas del Pacífico oriental y concomitantemente disminuye en el sector occidental, en respuesta al debilitamiento de los vientos alisios.

3.2.2 Fase fría del ciclo ENOS ("La Niña")

En el caso de la fase fría del ENOS, conocida como "La Niña", se presentan condiciones anómalas y opuestas a las que ocurren en un evento El Niño.

Hay acumulación de aguas cálidas en el Pacífico occidental debido a la intensificación del régimen de los vientos alisios que soplan desde el Este, así como una intensificación del funcionamiento de la "Celda de Walker", mientras que el "traslado" de un gran volumen de aguas cálidas hacia el Oeste con el consecuente aumento de la temperatura superficial del mar en ese sector, permite el fortalecimiento del fenómeno de surgencia en el sector del Pacífico oriental, frente a las costas de Ecuador, Perú y el Norte de Chile.

Vientos Alisios: En presencia de un evento "La Niña", los vientos que soplan hacia el Oeste a lo largo del Pacífico ecuatorial se intensifican, con el consecuente aumento del desplazamiento de las aguas "cálidas" superficiales hacia el sector occidental del Pacífico, hecho que a su vez promueve el ascenso de aguas más profundas y frías con la consecuente disminución de profundidad a la que se ubica la termoclina.

Presión atmosférica: Durante la fase fría del ciclo ENOS, la presión atmosférica tiene valores inferiores a lo normal en el sector de Indonesia y Norte de Australia (extremo occidental del Pacífico), mientras que es más alta de lo normal en el Pacífico tropical de Este.

Precipitación: Como consecuencia del enfriamiento de las aguas cercanas a la línea ecuatorial (aproximadamente entre 5° de latitud Norte y 5° de latitud Sur), y la correspondiente intensificación de la "Celda de Walker", se originan anomalías en el patrón de la circulación atmosférica tropical cuyas manifestaciones se materializan en un déficit de precipitaciones en el lado Este del Pacífico, sector en el cual se observan condiciones atmosféricas más secas que lo normal, mientras que por el contrario, en el sector del Pacífico occidental hay abundantes precipitaciones en regiones como Indonesia, Malasia y el Norte de Australia.

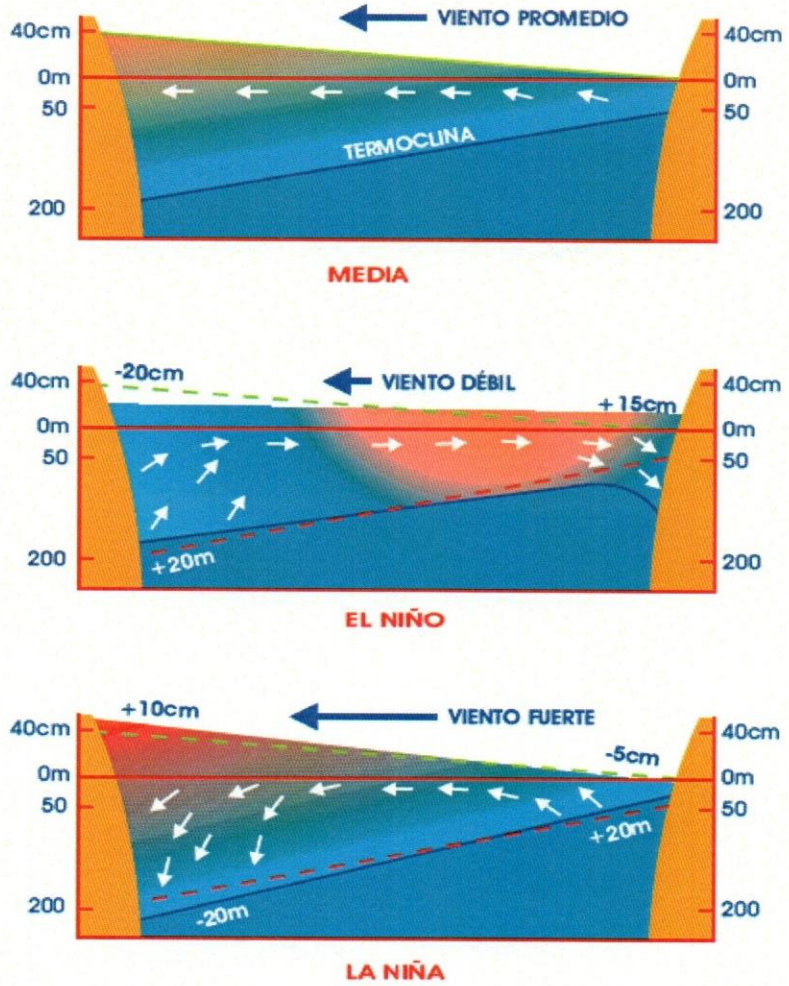


Figura 3.5 Esquema de las variaciones que ocurren en la profundidad de la termoclina y en el Nivel Medio del Mar, bajo condiciones Neutras, de El Niño y de La Niña.

Fuente: Maturana et al, 2004.

4. *AÑOS DONDE SE PRESENTA EL FENÓMENO DE EL NIÑO Y DONDE SE PRESENTA EL FENÓMENO DE LA NIÑA. CUANTIFICACÓN DEL FENÓMENO*

Las definiciones de lo que constituye un año de "*El Niño*" ó uno de "La Niña" pueden variar, dependiendo del índice y la base de referencia que se utilice para cuantificar el fenómeno.

No obstante, hay que tener presente que al igual que cuando se habla de la civilización humana, cuyo desarrollo es dividido por muchos autores en aquél sin historia (prehistoria), y uno posterior con historia que comienza con la invención de la escritura, la datación de diversos episodios "El Niño" está íntimamente relacionada con el conocimiento que los humanos han tenido del Océano Pacífico, que es el sistema donde hoy en día se sabe con certeza que dicho fenómeno se genera.

Es por ello que en ninguna fuente bibliográfica se señala la existencia de eventos "El Niño" antes del descubrimiento del océano Pacífico, ocurrido en 1513 por el navegante portugués Vasco Nuñez de Balboa, siendo Hernando de Magallanes el primer navegante occidental que lo navegó, bautizó, y cruzó en Diciembre de 1520.

Debido a esto, puede decirse que la historia del océano Pacífico sólo comenzó a escribirse a partir de la fecha antes señalada (Araya, 2004).

Hoy en día se puede afirmar que "El Niño" y "La Niña" son fenómenos que existen hace miles de años, que resultan del efecto de muchos factores entre los cuales están; la rotación de la tierra, la redistribución de la energía recibida desde el sol y la disposición que tienen los continentes en relación con los mares, la cual data desde hace unos 50 millones de años (Araya, 2004).

De hecho, durante el año 2000 fueron efectuadas dataciones dendrocronológicas (dendro: árbol, cronos: tiempo) de unos 30 fósiles de alerces maduros encontrados en las cercanías de Puerto Montt (en el Chile austral), que quedaron al descubierto a consecuencia del terremoto del año 1960. Estos fósiles de 50.000 años de antigüedad, de la especie conífera "*Fitzroya cupressoides*", son anteriores a la última era glacial, y el espesor mostrado por sus anillos anuales de crecimiento indican que la variabilidad del clima de ese entonces, era similar al de hoy.

Todo esto conllevó a Glantz (1998) a afirmar que: "No hay una sola lista de años en los que haya sucedido "El Niño" que sea universalmente aceptada".

Sin embargo, existe un acuerdo generalizado que asume que el éxito de cualquier control de calidad de datos climáticos, así como cualquier reconstrucción climática que se quiera realizar a partir de series fragmentadas, depende en gran medida de la calidad de las series de referencia que se empleen, razón por lo cual éstas son un punto focal dentro de cualquier estudio de datos climáticos (Begert, et al., 2005).

Kiem y Franks (2001) en un trabajo que buscaba encontrar correlaciones entre la ocurrencia de eventos "El Niño" y el comportamiento de la precipitación y escorrentía en la cuenca del Río Williams en Nueva Gales del Sur, Australia, obtuvieron resultados muy disímiles entre sí, dependiendo de cual fuera el criterio de clasificación e índice utilizado para evaluar un evento "El Niño", obteniendo las mejores correlaciones al utilizar el índice multivariado.

Es por ello que cualquier caracterización del fenómeno de El Niño o La Niña, pasa por la unificación internacional acerca de cual índice utilizar (ver la amplia documentación que al respecto se presenta en el Anexo 12.1).

En todo caso, el tratar de correlacionar períodos de eventos "El Niño" con las características que presente la temporada de huracanes (intensidad, número de eventos, trayectorias de huracanes, etc.) pasa por tener claro la diversidad de las fuentes de datos, así como la evolución que las mismas han tenido en cuanto a su cantidad y calidad debido a los avances tecnológicos que se han producido, especialmente a partir de la segunda mitad del siglo XX.

Una de las fuentes de datos más completas es la de Quinn (1992): "*The historical record of the Niño events*". Bradley, R.S y Jones P.D (eds): "*Climate Since A.D. 1500*", en la cual se enumeran los diferentes eventos "El Niño" ocurridos entre 1525 y 1990, y los clasifica según su intensidad en:

- VS (*Very Strong*) ó Muy Fuerte.
- S^+ (*Strong*) ó Fuerte.
- S (*Strong*) ó Fuerte.
- M+ (*Moderate*) ó Moderado.
- M (*Moderate*) ó Moderado.

Donde:

La clasificación VS representa anomalías costeras de la temperatura superficial del mar del orden de 6 a12° C a lo largo de las costas de Perú y Ecuador, comparables a los eventos ocurridos en 1877-78, 1891, 1925-26 y 1982-83.

La clasificación S^+ representa eventos significativamente más fuertes que eventos clasificados como S, si se toman en cuenta efectos hidrológicos, grados de destrucción y/o efectos sobre la vida marina, pero para los cuales no hay evidencia suficiente que permita elevarlos a la categoría VS.

La clasificación S agrupa aquellos eventos que presenten anomalías costeras de la temperatura superficial del mar del orden de 3 a 5° C a lo largo de las costas de Perú y Ecuador, comparables a los eventos ocurridos en 1932, 1940-41, 1957-58 y 1972-73.

La clasificación M^+ representa eventos que estuvieron acompañados de un aumento en la actividad hidrológica, pero más cortos en duración y más localizados que los eventos ocurridos en 1939, 1943, 1953 y 1965.

La clasificación M está asociada a anomalías costeras de la temperatura superficial del mar del orden de 2 a 3° C a lo largo de las costas de Perú y Ecuador, comparables a los eventos de 1918-19, 1923, 1930-31, 1976 y 1987.

Las clasificaciones M/S y M^+/M^- agrupan a posibles eventos dobles, pero sin la suficiente evidencia disponible como para que puedan ser diferenciados.

En el Anexo 12.2 se presenta el record climático histórico de los eventos "El Niño" extraído del "*World Data Center for Paleoclimatology and NOAA Paleoclimatology Program*" (tomado de: ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/climate1500ad/ch32.txt) y (Quinn y Neal, 1992) donde se puede obtener una completa descripción de cada uno de los eventos citados.

Por otra parte, en la Figura 4.1 se presentan en forma gráfica, cada uno de los eventos "El Niño" documentados y presentados en el Anexo 12.2 para el período 1525-1987, mientras que en la Figura 4.2 se muestran únicamente los eventos "El Niño" ocurridos entre 1900 y 1987.

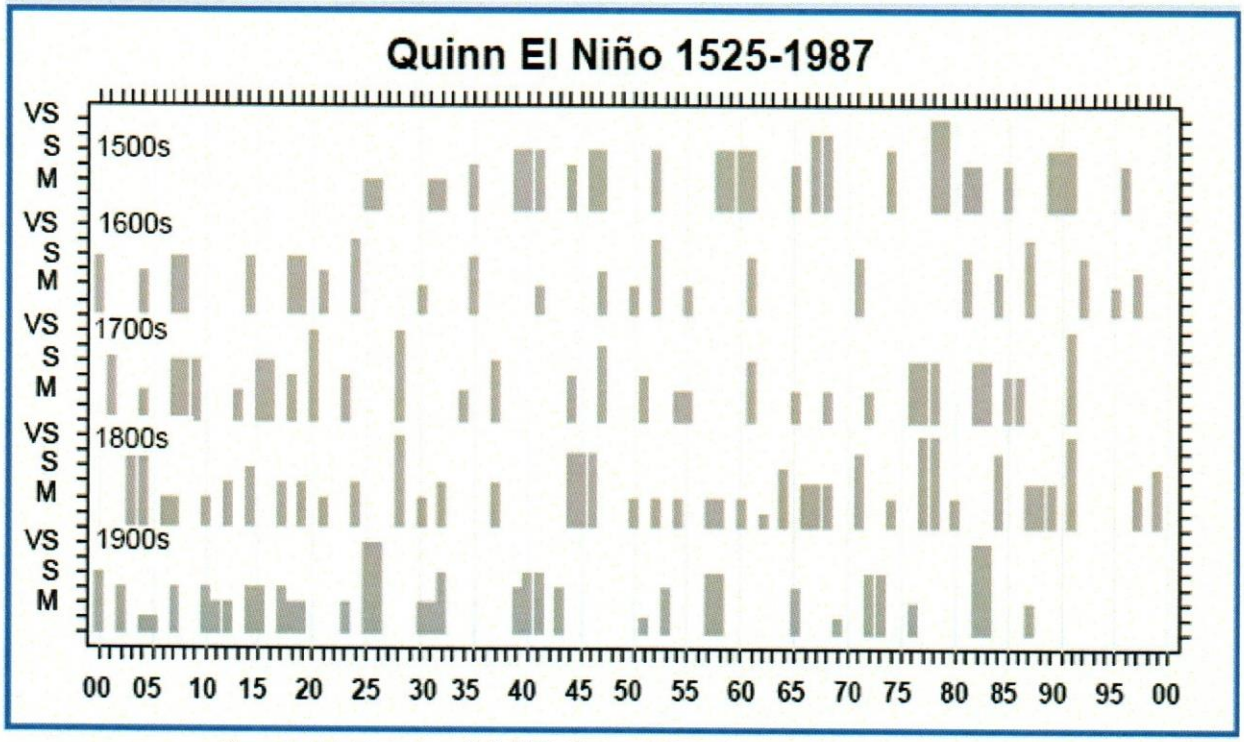


Figura 4.1 Eventos "El Niño" para el período 1525-1987.

Fuente: http://jisao.washington.edu/data/quinn/ y modificado por el autor

Donde los eventos "El Niño" están categorizados como
0 Neutral o frío
1 Moderado débil (M-)
2 Moderado
3 "Moderado +"
4 Fuerte
5 "Fuerte +"
6 Muy Fuerte

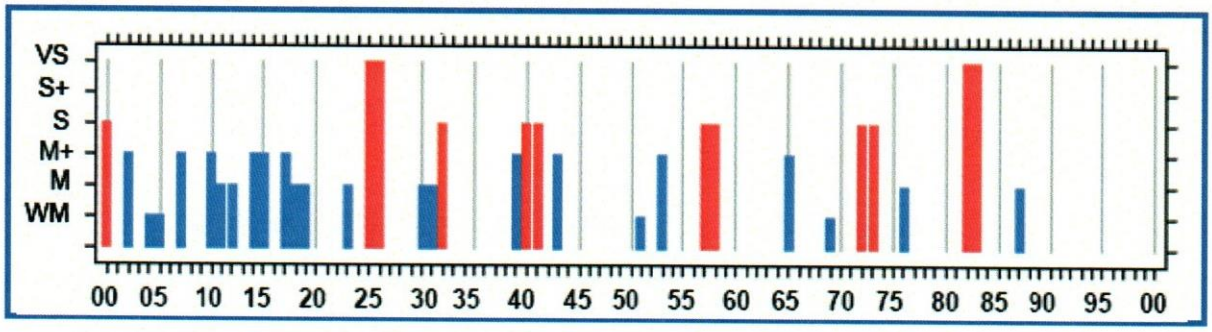


Figura 4.2 Eventos "El Niño" para el período 1900-1987.

Fuente: http://jisao.washington.edu/data/quinn/ y modificado por el autor

4.1 SELECCIÓN DEL ÍNDICE ONI PARA IDENTIFICAR CUANTITATIVAMENTE EL FENÓMENO DE "ELNIÑO-OSCILACIÓN DEL SUR" ENOS

Tal como se mencionó previamente, existe una amplia gama de índices utilizados en la identificación y definición cuantitativa del fenómeno de "El Niño-Oscilación del Sur" (Ver Anexo 12.1), y si bien es cierto que es un fenómeno producido por la interacción de los medios oceánico y atmosférico, solamente se encontraron dos (2) criterios que emplean conjuntamente un índice oceanográfico (anomalía de la superficie del mar), y un índice atmosférico (IOS) para identificar el ENOS (Guevara, 2008). Ellos son:

a) El criterio de Kiladis y Von Loon (1988).

b) El criterio de Ropeleswki y Harpert (1996)

Pero ninguno de los dos (2) criterios está tabulado como índice individual.

Si bien es cierto que entre los objetivos de este trabajo no está el de catalogar de "mejor" o "peor" a los diferentes índices utilizados en la actualidad para tratar de identificar y caracterizar a los fenómenos de "El Niño" o "La Niña", se debe seleccionar alguno de dichos índices para poder realizar diversos análisis con la data que se tiene disponible.

De acuerdo con esta necesidad, se seleccionó el índice oceánico El Niño (ONI), que refleja y representa el criterio del Centro de Predicción Climática (NCEP) de NOAA, conocido corrientemente como El Niño Oceánico. El ONI ("*Oceanic Niño Index*"), el cual se calcula a partir del promedio móvil de la anomalía de la temperatura superficial del mar con respecto al período de referencia 1971-2000, de tres (3) meses consecutivos: la anomalía del mes, la anomalía del mes precedente y la anomalía del siguiente mes, en la región Niño 3.4 (5° N a 5° S y 120° W a 170° W), de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Indice\ ONI\ del\ mes_{\ i} = \frac{(A_{i-1} + A_i + A_{i+1})}{3} \qquad (4.1)$$

Donde A_i es la anomalía de la temperatura superficial del mar (ASTM) del mes de cálculo y A_{i-1} y A_{i+1}, son las anomalías de la temperatura superficial del mar del mes anterior y del mes posterior, respectivamente, al mes donde se quiere calcular el índice.

En el año 2003 este índice fue adoptado como concepto operacional de "El Niño" y "La Niña" por la NOAA conjuntamente con las siguientes instituciones: *Scripps Institute of Oceanography, The Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies, The Center for Ocean-Atmospheric Prediction Studies, The Internacional Research Institute for Climate Prediction, The Nacional Center for Atmospheric Research,* y la Universidad de Washington, mientras que en el año 2005, fue adoptado por acuerdo oficial entre Canadá, México y USA, pasando a convertirse en el criterio estándar más utilizado para el monitoreo, evolución y predicción del ENOS en el océano Pacífico.

4.1.1 Cambios relacionados con el cálculo del índice oceánico El Niño

El cálculo del índice ONI ha experimentado cambios en el tiempo, que involucran el período base que se toma como referencia al momento de calcular las anomalías de la temperatura superficial del mar. Debido a la tendencia al calentamiento significativo existente en la región Niño 3.4 desde 1950, los eventos de "El Niño" y "La Niña" que son definidos a través de un solo período fijo base de treinta (30) años, (por ejemplo, 1971-2000), están cada vez más, incorporando tendencias a largo plazo que no reflejan la variabilidad interanual ENOS.

En razón de ello, y con el fin de eliminar esta tendencia al calentamiento (ver Figura 4.3), el Centro de Predicción Climático ó "*Climate Prediction Center*" (CPC) dependiente de la NOAA, está adoptando una nueva estrategia para actualizar el período base según la cual habrá múltiples períodos base de treinta (30) años centrados, que se utilizarán para definir el índice oceánico "El Niño" (ONI) como una desviación del promedio o "anomalía", siendo estos períodos base de treinta (30) años utilizados para calcular las anomalías de los siguientes cinco (5) años en el registro histórico, teniéndose por ejemplo que los valores ONI en el quinquenio 1950-1955 estarán basados en el período base comprendido entre 1936-1965, los valores ONI durante el quinquenio 1956-1960 se calcularán tomando como período base el período de treinta (30) años comprendido entre 1941-1970 y así sucesivamente.

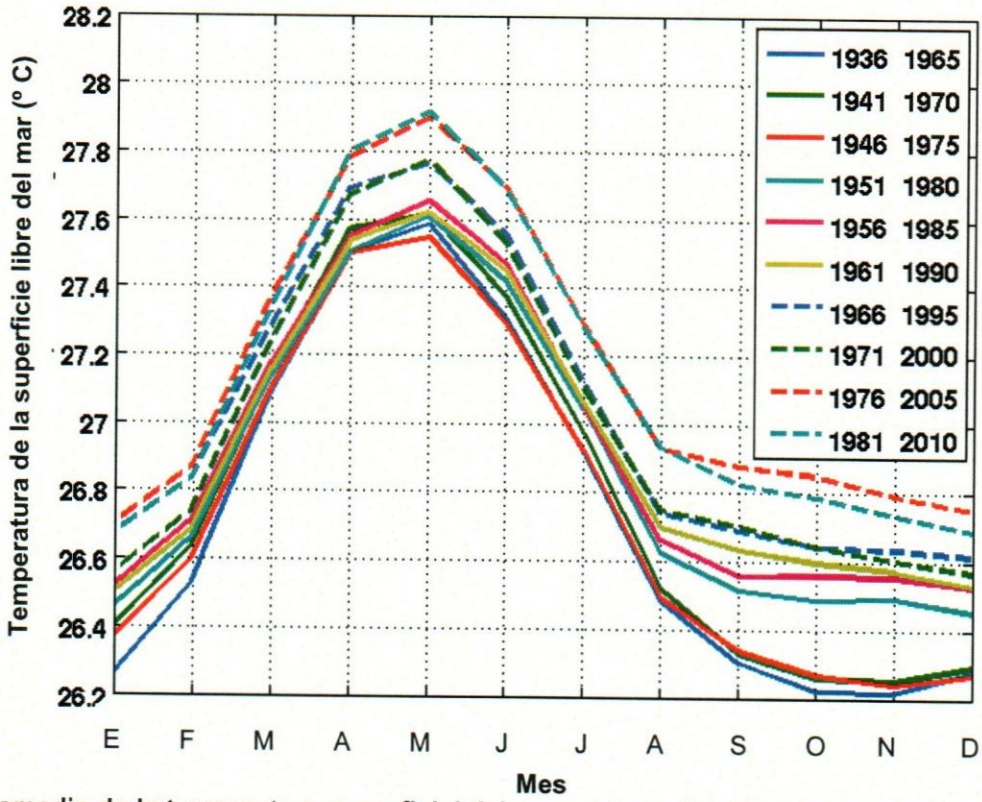


Figura 4.3 Promedio de la temperatura superficial del mar en la región Niño 3.4 para períodos base de 30 años.

Fuente: (NOAA 2) y modificado por el autor

4.1.2 Base de datos del índice ONI de la NOAA

La base de datos del índice seleccionado para hacer los diferentes análisis que se desarrollaron en este trabajo, corresponden a la base de datos del NOAA para el índice ONI, la cual se presenta en el Anexo 12.3, y está compuesta por las anomalías de la temperatura superficial del mar desde el año 1950 hasta el presente (se incluyen datos hasta Noviembre de 2012).

A partir de los datos de esta base se determinarán en buena medida los años donde ocurrieron eventos "El Niño" y "La Niña", siendo complementados para los años anteriores a 1950 con la información contenida en la base de datos histórica de Quinn (1992), sirviendo también para cruzar la información contenida en ambas bases de datos en aquellos períodos de tiempo comunes a ambas (1950-1990)

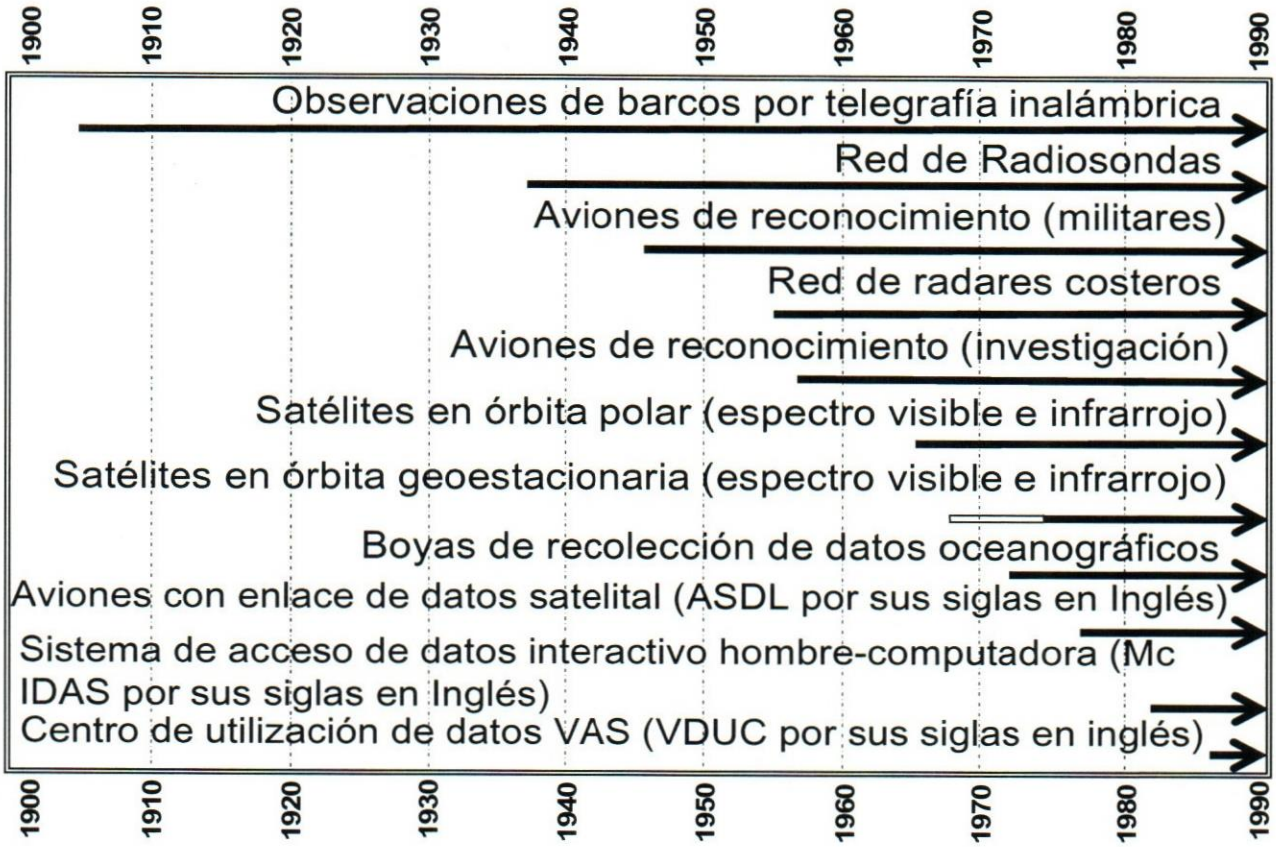


Figura 5.1 Hitos en los sistemas de observación de ciclones tropicales en el Atlántico tropical

Fuente: Sheets (1990) y modificado por el autor

5.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE UNA TEMPORADA DE HURACANES "PROMEDIO Ó TÍPICA"

A los fines de presentar lo que sería "el cuadro de una temporada típica de huracanes en el Atlántico", se ha querido incorporar en este documento información sobre las características y comportamiento que típicamente presenta una temporada de huracanes promedio, presentándose gráficos y tablas que muestren dicho comportamiento.

5.2.1 Trayectorias promedios por mes de los huracanes

Es conocido que la temporada de huracanes en la cuenca Atlántica comienza oficialmente el día 01 de Junio y culmina el 30 de Noviembre de cada año.

El comportamiento, zona de origen y trayectorias de los sistemas meteorológicos que se forman a lo largo de estos seis (06) meses no es homogéneo, presentando características diferentes según sea la fase de avance que presente la temporada de huracanes.

En las Figuras 5.2 a 5.7 y en la Tabla 5.1, tomadas de la página web de NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), http://hurricanes.noaa.gov se muestran tanto las zonas de origen, como las trayectorias promedios para los diversos meses que conforman la temporada de huracanes, las cuales permiten describir el progreso de una típica temporada de huracanes en términos de número total de sistemas tropicales y de huracanes producidos a través del año, recalcándose que representan solamente condiciones promedio, ya que los huracanes se pueden originar en diversas localizaciones y desplazarse a lo largo de trayectorias muy diferentes al promedio.

A partir de las Figuras 5.2 a 5.7 se puede observar como, tanto la zona de origen, como la trayectoria que siguen los fenómenos meteorológicos que se forman durante la temporada de huracanes, son función de la etapa (temprana, media o avanzada) en que se encuentre la temporada de huracanes.

En la Figura 5.8 se muestra para el período 1851-2012, que el número promedio de fenómenos meteorológicos que se han formado en la cuenca Atlántica es de aproximadamente nueve (09), de los cuales, casi cinco y medio (5,5) han sido huracanes, y de éstos, casi dos (2,0) han sido huracanes de categoría 3 o superior (vientos sostenidos comprendidos entre 111 y 130 mph en la escala Saffir/Simpson para huracanes).

Si bien estas cifras representan el "promedio histórico", las mismas deben ser vistas y analizadas con cautela, dadas las grandes diferencias tecnológicas existentes entre mediados del siglo XIX y el presente, las cuales influyen indudablemente tanto en el número de fenómenos meteorológicos detectados, como en sus características (tormenta tropical, huracán, huracán mayor, etc.), y caracterización detallada (mediciones a intervalos de tiempo de la velocidad del viento).

Estas "limitaciones" de la base de datos con la que se pueden hacer análisis de las temporadas de huracanes, serán abordadas en el aparte 5.3.

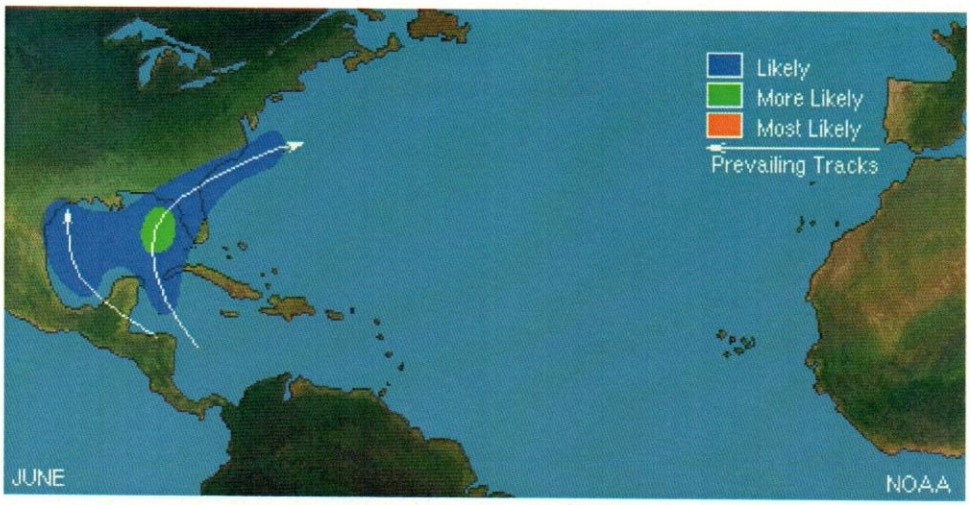


Figura 5.2 Zonas de origen y trayectorias promedio de fenómenos meteorológicos en la cuenca Atlántica para el mes de Junio.

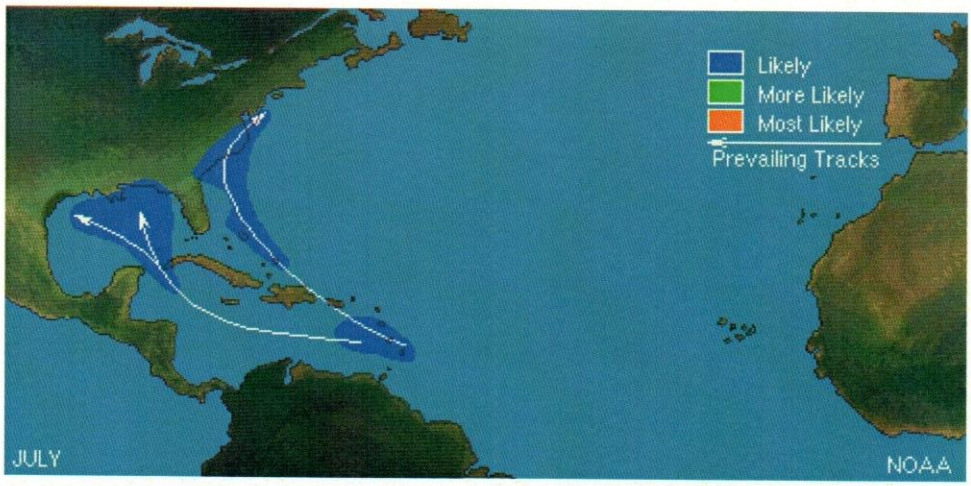


Figura 5.3 Zonas de origen y trayectorias promedio de fenómenos meteorológicos en la cuenca Atlántica para el mes de Julio.

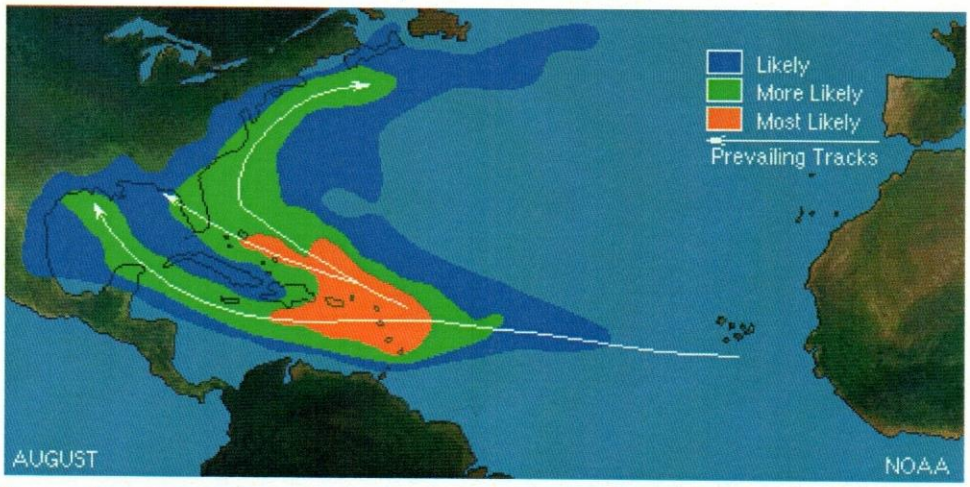


Figura 5.4 Zonas de origen y trayectorias promedio de fenómenos meteorológicos en la cuenca Atlántica para el mes de Agosto.

Fuente de las figuras: NOAA (3)

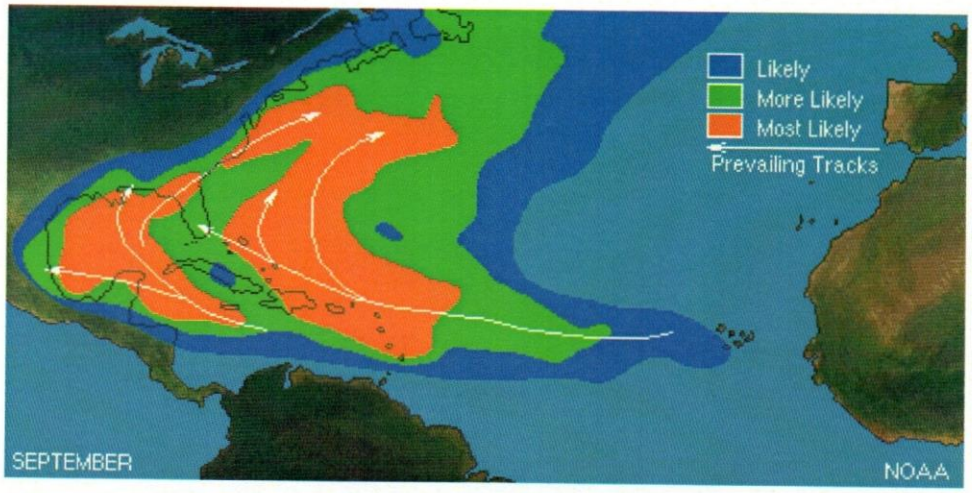


Figura 5.5 Zonas de origen y trayectorias promedio de fenómenos meteorológicos en la cuenca Atlántica para el mes de Septiembre.

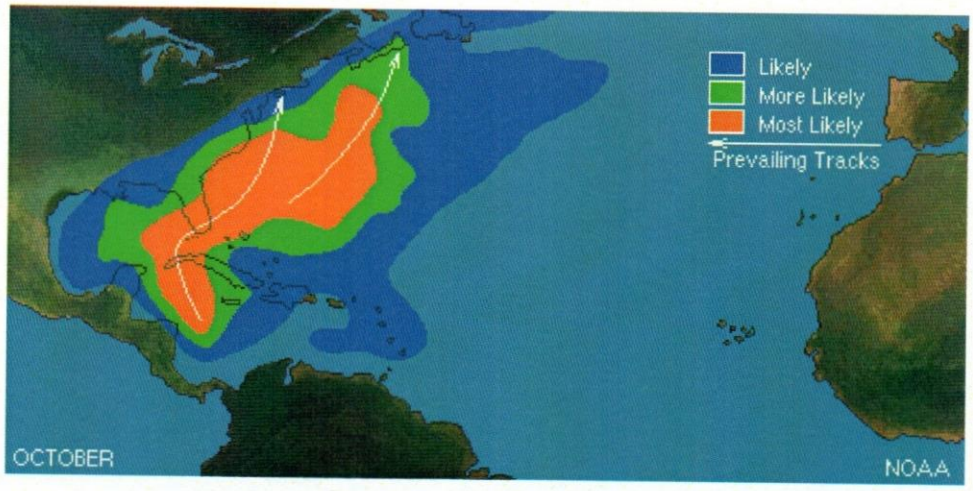


Figura 5.6 Zonas de origen y trayectorias promedio de fenómenos meteorológicos en la cuenca Atlántica para el mes de Octubre.

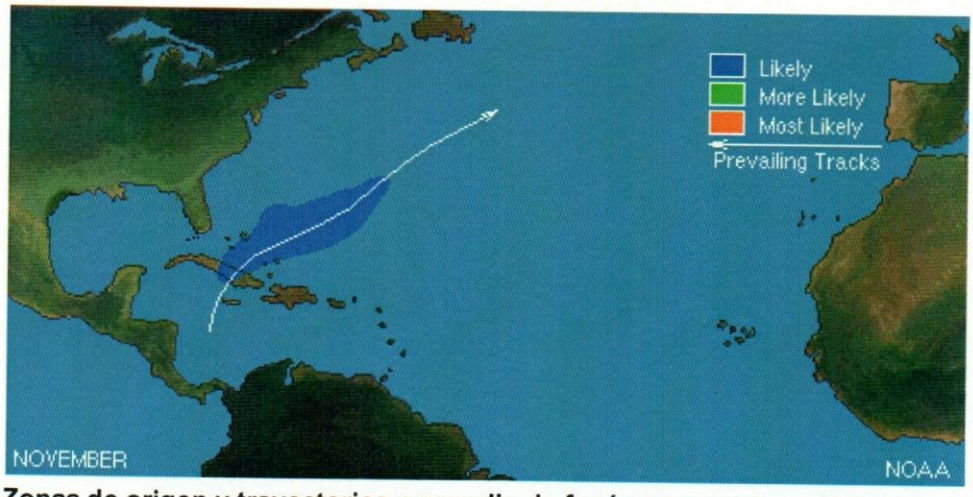


Figura 5.7 Zonas de origen y trayectorias promedio de fenómenos meteorológicos en la cuenca Atlántica para el mes de Noviembre.

Fuente de las figuras: NOAA (3)

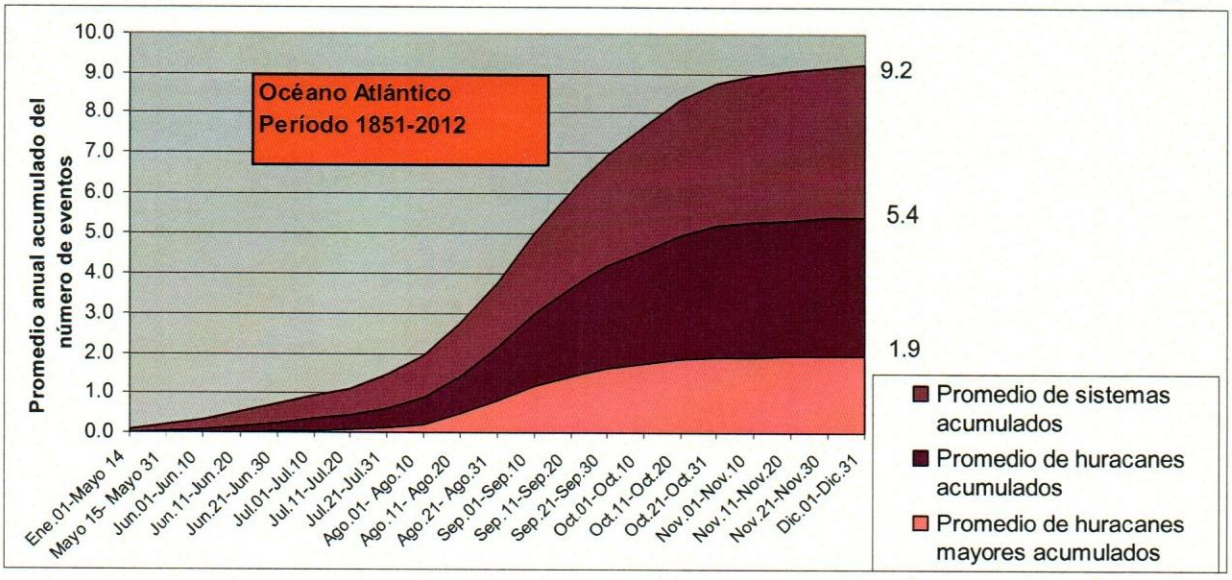


Figura 5.8 Promedio histórico de ocurrencia de fenómenos meteorológicos en la cuenca Atlántica (1851-2012)

Adicionalmente, en la Tabla 5.1 se muestra para el período 1944-2012, la evolución de una temporada de huracanes promedio en el Atlántico.

Tabla 5.1 Evolución promedio de una temporada de huracanes en la cuenca Atlántica (1944-2012)

Número	Sistemas identificados hasta la fecha	Huracanes	Huracanes mayores (Grado 3 o sup.)
1	Julio 04	Agosto 02	Agosto 25
2	Agosto 02	Agosto 20	Septiembre 15
3	Agosto 15	Septiembre 01	
4	Agosto 21	Septiembre 13	
5	Agosto 26	Septiembre 30	
6	Septiembre 05	Noviembre 01	
7	Septiembre 10		
8	Septiembre 20		
9	Septiembre 30		
10	Octubre 15		
11	Noviembre 25		

A partir de esta Tabla puede inferirse que en una temporada de huracanes promedio, se esperaría que para mediados del mes de Septiembre hubiesen ocurrido e identificado siete (07) sistemas o fenómenos meteorológicos, de los cuales cuatro (04) serían huracanes, y de estos, dos (02) huracanes serían de categoría 3 o más intenso.

5.3 BASE DE DATOS UTILIZADA, Y SUS LIMITACIONES

La base de datos utilizada para realizar los diferentes análisis y tendencias, es la base de datos de huracanes del Atlántico (conocida como HURDAT) y se remonta a 1851. Sin embargo, debido a que las tormentas tropicales y los huracanes pasan gran parte de su "vida" sobre el océano abierto (teniéndose que inclusive algunos de ellos nunca tocan tierra) muchos de los sistemas se "perdieron", es decir, nunca fueron detectados durante el lapso de tiempo comprendido entre finales del siglo XIX y los comienzos del siglo XX (Vecchi y Knutson, 2008), debido a que hasta ese momento la fuente principal de datos provenía de las observaciones hechas desde buques que navegaban (por obra de la casualidad) cerca del área de ocurrencia del evento.

Tal como se dijo en el aparte 5.1, por mucho tiempo el pronóstico de huracanes y programas de alerta estuvieron seriamente obstaculizados por la falta de observaciones y la capacidad para transmitir las observaciones y advertencias entre los entes pronosticadores y los lugares que pudieran verse afectados, lo cual se hacía hasta finales del siglo XIX a través del telégrafo, a través del cual se transmitían las observaciones diarias de algunas pocas localizaciones en el Mar Caribe, el Atlántico y la costa del Golfo.

A comienzos del siglo XX, el desarrollo de la radio permitió un gran avance en la capacidad de recolectar y comunicar las informaciones desde o hacia los buques en el mar.

Esto, sin bien facilitó mucho el seguimiento, seguía dejando todavía a cerca de la mitad de la cuenca Atlántica sin cobertura (Sheets, 1990), situación que mejoró a partir de 1944 cuando comenzó un sistemático reconocimiento aéreo para monitorear tanto a los ciclones tropicales, como a cualquier perturbación que tuviera el potencial para convertirse en tormenta tropical o en un huracán.

El gran salto en lo que respecta a las herramientas de observación de la meteorología tropical fue sin duda la puesta en operación de los satélites meteorológicos geoestacionarios, los cuales en conjunto con la colocación de un gran número de boyas de medición, permiten en la actualidad la obtención de más y mejores datos de los distintos parámetros meteorológicos y oceanográficos relacionados con la génesis y desarrollo de los huracanes.

En el Anexo 12.4 se presentan datos de importancia obtenidos a partir de la base de datos HURDAT, que sirvieron para los distintos análisis que se realizaron en la búsqueda del establecimiento de correlaciones y tendencias entre la ocurrencia de los eventos "El Niño" y "La Niña" y las características de las temporadas de huracanes en el Atlántico.

6. ÍNDICES DE CUANTIFICACIÓN DE LA INTENSIDAD DE LAS TEMPORADAS DE LOS CICLONES TROPICALES

Parte importante dentro del estudio del clima global lo constituye la climatología de los ciclones tropicales, la cual los describe y caracteriza desde el momento y lugar donde se originan, hasta su completa disipación, siendo de particular interés estudiar a través del tiempo como evolucionan las temporadas de huracanes dado el potencial de daño que tiene todo ciclón que se origine, si su trayectoria atraviesa centros poblados y de producción.

Un buen número de investigadores han empleado con diferentes fines, índices ciclónicos para tratar de caracterizar la actividad, tanto de cada ciclón en particular, como de cada temporada de huracanes, hecho que es de particular interés en este trabajo debido a la potencial relación que pudiera establecerse entre el grado de intensidad de una temporada de huracanes, y la ocurrencia de un evento "El Niño" ó "La Niña".

Por ejemplo, Emanuel (2005) afirma que las pérdidas monetarias ocasionadas por tormentas de vientos podría relacionarse con el cubo de la velocidad del viento existente sobre el área de la tormenta. El área de la tormenta es difícil de calcular debido a que los registros históricos de huracanes no suelen incluir las dimensiones de la tormenta.

Emanuel definió un índice simplificado de disipación de potencia (*Power Dissipation Index*), calculado como la sumatoria de todos los cubos de la velocidad máxima del viento durante la duración del ciclón, según:

$$Indice\ de\ disipación\ de\ potencia\ (IDP) = \sum_{tiempo} v_{máx}^{3} dt \qquad (6.1)$$

Bell (2000) definió el llamado índice de energía ciclónica acumulada (ECA) o *Accumulated Cyclonyc Energy* (ACE) por sus siglas en inglés, el cual se calcula como la suma de los cuadrados de las velocidades máximas del viento de un ciclón específico, a intervalos de seis (6) horas, mientras que el ciclón sea categorizado como Tormenta Tropical o Huracán, de acuerdo a:

$$Indice\ de\ energía\ ciclónica\ acumulada\ (ECA) = \sum_{tiempo} v_{máx}^{2} dt \qquad (6.2)$$

Teniéndose por tanto, que el ECA de una temporada de huracanes es la suma de las ECA de cada uno de los ciclones que se hubiesen generado durante dicha temporada.

Webster et al (2005) utilizó una serie de medidas para diferenciar entre el número de tormentas tropicales y su intensidad, pero se negó a multiplicar la duración de la tormenta por la máxima velocidad del viento como otros han hecho. En vez de eso, calculó "los días de tormenta" (*Storm days*), que representa el número de días que un ciclón tropical permanece con la categoría de tormenta tropical u otra de mayor fuerza (huracanes).

Por tanto, los días de tormenta pueden representarse como:

$$Días\ de\ tormenta = \sum_{tiempo} dt \qquad (6.3)$$

Drews (2007) afirma que el índice de huracanes ECA es un producto de tres (3) factores que pueden revelar el carácter cambiante de la actividad de los huracanes, y utiliza una versión de punto flotante de la escala de Saffir-Simpson para calcular la categoría del huracán por días, teniéndose que la formulación resultante es representativa del flujo de viento del huracán (*Hurricane flux index*) y captura el transporte de aire dentro de éste (ecuación 6.4).

$$\textit{Índice de flujo del huracán} = \sum_{tiempo} V_{máx} dt \tag{6.4}$$

Las ecuaciones (6.1) a (6.4) tienen en general la misma formulación, la cual puede ser expresada de la siguiente forma:

$$\textit{Índice de huracanes} = \sum_{tiempo} V_{máx}^{N} dt \tag{6.5}$$

donde N es el exponente al cual se eleva la velocidad máxima del viento.

En la Tabla 6.1 se resume la gama de exponentes utilizados por diversos investigadores.

Tabla 6.1 Índices de huracanes para diferentes exponentes de la velocidad máxima del viento

Exponente	Significado físico del índice	Nombre del Índice	Autores que lo utilizan
0	Duración	Días de tormenta	Webter, Holland, Curry, Chang
1	Flujo	Días por Categoria	Drews
2	Energía cinética	ECA, HDP	Gray, Bell, Camargo, Sobel
3	Disipación de potencia	IDP	Emanuel

Fuente: Tomada de Drews (2007) y modificada por el autor.

Tomando la idea propuesta por Drews (2007), se define un "Índice de temporada" que tome en cuenta la suma de todas las tormentas tropicales que ocurrieron durante esa temporada, expresándose de la siguiente manera.

$$\textit{Índice de temporada} = \sum_{tormentas} \sum_{tiempo} V_{máx}^{N} dt \tag{6.6}$$

expresión que permite analizar por separado cada uno de los componentes que caracterizan a los huracanes (Número de eventos, duración de los mismos, y su intensidad en términos relacionados directamente con la velocidad del viento).

De los diferentes índices mencionados en la Tabla 6.1, el de la Energía Ciclónica Acumulada (ECA) es el que utiliza la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA por sus siglas en inglés) para tratar de cuantificar el nivel de actividad de cada ciclón tropical y por ende, la actividad total de cada temporada de ciclones, especialmente las del Océano Atlántico que son las que en mayor grado afectan al territorio Norteamericano.

La expresión "actividad total de la temporada" hace referencia a la suma de la intensidad y duración de cada una de las tormentas tropicales y huracanes que ocurran en el Atlántico durante una temporada dada.

El índice o medida, utiliza una aproximación de la energía empleada por un sistema tropical durante su vida y se calcula cada seis (6) horas, siendo la ECA de una temporada de huracanes, la suma de las ECA de cada uno de los ciclones que se hubiesen generado durante dicha temporada, tomándose en consideración tanto el número, como la intensidad y la duración de cada uno de ellos.

El NOAA divide las cifras calculadas por 10^4 para obtener cifras más fácilmente manejables, siendo por tanto la unidad del índice; 10^4 kn^2 (nudos al cuadrado), por lo que la fórmula para el cálculo del ECA de cualquier ciclón tropical (es decir, fenómenos meteorológicos que presenten vientos iguales o superiores a los 35 nudos) queda finalmente expresada de la siguiente forma:

$$Indice\ ECA = 10^{-4} \sum \left(V_{máx}^{2} \right) \qquad (6.7)$$

Donde $V_{máx.}$ es la velocidad sostenida del viento, expresada en nudos.

El ECA de una temporada sirve para clasificar a las temporadas de huracanes según su actividad, teniéndose que el sistema de clasificación de la NOAA las divide en:

- Temporada por encima de lo normal: Son aquellas temporadas que presentan un ECA superior a 103 (115% de la mediana actual), siempre y cuando dos (2) de los siguientes tres (3) parámetros excedan el promedio a largo plazo: Número de tormentas tropicales (10), Huracanes (6) y Huracanes mayores (2).

- Temporada cercana a lo normal: Ni por encima ni por debajo de lo normal.

- Temporada por debajo de lo normal: Son aquellas temporadas de huracanes que presentan un ECA inferior a 66 (74% de la mediana actual).

En el Anexo 12.5 se presenta un ejemplo del cálculo del índice ECA de acuerdo con la ecuación (6.7), específicamente para la temporada de 1983.

Por otra parte, en el aparte 7 se hace un análisis para determinar cuan factible y útil es este índice para caracterizar y clasificar a las temporadas de huracanes.

7. *ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS TEMPORADAS DE HURACANES EN EL ATLÁNTICO NORTE*

7.1 INTENSIDAD DE LAS TEMPORADAS DE HURACANES

Una parte importante de este trabajo consistió en cuantificar e identificar si realmente las temporadas de huracanes se están intensificando o no, independientemente de que se tenga la percepción de que efectivamente se están incrementando. Para ello se hicieron análisis minuciosos, desglosando el índice de energía ciclónica acumulada (ECA) utilizado por la NOAA en sus diferentes componentes, de forma tal de poder analizar por separado los diferentes factores que constituyen el índice, y detectar si fuera el caso, cual o cuales de esos factores pudieran ser potenciales generadores de cambios en el índice de referencia ECA.

Para desarrollar este análisis se analizará la ecuación (6.6) y se utilizará un valor del exponente N=2, similar al que se usa en el cálculo del índice ECA, presentándose los resultados por décadas, y no en forma global, a los fines de tomar en cuenta la variabilidad existente en la calidad y número de los datos, producto de los diferentes avances tecnológicos que se han desarrollado entre 1850 y el presente (ver Figura 5.1).

En primer término, utilizando únicamente las estadísticas de la base de datos de la NOAA, se presentan en las Tablas 7.1 a 7.6 y en las Figuras 7.1 y 7.2 para diferentes períodos de tiempo, el promedio del total de sistemas meteorológicos, el total de huracanes, y el total de huracanes mayores (Grado 3 o superior en la escala de Saffir-Simpson) que ocurrieron a lo largo de las temporadas de huracanes incluidas en el período de tiempo analizado.

Los períodos de tiempo fueron seleccionados de acuerdo con la aparición de técnicas o equipos que influyeron en la cantidad, calidad y precisión de los eventos medidos, evitando así que las estadísticas reportadas mezclen entre sí los distintos grupos de datos medidos, permitiendo una mejor interpretación de los mismos.

Tabla 7.1 Evolución de la temporada de huracanes y estadísticas del número y tipo de eventos ocurridos. Período 1851-2012

Intervalo de ocurrencia de los fenómenos meteorológicos	Total acumulado de sistemas	Promedio de sistemas acumulados	Total de huracanes	Promedio de huracanes acumulados	Total de huracanes mayores	Promedio de huracanes mayores acumulados
Enero 01-Mayo 14	10	0.06	1	0.01	0	0.00
Mayo 15 a Mayo 31	30	0.19	5	0.03	1	0.01
Junio 01-Junio 10	50	0.31	11	0.07	2	0.01
Junio 11-Junio 20	83	0.51	24	0.15	3	0.02
Junio 21-Junio 30	119	0.73	39	0.24	5	0.03
Julio 01-Julio 10	149	0.92	58	0.36	8	0.05
Julio 11-Julio 20	180	1.11	74	0.46	12	0.07
Julio 21-Julio 31	234	1.44	100	0.62	17	0.10
Agosto 01- Agosto 10	318	1.96	144	0.89	31	0.19
Agosto 11- Agosto 20	444	2.74	232	1.43	76	0.47
Agosto 21- Agosto 31	612	3.78	348	2.15	132	0.81
Septiembre 01-Septiembre 10	811	5.01	488	3.01	193	1.19
Septiembre 11-Septiembre 20	974	6.01	591	3.65	231	1.43
Septiembre 21-Septiembre 30	1119	6.91	681	4.20	263	1.62
Octubre 01-Octubre 10	1242	7.67	744	4.59	281	1.73
Octubre 11-Octubre 20	1348	8.32	804	4.96	299	1.85
Octubre 21-Octubre 31	1416	8.74	843	5.20	307	1.90
Noviembre 01-Noviembre 10	1449	8.94	860	5.31	308	1.90
Noviembre 11-Noviembre 20	1470	9.07	869	5.36	312	1.93
Noviembre 21-Noviembre 30	1485	9.17	876	5.41	312	1.93
Diciembre 01-Diciembre 31	1495	**9.23**	878	**5.42**	312	**1.93**

Tabla 7.2 Evolución de la temporada de huracanes y estadísticas del número y tipo de eventos ocurridos. Período 1851-1904 (hasta antes de la utilización del telégrafo)

Intervalo de ocurrencia de los fenómenos meteorológicos	Total acumulado de sistemas	Promedio de sistemas acumulados	Total de huracanes	Promedio de huracanes acumulados	Total de huracanes mayores	Promedio de huracanes mayores acumulados
Enero 01-Mayo 14	0	0.00	0	0.00	0	0.00
Mayo 15 a Mayo 31	5	0.09	1	0.02	0	0.00
Junio 01-Junio 10	11	0.20	2	0.04	0	0.00
Junio 11-Junio 20	21	0.39	8	0.15	0	0.00
Junio 21-Junio 30	30	0.56	13	0.24	0	0.00
Julio 01-Julio 10	43	0.80	20	0.37	0	0.00
Julio 11-Julio 20	47	0.87	24	0.44	0	0.00
Julio 21-Julio 31	53	0.98	28	0.52	0	0.00
Agosto 01- Agosto 10	74	1.37	44	0.81	5	0.09
Agosto 11- Agosto 20	119	2.20	83	1.54	21	0.39
Agosto 21- Agosto 31	153	2.83	113	2.09	31	0.57
Septiembre 01-Septiembre 10	204	3.78	155	2.87	41	0.76
Septiembre 11-Septiembre 20	250	4.63	187	3.46	44	0.81
Septiembre 21-Septiembre 30	295	5.46	218	4.04	53	0.98
Octubre 01-Octubre 10	344	6.37	244	4.52	58	1.07
Octubre 11-Octubre 20	370	6.85	260	4.81	61	1.13
Octubre 21-Octubre 31	396	7.33	275	5.09	62	1.15
Noviembre 01-Noviembre 10	402	7.44	276	5.11	62	1.15
Noviembre 11-Noviembre 20	405	7.50	279	5.17	62	1.15
Noviembre 21-Noviembre 30	410	7.59	280	5.19	62	1.15
Diciembre 01-Diciembre 31	412	**7.63**	281	**5.20**	62	**1.15**

Tabla 7.3 Evolución de la temporada de huracanes y estadísticas del número y tipo de eventos ocurridos. Período 1905-1943 (hasta antes de comenzar los reconocimientos aéreos)

Intervalo de ocurrencia de los fenómenos meteorológicos	Total acumulado de sistemas	Promedio de sistemas acumulados	Total de huracanes	Promedio de huracanes acumulados	Total de huracanes mayores	Promedio de huracanes mayores acumulados
Enero 01-Mayo 14	4	0.10	1	0.03	0	0.00
Mayo 15 a Mayo 31	7	0.18	2	0.05	0	0.00
Junio 01-Junio 10	10	0.26	3	0.08	0	0.00
Junio 11-Junio 20	18	0.46	5	0.13	0	0.00
Junio 21-Junio 30	28	0.72	11	0.28	1	0.03
Julio 01-Julio 10	31	0.79	12	0.31	1	0.03
Julio 11-Julio 20	37	0.95	15	0.38	3	0.08
Julio 21-Julio 31	50	1.28	23	0.59	5	0.13
Agosto 01- Agosto 10	68	1.74	32	0.82	7	0.18
Agosto 11- Agosto 20	86	2.21	44	1.13	16	0.41
Agosto 21- Agosto 31	124	3.18	69	1.77	26	0.67
Septiembre 01-Septiembre 10	166	4.26	97	2.49	36	0.92
Septiembre 11-Septiembre 20	204	5.23	117	3.00	45	1.15
Septiembre 21-Septiembre 30	232	5.95	129	3.31	49	1.26
Octubre 01-Octubre 10	253	6.49	141	3.62	56	1.44
Octubre 11-Octubre 20	286	7.33	152	3.90	60	1.54
Octubre 21-Octubre 31	298	7.64	157	4.03	61	1.56
Noviembre 01-Noviembre 10	309	7.92	162	4.15	61	1.56
Noviembre 11-Noviembre 20	317	8.13	164	4.21	63	1.62
Noviembre 21-Noviembre 30	319	8.18	165	4.23	63	1.62
Diciembre 01-Diciembre 31	319	**8.18**	165	**4.23**	63	**1.62**

Tabla 7.4 Evolución de la temporada de huracanes y estadísticas del número y tipo de eventos ocurridos. Período 1944-1965 (entre el inicio de los reconocimientos aéreos y el uso de satélites)

Intervalo de ocurrencia de los fenómenos meteorológicos	Total acumulado de sistemas	Promedio de sistemas acumulados	Total de huracanes	Promedio de huracanes acumulados	Total de huracanes mayores	Promedio de huracanes mayores acumulados
Enero 01-Mayo 14	1	0.05	0	0.00	0	0.00
Mayo 15 a Mayo 31	5	0.23	1	0.05	1	0.05
Junio 01-Junio 10	8	0.36	1	0.05	1	0.05
Junio 11-Junio 20	15	0.68	3	0.14	2	0.09
Junio 21-Junio 30	18	0.82	5	0.23	3	0.14
Julio 01-Julio 10	21	0.95	8	0.36	3	0.14
Julio 11-Julio 20	24	1.09	10	0.45	4	0.18
Julio 21-Julio 31	34	1.55	14	0.64	4	0.18
Agosto 01- Agosto 10	43	1.95	18	0.82	7	0.32
Agosto 11- Agosto 20	59	2.68	30	1.36	15	0.68
Agosto 21- Agosto 31	84	3.82	48	2.18	27	1.23
Septiembre 01-Septiembre 10	118	5.36	71	3.23	45	2.05
Septiembre 11-Septiembre 20	141	6.41	84	3.82	51	2.32
Septiembre 21-Septiembre 30	163	7.41	104	4.73	61	2.77
Octubre 01-Octubre 10	181	8.23	114	5.18	64	2.91
Octubre 11-Octubre 20	199	9.05	129	5.86	72	3.27
Octubre 21-Octubre 31	204	9.27	131	5.95	74	3.36
Noviembre 01-Noviembre 10	209	9.50	133	6.05	74	3.36
Noviembre 11-Noviembre 20	210	9.55	133	6.05	74	3.36
Noviembre 21-Noviembre 30	211	9.59	133	6.05	74	3.36
Diciembre 01-Diciembre 31	213	**9.68**	133	**6.05**	74	**3.36**

Tabla 7.5 Evolución de la temporada de huracanes y estadísticas del número y tipo de eventos ocurridos. Período 1966-2012 (a partir del uso de satélites)

Intervalo de ocurrencia de los fenómenos meteorológicos	Total acumulado de sistemas	Promedio de sistemas acumulados	Total de huracanes	Promedio de huracanes acumulados	Total de huracanes mayores	Promedio de huracanes mayores acumulados
Enero 01-Mayo 14	5	0.11	0	0.00	0	0.00
Mayo 15 a Mayo 31	13	0.28	1	0.02	0	0.00
Junio 01-Junio 10	21	0.45	5	0.11	1	0.02
Junio 11-Junio 20	29	0.62	8	0.18	1	0.02
Junio 21-Junio 30	43	0.91	10	0.23	1	0.02
Julio 01-Julio 10	54	1.15	18	0.41	4	0.09
Julio 11-Julio 20	72	1.53	25	0.57	5	0.11
Julio 21-Julio 31	97	2.06	35	0.80	8	0.18
Agosto 01- Agosto 10	133	2.83	50	1.14	12	0.27
Agosto 11- Agosto 20	180	3.83	75	1.70	24	0.55
Agosto 21- Agosto 31	251	5.34	118	2.68	48	1.09
Septiembre 01-Septiembre 10	323	6.87	165	3.75	71	1.61
Septiembre 11-Septiembre 20	379	8.06	203	4.61	91	2.07
Septiembre 21-Septiembre 30	429	9.13	230	5.23	100	2.27
Octubre 01-Octubre 10	464	9.87	245	5.57	103	2.34
Octubre 11-Octubre 20	493	10.49	263	5.98	106	2.41
Octubre 21-Octubre 31	518	11.02	280	6.36	110	2.50
Noviembre 01-Noviembre 10	529	11.26	289	6.57	111	2.52
Noviembre 11-Noviembre 20	538	11.45	293	6.66	113	2.57
Noviembre 21-Noviembre 30	545	11.60	298	6.77	113	2.57
Diciembre 01-Diciembre 31	551	**11.72**	299	**6.80**	113	**2.57**

Tabla 7.6 Evolución de la temporada de huracanes y estadísticas del número y tipo de eventos ocurridos. Período 2000-2012

Intervalo de ocurrencia de los fenómenos meteorológicos	Total acumulado de sistemas	Promedio de sistemas acumulados	Total de huracanes	Promedio de huracanes acumulados	Total de huracanes mayores	Promedio de huracanes mayores acumulados
Enero 01-Mayo 14	2	0.15	0	0.00	0	0.00
Mayo 15 a Mayo 31	6	0.46	0	0.00	0	0.00
Junio 01-Junio 10	9	0.69	0	0.00	0	0.00
Junio 11-Junio 20	10	0.77	1	0.08	0	0.00
Junio 21-Junio 30	15	1.15	2	0.15	0	0.00
Julio 01-Julio 10	19	1.46	6	0.46	2	0.15
Julio 11-Julio 20	28	2.15	9	0.69	3	0.23
Julio 21-Julio 31	34	2.62	10	0.77	4	0.31
Agosto 01- Agosto 10	50	3.85	14	1.08	6	0.46
Agosto 11- Agosto 20	67	5.15	21	1.62	9	0.69
Agosto 21- Agosto 31	93	7.15	35	2.69	17	1.31
Septiembre 01-Septiembre 10	120	9.23	52	4.00	27	2.08
Septiembre 11-Septiembre 20	140	10.77	68	5.23	35	2.69
Septiembre 21-Septiembre 30	159	12.23	80	6.15	39	3.00
Octubre 01-Octubre 10	173	13.31	84	6.46	40	3.08
Octubre 11-Octubre 20	184	14.15	91	7.00	42	3.23
Octubre 21-Octubre 31	195	15.00	98	7.54	45	3.46
Noviembre 01-Noviembre 10	199	15.31	101	7.77	46	3.54
Noviembre 11-Noviembre 20	201	15.46	101	7.77	46	3.54
Noviembre 21-Noviembre 30	204	15.69	103	7.92	46	3.54
Diciembre 01-Diciembre 31	208	**16.00**	103	**7.92**	46	**3.54**

7.2 ANÁLISIS DECADAL DE LA ACTIVIDAD CICLÓNICA

En la Tabla 7.7 se presentan valores promedios por décadas a partir de 1940 hasta el presente, así como el promedio de la totalidad de los datos entre 1851 y 2011 de los siguientes parámetros relacionados con la actividad ciclónica del Atlántico: número de tormentas, duración promedio y total de las tormentas, e intensidad de las mismas (calculada como la sumatoria del cuadrado de las velocidades registradas durante el desarrollo de cada evento monitoreado), mientras que en la Tabla 7.8 se presentan los mismos parámetros pero agrupados en períodos de tiempo específicos, con el objetivo de tratar de separar los datos de acuerdo a la "calidad" de los mismos; calidad que ha ido aumentando en el tiempo debido a los grandes avances tecnológicos de los equipos utilizados para monitorear los eventos.

Finalmente, en la Tabla 7.9 se muestran, agrupados por décadas, los promedios de velocidad viento de cada temporada huracanes, para lo cual se tomaron en cuenta cada uno de los valores reportados por la NOAA para cada evento meteorológico desde su génesis hasta su decaimiento, mientras que en la Figura 7.3 se presentan cada uno de los promedios anuales de la velocidad del viento para el período 1950-2011.

Tabla 7.7 Cambios por décadas en la actividad ciclónica en el Atlántico Norte para cada componente del índice ECA

	Periodo 1851-2011	Periodo 1940-1949	Periodo 1950-1959	Periodo 1960-1969	Periodo 1970-1979	Periodo 1980-1989	Periodo 1990-1999	Periodo 2000-2011
Número de tormentas promedio	9.23	9.30	10.40	9.50	9.50	9.30	11.00	15.75
Duración promedio (Días)	6.7	5.9	7.0	8.3	6.8	6.9	7.7	7.5
Duración total promedio (Días)	61.8	54.9	72.8	78.9	64.6	64.2	84.7	118.1
Intensidad promedio (nudos^2)	4315.2	3894.8	4947.3	5281.0	3764.3	4023.9	3960.3	4050.6
Índice ECA	86.9	77.4	121.9	116.1	59.5	75.3	106.3	130.5

Tabla 7.8 Comparación de la actividad ciclónica en el Atlántico Norte para períodos de tiempo específicos de acuerdo con cada componente del índice ECA

	Periodo 1851-2011	Datos a partir de observaciones de barcos 1851-1904	Observaciones de barcos con utilización de la radio 1905-1943	Comienzo de reconocimiento aéreo 1944-1965	Comienzo de observaciones con satélites 1966-2011	Período 1980-1989	Período 1990-1999	Período 2000-2011	Porcentaje de cambio (%) entre periodo 1990-1999 y 2000-2011
Número de tormentas promedio	9.23	7.63	8.18	9.68	11.56	9.30	11.00	15.75	43.2
Duración promedio (Días)	6.7	6.0	6.9	7.1	7.3	6.9	7.7	7.5	-2.6
Duración total promedio (Días)	61.8	45.8	56.4	68.7	84.4	64.2	84.7	118.1	39.5
Intensidad pormedio (nudos^2)	4315.2	4593.2	3929.5	4959.3	4007.7	4023.9	3960.3	4050.6	2.3
Índice ECA	86.9	78.4	74.4	110.0	96.5	75.3	106.3	130.5	22.8

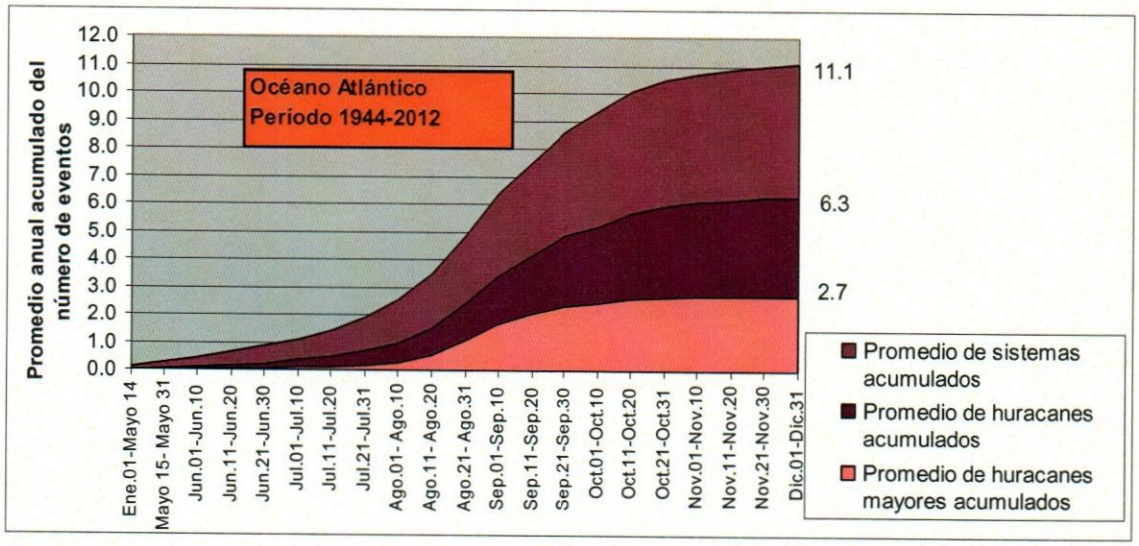


Figura 7.1 Promedio histórico de ocurrencia de fenómenos meteorológicos en la cuenca Atlántica (1944-2012)

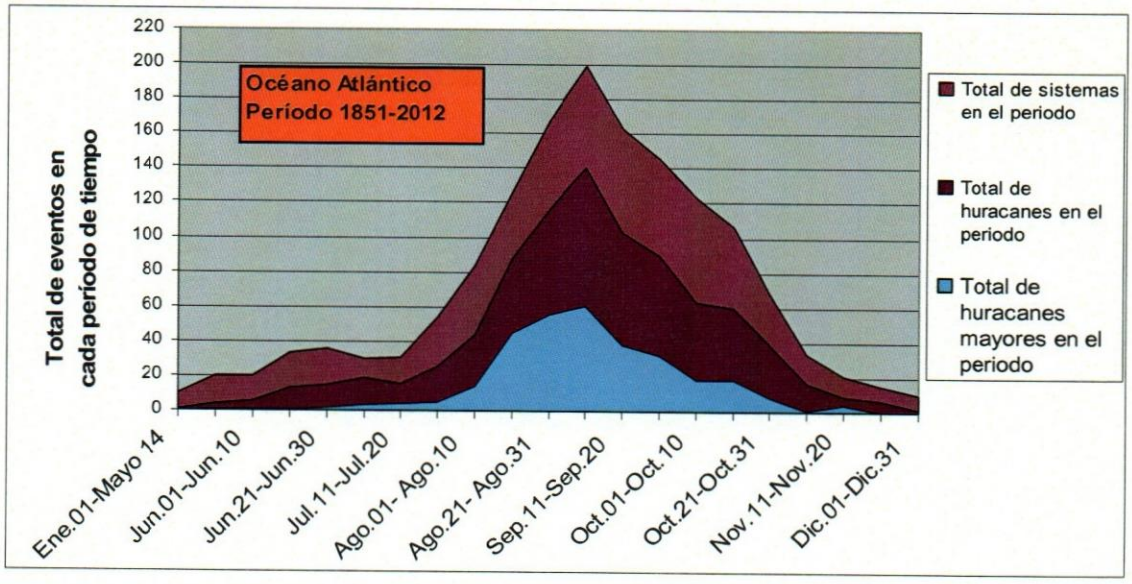


Figura 7.2 Distribución temporal de ocurrencia de fenómenos meteorológicos en la cuenca Atlántica. Período 1851-2012

Tabla 7.9 Promedio por décadas de la velocidad del viento generada por cada evento meteorológico ocurrido en el Atlántico durante las temporadas de huracanes

Década Analizada	Vel. Promedio de todos los eventos (nudos)
1950-1959	59.3
1960-1969	56.2
1970-1979	47.0
1980-1989	50.4
1990-1999	51.1
2000-2009	50.0

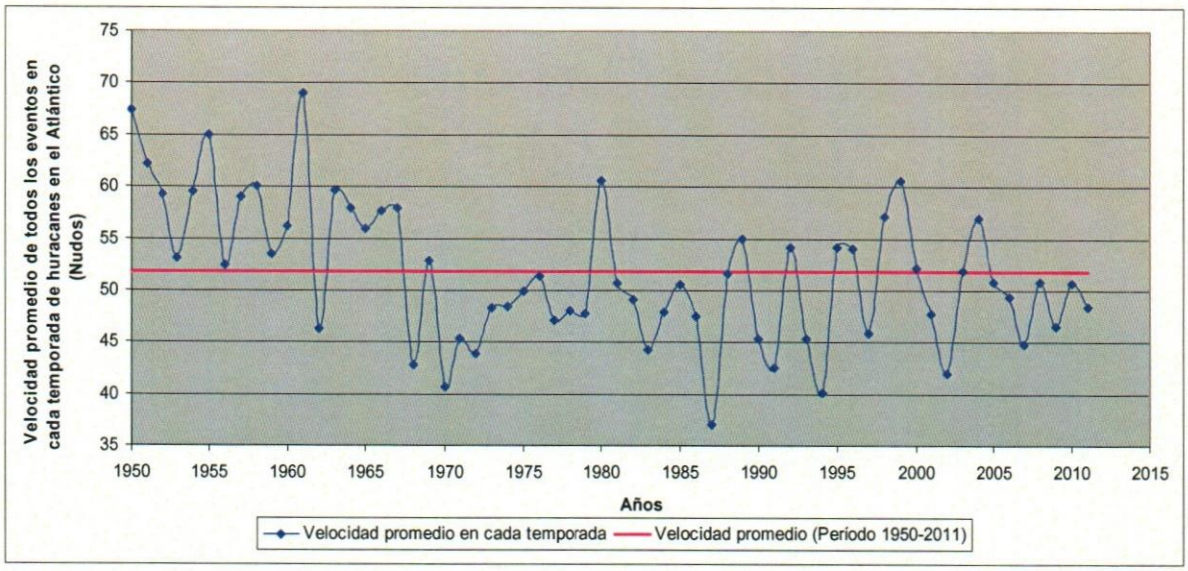


Figura 7.3 Velocidad promedio de todos los eventos ocurridos en cada temporada de huracanes. Período 1950-2011

El análisis de las Tablas 7.1 a 7.9 permite realizar las siguientes afirmaciones:

- Si se evalúan todos los registros contenidos en la base de datos de huracanes desde 1851 a 2012, sin hacer ningún tipo de distinción del momento y tecnología disponible para el tiempo en que fueron reportados, se tiene que en el Atlántico Norte en una temporada promedio ocurrirían poco más de nueve (09) fenómenos meteorológicos, de los cuales cinco y medio (5,5) serían huracanes, y de éstos, dos (2) serían huracanes mayores (grado 3 o superior en la escala de Saffir-Simpson).

- Si el análisis se realiza separando los datos estadísticos para tomar en cuenta los factores externos (representados en este caso básicamente por los avances tecnológicos que facilitan una mejor identificación y caracterización de los fenómenos meteorológicos), se observa que entre el año más antiguo en el que se tienen disponibles datos (año 1851) y el comienzo de la utilización del telégrafo (1904), el promedio total de fenómenos meteorológicos identificados en una temporada de huracanes, fue un 7% inferior al total reportado entre 1904 y 1943, en el cual se introdujo la utilización del telégrafo como elemento para la transmisión de los eventos detectados por parte de los barcos, mientras que si se compara con el período 1944-1965 en el cual se adicionaron los reconocimientos aéreos, se tiene que en este último período se registraron un 26,9% adicional de fenómenos meteorológicos que los reportados en el lapso 1851-1904.

- Más pronunciado aún es el incremento observado una vez que se comienzan a utilizar los satélites como herramienta para la detección y caracterización de los fenómenos (año 1966), teniéndose que entre el período 1944-1965 y 1966-2012 el incremento en el total de fenómenos meteorológicos pasó de casi 10 en el primer período, a casi 12 eventos anuales en el segundo (un incremento de poco más de 20%), con prácticamente un (01) huracán más por año, y si únicamente se analiza el período correspondiente al siglo XXI (2000-2012) se tiene un promedio de diez y seis (16) eventos anuales, de los cuales casi la mitad tienen categoría de huracanes.

  Todo lo anterior apunta a un aumento en la actividad general de las temporadas de huracanes, expresada en términos de "días totales con tormenta", lo cual no necesariamente implica un aumento en la intensidad de las mismas, asociada a las magnitudes de la velocidad del viento, la cual se analiza a través de la interpretación de las Tablas 7.7, 7.8 y 7.9.

- El análisis de las Tablas 7.7, 7.8 y 7.9 concuerda con lo visto en la Tabla 7.6 en el sentido de que el parámetro relacionado con los huracanes que ha experimentado un aumento significativo a partir de la década de los 90, es el relacionado con el número de eventos anuales, el cual pasó de poco más de nueve (09) eventos en la década de los años 40, a once (11) eventos en la década de los 90, dando un salto cuantitativo en el siglo XXI en el cual el promedio anual de eventos ha sido de diez y seis (16) eventos, mientras que la duración promedio de los eventos para cada período de tiempo analizado y la velocidad promedio en cada temporada de huracanes no experimentaron cambios significativos, teniéndose adicionalmente que como consecuencia del aumento en el número total de eventos anuales, también se ha incrementado el número anual de "días con tormenta", que se incrementó desde unos ochenta y cinco (85) días en la década de los 90, hasta ciento diez y ocho (118) días en el período 2000-2011 (un 39%).

  Esto contrasta con los valores del índice ECA utilizado por la NOAA, el cual muestra cambios cíclicos de aumento y disminución en su valor, al igual que la intensidad de los eventos meteorológicos. En el caso del índice ECA, éste experimentó un aumento del 23% entre la década de los 90 y los primeros doce (12) años del presente siglo, mientras que la intensidad promedio de los huracanes experimento sólo un ligero aumento de 2% entre los mismos períodos de tiempo.

  Esto permite a su vez concluir que:

- La percepción de que las temporadas de huracanes se han venido intensificando en los tiempos recientes es cierta, pero no debe confundirse "intensificación" con un aumento en la potencia de los huracanes, siendo en cambio el número total de fenómenos meteorológicos y los "días de tormenta" asociados a éstos, la causa de esa "intensificación", los cuales han aumentado en los últimos doce (12) años en un 43% y 39% respectivamente, con respecto a la década precedente.

- Si bien es cierto que el índice ECA utilizado por la NOAA, refleja en cierto modo la actividad de los ciclones tropicales, su análisis como un "todo" no pone en evidencia la influencia individual de los factores involucrados en la actividad ciclónica de una temporada, tales como la duración promedio de cada evento, el número total de los mismos, e inclusive la intensidad de ellos, la cual aumentó sólo un 2% contra un aumento general del índice de 23% en el mismo período de comparación (década de los 90 y los doce (12) primeros años del siglo XXI).

- En cuanto a las características generales de las temporadas de huracanes en el Atlántico, la Figura 7.1 muestra que el promedio de eventos meteorológicos que en promedio han ocurrido en el Atlántico durante las temporadas de huracanes

comprendidas en el lapso 1851-2012 es de 11 eventos, de los cuales 6 son huracanes y de éstos, casi 3 son huracanes mayores. Por otra parte, la Figura 7.2 evidencia que el período de tiempo de mayor actividad de la temporada se presenta entre Agosto 20 y Septiembre 20, con un pico máximo en los primeros diez (10) días del mes de Septiembre, mientras que la Figura 7.3 evidencia lo expresado en los párrafos precedentes en cuanto al hecho de que la "intensificación" de las temporadas de huracanes medida únicamente en función de la velocidad, no es un hecho cierto, por el contrario, la velocidad promedio de cada temporada de huracanes durante la década 2000-2009, es la menor desde la década 1970-1979.

7.3 FRECUENCIA EN LA OCURRENCIA DE TEMPORADAS DE HURACANES DE ALTA INTENSIDAD

La NOAA, conjuntamente con la determinación del índice ECA, también hace clasificaciones de las temporadas de huracanes en base a los parámetros estadísticos relacionados a dicho índice que se mencionaron en el aparte 6 y que se volverán a mencionar a continuación:

- Temporada por encima de lo normal: Aquellas temporadas con un valor ECA superior a 103 (115% de la mediana actual), siempre que dos (2) de los siguientes tres (3) parámetros excedan el promedio a largo plazo: Número de tormentas tropicales (10), Huracanes (6) y Huracanes mayores (2).

- Temporada cercana a lo normal: Ni por encima ni por debajo de lo normal.

- Temporada por debajo de lo normal: Un valor de ECA inferior a 66 (74% de la mediana actual).

En el Anexo 12.6 se muestran las estadísticas generales de las temporadas de huracanes en el Atlántico y del índice ECA desde 1851 hasta 2011 así como el sistema de clasificación de las temporadas de huracanes para el período 1950-2011, en base a las cuales se analizó la evolución temporal de las mismas, mientras que en la Tabla 7.10 se presenta un análisis por década de las temporadas de huracanes en el Atlántico, en el cual se discriminan el número de temporadas de huracanes por encima de lo normal, el número de temporadas cercanas a lo normal, y el número de temporadas por debajo de lo normal (de acuerdo con los criterios de clasificación utilizados por la NOAA basados en el valor anual del índice ECA), así como el promedio de temporadas seguidas con las que se presentan cada una de ellas, mientras que en la Tabla 7.11 se presenta el mismo análisis por décadas pero mostrando relaciones entre "huracanes mayores" y "huracanes menores".

Tabla 7.10 Análisis por décadas de las diferentes tipos de temporadas de huracanes de acuerdo con su índice ECA

Década	Temporadas por encima de lo normal	Temporadas cercanas a lo normal	Temporadas por debajo de lo normal	Promedio de temp. seguidas por encima de lo normal	Promedio de temp. seguidas cercanas a lo normal	Promedio de temp. seguidas por debajo de lo normal
1950-1959	6	3	1	2.0	1.3	1.0
1960-1969	4	4	2	1.0	1.3	1.0
1970-1979	0	4	6	0.0	1.3	2.0
1980-1989	3	3	4	1.5	1.5	2.0
1990-1999	4	2	4	3.0	1.0	1.3
2000-2009	6	2	2	2.7	2.0	1.0

Las estadísticas mostradas en la Tabla 7.10 permiten contestar a otra de las interrogantes planteadas en este trabajo, relacionada con la posibilidad de que las temporadas de huracanes categorizadas según el valor del índice ECA como "por encima de lo normal", se estuviera incrementando en los últimos años.

Las estadísticas revelan que el número de temporadas "por encima de lo normal" (categorizadas como tal, de acuerdo con los valores del índice ECA) fue en la década 2000-2009, la más alta desde la década de los años 60, pero fue igual a la registrada en la década de los años 50, presentando también valores cercanos a los promedios, el número de temporadas "cercanas a lo normal" y "por debajo de lo normal".

De hecho, pareciera que el número de temporadas "por encima de lo normal" en cada una de las décadas analizadas, tuvieran un comportamiento cíclico que solo podrá ser corroborado con certeza cuando se disponga de mayor cantidad de datos.

Lo que si es notorio en las estadísticas de la Tabla 7.10 es que a partir de 1990, aún cuando el número de temporadas "por encima de lo normal" no se ha incrementado abruptamente, dichas temporadas si están ocurriendo más seguidas (una a continuación de la otra), mientras que en las décadas anteriores a 1990 había mayor alternancia entre este tipo de temporadas y las otras ("cercanas a lo normal" y "por debajo de lo normal").

Tabla 7.11 Evolución de la relación entre "huracanes mayores" y "huracanes menores"

Lapso	Total de eventos	Máxima categoría alcanzada por el evento meteorológico							TOTAL EVENTOS	Total Huracanes mayores	Promedio anual de huracanes mayores	Rel. Huracanes menores/mayores	Re Hur. gr 4 y 5 vs (Hur gr3)
		DT	TT	H1	H2	H3	H4	H5					
1950-1959	104	2	34	18	11	22	13	4	104	39	3.90	0.74	0.77
1960-1969	95	0	33	24	10	13	9	6	95	28	2.80	1.21	1.15
1970-1979	95	0	45	24	10	8	5	3	95	16	1.60	2.13	1.00
1980-1989	93	0	41	27	8	7	7	3	93	17	1.70	2.06	1.43
1990-1999	110	0	46	23	16	11	12	2	110	25	2.50	1.56	1.27
2000-2009	151	1	76	30	8	13	15	8	151	36	3.60	1.06	1.77

7.4 CUESTIONAMIENTO AL ÍNDICE ECA COMO PARÁMETRO BASE PARA CLASIFICAR A LAS TEMPORADAS DE HURACANES

Tal como se ha mencionado anteriormente, el índice utilizado por la NOAA para clasificar y categorizar a las temporadas de huracanes es el llamado índice de energía ciclónica acumulada ECA, que se calcula de acuerdo con la ecuación 6.2.

Cabe hacerse la pregunta: ¿caracteriza realmente este índice a las temporadas de huracanes?.

Parte de esta pregunta ya fue contestada con la proposición del llamado "índice de la temporada" (ecuación 6.6), en el cual las características de los diferentes fenómenos meteorológicos que conforman cada temporada de huracanes, fueron desglosadas en tres (3) factores: duración de los fenómenos, número de fenómenos e intensidad de los eventos.

Éste análisis difiere del modo en que se estima el ECA, donde únicamente se refleja en forma explícita la intensidad (en términos de velocidad) de cada evento.

Tal como se demostró a partir de los resultados presentados en las Tablas 7.7, 7.8 y 7.9, el aparente aumento de la intensidad de las temporadas de huracanes (medido en términos de los valores del índice ECA), no es tal, demostrándose que lo que realmente se ha incrementado en los últimos años, es el número anual de eventos que se suceden en cada temporada de huracanes.

No conforme con esto, se realizó otro análisis diferente que demuestra que la metodología utilizada actualmente para clasificar a las temporadas de huracanes en: por encima de lo normal, cercana a lo normal, o por debajo de lo normal, debe ser revisada, ya que está dando origen a clasificaciones de las temporadas de huracanes que de acuerdo a un análisis exhaustivo de los mismos datos generados por la NOAA, son contradictorios.

Para el análisis se compararon dos (2) décadas distintas: la década de 1980-1989 y la década de 2000-2009, seleccionadas por presentar velocidades promedios de vientos muy similares (50,4 nudos la década de los 80, y 50,0 la primera década del siglo XXI), hecho que haría pensar que las características generales de ambas décadas en términos de sus temporadas de huracanes, deberían ser muy similares.

Sin embargo los resultados mostrados en la Tabla 7.11 parecen indicar todo lo contrario, es decir, que deberían existir sustanciales diferencias entre ambas décadas, ya que en la década de 1980-1989 se sucedieron el doble de huracanes menores (huracanes grado 1 y grado 2) que de huracanes mayores (huracanes grado 3,4 y 5), mientras que en la década de 2000-2009 la relación fue de 1 a 1, teniéndose además que en la década de 1980-1989 hubo únicamente 3 temporadas clasificadas como "por encima de lo normal" contra 6 temporadas "por encima de lo normal" en la década 2000-2009, todo lo cual pareciera indicar en primera instancia, que la década de 2000-2009 debe de haber sido más intensa que la década de los años 80.

Lo afirmado en el párrafo anterior también parece confirmarse si se toman en cuenta los promedios de los índice ECA calculados por la NOAA para cada uno de los años que conforman esas décadas (ver Anexo 12.6), los cuales arrojan valores promedio del índice ECA de 75,3 para la década de los 80 y de 128 para la década 2000-2009 (un 70% de aumento), hecho que se traduce en que para el período 1980-1989 la NOAA clasificara a las temporadas de huracanes de la siguiente manera: 3 temporadas "por encima de lo normal", 3 temporadas "cercanas a lo normal" y 4 temporadas "por debajo de lo normal", mientras que para el lapso de tiempo 2000-2009 dicha clasificación fue: 6 temporadas "por encima de lo normal", 2 temporadas "cercanas a lo normal" y 2 temporadas "por debajo de lo normal".

Para los dos (2) grupos de datos, década de los años 80 y la primera década del siglo XXI, se tomaron cada uno de los eventos reportados por la NOAA, y se calculó tanto la duración total del evento, como la duración y porcentaje del tiempo total en que cada evento presentó características de huracán menor (huracanes grado 1 y grado 2), y como huracanes mayores (huracanes grado 3, 4 y 5), e igualmente se hizo un análisis de las principales características que desde el punto de vista estadístico, presentaron cada uno de los grupos de datos analizados. Los resultados se muestran en las Tablas 7.12 y 7.13.

Tabla 7.12 Caracterización de los eventos meteorológicos de acuerdo con su intensidad y persistencia. Décadas de 1980-1989 y 2000-2009

LAPSO DE TIEMPO: 1980-1989

Número total de Eventos	Promedio de duracion total de los eventos (horas)	Tiempo promedio con vel. entre 64 y 95 nudos (horas) (Hur. 1 o 2)	Porcentaje del tiempo como huracán menor (%)	Tiempo promedio con vel. Entre 96 y 112 nudos (horas) (Hur. Gr. 3)	Porcentaje del tiempo como huracán (Hur. Gr. 3) (%)	Tiempo promedio con vel. entre 113 y 135 nudos (horas) (Hur. Gr. 4)	Porcentaje del tiempo como huracán (Hur. Gr. 4) (%)	Tiempo promedio con vel. > 135 nudos (horas) (Hur. Gr. 5)	Porcentaje del tiempo como huracán (Hur. Gr. 5) (%)	Porcentaje del tiempo como huracán mayor (%)
93	163	33.2	15.7	3.8	1.6	3.1	1.0	1.0	0.4	3.0

LAPSO DE TIEMPO: 2000-2009

Número total de Eventos	Promedio de duracion total de los eventos (horas)	Tiempo promedio con vel. entre 64 y 95 nudos (horas) (Hur. 1 o 2)	Porcentaje del tiempo como huracán menor (%)	Tiempo promedio con vel. Entre 96 y 112 nudos (horas) (Hur. Gr. 3)	Porcentaje del tiempo como huracán (Hur. Gr. 3) (%)	Tiempo promedio con vel. entre 113 y 135 nudos (horas) (Hur. Gr. 4)	Porcentaje del tiempo como huracán (Hur. Gr. 4) (%)	Tiempo promedio con vel. > 135 nudos (horas) (Hur. Gr. 5)	Porcentaje del tiempo como huracán (Hur. Gr. 5) (%)	Porcentaje del tiempo como huracán mayor (%)
151	181.6	28.3	11.6	5.6	1.9	5.2	1.7	1.2	0.4	4.0

La Tabla 7.12 evidencia un aumento en el porcentaje de tiempo en que existieron huracanes mayores al comparar la década de 2000-2009 con respecto a la década 1980-1989, pero ese aumento es mínimo (1 % en términos absolutos y 33% en términos relativos), lo cual no justifica el aumento de 70% reflejado en el índice ECA.

Por otra parte, el sencillo análisis estadístico realizado con ambos grupos de datos es aún más revelador en cuanto a lo parecido que son en términos generales las dos (2) décadas

analizadas (tanto en el valor promedio de la velocidad del viento registrado durante la duración de cada evento, como en la dispersión de los datos), aún cuando el índice ECA sea indicador de lo contrario.

Tabla 7.13 Análisis estadístico de las temporadas de huracanes correspondientes a los lapsos 1980-1989 y 2000-2009

Lapso de tiempo: 1980-1989		*Lapso de tiempo: 2000-2009*	
Media	50.4231338	Media	50.0095299
Error típico	0.4859648	Error típico	0.38148324
Mediana	45	Mediana	45
Moda	30	Moda	30
Desviación estándar	25.2795133	Desviación estándar	26.2143114
Varianza de la muestra	639.053794	Varianza de la muestra	687.190123
Curtosis	1.28731675	Curtosis	1.49651978
Coeficiente de asimetría	1.14517723	Coeficiente de asimetría	1.30605881
Rango	155	Rango	150
Mínimo	10	Mínimo	10
Máximo	165	Máximo	160
Suma	136445	Suma	236145
Cuenta	2706	Cuenta	4722

Igualmente, se calcularon los promedios anuales del índice ECA de forma tal de desacoplar los valores del índice de su dependencia con el número de eventos meteorológicos ocurridos en cada año, presentándose los resultados en la Figura 7.4 donde se pone de manifiesto la inexistencia de una "intensificación" de las temporadas de huracanes, mostrándose más bien, comportamientos cercanos al promedio histórico.

Si se analizan los valores anuales desde el año 1966 (cuando se comenzaron a utilizar los satélites como herramienta para el estudio de estos fenómenos) se tiene que veinte y seis (26) temporadas han tenido índices ECA anuales inferiores al promedio histórico del período 1966-2011, mientras que veinte (20) temporadas han presentado índices superiores.

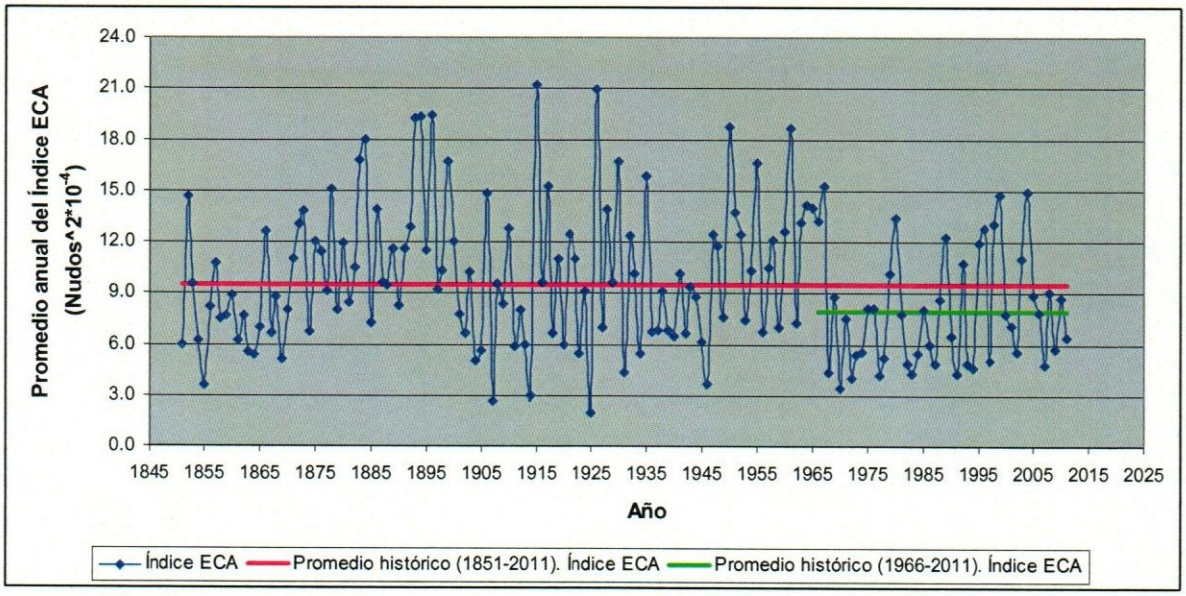


Figura 7.4 Promedios anualizados del índice ECA. 1851-2011

Todo lo anterior permite poner en duda la fiabilidad del índice ECA como parámetro base para caracterizar y clasificar a las temporadas de huracanes, cuya utilización indica una "aparente" intensificación general" de las temporadas de huracanes así como las clasificadas como "por encima de lo normal" sobretodo a partir de 1990, intensificación que tal como se ha mostrado anteriormente, no es tal, siendo el único factor relevante que ha cambiado en los últimos años, el referente al número total de eventos que ocurren por temporada y los días totales de tormenta asociados a éstos, eventos que por otra parte, no han incrementado su "potencia" medida en términos de velocidad.

8. *RELACIÓN ENTRE LA OCURRENCIA DE EVENTOS "EL NIÑO" O "LA NIÑA" Y LA INTENSIDAD DE LA TEMPORADA DE HURACANES EN EL ATLÁNTICO*

Otra de las interrogantes planteadas al momento de desarrollar este trabajo es si verdaderamente existe una correlación entre la intensidad de las temporadas de huracanes en el Atlántico, y la ocurrencia de eventos "El Niño" o "La Niña".

El desarrollo de este análisis pasa entre otros aspectos, por la diferencia entre las diversas fuentes bibliográficas acerca de lo que cada una de ellas considera como un evento "El Niño" o "La Niña", lo que trae como consecuencia que dependiendo de las fuentes consultadas se incluyan o excluyan eventos de este tipo.

Estas diferencias obedecen entre otras razones a los diferentes índices utilizados para cuantificar y caracterizar, sobre todo a los eventos "El Niño" (ver Anexo 12.1), la mayoría de los cuales, salvo el Índice Multivariado del ENOS (MEI), no toman en cuenta la acción conjunta de variables oceanográficas y meteorológicas, cuya influencia es decisiva en la gestación y desarrollo de los eventos "El Niño" o "La Niña".

No obstante lo anteriormente expuesto en cuanto al Índice Multivariado, se decidió utilizar las estadísticas disponibles del índice ONI utilizado por la NOAA, para realizar los análisis y establecer si existe o no relación entre los valores de dicho índice, la intensidad de las temporadas de huracanes, y la ocurrencia de eventos "El Niño" o "La Niña", el cual si bien es un índice basado únicamente en el análisis de un componente oceanográfico (anomalías de la temperatura superficial del mar) tiene una amplia base de datos, de fácil acceso.

8.1 CORRELACIÓN ENTRE EL PROMEDIO ANUAL Y LOS VALORES MENSUALES DEL ÍNDICE ONI

Para el establecimiento y categorización de cuanto por encima o por debajo de los valores promedios de la temperatura superficial del mar presentaba la región Niño 3.4, de acuerdo con el índice ONI, no se tomaron los valores individuales mensuales de dicho índice reportados por la NOAA, tomándose en cambio el promedio anual del mencionado índice para los fines de los cálculos, correlaciones y categorización de las temporadas de huracanes en el Atlántico.

En tal sentido, se tomaron los valores del índice ONI reportados por la NOAA (ver Anexo 12.3) para cada mes de cada año en el período 1950-2011, y luego se promediaron, obteniéndose un promedio anual del índice ONI para cada año del período analizado.

Posteriormente se calculó para cada año de análisis, la diferencia media cuadrática de cada mes con respecto a la media anual, de forma tal de establecer si el índice ONI de algún mes en particular mostraba algún tipo de correlación con promedio anual. Ese mes correspondería a aquél en el cual la suma de todas las diferencias cuadráticas con respecto al promedio de cada año en el lapso 1950-2011 fuese mínima, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\text{Suma de diferencias cuadráticas} = \sum_{i=1950}^{2011} \sum_{j=1}^{12} (\text{Índice ONI}_j - \text{Índice ONI promedio anual}_i)^2 \quad (8.1)$$

donde:

i= Año analizado.

j= Mes del año i que se está analizando.

De las diferentes sumas cuadráticas calculadas, la menor es la correspondiente al mes de Junio, lo que significa que el índice ONI correspondiente al mes de Junio de cada año es el que más se asemeja al correspondiente índice ONI promedio anual del cada año.

En la Figura 8.1 se presenta la relación existente entre el índice ONI del mes de Junio y el índice ONI promedio anual.

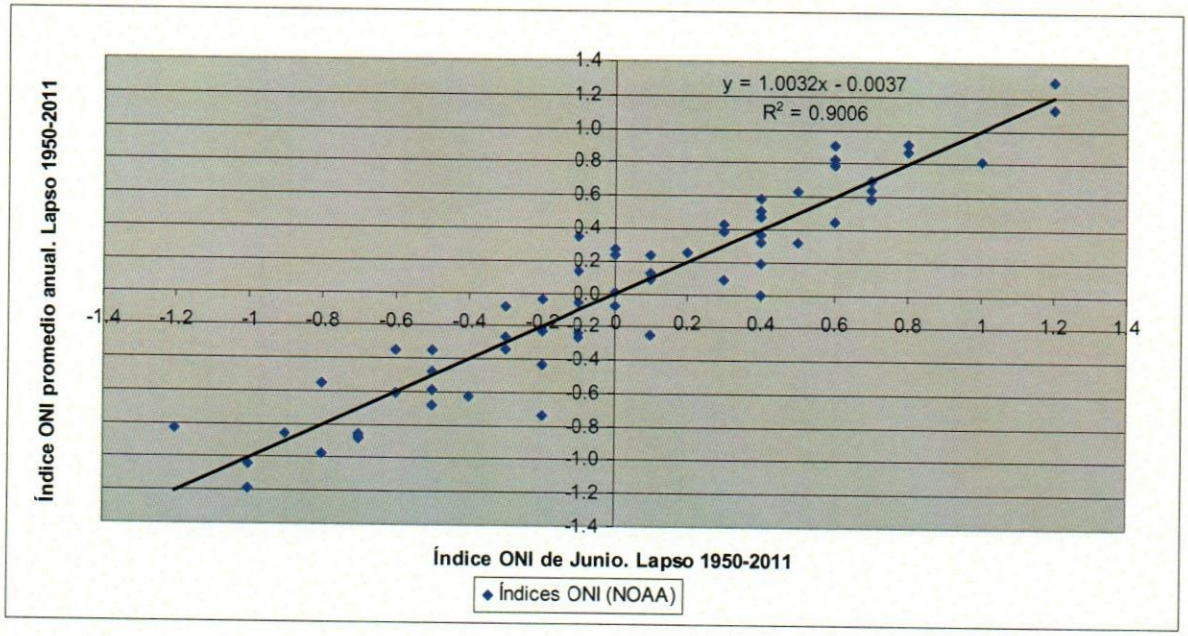


Figura 8.1 Correlación matemática entre el índice ONI del mes de Junio y el índice ONI promedio anual. Lapso 1950-2011

Por otra parte, si el análisis se realiza entre el índice ONI promedio anual y el índice ONI resultante de promediar los índices ONI individuales de los meses de Mayo, Junio y Julio de cada año, de acuerdo con la ecuación general 8.2, se obtiene una correlación aún mejor, tal como puede apreciarse en la Figura 8.2.

$$\text{Suma de dif. cuad.} = \sum_{i=1950}^{2011} \sum_{j=2}^{11} (\text{Promedio Índice ONI}_{j\text{-}1,j,j+1} - \text{Índice ONI promedio anual}_i)^2 \quad 8.2)$$

Esta metodología no solamente permite disponer de herramientas matemáticas de predicción a corto plazo de los valores y tendencias del índice ONI, sino que también permitirán una evaluación más expedita a la hora de clasificar un determinado año como más caliente, más frío, o normal, de acuerdo a los valores del mencionado índice y a su posterior relación con años donde, de acuerdo con la literatura, han ocurrido eventos "El Niño" o "La Niña".

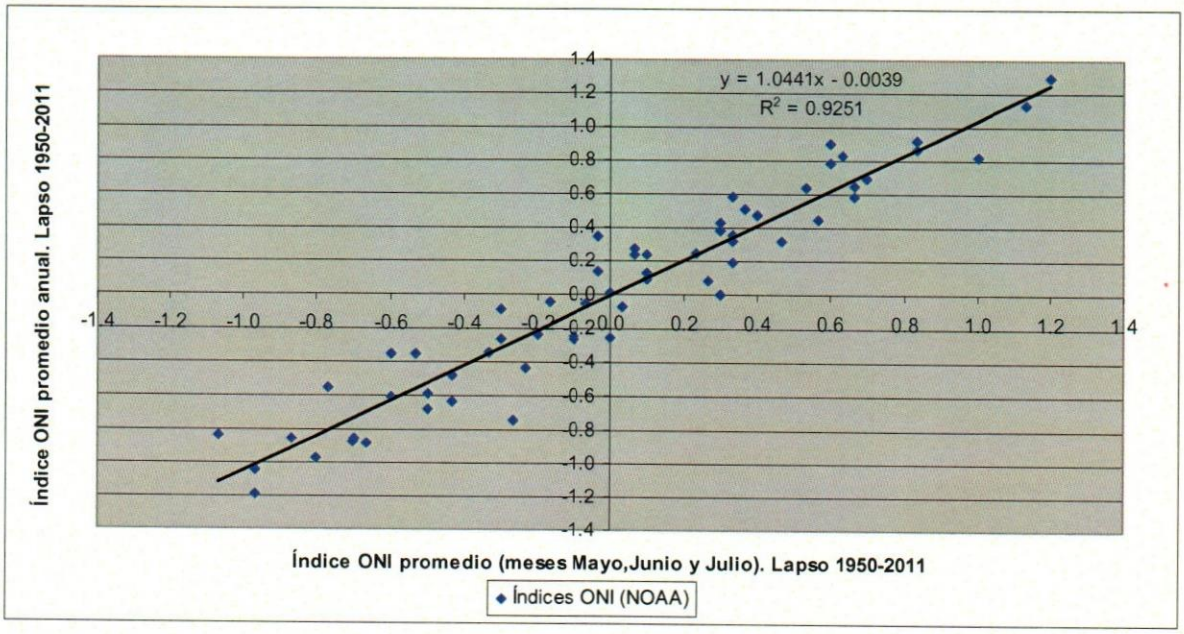


Figura 8.2 Correlación matemática entre el índice ONI promedio de los meses de Mayo, Junio y Julio, y el índice ONI promedio anual. Lapso 1950-2011

8.2 SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN DE EVENTOS "EL NIÑO" Y "LA NIÑA"

La bibliografía especializada reporta diferentes clasificaciones de los eventos "ENOS", muchas de las cuales son discrepantes entre sí, especialmente a la hora de clasificar la intensidad del evento, razón por lo que hasta los momentos es imposible tomar un criterio de clasificación que tenga aceptación universal.

Por ejemplo, Quinn y Neal (1992) que es una de las fuentes más amplia y veraz, hablan de una clasificación con eventos VS (*Very Strong*, ó muy fuertes), S^+ (*Strong* ó fuertes), S (*Strong* ó fuertes), M+ (*Moderate* ó moderados), M (*Moderate* ó moderados) donde el factor de clasificación principal son la anomalías de la temperatura superficial del mar a lo largo de las costas de Perú y Ecuador, así como efectos colaterales relacionados con eventos hidrológicos y efectos de destrucción, los cuales, salvo el grado de la anomalía considerado (ver Anexo 12.2) son difíciles de cuantificar y expresar numéricamente en forma objetiva.

En este trabajo se considerará el criterio adoptado por la NOAA según el cual, un evento "El Niño" ocurre si en la región Niño 3.4 se presenta una secuencia de al menos 5 índices ONI, cada uno con una magnitud mayor o igual a 0,5° C, y un evento Niña cuando se presenta una secuencia en la región Niño 3.4, de al menos 5 índices ONI, cada uno con una magnitud igual o menor a -0,5° C, teniéndose que el índice ONI se calcula como el promedio móvil de las anomalías de la superficie del mar de tres (3) meses consecutivos (ver Anexo 12.3).

Otra de las fuentes bibliográficas consultadas, es la página web de "Golden Gates Weather Services", http://ggweather.com/enso/oni.htm que es una empresa consultora de servicios meteorológicos" que goza de buen reconocimiento en el área del estado de California (EUA).

En dicha página se clasifica la intensidad de los eventos ENOS de acuerdo con los siguientes criterios:

- Eventos débiles, cuando se presentan anomalías comprendidas entre 0,5 y 0,9° C.
- Eventos moderados: cuando se presentan anomalías comprendidas entre 1,0 y 1,4° C.
- Eventos Fuertes: cuando se presentan anomalías superiores a 1,5° C.

según los cuales se presenta en la Tabla 8.1 la clasificación de eventos "El Niño" y "La Niña".

Tabla 8.1 Cronología de eventos "El Niño" y "La Niña". Lapso: 1950-2011.

Intensidad y año de ocurrencia de eventos "El Niño"			Intensidad y año de ocurrencia de eventos "La Niña"		
Débil	Moderado	Fuerte	Débil	Moderado	Fuerte
1953	1951	1957	1950	1970	1955
1963	1968	1965	1954	1998	1973
1969	1986	1972	1956	2007	1975
1976	1987	1982	1964		1988
1977	1994	1991	1971		1999
2004	2002	1997	1974		2010
2006	2009		1983		
			1984		
			1995		
			2000		
			2005		
			2011		

Fuente: http://ggweather.com/enso/oni.htm y modificada por el autor

A partir de esta tabla pueden evidenciarse algunas de las discrepancias existentes entre las diferentes fuentes al momento de clasificar los eventos "El Niño" o "La Niña" en un determinado año. Póngase como ejemplo el año 2007, el cual es señalado en la Tabla 8.1 como un año donde ocurrió un evento "La Niña" de intensidad moderada. Ahora bien, si se analizan los índices ONI emitidos por la NOAA (ver Anexo 12.2), se puede apreciar que en ese año, siete (7) de los doce (12) índices tuvieron valores iguales o superiores a +0,5, de los cuales seis (6) ocurrieron en meses consecutivos, lo cual es sinónimo de ocurrencia de un evento "El Niño", mientras que entre los otros cinco (5) índices, el valor más negativo fue de -0,2.

Otro ejemplo se tiene si se comparan los datos de la Tabla 8.1 con la base de datos de Quinn (1992). La Tabla 8.1 señala que en el año 1953 ocurrió un evento "El Niño" de intensidad "debil", mientras que la base de datos de Quinn lo cataloga como de intensidad M^+ (Moderada).

Estas son sólo algunas de las discrepancias encontradas entre las diferentes fuentes consultadas durante la ejecución de este trabajo, por lo que a los fines de evitar la generación de controversias sobre cual de las distintas fuentes es mejor, en este trabajo se propone una metodología basada en el análisis de los promedios anuales de los índices ONI (ver aparte 8.1), donde más allá de colocarle un sufijo al promedio anual de los índices ONI de un determinado año a los fines de caracterizarlos en fuertes, moderados, débiles, etc., se analizan y tratan de correlacionar los valores obtenidos, con las características propias de la correspondiente temporada de huracanes, tales como: Número total de eventos, duración total en días, e índice ECA.

En la Tabla 8.2 se presentan algunas de las características más importantes de las temporadas de huracanes en el Atlántico conjuntamente con el valor promedio anual del índice ONI, para el período 1950-2011, pudiendo agruparse a partir de esta base de datos las diferentes temporadas de huracanes según los rangos de valores que presente el valor anual del mencionado índice, y cuyos resultados se muestran en la Tabla 8.3.

Tabla 8.2 Promedio anual del índice ONI y características importantes de las temporadas de huracanes en el Atlántico. Lapso 1950-2011.

Año	Promedio anual del índice ONI	Numero total de eventos	Duracion total en dias	Indice ECA (Nudos)^2		Año	Promedio anual del índice ONI	Numero total de eventos	Duracion total en dias	Indice ECA (Nudos)^2
1950	-0.9	13	113.0	243		1981	-0.3	12	84.3	93
1951	0.4	10	76.5	137		1982	0.9	6	29.3	29
1952	0.2	7	54.3	87		1983	0.4	4	20.3	17
1953	0.7	14	88.3	104		1984	-0.5	13	85.5	71
1954	-0.4	11	71.3	113		1985	-0.6	11	78.0	88
1955	-1.0	12	100.0	199		1986	0.3	6	42.5	36
1956	-0.6	8	44.0	54		1987	1.3	7	62.8	34
1957	0.8	8	53.0	84		1988	-0.8	12	78.5	103
1958	0.8	10	74.8	121		1989	-0.6	11	92.0	135
1959	0.1	11	61.5	77		1990	0.3	14	110.8	91
1960	0.0	7	48.8	88		1991	0.6	8	48.8	34
1961	0.0	11	90.0	205		1992	0.6	7	55.5	75
1962	-0.2	5	41.3	36		1993	0.3	8	48.0	39
1963	0.6	9	73.5	118		1994	0.5	7	45.0	32
1964	-0.4	12	104.8	170		1995	-0.1	19	176.3	227
1965	0.9	6	56.8	84		1996	-0.4	13	130.8	166
1966	0.4	11	94.0	145		1997	1.1	8	46.8	40
1967	-0.3	8	79.0	122		1998	0.0	14	128.3	182
1968	0.1	8	64.3	35		1999	-1.2	12	99.8	177
1969	0.8	18	131.3	158		2000	-0.9	15	102.8	116
1970	-0.2	10	61.5	34		2001	-0.3	15	114.5	106
1971	-0.9	13	111.3	97		2002	0.6	12	88.3	66
1972	0.9	7	49.5	28		2003	0.3	16	133.5	175
1973	-0.6	8	54.8	43		2004	0.4	15	139.3	224
1974	-0.9	11	63.5	61		2005	0.1	28	205.5	248
1975	-1.0	9	68.5	73		2006	0.1	10	88.5	78
1976	-0.1	10	71.5	81		2007	0.6	15	86.5	72
1977	0.5	6	25.0	25		2008	-0.7	16	127.0	144
1978	-0.1	12	64.0	62		2009	0.3	9	56.8	51
1979	0.2	9	81.0	91		2010	-0.2	19	144.3	165
1980	0.2	11	82.3	147		2011	-0.7	19	128.0	121

Tabla 8.3 Relación entre el promedio anualizado del índice ONI y características primarias de las temporadas de huracanes en el Atlántico

Promedio anual del índice ONI	Prom. Número de eventos anuales	Prom. Duración de dias	Promedio Indice ECA
- 1.2 / -0.9	12.1	94.11	138.00
- 0.89 / -0.5	12.3	85.97	94.88
- 0.49 / -0.0	11.9	94.01	123.33
0.01 / 0.49	11.1	84.92	104.88
0.5 / 0.89	10.4	69.98	80.82
0.9 / 1.3	6.8	49.00	43.00

Las estadísticas mostradas en las Tablas 8.2 y 8.3 permiten puntualizar los siguientes aspectos:

- Para aquellas temporadas de huracanes que presentan un promedio anual del índice ONI positivo, indicativos de que la temperatura superficial del agua tuvo valores por encima del promedio histórico, y por ende muy probablemente asociados a eventos "El Niño", es evidente que:

  En la medida en que las temperaturas superficiales del agua del mar son más cálidas, (índices ONI con mayores valores positivos) se reduce drásticamente tanto el número total de eventos meteorológicos que ocurren en la temporada de huracanes, como la duración total de días y el índice ECA asociado, razón por la cual puede concluirse que para eventos "El Niño" marcadamente fuertes, se tendrán temporadas de huracanes de muy baja actividad general.

- Para aquellas temporadas de huracanes que presentan un promedio anual del índice ONI negativo, indicativos de que la temperatura superficial del agua tuvo valores inferiores al promedio histórico, y por ende muy probablemente asociados a eventos "La Niña", es evidente que:

  En la medida en que las temperaturas superficiales del agua del mar son más frías (índices ONI con mayores valores negativos), se incrementan tanto número total de eventos meteorológicos que ocurren en la temporada de huracanes, como la duración total de días y el índice ECA asociado, en comparación con el caso previamente analizado (temperaturas por encima del promedio), razón por la cual puede concluirse que para eventos "La Niña" asociados a temperaturas inferiores al promedio histórico, se tendrán temporadas de huracanes de alta actividad general.

- La Tabla 8.2 reafirma lo dicho en el aparte 7.4 en cuanto al cuestionamiento que se hace al índice ECA como parámetro para caracterizar a las temporadas de huracanes, pudiendo verse que para las temporadas de huracanes de los años 1950 y 2000, en las cuales se obtuvo un índice ONI promedio anual de -0,9 en ambos casos, el índice ECA de ambas temporadas difiere entre sí en más de un 100 % (243 para el año 1950, contra 116 para el año 2000), y si la comparación se hace entre la temporada de 1950 y la de 1974 (ambas con índice ONI promedio anual de -0,9) la diferencia entre los índices ECA de ambas temporadas es más pronunciada (243 en el año 1950, contra 61 en el año 1974).

9. *DISTINTAS AMENAZAS NATURALES QUE PUEDEN AFECTAR EL LITORAL COSTERO VENEZOLANO*

Además de analizar el comportamiento y tendencias temporales de las temporadas de huracanes en el Atlántico y de la determinación de sus características particulares, dependiendo de si se está en un evento "El Niño" o un evento "La Niña", un tercer elemento de análisis que se planteó en este trabajo, fue el analizar como ha sido la influencia histórica de los huracanes que transitan por el Océano Atlántico y por el Mar Caribe, sobre el litoral costero de Venezuela, así como determinar si ha o no aumentado la probabilidad de que un evento meteorológico pase "cerca" de territorio venezolano.

Este hecho cobra particular importancia en momentos en que la exploración de yacimientos de gas costa afuera asociada a proyectos como el "*Proyecto Mariscal Sucre (PMS)*" y el "*Proyecto Corocoro*" en el litoral oriental al Norte de la Península de Paria, y los proyectos en los campos "*Perla*" y "*Barracuda*" en el Golfo de Venezuela, están en pleno auge, lo que implica la posibilidad futura de que se construyan instalaciones asociadas a este tipo de actividad, tales como plataformas de producción, tuberías submarinas de conducción, instalaciones costeras de almacenamiento, etc., las cuales en su diseño y construcción, necesariamente deben considerar la influencia extrema que fenómenos como tormentas tropicales o huracanes pueden ocasionar sobre variables como: altura de oleaje, velocidad del viento, velocidades de flujo, etc. y que eventualmente pueden afectar a las mencionadas instalaciones.

Debe acotarse que no solamente los huracanes conforman una amenaza natural al área marino costera de Venezuela, existiendo por el contrario una amplia variedad de amenazas que se pueden englobar en las siguientes categorías:

a) Meteorológicas: Entre las cuales se pueden mencionar las precipitaciones extremas, los ciclones tropicales, rayos y relámpagos, trombas marinas y sequías extremas.

b) Oceanográficas: Entre las cuales destacan los mares de fondo, resacas, tsunamis, aumento del nivel del mar, corrientes circulares (*Eddies*), olas internas y erosión de costas.

c) Geológicas: Entre las que se tienen los sismos, los deslaves submarinos, las llamadas corrientes de turbidez, desplazamientos de fallas submarinas, fenómeno de licuefacción, etc.

d) Biológicas: Tales como la "Marea Roja", emanaciones tóxicas, etc.

Para los efectos de este trabajo los de mayor relevancia por su asociación con el tema de los huracanes, serían los tsunamis y los mares de fondo "*swells*".

9.1 TSUNAMIS Y MARES DE FONDO ("SWELLS")

Los tsunamis o maremotos conforman movimientos ondulatorios del agua de mar cuyo origen se debe principalmente a terremotos que se producen en los fondos submarinos o en áreas cercanas a la costa, aunque los aludes submarinos y las erupciones volcánicas también pueden originar tsunamis de menor intensidad en las áreas próximas a la fuente de perturbación.

En la literatura japonesa de tsunamis se puede encontrar una larga tradición de esfuerzo por cuantificarlos: Imamura (1942,1949) introdujo por primera vez el concepto de magnitud del tsunami y propuso una escala en función de la altura de ola y los daños que éstas producen en las áreas costeras, e Iida (1956,1970) desarrolló aún más el concepto de magnitud de tsunami, "m", que definió como:

$$m = Log_2 H_{máx} \tag{9.1}$$

donde H es la altura máxima de la ola del tsunami (en metros) observada en la costa o medida en mareógrafos.

Iida (1970) estudió los tsunamis ocurridos en Japón entre 1900 y 1968, y en base a ello elaboró expresiones matemáticas sencillas para estimar, únicamente en función de la magnitud y de la profundidad del sismo, la posibilidad de que se genere un tsunami a partir de un terremoto y de que en caso de generarse, dicho tsunami sea catastrófico. En la Figura 9.1 se muestra la relación entre la magnitud M_L y la profundidad focal (H) de terremotos submarinos, así como la ocurrencia y tamaño de los tsunamis asociados (Iida 1970).

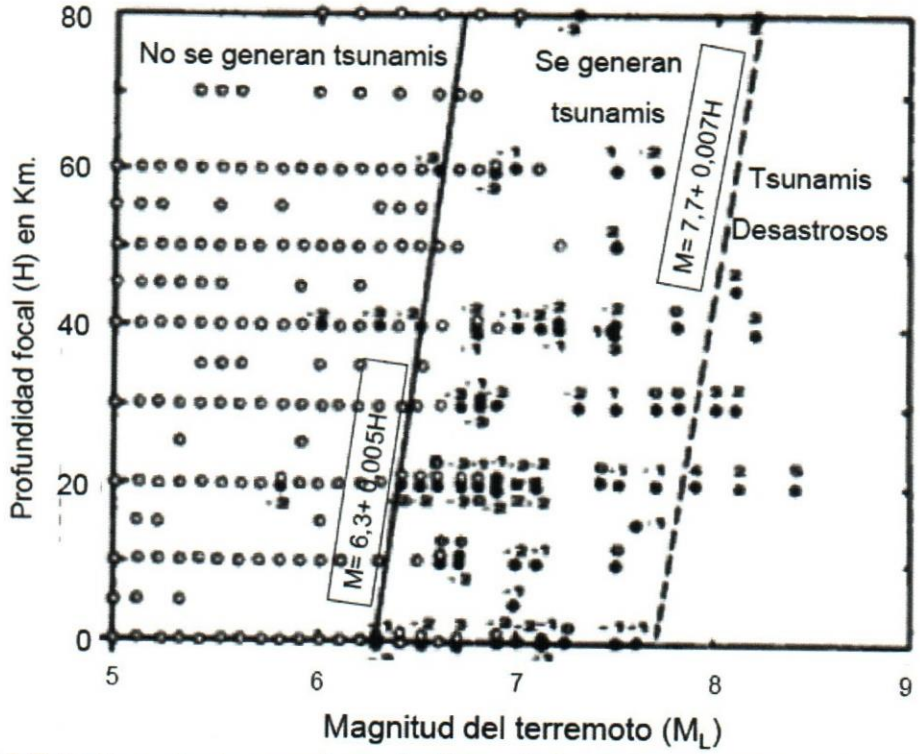


Figura 9.1 Relación entre la magnitud y la distancia focal de terremotos submarinos y la ocurrencia y tamaño de tsunamis asociados

Fuente: Iida 1970 y modificada por el autor.

Donde los círculos vacíos indican que no hubo tsunamis, los círculos sólidos indican tsunamis, mientras que el número adyacente es la magnitud total del tsunami más cercano, de acuerdo a una tabla que Iida elaboró y en la cual la magnitud del tsunami estaba asociada a la energía de éste.

Lander et al (2002) describe noventa y un (91) eventos que pudieron hacer sido tsunamis y que ocurrieron en el Mar Caribe entre los años 1492 y 2000 (ver Figura 9.2).

García (2008) analiza tres (3) tsunamis históricos que han afectado a la ciudad de Cumaná y que han generado alturas de ola comprendidas entre 3 y 6 m., e igualmente analiza la vulnerabilidad de las costas venezolanas a tsunamis regionales originados en el canal de "*La Mona*" (Puerto Rico), y en el cinturón deformado de Panamá.

De acuerdo con esta misma fuente, en el caso venezolano se tienen registros históricos de veinte y siete (27) tsunamis que han afectado entre 1498 y 2007 el litoral costero venezolano los cuales se muestran en la Tabla 9.1.

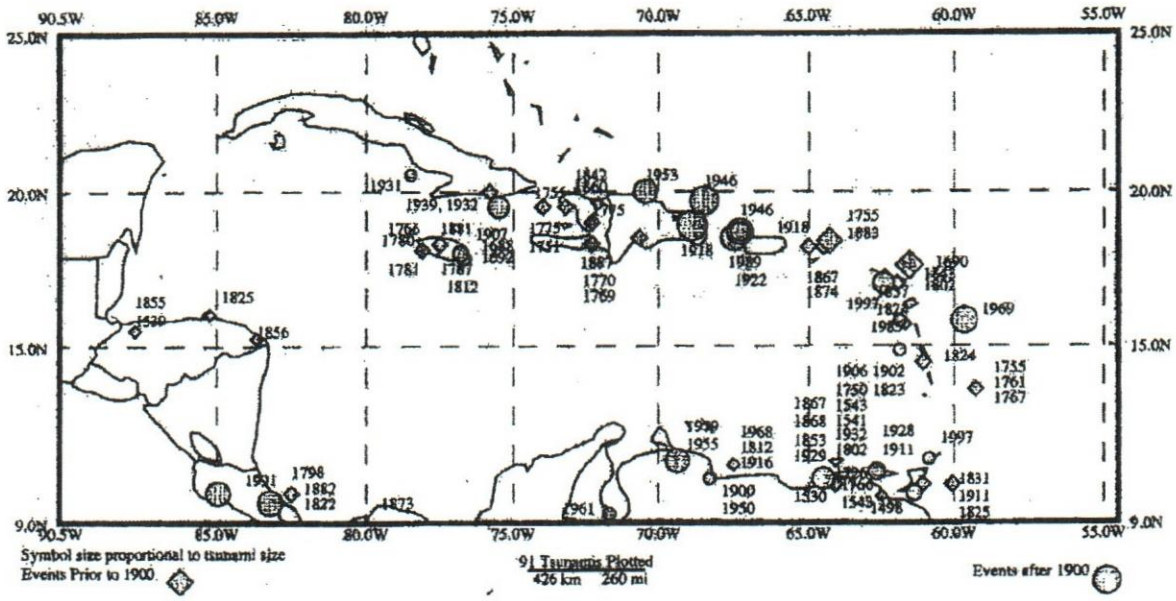


Figura 9.2 Tsunamis en el Mar Caribe. Lapso: 1492-2000

Fuente: Lander, 2002.

Tabla 9.1 Tsunamis históricos que han afectado a Venezuela, 1498-2007.

Evento	Fecha	Lat. (N)	Long. (O)	Localidades afectadas
1	02 y 03/08/1498	10.2	61.2	Boca de Serpiente, Pedernales, Golfo de Cariaco, Cumaná y Península de Araya.
2	01/09/1530	10.7	64.2	Península de Araya, Cumaná, Isla de Cubagua, Isla de Margarita, Nueva Cádiz, Península de Araya, Golfo de Venezuela, Puerto Cabello y Cariaco.
3	25/12/1541	10.7	63.8	Nueva Cádiz, Cumaná, Isla de Cubagua.
4	01/09/1543	10.7	64.1	Cumaná, Nueva Cádiz, Península de Araya e Isla de Margarita.
5	Fin del siglo XVI	10.7	64.1	Cumaná.
6	1726	10.6	64.3	Salina de Araya y Península de Araya.
7	1750	10.5	64.3	Cumaná.
8	21/10/1766	6.5	67.4	Punta Delgada & Río Orinoco.
9	15/08/1802	10.3	64.5	Río Orinoco, Venezuela.
10	26/03/1812	11.5	66.9	La Guaira (Venezuela - Colombia).
11	15/07/1853	12.1	63.6	Cumaná, Sabana de Salgado, Puerto Sucre y Sabana de Caigüire.
12	1867	-	-	Carúpano e Isla de Margarita.
13	1868	-	-	Maiquetía, Cabo Blanco.
14	13/08/1868	10.7	63.8	Juan Griego, Isla de Margarita y Río Caribe. San Juan, Puerto Rico.
15	29/10/1900	11	66.4	Puerto Tuy, Macuto, Río Neverí y Puente Hierro.
16	1906	-	-	Cabo Blanco, Maiquetía.
17	31/01/1906	-	-	Cumaná, Carúpano, Río Caribe, Nueva Esparta.
18	12/11/1916	10.5	67.8	Ocumare de la Costa.
19	13/09/1928	-	-	Carúpano.
20	17/01/1929	10.6	64.6	Cumaná, Manicuare, El Salado, Puerto Sucre y El Barbudo.
21	04/11/1932	-	-	Cumaná.
22	03/08/1950	10.6	69.5	Puerto Cabello.
23	18/01/1955	11.3	69.4	La Vela.
24	16/06/1961	8.9	73.4	Lago de Maracaibo.
25	20/09/1968	10.7	62.7	Venezuela - Trinidad.
26	03/09/1979	-	-	Puerto Cumarebo.
27	09/07/1997	10.6	63.5	Isla de Margarita, Cariaco, Cumaná y Sucre. Tobago.

Fuente: García, 2008.

En el caso de las costas venezolanas del Mar Caribe, las únicas evidencias encontradas sobre ocurrencia de grandes olas marinas concomitantes con eventos sísmicos, están circunscritas al área de Cumaná (Grases, 1979), aunque no puede descartarse la influencia que pudieran tener sobre las costas venezolanas, eventos asociados a tsunamis que se generen en el Mar Caribe.

García (2008) modeló matemáticamente los efectos de uno de los tsunamis más documentados en el Caribe, que fue generado por el sismo de Puerto Rico en 1918, donde una dislocación en la falla normal del Canal de "*La Mona*" (ver ubicación espacial en la Figura 9.3) originó un sismo de magnitud Mw 7.3.

Los resultados mostraron que la onda del tsunami arriba a las costas venezolanas en un tiempo de entre cincuenta (50) y sesenta (60) minutos, con alturas de ola de 3,5 m. en el archipiélago de Los Roques, de 3,0 m. en las islas de La Tortuga y Margarita, de 2,0 m. en las costas de Puerto Cabello y La Guaira, mientras que en Punto Fijo alcanzaría poco más de 0,20 m.

Figura 9.3 Acceso de oleajes extremos a las costas venezolanas, provenientes del Atlántico Norte

En cuanto a los llamados "mares de fondo", éstos son consecuencia de los efectos de las tormentas extratropicales, los cuales se dejan sentir en aguas venezolanas entre Diciembre y Abril de cada año, es decir, en el invierno del Hemisferio Norte.

En esta época, las depresiones de las latitudes medias son intensas y aparecen con una frecuencia media de cuatro (4) por mes, dos (2) o tres (3) de las cuales generan oleajes que arriban a costas venezolanas en formas de marejadas o mares de fondo ("*Swells*"), las cuales en ocasiones pueden producir efectos destructivos sobre instalaciones "*off-shore*" (costa afuera) y costeras.

Hidromet (1977) realizó un excelente estudio de este tipo de fenómenos a partir de un gran número de mapas sinópticos meteorológicos con la información de toda la década de los años 60.

La metodología seguida consistió en dividir la longitud total de las costas venezolanas en diez (10) tramos, en los cuales se estimaron los parámetros de generación de oleaje, así como la elaboración de modelos de las situaciones generadoras de los diversos oleajes, con lo cual se elaboraron estadísticas del oleaje en cada tramo.

Durante los diez (10) años estudiados, se determinaron 318 situaciones generadoras que afectaron a los diferentes tramos costeros definidos.

Por otra parte, Incostas (2011) ha venido realizando mediciones oceanográficas y meteorológicas para PDVSA, al Norte de la Península de Paria, tanto a través de la colocación de correntímetros Doppler en el fondo del mar que permiten tener obtener información del perfil vertical de velocidades de flujo, como mediante la instalación de boyas oceanográficas, a través de las cuales se obtiene información de diversos parámetros meteorológicos y oceanográficos, entre ellos, el oleaje.

Dentro de la serie temporal de datos asociados al oleaje (altura, dirección y período) registrados por una boya oceanográfica durante poco más de dos (2) años, se registraron eventos asociados tanto al paso cercano de tormentas tropicales y huracanes, como de "mares de fondo", algunos de los cuales se presentan a manera ilustrativa en el Anexo 12.7.

En el caso específico de los "mares de fondo" en algunas de las gráficas se pueden apreciar los diferentes "frentes de olas" asociados a este tipo de fenómeno, caracterizados por presentar secuencias de oleaje en los cuales el período va disminuyendo desde valores típicos del orden de los 16 s., hasta los valores típicos del oleaje cotidiano presente en el área de estudio (8 s.), a medida que se van desplazando desde la zona de generación hasta sectores de menores latitudes, y que se manifiestan como los "dientes de sierra" que presenta la variación temporal del período pico del oleaje.

En resumen, existen básicamente tres (3) fenómenos meteorológicos responsables de la generación de olas de altura considerable que pueden afectar a las costas venezolanas, y que deben ser tomados en cuenta a la hora de determinar los valores de diseño del oleaje que pudieran afectar a las estructuras instaladas costa afuera (*offshore*) en su período de vida útil:

En primer término, los tsunamis, que pudieran generar alturas de ola de más de 3,0 m en algunos sectores del litoral norte de Venezuela.

En segundo término, las tormentas extratropicales que se generan en el Atlántico Norte, las cuales bajo ciertas circunstancias favorables (intensidad, distribución de la presión atmosférica, velocidad de avance, etc.) ocasionan marejadas con períodos largos ("mares de fondo"), que suelen impactar y ocasionar daños a lo largo de las instalaciones costeras y estructuras "*offshore*".

Y en tercer término, los ciclones tropicales (tormentas tropicales y huracanes), que transitan cerca de las costas venezolanas con cierta periodicidad, y que pueden originar oleajes intensos. Bajo condiciones favorables en lo referente a su trayectoria, velocidad de avance, intensidad del gradiente de presión y distribución del campo de vientos, los ciclones tropicales son los marcadores de las condiciones extremas de las alturas de oleaje para períodos de retorno alto.

9.2 REVISIÓN HISTÓRICA DE LAS TRAYECTORIAS DE LOS HURACANES

Un primer análisis comprendió la revisión histórica general de todas las trayectorias de huracanes disponibles desde 1851 hasta 2012 en el océano Atlántico, evaluándose cuántos de ellos han pasado "cerca" de las costas venezolanas.

En la Figura 9.4 se presentan las trayectorias de todos los eventos meteorológicos documentados para el Atlántico Norte (a partir de 1851) y para el Pacífico Oriental (a partir de 1949), mientras que en la Figura 9.5 se presentan las trayectorias de todos los huracanes mayores (grado 3 o superior) documentados para el Atlántico Norte (a partir de 1851) y para el Pacífico Oriental (a partir de 1949).

Figura 9.4 Trayectorias de todos los ciclones tropicales documentados para el Atlántico Norte (1851-2012) y el Pacífico Oriental (1949-2012).

Figura 9.5 Trayectorias de todos los huracanes mayores documentados para el Atlántico Norte (1851-2012) y el Pacífico Oriental (1949-2012).

Fuente de ambas figuras: http://www.nhc.noaa.gov/climo/

Por otra parte, en la Figura 9.6 se muestran las trayectorias de los diferentes eventos meteorológicos que han transitado a menos de noventa (90) millas náuticas de una localización ubicada en las coordenadas Latitud 11,75° Norte y Longitud 64° Oeste (que representa el centro del círculo en la figura), seleccionada por su cercanía a una de las áreas en las cuales se están haciendo estudios costa afuera relacionados a proyectos gasíferos que se están desarrollando actualmente en Venezuela.

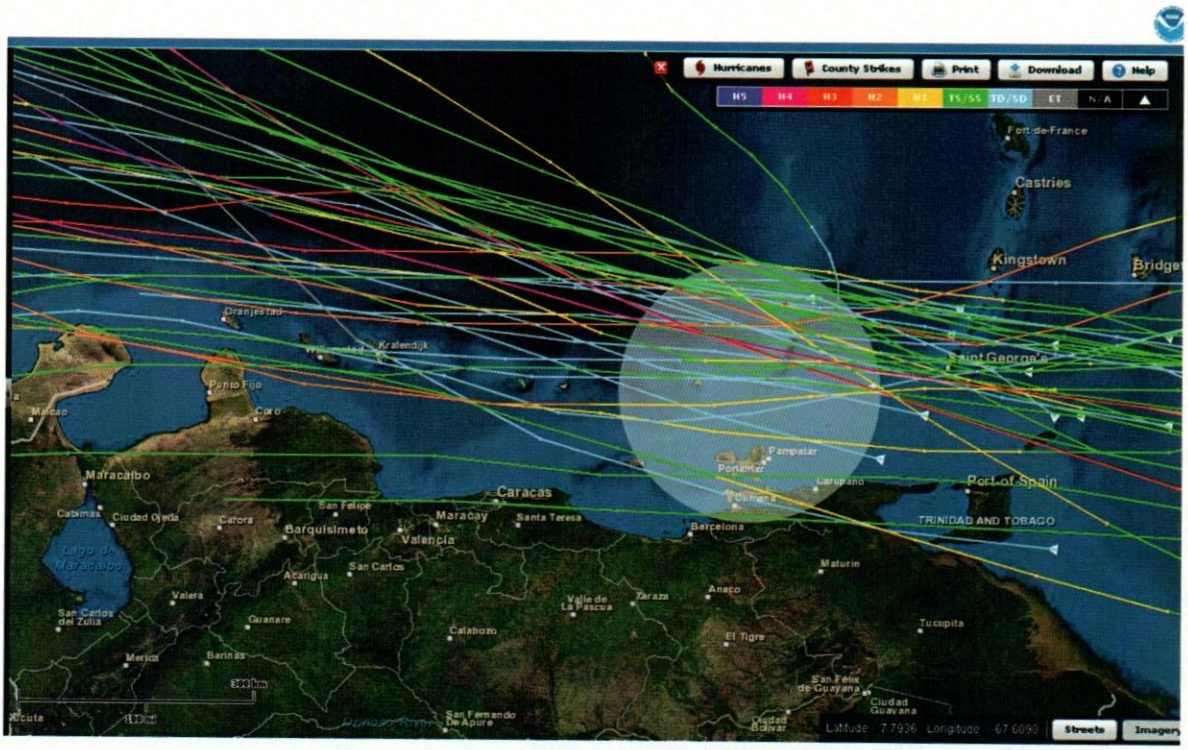


Figura 9.6 Trayectorias de los ciclones tropicales que han pasado a menos de 90 millas náuticas del punto de coordenadas Lat. 11,75° N y Long. 64° O. Lapso 1851-2012.

Fuente: http://www.csc.noaa.gov/hurricanes

Tomando como base del análisis una localización representativa como la que fue seleccionada, se tiene que de un total de un mil cuatrocientos noventa y cinco (1495) eventos meteorológicos o ciclones documentados en la cuenca Atlántica, un total de cuarenta y cuatro (44) tuvieron trayectorias que pasaron a menos de noventa (90) millas náuticas (167 Km.) del punto de Lat. 11,75° Norte y Long. 64° Oeste ubicado en el centro del círculo resaltado en la Figura 9.6, lo cual representa el 2,9% del total de ciclones documentados en el Atlántico desde el año 1851 hasta el 2012.

9.3 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA INFLUENCIA DE LOS HURACANES SOBRE LAS COSTAS VENEZOLANAS

El bajo porcentaje (2,9%) obtenido del análisis previo pareciera indicar que los huracanes no deberían representar un motivo importante de preocupación en lo referente a la influencia y potenciales daños que pudieran generar tanto en las áreas costeras como en terreno continental venezolano.

No obstante, siempre debe considerarse que la presencia de un evento meteorológico que transite por las cercanías de una determinada localización, va a generar valores altos de parámetros como: velocidad del viento, y en el caso de que la localización estuviera en el

mar, generaría valores altos ó extremos de otras variables como la altura del oleaje, incidiendo también en el comportamiento del patrón de flujo existente en el área.

Un análisis para períodos de tiempo similares al realizado en el aparte 7 con la finalidad de tomar en cuenta los diferentes avances tecnológicos que fueron haciendo su aparición entre 1851 y el presente, se muestra en la Tabla 9.2, donde se presentan todos los eventos meteorológicos que pasaron a menos de noventa (90) millas náuticas de un punto cuya localización es 11° 45' de latitud Norte y 64° de Longitud Oeste, convenientemente seleccionado debido a su cercanía a buena parte de las áreas donde se ejecutan mediciones relacionadas con la exploración de gas en el oriente venezolano, incluyendo además buena parte de los fenómenos que afectan el litoral costero occidental adyacente al Golfo de Venezuela.

Tabla 9.2 Estadísticas generales de los huracanes que pasaron cerca de las costas venezolanas

Lapso	Total de eventos	Eventos que pasaron a 13° 15' Lat o menos	Categoria al momento de pasar por la localizacion de referencia							Porcentaje de eventos que pasaron a Lat. 13° 15´ o menos
			DT	TT	H1	H2	H3	H4	H5	
1851-2012	1495	44	17	15	7	3	1	1		2.94
1851-1904	412	8	1	1	5	1				1.94
1905-1943	319	9	3	5	1					2.82
1944-1965	213	4		1	1	1	1			1.88
1966-2012	551	23	13	8		1		1		4.17
2000-2012	208	10	5	3		1		1		4.81

La Tabla 9.2 permite hacer las siguientes aseveraciones:

- El número y porcentaje de eventos meteorológicos que han pasado "cerca" o han "tocado" territorio venezolano entre los años 1851 y 2012 son históricamente bajos; 44 y 2,9% respectivamente.

- Si el análisis se realiza por períodos de tiempo, a los fines de "separar" los cambios que introducen en las estadísticas la adición de las nuevas tecnologías que fueron incorporadas en el estudio y detección de los eventos meteorológicos, se tiene que el porcentaje de incidencia en el lapso 1966-2012 fue 2,2 veces superior al registrado en el lapso 1944-1965, situación que en principio pudiera pensarse que es producto del hecho de que entre ambos períodos también hubo un incremento del promedio anual de eventos registrados, que fue de 9,68 en el lapso 1944-1965 versus un 11,72 en el lapso 1966-2012. No obstante, el incremento en el promedio anual de eventos entre los dos lapsos considerados fue sólo de 1,2 veces, razón por la cual puede afirmarse que efectivamente ha habido un incremento neto en el porcentaje de incidencia de este tipo de eventos sobre las costas venezolanas, que si bien es cierto, sigue siendo bajo, pasó de menos de un 2% a mediados del siglo XX, hasta casi 5% en lo que va del siglo XXI.

Otro análisis que se realizó, tuvo como objetivo, tratar de encontrar alguna relación que pudiera existir entre el paso de un evento meteorológico cerca de las costas venezolanas (Lat. menor a 13° 15' Norte) y la condición que tuviera la temporada de huracanes respectiva (condición neutral, condición de "El Niño" o condición de "La Niña"), mostrándose los resultados en la Tabla 9.3.

Tabla 9.3 Relación entre el paso de un evento meteorológico por debajo de la Lat. 13° 15' y las características generales de la temporada de huracanes

Año de ocurrencia del evento	Cantidad anual de eventos	Intensidad del evento para el momento en que transitó frente a la localización de referencia	Valor del Índice ONI para el mes de ocurrrencia del evento (de 1950 en adelante)	Valor promedio anual del índice ONI (de 1950 en adelante)	Condición de "El Niño" "La Niña" o Neutral
1856	1	H1			Neutral *
1877	1	H1			Niño *
1878	1	H1			Niño *
1886	1	H2			Niña *
1887	1	H1			Niña *
1892	1	H1			Neutral *
1897	1	TT			Niño *
1901	1	DT			Niño *
1909	1	DT			Neutral *
1911	1	TT			Niño *
1917	1	TT			Niño *
1918	1	TT			Niño *
1931	1	TT			Niño *
1933	3	H1, DT, DT			Niña *
1938	1	TT			Neutral *
1954	1	H2	-0.7	-0.4	Niña **
1955	1	H1	-1.0	-1.0	Niña **
1961	1	TT	0.2	0.0	Neutral **
1963	1	H3	1.3	0.6	Niño **
1969	1	DT	0.7	0.8	Niño **
1971	2	DT, DT	-0.7	-0.9	Niña **
1974	2	DT, TT	-0.4	-0.9	Niña **
1978	3	DT, DT, DT	-0.4	-0.1	Neutral **
1986	1	TT	0.7	0.3	Niño **
1988	1	TT	-1.6	-0.8	Niña **
1990	1	TT	0.3	0.3	Neutral **
1993	1	TT	0.2	0.3	Neutral **
1996	1	DT	-0.2	-0.4	Neutral **
2000	1	DT	-0.6	-0.9	Niña **
2002	2	TT, DT	0.9	0.6	Niño **
2004	3	TT, DT, H4	0.7	0.4	Niño **
2005	2	H2, DT	0.2	0.1	Neutral **
2006	1	DT	0.2	0.1	Neutral **
2007	1	TT	0.7	0.6	Niño **

* Condiciones estimadas en base a la base de Quinn.
** Condiciones estimadas en base a los índices mensuales ONI reportados por la NOAA y a los valores promedios anuales del índice, calculados en este trabajo.
DT= Depresión tropical
TT=Tormenta Tropical
H1, H2, H4= Huracán y grado del mismo de acuerdo a la clasificación de Saffir-Simpson.

A partir de los datos mostrados en esta Tabla se puede afirmar lo siguiente:

- No existe una condición preponderante que sirva de "catalizadora" para aumentar la frecuencia con la cual los huracanes pasan cerca de las costas venezolanas, ya que de un total de cuarenta y cuatro (44) eventos, diez y siete (17) ocurrieron bajo condiciones de "El Niño", trece (13) bajo condiciones de "La Niña" y catorce (14) en condiciones "neutras", lo que indica que el 61,4% de los eventos ocurrieron en condiciones "neutras" o bajo condiciones de "La Niña" mientras que el restante 38,6% se presentó bajo condiciones de un evento "El Niño".

- Si se hace un análisis por década de la ocurrencia de los eventos meteorológicos que han pasado "cerca" o han "tocado" territorio venezolano, tomándose en cuenta únicamente los ocurridos entre 1950 y 2009, se observa un incremento significativo en su número sobre todo a partir de 1980, teniéndose que en la década 1980-89 se presentaron dos (2) eventos, en la década 1990-99 se presentaron tres (3) eventos, mientras que en la década 2000-09 se presentaron diez (10) eventos, más del triple de la década precedente y el doble de los eventos ocurridos en las dos (2) décadas previas.

- Si se analiza la ocurrencia de los eventos, agrupándolos de acuerdo con el valor del índice ONI reportado por la NOAA para el mes y año en que ocurrió cada evento (únicamente para los eventos que ocurrieron a partir de 1950, que es cuando se comienza a disponer de datos para calcular el índice ONI), se obtiene lo presentado en la Tabla 9.4, en la cual se puede corroborar la información mostrada en la Tabla 9.3 en el sentido de que cerca del 70% de los casos en que han pasado huracanes cerca de las costas venezolanas, se han presentado bajo condiciones de "La Niña", con índices ONI negativos (-0,5° C o menor), o bajo condiciones neutras con índices ONI comprendidos entre -0,4° C y +0,4 ° C)

Tabla 9.4 Relación entre la frecuencia con la que pasa un huracán cerca de las costas venezolanas y el valor del índice ONI para el mes en que ocurre el paso del huracán

Rango de valores del indice ONI en el mes de ocurrencia (° C)	Número de eventos	Frecuencia relativa	Frecuencia acumulada (%)
Entre -1.6 y -1.2	1	0.037	3.70
Entre -1.19 y -0.7	4	0.148	18.52
Entre -0.69 y -0.2	7	0.259	44.44
Entre -0.19 y 0.3	6	0.222	66.67
Entre 0.31 y 0.8	6	0.222	88.89
Entre 0.81 y 1.3	3	0.111	100.00

10. CÁLCULO DE ALTURAS DE OLEAJE EN UNA DETERMINADA LOCALIZACIÓN PRODUCIDA POR UN HURACÁN Y COMPARACIÓN CON MEDICIONES REALES

El haber demostrado que efectivamente a partir de la década de los 90 ha ocurrido un aumento en el número total de eventos meteorológicos por temporada, el cual es especialmente significativo en lo que va de siglo XXI, así como el hecho de que efectivamente ha habido un incremento neto en el porcentaje de incidencia de este tipo de eventos meteorológicos sobre las costas venezolanas, pasando de menos de un 2% hasta mediados de los años 60, hasta casi 5% a partir de entonces, justifican la necesidad de aumentar el estudio y conocimiento existente en el país de dichos fenómenos, tanto mediante el aumento de mediciones de campo de los distintos parámetros involucrados, como a través del desarrollo e implementación de técnicas numéricas de mediana y alta complejidad, que permitan simular y analizar los distintos escenarios que se planteen.

En razón de esto, otro de los objetivos que se planteó este trabajo, fue el de evaluar técnicas alternativas, que sin la necesidad de desarrollar e implementar un modelo numérico global o local del fenómeno, permitieran de una manera más expedita y sencilla, pronosticar alturas de oleaje en un punto de interés a partir de las condiciones que el paso de un evento meteorológico, como por ejemplo un huracán, generara en otro punto distante, aprovechando el hecho de que los cálculos que se realicen pueden ser cotejados contra mediciones reales disponibles en sitios específicos, para luego extender los cálculos a otras localizaciones donde sea de interés el conocer, que valores extremos de oleaje pudieran generarse por el tránsito de un huracán a través del área circundante.

Estos valores "extremos" son de especial utilidad a la hora de desarrollar los cálculos de ingeniería asociados a su diseño, y que en un buen porcentaje de casos, son estimados a partir de extrapolaciones de datos de corta duración, hecho que redunda en la mayoría de los casos en valores sobre estimados, que pueden encarecer notablemente el costo del proyecto y construcción de estructuras costa afuera (*off-shore*), tales como plataformas de producción, tuberías submarinas, etc.

10.1 MODELOS PARAMÉTRICOS

En determinadas situaciones donde se tengan escasos detalles sobre las características reales de un huracán (tal como ocurre en ciertas regiones del mundo donde la escasez de datos meteorológicos sea evidente), los modelos paramétricos pueden proporcionar precisiones similares a la de los modelos espectrales, siempre que los efectos de "tierra" y de la batimetría del área sean mínimos. Sin embargo, incluso aún cuando estos criterios se cumplan, las situaciones donde sistemas secundarios de viento u oleaje puedan afectar seriamente las condiciones de oleaje en una determinada área, deben ser evitadas.

Se ha demostrado que los modelos espectrales proporcionan estimaciones precisas de las condiciones de oleaje de los huracanes cuando operan con una buena información del campo de vientos (Ward, Evans y Pompa, 1977, Corson et al, 1982 y Cardone, 1992). Además, el hecho de que dichos modelos numéricos puedan implementarse hoy en día en casi cualquier PC, aumenta la motivación para utilizarlos en muchas aplicaciones con importantes implicaciones económicas o de seguridad.

En general, los métodos paramétricos de predicción tienden a funcionar bien cuando se aplican a fenómenos que tienen poca o ninguna dependencia de los estados previos (es decir, sistemas con poca, o sin memoria), siendo un buen ejemplo de este tipo de sistemas físicos, el campo de vientos de un huracán.

Ward (1977) ha demostrado que los campos de vientos de un huracán pueden ser bien representados a través de un pequeño número de parámetros ya que los vientos en un huracán tienden siempre a permanecer muy cerca de un equilibrio dinámico con ciertos

mecanismos que lo impulsan. Por otra parte, el oleaje depende no solamente del campo de viento actual sino también de los campos de vientos previos, de los efectos que la batimetría del área pueda ejercer, del oleaje pre-existente originado por otros sistemas de vientos, y en general por todo el proceso de generación de oleaje de las últimas 12 a 24 horas.

Por lo tanto, los modelos paramétricos no funcionan bien para todos los huracanes (CEM, 2002), pero proporcionan resultados precisos cuando los siguientes criterios se cumplen dentro de un intervalo de 12 a 18 horas antes de la aplicación de un modelo paramétrico:

- La intensidad del huracán (velocidad máxima) es relativamente constante.
- La trayectoria del huracán es relativamente recta.
- La velocidad de avance del huracán es relativamente constante.
- El huracán no es afectado por cambios morfológicos de fondo (batimetrías) importantes, ni por la presencia de tierra.
- No existen sistemas secundarios de viento u oleaje cuyas condiciones afecten el área de interés.

Young (1987) desarrolló un modelo paramétrico de oleaje basado en los resultados de las simulaciones hechas con un modelo numérico espectral. Sus resultados evidencian la existencia de una fuerte dependencia de la altura del oleaje en relación con los máximos valores de velocidad del viento y velocidad de avance de una tormenta, la cual se muestra en la Figura 10.1, pudiendo ser utilizados los resultados para estimar el valor de H_mo en un huracán, donde H_mo es la energía basada en la altura significativa del oleaje.

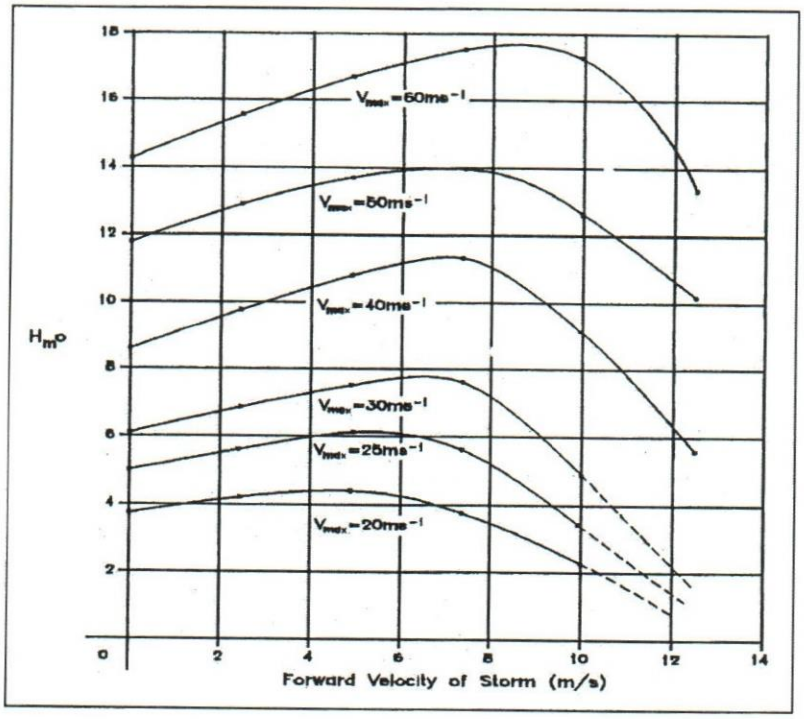


Figura 10.1 Máximo valor de H_mo en un huracán como función de Vmáx. y la velocidad de avance de la tormenta.

Fuente: Coastal Engineering Manual (CEM)

10.2 METODOLOGÍA SUGERIDA POR EL "SHORE PROTECTION MANUAL, DEL U.S ARMY COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER"

En ausencia de modelos numéricos espectrales, paramétricos o generales, que permitan pronosticar el régimen de oleaje producido por fenómenos naturales tales como, depresiones o tormentas tropicales y huracanes, el "*Shore Protection Manual del U.S Army Coastal Engineering Research Center*" sugiere para huracanes que se muevan lentamente, la utilización de las siguientes fórmulas para estimar la altura de ola significativa y su período, en el punto de máximo viento.

$$H_o = 16{,}5 * e^{\frac{R*\Delta P}{100}} * \left[1 + \frac{0{,}208 * \alpha * V_f}{\sqrt{U_r}}\right] \tag{10.1}$$

$$T_s = 8{,}6 * e^{\frac{R*\Delta p}{200}} * \left[1 + \frac{0{,}104 * \alpha * V_f}{\sqrt{U_r}}\right] \tag{10.2}$$

Donde:

H_o= Altura significativa del oleaje en aguas profundas (pies).

T_s= Período significativo del oleaje en aguas profundas (s.).

R= Radio del viento máximo (millas náuticas).

Δp= Diferencia entre la presión atmosférica normal (P_n) y la presión central del huracán (P_o) (en pulgadas de mercurio).

V_f= Velocidad de desplazamiento del huracán (en nudos).

$U_{máx}$= Velocidad máxima del viento a una altura de 30 pies, por encima de la superficie del agua (en nudos).

U_r= Velocidad máxima del viento sostenido, a una altura de 30 pies por encima de la superficie del agua (en nudos).

f= Parámetro de Coriolis = 2wSenΘ, siendo w la velocidad angular de la tierra y Θ el ángulo de la latitud.

α= Coeficiente dependiente de la velocidad de traslación del huracán y del incremento en la longitud efectiva del "*fetch*", como consecuencia del movimiento del huracán. Para huracanes de movimiento lento α= 1.

Otras fórmulas utilizadas en el cálculo son:

$$U_r = 0{,}865 * U_{\max} + 0{,}5 * V_f \tag{10.3}$$

$$U_{\max} = 0{,}868 * [73 * (P_n - P_o)]^{\frac{1}{2}} - R * (0{,}575 * f) \tag{10.4}$$

Una vez obtenido el valor de la altura del oleaje en el punto de máximos vientos del huracán (H_o), se pueden obtener la altura y período del oleaje en otras áreas de interés mediante la utilización de los gráficos de "isolíneas relativas para huracanes de período lento" (Figura 10.2) y de las siguientes fórmulas:

$$T = 12{,}1 * \sqrt{\frac{H_o}{g}} \qquad \text{con } H_o \text{ en m.} \tag{10.5}$$

$$H = Ho * \% \text{ de isolíneas relativas} \tag{10.6}$$

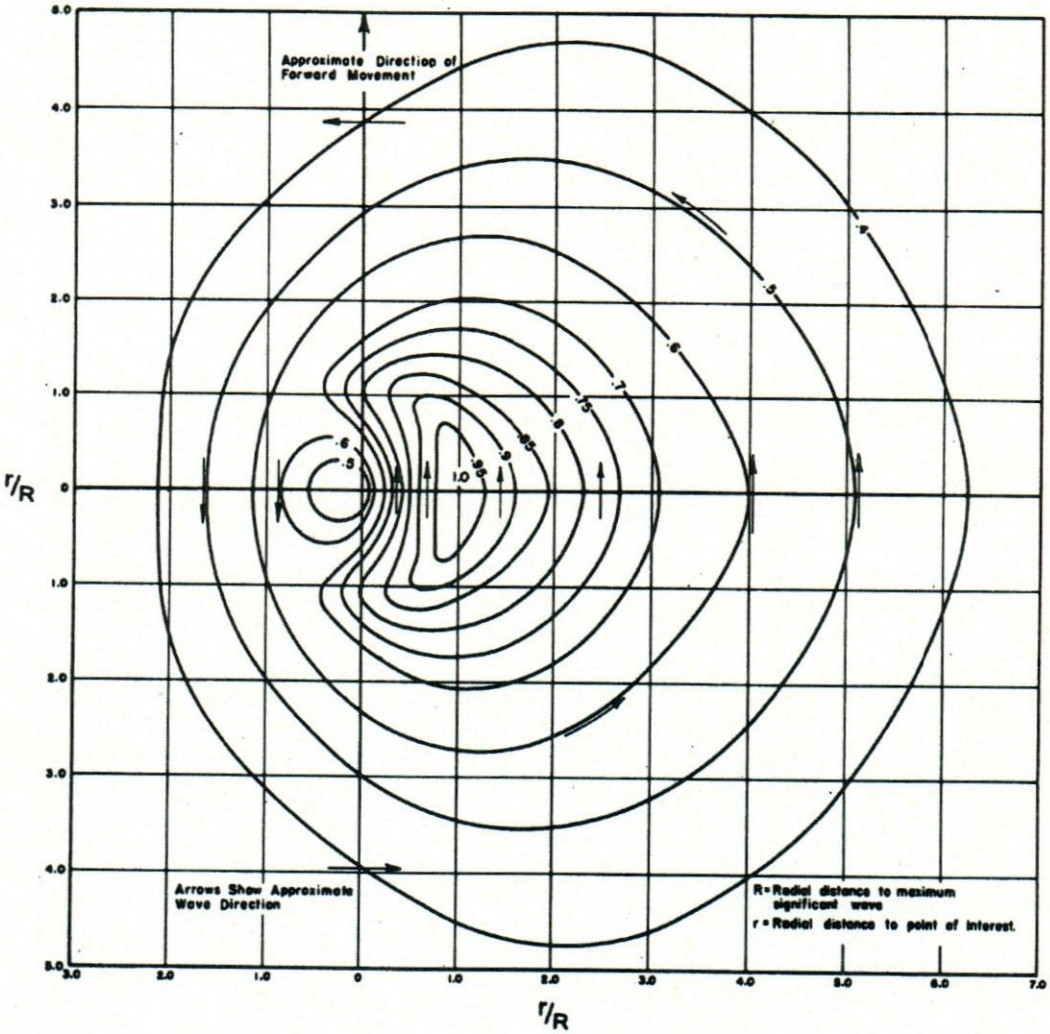


Figura 10.2 Isolíneas normalizadas de altura significativa del oleaje para huracanes de movimiento lento

Fuente: Coastal Engineering Manual (CEM)

Esta metodología fue validada (ver aparte 10.3) al comparar los resultados obtenidos luego de aplicarla, contra mediciones reales disponibles en un sitio de medición ubicado al Norte de la Península de Paria en el cual estaba instalada una boya meteorológica.

Una vez comprobada la validez del método, éste fue utilizado para simular diferentes escenarios, originados por la acción que diferentes eventos meteorológicos ejercen sobre un punto o área de interés.

10.3 VALIDACIÓN DEL MÉTODO DE CÁLCULO DEL "SHORE PROTECTION MANUAL, DEL U.S ARMY COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER"

Con la finalidad práctica de obtener valores con buena precisión de las alturas de oleaje que pudieran generarse en una determinada localización, como consecuencia del paso de un evento climatológico (ciclón tropical o huracán) por otra localización distante, sin la necesidad de implementar modelos matemáticos globales o locales como los descritos en el aparte 2, o de otra índole como los mencionados en el aparte 10.1, se utilizó la metodología del "*Shore Protection Manual del U.S Army Coastal Engineering Research Center*" descrita en el aparte 10.2, para un punto específico localizado al Norte de la Península de Paria, en el cual se dispone de más de dos (2) años de mediciones de una boya oceanográfica (Incostas 2011), así como de estadísticas generadas por la empresa "*Oceanweather*", las cuales no solamente sirvieron para validar la información referente a las mediciones del oleaje cotidiano registrado por la boya sino para analizar el oleaje extremo, dado que la base de datos de *Oceanweather* dispone de más de treinta años (30) de registros.

Oceanweather es básicamente un ente dedicado a la generación sintética de datos históricos de vientos y de oleaje. La generación de estos datos sintéticos las realiza a través de la calibración de modelos globales, en este caso de oleaje, para lo cual los modelos globales son "alimentados" con valores registrados por diferentes boyas oceanográficas convenientemente dispuestas a lo largo de los océanos.

El modelo se considera "calibrado" cuando logra reproducir los datos ya registrados por las diferentes boyas ("*hindcast*"), pudiendo entonces generar "datos sintéticos" de eventos ya ocurridos en cualquier área cercana a las boyas donde se necesiten conocer series de tiempo o espectros de oleaje, con los cuales puedan realizarse análisis estadísticos, de probabilidad de excedencia u ocurrencia, etc.

La ubicación donde estaba dispuesta la boya oceanográfica que permitió obtener entre otros parámetros información del régimen de oleaje, se muestra en la Figura 10.3.

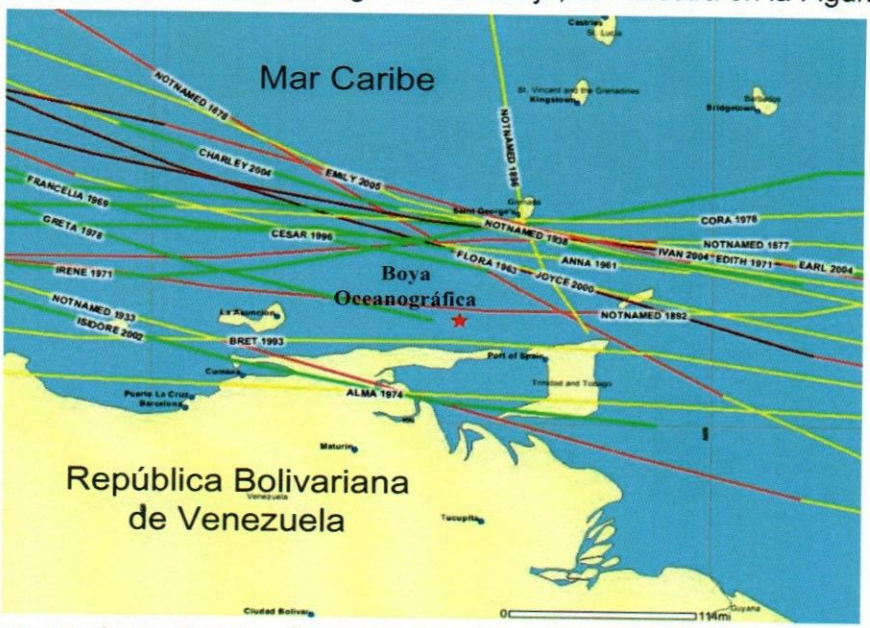


Figura 10.3 Trayectoria de distintos fenómenos meteorológicos que han pasado a menos de 65 millas náuticas de la ubicación de la boya oceanográfica.

Fuente: Pág. Web de dominio público de la "NOAA Coastal Services Center" y modificada por el autor

En dicha figura aparecen señalados todos aquellos fenómenos climatológicos que hubiesen en algún momento pasado a menos de sesenta y cinco (65) millas náuticas (que es según el centro nacional de huracanes de Miami, la distancia máxima de afectación de un huracán) de la ubicación de la boya oceanográfica, siendo la trayectoria, nombre y año en que se sucedieron dichos fenómenos meteorológicos, tomados de la página web de dominio público del "*NOAA Coastal Services Center*".

De todos los fenómenos que allí aparecen, se tomaron en consideración las depresiones o tormentas tropicales y huracanes de mayor intensidad que hubiesen pasado más cerca de la ubicación de la boya.

De acuerdo con el criterio antes mencionado se estudiaron las siguientes tormentas o huracanes, tomándose y señalándose la clasificación que tenía el fenómeno para el momento en que transitaba cerca de la ubicación de la boya:

- Tormenta tropical "Anna" (1961).
- Huracán (Grado 3) "Flora" (1963).
- Depresión Tropical "Greta" (1978).
- Depresión tropical "César" (1996).
- Huracán (Grado 3) "Iván" (2004).
- Huracán (Grado 3) "Dean" (2007).

Para cada uno de los eventos estudiados se siguió la siguiente metodología:

a) De acuerdo con la información disponible sobre la trayectoria "*Track*" de cada evento, se ubicaron las posiciones más cercanas a la boya (coordenadas, fecha y hora, intensidad del evento y presión central mínima estimada), a partir de las cuales se determinó la velocidad de avance del ciclón tropical o del huracán.

b) Con los valores de la presión central y la velocidad de desplazamiento del huracán, y adoptando un valor típico de R (radio de viento máximo) de 30 millas náuticas, se obtuvieron los valores de altura significativa y período significativo del oleaje en aguas profundas.

c) A partir de los datos obtenidos en el aparte b) se obtuvieron las magnitudes de Umáx y Ur (Velocidad máxima del viento a una altura de 30 pies, por encima de la superficie del agua y Velocidad máxima del viento sostenido, a una altura de 30 pies por encima de la superficie del agua) respectivamente.

d) A continuación se obtiene el valor "r", que representa la distancia entre el centro del huracán y el punto de interés sobre el cual se quieren hacer las estimaciones del oleaje (la ubicación de la boya en este caso), y que se obtiene a partir de las diferencias de coordenadas entre la ubicación de la boya y las diferentes posiciones del huracán que se tomen en consideración, tomándose para efectos de cálculos la menor de las distancias.

e) Con los valores de R y "r", se entra en la Figura 10.2, tomando en cuenta la ubicación relativa entre la posición del huracán y la del punto de interés, a los fines de encontrar el valor de la "isolínea" normalizada de altura significativa del oleaje, valor que una vez obtenido se multiplica por el valor de la altura significativa en aguas profundas que se

ha obtenido previamente en el paso b), obteniéndose de esta forma el valor de la altura significativa del oleaje en el punto de interés.

En la Tabla 10.1 se presenta un resumen de las alturas y períodos significativos de oleaje tanto en los puntos de máximo viento (generados durante el tránsito sobre la superficie del mar, por depresiones, tormentas tropicales y huracanes), como los correspondientes valores de altura y período significativo que hubieran generado en el punto de interés (ubicación de la boya en el presente caso).

Si bien es cierto, que el mejor método para calcular las condiciones de oleaje generadas por la acción de un huracán es mediante la utilización de modelos matemáticos, la metodología aquí planteada, en ausencia de modelos globales de predicción de oleaje, permite tener aproximaciones con un buen grado de confiabilidad de los valores que realmente pudieran presentarse.

Tabla 10.1 Oleajes de tormenta generados por fenómenos meteorológicos

Fenómeno Meteorológico e intensidad	Distancia a la que pasó de la boya Ocenográfica (Km.)	Altura Significativa (Ho) en agua profundas (m)	Período significativo del oleaje en aguas profundas (Ts) (Seg.)	Altura Significativa del oleaje en el punto de interés (Boya) (m)	Período del oleaje en el punto de interés (Boya) (Seg.)
Tormenta Tropical "Anna" (1961)	74.5	8.8	11.7	4.4	8.1
Huracán Gr. 3) "FLora" (1963)	64.2	9.1	11.7	7.0	10.2
Depresión Tropical "Greta" (1978)	32.1	8.9	11.8	8.0	10.9
Depresión Tropical "César" (1996)	92.2	9.3	12.2	6.5	9.8
Huracán Gr. 3) "Iván" (2004)	106.6	11.4	13.1	7.4	10.5
Tormenta tropical "Félix" (2007)	150.1	7.0	10.2	1.7	5.1
Huracán Gr. 3) "Dean" (2007)	373.7	11.5	13.3	1.7	5.1

Específicamente en los casos de los huracanes "Dean" y "Félix", que para el momento en que pasaron al norte de las costas venezolanas tenían clasificación de huracán 3 (huracán mayor) y de tormenta tropical respectivamente, la boya oceanográfica estaba desplegada en el mar registrando datos, hecho que permitió comparar los datos obtenidos en la Tabla 10.1 contra los registros reales obtenidos para los instantes en que dichos huracanes transitaron cerca del área de mediciones.

Los registros reales se muestran en las Figuras 10.4 y 10.5 en la cuales se presentan no solamente características propias del oleaje, sino que también se muestran valores de la dirección y velocidad del viento y de las velocidades de corriente a diferentes profundidades.

Los resultados obtenidos con la metodología descrita en los párrafos previos, arrojó excelentes resultados en lo referente a la altura de ola significativa, ya que los valores calculados en la localización de la boya, de 1,7 m. de altura de ola significativa tanto para la tormenta tropical "Félix" como para el huracán "Dean" concordaron muy bien con los valores registrados por la boya, que fueron de 1,6 m. en el caso de "Félix" y de 1,75 m. en el caso de "Dean".

En cuanto a los valores pronosticados del período del oleaje, los resultados fueron menos precisos, ya que los períodos calculados fueron del orden de 5 seg., mientras que los realmente medidos fueron del orden de 7 seg.

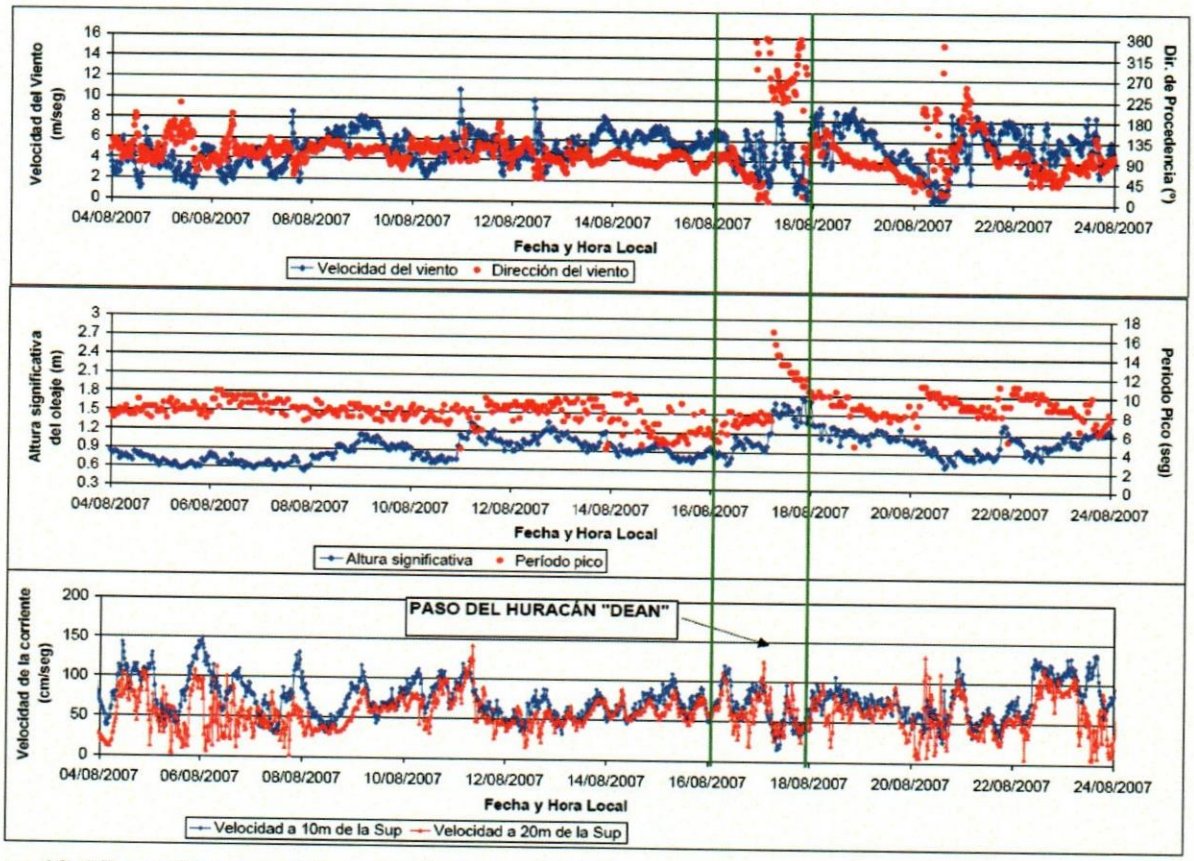


Figura 10.4 Boya Oceanográfica. Mediciones de viento, oleaje y corrientes para el momento del paso del huracán "Dean" cerca del área de mediciones

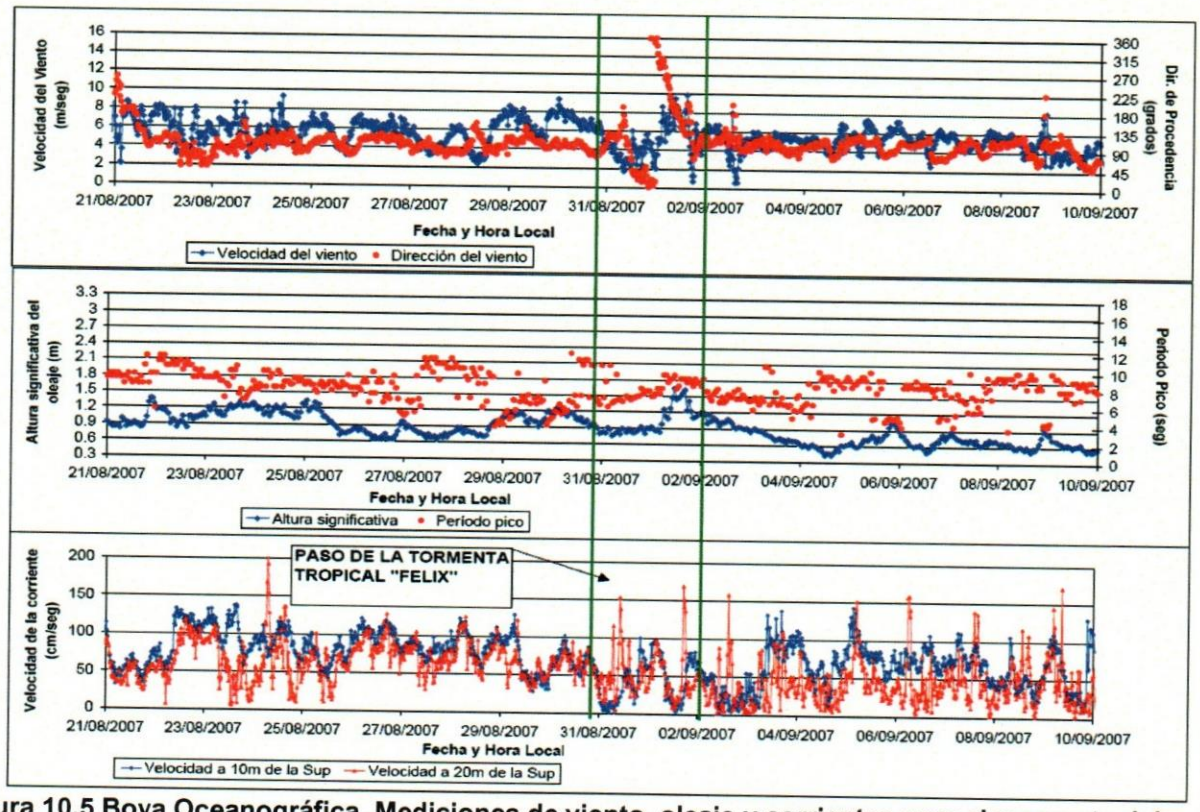


Figura 10.5 Boya Oceanográfica. Mediciones de viento, oleaje y corrientes para el momento del paso de la tormenta tropical "Félix" cerca del área de mediciones

11. *CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES*

11.1 CONCLUSIONES

A partir de los análisis realizados en el presente trabajo, se puede concluir lo siguiente:

a) En lo referente al comportamiento y tendencias en el tiempo de las temporadas de huracanes en el Atlántico:

- La evaluación de todos los datos de la base de datos de huracanes desde 1851 a 2012, sin hacer ningún tipo de distinción del momento y tecnología disponible para el tiempo en que fueron reportados, muestra que en el Atlántico Norte en una temporada promedio ocurren poco más de nueve (09) fenómenos meteorológicos, de los cuales cinco y medio (5,5) serían huracanes, y de éstos, dos (2) serían huracanes mayores (grado 3 o superior en la escala de Saffir-Simpson), siendo el período de tiempo de mayor actividad de la temporada el comprendido entre Agosto 20 y Septiembre 20, con un pico máximo en los primeros diez (10) días del mes de Septiembre.

- Un análisis que separe los datos estadísticos para tomar en cuenta la influencia que tienen los avances tecnológicos, los cuales mejoran la identificación y caracterización de los fenómenos meteorológicos, evidencia un constante aumento en el número de fenómenos meteorológicos que se registraron en las décadas más recientes (último cuarto del siglo XX y el lapso de tiempo del siglo XXI que ha transcurrido), con respecto a las estadísticas reportadas entre 1850 y la primera mitad del siglo XX, teniéndose que el incremento más pronunciado se observa a partir del momento en que se comienzan a utilizar los satélites como herramienta para la detección y caracterización de los fenómenos (año 1966), por lo que entre el período 1944-1965 y 1966-2012 el incremento en el total de fenómenos meteorológicos pasó de casi 10 en el primer período, a casi 12 eventos anuales en el segundo (un incremento de poco más de 20%), con prácticamente un (01) huracán más por año, mientras que en el período correspondiente al siglo XXI se tiene un promedio de diez y seis (16) eventos anuales, de los cuales casi la mitad tienen categoría de huracanes.

- Si bien es cierto que el incremento en el número promedio de eventos meteorológicos ha sido sostenido, eso no implica necesariamente la existencia de un aumento similar en cuanto a la intensidad general de las temporadas de huracanes, valor que normalmente es reflejado a través del índice de actividad ciclónica (ECA) de la NOAA el cual por el contrario, muestra cambios cíclicos de aumento y disminución en su valor.

- Lo anterior es indicativo de que si bien el índice ECA (que es un índice acumulativo) refleja en cierto modo la actividad de los ciclones tropicales, su análisis visto como un "todo", no pone en evidencia la influencia individual de los factores involucrados en la actividad ciclónica de una temporada, como lo son la duración promedio de cada evento, el número total de los mismos, e inclusive la intensidad de ellos, la cual aumentó sólo un 2% contra un aumento del índice de 23% en el mismo período de comparación (década de los 90 y los doce (12) primeros años del siglo XXI).

  Esto permite a su vez concluir que:

- La percepción de que las temporadas de huracanes se han venido intensificando en los tiempos recientes es cierta, pero no debe confundirse "intensificación" con un aumento en la potencia de los huracanes, siendo en cambio el número total de fenómenos meteorológicos y los "días de tormenta" asociados a éstos, la causa de esa "intensificación", los cuales han aumentado en los últimos doce (12) años en un 43% y 39% respectivamente, con respecto a la década precedente.

- El análisis de la frecuencia de ocurrencia de temporadas de huracanes de alta intensidad, categorizadas como tal según el valor del índice ECA, reveló que el número de temporadas "por encima de lo normal" fue en la década 2000-2009 la más alta desde la década de los años 60, pero fue igual a la registrada en la década de los años 50, teniendo también valores cercanos a los promedios el número de temporadas "cercanas a lo normal" y "por debajo de lo normal", presentando un aparente comportamiento cíclico, que solo podrá ser corroborado con certeza cuando se disponga de mayor cantidad de datos.

b) En referencia a la caracterización particular de las temporadas de huracanes, dependiendo de si se está en un evento "El Niño" o un evento "La Niña",

- Dadas las diferencias existentes entre las fuentes de datos al momento de clasificar los eventos "El Niño" o "La Niña" en un determinado año, se presentó una metodología basada en el análisis de los promedios anuales de los índices ONI y su correlación con las características propias de la correspondiente temporada de huracanes, tales como: Número total de eventos, duración total en días, e índice ECA, la cual no solamente permite disponer de herramientas matemáticas de predicción a corto plazo de los valores y tendencias del índice ONI, sino que también aporta una evaluación más expedita a la hora de clasificar un determinado año como más caliente, más frío, o normal de acuerdo a los valores del mencionado índice, y a su posterior relación con años donde, de acuerdo con la literatura, han ocurrido eventos "El Niño" o "La Niña".

- Existe una clara relación entre las características de las temporadas de huracanes en el Atlántico y la presencia de eventos "El Niño" o "La Niña", teniéndose que en la medida en que las temperaturas superficiales del agua del mar son más cálidas (asociado a eventos "El Niño"), se reduce drásticamente tanto el número total de eventos meteorológicos que ocurren en la temporada de huracanes, como la duración total de días y el índice ECA asociado, teniéndose en consecuencia temporadas de huracanes de muy baja actividad general, ocurriendo un fenómeno totalmente opuesto cuando las temperaturas superficiales del mar son más frías de lo normal (asociado a eventos "La Niña"), cuando se presentan las temporadas de huracanes de mayor actividad general.

c) En referencia a como ha sido la influencia histórica de los huracanes que transitan por el Océano Atlántico y por el Mar Caribe sobre el litoral costero de Venezuela, su relación con eventos "El Niño" o "La Niña" y su evolución temporal, se tiene que:

- Si bien el número y porcentaje de eventos meteorológicos que han pasado "cerca" o han "tocado" territorio venezolano entre los años 1851 y 2012 son históricamente bajos; 44 y 2,9% respectivamente, a partir de 1966 ha habido un incremento, pasando de un porcentaje menor a 2% antes de 1965, a casi 5% a partir de 1966.

- Si se hace un análisis por década de la ocurrencia de los eventos meteorológicos que han pasado "cerca" o han "tocado" territorio venezolano, tomándose en cuenta únicamente los ocurridos entre 1950 y 2009, se observa un incremento significativo en su número sobre todo a partir de 1980, teniéndose que en la década 1980-89 se presentaron dos (2) eventos, en la década 1990-99 se presentaron tres (3) eventos, mientras que en la década 2000-09 se presentaron diez (10) eventos, más del triple de la década precedente y el doble de los eventos ocurridos en las dos (2) décadas previas.

- No existe una condición preponderante que sirva como "catalizadora" para aumentar la frecuencia con la cual los huracanes pasan cerca de las costas venezolanas, ya que de un total de cuarenta y cuatro (44) eventos, diez y siete (17) ocurrieron bajo condiciones de "El Niño", trece (13) bajo condiciones de "La Niña" y catorce (14) en condiciones

"neutras", lo que indica que el 61,4% de los eventos ocurrieron en condiciones "neutras" o bajo condiciones de "La Niña" mientras que el restante 38,6% se presentó bajo condiciones de un evento "El Niño".

e) En cuanto a la evaluación de metodologías que en ausencia de modelos numéricos complejos, permitan pronosticar el régimen de oleaje producido por fenómenos naturales, específicamente la sugerida por el "*Shore Protection Manual del U.S Army Coastal Engineering Research Center*" se obtuvo que:

- La metodología reprodujo con un alto grado de precisión la altura de ola significativa del oleaje calculada en áreas alejadas del paso de un huracán, a partir de los datos de velocidad del viento, velocidad de avance y presión propios del huracán, con errores menores al 5%, hecho bien significativo ya que permite obtener información de alta valía sin necesidad de aplicar modelos matemáticos complejos, lo cual si bien aporta solamente una pequeña parte de toda la información necesaria para el diseño de estructuras costa afuera, sirve en ausencia de los modelos para analizar diferentes escenarios hipotéticos que se planteen.

11.2 RECOMENDACIONES

- Sería bien interesante que los expertos en el área, especialmente los meteorólogos, estuvieran ganados a la idea de uniformizar los criterios e índices con los cuales caracterizan actualmente a los fenómenos climatológicos y oceanográficos como "El Niño", ya que no existe en la actualidad un criterio único que sirva como referente para hacerlo, presentándose diagnósticos disímiles del mismo fenómeno según sean los criterios utilizados para describirlos y explicarlos. El autor de este trabajo, si bien utilizó el índice ONI utilizado por la NOAA como índice base para los análisis realizados debido a la facilidad de acceso y gran cantidad de datos disponibles, es de la opinión que el índice multivariado (MEI), es el que debería representar mejor el fenómeno de "El Niño-Oscilación del Sur", ENOS, ya que emplea variables tanto atmosféricas como oceánicas, acordes con la naturaleza dual del fenómeno, mientras que la gran mayoría de los índices utilizados se basan únicamente en variables como la temperatura superficial del mar y la estimación histórica de sus anomalías (entre ellos el índice ONI).

- Se deben tomar con cautela las clasificaciones de las temporadas de huracanes, que actualmente se hacen a partir de los valores del índice ECA de la NOAA, dada las carencias que presenta este índice y que fueron puestas en evidencia durante el desarrollo de este trabajo, recomendándose a su vez profundizar los análisis que permitan caracterizar de una manera más fidedigna a las temporadas de huracanes. El autor propone que se utilice un índice ECA promediado anualmente, en vez de utilizar el valor actual que es acumulativo, y que por ende está influenciado por el número total de eventos que ocurran en cada temporada.

- El rumbo que sigue la actual política energética venezolana, asociada en estos momentos en buena medida a la explotación gasífera costa afuera, conlleva a tener el mejor conocimiento posible de las condiciones oceanográficas y meteorológicas en las zonas de interés, por lo cual se propone la construcción de una gran y única base de datos, (que pudiera ser "manejada o gerenciada" por PDVSA) con la cual se pueda "alimentar" a poderosas herramientas de análisis tridimensional, tales como modelos globales, de mesoescala, o locales, que permitan la generación de valores predictivos de todas las variables de interés y con la mayor precisión posible, lo cual redundará en una menor incertidumbre, y por ende en menores costos al momento de diseñar y construir las obras de ingeniería proyectadas.

  Lo expuesto en el párrafo anterior va asociado directamente a la necesidad de hacer mediciones de los diferentes parámetros oceanográficos y meteorológicos en las áreas de interés, por espacios de tiempo lo suficientemente extensos (2 a 3 años como mínimo) como para generar valores estadísticos confiables, más aún cuando los resultados obtenidos en este trabajo indican que la probabilidad de que fenómenos meteorológicos extremos afecten a las costas venezolanas, ha venido incrementándose en los últimos años, con respecto a la tendencia que tenía a mediados del siglo XX.

12. ANEXOS

12.1 ÍNDICES UTILIZADOS PARA IDENTIFICAR Y DEFINIR CUANTITATIVAMENTE AL FENÓMENO DE EL NIÑO-OSCILACIÓN DEL SUR (ENOS) Y ESCALA DE SAFFIR-SIMPSON

A los fines de poder conceptualizar e identificar la existencia o no del ENOS, así como su intensidad, existen una variedad de índices y criterios que permiten la identificación cuantitativa de las fases caliente y fría del ENOS.

El objetivo de este Anexo es presentar toda la información necesaria para maximizar la comprensión del tema por parte de los lectores "no expertos", la cual no siempre está explicada en detalle y en forma explícita, entendiéndose que si el lector está familiarizado lo suficiente con el tema tratado, puede hacer caso omiso de la información mostrada en este Anexo.

12.1.1 Regiones "Niño"

Frecuentemente en las estimaciones de los índices descriptivos del ENOS se habla de las "Regiones Niño" en el océano Pacífico ecuatorial, las cuales están directamente conectadas con los índices térmicos oceánicos.

Comprenden cuatro (4) zonas en el océano Pacífico oriental y central a lo largo de la línea ecuatorial, situadas entre la costa oeste de Sur América y el meridiano de 180° o línea de cambio del tiempo de la fecha.

En dichas regiones se han instalado instrumentos para medir parámetros meteorológicos y boyas marinas, siendo igualmente objeto de una permanente observación satelital.

En la Tabla 12.1 se presentan las coordenadas que delimitan a cada una de las Regiones o Zonas Niño, mientras que en la Figura 12.1 se presenta su ubicación relativa dentro del océano Pacífico ecuatorial.

Tabla 12.1 Regiones o zonas Niño y sus dimensiones e índices asociados

Región	Latitud (°)	Longitud (°)	Índices ENOS
Región Niño 1+2 (N1+2)	0° a 10° S	80° W a 90° W	N1+2
Región Niño 3 (N3)	5° N a 5° S	90° W a 150° W	N3
Región Niño 4 (N4)	5° N a 5° S	150° W a 160° E	N4
Región Niño 3.4 (N3.4)	5° N a 5° S	120° W a 170° W	N3.4 o N3+4

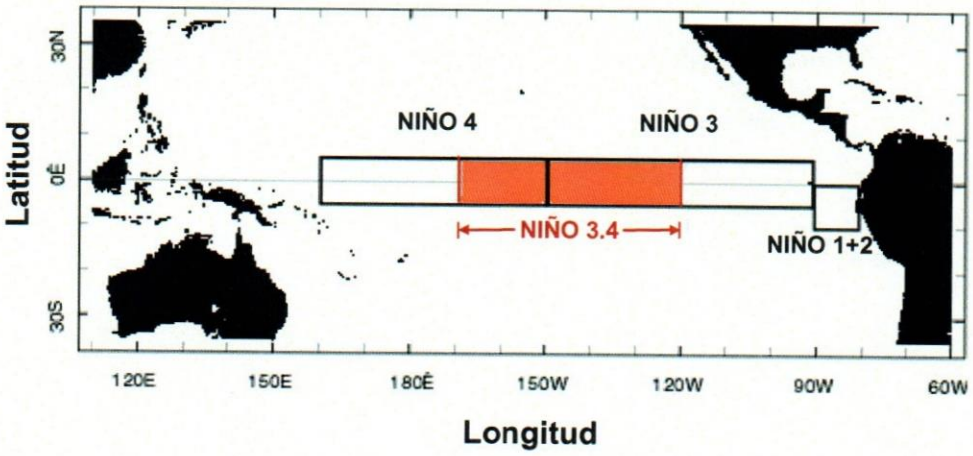


Figura 12.1 Regiones Niño en el Océano Pacífico ecuatorial. Fuente: IRI (2007)

12.1.2 *Identificación cuantitativa de El Niño y La Niña basándose en la temperatura del Océano Pacífico*

Parte de la problemática involucrada en el estudio del ENOS es que para su identificación no hay una "receta" única. Por el contrario, existen numerosos índices para caracterizarlo e identificarlo, con estructuras similares pero no iguales, calculados todos como medias móviles que toman en cuenta períodos de referencia distintos. Guevara, J.M. (2008) hace una recopilación de los diferentes índices utilizados para caracterizar al ENOS así como las ecuaciones que sirven para calcular dichos índices, los cuales se presentan y describen a continuación.

Criterio del Servicio Meteorológico del Japón (*JMA, Japan Meteorological Agency*): Emplea el llamado índice Niño 3, aplicable sobre dicha región.

Se dice que se está en presencia de un evento Niño o Niña cuando se produce una secuencia de al menos seis (6) índices mensuales consecutivos Niño 3, cada uno con un valor de ± 0,5° C (Niño si es +0,5° C y Niña en caso contrario) en la región Niño 3 del Pacífico ecuatorial (5° N a 5° S y 90° W a 150° W).

Se tiene entonces que el índice Niño 3 en un mes i (ecuación 12.1), se calcula en base a una media móvil de cinco (5) meses que está conformada por la anomalía del mes i, la de los dos (2) meses anteriores, y las anomalías de los dos (2) siguientes meses al que se quiere calcular, estando constituidas dichas anomalías por la diferencia de temperatura de cada mes que se quiera calcular con respecto a la media de referencia del período 1971-2000.

$$Indice\ Niño\ 3\ del\ mes_i = \frac{(A_{i-2} + A_{i-1} + A_i + A_{i+1} + A_{i+2})}{5} \qquad (12.1)$$

Donde:

A_i es la anomalía de la temperatura superficial del mar (ASTM) del mes de cálculo.

A_{i-2} y A_{i-1}, Son las anomalías de la temperatura superficial del mar (ATSM) de los dos (2) meses anteriores al mes donde se quiere calcular el índice.

A_{i+1} y A_{i+2}, Son las anomalías de la temperatura superficial del mar (ATSM) de los dos (2) meses posteriores al mes donde se quiere calcular el índice.

Las anomalías, ASTM, son calculadas con respecto a la media de referencia del período 1971/2000.

Criterio de Trenberth (1997): Trenberth emplea el índice Niño 3.4, referido a la región Niño 3.4 (5° N a 5° S y 120° W a 170° W), y lo calcula como la media móvil de cinco (5) meses de las anomalías de la temperatura superficial del mar (ATSM) en relación a la media de referencia del período 1950-1979, de acuerdo con la ecuación 12.2.

$$Indice\ Niño\ 3.4\ del\ mes_i = \frac{(A_{i-2} + A_{i-1} + A_i + A_{i+1} + A_{i+2})}{5} \qquad (12.2)$$

Donde:

A_i es la anomalía de la temperatura superficial del mar (ASTM) del mes de cálculo.

A_{i-2} y A_{i-1}, Son las anomalías de la temperatura superficial del mar (ATSM) de los dos (2) meses anteriores al mes donde se quiere calcular el índice.

A_{i+1} y A_{i+2}, Son las anomalías de la temperatura superficial del mar (ATSM) de los dos (2) meses posteriores al mes donde se quiere calcular el índice.

Trenberth considera que este índice representa la anomalía promedio de la temperatura de la superficie del mar, desde el meridiano 180° hasta la costa de América del Sur, y considera que un evento Niño ocurre cuando se presenta una secuencia de al menos seis (6) meses cuyos índices sea mayores o iguales que 0,4° C, y consecuentemente una Niña se presenta con una secuencia de al menos seis (6) meses cuyos índices sean menores o iguales que -0,4° C

Trenberth (1997) también utiliza el índice Niño 3, calculado con una media móvil de cinco (5) meses, pero con un umbral de ± 0,4° C, como criterio para definir si hay o no un evento Niño o Niña.

El índice Oceánico El Niño (ONI): El ONI (*Oceanic Niño Index*) representa el criterio del Centro de Predicción Climática (NCEP) de NOAA, conocido corrientemente como El Niño Oceánico. Según NOAA, (2012) se calcula a partir del promedio móvil de la anomalía de la temperatura superficial del mar con respecto al período de referencia 1971-2000, de tres (3) meses consecutivos: la anomalía del mes, la anomalía del mes precedente y la anomalía del siguiente mes, en la región Niño 3.4 (5° N a 5° S y 120° W a 170° W), de acuerdo con la ecuación 12.3.

$$Indice\ \ ONI\ del\ mes\ _i = \frac{(A_{i-1} + A_i + A_{i+1})}{3} \qquad (12.3)$$

Donde:

A_i es la anomalía de la temperatura superficial del mar (ASTM) del mes de cálculo.

A_{i-1} y A_{i+1}, Son las anomalías de la temperatura superficial del mar (ATSM) del mes anterior y del mes posterior, respectivamente, al mes donde se quiere calcular el índice.

En el año 2003 este índice fue adoptado como concepto operacional de El Niño y La Niña por la NOAA conjuntamente con las siguientes instituciones: *Scripps Institute of Oceanography, The Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies, The Center for Ocean-Atmospheric Prediction Studies, The Internacional Research Institute for Climate Prediction, The Nacional Center for Atmospheric Research*, y la Universidad de Washington, siendo el índice ONI en el año 2005, adoptado por acuerdo oficial entre Canadá, México y USA, con lo que pasó a convertirse en el criterio estándar más utilizado para el monitoreo, evolución y predicción del ENOS en el océano Pacífico.

Criterio del SCOR WG 55 (*Scientific Comité for Oceanic Research Working Group*): Este concepto de El Niño fue establecido por el comité de Investigaciones Oceanográficas (SCOR por sus siglas en inglés) en 1983 y enunciado por Lagos et al (2007) en el foro científico conmemorativo de los 50 años del Servicio Hidrometeorológico del Perú, no menciona ninguna de las regiones Niño y establece que: El Niño es la aparición de agua anormalmente cálida a lo largo de las costas de Ecuador y Perú, hasta un área muy cercana a Lima en los 12° S de latitud, cuya anomalía promedio de la temperatura superficial del mar, esté por encima de una o más desviaciones estándar, durante al menos cuatro (4) meses consecutivos, a las observadas en al menos tres (3) de cinco (5) estaciones costeras peruanas (Talara, Puerto Chicama, Chimbote, Isla Don Martín y El Callao).

Aunque este concepto no fue aceptado por la comunidad científica internacional, quedando por tanto restringida su utilización a la zona mencionada, Caviedes y Waylen (1998), investigadores del departamento de Geografía de la Universidad de Florida, USA,

consideran que las estaciones de Puerto Chicama y Callao en Perú, son representativas para las regiones El Niño 1 y El Niño 2, (N1+2).

Índice Trans-Niño (TNI): Este índice fue propuesto por Trenberth y Stepaniak (2001), es la diferencia entre los índices mensuales normalizados Niño 1+2 y Niño 4, siendo esta diferencia suavizada (s) con una media móvil de cinco (5) meses, y luego normalizada (n) con la desviación estándar anual de la serie de esas diferencias (ecuación 12.4), teniendo como período de referencia el lapso 1950-1979, período que también es utilizado para calcular las medias y desviaciones estándar de los índices: N1+2, N4, N3.4 y TNI.

$$TNI = \left[Niño(1+2)_N - Niño4_N\right]_{S,N} \tag{12.4}$$

Por otra parte, el índice TNI sin suavización ni normalización se expresa según:

$$TNI = \left[Niño(1+2)_N - Niño4_N\right] \tag{12.5}$$

teniéndose que en las ecuaciones (12.4) y (12.5) el subíndice n, indica que los índices N1+2 y N4, están normalizados con la desviación estándar del período 1950-1979, mientras que los subíndices S, N después del corchete, indican que el índice TNI está suavizado con la media móvil de cinco (5) meses y luego, estandarizado con la desviación estándar del período 1950-1979.

Si se desarrolla la ecuación (12.4) se obtiene la siguiente expresión:

$$TNI = \frac{\left[\left(\frac{TSM_{(1+2)} - TSM_{(1+2)ref}}{S_{(1+2)ref}}\right) - \left(\frac{TSM_4 - TSM_{4ref}}{S_{4ref}}\right)\right] suavizada}{S_{anual}\left[\left(\frac{TSM_{(1+2)} - TSM_{(1+2)ref}}{S_{(1+2)ref}}\right) - \left(\frac{TSM_4 - TSM_{4ref}}{S_{4ref}}\right)\right] suavizada} \tag{12.6}$$

Donde:

TSM(1+2) y TSM4 son las temperaturas medias mensuales de la superficie del mar en un año dado, en las regiones Niño (1+2) y Niño 4 respectivamente.

$TSM(1+2)_{ref}$ y $TSM4_{ref}$ son las medias de la temperatura media mensual de la superficie del mar en el período de referencia considerado, en las regiones Niño (1+2) y Niño 4 respectivamente.

$S(1+2)_{ref}$ y $S4_{ref}$, son la desviación estándar mensual de la TSM en el período de referencia considerado (1950-1979) en este caso, en las regiones Niño (1+2) y Niño 4 respectivamente. El término suavizado significa en el numerador, significa que se le aplica la media móvil de cinco (5) meses a todo el numerador.

En cuanto a la expresión del denominador:

$$S_{anual} = \left[\left(TSM_{(1+2)} - TSM_{(1+2)ref}\right)/S_{(1+2)ref} - \left(TSM_4 - TSM_{4ref}\right)/S_{4ref}\right] suavizada$$

Representa la desviación estándar anual de la diferencia estandariza y suavizada, pero de todos los meses, y no de un mes particular, para el período de referencia (1950-1979), en otras palabras, es la desviación estándar del numerador, pero anual, no la desviación estándar del mes. Además es importante acotar que esta desviación estándar es poblacional, en su cálculo se divide por el número de datos y no por (n-1).

A continuación se enumeran los pasos para calcular el TNI disponiendo de las series mensuales de temperatura de la superficie del mar (TSM) en las regiones Niño 1+2 y Niño 4:

a) Para cada mes del año, en las regiones Niño 1+2 y Niño 4, se calcula la anomalía mensual de temperatura de la superficie del mar (ATSM) en cada región según: $ATSM=(TSM-TSM_{ref})$, donde TSM_{ref} es la media mensual de referencia para el período considerado como tal, que en este caso es 1950-1979. Luego, estas series de anomalías son suavizadas con el promedio móvil de cinco (5) meses, obteniéndose entonces las series de anomalías suavizadas de cinco (5) meses, centradas en el mes intermedio, para las regiones Niño 1+2 y Niño 4.

b) Los índices Niño 1+2 y Niño 4 se normalizan al dividirlos por sus respectivas desviaciones estándar en el período de referencia 1950-1979, de forma tal que se tienen las series de índices normalizados (Niño 1+2)n y (Niño 4)n.

c) Se calcula entonces la diferencia entre ambos índices [(Niño 1+2)n-(Niño 4)n] que representa la serie de diferencias de anomalías estandarizadas o serie de índice TNI presentado inicialmente por Trenberth y Stepaniak (2001).

d) Este índice TNI inicial se suaviza mediante el promedio móvil de cinco (5) meses, teniéndose entonces que el índice TNI que será asignado para el mes *i*, será el promedio de cinco (5) índices iniciales TNI: el del mes *i*-2, el del mes *i*-1, el del mes *i*, el del mes *i*+1 y el del mes *i*+2.

e) Finalmente cada índice TNI suavizado con la media móvil de cinco (5) meses, se normaliza al dividirlo entre la desviación estándar de la misma serie de TNI suavizados del período de referencia 1950-1979, pero con la desviación estándar anual, obtenida con las series de TNI de todos los meses, y no con la serie de TNI de un mes en particular, obteniéndose así la serie de TNI suavizada y normalizada para cada mes.

Lo que motivó a Trenberth y Stepaniak (2001) a desarrollar el TNI, era combinarlo con otro de los índices El Niño, específicamente el índice 3.4 normalizado, para así tratar de expresar el carácter diferencial que tiene la naturaleza y evolución del ENOS.

Estos autores consideraban que el índice Niño 3.4 normalizado, representa la TSM media a lo largo del Pacífico ecuatorial, mientras que el índice Trans-Niño (TNI) representa el gradiente de la temperatura de la superficie del mar en la misma área.

Trenberth y Stepaniak (2001) demostraron que El Niño entre 1950 y 1979 tendía a desarrollarse en principio en la costa occidental de Sur América para luego extenderse hacia el Oeste, pero investigaciones más recientes como las de Hanley et al (2003), expresan que "la suma del TNI con el 3.4 es insuficiente para un índice mejorado", razón por la que recomiendan la combinación del índice N3.4, N4 o unos de los IOS con el JMA.

Índice de Oscilación Peruano: Con el fin de contar con un índice representativo del efecto del ENOS sobre los cambios de la temperatura superficial del mar, específicamente frente a las costas peruanas, Purca (2005) conformó el llamado Índice de Oscilación Peruano (IOP), el cual integra la variabilidad espacial conjunta de las anomalías de

temperatura superficial del mar (ATSM) de las estaciones costeras peruanas, muy diferentes a las que se presentan en las regiones Niño 3 y 3.4.

Se calculó mediante análisis ortogonal empírico, y se representó por la Primera Componente Principal (PC1) habiéndose empleado para su determinación la información de cinco (5) estaciones del litoral peruano: Chicama, Chimbote, Huacho, Callao e Ilo.

Índice de la Oscilación del Sur (IOS, SOI por sus siglas en inglés): El índice de la Oscilación del Sur (IOS) es el más conocido y empleado en la identificación de El Niño y La Niña, y viene definido como la diferencia de presión atmosférica (a nivel del mar) estandarizada, entre la estación Papeete (Taití), en la Polinesia Francesa, y la estación de Darwin, en Australia, describiendo a su vez la intensidad de los Vientos Alisios del Este que fluyen en el océano Pacífico: IOS alto y positivo es sinónimo de Alisios fuertes, mientras que IOS alto y negativo, significa Alisios con dirección opuesta.

La oscilación del Sur consiste en una fluctuación interanual de gran escala, indicativa del intercambio de masa atmosférica entre las zonas de baja presión atmosférica ecuatorial de Indonesia y el anticiclón subtropical del Pacífico del Sur-este (Trenberth, 1997)

A continuación se presentarán tres (3) expresiones diferentes para caracterizar a la Oscilación del Sur, utilizando en todos los casos la diferencia de presiones estandarizada de los mismos lugares: Taití y Darwin. Dichas expresiones son:

1) IOS NOAA: Que es la formulación utilizada por *The Climate Prediction Center* y el Servicio Meteorológico de los Estados Unidos de América (*The Weather Meteorological Service, WMS*), ambos entes dependientes de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). De igual forma es empleada también por el *Climate Research Unit (CRU)*, la Universidad de East Anglia y el Servicio Meteorológico de Japón, (JMA), pero con diferente período de referencia.

2) IOS Troup: Calculado en base a la formulación desarrollada por Troup (1965), y que es en la actualidad utilizada por el Servicio Meteorológico de Australia, (*BOM, Bureau of Meteorology)*.

3) IOS Trenberth: Calculado tomando como base la formulación desarrollada por Kevin Trenberth (1984,1997), y utilizada hoy en día en el CAS, UCAR (*Climate Analysis Section, University Corporation for Atmospheric Research)* ubicado en Boulder, Colorado, USA.

Las tres (3) formulaciones mencionadas previamente, tienen las siguientes características en común:

a) Están fundamentadas en la diferencia de presión atmosférica reducida al nivel medio del mar de las estaciones de Papeete, Taití (Lat. 17,5° S y Long. 149,6° W) en la Polinesia Francesa, y Darwin (Lat. 12,4° S y Long. 130,9° E) en Australia.

b) Son índices mensuales normalizados (estandarizados) con medias y desviación estándar calculados con series de períodos de referencia (período base de normalización y estandarización) pre-establecidos, lo cual permite que los índices se mantengan constantes aún cuando la serie se incremente con el tiempo, ya que la media y la desviación estándar de referencia (la del período de referencia) se mantiene constante e independiente del número de datos de las series.

Lo que diferencia y distingue a las tres (3) formulaciones del IOS es la forma en que se estandarizan los datos, las cuales son explicadas en forma resumida a continuación:

Índice IOS NOAA: Para su cálculo se aplica una doble estandarización, por lo que el índice es en sí, la estandarización de la diferencia de las anomalías mensuales estandarizadas, de la presión atmosférica reducida al nivel del mar, en las estaciones ubicadas en Taití y Darwin.

La fórmula del IOS NOAA se calcula entonces a través de la siguiente expresión:

$$IOS = \frac{\left(\frac{PT_{mes}PT_{ref}}{ST_{ref}}\right) - \left(\frac{PD_{mes}PD_{ref}}{SD_{ref}}\right)}{S\left[\left(\frac{PR_{mes}PT_{ref}}{ST_{ref}}\right) - \left(\frac{PD_{mes}PD_{ref}}{SD_{ref}}\right)\right]} \tag{12.7}$$

expresión que puede ser simplificada para obtener:

$$IOS = \frac{(P_sT_{mes} - P_sD_{mes})}{S(P_sT_{mes} - P_sD_{mes})_s} \tag{12.8}$$

si se considera que la presión atmosférica estandarizada de un mes en Taití y Darwin, vienen dadas por:

$$Ps = \frac{(Pmes - \overline{P}_{ref})}{S_{ref}} \tag{12.9}$$

Donde:

PT_{MES} y PD_{MES} son la presión atmosférica mensual en un año dado, en Taití y Darwin respectivamente.

PT_{ref} y PD_{ref} representan la presión atmosférica media mensual en el período de referencia 1951-1980 en Taití y Darwin respectivamente.

S_{Tref} y S_{Dref} son las desviaciones estándar mensual de la serie de presión atmosférica para el período de referencia 1951-1980 en Taití y Darwin respectivamente, debiendo destacarse el hecho de que son desviaciones "poblacionales", es decir, para su obtención se divide entre el número de datos y no entre (n-1).

El Servicio Meteorológico de Japón emplea este índice pero utilizando un período de referencia diferente (1971-2000).

Índice IOS de Troup:

Su numerador es la diferencia de las anomalías de las presiones atmosféricas reducidas al nivel medio del mar entre las estaciones de Taití y Darwin, mientras que el denominador está conformado por la desviación estándar de la serie de esa misma diferencia.

Tanto la media como la desviación estándar se calculan a partir de los datos mensuales del período de referencia 1933-1992, por lo que en consecuencia, el índice IOS Troup refleja la diferencia de anomalía mensual de la presión atmosférica reducida al nivel del mar en las estaciones ubicadas en Taití y Darwin, estandarizada con la desviación estándar de esa diferencia.

$$IOS = \frac{\left(PT_{mes} - PT_{medrefmes}\right) - \left(PD_{mes} - PD_{medrefmes}\right)}{S\left[\left(PTmes - PTmedrefmes\right) - \left(PD_{mes} - PD_{medrefmes}\right)\right]_{ref}} \qquad (12.10)$$

y simplificando (12.10) se obtiene:

$$IOS = \frac{\left(AT - AD\right)}{S\left(AT - AD\right)} \qquad (12.11)$$

donde:

PT_{mes} es la presión atmosférica del mes, al nivel medio del mar en un año dado en Taití.

PD_{mes} es la presión atmosférica del mes, al nivel medio del mar en un año dado en Darwin.

$PT_{med\ ref\ mes}$ y $PD_{med\ ref\ mes}$ son las presiones atmosféricas del mes, al nivel medio del mar en el período de referencia, en Taití y Darwin respectivamente.

$S[(PT_{mes} - PT_{med\ ref\ mes}) - (PD_{mes} - PD_{med\ ref\ mes})]$ (Desviación estándar poblacional).

$(PT_{mes} - PT_{med\ ref\ mes}) - (PD_{mes} - PD_{med\ ref\ mes})$ es la anomalía en hPa de la presión atmosférica en las estaciones de Taití y Darwin respectivamente, para el período de referencia que en este caso es 1933-1992.

AT y AD, son las anomalías de la presión atmosférica en las estaciones de Taití y Darwin en hPa.

S(AT-AD) es la desviación estándar de la diferencia entre las anomalías de presiones reducidas al nivel medio del mar

Aquí hay que hacer la acotación de que los datos reportados por el BOM, son por convención multiplicados por 10, lo cual en realidad no es necesario hacer.

Índice IOS de Trenberth: Refleja la diferencia de la anomalía mensual normalizada de la presión atmosférica reducida al nivel de mar en las estaciones de Taití y Darwin, pero empleando las desviaciones estándar de las series anuales de presión atmosférica tanto de Taití como de Darwin, en lugar de las desviaciones estándar de las series mensuales de esas dos (2) estaciones.

Por tanto el índice IOS de Trenberth se puede expresar de acuerdo con la siguiente expresión:

$$IOS = \left[T_n - D_n\right] \qquad (12.12)$$

Donde:

$T_n = (PT_{mes} - PT_{med\ mes\ ref}) / ST_{anual\ ref}$

$D_n = (PD_{mes} - PD_{med\ mes\ ref}) / SD_{anual\ ref}$

PT_{mes} y PD_{mes}, son las presiones atmosféricas del mes a nivel del mar en un año dado en Taití y Darwin respectivamente.

$PT_{med\ mes\ ref}$ y $PD_{med\ mes\ ref}$ son las presiones atmosféricas medias del mes para el período de referencia, en Taití y Darwin respectivamente.

$ST_{anual\ ref}$ y $SD_{anual\ ref}$ son las desviaciones estándar media anual de la presión de Taití y Darwin respectivamente, en el período de referencia (no la mensual).

Si este índice utilizara las desviaciones estándar de las series mensuales de Taitií y Darwin, coincidiría exactamente con la diferencia de presiones normalizadas entre Taití y Darwin, es decir, sería igual a:

$(Z_T - Z_D)$, donde $Z = (P - P_{mes})/S_{mes}$

Suavización de los índices de la Oscilación Sur

Son varios los autores que han propuesto la suavización del IOS.

Trenberth (1984) propuso la suavización del IOS en la correlación que hizo entre las series de Taití y Darwin normalizadas, y la correlación entre la temperatura superficial del mar y el índice IOS, con la finalidad de eliminar la variación no asociada al ENOS.

Por otra parte, Ropelewski y Jones (1987) sugirieron la suavización alegando la alta variabilidad del índice en varios de sus meses.

MacPhaden (2004) afirma que los índices IOS que utilizan los datos de las estaciones de Taití y Darwin, presentan el inconveniente de que por provenir los datos de únicamente dos (2) estaciones, están sujetos a la influencia que pudieran tener sobre ellos cualquier fenómeno local.

Índice multivariado del ENOS (MEI): Es un complejo índice desarrollado por Wolter (1987) que busca caracterizar el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur, ENOS, empleando componentes principales con seis (6) variables: temperatura de la superficie del mar, temperatura del aire, presión atmosférica al nivel del mar, nubosidad, componente zonal del viento y componente meridional del viento.

La idea central del Análisis de Componentes Principales (ACP) es conseguir la simplificación de un conjunto de datos, generalmente cuantitativos que proceden de un conjunto de variables interrelacionadas (Sachs, 1978). Este objetivo se alcanza, obteniendo a partir de combinaciones lineales de las variables originales, un nuevo conjunto de igual número de variables, no correlacionadas, llamadas componentes principales (CP).

Estos CP conservan la variabilidad presente en los datos originales y, al ordenarlas en forma decreciente por su varianza, permiten explicar el fenómeno de estudio con las primeras CP.

Según Wolter (1987) y Wolter y Timlin (1998), el índice MEI sería un promedio ponderado de los rasgos del ENOS de las variables empleadas en su cálculo cuya ubicación de precedencia se muestran en la Figura 6.2, obteniéndose mensualmente para los dos (2) meses precedentes.

Por la metodología empleada, el MEI es el primer componente principal no rotado, de las seis (6) variables utilizadas, luego de lo cual, y mediante normalización con el período de referencia 1950-93, el índice MEI se hace comparable con otros índices ENOS.

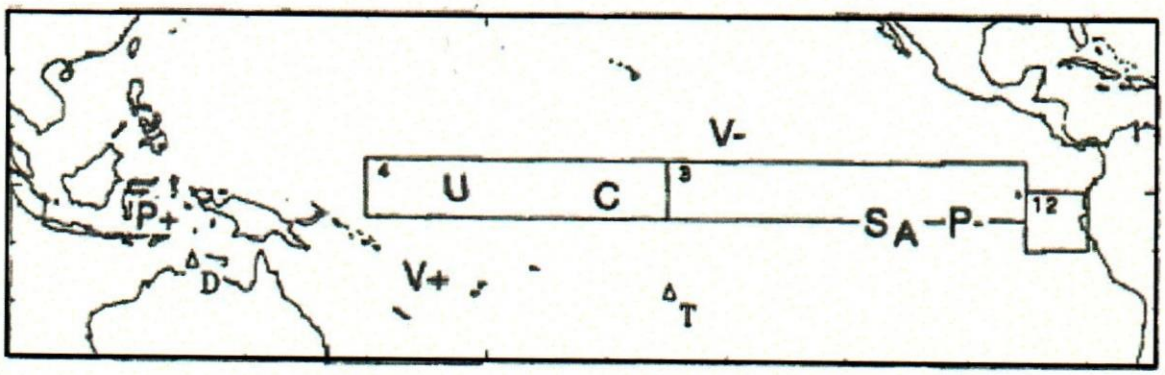


Figura 12.2 Ubicación relativa de las variables empleadas en el cálculo del índice multivariado ENOS, MEI. Fuente: Wolter y Timlin (1998)

P+ y P- : (Presiones). Diferencia de presión al nivel del mar, en el sitio más occidental y más oriental del Pacífico ecuatorial, respectivamente.

U (Anomalía de la componente zonal del viento). V+ y V-, Anomalía de la componente meridional del viento (viento del sur, positivo, y viento del norte, negativo).

S_A: Ubicación media de la temperatura de la superficie del mar y de la anomalía de la temperatura del aire.

C: Anomalía de la nubosidad en la región Niño 4.

T: Taití; D: Darwin. 1,2,3,4: Regiones Niño 1+2, 3, y 4 respectivamente.

12.1.3 Identificación cuantitativa de El Niño y La Niña basado en el nivel del mar e el Pacífico

En un principio la anomalía del nivel del mar era considerado como un dato complementario en la identificación del ENOS, siendo incorporado a la misma categoría que los índices basados en la anomalía de la temperatura, a partir del momento en que se comienzan a obtener datos de origen satelital.

Índice del nivel del mar, SSHA ó Niño A:

Este índice, conocido como Niño-SSHA o simplemente Niño A, al igual que los índices basados en la temperatura, mantiene cuatro (4) índices Niño, agregándole la letra mayúscula A (de altimetría); siendo normalizados con un valor fijo de 7 cm, por lo que se tienen entonces los índices Niño 1+2A, índice Niño 3A, índice Niño 3.4A e índice Niño 4A.

12.1.4 Clasificación de los eventos ENOS según su intensidad

Quinn, Short, Yang y Zopf, citados por Rasmusson y Carpenter (1982), clasificaron a los eventos del ENOS en su fase caliente, de acuerdo con su intensidad, clasificando los eventos Niño en tres (3) categorías: débil, moderado y fuerte, aplicando los mismos criterios de clasificación para la fase fría (La Niña), pero con valores negativos.

En la Tabla 12.2 tomada de Guevara (2008) se muestran los valores que delimitan cada rango de intensidad, así como ejemplos de cada categoría tanto para eventos Niño como Niña.

Tabla 12.2 Clasificación de eventos del ENOS según su intensidad

Categoria	Evento Niño y año de ocurrencia	Categoria	Evento Niño y año de ocurrencia
Débil: entre 0,5 y 0,9 Moderado: entre 1,0 a 1,4 Fuerte > 1,4	1963 1986-87 1997-98	Débil: entre -0,5 y -0,9 Moderado: entre -1,0 a -1,4 Fuerte < -1,4	1995-96 1988-89

Fuente: Tomado y Modificado de Guevara (2008)

12.1.5 Índices complementarios de variables del sistema climático relacionados con el ENOS

Aunque los llamados índices complementarios no se emplean directamente en la identificación de un evento ENOS, su conocimiento y comprensión complementan en forma significativa el entendimiento del ENOS.

Aquí solamente serán nombrados, pero si el lector quisiera ahondar en el estudio de los mismos, puede hacerlo a través de la amplia literatura disponible al respecto.

- Índice de radiación de longitud de ondas largas tropical (OLR tropical).
- Índice de la anomalía del viento del Este a 850 hPa.
- Índice de la anomalía del viento a 200 hPa.
- Índice del volumen de agua caliente tropical (WWV).
- Índice de la lengua fría (CTI, Cold Tongue Index.)
- Índice de la pendiente mensual de la termoclina.

El índice más recientemente utilizado es el conocido como Niño A, el cual está basado en la altura del nivel del mar, normalizado no por un período de referencia específico, sino con un valor fijo de 7 cm.

En la Tabla 12.3 (tomada de Guevara, 2008 y modificada por el autor), se presenta un excelente resumen de los diferentes índices utilizados para caracterizar a los eventos ENOS ("El Niño" y "La Niña" mientras que en la Figura 12.3 se presentan en forma conjunta diferentes índices utilizados para caracterizar a eventos "El Niño"

Tabla 12.3 Cuadro resumen de los diferentes Índices utilizados para caracterizar y cuantificar los eventos ENOS ("El Niño" o "La Niña"

Institución o Investigador	Índice	Variable de análisis	Período de referencia	Método de suavización ó normalización	Criterio (secuencia) para que ocurra un evento "El Niño"	Criterio (secuencia) para que ocurra un evento "La Niña"
JMA	JMA	ASTM	1971 / 2000	Media móvil de 5 meses	6 índices ≥ +0,5º C	6 índices ≤ -0,5º C
Trenberth	Niño 3 Niño 3.4	ASTM ASTM	1950 / 1979 1950 / 1979	Media móvil de 5 meses Media móvil de 5 meses	6 índices ≥ +0,4º C 6 índices ≥ +0,4º C	6 índices ≤ -0,4º C 6 índices ≤ -0,4º C
NOAA	ONI 1+2; 3, 3.4 y 4	ASTM ASTM	1971 / 2000 1950 / 1980	Media móvil de 3 meses Media móvil de 3 meses	5 índices ≥ +0,5º C 5 índices ≥ +0,5º C	5 índices ≤ -0,5º C 5 índices ≤ -0,5º C
SCOR WG 55	SCOR	ASTM	¿ ?	S (Desviación estándar)	4 índices = +1S en 4 estaciones peruanas	4 índices = -1S en 4 estaciones peruanas
Purca	IOP	ASTM	¿ ?	Normalización	¿ ?	¿ ?
Trenberth y Stepaniak	TNI	ASTM	1950 / 1979	Media móvil de 5 meses Normalización	Expresa evolución de "El Niño"	Expresa evolución de "El Niño"
	Ind. 3.4	ASTM	1950 / 1979	Media móvil de 5 meses Normalización	6 índices ≥ +0,4º C	6 índices ≤ -0,4º C
NOAA BOM Trenberth JMA	IOS IOS IOS IOS	P P P P	1951 / 1980 1933 / 1992 1951 / 1980 1971 / 2000	Normalización Normalización Normalización Normalización	Varía según el autor Tendencia a emplear clases de índices térmicos.	Varía según el autor Tendencia a emplear clases de índices térmicos.
Wolter	MEI	P, Tm, Ta, V, N	1950 / 1993	Normalización	Sucesión = +0,5º C	Sucesión = -0,5º C
Kiladis y Von Loon	ASTM IOS	ASTM [T-D]	1951 / 1979 1951 / 1979	Normalización Media móvil de 5 meses Normalización Media móvil de 5 meses	3 trimestres + y 1 trimestre= +0,5º C IOS - y un trimestre < -1	3 trimestres - y 1 trimestre= -0,5º C IOS + y un trimestre > 1
Ropelewski y Halpert	IOS	[T-D]	1951 /1980	Normalización Media móvil de 5 meses	5S= -0,5	5S= +0,5
Deos	Niños A, 1+2A, 3A, 3.4A, 4A	Nivel del mar	7 cm.	Normalización	¿ ?	¿ ?

Ejemplo de interpretación: Primera fila: El índice es JMA del Servicio Meteorológico del Japón. Emplea la anomalía de la temperatura superficial del mar en relación con la media del período 1971-2000. Es una anomalía móvil de 5 meses. Un evento ENOS ocurre cuando hay una secuencia de por lo menos 6 índices consecutivos, cada uno igual o mayor que +0,5º C (un evento "El Niño") o menor que -0,5ºC (un evento "La Niña").
Abreviaturas: ASTM (Anomalía de la temperatura superficial del mar), P (Presión atmosférica), Tm (Temperatura del mar), Ta (Temperatura del aire), V (Velocidad del Viento), N (Nubosidad) y S (Desviación estándar del índice IOS suavizado 5 meses)
Deos (Department of Earth Observation and Space Systems of the Faculty of Aerospace Engineering Delf, Nederlands.

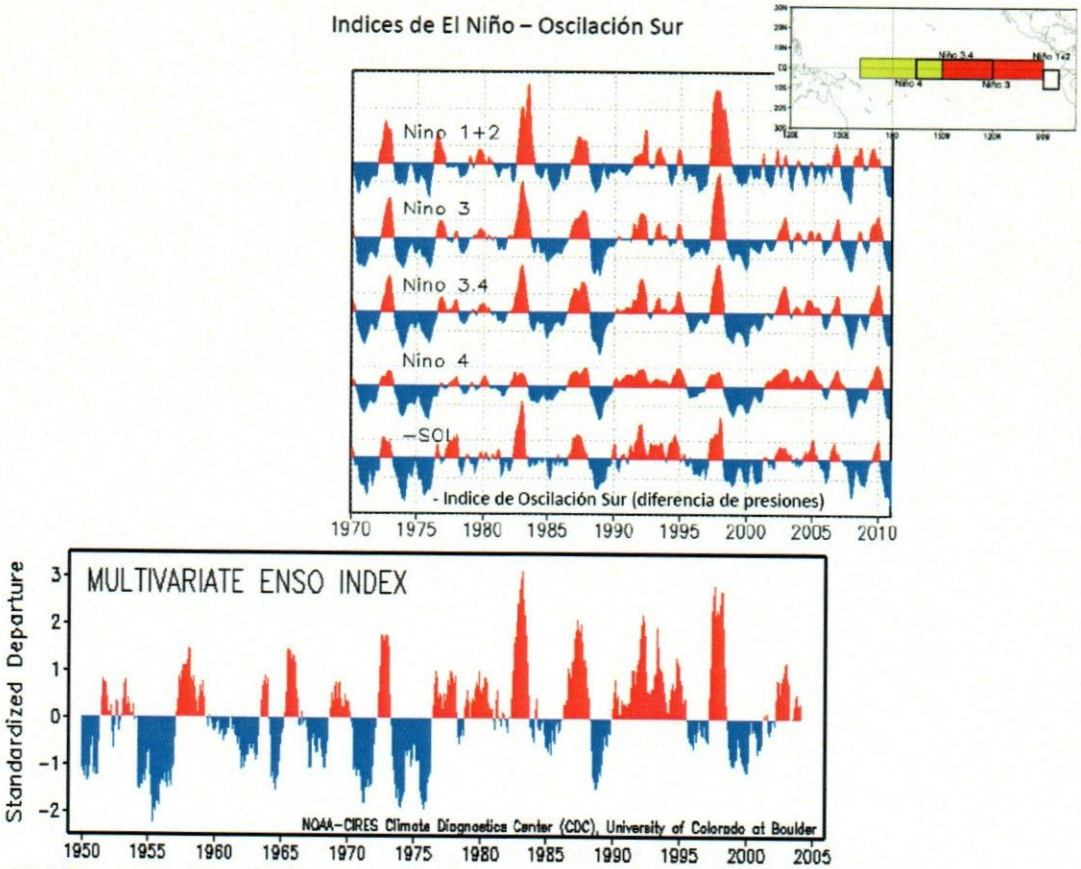


Figura 12.3 Recopilación de diferentes índices utilizados para caracterizar eventos "El Niño". Fuente: http://www.research.noaa.gov/climate/t_elnino.html y modificada por el autor

12.1.6 *Escala de Saffir-Simpson*

La escala de Saffir-Simpson clasifica los ciclones tropicales según la intensidad del viento, y fue desarrollada en 1969 por el ingeniero Herbert Saffir y el director del Centro de Huracanes de los Estados Unidos, Bob Simpson.

La escala caracteriza a los fenómenos meteorológicos en Depresiones Tropicales, Tormentas Tropicales, y Huracanes Grado 1, Grado 2, Grado 3, Grado 4 y Grado 5 en función de la velocidad de los vientos y de la presión atmosférica.

Se acostumbra a denominar a los huracanes grado 1 y grado 2 como "Huracanes Menores", mientras que a los huracanes grado 3, grado 4 y grado 5 se les denomina "Huracanes Mayores".

En la Tabla 12.4 se presenta la escala de Saffir-Simpson.

Tabla 12.4 Escala de Saffir-Simpson

Descripción del evento	Categoría	Presión (mb)	Vientos (nudos)	Vientos (millas/hora)
Depresión tropical	DT	--------	< 34	< 39
Tormenta tropical	TT	--------	34 - 63	39 - 73
Huracán	G1 (grado 1)	> 980	64 - 82	74 - 95
Huracán	G2 (grado 2)	965 - 980	83 - 95	96 - 110
Huracán	G3 (grado 3)	945 - 965	96 - 113	111 - 130
Huracán	G4 (grado 4)	920 - 945	114 - 135	131 - 155
Huracán	G5 (grado 5)	< 920	> 135	> 155

Fuente: http://weather.unisys.com/hurricane/index.php y modificada por el autor

12.2 BASE DE DATOS HISTÓRICA DE QUINN Y NEAL DE EVENTOS CLIMÁTICOS "EL NIÑO" DESDE 1500

Climate Since AD 1500: Quinn and Neal Historical record of El Niño events

---

World Data Center for Paleoclimatology
and
NOAA Paleoclimatology Program

NOTE: PLEASE CITE ORIGINAL REFERENCE WHEN USING THIS DATA!!!!!

NAME OF DATA SET: Climate Since AD 1500 Database CONTRIBUTOR: R. Bradley, University of Massachusetts

IGBP PAGES/WDCA Data Contribution Series #: 92-015

ORIGINAL REFERENCE: CLIMATE SINCE A.D. 1500, Edited by Raymond S. Bradley and Philip D. Jones, Routledge, London, 1992 (679pp). I.S.B.N. 0-415-07593-9.

SUGGESTED DATA CITATION:
Bradley, R., 1992, Climate Since AD 1500 Database.
IGBP PAGES/World Data Center for Paleoclimatology
Data Contribution Series # 92-015. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA.

GEOGRAPHIC REGION: Global
PERIOD OF RECORD: 1525 - 1990 A.D.

DATA:

W. H. Quinn, V. T. Neal. 1992. The Historical record of El Niño events. in Climate since AD 1500, R. S. Bradley, P. D. Jones, Eds.
(Routledge, London, 1992), pp. 623-648.

Table 32-1.
El Niño events of moderate, strong and very strong intensities, their confidence ratings and information sources.

Intensity ratings:
VS: Very Strong
S+: Strong
S: Strong
M+: Moderate
M: Moderate

VS rating represents coastal SST anomalies 6-12C along the coasts of Peru and Ecuador, comparable to 1877-78, 1891, 1925-26, and 1982-83 events.

S+ rating represents events significantly stronger than S events with regard to hydrologic effects, degreee of destruction, and/or effects on sea life, but without sufficient evidence to raise to VS rating.

S rating implies coastal SST anomalies 3-5C along the coasts of Peru and Ecuador, comparable to 1932, 1940-41, and 1957-58, and 1972-73 events.

M+ rating represents events exhibiting increased hydrological activity, but shorter in duration and more localized, comparable to 1939, 1943, and 1953, and 1965 events.

M rating implies coastal SST anomalies 2-3.5C along the coasts of Peru and Ecuador, comparable to 1918-19, 1923, 1930-31, 1976, and 1987 events.

M/S and M+/M- ratings are probable dual events, but sufficient evidence to differentiate is not available.

For complete description, please consult Quinn and Neal (1992).

El Niño Events	Event Strength	Confidence Rating	Information sources
1525-26	S	3	Xeres (1534).
1531-32	S	4	Xeres (1534) Prescott (1892) Murphy (1926).
1535	M+	2	Mackenna (1877) Taulis (1934).
1539-41	M/S	3	Montesinos (1642) Cobo (1653) Raimondi (1876).
1544	M+	4	Albenino (1549) Montesinos (1642) Mackenna (1877) Gormaz (190l) Taulis (1934).
1546-47	S	4	Albenino (1549) Benzoni (1565) Raimondi (1876).
1552	S	4	Humboldt (1804) Moreno (1804) Palma (1894).
1558-61	M/S	3	Montesinos (1642) Martinez y Vela (1702) Garcia Rosell (1903).
1565	M+	2	Montesinos (1642).
1567-68	S+	5	Oliva (1631) Cobo (1639) Montesinos (1642) Gormaz (1901) Labarthe (1914) Portocarrero (1926).
1574	S	4	Garcia Rosell (1903) Taulis (1934)
1578	VS	5	Cabello Balboa (1586) Acosta (1590) Cobo (1639, 1653) Garcia Rosell (1903) Labarthe (1914) Brunning (1922-23) Portocarrero (1926) Huertas (1984).
1582	M	3	Montesinos (1642) Taulis (1934).
1585	M+	2	Montesinos (1642).
1589-91	M/S	3	Montesinos (1642) Martinez y Vela (1702) Barriga (1951).
1596	M+	3	Montesinos (1642).
1600	S	3	Gormaz (1901) Barriga (1951).
1604	M+	3	Montesinos (1642) Andrade (1948) Brooks (1971).
1607-08	S	5	Cobo (1639) Martinez y Vela (1702) Alcedo y Herrera (1740), Palma (1894) Labarthe (1914) Portocarrero (1926) Taulis (1934) Brooks (1971).
1614	S	5	Cobo (1653) Haenke (1799) Labarthe (1914) Portocarrero (1926) Andrade (1948) Brooks (1971).
1618-19	S	4	Vasquez de Espinosa (1629) Cobo (1653) Mackenna (1877) Taulis (1934),
1624	S+	5	Montesinos (1642) Cobo, (1653) Labarthe (1914) Portocarrero (1926).
1634-35	S	3	Montesinos (1642) Puente (1885) Palma (1894).
1640-41	S	2	Martinez y Vela (1702) Mackenna (1877) Taulis (1934)
1647	M+	3	Mackenna (1877) Gormaz (1901) Taulis (1934).
1652	S+	4	Cobo (1653) Labarthe (1914) Portocarrero (1926).
1655	M	3	Alcedo y Herrera (1740) Taulis (1934).
1660	S	3	Labarthe (1914) Portocarrero (1926).
1671	S	3	Martinez y Vela (1702) Labarthe (1914). Portocarrero (1926).
1681	S	3	Rocha (1681).
1684	M+	2	Martinez y Vela (1702) Taulis (1934)
1687-88	S+	4	Unanue (1806) Melo (1913) Remy (1931) Taulis (1934).
1692-93	S	3	Martinez y Vela (1702) Andrade (1948) Brooks (1971).
1696-97	M+	3	Mackenna (1877) Palma (1894) Taulis, (1934).
1701	S+	5	De Sosa (1763) Bueno (1763) Haenke (1799) Humboldt (1804) Unanue (1806) Paz Soldan (1862) Palma (1894) Labarthe (1914) Portocarrero (1926) Nials et al. (1979).
1707-09	M/S	3	Cooke (1712) Alcedo y Herrera (1740).
1715-16	S	3	Gentil (1728) Labarthe (1914) Portocarrero (1926).
1718	M+	3	Bueno (1763) Barriga (1951).
1720	VS	5	Shelvocke (1726) De Sosa (1763) Bueno (1763) Alcedo (1786-89) Haenke (1799) Humboldt (1804) Moreno (1804) Unanue (1806) Paz Soldan (1862) Raimondi (1876) Palma (1894) Adams (1905) Labarthe (1914) Bachmann (1921) Portocarrero (1926) Nials et al. (1979) Huertas (1984).
1723	M+	3	Mackenna (1877) Taulis (1934) Andrade (1948) Brooks (1971).
1728	VS	5	Anson (1748) De Sosa (1763) Bueno (1763) Alcedo (1786-89) Humboldt (1804) Unanue (1806) Paz Soldan (1862) Spruce (1864) Palma (1894) Eguiguren (1894) Garcia Rosell (1903) Labarthe (1914) Portocarrero (1926) Nials et al. (1979).
1736	S	2	Andrade (1948) Brooks (1971).

1740 M 3 Juan and Ulloa (1748) Gormaz (1901).
1744 M+ 3 Mackenna (1877) Taulis (1934) Andrade (1948) Brooks (1971).
1747 S+ 5 Llano Zapata (1748) De Sosa (1763) Humboldt (1804) Moreno (1804) Palma (1894) Labarthe (1914) Portocarrero (1926) Taulis (1934) Nials et al. (1979).
1750 M+ 4 Puente (1885) Labarthe (1914) Portocarrero (1926) Taulis (1934).
1755-56 M 3 Garcia Rodriguez (1779) Garcia Rosell (1903) Andrade (1948).
1761 S 5 Buena (1763) Garcia Rodriguez (1779) Alcedo (1786-89) Haenke (1799) Ruschenberger (1834) Labarthe (1914) Portocarrero (1926) Andrade (1948).
1764 M 2 Mackenna (1877) Taulis (1934).
1768 M 2 Garcia Rodriguez (1779) Mackenna (1877) Taulis (1934).
1775 S 3 Puente (1885) Labarthe (1914) Portocarrero (1926).
1778-79 M+ 4 Garcia Rodriguez (1779) Mackenna (1877) Puente (1885) Labarthe (1914) Portocarrero (1926) Andrade (1948) Brooks (1971).
1783 S 3 Mackenna (1877) Taulis (1934) Andrade (1948) Brooks (1971).
1786 M+ 3 Labarthe (1914) Portocarrero (1926) Estrada (1977).
1791 VS 5 Unanue (1806) Ruschenberger (1834) Paz Soldan (1862) Spruce (1864) Hutchinson (1873) Eguiguren (1894) Garcia Rosell (1903) Adams (1905) Labarthe (1914) Leguia y Martinez (1914) Bachmann (1921) Portocarrero (1926) Andrade (1948) Brooks (1971).
1803-04 S+ 5 Humboldt (1804) Moreno (1804) Unanue (1806) Stevenson (1829) Paz Soldan (1862) Spruce (1864) Eguiguren (1894) Palma (1894) Labarthe (1914) Portocarrero (1926) Petersen (1935) Lastres (1937) Andrade (1948) Brooks (1971).
1806-07 M 3 Unanue (1815) Stevenson (1829) Remy (1931).
1812 M+ 3 Palma (1894) Gonzales (1913).
1814 S 4 Spruce (1864) Eguiguren (1894).
1817 M+ 5 Eguiguren (1894) Labarthe, (1914) Portocarrero (1926) Taulis (1934) Andrade (1948).
1819 M+ 5 Eguiguren (1894) Gormaz (1901) Taulis (1934).
1821 M 5 Eguiguren (1894) Fuchs (1925) Remy (1931) Taulis (1934).
1824 M+ 5 Spruce (1864) Basadre (1884) Eguiguren (1894) Andrade (1948) Brooks (1971).
1828 VS 5 Ruschenberger (1834) Paz Soldan (1862) Spruce (1864) Hutchinson (1873) Eguiguren (1894) Middendorf (1894) Adams (1905) Sievers (1914) Labarthe (1914) Bachmann (1921) Portocarrero (1926) Taulis (1934) Brooks (1971).
1832 M+ 5 Spruce (1864) Mackenna (1877) Basadre (1884) Eguiguren (1894) Bachmann (1921) Taulis (1934) Andrade (1948) Brooks (1971).
1837 M+ 5 Mackenna (1877) Eguiguren (1894) Labarthe (1914) Portocarrero (1926) Taulis (1934).
1844-46 M/S+ 4 Spruce (1864) Mackenna (1877) Basadre (1884) Eguiguren (1894) Adams (1905) Labarthe (1914) Portocarrero (1926) Taulis (1934) Andrade (1948) Brooks (1971).
1850 M 4 Mackenna (1877) Eguiguren (1894) Gormaz (1901) Fuchs (1925) Taulis (1934).
1852 M 4 Spruce (1864) Eguiguren (1894).
1854 M 4 Spruce (1864) Eguiguren (1894).
1857-58 M 5 Mackenna (1877) Eguiguren (1894) Gormaz (1901) Labarthe (1914) Gaudron (1925) Portocarrero (1926) Zegarra (1926) Taulis (1934).
1860 M 4 El Comercio (01/07/1860;02/04/1860) Gormaz (1901) Labarthe (1914) Portocarrero (1926) Taulis (1934).
1862 M- 4 Spruce (1864) Eguiguren (1894).
1864 S 5 Spruce (1864) Mackenna (1877) Eguiguren (1894) Taulis (1934).
1866 M+ 5 Eguiguren (1894) Adams (1905) Labarthe (1914) Bachmann (1921) Portocarrero (1926).
1867-68 M+ 4 El Comercio (01/10/1872) Mackenna (1877) Eguiguren (1894) Raimondi (1897) Gormaz (1901) Bachmann (1921) Taulis (1934).
1871 S+ 5 Hutchinson (1873) Middendorf (1894) Eguiguren (1894) Adams (1905) Tizon y Bueno (1907) Leguia y Martinez (1914) Sievers (1914) Labarthe (1914) Bachmann (1921) Anonymous (1925) Gaudron (1925) Portocarrero (1926).

1874 M 4 LaPatria (02/09/1874) Gormaz (1901) Adams (1905) Bachmann (1921).
1877-78 VS 5 Mackenna (1877) Basadre (1884) Eguiguren (1894) Palma (1894) Adams (1905) Melo (1913) Sievers (1914) Labarthe (1914) Leguia y Martinez (1914) Bachmann (1921) Anonymous (1925) Portocarrero (1926) Murphy (1926) Taulis (1934) Andrade (1948) Brooks (1971) Kiladis and Diaz (1986).
1880 M 4 Puls (1885) Eguiguren (1894) Taulis (1934).
1884 S+ 5 Eguiguren (1894) Gormaz (1901) Sievers (1914) Labarthe (1914) Bachmann (1921) Murphy (1925) Anonymous (1925) Portocarrero (1926).
1887-89 M-/M+ 4 Eguiguren (1894) Gormaz (1901) Bravo (1903) Labarthe (1914) Portocarrero (1926) Taulis (1934) Andrade (1948) Brooks (1971).
1891 VS 5 Carranza (1891) Eguiguren (1894) Gormaz (1901) Adams (1905) Fuchs (1907) Labarthe (1914) Leguia y Martinez (1914) Sievers (1914) Bachmann (1921) Anonymous (1925) Zegarra (1926) Murphy (1926) Portocarrero (1926) Taulis (1934) Andrade (1948) Brooks (1971) Nials et al. (1979).
1897 M+ 4 El Comercio (02/03/1897, 02/22/1897) Gormaz (1901) Bravo (1903) Bachmann (1921) Jones (1933) Andrade (1948) Brooks (1971).
1899-1900 S 5 El Comercio (2/10/1899) Gormaz (1901) Labarthe (1914) Bachmann (1921) Murphy (1923) Portocarrero (1926) Jones (1933) Taulis (1934) Schott (1938) Andrade (1948) Hutchinson (1950) Brooks (1971).
1902 M+ 4 El Comercio (02/17/1902) Bachmann (1921) Jones (1933) Taulis (1934) Schott (1938) Andrade (1948) Brooks (1971).
1904-05 M- 4 Bachmann (1921) Jones (1933) Taulis (1934) Schott (1938) Andrade (1948) Brooks (1971).
1907 M 3 Paz Soldan (1908) Remy (1931) Jones (1933) Andrade (1948) Brooks (1971).
1910 M+ 3 El Comercio (02/10/1910) Labarthe (1914) Bachmann (1921) Portocarrero (1926) Jones (1933).
1911-12 S 5 Forbes (1913, 1914) Bowman (1916, 1924) Barclay (1917) Lavalle y Garcia (1917) Garcia (1921) Ballen (1925) Jones (1933) Schott (1938) Vogt (1940) Hutchinson (1950) Schweigger (1961).
1914-15 M+ 5 Labarthe (1914) Garcia (1921) Bowman (1924) Zegarra (1926) Portocarrero (1926) Jones (1933) Taulis (1934) Petersen (1935) Schott (1938) Andrade (1948) Schweigger (1961) Brooks (1971) Markham (1972).
1917 S 5 Lavalle y Garcia (1917) Garcia (1921) Murphy (1923) Ballen (1925) Portocarrero (1926) Zegarra (1926) Jones (1933) Petersen (1935) Maisch (1936) Hutchinson (1950) Schweigger (1961).
1918-19 M 5 Fuchs (1918, 1937) Garcia (1921) Murphy (1923) Portocarrero (1926) Jones (1933) Taulis (1934) Maisch (1936) Schott (1938) Vogt (1940) Andrade (1948) Hutchinson (1950) Brooks (1971) Markham (1972).
1923 M 5 Lavalle y Garcia (1924) Ballen (1925) Zegarra (1926) Jones (1933) Gunther (1936) Hutchinson (1950) Schweigger (1961).
1925-26 VS 5 Fuchs (1925, 1937) Murphy (1926) Zegarra (1926) Berry (1927) Sheppard (1930) Jones (1933) Petersen (1935) Maisch (1936) Vogt (1940) Mews (1944) Hutchinson (1950) Rudolph (1953) Nials et at. (1979) Mugica (1983).
1930-31 M 5 Jones (1933) Petersen (1935) Andrade (1948) Hutchinson (1950) Schweigger (1961) Brooks (1971) Miller and Laurs, (1975) Woodman (1984).
1932 S 5 Sheppard (1933) Jones (1933) Petersen (1935) Schott (1938) Vogt (1940) Mears (1944) Andrade (1948) Hutchinson (1950) Rudolph (1953) Brooks (1971) Mugica (1983) Woodman (1984).
1939 M+ 5 Schweigger (1940) Vogt (1940) Mears (1944) Hutchinson (1950) Sears (1954) Mugica (1983) Woodman (1984).
1940-41 S 5 Lobell (1942) Mears (1944) Hutchinson (1950) Sears (1954) Wooster (1960) Schweigger (1961) Brooks (1971) Mugica (1983) Woodman (1984) Quinn and Zopf (1984).
1943 M+ 5 Schweigger (1961) Miller and Laurs (1975) Caviedes (1975) Mugica (1983) Woodman (1984).
1951 M- 5 Garcia Mendez (1953) Schweigger (1961) Brooks (1971) Wooster and Guillen (1974) Miller and Laurs (1975).

1953 M+ 5 Rudolph (1953) Avilla (1953) Sears (1954) Wooster and Jennings (1955) Merriman (1955) Schweigger (1961) Mugica (1983) Woodman (1984).
1957-58 S 5 Wooster (1960) Schweigger (1961) Bjerknes (1961) Brooks (1971) Idyll (1973) Miller and Laurs (1975) Caviedes (1975) Mugica (1983). Hastenrath et al. (1984).
1965 M+ 5 Guillen (1967, 1971) Wooster and Guillen (1974) Miller and Laurs (1975) Caviedes (1975) Mugica (1983) Woodman (1984).
1969 M- 5 Wooster and Guillen (1974) Miller and Laurs (1975) Quinn et al. (1978) Rasmusson and Hall (1983).
1972-73 S 5 Idyll (1973) (Wooster and Guillen (1974) Miller and Laurs (1975) Ramage (1975) Caviedes (1975) Nials et al. (1979) Mugica (1983) Woodman (1984).
1976 M 5 Quinn (1977, 1980) Ceres (1981) Smith (1983) Mugica (1983) Rasmusson and Hall (1983) Quinn and Neal (1983) Woodman (1984).
1982-83 VS 5 Mugica (1983) Rasmusson and Hall (1983) Rasmusson and Wallace (1983) Quiroz (1983) Smith (1983) Le Comte (1984) Quinn and Zopf (1984) Woodman (1984) Caviedes (1984) Canby (1984) Quinn and Neal (1984).
1987 M 5 Quinn et al. (1987) Le Comte (1988) reports of anomalous storm activity and heavy rainfall over subtropical and northern Chile (from V. T. Neal, during his 1987 assignment in Chile).

12.3 BASE DATOS DEL INDICE ONI DE LA NOAA

Año	Dic-Ene-Feb	Ene-Feb-Mar	Feb-Mar-Abr	Mar-Abr-May	Abr-May-Jun	May-Jun-Jul	Jun-Jul-Ago	Jul-Ago-Sep	Ago-Sep-Oct	Sep-Oct-Nov	Oct-Nov-Dic	Nov-Dic-Ene
1950	-1.4	-1.3	-1.2	-1.2	-1.1	-0.9	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.5	-0.7
1951	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0.0	0.4	0.6	1.0	1.1	1.2	1.1	0.9
1952	0.6	0.4	0.3	0.3	0.3	0.1	-0.1	0.0	0.2	0.2	0.2	0.3
1953	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.7
1954	0.7	0.5	0.1	-0.3	-0.5	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.7	-0.7	-0.7
1955	-0.7	-0.7	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.7	-1.0	-1.4	-1.7	-1.6
1956	-1.1	-0.8	-0.6	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.6	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
1957	-0.3	0.0	0.4	0.7	0.9	1.0	1.1	1.2	1.2	0.3	1.5	1.8
1958	1.8	1.6	1.2	0.9	0.7	0.6	0.5	0.3	0.3	0.4	0.5	0.6
1959	0.6	0.6	0.5	0.3	0.2	-0.1	-0.2	-0.3	-0.1	0.0	0.1	0.0
1960	-0.1	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
1961	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.4	0.2	-0.1	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1
1962	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1	0.0	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5
1963	-0.4	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.1	1.2	1.3	1.4	1.3
1964	1.1	0.6	0.1	-0.3	-0.6	-0.6	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8
1965	-0.6	-0.3	0.0	0.2	0.5	0.8	1.2	1.4	1.7	1.9	1.9	1.7
1966	1.4	1.1	0.9	0.6	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0	-0.1	-0.1	-0.2
1967	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4	-0.2	0.1	0.1	-0.1	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4
1968	-0.6	-0.8	-0.7	-0.5	-0.2	0.1	0.4	0.5	0.5	0.6	0.8	1.0
1969	1.1	1.1	1.0	0.9	0.8	0.6	0.5	0.5	0.8	0.9	0.9	0.8
1970	0.6	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.2	-0.5	-0.7	-0.7	-0.7	-0.8	-1.0
1971	-1.2	-1.3	-1.0	-0.8	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.8	-0.9	-0.8
1972	-0.6	-0.3	0.0	0.3	0.6	0.8	1.1	1.4	1.6	1.9	2.1	2.1
1973	1.8	1.2	0.6	0.0	-0.5	-0.8	-1.0	-1.2	-1.3	-1.6	-1.9	-2.0
1974	-1.9	-1.6	-1.2	-1.0	-0.8	-0.7	-0.5	-0.4	-0.4	-0.6	-0.8	-0.7
1975	-0.5	-0.5	-0.6	-0.6	-0.8	-1.0	-1.1	-1.2	-1.4	-1.5	-1.6	-1.7
1976	-1.5	-1.1	-0.7	-0.5	-0.3	-0.1	0.2	0.4	0.6	0.7	0.8	0.8
1977	0.6	0.6	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7	0.8	0.8
1978	0.7	0.5	0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.3	-0.1	-0.1
1979	-0.1	0.1	0.2	0.3	0.2	0.0	0.0	0.2	0.3	0.5	0.5	0.6
1980	0.5	0.4	0.3	0.3	0.4	0.4	0.2	0.0	-0.1	0.0	0.0	-0.1
1981	-0.4	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.1
1982	-0.1	0.0	0.1	0.3	0.5	0.6	0.7	1.0	1.5	1.9	2.1	2.2
1983	2.2	1.9	1.5	1.2	0.9	0.6	0.2	-0.2	-0.5	-0.8	-0.9	-0.8
1984	-0.5	-0.3	-0.2	-0.4	-0.5	-0.5	-0.3	-0.2	-0.3	-0.6	-0.9	-1.1
1985	-1.0	-0.9	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6	-0.5	-0.5	-0.5	-0.4	-0.4	-0.4
1986	-0.5	-0.4	-0.2	-0.2	-0.1	0.0	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.2
1987	1.2	1.3	1.2	1.1	1.0	1.2	1.4	1.6	1.6	1.5	1.3	1.1
1988	0.7	0.5	0.1	-0.2	-0.7	-1.2	-1.3	-1.2	-1.3	-1.6	-1.9	-1.9
1989	-1.7	-1.5	-1.1	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1
1990	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4
1991	0.3	0.2	0.2	0.3	0.5	0.7	0.8	0.7	0.7	0.8	1.1	1.4
1992	1.6	1.5	1.4	1.2	1.0	0.7	0.3	0.0	-0.2	-0.3	-0.2	0.0
1993	0.2	0.3	0.5	0.6	0.6	0.5	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1
1994	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7	1.0	1.2
1995	1.0	0.8	0.6	0.3	0.2	0.0	-0.1	-0.4	-0.7	-0.8	-0.9	-0.9
1996	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4	-0.5
1997	-0.5	-0.4	-0.1	0.2	0.7	1.2	1.5	1.8	2.1	2.3	2.4	2.3
1998	2.2	1.8	1.4	0.9	0.4	-0.2	-0.7	-1.0	-1.2	-1.2	-1.4	-1.5
1999	-1.5	-1.3	-1.0	-0.9	-0.9	-1.0	-1.0	-1.1	-1.1	-1.3	-1.5	-1.7
2000	-1.7	-1.5	-1.1	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.5	-0.6	-0.8	-0.8
2001	-0.7	-0.6	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1	0.0	0.0	-0.1	-0.2	-0.2	-0.3
2002	-0.2	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.8	0.8	0.9	1.2	1.3	1.3
2003	1.1	0.8	0.4	0.0	-0.2	-0.1	0.2	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3
2004	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.3	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
2005	0.6	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1	0.0	-0.2	-0.5	-0.8
2006	-0.9	-0.7	-0.5	-0.3	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.0	1.0
2007	0.7	0.3	-0.1	-0.2	0.1	0.4	0.5	0.6	0.7	1.0	1.4	1.6
2008	-1.5	-1.5	-1.2	-0.9	-0.7	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1	-0.2	-0.4	-0.7
2009	-0.9	-0.8	-0.6	-0.2	0.1	0.4	0.5	0.6	0.7	1.0	1.4	1.6
2010	1.6	1.4	1.1	0.7	0.2	-0.3	-0.8	-1.2	-1.4	-1.5	-1.5	-1.5
2011	-1.4	-1.3	-1.0	-0.7	-0.4	-0.2	-0.2	-0.3	-0.6	-0.8	-1.0	-1.0
2012	-0.9	-0.7	-0.5	-0.3	-0.1	0.0	0.1	0.3	0.4	0.6	0.4	

Descripción: Episodios calientes (rojo) y fríos (azul), basados en un umbral de ± 0,5° para el índice Oceánico El Niño (ONI). (calculado medianta la media móvil de 3 meses de las anomalías de la TSM en ERSST.v3b en la región Niño 3.4 (5° N - 5° S, 120° W - 170° W) sobre períodos base de 30 años, actualizados cada 5 años. Para fines históricos, episodios fríos y calientes (números de color azul y rojo), se definen cuando el umbral es sobrepasado durante un mínimo de 5 meses consecutivos.

12.4 DATOS RELEVANTES DE LAS TEMPORADAS DE HURACANES EN EL ATLÁNTICO, OBTENIDOS A PARTIR DE LA BASE DE DATOS HURDAT

Año	Número total de eventos	Fecha de inicio del primer evento	Fecha de inicio del último evento	Depresión Tropical	Tormenta Tropical	Hur. G-1	Hur. G-2	Hur. G-3	Hur. G-4	Hur. G-5	Total de eventos anual	Total de huracanes anual	Total de huracanes mayores anual
1851	6	25-Jun	16-Oct	0	3	2	0	1	0	0	6	3	1
1852	5	19-Ago	06-Oct	0	0	3	1	1	0	0	5	5	1
1853	8	05-Ago	19-Oct	0	4	1	1	1	1	0	8	4	2
1854	5	25-Jun	20-Oct	0	2	1	1	1	0	0	5	3	1
1855	5	06-Ago	15-Sep	0	1	1	2	1	0	0	5	4	1
1856	6	09-Ago	18-Sep	0	2	2	0	1	1	0	6	4	2
1857	4	30-Jun	24-Sep	0	1	1	2	0	0	0	4	3	0
1858	6	12-Jun	21-Oct	0	0	4	2	0	0	0	6	6	0
1859	8	01-Jul	28-Oct	0	1	2	4	1	0	0	8	7	1
1860	7	08-Ago	20-Oct	0	1	1	4	1	0	0	7	6	1
1861	8	06-Jul	01-Nov	0	2	4	2	0	0	0	8	6	0
1862	6	15-Jun	22-Nov	0	3	1	2	0	0	0	6	3	0
1863	9	08-Ago	29-Sep	0	4	1	4	0	0	0	9	5	0
1864	5	16-Jul	22-Oct	0	2	3	0	0	0	0	5	3	0
1865	7	30-May	18-Oct	0	4	1	2	0	0	0	7	3	0
1866	7	11-Jul	28-Oct	0	0	3	3	0	1	0	7	7	1
1867	9	21-Jun	27-Oct	0	2	2	4	1	0	0	9	7	1
1868	4	03-Sep	15-Oct	0	1	0	3	0	0	0	4	3	0
1869	10	12-Ago	04-Oct	0	3	2	4	1	0	0	10	7	1
1870	11	30-Jul	30-Oct	0	1	5	3	2	0	0	11	10	2
1871	8	01-Jun	10-Oct	0	2	3	1	2	0	0	8	6	2
1872	5	09-Jul	22-Oct	0	1	3	1	0	0	0	5	4	0
1873	5	01-Jun	26-Sep	0	2	1	0	2	0	0	5	3	2
1874	7	02-Jul	31-Oct	0	3	3	1	0	0	0	7	4	0
1875	6	16-Ago	12-Oct	0	1	3	1	1	0	0	6	5	1
1876	5	09-Sep	12-Oct	0	1	1	1	2	0	0	5	4	2
1877	8	01-Ago	28-Nov	0	5	2	0	1	0	0	8	3	1
1878	12	01-Jul	25-Nov	0	2	4	4	1	1	0	12	10	2
1879	8	09-Ago	18-Nov	0	2	2	2	2	0	0	8	6	2
1880	11	21-Jun	20-Oct	0	2	6	1	0	2	0	11	9	2
1881	7	01-Ago	18-Sep	0	3	2	2	0	0	0	7	4	0
1882	6	24-Ago	05-Oct	0	1	2	1	1	1	0	6	5	2
1883	4	18-Ago	22-Oct	0	1	1	0	2	0	0	4	3	2
1884	4	01-Sep	07-Oct	0	0	2	1	1	0	0	4	4	1
1885	8	07-Ago	10-Oct	0	2	5	0	1	0	0	8	6	1
1886	12	13-Jun	21-Oct	0	2	1	5	3	1	0	12	10	4
1887	19	15-May	07-Dic	0	8	5	4	2	0	0	19	11	2
1888	9	16-Jun	17-Nov	0	3	2	2	2	0	0	9	6	2
1889	9	16-May	05-Oct	0	3	4	2	0	0	0	9	6	0
1890	4	27-May	31-Oct	0	2	1	0	1	0	0	4	2	1
1891	10	03-Jul	03-Nov	0	3	3	3	1	0	0	10	7	1
1892	9	09-Jun	21-Oct	0	4	2	3	0	0	0	9	5	0
1893	12	12-Jun	05-Nov	0	2	1	4	4	1	0	12	10	5
1894	7	06-Jun	21-Oct	0	2	0	1	3	1	0	7	5	4
1895	6	14-Ago	13-Oct	0	4	0	2	0	0	0	6	2	0
1896	7	04-Jul	27-Nov	0	1	0	4	2	0	0	7	6	2
1897	6	31-Ago	23-Oct	0	3	2	1	0	0	0	6	3	0
1898	11	02-Ago	27-Oct	0	6	3	1	0	1	0	11	5	1
1899	9	26-Jun	07-Nov	0	4	0	3	1	1	0	9	5	2
1900	7	27-Ago	24-Oct	0	4	0	1	1	1	0	7	3	2
1901	12	11-Jun	30-Oct	0	7	4	1	0	0	0	12	5	0
1902	5	12-Jun	01-Nov	0	2	1	2	0	0	0	5	3	0
1903	10	21-Jul	17-Nov	0	3	3	3	1	0	0	10	7	1
1904	5	10-Jun	31-Oct	0	2	3	0	0	0	0	5	3	0
1905	5	06-Sep	05-Nov	0	4	0	0	1	0	0	5	1	1
1906	11	08-Jun	05-Nov	0	5	2	1	2	1	0	11	6	3
1907	5	24-Jun	06-Nov	0	5	0	0	0	0	0	5	0	0
1908	10	06-Mar	19-Oct	0	4	2	3	1	0	0	10	6	1
1909	11	15-Jun	08-Nov	0	5	0	2	4	0	0	11	6	4
1910	5	23-Ago	09-Oct	0	2	0	2	0	1	0	5	3	1
1911	6	04-Ago	26-Oct	0	3	1	2	0	0	0	6	3	0
1912	7	07-Jun	11-Nov	0	3	2	1	1	0	0	7	4	1
1913	6	21-Jun	28-Oct	0	2	4	0	0	0	0	6	4	0
1914	1	15-Sep	15-Sep	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
1915	6	31-Jul	21-Sep	0	1	1	1	1	2	0	6	5	3
1916	15	13-May	11-Nov	0	5	2	3	4	1	0	15	10	5
1917	4	06-Jul	20-Sep	0	2	0	0	1	1	0	4	2	2
1918	6	01-Ago	09-Sep	0	2	1	2	1	0	0	6	4	1
1919	5	02-Jul	10-Nov	0	3	0	1	0	1	0	5	2	1
1920	5	07-Sep	25-Sep	0	1	2	2	0	0	0	5	4	0
1921	7	16-Jun	19-Nov	0	2	3	0	1	1	0	7	5	2
1922	5	12-Jun	12-Oct	0	2	1	1	1	0	0	5	3	1
1923	9	22-Jun	24-Oct	0	5	2	1	1	0	0	9	4	1
1924	11	18-Jun	05-Nov	0	6	2	1	1	0	1	11	5	2
1925	4	18-Ago	27-Nov	0	2	2	0	0	0	0	4	2	0
1926	11	22-Jul	12-Nov	0	3	0	2	2	4	0	11	8	6
1927	8	18-Ago	19-Nov	0	4	2	1	1	0	0	8	4	1
1928	6	03-Ago	10-Oct	0	2	2	1	0	0	1	6	4	1
1929	5	27-Jun	19-Oct	0	2	2	0	0	1	0	5	3	1
1930	3	21-Ago	18-Oct	0	1	0	0	1	1	0	3	2	2
1931	9	25-Jun	22-Nov	0	7	0	1	1	0	0	9	2	1

Año	Número total de eventos	Fecha de inicio del primer evento	Fecha de inicio del último evento	Depresión Tropical	Tormenta Tropical	Hur. G-1	Hur. G-2	Hur. G-3	Hur. G-4	Hur. G-5	Total de eventos anual	Total de huracanes anual	Total de huracanes mayores anual
1932	11	05-May	03-Nov	0	5	1	1	1	2	1	11	6	4
1933	21	14-May	15-Nov	0	11	2	3	3	2	0	21	10	5
1934	11	27-May	20-Nov	0	5	4	2	0	0	0	11	6	0
1935	6	18-Ago	30-Oct	0	1	2	0	2	0	1	6	5	3
1936	16	12-Jun	09-Oct	0	9	4	2	1	0	0	16	7	1
1937	9	29-Jul	29-Sep	0	6	0	3	0	0	0	9	3	0
1938	8	08-Ago	06-Nov	0	5	0	2	0	0	1	8	3	1
1939	5	12-Jun	29-Oct	0	2	2	0	0	1	0	5	3	1
1940	8	19-May	24-Oct	0	4	3	1	0	0	0	8	4	0
1941	6	11-Sep	15-Oct	0	2	2	0	2	0	0	6	4	2
1942	10	17-Ago	05-Nov	0	6	1	2	1	0	0	10	4	1
1943	10	25-Jul	20-Oct	0	5	1	2	1	1	0	10	5	2
1944	11	13-Jul	12-Oct	0	4	3	1	2	1	0	11	7	3
1945	11	20-Jun	10-Oct	0	6	0	2	1	2	0	11	5	3
1946	6	13-Jun	31-Oct	0	3	1	1	0	1	0	6	3	1
1947	9	31-Jul	16-Oct	0	4	2	1	1	0	1	9	5	2
1948	9	22-May	08-Nov	0	3	2	0	2	2	0	9	6	4
1949	13	21-Ago	03-Nov	0	6	1	3	1	2	0	13	7	3
1950	13	12-Ago	18-Oct	2	0	1	2	5	2	1	13	11	8
1951	10	15-May	15-Oct	0	2	2	1	3	1	1	10	8	5
1952	7	02-Feb	20-Oct	0	1	1	2	2	1	0	7	6	3
1953	14	25-May	07-Dic	0	8	1	1	3	1	0	14	6	4
1954	11	24-Jun	30-Dic	0	4	2	3	1	1	0	11	7	2
1955	12	31-Jul	14-Oct	0	3	1	2	4	1	1	12	9	6
1956	8	12-Jun	30-Oct	0	4	2	0	1	1	0	8	4	2
1957	8	08-Jun	23-Oct	0	5	1	0	0	2	0	8	3	2
1958	10	14-Jun	05-Oct	0	3	2	0	2	2	1	10	7	5
1959	11	28-May	17-Oct	0	4	5	0	1	1	0	11	7	2
1960	7	22-Jun	17-Sep	0	3	1	1	0	0	2	7	4	2
1961	11	20-Jul	05-Nov	0	3	1	0	3	2	2	11	8	7
1962	5	26-Ago	14-Oct	0	2	0	2	1	0	0	5	3	1
1963	9	31-Jul	25-Oct	0	2	2	3	1	1	0	9	7	2
1964	12	02-Jun	05-Nov	0	6	0	0	2	4	0	12	6	6
1965	6	11-Jun	12-Oct	0	2	2	1	0	1	0	6	4	1
1966	11	04-Jun	04-Nov	0	4	4	0	2	1	0	11	7	3
1967	8	28-Ago	19-Oct	0	2	4	1	0	0	1	8	6	1
1968	8	01-Jun	13-Oct	0	4	4	0	0	0	0	8	4	0
1969	18	25-Jul	21-Nov	0	6	5	2	4	0	1	18	12	5
1970	10	17-May	20-Oct	0	5	2	1	2	0	0	10	5	2
1971	13	04-Jul	12-Nov	0	7	4	1	0	0	1	13	6	1
1972	7	23-May	01-Nov	0	4	2	1	0	0	0	7	3	0
1973	8	01-Jul	16-Oct	0	4	3	0	1	0	0	8	4	1
1974	11	24-Jun	04-Oct	0	7	1	1	1	1	0	11	4	2
1975	9	27-Jun	09-Dic	0	3	1	2	2	1	0	9	6	3
1976	10	21-May	22-Oct	0	4	2	2	2	0	0	10	6	2
1977	6	29-Ago	16-Oct	0	1	4	0	0	0	1	6	5	1
1978	12	18-Ene	28-Oct	0	7	2	1	0	2	0	12	5	2
1979	9	19-Jun	23-Oct	0	4	2	1	0	1	1	9	5	2
1980	11	31-Jul	25-Nov	0	2	4	3	1	0	1	11	9	2
1981	12	06-May	12-Nov	0	5	3	1	2	1	0	12	7	3
1982	6	02-Jun	30-Sep	0	4	1	0	0	1	0	6	2	1
1983	4	15-Ago	26-Sep	0	1	2	0	1	0	0	4	3	1
1984	13	18-Ago	12-Dic	0	8	3	1	0	1	0	13	5	1
1985	11	15-Jul	15-Nov	0	4	4	0	2	1	0	11	7	3
1986	6	05-Jun	18-Nov	0	2	3	1	0	0	0	6	4	0
1987	7	09-Ago	09-Oct	0	4	2	0	1	0	0	7	3	1
1988	12	05-Ago	17-Nov	0	7	2	0	0	2	1	12	5	3
1989	11	24-Jun	28-Nov	0	4	3	2	0	1	1	11	7	2
1990	14	22-Jul	16-Oct	0	6	5	2	1	0	0	14	8	1
1991	8	29-Jun	28-Oct	0	4	1	1	1	1	0	8	4	2
1992	7	21-Abr	22-Oct	0	3	1	2	0	0	1	7	4	1
1993	8	18-Jun	18-Sep	0	4	2	1	1	0	0	8	4	1
1994	7	30-Jun	08-Nov	0	4	2	1	0	0	0	7	3	0
1995	19	03-Jun	27-Oct	0	8	4	2	2	3	0	19	11	5
1996	13	17-Jun	13-Nov	0	4	3	0	4	2	0	13	9	6
1997	8	31-May	14-Oct	0	5	2	0	1	0	0	8	3	1
1998	14	27-Jul	24-Nov	0	4	3	4	1	1	1	14	10	3
1999	12	11-Jun	13-Nov	0	4	0	3	0	5	0	12	8	5
2000	15	03-Ago	25-Oct	0	7	4	1	1	2	0	15	8	3
2001	15	05-Jun	23-Nov	0	6	4	1	2	2	0	15	9	4
2002	12	14-Jul	21-Sep	0	8	1	1	1	1	0	12	4	2
2003	16	18-Abr	07-Dic	0	9	3	1	1	1	1	16	7	3
2004	15	31-Jul	26-Nov	0	6	2	1	2	3	1	15	9	6
2005	31	08-Jun	30-Dic	4	12	7	1	2	2	3	31	15	7
2006	9	10-Jun	27-Sep	0	4	3	0	2	0	0	9	5	2
2007	15	06-May	10-Dic	0	9	4	0	0	0	2	15	6	2
2008	16	31-May	05-Nov	0	8	2	1	1	4	0	16	8	5
2009	9	10-Ago	04-Nov	0	6	0	1	1	1	0	9	3	2
2010	19	24-Jun	29-Oct	0	7	3	4	1	4	0	19	12	5
2011	19	29-Jun	08-Nov	0	13	2	1	1	2	0	19	6	3
2012	19	19-May	22-Oct	0	9	6	3	1	0	0	19	10	1

12.5 CUANTIFICACIÓN DE LA INTENSIDAD DE LAS TEMPORADAS DE LOS CICLONES TROPICALES. ENERGÍA CICLÓNICA ACUMULADA

El índice o medida, utiliza una aproximación de la energía empleada por un sistema tropical durante su vida, y se calcula cada seis (6) horas, siendo la ECA de una temporada de huracanes, la suma de las ECA de cada uno de los ciclones que se hubiesen generado durante dicha temporada, siendo tomados en cuenta tanto el número, como la intensidad y la duración de cada uno de ellos.

NOAA hace uso del índice ECA para categorizar las temporadas de huracanes del Atlántico Norte cómo: por encima, cerca, o por debajo de lo normal.

Cálculo de la ECA para la temporada de huracanes de 1983 en el Atlántico

El índice ECA de una temporada se calcula aplicando la ecuación (6.7) a cada una de los fenómenos meteorológicos que ocurran en la temporada de huracanes que se esté analizando, en aquellos momentos en que dichos fenómenos presenten velocidades máximas sostenidas iguales o superiores a 35 nudos.

Aquí se presenta un ejemplo del cálculo del índice ECA para la temporada de huracanes de 1983, en la cual ocurrieron únicamente cuatro (4) fenómenos meteorológicos, e igualmente se presentan los valores del índice ECA que la NOAA reporta desde 1851 a 2011, conjuntamente con estadísticas básicas de cada una de las temporadas de huracanes de dicho período (Anexo 12.6), señalándose el número total de fenómenos meteorológicos, así como cuantos de dichos fenómenos tuvieron categoría de huracanes, y cuantos de esos huracanes fueron catalogados como huracanes mayores (Intensidad igual o superior a grado 3 en la escala de Saffir-Simpson).

Temporada de huracanes de 1983 en el Atlántico

ÍNDICE ECA= 17.37

Cálculos del Indce ACE de cada ciclón tropical

Evento	Día y mes	Hora Zulu	Velocidad viento (Nudos)	(Vmax)^2	Sumatoria de (Vmax)^2	Índice ECA Parcial
						6.39
Huracán "Alicia"	15-Ago	12		0	0	
	15-Ago	18	40	1600	1600	
	16-Ago	0	45	2025	3625	
	16-Ago	6	50	2500	6125	
	16-Ago	12	55	3025	9150	
	16-Ago	18	60	3600	12750	
	17-Ago	0	65	4225	16975	
	17-Ago	6	70	4900	21875	
	17-Ago	12	75	5625	27500	
	17-Ago	18	90	8100	35600	
	18-Ago	0	95	9025	44625	
	18-Ago	6	100	10000	54625	
	18-Ago	12	80	6400	61025	
	18-Ago	18	40	1600	62625	
	19-Ago	0	35	1225	63850	
	19-Ago	6		0	63850	
	19-Ago	12		0	63850	
	19-Ago	18		0	63850	
	20-Ago	0		0	63850	
	20-Ago	6		0	63850	
	20-Ago	12		0	63850	
	20-Ago	18		0	63850	
	21-Ago	0		0	63850	
	21-Ago	6		0	63850	

Detalles del recorrido

Fecha: 15-21 AGOSTO DE 1983
Huracán "ALICIA"

Medición	LAT.(°)	LONG.(°)	HORA	VEL (NUDOS)	PRESION (mb)	CAT. EVENTO
1	27.30	-90.50	08/15/12Z	30	1009	Depresión tropical
2	27.20	-91.00	08/15/18Z	40	1006	Tormenta tropical
3	27.10	-91.50	08/16/00Z	45	1005	Tormenta tropical
4	27.00	-92.00	08/16/06Z	50	1004	Tormenta tropical
5	27.10	-92.40	08/16/12Z	55	1002	Tormenta tropical
6	27.30	-92.80	08/16/18Z	60	998	Tormenta tropical
7	27.40	-93.30	08/17/00Z	65	991	Huracán-1
8	27.70	-93.70	08/17/06Z	70	987	Huracán-1
9	27.90	-94.20	08/17/12Z	75	983	Huracán-1
10	28.10	-94.50	08/17/18Z	90	974	Huracán-2
11	28.40	-94.80	08/18/00Z	95	969	Huracán-2
12	28.90	-95.00	08/18/06Z	100	963	Huracán-3
13	29.70	-95.50	08/18/12Z	80	965	Huracán-1
14	30.50	-96.00	08/18/18Z	40	990	Tormenta tropical
15	31.50	-96.70	08/19/00Z	35	998	Tormenta tropical
16	32.40	-97.40	08/19/06Z	30	1003	Depresión tropical
17	33.30	-98.00	08/19/12Z	25	1006	Depresión tropical
18	34.40	-98.50	08/19/18Z	25	1009	Depresión tropical
19	35.40	-99.00	08/20/00Z	20	1010	Depresión tropical
20	36.50	-99.40	08/20/06Z	20	1011	Depresión extratropical
21	37.60	-99.20	08/20/12Z	20	1011	Depresión extratropical
22	38.90	-99.00	08/20/18Z	20	1011	Depresión extratropical
23	40.00	-98.00	08/21/00Z	20	1010	Depresión extratropical
24	41.20	-97.00	08/21/06Z	20	1010	Depresión extratropical

Evento	Día y mes	Hora Zulu	Velocidad viento (Nudos)	(Vmax)^2	Sumatoria de (Vmax)^2	Índice ECA Parcial
						3.14
Huracán "Barry"	23-Ago	18		0	0	
	24-Ago	0		0	0	
	24-Ago	6	40	1600	1600	
	24-Ago	12	50	2500	4100	
	24-Ago	18	50	2500	6600	
	25-Ago	0	45	2025	8625	
	25-Ago	6	40	1600	10225	
	25-Ago	12		0	10225	
	25-Ago	18		0	10225	
	26-Ago	0		0	10225	
	26-Ago	6		0	10225	
	26-Ago	12		0	10225	
	26-Ago	18		0	10225	
	27-Ago	0		0	10225	
	27-Ago	6		0	10225	
	27-Ago	12	35	1225	11450	
	27-Ago	18	45	2025	13475	
	28-Ago	0	60	3600	17075	
	28-Ago	6	60	3600	20675	
	28-Ago	12	65	4225	24900	
	28-Ago	18	70	4900	29800	
	29-Ago	0	40	1600	31400	
	29-Ago	6		0	31400	
	29-Ago	12		0	31400	

Fecha: 23-29 AGOSTO DE 1983
Huracán "BARRY"

Medición	LAT.(°)	LONG.(°)	HORA	VEL (NUDOS)	PRESION (mb)	CAT. EVENTO
1	26.00	-76.00	08/23/18Z	25	1012	Depresión tropical
2	26.80	-76.20	08/24/00Z	30	1011	Depresión tropical
3	27.40	-76.30	08/24/06Z	40	1010	Tormenta tropical
4	28.10	-76.80	08/24/12Z	50	1011	Tormenta tropical
5	28.10	-77.60	08/24/18Z	50	1011	Tormenta tropical
6	28.10	-78.90	08/25/00Z	45	1011	Tormenta tropical
7	28.00	-79.80	08/25/06Z	40	1012	Tormenta tropical
8	27.90	-80.80	08/25/12Z	30	1013	Depresión tropical
9	27.50	-82.00	08/25/18Z	25	1014	Depresión tropical
10	27.00	-83.80	08/26/00Z	20	1013	Depresión tropical
11	26.30	-85.00	08/26/06Z	25	1013	Depresión tropical
12	25.70	-86.30	08/26/12Z	30	1012	Depresión tropical
13	25.20	-87.60	08/26/18Z	30	1011	Depresión tropical
14	25.10	-88.90	08/27/00Z	30	1010	Depresión tropical
15	25.20	-90.20	08/27/06Z	30	1009	Depresión tropical
16	25.80	-91.60	08/27/12Z	35	1008	Tormenta tropical
17	25.80	-93.00	08/27/18Z	45	1002	Tormenta tropical
18	25.70	-94.50	08/28/00Z	60	999	Tormenta tropical
19	25.50	-95.50	08/28/06Z	60	998	Tormenta tropical
20	25.50	-96.40	08/28/12Z	65	993	Huracán-1
21	25.40	-97.50	08/28/18Z	70	986	Huracán-1
22	25.50	-98.50	08/29/00Z	40	995	Tormenta Tropical
23	25.50	-99.50	08/29/06Z	30	1005	Depresión tropical
24	25.50	-100.50	08/29/12Z	25	1010	Depresión tropical

Evento	Día y mes	Hora Zulu	Velocidad viento (Nudos)	(Vmax)^2	Sumatoria de (Vmax)^2	Índice ECA Parcial
						4.27
Huracán "Chantal"	10-Sep	12		0	0	
	10-Sep	18		0	0	
	11-Sep	0	35	1225	1225	
	11-Sep	6	45	2025	3250	
	11-Sep	12	55	3025	6275	
	11-Sep	18	65	4225	10500	
	12-Sep	0	65	4225	14725	
	12-Sep	6	65	4225	18950	
	12-Sep	12	65	4225	23175	
	12-Sep	18	65	4225	27400	
	13-Sep	0	55	3025	30425	
	13-Sep	6	55	3025	33450	
	13-Sep	12	45	2025	35475	
	13-Sep	18	40	1600	37075	
	14-Sep	0	40	1600	38675	
	14-Sep	6	40	1600	40275	
	14-Sep	12	35	1225	41500	
	14-Sep	18	35	1225	42725	
	15-Sep	0		0	42725	
	15-Sep	6		0	42725	

Fecha: 10-15 SEP DE 1983
Huracán "CHANTAL"

Medición	LAT.(°)	LONG.(°)	HORA	VEL (NUDOS)	PRESION (mb)	CAT. EVENTO
1	30.20	-64.40	09/10/12Z	25	1010	Depresión tropical
2	30.90	-64.00	09/10/18Z	30	1008	Depresión tropical
3	31.60	-63.30	09/11/00Z	35	1005	Tormenta tropical
4	32.00	-62.40	09/11/06Z	45	1000	Tormenta tropical
5	32.40	-61.20	09/11/12Z	55	996	Tormenta tropical
6	32.80	-60.00	09/11/18Z	65	994	Huracán-1
7	33.10	-58.90	09/12/00Z	65	994	Huracán-1
8	33.60	-57.60	09/12/06Z	65	994	Huracán-1
9	34.00	-56.30	09/12/12Z	65	994	Huracán-1
10	34.40	-55.50	09/12/18Z	65	994	Huracán-1
11	34.80	-54.90	09/13/00Z	55	1000	Tormenta tropical
12	35.30	-54.50	09/13/06Z	55	1000	Tormenta tropical
13	35.90	-54.20	09/13/12Z	45	1005	Tormenta tropical
14	36.30	-53.90	09/13/18Z	40	1005	Tormenta tropical
15	36.80	-53.80	09/14/00Z	40	1005	Tormenta tropical
16	37.40	-53.80	09/14/06Z	40	1006	Tormenta tropical
17	38.70	-53.80	09/14/12Z	35	1008	Tormenta tropical
18	39.50	-52.50	09/14/18Z	35	1008	Tormenta tropical
19	40.40	-50.70	09/15/00Z	30	1009	Depresión tropical
20	41.70	-48.80	09/15/06Z	30	1009	Depresión tropical

Evento	Día y mes	Hora Zulu	Velocidad viento (Nudos)	(Vmax)^2	Sumatoria de (Vmax)^2	Índice ECA Parcial
						3.57
Tormenta tropical "Dean"	26-Sep	18	35	1225	1225	
	27-Sep	0	35	1225	2450	
	27-Sep	6	40	1600	4050	
	27-Sep	12	40	1600	5650	
	27-Sep	18	40	1600	7250	
	28-Sep	0	45	2025	9275	
	28-Sep	6	45	2025	11300	
	28-Sep	12	50	2500	13800	
	28-Sep	18	50	2500	16300	
	29-Sep	0	55	3025	19325	
	29-Sep	6	55	3025	22350	
	29-Sep	12	55	3025	25375	
	29-Sep	18	55	3025	28400	
	30-Sep	0	55	3025	31425	
	30-Sep	6	55	3025	34450	
	30-Sep	12	40	1600	36050	
	30-Sep	18	30	900	36950	

Fecha: 26-30 SEP DE 1983
Tormenta Tropical "DEAN"

Medición	LAT.(°)	LONG.(°)	HORA	VEL (NUDOS)	PRESION (mb)	CAT. EVENTO
1	28.00	-73.00	09/26/18Z	35	1010	Tormenta subtropical
2	28.50	-72.90	09/27/00Z	35	1009	Tormenta subtropical
3	29.00	-72.80	09/27/06Z	40	1006	Tormenta subtropical
4	29.50	-72.60	09/27/12Z	40	1003	Tormenta subtropical
5	30.30	-72.10	09/27/18Z	40	1000	Tormenta tropical
6	31.20	-71.70	09/28/00Z	45	999	Tormenta tropical
7	32.20	-71.10	09/28/06Z	45	999	Tormenta tropical
8	33.10	-70.70	09/28/12Z	50	1000	Tormenta tropical
9	34.00	-70.70	09/28/18Z	50	1001	Tormenta tropical
10	34.50	-70.80	09/29/00Z	55	1003	Tormenta tropical
11	34.80	-71.00	09/29/06Z	55	1005	Tormenta tropical
12	35.10	-71.50	09/29/12Z	55	1006	Tormenta tropical
13	35.80	-73.00	09/29/18Z	55	1007	Tormenta tropical
14	36.40	-74.00	09/30/00Z	55	1008	Tormenta tropical
15	37.00	-74.90	09/30/06Z	55	1009	Tormenta tropical
16	37.50	-75.80	09/30/12Z	40	1010	Tormenta tropical
17	37.90	-76.90	09/30/18Z	30	1015	Depresión tropical

12.6 ESTADÍSTICAS GENERALES DE LAS TEMPORADAS DE HURACANES EN EL ATLÁNTICO Y DEL ÍNDICE ECA. LAPSO 1851-2011

Océano Atlántico
Estadísticas generales e Índice ECA para cada temporada de huracanes

Año	Número total de tormentas	Huracanes	Huracanes Mayores	Índice ECA
1851	6	3	1	36
1852	5	5	1	73
1853	8	4	2	76
1854	5	3	1	31
1855	5	4	1	18
1856	6	4	2	49
1857	4	3	0	43
1858	6	6	0	45
1859	8	7	1	61
1860	7	6	1	62
1861	8	6	0	50
1862	6	3	0	46
1863	9	5	0	50
1864	5	3	0	27
1865	7	3	0	49
1866	7	7	1	88
1867	9	7	1	60
1868	4	3	0	35
1869	10	7	1	51
1870	11	10	2	88
1871	8	6	2	88
1872	5	4	0	65
1873	5	3	2	69
1874	7	4	0	47
1875	6	5	1	72
1876	5	4	2	57
1877	8	3	1	73
1878	12	10	2	181
1879	8	6	2	64
1880	11	9	2	131
1881	7	4	0	59
1882	6	5	2	63
1883	4	3	2	67
1884	4	4	1	72
1885	8	6	1	58
1886	12	10	4	166
1887	19	11	2	182
1888	9	6	2	85
1889	9	6	0	104
1890	4	2	1	33
1891	10	7	1	116
1892	9	5	0	116
1893	12	10	5	231
1894	7	5	4	135
1895	6	2	0	69
1896	7	6	2	136
1897	6	3	0	55
1898	11	5	1	113
1899	9	5	2	150
1900	7	3	2	84
1901	12	5	0	93
1902	5	3	0	33
1903	10	7	1	102
1904	5	3	0	25
1905	5	1	1	28
1906	11	6	3	163
1907	5	0	0	13
1908	10	6	1	95
1909	11	6	4	92
1910	5	3	1	64
1911	6	3	0	35
1912	7	4	1	56
1913	6	4	0	36
1914	1	0	0	3
1915	6	5	3	127
1916	15	10	5	144
1917	4	2	2	61
1918	6	4	1	40
1919	5	2	1	55
1920	5	4	0	30
1921	7	5	2	87
1922	5	3	1	55
1923	9	4	1	49
1924	11	5	2	100
1925	4	2	0	8
1926	11	8	6	230
1927	8	4	1	56
1928	6	4	1	83
1929	5	3	1	48
1930	3	2	2	50

Océano Atlántico
Estadísticas generales e Índice ECA para cada temporada de huracanes

Año	Número total de tormentas	Huracanes	Huracanes Mayores	Índice ECA
1931	9	2	1	39
1932	11	6	4	136
1933	21	10	5	213
1934	11	6	0	60
1935	6	5	3	95
1936	16	7	1	108
1937	9	3	0	61
1938	8	3	1	73
1939	5	3	1	34
1940	8	4	0	52
1941	6	4	2	61
1942	10	4	1	66
1943	10	5	2	94
1944	11	7	3	96
1945	11	5	3	67
1946	6	3	1	22
1947	9	5	2	112
1948	9	6	4	106
1949	13	7	3	98
1950	13	11	8	243
1951	10	8	5	137
1952	7	6	3	87
1953	14	6	4	104
1954	11	8	2	113
1955	12	9	6	199
1956	8	4	2	54
1957	8	3	2	84
1958	10	7	5	121
1959	11	7	2	77
1960	7	4	2	88
1961	11	8	7	205
1962	5	3	1	36
1963	9	7	2	118
1964	12	6	6	170
1965	6	4	1	84
1966	11	7	3	145
1967	8	6	1	122
1968	8	4	0	35
1969	18	12	5	158
1970	10	5	2	34
1971	13	6	1	97
1972	7	3	0	28
1973	8	4	1	43
1974	11	4	2	61
1975	9	6	3	73
1976	10	6	2	81
1977	6	5	1	25
1978	12	5	2	62
1979	9	5	2	91
1980	11	9	2	147
1981	12	7	3	93
1982	6	2	1	29
1983	4	3	1	17
1984	13	5	1	71
1985	11	7	3	88
1986	6	4	0	36
1987	7	3	1	34
1988	12	5	3	103
1989	11	7	2	135
1990	14	8	1	91
1991	8	4	2	34
1992	7	4	1	75
1993	8	4	1	39
1994	7	3	0	32
1995	19	11	5	227
1996	13	9	6	166
1997	8	3	1	40
1998	14	10	3	182
1999	12	8	5	177
2000	15	8	3	116
2001	15	9	4	106
2002	12	4	2	66
2003	16	7	3	175
2004	15	9	6	224
2005	28	15	7	248
2006	10	5	2	78
2007	15	6	2	72
2008	16	8	5	144
2009	9	3	2	51
2010	19	12	5	165
2011	19	7	3	121
Promedio 1968-2011	11.7	6.2	2.4	94.8

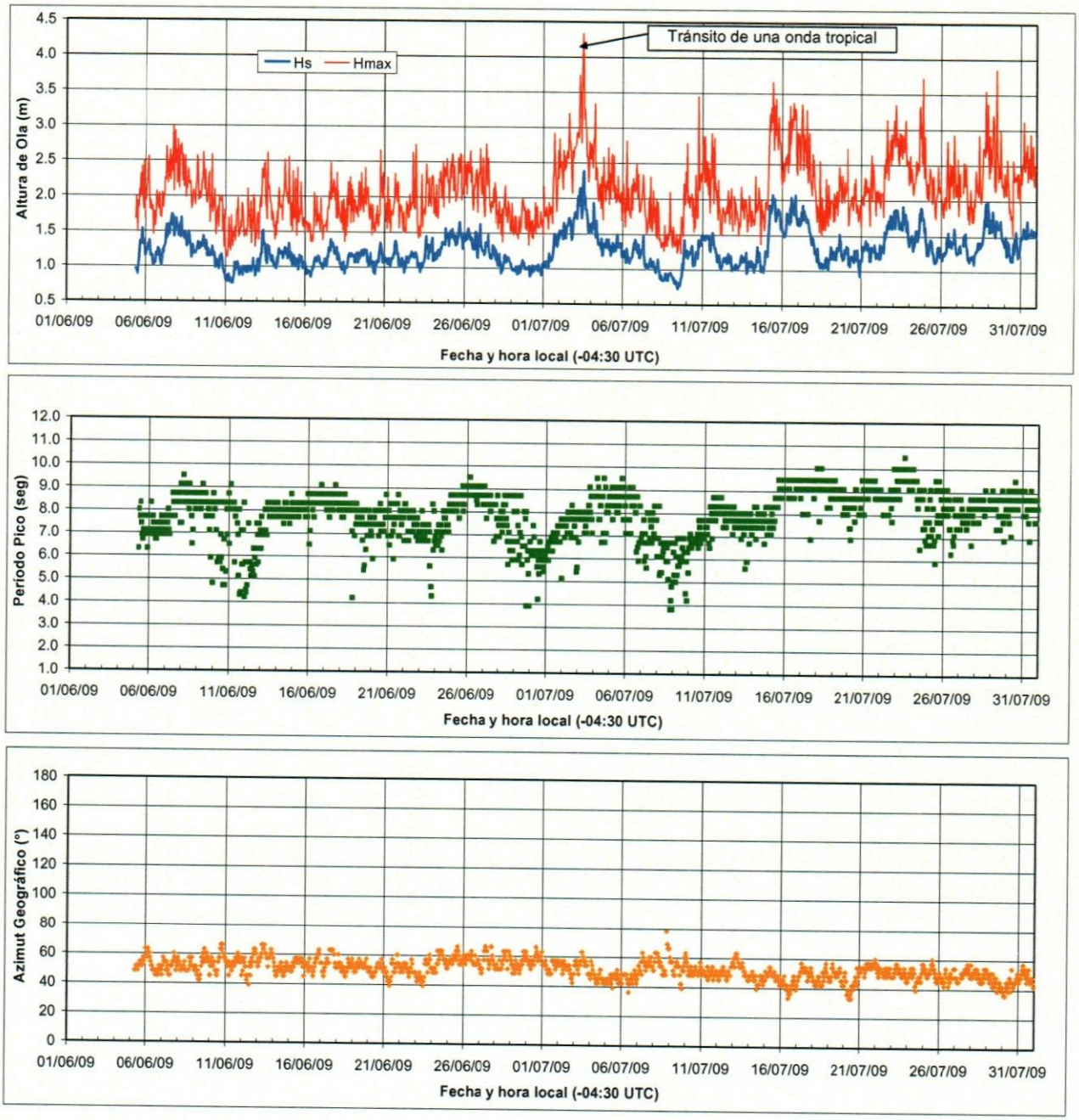
Océano Atlántico
Estadísticas generales e Índice ECA
cada temporada de huracanes (1950-2011)

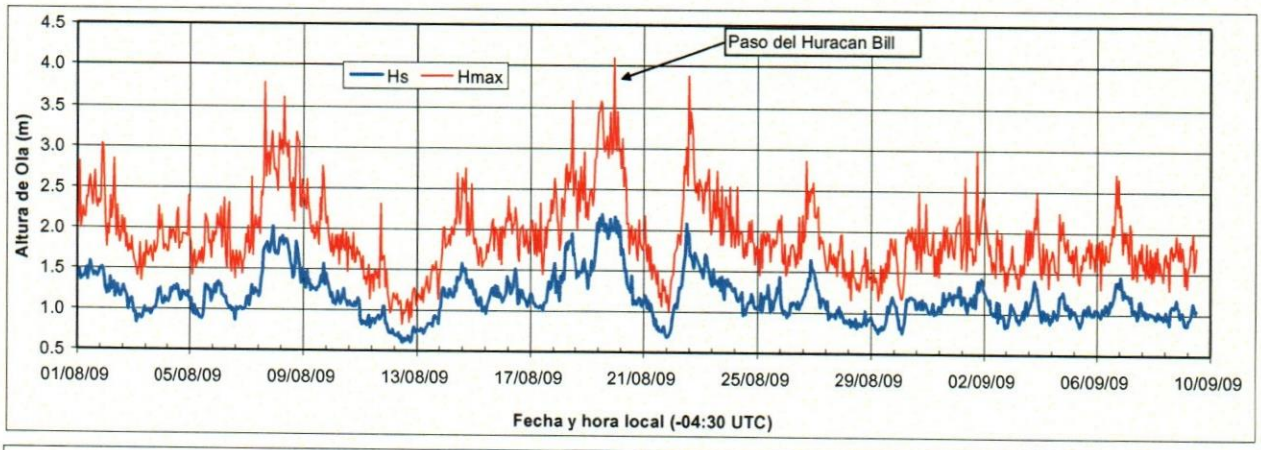
Año	Número total de tormentas	Huracanes	Huracanes Mayores	Índice ECA	Clasificación
1950	13	11	8	243	Por encima
1951	10	8	5	137	Por encima
1952	7	6	3	87	Cercana
1953	14	6	4	104	Por encima
1954	11	8	2	113	Por encima
1955	12	9	6	199	Por encima
1956	8	4	2	54	Por debajo
1957	8	3	2	84	Cercana
1958	10	7	5	121	Por encima
1959	11	7	2	77	Cercana
1960	7	4	2	88	Cercana
1961	11	8	7	205	Por encima
1962	5	3	1	36	Por debajo
1963	9	7	2	118	Cercana
1964	12	6	6	170	Por encima
1965	6	4	1	84	Cercana
1966	11	7	3	145	Por encima
1967	8	6	1	122	Cercana
1968	8	4	0	35	Por debajo
1969	18	12	5	158	Por encima
1970	10	5	2	34	Por debajo
1971	13	6	1	97	Cercana
1972	7	3	0	28	Por debajo
1973	8	4	1	43	Por debajo
1974	11	4	2	61	Por debajo
1975	9	6	3	73	Cercana
1976	10	6	2	81	Cercana
1977	6	5	1	25	Por debajo
1978	12	5	2	62	Por debajo
1979	9	5	2	91	Cercana
1980	11	9	2	147	Por encima

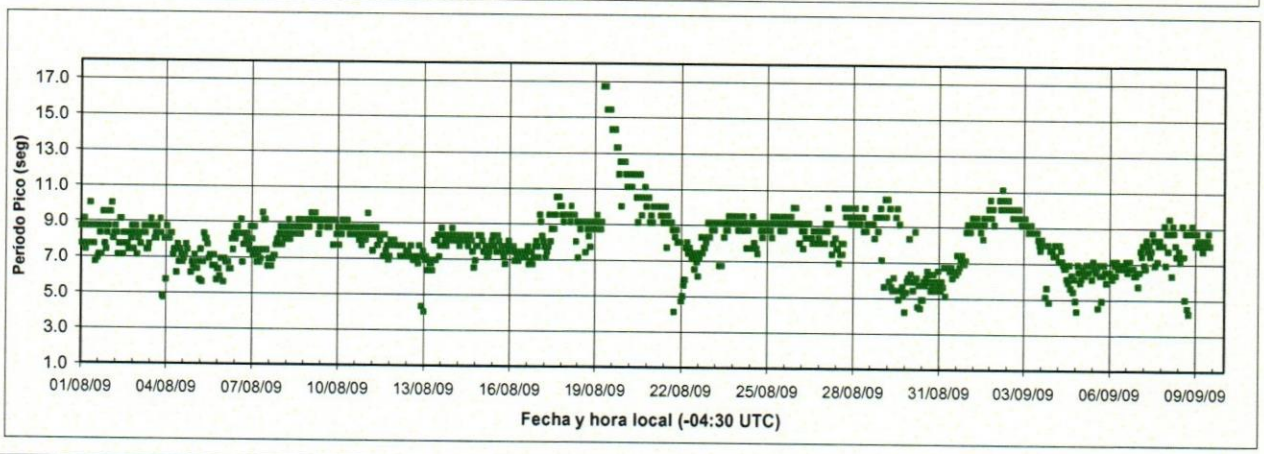
Océano Atlántico
Estadísticas generales e Índice ECA
cada temporada de huracanes (1950-2011)

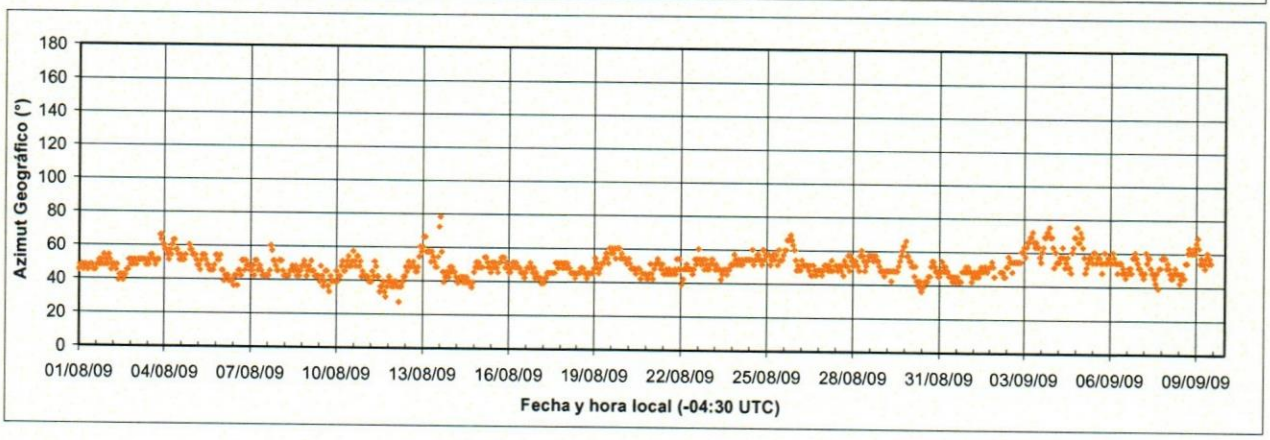
Año	Número total de tormentas	Huracanes	Huracanes Mayores	Índice ECA	Clasificación
1981	12	7	3	93	Cercana
1982	6	2	1	29	Por debajo
1983	4	3	1	17	Por debajo
1984	13	5	1	71	Cercana
1985	11	7	3	88	Cercana
1986	6	4	0	36	Por debajo
1987	7	3	1	34	Por debajo
1988	12	5	3	103	Por encima
1989	11	7	2	135	Por encima
1990	14	8	1	91	Cercana
1991	8	4	2	34	Por debajo
1992	7	4	1	75	Cercana
1993	8	4	1	39	Por debajo
1994	7	3	0	32	Por debajo
1995	19	11	5	227	Por encima
1996	13	9	6	166	Por encima
1997	8	3	1	40	Por debajo
1998	14	10	3	182	Por encima
1999	12	8	5	177	Por encima
2000	15	8	3	116	Por encima
2001	15	9	4	106	Por encima
2002	12	4	2	66	Por debajo
2003	16	7	3	175	Por encima
2004	15	9	6	224	Por encima
2005	28	15	7	248	Por encima
2006	10	5	2	78	Cercana
2007	15	6	2	72	Cercana
2008	16	8	5	144	Por encima
2009	9	3	2	51	Por debajo
2010	19	12	5	165	Por encima
2011	19	7	3	121	Por encima

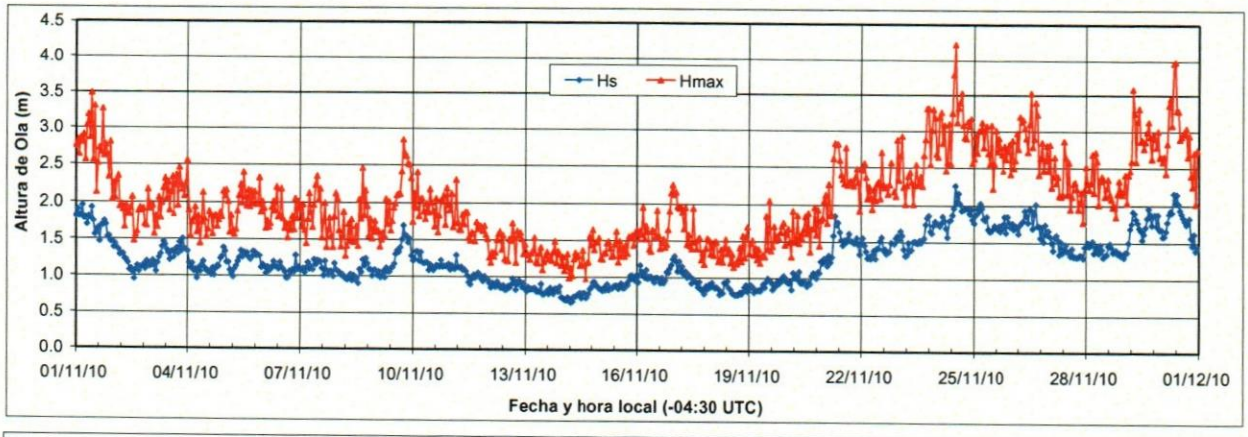
12.7 PERTURBACIONES SOBRE MEDICIONES REALES DE OLEAJE DEBIDO A LA INFLUENCIA DE "MARES DE FONDO", TORMENTAS TROPICALES Y HURACANES

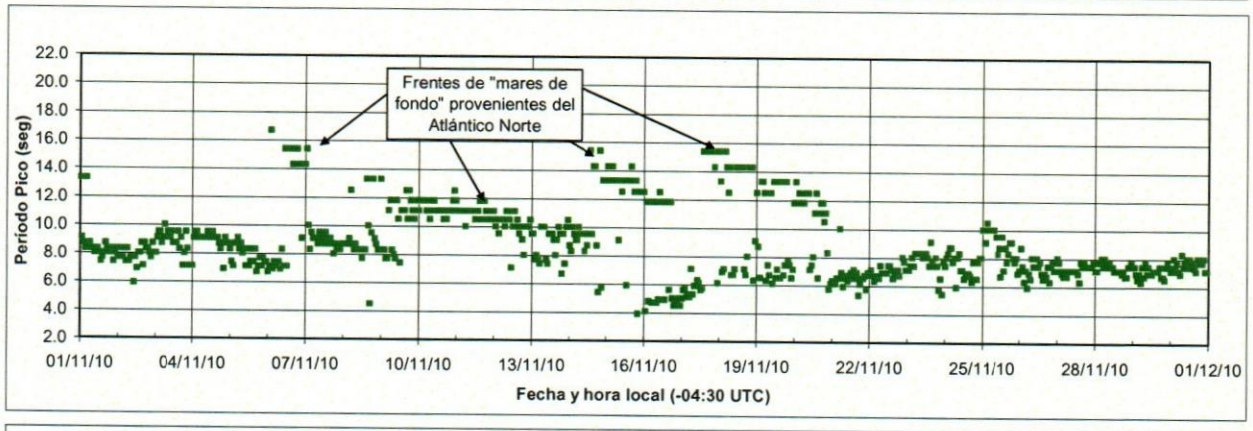


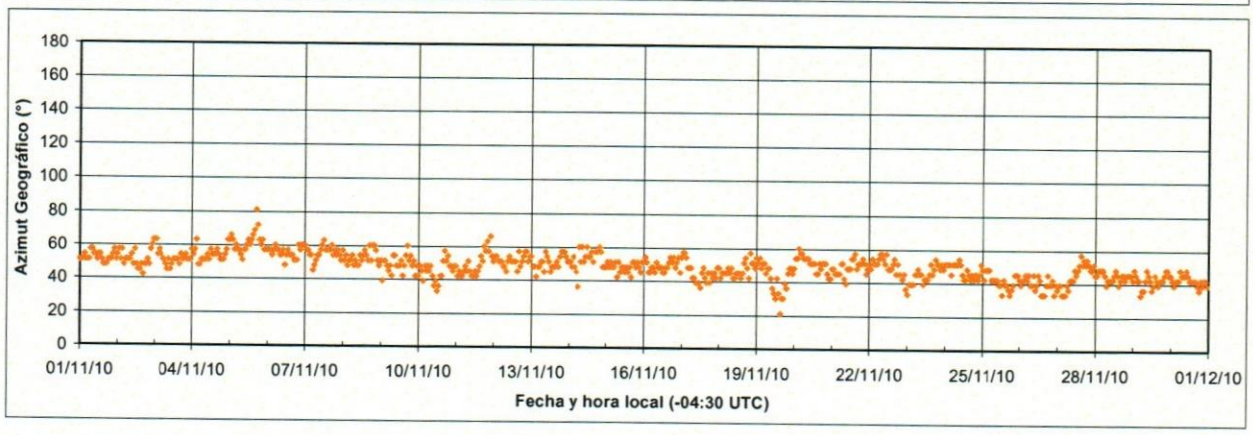

Paso del Huracan Bill
Hs
Hmax
Altura de Ola (m)
4.5
4.0
3.5
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
01/08/09
05/08/09
09/08/09
13/08/09
17/08/09
21/08/09
25/08/09
29/08/09
02/09/09
06/09/09
10/09/09
Fecha y hora local (-04:30 UTC)


Periodo Pico (seg)
17.0
15.0
13.0
11.0
9.0
7.0
5.0
3.0
1.0
01/08/09
04/08/09
07/08/09
10/08/09
13/08/09
16/08/09
19/08/09
22/08/09
25/08/09
28/08/09
31/08/09
03/09/09
06/09/09
09/09/09
Fecha y hora local (-04:30 UTC)


Azimut Geográfico (°)
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
01/08/09
04/08/09
07/08/09
10/08/09
13/08/09
16/08/09
19/08/09
22/08/09
25/08/09
28/08/09
31/08/09
03/09/09
06/09/09
09/09/09
Fecha y hora local (-04:30 UTC)


Hs
Hmax
Altura de Ola (m)
4.5
4.0
3.5
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
01/11/10
04/11/10
07/11/10
10/11/10
13/11/10
16/11/10
19/11/10
22/11/10
25/11/10
28/11/10
01/12/10
Fecha y hora local (-04:30 UTC)


Frentes de "mares de fondo" provenientes del Atlántico Norte
Periodo Pico (seg)
22.0
20.0
18.0
16.0
14.0
12.0
10.0
8.0
6.0
4.0
2.0
01/11/10
04/11/10
07/11/10
10/11/10
13/11/10
16/11/10
19/11/10
22/11/10
25/11/10
28/11/10
01/12/10
Fecha y hora local (-04:30 UTC)


Azimut Geográfico (°)
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
01/11/10
04/11/10
07/11/10
10/11/10
13/11/10
16/11/10
19/11/10
22/11/10
25/11/10
28/11/10
01/12/10
Fecha y hora local (-04:30 UTC)

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aceituno P. y Montesinos A. (1992): "Análisis de la estabilidad de la relación entre la Oscilación Sur y la Precipitación en América del Sur. Proceedings of International Symposium in Paleo ENSO Records, pp. 7-13.

Allan, R.J. (1988): "El Niño-Southern Oscillation influences in the Australasian region". Progress in Physical Geography, 12, pp. 313-348.

Amarasekera K, Lee R.F. y Williams E.R: (1997) "ENSO and the natural variability in the flow of the tropical rivers". Journal of Hydrology, 200: 24-39.

Araya, R. (2004): "El fenómeno El Niño y su influencia en el clima". Revista chilena de ingenieria, Vol. 433.

Begert, M. Shiegel, T. and Kirchhofer, W. (2005):"Homogeneous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000". International Journal of Climatology, 25, pp. 65-80.

Bell, G. at el (2000): "Climate assessment for 1999". Bulletin of the American Meteorological Society, 81, S1-S50.

Bjerkness, V. (1904): "Das problem von der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkt der Mechanik une der Physik". Meteor. Zeitschrift, 21, pp 1-7.

Bjerknes, J. (1966): "A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature". Tellus, 18, pp. 820-829.

Bjerknes, J. (1969): "Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific". Monthly Weather Review, 97, pp. 163-172.

Cardone, V. (1992:" On th estructure of the marine surface wind field". 3rd International workshop of wave Hindcasting and forecasting, Montreal, Quebec, May 19-22, pp 54-66.

Caviedes, C. y Waylen P. (1998): "Respuestas del Clima de América del Sur a las Fases de ENSO". Trabajo presentado en el Seminario Internacional sobre El Niño. Consecuencias climáticas e hidrológicas del evento El Niño a escala regional local. Incidencia en América del Sur. Organizado por el INAMHI de Ecuador y por el ORSTOM de Francia.

Coastal Engineering Manual (CEM), EM 1110-2-1100 Parte II, Abril 2002:

Chavasse D, y Seoane R. (2009):" Assessing and predicting the impact of El Niño Southern Oscillation (ENSO) events on runoff from the Chopin River basin, Brasil". Hydrological Processes, 23:3261-3266.

Corson, W. and et al (1982): "Atlantic coast Hindcast phase II, significant wave information, " WIS Report 6, U.S Army Engineer Waterways Experimental Station, Vicksburg, MS.

Díaz, H.F. y Kiladis, G.N. (1992): "Atmospheric teleconnections associated with the extreme phases of the Southern Oscillation" en Díaz, H.F y Markgraf, V (1992) "El Niño. Historical and Paleoclimatic Aspects of the Southern Oscillation. Cambridge University Press. Cambridge. (pp 7-28).

Deser, C. y Wallace, J.M. (1987): "El Niño events and their relation to the Southern Oscillation:" 1925-1986. J. Geophys. Res., 92, 14189-14196.

Drews, C. (2007: "Hurricane index into Number, intensity and duration". Documento disponible en internet, en http://acd.ucar.edu/~drews/hurricane/SeparatingTheACE.html. Consultado el 26-11-2012.

Emanuel, K. A. (2005): "Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years". Nature, 436, 686-688).

Enfield, D.B. (1992): "Historical and prehistorical overview of the Niño/Southern Oscillation" en Díaz, H.F. y Markgraf, V. (1992) "El Niño. Historical and Paleoclimatic Aspects of the Southern Oscillation. Cambridge University Press. Cambridge. (pp 95-117).

García N. y Mechoso C. (2005):" Variability in the discharge of South American rivers and in climate". Hydrological Sciences, 50: 459-478.

García, M. (2008): "Interpolación de datos batimétricos para simulación numérica de tsunamis históricos ocurridos en las costas venezolanas". Trabajo presentado como tesis de maestría. Universidad Central de Venezuela.

Glantz, M. (1994): "Usable Science: Food security, early warning, and El Niño." Proceedings of the wokshop on ENSO/FEWS, Budapest, Hungary, October 1993. UNEP, Nairobi, NCAR, Boulder, Colorado.

Glantz, M. (1996) "Corrientes de Cambio. El impacto de "El Niño" sobre el clima y la sociedad. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 141.

Glantz, M. (1998): "Lo que sabemos y lo que no sabemos acerca de El Niño". Ensayo presentado en la Universidad de Washington. XXV Aniversario de la Escuela de Asuntos Marino (7-8 de Mayo). Seatte, Washington.

Girishkumar, M. y Ravichandran. M. (2012): "The influences of ENSO on tropical cyclone activity in the Bay of Bengal during October-December". Journal of Geophysical Research, 117, C03040, doi: 10. 1029/2011JC007798.

Grases, J. (1979): "Investigaciones sobre sismos destructores que han afectado el oriente de Venezuela. Delta del Orinoco y regiones adyacentes". Inédito para Intevep S.A. 107 p.

Guevara, J.M. (2008): "El ABC de los índices usados en la identificación y definición cuantitativa de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO)". Terra, Nueva Etapa, Vol. XXIV, Núm. 35, pp. 85-140.

Hanley D. et al (2003):"A cuantitative evaluations of ENSO indices'. Journal of Climate, 16, pp. 1249-1258.

Hidromet, S.C (1977): "Estimación del regimen del oleaje en las costas venezolanas". Trabajo para la Gerencia General de Desarrollo, del Instituto Nacional de Puertos.

Horel, J.D. y Wallace J.M. (1981): "Planetary scale atmospheric phenomena associated with the Southern Oscillation". Monthly Weather Review, 109, pp. 813-829.

Holton, James R. (1992): "An introduction to Dinamic Meteorology", Academic Press, Third Edition.

Iida, K. (1956):"Earthquakes accompanied by tsunamis occurring under the sea of the islands of Japan". J. Earth Sciences Nagoya Univ., 4, 1-43.

Iida, K. (1970): "The generation of tsunamis and the focal mechanism of earthquakes. In tsunamis in the Pacific Ocean", edited by W.M. Adams, East-West center Press, Honolulu, 3-18.

Imamura, A. (1942): "History of Japanese tsunamis". Kayo-No-Kagaku (Oceanography9, 2, 74-80 (in Japanese).

Imamura, A. (1949): "List of tsunamis in Japan". J. Seismol. Soc. Japan, 2, 23-28 (in Japanese).

Incostas, S.A (2011): "Servicios de adquisición, procesamiento, interpretación de datos meteorológicos y oceanográficos en el campo Corocoro, Golfo de Paria y Plataforma Deltana". Informe Final

IRI (2007): "Overview of the ENSO system: Monitoring. Documento en línea. Disponible en: http://iri.columbia.edu/climate/ENSO/background/monitoring.html.

Kalnay, E. (2003): "Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability". Cambridge University Press, Cambridge.

Kao, H. y Yu, J. (2009): "Constrasting Eastern-Pacific and Central-Pacific types of ENSO". Journal of Climate, 22, pp. 615-632.

Kiem, .A. y Franks, S. (2001): "On the identification of ENSO-induced rainfall and runoff variability: a comparison of methods and indices". Hydrological Sciences-Journal-des-Sciences Hydrologiques, 46(5), October, 2001.

Lagos, P; Silva, T. y Mosquera, K. (2007): "Consideraciones en el Pronóstico de los Eventos El Niño en el Perú.". Foro científico.

Lander, J.F., Whiteside, S.L., Lockridge, P.A. (2002): "A Brief History of Tsunamis in the Caribbean Sea". Science of Tsunami Hazards Journal, 2002.

Lezaun, M. (2003): "Predicciones del tiempo y matemáticas", 2003ko Azaroa.

MacPhaden, M.J. (2004): "Evolution of the 2002/03 El Niño. Amer. Met. Soc., pp 677-695.

MacPhaden, M.J, Zebiak, S.E. y Glantz M.H. (2006): "ENSO as an Integrating Concept in Earth Science". Science, 314: 1740-1745.

Marengo, J., et al (2010): "Recent developments on South America monsoon system". International Journal of Climatology, DOI: 10.1002/joc.2254.

Maturana, J., Bello, M. y Manley, M. (2004): "Antecedentes históricos y descripción del fenómeno El Niño, Oscilación del Sur". Publicación del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA), 2004.

NOAA (1) http://www.research.noaa.gov/climate/observing1.html. Consultado el 31-10-2012.

NOAA (2): Climate Prediction Center-Background Information: The North Atlantic Hurricane Season (http://www.aoml.noaa.gov/hrd/Goldenberg/science01.pdf). Consultado el 03-10-2012

NOAA (3): Página Web del National Hurricane Center. http://www.nhc.noaa.gov/climo/. Consultado el 03-10-2012.

NOAA (2012): "Enso Cycle: Recent Evolution, current, Status and Prediction". Update prepared by Climate Center/ NCEP.

Pui, A., Sharma, A, Santoso A., y Westra, S. (2012). Monthly Weather Review, Vol. 140, pp. 1665-1682.

Purca, S. (2005): "Variabilidad temporal de baja frecuencia en el ecosistema de la Corriente Humboldt frente a Perú". Tesis de Doctorado, Universidad de Concepción, Chile.

Quinn, W.H. y Neal, V.T. (1992): "The historical record of the Niño events". Bradley, R.S y Jones P.D (eds): "Climate Since A.D. 1500"Routledge, Chapman and Hall. Londres. (pp. 623-648).

Ramage, C.S. (1986): "El Niño. VV.AA (1986): El clima. Prensa científica (Col. Libros de investigación y ciencia). Barcelona. (pp. 67-75).

Rasmusson, E.M. y Carpenter, T.H. (1982): "Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño. Monthly Weather Review, 110, pp. 354-384.

Rasmusson, E.M. y Carpenter, T.H. (1983): "The relationship between eastern equatorial Pacific sea surface temperatures and rainfall over India and Sri Lanka". Monthly Weather Review, 111, pp. 517-528.

Richardson, L.F. (1922): "Weather Prediction by Numerical Process". Cambrigde University Press, reprinted Dover, 1965.

Ropelewsky, C. y Halpert, M. (1987): "Global and Regional Scale Precipitation Pattern associated with the El Niño/Southern Oscillation. Monthly Weather Review, 115: 1606-1626.

Sachs, L. (1978): "Estadística Aplicada". Pp. 567, Editorial Labor S.A., Barcelona, España.

Seinfeld, J. y Pandis, S. (1998): "Atmospheric Chemistry and Physics. From air pollution to climate change". J. Willey and Sons, Inc.

Schongart, J. y Junk, W. (2007): "Forescasting the flood pulse in Central Amazonia by ENSO indices". Journal of Hydrology, 335: 124-132.

Sheets, R. (1990): "The National Hurricane Center. Past, Present and Future". Weather and Forecasting. Vol. 5, No 2, pp. 185-231.

Trenberth, K.E. (1984): "Signal versus noise in the Southern Oscillation". Monthly Weather Review. Vol. 112, pp. 326-332..

Trenberth, K.E. (1997): "The Definition of El Niño. Bulletin of the American Meteorological Society, 78, pp. 2771-2777.

Trenberth, K. E., y Stepaniak, D. (2001): "Indices of El Niño evolution". Journal of Climate, 14, pp. 1697-1701.

Trenberth, K.E., y Stepaniak, D. (2001): "A new index of El Niño related to decadal variability". Documento en línea. Disponible en: http://www.decvar.org.newsletter/voll.1/trenberth.html

Troup, A. J., (1965): "The Southern Oscillation". Quart. J. Royal Meteorological Society, 91, pp. 490-506.

U.S Army Corps of Engineers (1984): "Shore Protection Manual. Volume I". Coastal Engineering Research Center.

Valiente, O. (1999): "Evolución en el estudio del fenómeno ENSO (El Niño-Oscilación del Sur): de anomalía local a la predicción de variables climáticas locales". Anales de la Universidad de Alicante. Instituto Universitario de Geografía.

Vecchi, G., y Knutson, T. (2008):" On estimates of historical North Atlantic Tropical Cyclone Actiivity". Journal of Climate, Volumen 21, pp. 3580-3600.

Voituriez, B. y Jacques, G. (2000): "El Niño: Realidad y Ficción". UNESCO, Francia, pp. 142.

Walker, G.T. (1923): World Weather I. Memoirs of the Indian Meteorological Department, 24, pp 75-131.

Walker, G.T. y Bliss, E.W. (1930):·"World Weather IV. Some applications to seasonal foreshadowing. Memoirs of the Royal Meteorological Society, 3, pp 81-94.

Walker, G.T. y Bliss, E.W. (1932):·"World Weather V. Memoirs of the Royal Meteorological Society, 4, pp 53-84.

Ward, E., Evans, D. y Pompa, J (1977): "Extreme wave heights along the Atlantic coast of the United States.", Offshore Technology Conference, OTC 2846, pp 315-324.

Webster, P.J., Holland, J.G, Curry, J.A. y Chang, H.R. (2005):" Changes in Tropical Cyclone Number, Duration and intensity in a Warming Environmental", Science, 309 (5742).

Wolter, K. (1987): "The Southern Oscillation in surface circulation and climate over the tropical Atlantic, Eastern Pacific, and Indian Oceans as captured by cluster analysis". Journal of Applied Meteorology, 26, pp. 540-558.

Wolter, K. y Timlin, S. (1998):" Monitoring ENSO in COADS with a seasonally adjusted principal component index". Proc. of the 17th Climate Diagnostics Workshop, Norman, OK, NOAA/NMC/CAC, NSSL, Oklahoma Clim. Survey, CIMMS and the School of Meteor., Univ. of Oklahoma, pp. 52-57.

Yarnal, B. (1985):"Extratropical teleconnections with El Niño/Southern Oscillation (ENSO) events". Progress in Physical Geography, 9, pp. 315-352.

Yarnal, B. y Kiladis, G. (1985): "Tropical teleconnections associated with El Niño/Southern Oscillation (ENSO) events. Progress in Physical Geography, 9, pp. 524-556.

Young, I.R. (1987): "Validation of the spectral wave model ADFA1,"Res. Rep. 17, Dep. Civ. Eng., Augt. Defense Force Acad., Canberra, Australia.