



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

14  
Lej

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PRONÓSTICO DE TRAYECTORIA DE CICLONES  
UTILIZANDO DATOS ESTADÍSTICOS Y SISTEMAS  
DE PERCEPCIÓN REMOTA EN TIEMPO REAL**

**TESIS**

Como requisito para obtener el título de  
**INGENIERO CIVIL**

Presenta

**ADOLFO CONTRERAS RUIZ ESPARZA**

DIRECTOR DE TESIS

**Dr. RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA**

270751



**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

MÉXICO, D.F.

FEBRERO 1999



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
FING/DCTG/SEAC/UTIT/139/95

Señor  
**ADOLFO CONTRERAS RUIZ ESPARZA**  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **DR. RAMON DOMINGUEZ MORA**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

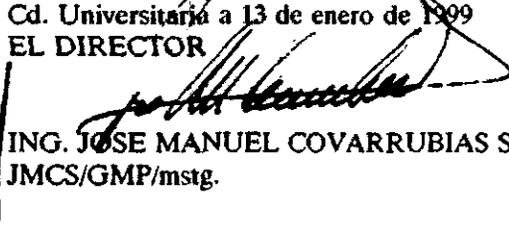
**"PRONOSTICO DE TRAYECTORIA DE CICLONES UTILIZANDO DATOS ESTADISTICOS  
Y SISTEMAS DE PERCEPCION REMOTA EN TIEMPO REAL"**

- INTRODUCCION**
- I. INFORMACION SOBRE CICLONES**
  - II. METODOS DE PRONOSTICO DE TRAYECTORIAS**
  - III. PROGRAMA DE PRONOSTICO DE LOS EFECTOS DE LOS CICLONES EN LA REPUBLICA MEXICANA**
  - IV. APLICACIONES**
  - V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cd. Universitaria a 13 de enero de 1999  
EL DIRECTOR

  
ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS  
JMCS/GMP/mstg.

## **DEDICATORIAS**

*A mis padres Lilia y Moises  
con admiración y respeto*

*A mis hermanos Lilia, Beatriz, Moises y Victoria, por ser los mejores amigos.*

*An Ing. Otto Skorzeny für seinen mut und Schlaueit  
Im Kampf gegen das Unglück.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*En eterna gratitud con la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.*

*A los Doctores Ramón Domínguez Mora, Oscar Fuentes Mariles y Rodolfo Silva Casarín por sus atinados consejos y dirección de este trabajo.*

*A Martha Campos por su apoyo y amistad.*

*A mis Profesores y camaradas de estudio, por su ayuda en mi formación tanto profesional como personal.*

*Al grupo G-15 como reto de superación personal*

*Un especial agradecimiento a las personas del CENAPRED, CFE e Instituto de Ingeniería que de manera desinteresada, ayudaron al desarrollo de este trabajo.*

## INDICE

<b>Introducción</b>	1
<b>Objetivo y Alcances</b>	1
<b>Capítulo I</b>	2
1.1. ¿Qué es un ciclón tropical?	2
1.2. Origen de un ciclón tropical	3
1.3. Estructura vertical de un ciclón tropical	4
1.4. Principales efectos de los ciclones	5
1.4.1 Precipitación	5
1.4.2 Vientos ciclónicos	6
1.4.3 Oleaje ciclónico	7
1.4.4 Marea de tormenta ó surgencia	9
1.5. Trayectorias y regiones de ocurrencia de ciclones	10
1.6. Clasificación de ciclones	12
<b>Capítulo II</b>	13
2.1. Descripción de la información registrada	13
2.1.1 Descripción de la base de datos y criterios de análisis	14
2.2. Descripción de la información que se suministra en boletines meteorológicos por Internet	16
<b>Capítulo III</b>	21
3.1. Método de pronóstico de ciclones tropicales	21
3.2. Estado del arte	22
3.2.1 Modelo barotrópico equivalente	22
3.2.2 Modelo de ecuaciones primitivas	24
3.2.3 Modelo baroclínico	26
3.2.4 Modelos termodinámicos	29
3.2.5 Modelo MRF	29
3.2.6 EXTRACITRO	29
3.2.7 Modelo Hurrell	30
Modelo NHC90 y CLIPER	31
<b>Capítulo IV</b>	32
4.1. Ejemplo de aplicación del modelo Hurakan	32
4.2. Descripción del ciclón Gilberto	32
4.3. Resumen de daños	33
4.4. Pronóstico de la trayectoria del ciclón	34
<b>Capítulo V</b>	45
5.1. Tópicos de ingeniería civil y su interacción con el programa Hurakan	45
5.2. Diseño por viento	45
5.3. Procedimiento para determinar las acciones por viento	48
5.3.1. Determinación de la velocidad de diseño $V_D$	48
5.3.2. Categoría de terrenos y clases de estructuras	49
5.3.3. Mapas de isotacas o consulta a la base de datos	50

5.3.4. Cambios del periodo de retorno	54
5.3.5. Presión dinámica en la base $\alpha$	55
5.4. Ayudas para la determinación de la zona federal marítimo terrestre	56
<b>Conclusiones y Comentarios</b>	<b>58</b>
<b>Notas</b>	<b>59</b>
Nota 1. Descripción del criterio de vulnerabilidad	59
Nota 2. Descripción del criterio de velocidad de desplazamiento vs. deflexión	62
Nota 3. Descripción de las consideraciones geográficas	63
Nota 4. Descripción de la relación presión - viento	65
Nota 5. Mareas meteorológicas	66
Nota 6. Análisis estadístico de los eventos históricos	70
Nota 7. Tipo de imágenes meteorológicas disponibles en Internet	73
<b>Bibliografía</b>	<b>76</b>

## **INTRODUCCION**

Anualmente arriban a los litorales nacionales un promedio de veintitrés ciclones tropicales (tormentas tropicales ó huracanes de diferente intensidad), de los cuales catorce se presentan en las costas del Océano Pacífico y nueve en el del Golfo de México y Mar Caribe. La ocurrencia de los mismos se lleva cabo entre los meses de mayo y noviembre. De los ciclones que inciden o se acercan a menos de 100 km, al territorio Nacional, 74 % provienen del Pacífico y el 26 % del Atlántico. Se estima que alrededor de 4 ciclones anualmente como mínimo se introducen al territorio de la República Mexicana.

La alta incidencia de esta clase de fenómenos ocasiona importantes daños económicos, un número importante de damnificados, y la pérdida de vidas humanas. Dado el origen del meteoro resulta imposible evitar totalmente los daños, pero con una alerta oportuna es posible reducir sus efectos negativos para la población expuesta a dicho fenómeno.

## **OBJETIVO Y ALCANCES**

El objetivo de este trabajo es el desarrollo de un programa de computo que tenga la capacidad de pronosticar para diferentes periodos de tiempo la trayectoria a seguir por un ciclón tropical que tenga ocurrencia en el Atlántico y el mar Caribe.

Actualmente existen varios programas de pronóstico de trayectorias pero requieren de un sinnúmero de datos difíciles de obtener para el personal de Protección civil de los estados; una de las particularidades de este proyecto será el de utilizar los datos publicados en Internet en los boletines del Servicio Meteorológico Nacional o de la Comisión Federal de Electricidad, además de que será desarrollado como un paquete modular al cual se le pueda agregar otro tipo de programas de pronóstico.

## CAPITULO 1

### DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO

#### 1.1 ¿Qué es un ciclón tropical?

Reciben el nombre de ciclones tropicales ciertas perturbaciones atmosféricas originadas entre los trópicos en el borde de la mal llamada región de las calmas ecuatoriales (10 a 20° de latitud norte).

Los ciclones tropicales cubren áreas de forma aproximadamente circular; la presión disminuye hacia su centro. Están caracterizados por la circulación de una masa de aire única, de carácter marítimo - tropical, sin frentes. La extensión de los ciclones rara vez supera los 560 kilómetros o 300 millas náuticas de diámetro, y su parte más activa es, a menudo, bastante más reducida.

La variación de presión, en el centro del ciclón es extraordinariamente grande; varía entre los 80 y 120 milibares. El récord de baja presión, para ciclones del Atlántico es de 26.24 pulgadas de mercurio (888 milibares) y fue registrada en el mes de septiembre de 1988, en las costas del caribe durante la ocurrencia del ciclón *Gilberto*. El mínimo absoluto, registrado hasta la fecha, corresponde a una presión de 28.185 pulgadas (887 milibares), cerca de Luzón en las Filipinas, el 18 de agosto de 1927.

El gradiente de presión no es radialmente uniforme, sino que, aumenta al acercarse hacia el centro. Los vientos extraordinariamente intensos que se registran en el huracán, están estrechamente ligados a dicho gradiente y alcanzan su máxima intensidad cerca del centro, debido precisamente a que allí se presenta el mayor gradiente de presión. Dicho efecto esta representado en la *Figura 1.1*; donde se aprecia que mientras el viento sigue la espiral hacia el centro experimenta una desviación creciente hasta que finalmente su trayectoria es circular, sin llegar a alcanzar dicho centro.



**Figura 1.1** El gradiente de presión aumenta hacia el centro de un ciclón tropical. En el hemisferio Norte da lugar a un sistema de vientos, que giran en sentido contrario al de las agujas del reloj.

La región central (de unos 16 a 22 km de diámetro) se encuentra, en calma relativa. A ambos lados de dicha zona, los vientos soplan de direcciones opuestas, las velocidades registradas en los bordes de la zona central alcanzan los 185 a 370 km/h.

La energía del ciclón es mayor conforme aumenta la diferencia de presiones en su centro con respecto a la normal de la periferia exterior. La presión en la periferia es del orden de 1013 milibares (101.3 kPa, 29.92 in Hg), ocurre que mientras menor sea la central, mayor será esta energía.

Los vientos incrementan su velocidad lentamente hacia el centro, pero alcanzan un máximo a una cierta distancia de él, donde sucede una variación muy brusca de los vientos a una zona de calma.

Los ciclones en el hemisferio norte se forman entre los 5° y 15° latitud norte y se desplazan hacia el oeste. Las principales áreas donde se originan los ciclones, (zonas ciclogénicas) que afectan a México son: sonda de Campeche, Caribe oriental (13° latitud norte y 65° de longitud oeste), costas occidentales del Continente Africano, Golfo de Tehuantepec y al sur de las islas Cabo Verde (12° latitud norte y 57° longitud oeste).

## **1.2 Origen de un Ciclón Tropical**

Un ciclón tropical puede considerarse como una máquina térmica sencilla cuyo funcionamiento está determinado por la diferencia de temperaturas que existe entre su centro y la periferia. La columna central está más caliente que la zona de alrededor para mantener la fuerte convección de la cual depende la existencia del temporal.

La energía necesaria para la continuidad de los movimientos violentos, característicos de esta clase de fenómenos, procede del continuo suministro de calor latente de condensación, aportado por los vientos cargados de humedad. En esta máquina térmica, se transforman enormes cantidades de energía térmica en energía mecánica de movimiento, en un breve intervalo de tiempo, lo cual se manifiesta en la intensidad de los vientos.

Es equiparable la energía liberada en el interior de un huracán, en 24 horas, con 10,000 veces el consumo energético diario de la Unión Americana, o bien la energía liberada en el interior de un ciclón mediano durante toda su existencia, equivale a la producida por unas cien mil bombas atómicas de un megatón (ref. METEOROLOGIA, William L. Donn).

Cuando los ciclones penetran en los continentes sufren un proceso de decaimiento energético, el cual puede disiparlos a menos de que reingresen a zonas marinas. Lo anterior pone de manifiesto la importancia que desempeña la humedad, procedente del océano, en el mantenimiento de la energía de los ciclones.

En la actualidad aun no está completamente aclarada la forma en que tiene lugar la concentración de energía que da origen a los ciclones, aunque se han establecido algunas relaciones básicas, deducidas de la gran cantidad de datos obtenidos por observación.

Los ciclones tienen su origen en la zona de calmas ecuatoriales, que son la región de convergencia intertropical. Sólo es posible que se desarrollen en esta zona y a cierta distancia del ecuador, pues debido a que la curvatura del movimiento del viento requiere una fuerza de *Coriolis* adecuada; dicha fuerza es demasiado pequeña en las proximidades del ecuador para que pueda dar lugar al inicio de la circulación ciclónica.

Otro de los factores que dan origen a la formación de ciclones es la alta temperatura de la superficie marina, la cual debe ser mayor a los 26° C (80 ° F); tal temperatura es al parecer indispensable para que pueda producirse un calentamiento del aire inferior. Esto da lugar al establecimiento de un gradiente térmico vertical adecuado para que se provoque y mantenga la convección de un ciclón tropical.

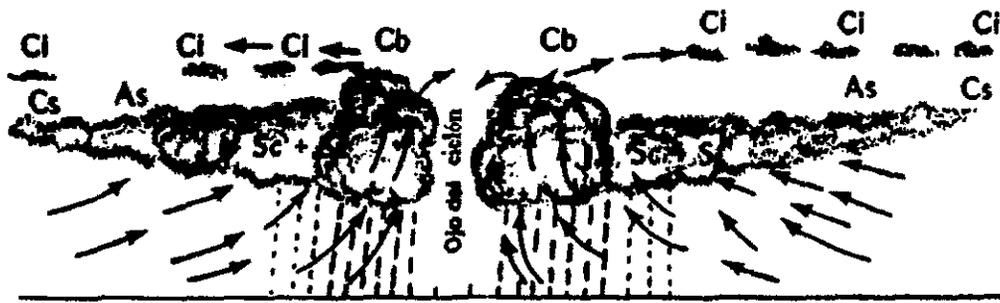
Los ciclones también pueden ser originados por ondas térmicas procedentes del este, que son vaguadas de baja presión en el seno de la corriente de aire de los *alisios* junto con la que se desplazan. Tales ondulaciones son identificables por las discontinuidades que se observan en el movimiento normal de los vientos alisios.

Resumiendo, la generación del ciclón depende de los vientos alisios, la temperatura en el mar, la rotación de la tierra y el hemisferio en el que se presente.

### 1.3 Estructura Vertical de un Ciclón Tropical

Al mismo tiempo que el viento gira en espiral en el interior del centro tormentoso de baja presión, el aire experimenta un movimiento ascendente. Este movimiento es en gran parte casi vertical y tiene lugar alrededor del centro de la tormenta. Como consecuencia, se produce un enfriamiento del aire y este se condensa, pero como se trata de aire marítimo húmedo, se forma una gran nubosidad. El tipo de nubosidad varía desde los cirrostratos en las partes marginales del temporal, pasando por altostratos y nimbostratos, hasta los cúmulonimbos que se originan, alrededor del centro

En el centro, no existe aire ascendente e incluso se llegan a presentar corrientes descendentes. El cielo se presenta relativamente despejado, a esta apertura o eje de cielo claro se le denomina *ojo del temporal*.



**Figura 1.2** En esta figura se presenta un corte esquemático de la estructura de un Ciclón; en el cual se aprecia la zona ascendente, la frontera Cumulonibotica, el centro de calma y la zona de salida de las corrientes.

En la *Figura 1.2* se pueden apreciar los siguientes procesos atmosféricos:

Se advierte en las cimas de los cúmulonimbos centrales la formación de cirrus; tales *cirrus* son arrastrados, por el soplo del viento, hacia afuera de la tormenta y en todas las direcciones, quedando ocultos en un principio tras las propias nubes del temporal y solo son visibles hasta que sobrepasan el borde exterior del ciclón; este tipo de nubosidad es de especial interés en capítulos posteriores a este por el efecto que provocan en el filtrado de fotos de satélite de banda infrarroja.

#### 1.4 Principales efectos de los Ciclones

La peligrosidad de un ciclón tropical puede dividirse en cuatro efectos principales, los cuales en conjunto o de manera independiente provocan daños en las zonas de ocurrencia, estos efectos se enumeran a continuación:

- Precipitación
- Viento Ciclónico
- Oleaje Ciclónico
- Marea de Tormenta

Recientemente se ha descubierto un nuevo factor dañino en la incidencia de los ciclones, este es la ocurrencia de tornados o trombas en la parte frontal derecha de estos fenómenos. Esto se predijo matemáticamente y después se observaron tornados en las imágenes de los radares de efecto Dopler, en las cuales fue posible observar dichos vórtices.

Debe aclararse que la ocurrencia de tornados o trombas esta directamente relacionada con la presencia de cúmulonimbos, los cuales, como se describió en el subcapítulo anterior forman la parte principal del ojo de un ciclón.

##### 1.4.1 Precipitación

Uno de los efectos de los ciclones es el rápido ascenso de las corrientes de aire y la rápida condensación de la humedad, la cual causa de precipitaciones muy intensas, principalmente en la región periférica al ojo del meteoro. La intensidad de la lluvia alcanza

normalmente de 15 a 30 centímetros en 24 horas, pero en casos extremos ha superado las cantidades anteriores.

Los ciclones tropicales, debido a las tremendas cantidades de agua que transportan, juegan un papel relevante en el balance hidrológico terrestre. El contenido absoluto de humedad en la atmósfera es máximo durante el verano como resultado de la fuerte evaporación, debido a las altas temperaturas de la temporada. Los ciclones de otoño, estación en que la temperatura va disminuyendo, en conjunto con los fuertes *ciclones extratropicales* de las latitudes medias, constituyen uno de los mecanismos más importantes que permite la pérdida del exceso de humedad atmosférica acumulada en la época de verano.

De acuerdo con lo escrito anteriormente, queda establecido, que un ciclón a lo largo de su trayectoria se encuentra en un proceso de incorporación de aire húmedo. Cabe hacer mención que del contenido total de humedad, en el interior del ciclón y en cualquier instante sólo unos 50 mm están en forma de agua precipitable, es tan sólo por la adición del aire de alta humedad, por lo que el fenómeno logra desprender a lo largo de su vida, una gran cantidad de agua.

Las fuertes precipitaciones no sólo afectan las regiones en las que se presenta una incidencia directa del ciclón, si no que también las zonas aledañas al paso del mismo, presentan daños por precipitación, pero estos son debidos a efectos orográficos, principalmente en zonas serranas contra las que choca la nubosidad de la parte alta del fenómeno.

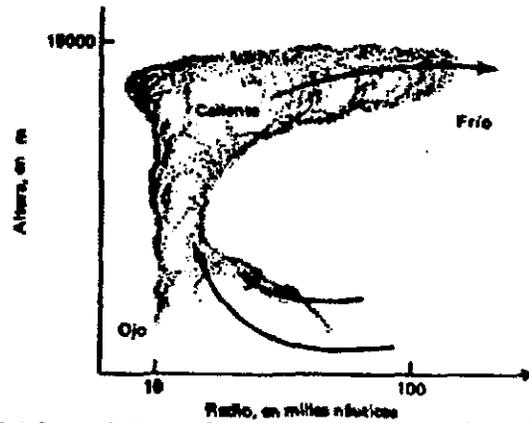
En nuestro país se presenta el efecto antes descrito en las principales sierras, al registrarse una alteración tropical ya sea en el Golfo de México o en el Océano Pacífico. Las fuertes precipitaciones representan un gran riesgo en las regiones altas por los deslizamientos de tierra y en las zonas bajas por inundaciones.

#### 1.4.2 Vientos Ciclónicos

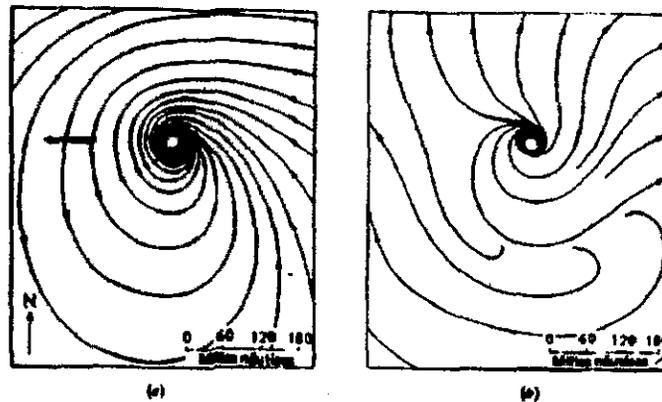
El factor viento es directamente proporcional al gradiente de presión entre las isobaras. Siendo así que a mayor diferencial y menor distancia entre isobaras las velocidades del viento serán mayores. El factor viento se divide en dos tipos: viento sostenido y rachas máximas, siendo el primero el precursor del *mar huracanado* y la *marea de tormenta*.

Dada la magnitud que pueden alcanzar los vientos, sus efectos suelen ser catastróficos para las zonas afectadas y deben ser consideradas tanto en el diseño de obras civiles, como, durante su ocurrencia en el alertamiento de la población civil y a las autoridades de servicios aeroportuarios y de espacio aéreo.

En la *Figura 1.3* se muestra esquemáticamente la altitud y amplitud alcanzada normalmente por un fenómeno tropical. Del gráfico se puede inferir la magnitud del espacio aéreo afectado por el mismo.



**Fig.1.3** Sección vertical - radial de un ciclón, en la que se resumen sus principales características



**Figura 1.4** En este es posible apreciar las líneas de corriente de flujo de aire entrante a 300 m de altura desde el nivel del mar, al interior de un ciclón, y las líneas de corriente de salida a una altura de 13 700 m.

### 1.4.3 Oleaje Ciclónico

Las olas en los océanos, se forman por la acción del viento; por lo cual, las que se originen en el seno de un ciclón alcanzan mayores alturas. La altura de las olas producidas por el viento resulta del efecto combinado de la velocidad del viento y de la persistencia durante la cual ha venido soplando de la misma dirección.

Debido a que un ciclón tiene poca extensión y a que sus vientos siguen trayectorias fuertemente curvadas, su recorrido no suele ser muy grande. Por otra parte, la duración o tiempo en que un viento dado sopla de la misma dirección es también pequeña, sólo exceptuando la parte del temporal en la que la dirección del viento y la del mismo son coincidentes. La región en la que tiene lugar la máxima producción de olas puede determinarse a partir de las *figuras 1.4 b y 1.5*, de la siguiente forma:

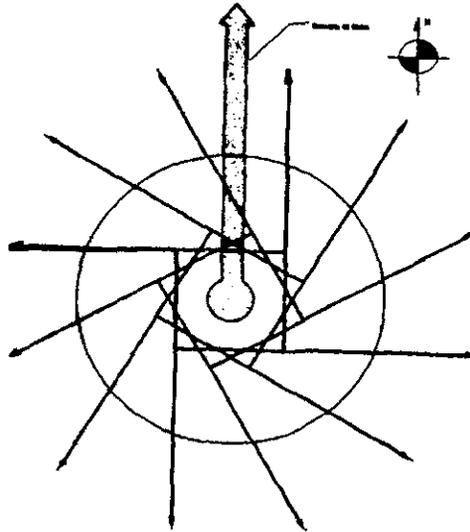


Figura 1.5 Radiación del oleaje de tormenta de un ciclón tropical. La flecha gruesa indica la dirección de desplazamiento del temporal.

Imagine que la línea según se desplaza el ciclón en el hemisferio norte, divide al temporal en dos semicírculos que observados a lo largo de dicha línea de movimiento, se definen como semicírculo de la derecha y de la izquierda respectivamente; el viento en la zona central, así como en la parte derecha superior del cuadrante, sopla paralela o casi paralelamente a la dirección del movimiento, por lo tanto, las olas que se desarrollan en estas zonas serán las que estarán sometidas mayor tiempo y con mayor constancia en dirección a la acción del viento, con lo que serán las que alcanzarán mayores alturas y longitudes, en el seno del ciclón.

En aguas profundas en el Atlántico, se han llegado a registrar olas hasta de 10 a 12 m, y en ciclones en el Pacífico se han registrado hasta por encima de los 14m. Por el contrario, las olas que se desarrollan en el cuadrante izquierdo posterior, se desplazan en dirección opuesta a la del movimiento del temporal, por lo que experimentan por menos tiempo los efectos del viento, tanto en duración como en recorrido y son por lo tanto las que alcanzan menor altura entre todas las que se originan en el ciclón. Ocurre también, que la velocidad del viento en el semicírculo de la derecha supera a la del lado izquierdo, lo que contribuye aún más a que la altura de las olas sea superior en esta parte del ciclón.

A veces, las olas producidas en partes distintas del ciclón llegan a cruzarse entre sí, en tales casos las olas originadas por la interferencia alcanzan alturas superiores a cualquiera de las ondulaciones que interfieren. A pesar de que existen registros de olas de este tipo que alcanzaron hasta los 17 m en el Atlántico y superiores a los 18 m en el Pacífico, no suelen ser muy comunes y se desarrollan tan sólo de forma esporádica en temporales particularmente violentos, cuando las condiciones para la interferencia resultan adecuadas.

Un análisis, más detallado, de los diagramas que ilustran la trayectoria del viento en un ciclón tropical, pone de manifiesto que las olas que se desarrollan en el seno de la zona del temporal deben viajar radialmente hacia fuera, alejándose del ciclón. Esto ocurre incluso para aquellas olas de altura máxima que se engendran en la parte derecha y que se mueven

paralelamente a la dirección del ciclón; como las olas se desplazan con una velocidad igual a una fracción bastante grande de la propia velocidad del viento, en realidad avanzan mucho más rápido que el ciclón, e incluso las que se producen en el lado derecho muy pronto cruzan la zona del temporal y le superan en su avance. Mientras se encuentran bajo la influencia del viento, en el seno del ciclón, las olas son irregulares y, a menudo, de aspecto confuso; pero tan pronto como emergen de tal zona, se hace el oleaje más regular y con crestas más largas, a la vez que van disminuyendo lentamente de altura, dando lugar a lo que se conoce como *mar de fondo ó marejadas*.

#### **1.4.4 Marea de Tormenta ó Surgencia**

Los mayores daños causados por los ciclones, en virtud de sus efectos destructivos, tanto para las vidas humanas como para las propiedades, no siempre son debidos a los vientos, ni a las precipitaciones extremas, sino a los efectos de las inundaciones que generalmente acompañan a un ciclón cuando penetra sobre una zona costera tanto continental como de una isla. Lo anterior es debido a una subida del nivel del mar que es conocido como *marea de tormenta*.

El fenómeno se debe principalmente a dos factores: el viento y a la disminución de la presión debida al ciclón. La disminución de la presión, origina el ascenso del nivel del mar, a modo de barómetro invertido; otra parte del fenómeno se origina si la profundidad de las aguas en el lugar de incidencia es la adecuada, el montículo central de agua formado por el oleaje, al acercarse a la playa comienza a comportarse como una onda de gran periodo (igual que las mareas o Tsunamis), ocasionando una sobre elevación que puede superar los 4 m.

En estudios recientes se ha encontrado que la marea de tormenta depende más de las condiciones de viento que la presión en el centro. La sobrelevación se origina por la acumulación de agua provocada por el oleaje (ver nota 5).

El fenómeno anterior puede verse magnificado si coincide el arribo del ciclón con la marea gravitacional máxima (pleamar), y la suma del oleaje ciclónico, el cual debido a la sobrelevación puede romper tierra adentro y aumentar los daños en las zonas donde inciden.



Figura 1.6 Efecto de la surgencia en construcciones costeras cercanas a la línea de playa

### 1.5 Trayectorias y Regiones de Ocurrencia de Ciclones

En general todos los ciclones tienen su origen en las inmediaciones del ecuador. Al principio se desplazan lentamente alejándose del ecuador, pero con el flujo de aire tropical del este van desarrollando una trayectoria curvilínea oeste - noroeste en el hemisferio norte. Normalmente, dicha trayectoria se curva de nuevo hacia el noreste, cuando los ciclones se encuentran con flujos de Poniente, tras cruzar las latitudes de los caballos (30-35° latitud Norte), con lo cual la trayectoria total adquiere una forma parabólica. Antes del segundo cambio de curvatura, los ciclones están animados de una velocidad de avance relativamente pequeña (de unos 18.5 a 22.3 km/h en promedio), pero tras en cambio de curvatura el movimiento se acelera, hasta alcanzar una velocidad media de 37 a 56 km/h, aunque se han registrado casos de ciclones que han alcanzado los 111 km/h, como los que se presentaron en la cuenca del Atlántico en 1938 y 1944.

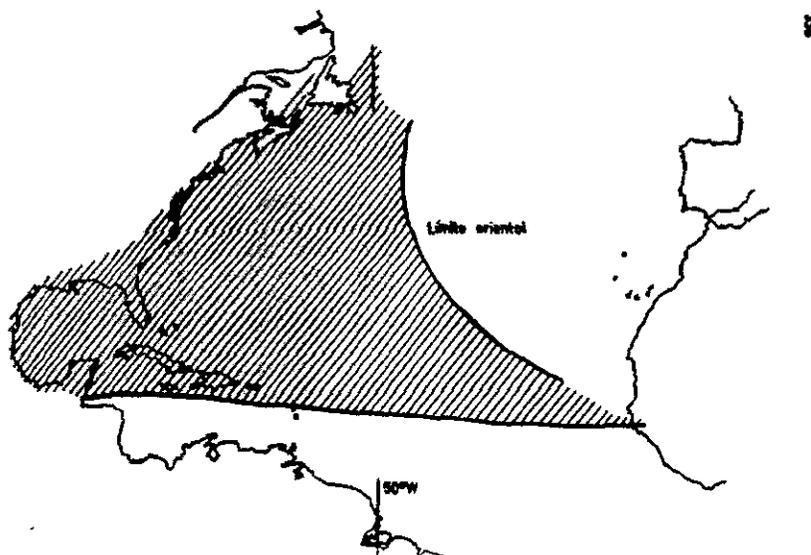


Figura 1.7 Zona ciclogénica del Atlántico en el hemisferio norte

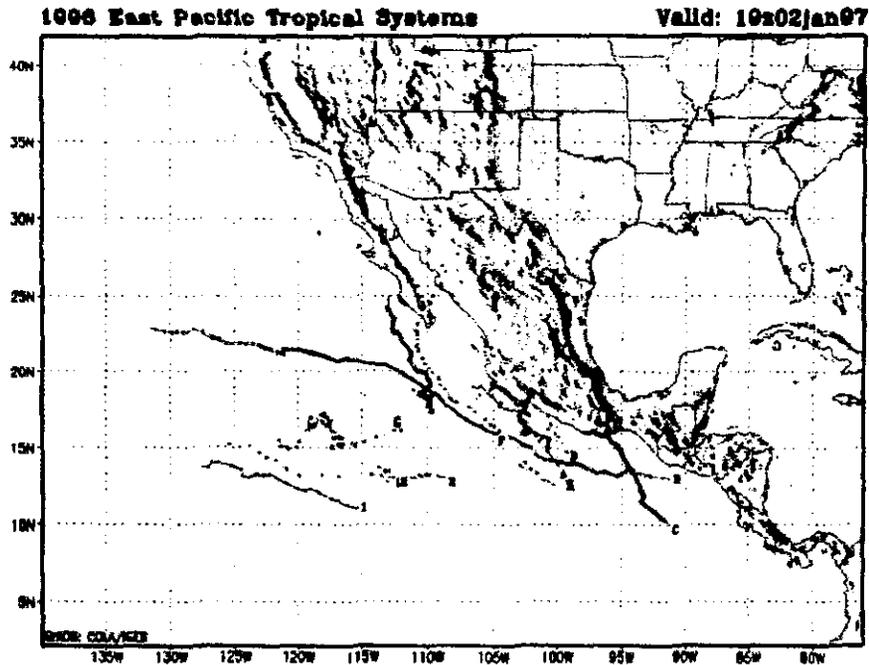


Figura 1.8 Zona ciclogénica del Pacífico en el hemisferio norte, eventos de 1996

Finalmente los ciclones se mezclan con ondas ciclónicas extratropicales, perdiendo su propia identidad e intensidad. Aunque los ciclones tienden a seguir trayectorias bajo la influencia primero de los vientos alisios y luego de los ponientes, la trayectoria propia de un ciclón está también controlada por la circulación del aire superior (500 y 250 milibares), que con frecuencia involucra la presencia de fuertes celdas de baja y alta presión junto al suelo (1000 milibares), pero cuyos efectos se hacen sentir en altura; una región con alta presión muy acusada, especialmente al norte de las latitudes de los caballos, puede bloquear la curvatura normal del ciclón, dando lugar a que el temporal resulte desviado hacia el oeste, siguiendo la circulación alrededor de la corriente de alta presión antes mencionada. Muchos ciclones de las Antillas resultan, en virtud de tal proceso, desviados y dirigidos, directamente, hacia el norte a la costa oriental de los Estados Unidos, alrededor del borde occidental del anticiclón bien desarrollado, en lugar de experimentar el cambio de curvatura que los haría dirigirse de nuevo hacia el mar.

La Figura 1.9 muestra, las trayectorias de ciclones en el Atlántico en 1996

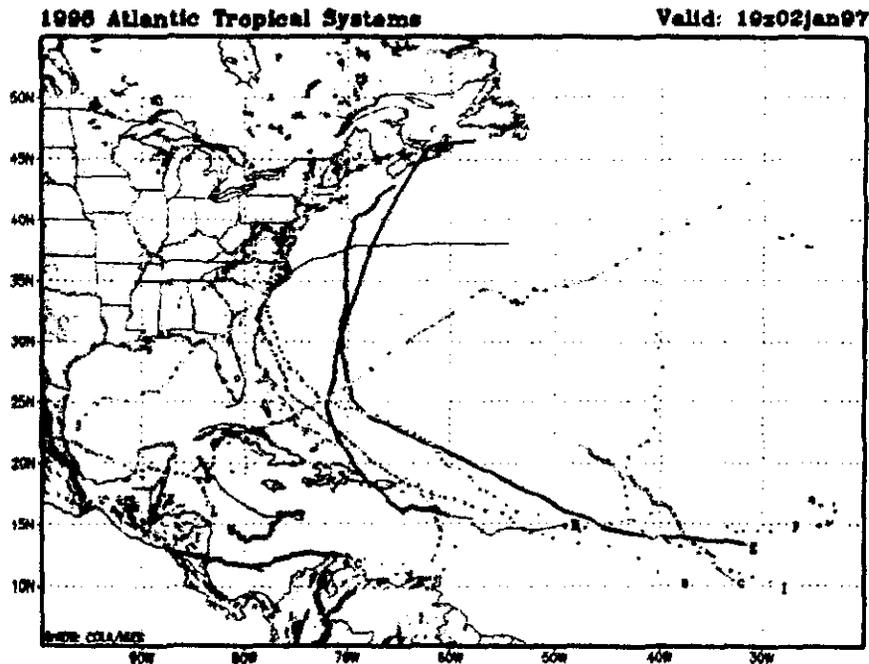


Figura 1.9 Trayectoria en el Atlántico en 1996

### 1.6 Clasificación de Ciclones

La O.N.U. bajo la representación de su organismo la O.M.S. propone una escala cuantitativa, en un intento por estandarizar los criterios en la evaluación de los riesgos que representan los ciclones. Esta escala es la *Saffir-Simpson*, la cual toma como principal parámetro la presión central, ya que es fundamental para determinar la intensidad del ciclón Tabla 1.1

CATEGORÍA	PRESIÓN CENTRAL (mb)	VIENTOS (km/h)	MAREA DE TORMENTA (m)	CARACTERÍSTICAS
Perturbación Tropical	1008.1 a 1010			Ligera circulación de los vientos
Depresión Tropical	1004.1 a 1008	< 62		Localmente destructivo
Tormenta Tropical	985.1 a 1004	62.1 a 118	1.1	Presenta efectos destructivos
Huracán categoría 1	980.1 a 985	118.1 a 154	1.5	Altamente destructivo
Huracán categoría 2	965.1 a 985	154.1 a 178	2.0 a 2.5	Altamente destructivo
Huracán categoría 3	945.1 a 965	178.1 a 210	2.5 a 4.0	Extremadamente destructivo
Huracán categoría 4	920.1 a 945	210.1 a 250	4.0 a 5.5	Extremadamente destructivo
Huracán categoría 5	< 920	> 250	> 5.5	El más destructivo

Tabla 1.1 Escala de intensidades propuesta por Saffir – Simpson

## **CAPITULO 2**

### **2.1 Descripción de la información registrada**

Debido a la frecuencia en la ocurrencia de ciclones tropicales en los litorales Mexicanos el Servicio Meteorológico Nacional, creó una base de datos de los mismos en la cual se tiene registro a partir del año de 1886.

En esta base de datos se tiene registrada la velocidad del viento, día y hora de la observación, así como la ubicación de la misma. Se observa que solo a partir de 1949 la ubicación, y demás datos comienzan a ser confiables, lo anterior a raíz de la utilización de los datos de las estaciones meteorológicas, buques y aviones caza huracanes.

Por lo mencionado anteriormente se creó una nueva base de datos utilizando los registros de 1949 a 1995, los cuales fueron vaciados en una base de datos ACCESS para Windows 97, que contempla los siguientes parámetros:

1. Lugar de ocurrencia:
  - Pacífico
  - Atlántico
2. Nombre del Fenómeno
3. Fecha del Registro
4. Hora del Registro
5. Longitud del centro del Ciclón
6. Latitud del centro del Ciclón
7. Velocidad del viento sostenido en el centro del Ciclón
8. Presión en el Centro del Ciclón

El intervalo de tiempo entre avisos no es constante pero en promedio es de 6 horas.

De los datos anteriores se calculan los siguientes datos:

1. Velocidad de desplazamiento del ciclón, para lo cual se considera la distancia recorrida sobre el geoide, en el intervalo de tiempo entre avisos sucesivos.
2. Dirección del Ciclón en grados con respecto al norte, la cual se calcula con la posición entre avisos sucesivos.

A continuación se muestra una tabla con los datos de un ciclón:

"Roxanne"							
Fecha	Hora [GMT]	Lat [° N]	Long [° W]	V <sub>vento</sub> [kph]	Presión [mb]	V <sub>vento</sub> [km/h]	Dirección [°]
10/08/95	21:00	16	-82.3	55.56	1003		
10/09/95	3:00	16.5	-83.3	55.56	1003	41.30	296.57
10/09/95	9:00	17.5	-83	64.82	1003	19.26	16.70
10/09/95	15:00	18.2	-82.9	74.08	1000	13.05	8.13
10/09/95	21:00	18.8	-83	101.86	990	11.23	350.54
10/10/95	3:00	19.4	-84.1	111.12	989	46.19	298.61
10/10/95	9:00	19.9	-85	129.64	985	19.00	299.05
10/10/95	15:00	19.5	-85.5	166.68	972	11.83	231.34
10/10/95	21:00	20.1	-86.4	175.94	963	19.94	303.69
10/11/95	3:00	20.2	-87.8	157.42	965	51.98	274.09
10/11/95	9:00	20	-88.9	138.9	975	20.69	259.70
10/11/95	15:00	19.9	-89.5	120.38	987	11.26	280.54
10/11/95	21:00	19.7	-90.6	120.38	987	20.69	259.70
10/12/95	3:00	19.2	-90.9	120.38	990	21.52	210.96
10/12/95	9:00	19.4	-91.4	120.38	990	9.96	291.80

Tabla 2.1 Registro de datos para el ciclón Roxanne en el año de 1996, puede observarse los datos registrados por el Servicio Meteorológico Nacional, así como la dirección y velocidad de desplazamiento estimada.

Aun considerando los datos de registro a partir de 1949, en muchos casos se carece, de información de presión central, principalmente debido a lo complicado que resulta medir en el interior de dichos fenómenos. Por lo anterior como si se disponía de datos de viento máximo sostenido en el centro se desarrollo un programa que utiliza la velocidad máxima de viento sostenido (Vm), para estimar el dato de presión central (Pc), utilizando la escala de Saffir - Simpson.

### 2.1.2 Descripción de la Base de Datos y Criterios de Análisis

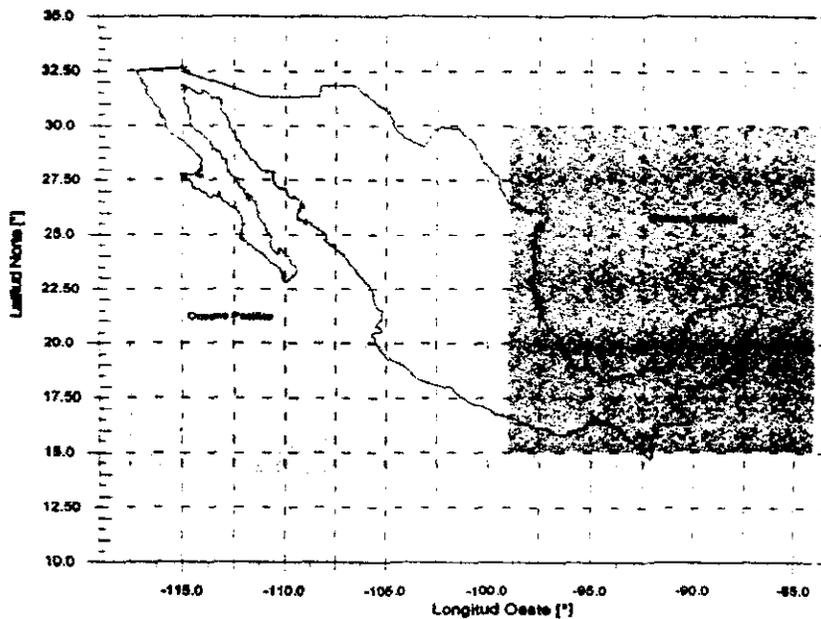
La base de datos quedo constituida con un total de 647 eventos registrados en el Pacífico y 475 en el Atlántico. Debido a que el objetivo de este trabajo es el desarrollo de un programa de pronóstico para el Atlántico, solo será descrito con detalle la base de datos de esta región.

Partiendo de un registro de 475 ciclones, se cuenta con un total de 13,875 avisos, con intervalos de 6 horas y en algunos casos de 3 horas.

Utilizando la base de datos se analizaron los registros con miras a encontrar indicadores estadísticos basándose en el siguientes criterio:

#### Conservación de Características Dinámicas

Del total de datos que forman la base de datos, se hace un acumulado de eventos por cada grado de longitud - latitud, considerando una malla espacial que va de 15° latitud norte - 85° longitud oeste a 30° latitud norte - 100° longitud oeste, para el Atlántico. La siguiente figura ilustra la zona en estudio:



**Figura 2.1 Zonas de Estudio para el Atlántico**

El análisis dinámico se basa en el hecho de que dadas las características de un ciclón en un instante, este conserve la tendencia de dirección, intensidad, o velocidad de desplazamiento en un lapso de tiempo, a pesar de lo errático de las trayectorias no es común que estos varíen todas sus características radicalmente en lapsos de 3 a 6 horas, este análisis se detalla en las notas (ver nota 6). Con el análisis dinámico se obtuvieron criterios utilizados en el programa Hurakan.

De la consulta de eventos se obtiene la figura 2.2 en la que se observan todos los eventos registrados en la región de estudio, la escala de colores muestra la intensidad registrada en función de la escala Saffir – Simpson.

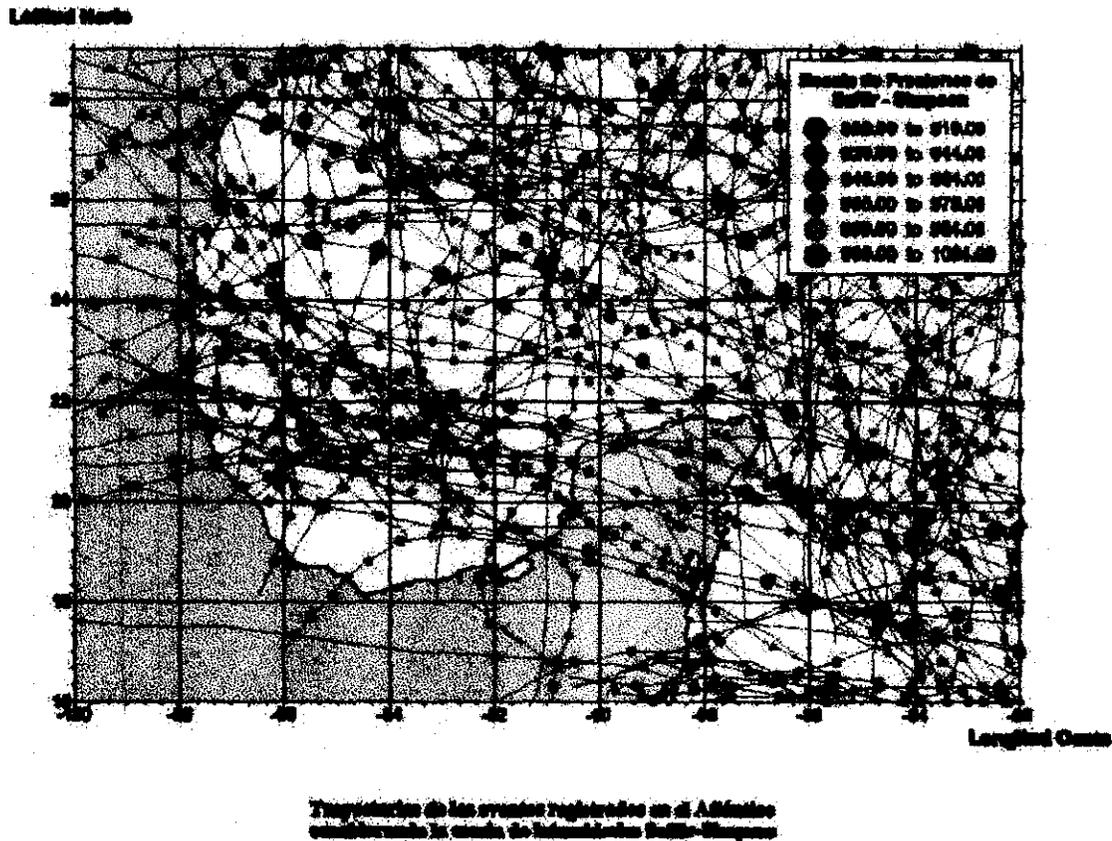


Figura 2.2 Eventos registrados en la región de estudio, en la cual se observa su trayectoria e intensidad en función de la escala S.S.

## 2.2 Descripción de la información que se suministra en boletines Meteorológicos por Internet

La información meteorológica que se presenta en el Internet, abarca boletines, avisos, etc., para prácticamente cualquier punto del planeta, pero en cuanto a monitoreo de ciclones que ocurren en el noroeste del Océano Atlántico, o noreste del Océano Pacífico, existen básicamente tres centros que disponen de mayor confiabilidad en los datos que manejan, estos son el Centro Nacional de Huracanes (NHC de sus siglas en inglés), dependiente de la NOAA, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y el Departamento de Meteorología de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Los tres centros antes mencionados trabajan en conjunto durante la ocurrencia de dichos fenómenos, interpretando los datos recibidos de estaciones meteorológicas, boyas en altamar, datos de buques y aviones en sus rutas de tránsito, fotos de satélites y globos sonda.

Es importante remarcar que durante la ocurrencia de un fenómeno en el Atlántico la NOAA americana despliega una gran cantidad de equipo para el monitoreo constante de los mismos, pues los ciclones provenientes de la zona central del Atlántico, Mar Caribe y Golfo de México son los que mayores daños provocan en los litorales Norte Americanos.

Lo anterior es importante pues el flujo de información durante la ocurrencia de ciclones en el Atlántico es mucho mayor y más confiable que la que se dispone de los eventos en el Pacífico.

A continuación se presentan los boletines emitidos durante la ocurrencia del ciclón Pauline, en el pacífico en el mes de octubre de 1997. El primer boletín corresponde al Servicio Meteorológico Nacional:

## HURACÁN PAULINE

[5 Octubre - 10 Octubre]

El centro del huracán "Paulina" se localizo a las 13:00 (GMT) a 30 km al Nor - noroeste de Acapulco Guerrero, con vientos máximos sostenidos de 165 km/h y rachas de hasta 200 km/h, el huracán mantiene una trayectoria hacia el Oeste - noroeste a 25 km/h. El huracán mantiene una categoría clase 2 en la escala Saffir - Simpson. Por lo que se considera extremadamente peligroso. Se espera el fenómeno pierda intensidad si conserva la dirección actual, con la posibilidad de reintensificación si regresa al mar.

Se emite una alerta general al estado de Guerrero por el paso del intenso huracán Pauline.

## IMAGENES DEL RADAR DE PUERTO ANGEL (Oaxaca) [8 de Octubre 1997]

- Loop de Imágenes Radar 12:00 a 19:45 GMT (438 Kbytes)

● [Regresar](#) a [Página](#) [Índice](#) [SMN](#)

Cualquier comentario relacionado, favor comunicarlo a:  
 Alberto Hernández Unzón [ahunzon@gsmn.cna.gob.mx](mailto:ahunzon@gsmn.cna.gob.mx)  
 Centro Nacional de Previsión del Tiempo. Tel:626-87-33 al 38.

Última Actualización: 31/octubre/1997.

El siguiente es un boletín emitido por el Departamento de Meteorología de la Comisión Federal de Electricidad:



## Aviso del Huracán "Pauline" del Pacífico

No. DE AVISO: 19

FECHA: 9 DE OCTUBRE DE 1997

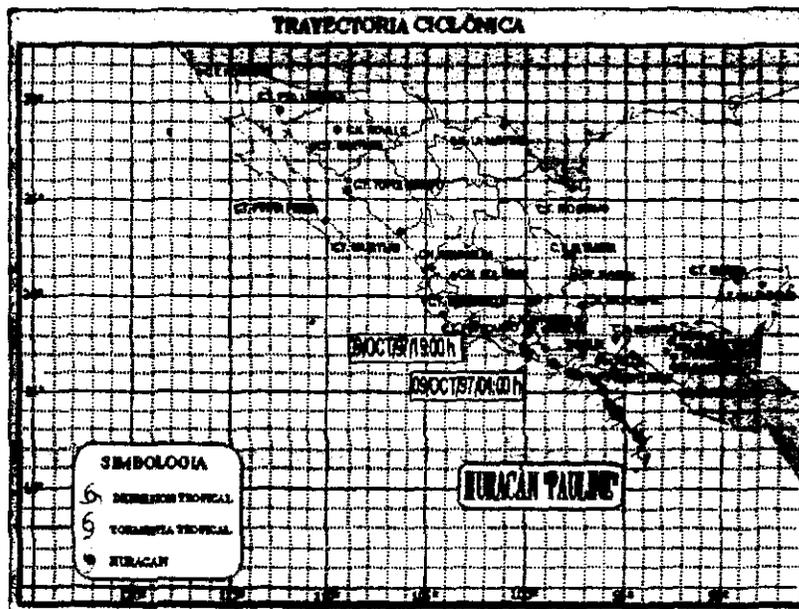
HORA: 07:30



### **SITUACIÓN ACTUAL:**

**El Huracán "Pauline", se mantiene en la categoría no. 2 de la escala de huracanes de Saffir-Simpson, debido a que su centro se mueve en tierra pero muy cerca de la costa; sin embargo, persiste altamente peligroso y amenazante para las costas de Guerrero principalmente.**

El centro del Huracán "Pauline" del Pacífico, se localizó hoy a las 07:00 h local, cerca de 17.4° lat. norte y 100.5° long. oeste, en tierra y muy cerca de la línea costera de Guerrero a 25 km al noreste de Tecpan, Gro., así como a unos 65 km al noroeste de la TG. Las Cruces, Gro. y a 110 km al este-sureste de Zihuatanejo, Gro.; su movimiento actual es ligeramente acelerado hacia el oeste-noroeste a 24 km/h, con vientos máximos sostenidos cerca del centro de 160 km/h y rachas de 200 km/h. Se acompaña de fuerte convección y lluvias en un radio de 300 km a partir de su centro; vientos de huracán de hasta 120 km/h se extienden a una distancia de 55 km en todas direcciones a partir del centro del sistema; en tanto los vientos de tormenta de hasta 63 km/h se extienden a una distancia de 185 km en el sector sur del sistema y a unos 110 km en el sector norte del ciclón, afectando la zona costera de Guerrero y el occidente de Oaxaca, así como a las poblaciones contenidas en estos radios de cobertura; olas de hasta 4 m se extienden sobre costas y altamar hasta una distancia de 300 km a partir del centro del sistema. Su circulación ocasiona entrada de humedad sobre la región del Sureste y Pacífico Sur, favoreciendo nublados con lluvias moderadas a fuertes y vientos fuertes a intensos sobre dichas regiones y principalmente en costas de Chiapas, Oaxaca y Guerrero; aumento de nublados y lluvias en el sur de la región Golfo, así como en el Valle de México y zonas de los alrededores.



### PRONÓSTICO:

Se espera que de acuerdo a los análisis y el último modelo de trayectoria, el centro del peligroso e intenso Huracán "Pauline", continúe moviéndose en tierra hacia el oeste-noroeste y muy cerca de la línea costera de Guerrero, sufriendo una ligera disminución en su intensidad debido a la interacción que mantiene con la parte continental. (De acuerdo a la escala de huracanes de Saffir-Simpson algunos de los daños potenciales podrían ser daños en los tejados, puertas y ventanas de los edificios y casas, daños considerables a la vegetación, las carreteras costeras se inundan, daños a árboles y postes, etc.); también se espera que a las 19 h local del día 9 de octubre, su centro se localice cerca de 18.5° lat. norte y 102.5° long. oeste a 70 km al noroeste de la Subestación Lázaro Cárdenas, Mich. y a la misma distancia pero al oeste de la CH. Infiernillo, Mich. con vientos máximos sostenidos cerca del centro de 150 km/h y rachas de hasta 190 km/h; vientos de huracán de hasta 120 km/h se extenderán en un radio de 55 km en todas direcciones, en tanto vientos tormenta de hasta 65 km/h se extenderán hasta una distancia de 185 km en el sector sur y a hasta 110 km en el sector norte, afectando a las poblaciones contenidas en dichos radios de cobertura. Se estima que durante el mediodía de hoy, se acerque a Zihuatanejo, Gro. con esta categoría. Se registrarán lluvias de moderadas a fuertes con tormentas intensas aisladas y lluvias acumulables en 24 h, mayores de 150 mm, además de vientos huracanados en las costas de Oaxaca y Guerrero, vientos variables de moderados a fuertes desde Puerto Escondido, Oax. hasta Lázaro Cárdenas, Mich., con posibles inundaciones y deslaves de terreno.

El siguiente aviso se emitirá a las 10:30 horas del día 9 ó antes si ocurre algún cambio significativo.

Para información adicional comunicarse al Tel. (5)543-5544 ó al Fax (5)230-9236



[ Home Page de la GEIC ] [ Índice del Servicio Meteorológico ]

También ponemos a su disposición nuestro buzón de correo 1996 CFE

De los boletines pueden ser extraídos los datos de posición, hora, velocidad del viento máximo sostenido, presión central, velocidad de rachas máximas, velocidad y dirección de desplazamiento, los cuales son la parte fundamental de este proyecto.

## CAPITULO 3

### 3.1 Métodos de Pronostico de Ciclones Tropicales

Una de las tareas más importantes de los grupo de meteorólogos y personal de Protección Civil, observando un ciclón tropical, es la de pronosticar la trayectoria que seguirá en el futuro inmediato, así como la posible evolución de su intensidad. Con lo anterior se podría inferir las posibles zonas de incidencia y con ello realizar las siguientes acciones:

- Evaluar la zona de posible incidencia en tierra, delimitando la zona de peligro para el alertamiento a las autoridades respectivas y a la población en general; esto es esencial para enmarcar las zonas a evacuar.
- Obtener el tiempo disponible para esta incidencia en tierra o para el inicio de condiciones que representen peligro para la población, la infraestructura y los bienes en general; esto sirve para establecer el tiempo disponible para realizar tareas de evacuación y tomar medidas de emergencia.
- Calcular la evolución en el tiempo y la distribución en el espacio de los efectos destructivos asociados con los ciclones tropicales, viento, oleaje, marea de tormenta y precipitación pluvial. Ello se haría para las próximas horas o días y así establecer el tipo de estructuras que estarán en peligro y tomar las medidas pertinentes.
- Definir las zonas interiores (no costeras) que estarán sujetas a las precipitaciones pluviales torrenciales; lo anterior es de importancia para los organismos asignados con la operación de obras hidráulicas, protección contra inundaciones, administración de vías de comunicación, o la toma de medidas en zonas urbanas típicamente afectadas por inundaciones y deslizamientos de tierra.

Obviamente, el tener un pronóstico no significa tener la absoluta certeza de que éste efectivamente se dará, y en dicho contexto, todo pronóstico tiene asociado un grado de incertidumbre.

Normalmente una oficina de pronóstico meteorológico, debe contar con un conjunto de herramientas de pronóstico de trayectoria e intensidad de ciclones tropicales. Estas producen el pronóstico deseado con base en ciertas hipótesis, a veces contradictorias. El nivel de complicación de ellas también cubre un gran rango, para producir un pronóstico con suficiente rapidez para que este sea oportuno.

El pronóstico de una oficina meteorológica, consiste en una combinación subjetiva (de acuerdo al criterio, instinto y experiencia del meteorólogo pronosticador) de una serie de estimaciones independientes obtenidos cada uno de ellos con alguna de las herramientas objetivas con las que cuenta.

## 3.2 Estado del Arte

En la actualidad existen varios modelos de predicción de trayectorias de ciclones, pero estos en general pueden ser clasificados en dos grandes ramas y sus combinaciones, estas son :

Modelos Dinámicos  
Modelos Estáticos

Dentro de los modelos Dinámicos encontramos los siguientes:

- Modelos Barotrópicos
- Modelo de Ecuaciones Primitivas
- Modelos Baroclínicos
- Modelos Termodinámicos
- Modelo MRF

Modelos de tipo Estático:

- EXTRACITRO (Extrapolación de Trayectorias en Ciclones Tropicales)
- HURRAN (Hurricane Analog)
- Modelos CLIPER (Climatology and Persistence)

Modelos de tipo Estático - Dinámicos

- Modelo NHC90 (National Hurricane Center model 90)

### 3.2.1 MODELO BAROTRÓPICO EQUIVALENTE

Este modelo es de interés histórico pues se utilizó en el primer intento exitoso en la predicción numérica del clima. El nombre proviene del hecho que se utiliza un sistema de ecuaciones con variables que no contemplan la variación de la presión en la vertical. Una de las principales suposiciones de este modelo es que en una atmósfera barotrópica la densidad es solamente función de la presión y no de la temperatura, por lo cual en superficies paralelas se presentan condiciones isotérmicas e isobaricas y por lo anterior de igual densidad.

En este modelo todas las superficies de presión se suponen paralelas, por lo que solo debe ser pronosticado un nivel para inferir el comportamiento en las diferentes capas. En la práctica se aplicó en modelos de tres capas con considerables éxitos, las capas han sido principalmente la de 200, 500 y 700 mb.

El modelo barotrópico se basa en el hecho de que la media de la divergencia en una columna de aire que parte de la superficie media del mar, al tope de la atmósfera ( $p = p_0 \Rightarrow p = 0$ ), es al menos un orden de magnitud más pequeño que el monto significativo en cualquier nivel particular.

La compensación anterior en los campos divergentes se refleja en la condición de frontera, lo cual implica que la compensación es completa.

Aunque la divergencia media es imperceptiblemente pequeña, puede ser escrita:

$$\frac{\partial \bar{Q}}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla \bar{Q} = -f \bar{D} = 0 \quad \dots 3.1$$

Donde:

**Q:** Vorticidad media absoluta

**V:** velocidad del viento

**f:** parámetro de Coriolis

**D:** Divergencia en una superficie específica

y la barra significa la media de los valores (con respecto a los intervalos de presión) de toda la columna de aire.

Si se supone que la atmósfera es autobarotrópica (o homogénea e incompresible) entonces, por la ausencia de oscilaciones inerciales  $V$ ,  $Q$  y  $D$  son independientes de la altitud (o presión). De lo anterior se tiene la ecuación:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + V \cdot \nabla Q = -f D = 0 \quad \dots 3.2$$

para cualquier nivel en una atmósfera autobarotrópica.

En la realidad la atmósfera es siempre baroclinica y  $V$ ,  $Q$  y  $D$  varían con la altitud. Por lo anterior la media de la divergencia es mucho más pequeña que el monto significativo de  $D$  en cualquier nivel, por lo anterior debe existir al menos un nivel ( $p = p^*$ ) en cualquier columna de aire en la cual la divergencia  $D$  se desvanezca. Este es el nivel de la no divergencia postulado por Bjerknes & Holmboe.

En el nivel antes mencionado:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + V \cdot \nabla Q = 0 \text{ en } p=p^* \quad \dots 3.3$$

La siguiente suposición en este modelo es de considerable importancia pues se considera que el nivel de no divergencia es constante e independiente de  $x$ ,  $y$  y  $t$ , por lo mismo independiente del movimiento en sí. La anterior suposición implica que la vorticidad en el nivel constante  $p^*$  se conserva, de manera que la atmósfera en este nivel se comporta como si fuera barotrópica. La aplicación de la ecuación 3.3, equivale a el uso de un modelo de atmósfera barotrópica.

El principio de la conservación de la vorticidad absoluta fue enunciado por Rossby *et al.*, y justifica la constancia de el nivel  $p^*$ , basado en la suposición semiempírica de la observación de la variación a lo largo de la vertical del viento, propuesta por Charney.

Estimaciones teóricas y calculadas indican que el nivel al cual la ecuación 3.3 presenta mejores resultados es alrededor de los 500 y 600 mb (5000 a 5500 msnm). Por lo anterior el modelo se utiliza generalmente en el pronóstico de la capa de los 500 mb; como se comento al inicio de este subcapítulo.

La ecuación 3.3 basta para determinar el cambio en modelo del nivel  $p^*$  cuando el campo inicial de movimientos en el mismo es conocido. De lo anterior se infiere que en los modelos barotrópicos el movimiento en otros niveles no tiene afectaciones sobre el movimiento en el nivel en estudio. Además las consideraciones termodinámicas no se consideran en este modelo, por lo cual la ecuación de la energía termodinámica no se utiliza.

Este tipo de modelos simplifican el problema matemático, pero en dicha simplificación se pierde exactitud en los resultados que con el se obtienen. Lo anterior puede notarse al aplicar la ecuación 3.2 a un nivel de presión constante y observando que no existe conversión de energía potencial y energía interna en energía cinética. Como es sabido el desarrollo de ciclones tropicales es un proceso de conversión de energía y el modelo al no tener contemplado este proceso, se vuelve inadecuado para la predicción de la intensificación del fenómeno, pero es útil en el pronóstico de desplazamientos y cambio de forma del sistema de presiones.

### 3.2.2 MODELO DE LAS ECUACIONES PRIMITIVAS

La mayoría de los modelos de ecuaciones primitivas actuales utilizan el sistema un sistema coordinado en el cual el eje vertical se representa con la escala adimensional:  $\sigma = p/p_s$ , el cual permite el desarrollo de un esquema de diferencias en la vertical, el cual conserva la energía y otras propiedades integrales de las ecuaciones de continuidad.

Lorenz en 1960 fue el primero en introducir la conservación de la energía en la formulación de un modelo balanceado en coordenadas de presión. El modelo desarrollado por Arakawa y Lamb (1977) contempla un sistema sigma más general con el fin de obtener mejor resolución en la estratosfera.

$$\sigma = \frac{(p - p_l)}{\pi} \dots\dots\dots 3.4$$

donde:  $\pi_u = p_l - p_r$  para,  $p_r \leq p \leq p_l$   
 $\pi =$   
 $\pi_s = p_s - p_l$  para,  $p_l \leq p \leq p_s$

Donde  $P_l$  y  $P_r$  son constantes, por lo que  $\sigma$ , el cual varía de 1 en  $P_s$  a -1 en  $P_r$ , lo cual obliga a un comportamiento de  $\sigma$  estándar (coordenada de presión normalizada  $\sigma = p/p_s$ ),

Phillips, 1957), bajo  $P_1$  y como coordenada  $P$  sobre  $P_1$  (ver Figura 3.1), el sistema  $\sigma$  estándar es restituido suponiendo  $P_1 = P_T = 0$

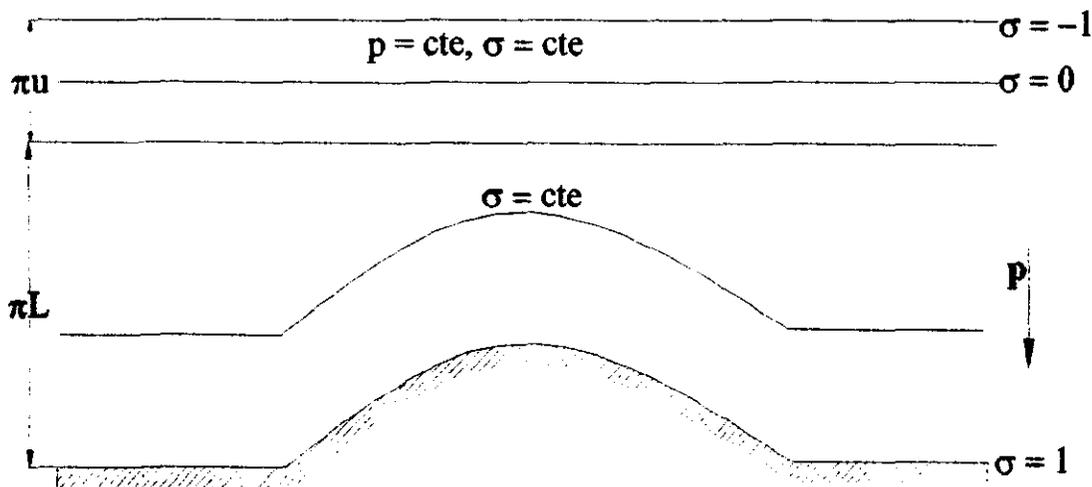


Figura 3.1 Definición de las capas del modelo en función de las coordenadas  $\sigma$  verticales.

El siguiente sistema de ecuaciones con el sistema coordenado  $\sigma$ , se obtiene de la sustitución de  $P_s$  por  $\pi$ , en las siguientes ecuaciones:

$$\frac{dV}{dt} + \nabla \phi + \sigma \alpha \nabla \pi + f \kappa \times V = F \quad \text{Ecuación Dinámica .....3.5}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \sigma} = -\pi \alpha \quad \text{Ecuación Hidrostática .....3.6}$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial t} + \nabla \cdot \pi \nabla + \pi \omega \sigma / \partial \sigma = 0 \quad \text{Ecuación de Continuidad .....3.7}$$

$$c_p \frac{dT}{dt} - \alpha \omega = Q \quad \text{Ecuación de la Termodinámica ....3.8}$$

donde:

F: es la fricción

Q: es la temperatura

$$\omega = \pi \sigma + \sigma (\partial \pi / \partial t + V \cdot \nabla \pi)$$

Puede notarse que algunos términos del sistema de ecuaciones son cero en la frontera superior donde  $\pi$ , es contante.

Las siguientes ecuaciones son simplificaciones de la ecuación hidrostática 3.6

$$\delta(\phi \sigma) = -(\pi \sigma \alpha - \phi) \delta \sigma$$

$$\begin{aligned}\delta\phi &= -RT\delta\ln p \\ &= -c_p\theta\delta(p/p_o)^{\frac{1}{\gamma}} \\ &= c_p\frac{d\ln\theta}{d(1/\theta)}\delta\left(\frac{p}{p_o}\right)^{\frac{1}{\gamma}}\end{aligned}$$

$$\delta(c_pT + \phi) = (p/p_o)^{\frac{1}{\gamma}} c_p\delta\theta$$

donde:

$\theta = T(p_o/p)^{\frac{1}{\gamma}}$ , que es la temperatura potencial y  $\delta$  es la diferencial de presiones en la vertical. Las ecuaciones anteriores se resuelven simultáneamente en cada una de las celdas de la malla con lo que se obtienen las características del flujo atmosférico.

Los modelos de ecuaciones primitivas requieren de datos obtenidos con globos estratosféricos, como temperatura, presión, velocidad y dirección del viento. Los datos se obtienen en tres diferentes niveles con los globos y a nivel de suelo con las estaciones meteorológicas.

El modelo resuelve el sistema de ecuaciones en tres mallas diferentes teniendo como condiciones de frontera la estratosfera y la tierra. Debido a la cantidad de datos y complejidad de los cálculos, los modelos de ecuaciones primitivas requieren de grandes periodos de tiempo de computo en equipos de gran capacidad.

### 3.2.3 MODELO BAROCLÍNICO

En el modelo barotrópico equivalente la advección de la temperatura no se considera y por lo mismo el viento se supone paralelo a las isotermas; además la vorticidad absoluta se conserva en los diferentes niveles.

Por lo anterior la vorticidad absoluta central será esencialmente conservada con la misma intensidad, pero si se considera un modelo de vorticidad relativa, se presentarían variaciones tanto a lo largo como a lo ancho y solo ocurren cambios limitados en la intensidad del sistema de presiones.

Como se explicó en el modelo barotrópico la energía cinética total se conserva por lo que no es el más adecuado para la modelación de sistemas de presión dinámicos en los que se considere el incremento y decaimiento del mismo.

En el modelo baroclínico se considera la componente vertical del viento en la que la advección es posible y de esta manera los gradientes térmicos.

De acuerdo con la relación de viento - temperatura, un gradiente horizontal de temperatura implica esfuerzos cortantes verticales y disminución del viento con la altitud, esta son algunas características que se consideran en cualquier modelo de tipo baroclínico.

A continuación se describe las consideraciones de un modelo baroclínico de predicción de ciclones tropicales a nivel del mar :

1. En primer lugar se asume que el movimiento es adiabático. La invarianza entre la vorticidad advectiva en el nivel no divergente y el efecto de la advección térmica abajo de este nivel debe compensarse en parte por "flotación" y parte por cambios de la vorticidad local a nivel del mar (1000 mb).
2. La velocidad vertical ( $\omega = dp/dt$ ) se supone que se decae en los 1000 mb. Además  $\omega$  varía de manera continua a un valor máximo en el primer nivel de no divergencia, por lo cual podemos asumir que  $\omega$  puede ser expresado por :

$$\omega(x, y, t, p) = \sqrt{2} \omega_0(x, y, t) \sin \frac{\pi}{2} \frac{p_0 - p}{p_0 - p_L}$$

Donde :  $p_0 = 1000$  mb,  $p_L$  es la presión en el primer nivel de no divergencia y  $\omega_0$  es la velocidad vertical en el nivel medio  $\frac{1}{2}(p_0 + p_L)$ .

La tendencia de vorticidad al nivel del mar esta determinada exclusivamente por las condiciones bajo el primer nivel de nodivergencia, por lo anterior la siguiente ecuación solo debe ser utilizada bajo ese nivel ; así  $p_0 \geq p \geq p_L$  y no se suponen restricciones en la velocidad vertical encima del nivel  $p_L$ .

3. Es normal que en los modelos numéricos de pronóstico, asumir que la vorticidad relativa puede asumirse en el termino que contiene la divergencia horizontal. Por lo anterior la ecuación de la vorticidad que se utiliza es la siguiente :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + V \cdot \nabla Q = -fD$$

4. La advección de la vorticidad del viento al nivel del mar se desprecia, entonces la advección de la vorticidad por el viento térmico pertenece al nivel de no divergencia. Así :

$$V_0 \cdot \nabla Q_0 = 0 \text{ y } V_L \cdot Q_0 = 0$$

donde

$V_0$  : velocidad del viento al nivel del mar

$\nabla$  : operador de Hamilton

$Q_0$  : vorticidad absoluta

$V_L$  : velocidad del viento en el primer nivel de no divergencia

De las anteriores suposiciones la primera puede justificarse por referencias de observaciones, la segunda aparenta ser menos justificable, pero el resultado de la integración indica que no son tan significantes dichas suposiciones.

5. Se asume que la hodografía del viento es continua o casi continua, entonces el espesor de la advección  $V_L$  puede sustituirse por la advección del viento a la mitad de la capa, así :

$$V_L \cdot \nabla(Z_L - Z_0) = V_m \cdot \nabla(Z_L - Z_0)$$

donde :

$Z_0$  : altitud inicial con respecto a el nivel medio del mar

$Z_L$  : altitud en el primer nivel de no divergencia

Las experiencias muestran que la utilización de esta última suposición prácticamente no afecta el resultado.

Utilizando las suposiciones 1 a 3 la ecuación de la vorticidad geostrófica para cualquier nivel donde  $p \geq p_L$ , puede escribirse :

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} + V \cdot \nabla \right) \left( \frac{g}{f} \nabla^2 Z + f \right) = - \frac{\pi}{\sqrt{2}} \frac{f \omega_m}{p_0 - p_L} \cos \frac{\pi}{2} \frac{p_0 - p}{p_0 - p_L}$$

además para los niveles  $p$  y  $p_L$  se obtiene respectivamente :

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} + V_{gL} \cdot \nabla \right) \left( \frac{g}{f} \nabla^2 Z_L + f \right) = 0$$

y

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} + V_{g0} \cdot \nabla \right) \left( \frac{g}{f} \nabla^2 Z_0 + f \right) = - \frac{\pi}{\sqrt{2}} \frac{f \omega_m}{p_0 - p_L}$$

donde :

$\nabla^2$  : operador de Laplace

$V_{g0}$  : viento geostrófico al nivel del mar

$V_{gL}$  : viento geostrófico en el primer nivel de no divergencia

$$h = Z_L - Z_0$$

$h$  : es el espesor de la capa

Igual que en los modelos de ecuaciones primitivas y barotrópicos, este tipo de modelos requiere de gran cantidad de datos y equipo de computo de gran capacidad, los pronósticos que resultan con estos modelos son muy precisos en grandes intervalos de tiempo, pero debido a el tiempo de cálculo, en periodos cortos de tiempo pierden utilidad.

### 3.2.4 MODELOS TERMODINÁMICOS

Este tipo de modelos son utilizados por la Universidad de Moscú y por la Universidad de Osaka. Los modelos termodinámicos basan su funcionamiento básicamente en la interacción de dos fenómenos, la temperatura en el mar y sus corrientes y las condiciones meteorológicas en las capas de 500 y 100 milibares.

Como se describió en el capítulo I, los ciclones tropicales solo pueden generarse en zonas marinas con temperaturas mayores a los 26° C, siendo esta su fuente generadora los ciclones muestran una tendencia a seguir, en su trayectoria, las zonas más cálidas del mar, pero su estructura nubosa se ve afectada por las condiciones atmosféricas generales, por lo que estos modelos para pronosticar la trayectoria de un ciclón, primero resuelven una malla basada en la temperatura del mar y sus corrientes, para luego resolver un modelo baroclínico; con la interacción de los resultados de las dos rutinas determinan la posible trayectoria a seguir por el ciclón tropical.

### 3.2.5 MODELO MRF

El programa pronósticos de medio rango (Medium Range Forecast), desarrollado por la National Centers for Environmental Prediction's (NCEP). Este programa cuenta con una subrutina para pronosticar las condiciones atmosféricas a diferentes niveles con fines de navegación aérea (Aviation Run AVR). El programa se basa en un modelo de 28 niveles con coordenadas sigma verticales y un modelo de espectro global con un truncado triangular de 126 ondas; esto incluye una parametrización de la convección, así como un proceso multicapa de fronteras radiales, además de contar con una técnica especial para considerar el inicio de la circulación de ciclones tropicales, donde observaciones de viento sintéticas se agregan a la consideración del sistema global de datos.

Las observaciones sintéticas se obtienen de la sumatoria de una dirección de flujo y un vórtice simétrico. La dirección del flujo se determina a partir del truncado espectral del cual se obtiene un promediado de la velocidad del viento en la vertical, el cual se aproxima al movimiento real del ciclón. El vórtice simétrico en los niveles atmosféricos bajos se obtiene a partir de la presión central estimada, así como del radio y presión de la curva isobárica cerrada más alejada del centro del ciclón

### 3.2.6 EXTRACITRO

El programa EXtrapolación de TRAyectorias en CiclonEs TROPicales, es un desarrollo del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), el cual pronostica la intensidad y trayectoria futuras de un ciclón tropical con base en persistencia pura, es decir, extrapolando el movimiento actual e inmediato pasado del ciclón suponiendo que alguna de sus características se mantendrá constante en el futuro.

El programa incluye la combinación de tres criterios independientes: la velocidad de avance, la dirección de avance y la intensidad del ciclón; esta última con el criterio de la velocidad sostenida del viento. Cada uno tiene dos opciones: el mantener la variable en

cuestión constante con respecto a la últimas dos posiciones conocida, o el mantener el cambio de dicha variable constante con respecto a las dos últimas posiciones conocidas. Esto produce 8 combinaciones posibles para realizar un pronóstico.

El programa EXTRACITRO presenta las siguientes capacidades:

Puede calcular un pronóstico de la trayectoria futura en base a dos criterios combinados, uno sobre la velocidad de avance y el otro sobre la dirección de avance, manteniendo la variable constante con respecto a la última posición conocida, o manteniendo el cambio de la variable constante con respecto a sus dos últimas posiciones conocidas.

Puede calcular un pronóstico de la intensidad (en términos de la velocidad de vientos máximos sostenidos) futura, manteniendo la misma constante o manteniendo el cambio de la misma constante.

Se puede utilizar cualquier combinación de los criterios de pronóstico; la versión actual permite ocho combinaciones posibles (tres criterios independientes con dos opciones cada uno).

Los datos de posición e intensidad presente y pasada no necesariamente deben tener intervalos el intervalo usual de seis horas entre posiciones consecutivas; Incluso este intervalo puede ser arbitrario y puede variar entre posiciones conocidas consecutivas.

Los pronósticos pueden realizarse hasta para 72 horas a futuro, pero despliega las posiciones a intervalos de 6 horas.

### **3.2.7 MODELO HURRAN**

Este modelo fue desarrollado por el Centro Nacional de Huracanes (NHC) perteneciente a la NOAA de los Estados Unidos. El desarrollo estuvo a cargo de los investigadores Hope y Neumann en el año de 1970.

El modelo es de tipo estático por lo que igual que los modelos tipo CLIPER utiliza una base de datos con los registros históricos de todos los ciclones que han ocurrido en los dos océanos desde 1886, el modelo parte de los datos del ciclón estudiado en un instante y identifica de la base de datos todos los ciclones con características similares al actual tanto en tiempo como en espacio. El siguiente paso que realiza el programa es clesionar todas las trayectorias seleccionadas a un origen común que en este caso será la posición del ciclón actual.

Los datos de los ciclones seleccionados y sus posiciones a los diferentes periodos de pronostico son analizados en una distribución normal bivariada, donde el centroide de estas distribuciones representa la trayectoria de pronostico.

Este modelo igual que los tipo CLIPER y NHC90 pueden presentar errores de 0 a 100 millas náuticas en periodos de pronostico de 72 horas, lo cual no es muy diferente a los errores que presentan los modelos dinámicos.

El modelo HURRAN a presentado buenos resultados en el pronóstico de trayectorias de ciclones con trayectorias "normales". En el pronóstico de las trayectorias de ciclones abajo del paralelo 25° antes de la recurvatura (ver figura 1.7), a tenido muy buenos resultados, pues más al norte el modelo comienza a presentar un mayor rango de error en el pronóstico.

A continuación se describen las características y suposiciones del modelo:

La malla en la que se acumulan los eventos es de 2.5° de longitud por 2.5° de latitud, además los datos de los ciclones deben de contener por lo menos 5 días de registro para evitar problemas al manejar los pronósticos de 12 y 72 horas; con lo anterior se aseguran datos para realizar al menos 3 pronósticos de 12 y el de 72 horas, además de la posición 12 horas previas a la posición actual con la que se deriva la persistencia.

### **3.2.8 MODELO NHC90 y CLIPER**

Son modelos estáticos, originalmente se desarrollo el modelo CLIPER (persistencia Climatológica de sus siglas en inglés), el cual junto con una base de datos de los eventos históricos compara e infiere con base a indicadores estadísticos la posible evolución de un ciclón actual.

Los datos de entrada que requiere el modelo CLIPER son longitud y latitud iniciales del ciclón, las componentes del vector de movimiento, el día juliano y la intensidad inicial (Neumann 1972). Los pronósticos de este modelo son ampliamente utilizados para normalizar los de otros modelos, así como punto de referencia y para evaluar la precisión de otros modelos.

El NHC90 es el modelo que más utiliza las salidas del CLIPER en combinación con los promedios en la vertical de las capas geopotenciales (1000 – 100 hPa), obtenidas con los resultados de la subrutina AVN del modelo MRF (descrito antes).

## CAPITULO 4

### 4.1 Ejemplo de Aplicación del Programa Hurakan

El programa Hurakan se calibro utilizando la trayectoria seguida por el huracán Gilberto, la elección de este evento se debió a su intensidad (huracán clase 5), a la gran cantidad de datos medidos, y la magnitud de los daños ocasionados.

La información recabada durante y después del ciclón tropical permitió calibrarlo en función de la distancia y altitud de las poblaciones al centro del fenómeno.

### 4.2 Descripción del ciclón Gilberto

El huracán Gilberto tuvo su ocurrencia en el año de 1988 en el mes de septiembre con una duración de 12 días desde su formación como depresión tropical (8-sep-1988), hasta su disipación (20-sep-1988). El huracán Gilberto registro una presión mínima en su centro de 888 mb, con una velocidad sostenida de 296 km/h y rachas de 319 km/h, lo cual lo hace el ciclón tropical más intenso de este siglo en el océano Atlántico.

A continuación se muestra una tabla con los boletines emitidos por el Servicio Meteorológico Nacional.

Fecha	Hora (GMT)	Latitud [°]	Longitud [°]	Velocidad del Viento [km/h]	Presión Central [mb]	Vel. de Desplaz. [km/h]
12/09/88	18:00	17.9	-76.9	203.72	960	30.11
13/09/88	0:00	18.2	-78.5	203.72	960	30.11
13/09/88	6:00	18.5	-79.7	212.98	952	22.88
13/09/88	12:00	18.8	-81.1	231.5	934	26.48
13/09/88	18:00	19.4	-82.5	259.28	905	28.07
14/09/88	0:00	19.7	-83.8	296.32	888	24.67
14/09/88	6:00	19.9	-85.3	287.06	889	28.01
14/09/88	12:00	20.4	-86.5	268.54	892	23.98
14/09/88	18:00	20.9	-87.8	240.76	925	25.69
15/09/88	0:00	21.3	-89.5	185.2	944	32.25
15/09/88	6:00	21.6	-90.7	166.68	949	22.87
15/09/88	12:00	21.9	-91.7	157.42	950	19.30
15/09/88	18:00	22.1	-92.8	166.68	950	20.69
16/09/88	0:00	22.5	-93.8	185.2	949	19.88
16/09/88	6:00	22.9	-94.8	203.72	946	19.88
16/09/88	12:00	23.7	-95.9	212.98	948	24.94
16/09/88	18:00	23.9	-97	212.98	950	20.69
17/09/88	0:00	24.4	-98.2	148.16	964	23.95
17/09/88	6:00	24.8	-99.3	92.6	988	21.60
17/09/88	12:00	25	-100.5	64.82	996	22.51
17/09/88	18:00	25.4	-101.9	55.56	1000	26.86
18/09/88	0:00	26	-103.2	55.56	1002	26.30

Tabla 4.1 Avisos de ciclón emitidos por el Servicio Meteorológico Nacional

En la figura 4.1 se muestra un plano con el contorno del continente Americano y la trayectoria seguida por el huracán.

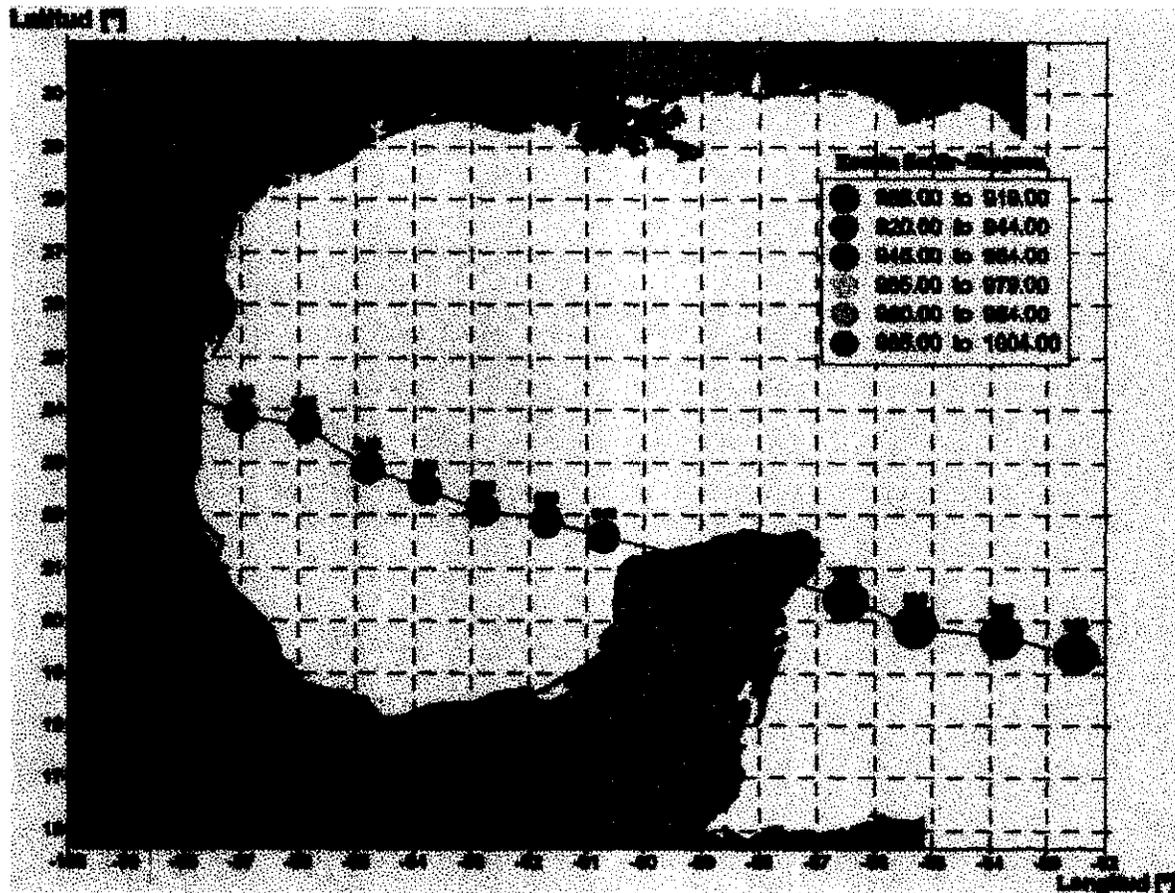


Figura 4.1 Trayectoria del huracán Gilberto en el Atlántico, así como la intensidad en función de la escala Saffir-Simpson

### 4.3 Resumen de Daños

El día 14 de septiembre de 1988 el huracán Gilberto impactó contra la república Mexicana, en la ciudad de Cancún, Q. Roo, a las 12:00 GMT, donde con vientos sostenidos de 290 km/h y rachas de 320 km/h así como una marea meteorológica de 3.7 m inundó gran parte de la ciudad e incluso destruyó una flota camaronera anclada en el puerto.

Los efectos del viento, lluvia y oleaje afectaron toda la costa Atlántica obligando a cerrar todos los puertos, además de provocar inundaciones en las zonas bajas y derrumbes en las zonas montañosas.

El huracán Gilberto provocó 350 muertes de las cuales 320 ocurrieron en la ciudad de Monterrey, al desbordarse el río Santa Catarina.

#### 4.4 Pronóstico de la trayectoria del Ciclón

El modelo se ejecuto a partir de los datos emitidos en el boletín del día 14 de septiembre de 1988 a las 6:00 GMT, esto se debe a que se deseaba tener un alerta a la población mínima con 12 horas de anticipación.

La siguiente figura muestra como el programa realiza la captura de los datos del boletín, publicado en Internet.

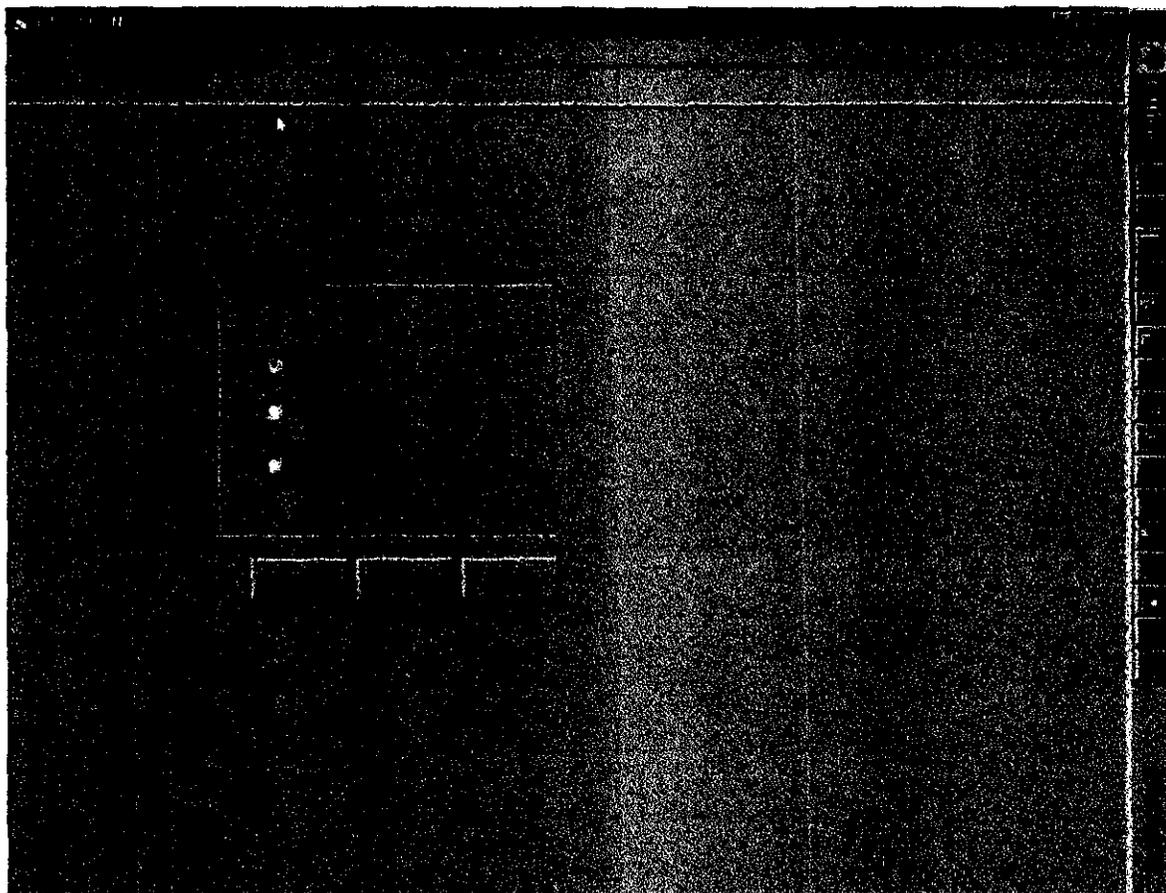


Figura 4.2 Pantalla de inicio para el pronóstico de trayectoria del evento

La pantalla de inicio presenta la entrada al sistema y muestra tres opciones:

1. Pronóstico de la trayectoria de un evento hasta en periodos de 6 horas, en un intervalo de 24 horas.
2. Acceso a la base de datos histórica de huracanes; esta parte del sistema permite realizar consultas a la base de datos como los eventos extremos en un punto en particular, velocidades máximas (ver Capítulo 5), presión mínima, etc.

3. Acceso a la base de datos de municipios, puertos y ciudades; es posible realizar consultas para ver poblaciones cercanas a un punto específico, a una población o aun puerto.

Para el caso del pronóstico se selecciona la opción 1. A continuación se muestra la pantalla de Avisos, la cual trabaja en conjunto con un *buscador* de Internet, con el cual se pueden consultar los boletines del Servicio Meteorológico Nacional, los de la Comisión Federal de Electricidad o del Centro Nacional de Huracanes (NHC), de los Estados Unidos.

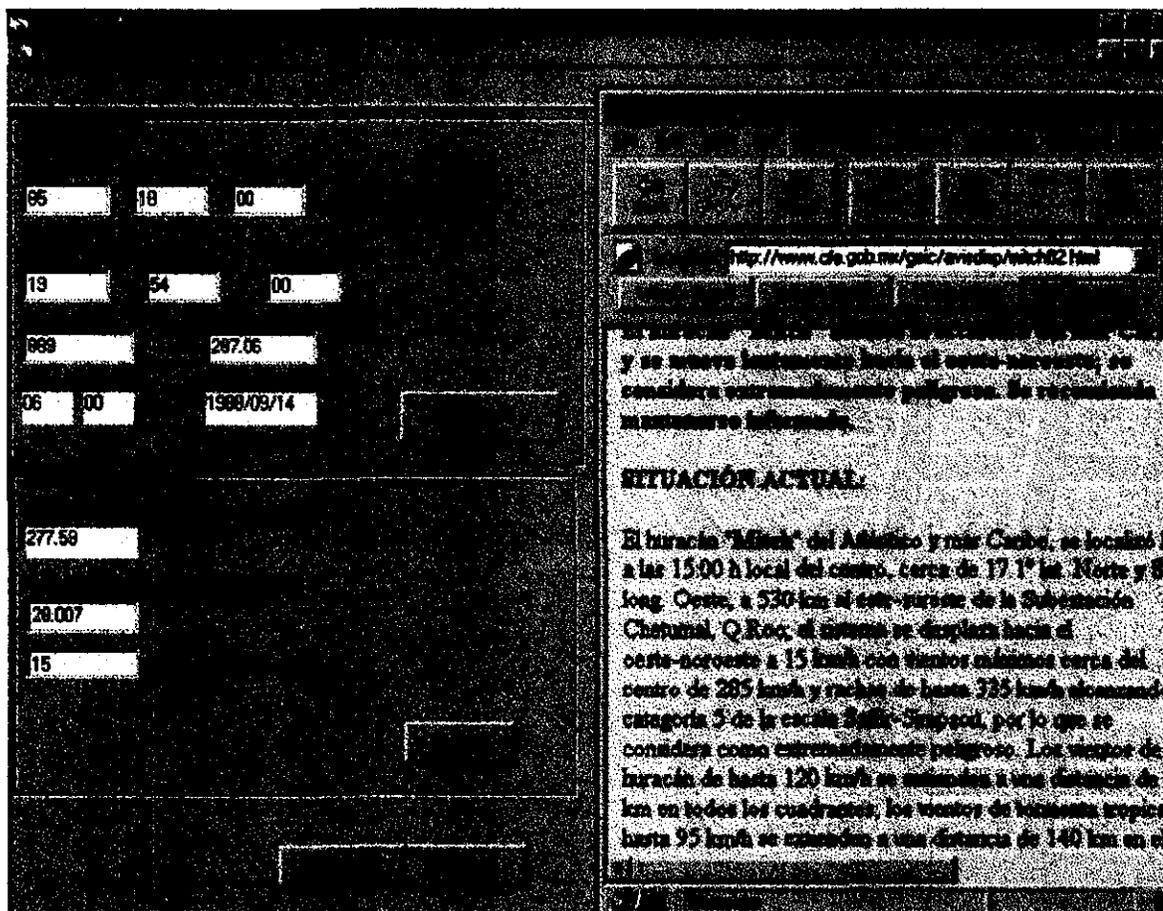


Figura 4.3 Pantalla “Avisos”, en la cual se capturan los datos obtenidos de las consultas a los boletines de Internet

Una vez capturados los datos se presiona con el digitizador (mouse), el botón *pronóstico*, con lo que se da inicio al programa. A continuación se describe cual es el algoritmo que se realiza para el cálculo de la trayectoria, evolución de la intensidad y posibles daños a los municipios y puertos.

De la consulta al boletín se obtiene el siguiente vector:

<i>Fecha</i>	1988/09/14,06:00
<i>Long</i>	85.3
<i>Lat</i>	19.9
<i>Pc</i>	889
<i>Vv</i>	287.06
<i>D<sub>D</sub></i>	277.59°
<i>V<sub>D</sub></i>	28
<i>R<sub>C</sub></i>	15

Tabla 4.2 Vector de parámetros iniciales.

Con el vector se obtiene un par de variables *lonz* y *latz* los cuales se calculan de la siguiente manera:

$$lonz = entero(long(-1)) - 0.5 = -85.5$$

$$latz = entero(lat) - 0.5 = 19.5$$

La primera consulta a la base de datos se realiza con el par de variables anteriores. Para definir en que rango de celdas aledañas se realizara la consulta se compara la velocidad de desplazamiento con los rangos mostrados en las notas (tabla 7.5) y de la de la ecuación 7.1 (notas), para  $V_D = 28$  km/h se obtiene:

$$\Phi = 70.610049 - 3.7363823V_D + 0.085967968V_D^2 - 0.00061360888V_D^3$$

$$\Phi = 19.92^\circ$$

De la suma y resta a  $D_D$  del intervalo obtenemos 3 posibles direcciones:

$$D_1 = 277.59 + 19.92 = 297.51^\circ$$

$$D_2 = 277.59^\circ$$

$$D_3 = 277.59 - 19.92 = 257.67^\circ$$

Con base en las tres direcciones se realiza las consultas a los nodos aledaños considerando únicamente los eventos que han arribado del nodo de coordenadas *lonz*, *latz*, obteniéndose las siguientes probabilidades:

Número de Eventos			Probabilidades		
7	0	0	0.63600		
3	$\Phi$	0	0.27273		
1	0	0	0.09091		

Figura 4.4 Número de eventos que han arribado a las celdas aledañas del nodo central, el siguiente cuadro muestra las probabilidades en los sectores de posible trayectoria.

En la figura 4.4 la primera malla muestra el número de eventos por nodo que han arribado del nodo central, la segunda malla muestra las probabilidades de los sectores a los que puede desplazarse el ciclón.

La celda superior izquierda es la que presenta mayor probabilidad, por lo cual se considera que es hacia donde el ciclón se desplazará. A continuación se calculan la velocidad, dirección de desplazamiento y la posible presión central.

Para los cálculos antes mencionados se consideran las características de los eventos registrados en la celda de posible arribo, principalmente a los eventos que han arribado de la celda de inicio. El siguiente vector presenta las características de los eventos registrados en el nodo:

Indicadores Probabilísticos	
$N_{\text{event}}$	7
$P_{\text{cm}}$	988.00
$P_{\text{cmín}}$	882.00
$P_{\text{cNm}}$	975.76
$P_{\text{cNmín}}$	882.00
$D_m$	310.08
$V_{Dm}$	19.92

Tabla 4.3. Características estadísticas de la celda de posible arribo en un intervalo de 6 horas

La tabla 4.3 contempla los siguientes parámetros, calculados de la consulta a la base de datos.

$N_{\text{event}}$ : número de eventos arribados desde la celda de inicio,

$P_{\text{cm}}$ : presión central promedio total

$P_{\text{cmín}}$ : presión central mínima total

$P_{\text{cNm}}$ : presión central promedio de eventos arribados del nodo inicial

$P_{\text{cNmín}}$ : presión central mínima de eventos arribados del nodo inicial

$D_m$ : dirección promedio de los eventos arribados del nodo inicial

$V_{Dm}$ : velocidad promedio de los eventos arribados del nodo inicial

Para el cálculo de la velocidad de desplazamiento de pronóstico se considera un promedio de la velocidad de desplazamiento inicial  $V_D$  y la velocidad promedio de arribo al nodo  $V_{Dm}$ .

$$V_{D6\text{horas}} = \frac{(V_D + V_{Dm})}{2} = \frac{(28.0 + 19.92)}{2} = 23.96 \text{ km/h}$$

La dirección de desplazamiento se calcula como el promedio de la dirección inicial  $D_D$  y el promedio de las direcciones de arribo a la celda  $D_m$ .

$$D_{D6horas} = \frac{(D_D + D_m)}{2} = \frac{(277.59 + 310.08)}{2} = 293.835^\circ$$

Para el pronóstico de la presión central del ciclón, se considera el promedio resultante de la presión central inicial y la presión promedio de los eventos de arribo al nodo. Esta consideración es muy inexacta (en las conclusiones se abunda un poco más al respecto).

$$P_{C6horas} = \frac{(P_C + P_{cNm})}{2} = \frac{(889 + 975.76)}{2} = 932.38mb$$

Una vez conocida la dirección y la velocidad de desplazamiento se calculan la posición del ciclón con un intervalo  $\Delta t$  de 6 horas; con lo que se obtienen los datos para generar un vector del tipo inicial (tabla 4.2).

El cálculo de la posición se realiza de la siguiente manera:

$$Dist_{6h} = V_{D6h} \times \Delta t = 23.96 \times 6 = 143.76km$$

$$\theta \Rightarrow \text{si } D_{D6h} > 180, \theta = 360 - D_{D6h}, \text{ ó } D_{D6h} < 180, \theta = D_{D6h}$$

para este caso:

$$\theta = 360 - 293.835 = 66.165^\circ$$

$$\Delta Lont = \frac{[2\pi Re']}{360}, \text{ donde } Re' \text{ se calcula en función de la latitud (ver nota 3)}$$

para  $Lat = 19.9^\circ$ , se tiene  $Re' = 6,199.244 \text{ km}$

$$\Delta Lont = 108.19 \text{ km}$$

$$\Delta Long = \frac{(Dist_{6h} \times \text{Sen}\theta)}{\Delta Lont} = 1.215^\circ$$

$$Long_{6h} = Long + \Delta Long = 85.3 + 1.215 = 86.5154^\circ$$

Para el cálculo de la latitud se realiza el siguiente procedimiento:

$$\Delta Lati = 111.112 \text{ km}$$

$$\Delta Lat = \frac{(Dist_{6h} \times \text{Cos}\theta)}{\Delta Lati} = 0.523^\circ$$

$$Lat_{6h} = Lat + \Delta Lat = 19.9 + 0.523 = 20.423^\circ$$

Para obtener la velocidad del viento de pronóstico, se utiliza la ecuación 7.4 (ver nota 4)

$$V_v = 171725.83 - 544.40088P_C + 0.57747673P_C^2 - 0.000204719P_C^3$$

$V_v = 227.7 \text{ km/h}$

Finalmente se tienen los parámetros con los que se forma el vector para un pronóstico de 6 horas

<i>Fecha</i>	1988/09/14,12 : 00
<i>Long</i>	86.545
<i>Lat</i>	20.423
<i>Pc</i>	932.98
<i>V<sub>v</sub></i>	227.7
<i>D<sub>D</sub></i>	293.835 <sup>0</sup>
<i>V<sub>D</sub></i>	23.96
<i>R<sub>C</sub></i>	?

Tabla 4.4 Vector con los parámetros de pronóstico a 6 horas

Utilizando el vector de la tabla 4.4 se realiza un nuevo pronóstico para las siguientes 6 horas. A continuación se muestran los valores probabilísticos y el vector resultante.

Deflexión:  $\Phi = 21.998^\circ$

De la suma y resta a  $D_D$  del intervalo obtenemos 3 posibles direcciones:

$D_1 = 293.835 + 21.998 = 315.83^\circ$

$D_2 = 293.835^\circ$

$D_3 = 293.835 - 21.998 = 271.837^\circ$

Número de Eventos			Probabilidades			Presiones mínimas		
2	4	0	0.18182	0.36364		989.07	899	
4	$\Phi$	0	0.36364			892.0		
0	0	0						

Figura 4.5 Tabla de eventos, probabilidades y presiones mínimas registradas en la celda de arribo.

En el pronóstico de la trayectoria al presentarse probabilidades iguales se procede a utilizar un criterio que se base en seleccionar la celda con la menor presión central de arribo

registrada. El criterio anterior se basa en considerar la condición de presión más desfavorable y es una propuesta empírica.

Una vez conocida la dirección posible de desplazamiento se procede al cálculo de los demás parámetros y se obtiene el siguiente vector:

<i>Fecha</i>	1988/09/14,18:00
<i>Long</i>	87.95
<i>Lat</i>	20.93
<i>Pc</i>	942.16
<i>Vv</i>	215.59
<i>D<sub>D</sub></i>	290.28
<i>V<sub>D</sub></i>	26.88
<i>R<sub>C</sub></i>	?

Tabla 4.5 vector resultante del pronóstico a 12 horas

El procedimiento para los siguientes intervalos es análogo al anterior por lo que solo se presentan los resultados.

<i>Fecha</i>	1988/09/15,00:00	<i>Fecha</i>	1988/09/15,06:00
<i>Long</i>	89.27	<i>Long</i>	90.54
<i>Lat</i>	21.20	<i>Lat</i>	21.42
<i>Pc</i>	950.36	<i>Pc</i>	958.36
<i>Vv</i>	203.59	<i>Vv</i>	191.87
<i>D<sub>D</sub></i>	282.17	<i>D<sub>D</sub></i>	279.94
<i>V<sub>D</sub></i>	24.45	<i>V<sub>D</sub></i>	23.16
<i>R<sub>C</sub></i>	?	<i>R<sub>C</sub></i>	?

Tabla 4.6 Vectores resultantes de los pronósticos a 18 y 24 horas

Una vez que el programa a terminado el cálculo de la trayectoria, comienza el proceso del análisis de la vulnerabilidad de los municipios y puertos de los estados con litorales en el golfo y mar Caribe.

A continuación, en la figura 4.6, se presenta la ventana con la que se despliega la consulta de la base de datos de los municipios y poblaciones.

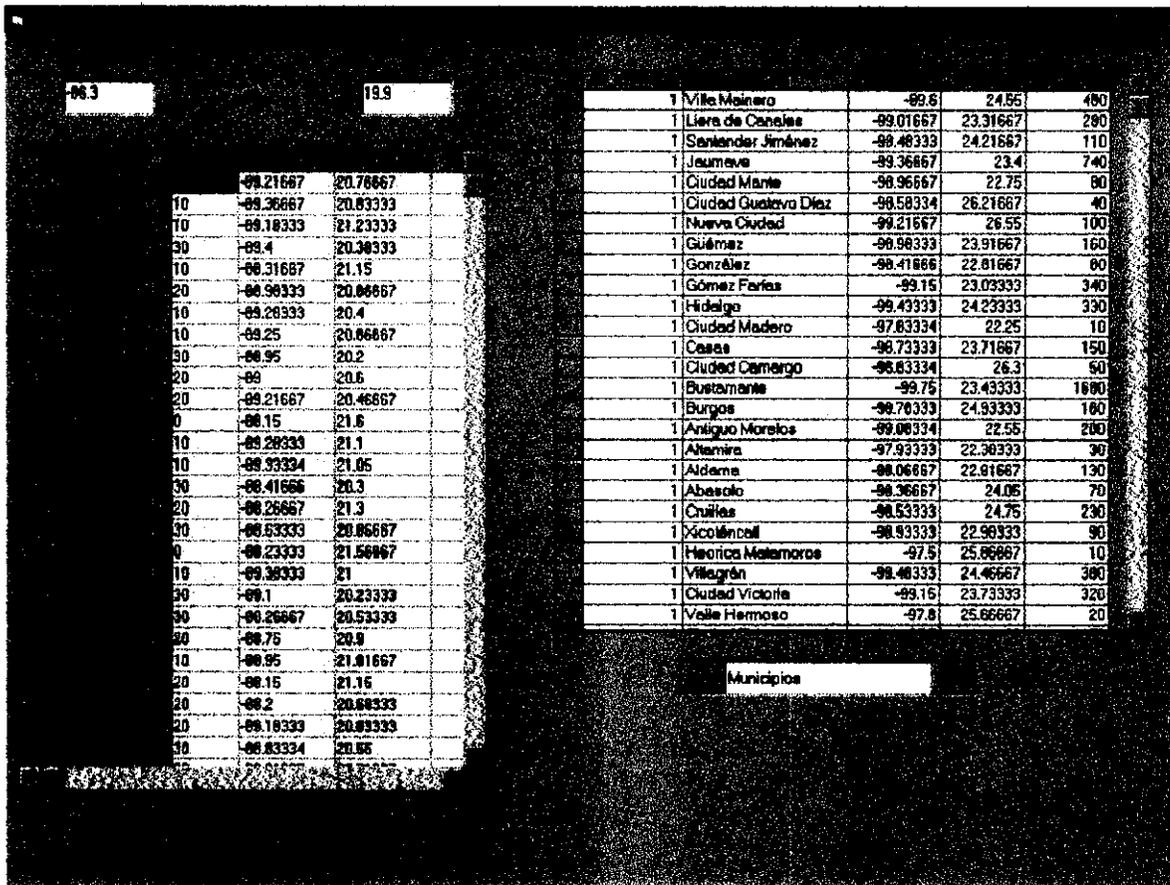


Figura 4.6 En la ventana se presenta el resultado de una consulta a la base de datos de todos los municipios de los estados, en un radio de 500 km de la ubicación del centro del ciclón.

Basados en las escalas de vulnerabilidad propuestas en las notas (tabla 7.4), se presentan los resultados para la primera posición del ciclón, en función de la intensidad del ciclón, la altitud del municipio y la distancia entre los dos.

Distancia [km]	Efectos	Altitud [msnm]	Tipo de Zona	Estado	Municipio
96.9		0		Quintana Roo	Cozumel
116.2		10		Quintana Roo	Playa del Carmen
157.7		0		Quintana Roo	Isla Mujeres
152.1		10		Quintana Roo	Cancún
192.7		10		Quintana Roo	Felipe Carrillo Puerto
184.7		20		Quintana Roo	Kantunilkin
195.2		30		Yucatan	Chemax
223.0		20		Yucatan	Valladolid
243.4		20		Yucatan	Tizimin
226.4		20		Yucatan	Tekom
249.2		20		Yucatan	Espita
236.8		20		Yucatan	Calotmul
246.5		30		Yucatan	Tinum
242.3		30		Yucatan	Kaua
241.0		30		Yucatan	Chikindzonot
233.2		30		Yucatan	Oxkutzcab
231.0		30		Yucatan	Cuncunul
228.4		30		Yucatan	Temozón
224.0		30		Yucatan	Tixcacalcupul
222.6		30		Yucatan	Chichimila
236.1		30		Yucatan	Uayma
250.8		30		Yucatan	Chankom
274.9		0		Yucatan	Río Lagartos
279.0		0		Yucatan	San Felipe
266.8		10		Quintana Roo	Chetumal
258.4		10		Yucatan	Sucilá
263.3		20		Yucatan	Panabá
260.3		20		Quintana Roo	José María Morelos
287.1		20		Yucatan	Tunkás
295.3		30		Yucatan	Chacsinkín
288.5		30		Yucatan	Tahdziú

**Tabla 4.7 Vulnerabilidad de los municipios en función de la intensidad del ciclón, altitud del municipio y la distancia al centro del ciclón, en función de las escalas de vulnerabilidad (ver nota 1, tabla 7.4)**

Finalmente utilizando los datos generados por el programa, en un mapa georeferido, como el que se muestra en la figura 4.7, en la cual se muestran las posiciones de pronóstico del ciclón así como los municipios de la zona.

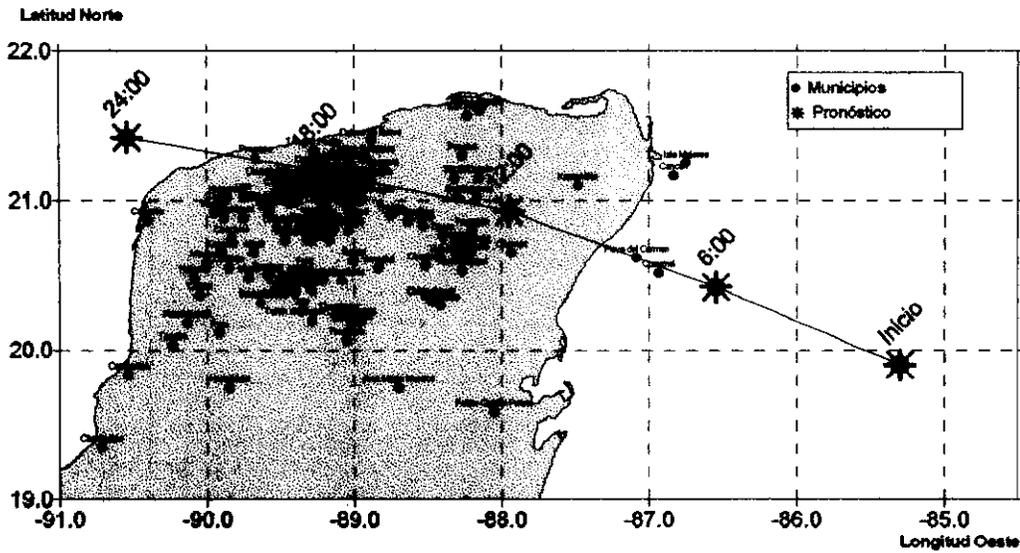


Figura 4.7 Posiciones de pronóstico, y municipios vulnerables de la zona

La siguiente figura presenta la trayectoria pronosticada utilizando el programa Hurakan y la seguida en la realidad por el ciclón. Como se puede observar por lo menos par este caso el programa no es tan impreciso considerando intervalos de tiempo pequeños.

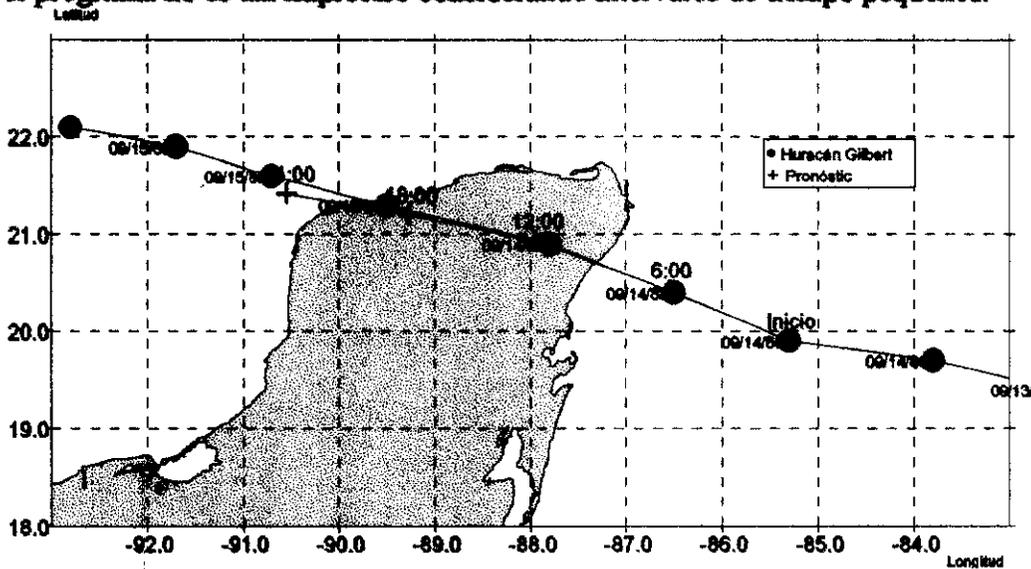


Figura 4.8 Trayectoria real seguida por el ciclón Gilberto y la pronosticada con el programa Hurakan

Finalmente se presenta la tabla de posiciones pronosticadas vs. Reales, así como la diferencia en kilómetros, entre ellas.

<b>Posiciones del Ciclón Gilberto</b>				
<b>Reales</b>		<b>Pronosticadas</b>		<b>Diferencia</b>
<b>Longitud</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Latitud</b>	
<b>[°]</b>	<b>[°]</b>	<b>[°]</b>	<b>[°]</b>	
-85.3	19.9	-85.3	19.9	
-86.5	20.4	-86.545	20.423	5.48
-87.8	20.9	-87.95	20.93	16.56
-89.5	21.3	-89.27	21.2	27.19
-90.7	21.6	-90.54	21.42	26.23

**Tabla 4.8** Comparación entre las posiciones pronosticadas y las reales así como la diferencia en kilómetros.

## CAPITULO 5

### 5.1 Tópicos de Ingeniería Civil y su Interacción con el Programa Hurakan

El sistema Hurakan fue diseñado para pronosticar la trayectoria de ciclones tropicales y la emisión de avisos a poblaciones vulnerables a los efectos de los mismos, sin embargo el sistema al contar con bases de datos de ciclones históricos y ubicación de poblaciones, resulta una herramienta en el diseño de estructuras por viento, en el diseño de estructuras hidráulicas y para el cálculo de periodos de retorno de fenómenos extremos.

### 5.2 Diseño por Viento

La seguridad necesaria para que una construcción dada cumpla adecuadamente con las funciones para las que se haya diseñado puede establecerse a partir de niveles de importancia o de seguridad. En la práctica, dichos niveles se asocian con velocidades del viento que tengan una probabilidad de ser excedidas y a partir de éstas se evalúa la magnitud de las solicitaciones de diseño debidas a viento.

Atendiendo al grado de seguridad aconsejable para una estructura, las construcciones se clasifican según los grupos que se indican a continuación:

#### GRUPO A

Estructuras para las que se recomienda un grado de seguridad elevado. Pertenecen a este grupo aquéllas que en caso de fallar causarían la pérdida de un número importante de vidas, o perjuicios económicos o culturales excepcionalmente altos; asimismo, las construcciones y depósitos cuya falla implique un peligro significativo por almacenar o contener sustancias tóxicas o inflamables, así como aquéllas cuyo funcionamiento es imprescindible y debe continuar después de la ocurrencia de vientos fuertes tales como los provocados por huracanes. Quedan excluidos depósitos y las estructuras enterradas.

Ejemplos de este grupo son las construcciones cuya falla impida la operación de plantas termoeléctricas, hidroeléctricas y nucleares; entre éstas, pueden mencionarse las chimeneas, las subestaciones eléctricas, torres y postes que formen parte de las líneas de transmisión principales. Dentro de esta clasificación también se cuentan las centrales telefónicas e inmuebles de telecomunicaciones principales, puentes, estaciones terminales de transporte, estaciones de bomberos, de rescate de policía, hospitales e inmuebles médicos con áreas de urgencias, centros de operación en situaciones de desastre, escuelas, estadios, templos y museos. Del mismo modo pueden considerarse los locales, las cubiertas y los paraguas que protejan equipo especialmente costoso, y las áreas de reunión que puedan alojar a más de doscientas personas, tales como salas de espectáculos, auditorios y centros de convenciones.

#### GRUPO B

Estructuras para las que se recomienda un grado de seguridad moderado. Se encuentran dentro de este grupo aquéllas que en caso de fallar, representan un

bajo riesgo de pérdidas humanas y que ocasionarían daños materiales de magnitud intermedia. Este es el caso de plantas industriales, bodegas ordinarias, gasolineras (excluyendo los depósitos exteriores de combustibles pertenecientes a l grupo A), comercios, restaurantes, casa para habitación viviendas edificios de apartamentos u oficinas, hoteles, bardas cuya altura sea mayor de 2.5m y todas las construcciones cuya falla por viento pueda poner en peligro a otras de está clasificación o de la anterior. Se incluyen también salas de reunión, espectáculos y estructuras de depósitos, urbanas o industriales no incluidas en el grupo A, así como todas aquellas construcciones que forman parte de plantas generadoras de energía y que, en caso de fallar, no paralizarían el funcionamiento de la planta. Asimismo, se consideran en este grupo las subestaciones eléctricas, las líneas y postes de transmisión de menor importancia que las del grupo A.

### GRUPO C

Estructuras para las que se recomienda un bajo grado de seguridad. Son aquellas cuya falla no implica graves consecuencias, ni puede causar daños a construcciones del grupo A y B. Abarca, por ejemplo, no sólo bodegas provisionales, cimbras, carteles, muros aislados y bardas con una altura no mayor a los 2.5m , sino también recubrimientos, tales como cancelerías y elementos estructurales que formen parte de las fachadas de las construcciones, siempre y cuando no representen un peligro que pueda causar daños corporales o materiales importantes en caso de desprendimiento. Si por el contrario las consecuencias de su desprendimiento son graves, dichos recubrimientos se analizarán utilizando las presiones de diseño de la estructura principal.

Existe otra clasificación de las estructuras según su respuesta ante las sollicitaciones por viento, a continuación de acuerdo con su sensibilidad ante los efectos de ráfagas del viento y a su correspondiente respuesta dinámica, las construcciones se clasifican en cuatro tipos. Con base en esta clasificación podrá seleccionarse el método para obtener las cargas de diseño por viento sobre las estructuras y la determinación de efectos dinámicos suplementarios si es el caso.

### TIPO 1

Estructuras poco sensibles a las ráfagas y a los efectos dinámicos del viento. Abarca todas aquellas en las que la relación de aspecto  $\lambda$ , (definida como el cociente entre la altura y la menor dimensión en la planta), es menor o igual a cinco y cuyo periodo natural de vibración es menor a un segundo. Pertenecen a este tipo, por ejemplo, la mayoría de los edificios para habitación u oficinas, bodegas, naves industriales, teatros y auditorios, puentes cortos y viaductos. En el caso de puentes, constituidos por losas, trabes, armaduras simples o continuas o arcos, la relación de aspecto se calculará como el cociente entre el claro mayor y la menor dimensión perpendicular a éste. También incluye las construcciones cerradas con sistemas de cubierta suficientemente rígidos, es decir, capaces de resistir las cargas debidas al viento sin que varíe esencialmente su geometría. Se excluyen las cubiertas flexibles, como las de tipo colgante, a menos que por la adopción de una geometría adecuada, proporcionada por la aplicación de preesfuerzo u otra medida conveniente, logre limitarse la respuesta estructural dinámica.

**TIPO 2**

Estructuras que por su alta relación de aspecto o las dimensiones reducidas de su sección transversal son especialmente sensibles a las ráfagas de corta duración (entre 1 y 5 segundos) y cuyos periodos naturales largos favorecen la ocurrencia de oscilaciones importantes en la dirección del viento. Dentro de este tipo se cuentan los edificios con relación de aspecto  $\lambda$ , mayor que cinco o con periodo fundamental mayor a un segundo. Se incluyen también, por ejemplo, las torres de celosía atirantadas y las autosoportadas para líneas de transmisión, chimeneas, tanques elevados, antenas, bardas, parapetos, anuncios y en general, las construcciones que presentan una dimensión muy corta paralela a la dirección del viento. Se excluyen aquéllas que explícitamente se mencionan como pertenecientes a los tipos 3 y 4.

**TIPO 3**

Estas estructuras además de reunir todas las características de las tipo 2, presentan oscilaciones importantes transversales al flujo del viento provocadas por la aparición periódica de vórtices o remolinos con ejes paralelos a la dirección del viento. En este tipo se incluyen las construcciones y elementos aproximadamente cilíndricos o prismáticos esbeltos, tales como chimeneas, tuberías exteriores o elevadas, arbotantes para iluminación, postes de distribución y cables de transmisión.

**TIPO 4**

Estructuras que por su forma o por lo largo de sus periodos de vibración (periodos mayores que un segundo), presentan problemas aerodinámicos especiales. Entre ellas se hallan las formas aerodinámicamente inestables como son cables de las líneas de transmisión (cuya sección se ve modificada de manera desfavorable en zonas sometidas a heladas), las tuberías colgantes y las antenas parabólicas. También pertenecen a esta clasificación las cubiertas colgantes que no puedan incluirse en el Tipo 1 y las estructuras flexibles con periodos de vibración próximos entre sí.

A continuación se mencionan los efectos que según el tipo de construcción se deberán tomar en cuenta en el diseño de estructuras sometidas a la acción del viento.

**1. Empujes Medios**

Son los causados por presiones y succiones del flujo del viento prácticamente laminar, tanto exteriores como interiores, y cuyos efectos son globales (para el diseño de la estructura en conjunto) y locales (para el diseño de un elemento estructural o de recubrimiento en particular). Se considera que estos empujes actúan en forma estática ya que su variación en el tiempo es despreciable.

**2. Empujes Dinámicos en la Dirección del Viento**

Consisten en fuerzas dinámicas paralelas al flujo principal causadas por la turbulencia del viento y cuya fluctuación en el tiempo influye de manera importante en la respuesta estructural.

### 3. Vibraciones Transversales al Flujo

La presencia de cuerpos en particular cilíndricos o prismáticos, dentro del flujo del viento, generan entre otros efectos el desprendimiento de vórtices alternantes que a su vez provocan sobre los mismos cuerpos, fuerzas y vibraciones transversales a la dirección del flujo.

### 4. Inestabilidad Aerodinámica

Se define como la amplificación dinámica de la respuesta estructural causada por los efectos combinados de la geometría de la construcción y los distintos ángulos de incidencia del viento.

## 5.3 Procedimiento Para Determinar las Acciones por Viento

A fin de evaluar las fuerzas provocadas por la acción del viento, se proponen principalmente dos procedimientos. El primero, referido como análisis estático, se empleará cuando se trate de estructuras o elementos estructurales suficientemente rígidos, que no sean sensibles a los efectos dinámicos del viento. En caso contrario, deberá utilizarse el segundo procedimiento llamado análisis dinámico, en el cual se afirma que una construcción o elemento estructural es sensible a los efectos dinámicos del viento cuando se presentan fuerzas importantes provenientes de la interacción dinámica entre el viento y la estructura.

Un tercer procedimiento para evaluar la acción del viento sobre las construcciones consiste en llevar a cabo pruebas experimentales de modelos en túnel de viento. Estas pruebas deben realizarse cuando se desee conocer la respuesta dinámica de estructuras cuya geometría sea marcadamente diferente de las formas comunes para las cuales existe información disponible en los reglamentos o en la literatura. También se aconsejan cuando es necesario calcular coeficientes de presión para diseñar recubrimientos de estructuras que tengan una forma poco común.

### 5.3.1 Determinación de la Velocidad de Diseño $V_D$

La velocidad de diseño  $V_D$ , es la velocidad a partir de la cual se calculan los efectos del viento sobre la estructura o sobre una componente de la misma.

La velocidad de diseño, en km/h, se obtendrá de acuerdo con la ecuación:

$$V_D = F_T F_a V_R \dots\dots\dots \text{ec. 5.1}$$

en donde:

$F_T$  es un factor que depende de la topografía del sitio, adimensional

$F_a$  el factor que toma en cuenta el efecto combinado de las características de exposición locales, del tamaño de la construcción y de la variación de la velocidad con la altura, adimensional

$V_R$  la velocidad regional que le corresponde al sitio en donde se construirá la obra, en km/h

### 5.3.2 Categorías de Terrenos y Clases de Estructuras

Tanto en el procedimiento de análisis estático como en el dinámico intervienen factores que dependen de las condiciones topográficas y de exposición locales del sitio en donde se desplantará la construcción, así como del tamaño de ésta. Por lo tanto, a fin de evaluar correctamente dichos factores, es necesario establecer clasificaciones de carácter práctico. En la tabla 5.1 se consignan cuatro categorías de terreno atendiendo al grado de rugosidad que se presenta alrededor de la zona de desplante. La tabla 5.2 divide a las estructuras y a los elementos que forman parte de ellas en tres clases, en función a su tamaño.

En la dirección del viento que se esté analizando, el terreno inmediato a la estructura deberá presentar la misma rugosidad (categoría), cuando menos en una distancia denominada longitud mínima de desarrollo, la cual se consigna en la tabla 5.1 para cada categoría de terreno. Cuando no exista esta longitud mínima, el factor de exposición  $F_{cs}$ , definido con anterioridad, deberá modificarse para tomar en cuenta este hecho. En este caso, el diseñador podrá seleccionar entre categorías de los terrenos que se encuentren en una dirección de análisis dada, la que provoque los efectos más desfavorables y determinar el factor de exposición para tal categoría, o seguir un procedimiento analítico más refinado a fin de corregir el factor de exposición.

Cat.	Descripción	Ejemplos	Limitaciones
1	Terreno abierto, prácticamente plano y sin obstrucciones	Franjas costeras planas, zonas de pantanos, campos aéreos, pastizales y tierras de cultivo sin setos o bardas alrededor. Superficies nevadas planas.	La longitud mínima de este tipo de terreno en la dirección del viento debe ser de 2000m o 10 veces la altura de la construcción por diseñar, la que sea mayor.
2	Terreno plano u ondulado con pocas obstrucciones	Campos de cultivo o granjas con pocas obstrucciones tales como setos o bardas alrededor, árboles y construcciones dispersas	Las obstrucciones tienen alturas de 1.5 a 10 m en una longitud mínima de 1500 m.
3	Terreno cubierto por numerosas obstrucciones estrechamente espaciadas	Áreas urbanas, suburbanas y de bosques, o cualquier terreno con numerosas obstrucciones estrechamente espaciadas. El tamaño de las construcciones corresponde al de las casas y viviendas.	Las obstrucciones presentan alturas de 3 a 5m. La longitud mínima de este tipo de terreno en la dirección del viento debe ser de 500m o 10 veces la altura de construcción, la que sea mayor.
4	Terrenos con numerosas obstrucciones largas, altas y estrechamente espaciadas	Centros de grandes ciudades y complejos industriales bien desarrollados	Por lo menos el 50% de los edificios tiene una altura mayor que 20m. Las obstrucciones miden de 10 a 30m de altura. La longitud mínima de este tipo de terreno en la dirección del viento debe ser la mayor entre 400m y 10 veces la altura de la construcción.

Tabla 5.1 Categorías del Terreno Según su Rugosidad

Clase	Descripción
<b>A</b>	Todo elemento de recubrimiento de fachadas, de ventanerías, de techumbres y sus respectivos sujetadores. Todo elemento estructural aislado, expuesto directamente a la acción del viento. Asimismo, todas las construcciones cuya mayor dimensión, ya sea horizontal o vertical, sea menor que 20 m.
<b>B</b>	Todas las construcciones cuya mayor dimensión, ya sea horizontal o vertical, varíe entre 20 y 50 m
<b>C</b>	Todas las construcciones cuya mayor dimensión, ya sea horizontal o vertical, sea mayor que 50 m

Tabla 5.2 Clase de Estructura Según Tamaño

### 5.3.3 Mapas de Isotacas o Consultas a las Bases de Datos

La velocidad regional del viento  $V_R$ , es la máxima velocidad media probable de ocurrencia con un cierto periodo de retorno en una zona o región determinada del país.

Para obtener la velocidad máxima registrada en un sitio específico, existen dos maneras de hacerlo, la primera es consultando los mapas de isotacas con diferentes periodos de retorno (publicadas en el Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad), los mapas muestran curvas de velocidad a condiciones homogéneas que corresponden a una altura de 10 metros sobre la superficie en terreno plano (categoría 2 según la tabla 5.1); es decir no considera las características de rugosidad locales del terreno ni la topografía específica del sitio. Además dicha velocidad se asocia con ráfagas de 3 segundos y toma en cuenta la posibilidad de que se presenten vientos debidos a ciclones tropicales en las zonas costeras.

La segunda forma para zonas costeras es mediante la utilización de las consultas a las bases de datos del programa Hurakan y de los programas BANDAS o Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC). La consulta funciona de la siguiente manera:

- 1) Con la ubicación geográfica del sitio de estudio se consulta a la base de datos sobre la ocurrencia histórica de eventos a 100 km a la redonda. El programa devuelve la ubicación de todos los eventos registrados en ese radio, así como la velocidad del viento máximo registrada.
- 2) Se consulta el programa ERIC o BANDAS, sobre las velocidades máximas registradas en las estaciones meteorológicas cercanas al punto de interés en las fechas de ocurrencia de los ciclones tropicales.

3) Con las velocidades máximas registradas y el periodo de registro se calcula la probabilidad de excedencia en un periodo de retorno N.

La importancia de las estructuras dictamina los periodos de recurrencia que deberán considerarse para el diseño por viento; de esta manera, los grupos A,B y C se asocian con los periodos de retorno de 200, 50 y 10 años respectivamente.

A continuación la figura 5.1 muestra el mapa de isotacas para la zona del Atlántico con un periodo de retorno de 200 años

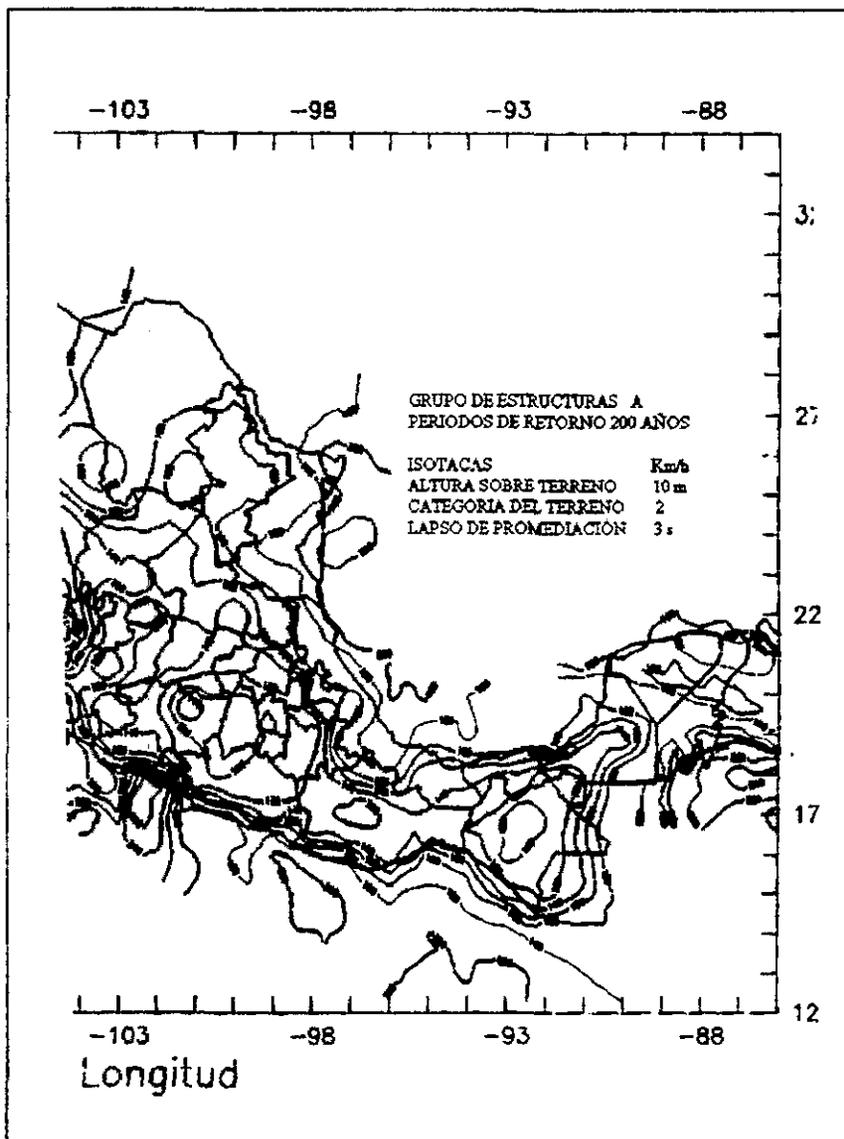


Figura 5.1 Mapa de Isotacas del Atlántico para un periodo de retorno de 200 años

El manual de diseño por viento de la Comisión Federal de Electricidad contiene los mapas con isotacas para periodos de recurrencia de 200, 50 y 10 años.

### Factor de Exposición, $F_{\alpha}$

El coeficiente  $F_{\alpha}$  refleja la variación de la velocidad del viento con respecto a la altura  $Z$ . Asimismo, considera el tamaño de la construcción o de los elementos de recubrimiento y las características de exposición.

EL factor de exposición se calcula con las siguiente expresión:

$$F_{\alpha} = F_C F_{rz} \dots\dots\dots \text{ec. 5.2}$$

en donde:

$F_C$ : es el factor que determina la influencia del tamaño de la construcción

$F_{rz}$ : el factor que establece la variación de la velocidad del viento con la altura  $Z$  en función de la rugosidad del terreno de los alrededores

Cuando la longitud mínima de desarrollo de un terreno con una cierta rugosidad no satisface lo establecido en la tabla 5.1, deberá seleccionarse la categoría que genere las condiciones más desfavorables para una dirección del viento dada.

### Factor de Tamaño, $F_C$

El factor de tamaño  $F_C$  es el que toma en cuenta el tiempo en el que la ráfaga del viento actúa de manera efectiva sobre una construcción de dimensiones dadas. Considerando la clasificación de las estructuras según su tamaño, este factor puede determinarse de acuerdo a la tabla 5.3

Clase de Estructura	$F_C$
A	1.00
B	0.95
C	0.90

Tabla 5.3 Factor de Tamaño,  $F_C$

### Factor de Rugosidad y Altura, $F_{rz}$

El factor de rugosidad y altura  $F_{rz}$ , establece la variación de la velocidad del viento con la altura  $Z$ . Dicha variación está en función de la categoría del terreno y del tamaño de la construcción.

Se obtiene de acuerdo con las siguientes expresiones :

$$F_{rz} = 1.56 \left[ \frac{10}{\delta} \right]^{\alpha} \quad \text{si } 10 \geq Z$$

$$F_{rz} = 1.56 \left[ \frac{Z}{\delta} \right]^{\alpha} \quad \text{si } 10 < Z < \delta$$

$$F_z = 1.56 \quad \text{si } Z \geq \delta$$

En donde :

$\delta$  es la altura, medida a partir del nivel del terreno de desplante, por encima de la cual la variación de la velocidad del viento no es importante y se puede suponer constante; a esta altura se le conoce como altura gradiente;  $\delta$  y  $Z$  están en [m]

$\alpha$  el exponente que determina la forma de la variación de la velocidad del viento con la altura y es adimensional.

Los coeficientes  $\alpha$  y  $\delta$  están en función de la rugosidad del terreno (tabla 5.1) y el tamaño de la construcción (tabla 5.2). En la tabla 5.4 se consignan los valores que se aconsejan para estos coeficientes. En la figura 5.2 se muestra la variación del factor  $F_\alpha$  con la altura, con la categoría del terreno y con la clase de estructura.

Categoría de Terreno	$\alpha$			$\delta$ [m]
	Clase de Estructura			
	A	B	C	
1	0.099	0.101	0.105	245
2	0.128	0.131	0.138	315
3	0.156	0.160	0.171	390
4	0.170	0.177	0.193	455

Tabla 5.4 Valores de  $\alpha$  y  $\delta$

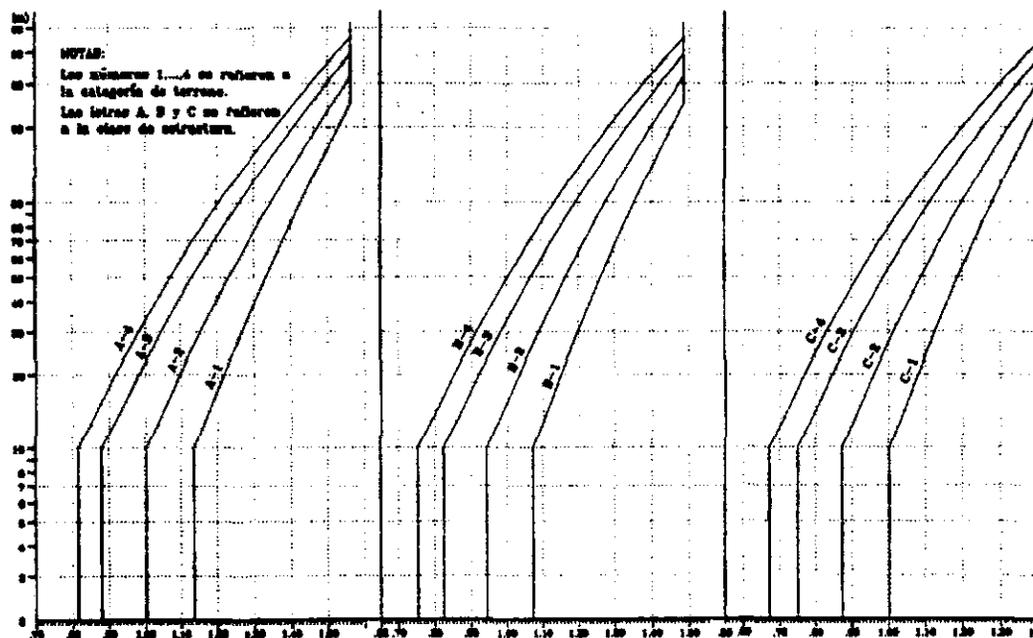


Figura 5.2 Factor de Exposición  $F_\alpha$

### Factor de Topografía, $F_T$

Este factor toma en cuenta el factor topográfico local del sitio en donde se desplantará la estructura. As, por ejemplo, si la construcción se localiza en las laderas o cimas de colinas o montañas de altura importante con respecto al nivel general del terreno de los alrededores, es muy probable que se generen aceleraciones del flujo del viento y por consiguiente, deberá incrementarse la velocidad regional.

En la tabla 5.5 se muestran los valores que se recomiendan con base en la experiencia para el factor de topografía, de acuerdo con las características topográficas del sitio.

En casos críticos para el diseño de obras de máxima seguridad, estructuras no convencionales, se recomienda alguno de los siguientes procedimientos:

5. Experimentos a escala en túneles de viento
6. Mediciones realizadas directamente en el sitio
7. Empleo de ecuaciones basadas en ensayos experimentales

Sitios	Topografía	$F_T$
Protegidos	Base de promontorios y faldas de serranías del lado de Sotavento	0.8
	Valles cerrados	0.9
Normales	Terrenos prácticamente plano, campo abierto ausencia de cambios topográficos importantes con pendientes menores que 5%	1.0
Expuestos	Terrenos inclinados con pendientes entre 5 y 10%, valles abiertos y litorales planos.	1.1
	Cimas de promontorios, colinas o montañas, terrenos con pendientes mayores que 10% cañadas cerradas y valles que formen un embudo o cañón, islas.	1.2

Tabla 5.5 Factor de Topografía local  $F_T$

Expertos en la materia deberán justificar y validar ampliamente los resultados de cualquiera de estos procedimientos.

#### 5.3.4 Cambios del Periodo de Retorno

Si por alguna razón plenamente justificada se requiere cambiar el periodo de retorno de la velocidad regional o el nivel de probabilidad de excedencia o el periodo de vida útil de una estructura que se desplantará en un sitio, se aplicaran los siguientes criterios:

El nivel de probabilidad de excedencia deseado para un periodo de vida útil N, en años se calcula con la ecuación:

$$P = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^N \dots\dots ec. 5.3$$

donde:

P: es la probabilidad de que la velocidad del viento  $V_T$ , se exceda al menos una vez en N años, adimensional

$V_T$ : la velocidad del viento con periodo de retorno T [km/h]

T: el periodo de retorno de la velocidad  $V_T$ , [años]

N: el periodo de exposición o de vida útil [años]

Es importante señalar que al modificar el periodo de vida útil N, o el de retorno T, entonces se modifica la probabilidad de excedencia P. En la tabla 5.6 se presentan valores de P para diferentes T y N.

Vida Útil, N [años]	Periodo de Retorno, T [años]							
	10	50	100	200	400	800	1600	2000
20	88	33	18	10	5	3	1.2	1.0
30	96	45	26	14	7	4	1.9	1.5
40	98	55	33	18	9	5	2.5	2.0
50	99	63	39	22	12	6	3.0	2.5
100	99.9	87	63	39	22	12	6.0	4.9

Tabla 5.6 Probabilidad de excedencia P(%), según el periodo de retorno T y la vida útil de la estructura N.

### 5.3.5 Presión Dinámica en la base $q_z$

Cuando el viento actúa sobre un obstáculo, genera presiones sobre su superficie que varían según la intensidad de la velocidad y la dirección del viento. La presión que ejerce el flujo del viento sobre una superficie plana perpendicular a él se denomina comúnmente *presión dinámica de base* y se determina con la siguiente ecuación:

$$q_z = 0.0048GV_D^2 \dots\dots ec. 5.4$$

donde:

G: es el factor de corrección por temperatura y por altura con respecto al nivel del mar

$V_D$ : La velocidad de diseño, definida anteriormente, [km/h]

$q_z$ : la presión dinámica de base a una altura Z sobre el nivel del terreno, [kg/m<sup>2</sup>]

El factor de 0.0048 corresponde a un medio de la densidad del aire y el valor de G se obtiene de la expresión:

$$G = \frac{0.392\Omega}{273 + \tau} \dots\dots ec. 5.5$$

donde:

$\Omega$ : es la presión barométrica, en mm de Hg

$t$ : la temperatura ambiental °C

En la tabla 5.7 se presenta la relación entre los valores de la altitud  $h_m$ , en metros sobre el nivel medio del mar [msnm], y la presión barométrica  $\Omega$ .

Altitud [msnm]	Presión Barométrica [mm de Hg]
0	760
500	720
1000	675
1500	635
2000	600
2500	565
3000	530
3500	495

Tabla 5.7 Relación entre altitud y la presión barométrica

La presión actuante sobre una construcción determinada  $p_z$ , [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ], se obtiene tomando en cuenta principalmente su forma y está dada, de manera general, por la ecuación:

$$p_z = C_p q_z \dots\dots\dots \text{ec. 5.6}$$

donde:

$C_p$ : se denomina coeficiente de presión y es adimensional

#### 5.4 Ayudas para la determinación de la zona federal marítimo terrestre

Uno de los efectos que más daños ocasionan por el paso de ciclones tropicales son las mareas meteorológicas o surgencias

Actualmente la Secretaría de Marina Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), desarrolla el programa nacional de delimitación de la zona federal marítimo terrestre, para lo cual con base a la topografía de la costa y la longitud latitud del sitio, se obtiene la pleamar máxima superior así como la bajamar mínima inferior, de esa manera se delimita la zona, pero es importante señalar que en algunos sitios no se está considerando los efectos de la marea meteorológica, la que en casos como en Cancún, Quintana Roo, es más significativa que la astronómica, a continuación se presenta una tabla con las amplitudes de marea astronómica para los principales puertos del golfo de México y mar Caribe, la cual se compara con las mareas meteorológicas que se contemplan para diferentes intensidades de ciclones tropicales.

<b>Puerto</b>	<b>Tampico</b>	<b>n.m.m.</b>	<b>Pleamar máxima</b>	<b>Bajamar mínima</b>	<b>Amplitud</b>
<b>Longitud</b>	-97.85	0.839	2.1615	-0.8977	3.059
<b>Latitud</b>	22.21667				
<b>Puerto</b>	<b>Coatzacoalcos</b>	<b>n.m.m.</b>	<b>Pleamar máxima</b>	<b>Bajamar mínima</b>	<b>Amplitud</b>
<b>Longitud</b>	-94.41666	0.5199	0.7984	0.0657	0.733
<b>Latitud</b>	18.15				
<b>Puerto</b>	<b>Progreso</b>	<b>n.m.m.</b>	<b>Pleamar máxima</b>	<b>Bajamar mínima</b>	<b>Amplitud</b>
<b>Longitud</b>	-89.66666	0.3399	0.7353	-0.1862	0.922
<b>Latitud</b>	21.28333				
<b>Puerto</b>	<b>Veracruz</b>	<b>n.m.m.</b>	<b>Pleamar máxima</b>	<b>Bajamar mínima</b>	<b>Amplitud</b>
<b>Longitud</b>	-96.11667	0.3099	0.6788	-0.2085	0.887
<b>Latitud</b>	19.18333				
<b>Puerto</b>	<b>Isla de Cozumel</b>	<b>n.m.m.</b>	<b>Pleamar máxima</b>	<b>Bajamar mínima</b>	<b>Amplitud</b>
<b>Longitud</b>	-87	0.1998	0.4317	-0.037	0.469
<b>Latitud</b>	20.5				
<b>Puerto</b>	<b>Matamoros</b>	<b>n.m.m.</b>	<b>Pleamar máxima</b>	<b>Bajamar mínima</b>	<b>Amplitud</b>
<b>Longitud</b>	-97.51667	0.2398	0.5842	-0.2439	0.828
<b>Latitud</b>	25.88333				
<b>Puerto</b>	<b>Campeche</b>	<b>n.m.m.</b>	<b>Pleamar máxima</b>	<b>Bajamar mínima</b>	<b>Amplitud</b>
<b>Longitud</b>	-90.53333	0.2399	0.7281	-0.5043	1.232
<b>Latitud</b>	19.83333				

Tabla 5.8 Puertos de la República Mexicana con sus amplitudes, así como su pleamar y bajamar máximas.

Como se observa de la tabla 5.8 el puerto de Tampico Tamaulipas es el que registra la mayor pleamar (2.16 msnbmi), y en la ciudad de Cozumel Quintana Roo la menor con 0.44 msnbmi, sin embargo el día 14 de septiembre de 1988 el nivel del mar se incremento por 3.7 msnbmi (dato registrado por las marcas de agua en los edificios de la ciudad de Cancún), penetrando el mar tierra adentro, lo cual dio paso a la entrada del oleaje el cual rompió contra los edificios y casas de la zona.

Los factores que ocasionan la marea meteorológica se describen con amplitud en las notas (nota 5), por lo que en función del tipo de vulnerabilidad de la zona en estudio se deberá seleccionar el método más adecuado para un análisis de riesgo por marea meteorológica.

El programa Hurakan con su base de datos, puede ser de utilidad al estudiar zonas vulnerables. Lo anterior es realizando consultas de la zona en estudio con las que se puede conocer la persistencia y con ella seleccionar el periodo de retorno para un evento extremo.

## **CONCLUSIONES**

- El programa muestra precisión en periodos cortos de pronóstico, con lo anterior se cumple con el objetivo de ser una herramienta para la evaluación de riesgos en poblaciones y puertos de los estados costeros.
- El tiempo de computo es pequeño, además de que no se requiere de equipos muy sofisticados para su ejecución, lo cual lo hace accesible para el personal de protección civil.

Las necesidades de equipo son:

- ❖ Computadora personal Penttium I o superior
- ❖ Conexión a Internet

- Para lograr una mayor precisión en periodos mayores de pronóstico (mayores a las 24 horas), deberá utilizarse una malla más pequeña.

Para estudios posteriores se propone utilizar una malla de 0.5 x 0.5 grados de longitud - latitud, además la base de datos deberá ser densificada interpolando los registros a cada hora.

- El pronóstico de intensidad es deficiente por lo cual se propone la realización de análisis extrémal, de parámetros estadísticos con miras a pronosticar la intensidad de manera más confiable.

## **COMENTARIOS**

- Debido a que el programa se diseñó de manera modular, es posible adaptarle otros programas, como el diseñado en el Instituto de Ingeniería para pronosticar el oleaje en aguas profundas provocado por un ciclón tropical.
- Este trabajo abre posibles líneas de investigación como el desarrollo de modelos para el pronóstico de zonas inundables por marea meteorológica, modelos de campos de viento y modelación hidrológica de cuencas expuestas a la incidencia de ciclones.

### Nota 1. Descripción del Criterio de Vulnerabilidad

Para el análisis de vulnerabilidad al que estarían expuestos los municipios y puertos, se consideran los siguientes factores:

- Intensidad del fenómeno
- Distancia al centro del mismo
- Altitud sobre el nivel del mar

La clasificación anterior se basa en la escala propuesta por Saffir – Simpson y aprobada por el NHC (National Hurricane Center), de Miami, a continuación se proponen dos escalas de colores para agilizar la identificación y zonificación de riesgos. La primera identifica el tipo de fenómeno, o los efectos a los que se someterá a una zona en función de la distancia al centro. La escala va del azul claro (depresión tropical) al rojo (huracán clase 5) ver tabla 7.1

DT
TT
H1
H2
H3
H4
H5

Tabla 7.1 Escala de colores propuesta para la intensidad de los fenómenos partiendo de la depresión tropical hasta llegar al huracán clase 5.

La Tabla 7.2 se propone para ver los efectos a los que se verán expuestas las poblaciones en función de la intensidad central y la distancia a las mismas, la tabla es de tipo empírico y se basa en un análisis de los efectos a las poblaciones luego del paso del huracán Roxanne (1992).

Evento	Distancia de Afectación [km]								
	0 a 60	100	150	200	250	300	350	400	500

Tabla 7.2 Escala de efectos vs. distancia utilizando la escala propuesta en la tabla 7.1

La siguiente figura muestra un corte de una sección típica de la república Mexicana en su vertiente del golfo en la cual podemos observar la zona litoral, la gran planicie y la Sierra Madre Oriental, con lo cual se propone la siguiente escala de colores

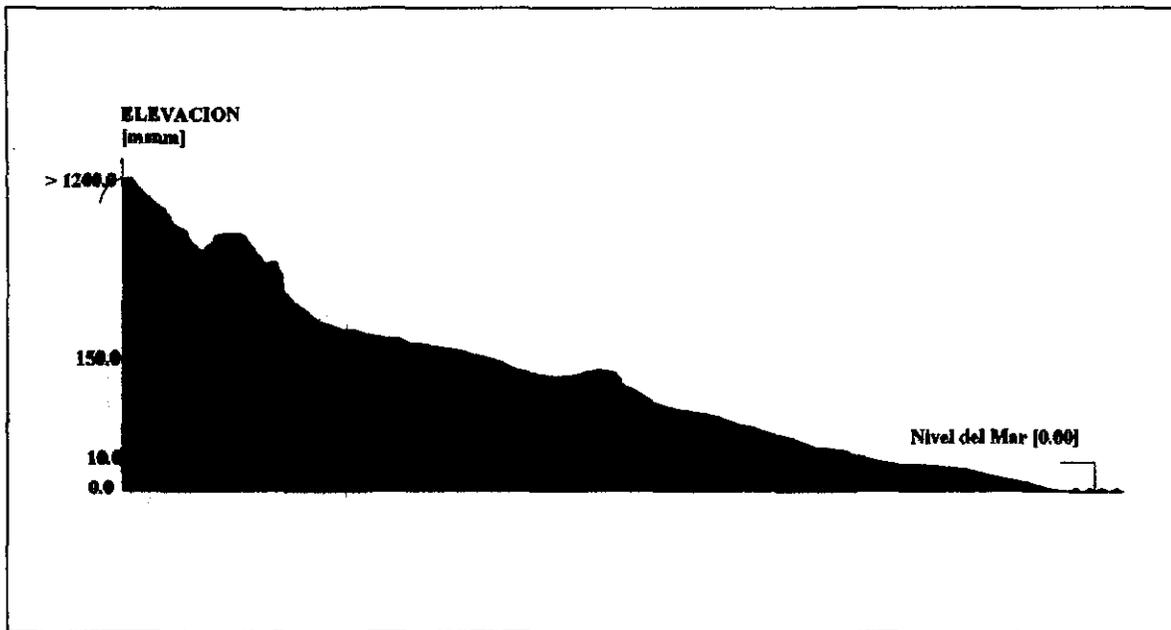


Figura 7.1 Corte Topográfico, de la República Mexicana en la que se puede observar las principales características típicas de la vertiente del Golfo.

En función al nivel del mar y los tipos de daños a los que se exponen las poblaciones, se propone una tabla que subdivide en tres zonas a la topografía típica del la vertiente Golfo:

- Zona costera de 0 a 10 msnm
- Zona de planicie 10 a 150 msnm
- Zona Montañosa de 150 a 5452 msnm

Como resultado de la clasificación anterior se presenta la tabla 7.3 en la que en una escala de verdes se presentan los 3 niveles propuestos, los que van de claro (zona costera) a oscuro (zona motañosa).

Costera	[ 0 - 10 ]
Planicie	[ 10 - 150 ]
Montañosa	[ 150 - 5452 ]

Tabla 7.3 Escala de colores para los tres niveles topográficos en los que se consideran riesgos similares en función de su nivel sobre el mar.

Daños		
DT	Escalas	
TT	Daños menores a la vegetación, desaje, viento y lluvias intensas en las zonas más próximas al centro del meteorio. Presencia de sobrelevación del mar menor a 0.8 m	Lluvias y viento intensos, con afectaciones en la vegetación y zonas bajas inundadas
H1	Daños menores a la vegetación, daños a casas sin cimentación de muros y techos ligeros. Daño menor a estructuras de concreto o acero y menor a muros, ventanas y techos. Inundaciones en zonas bajas, por altura menor a los 1.7 msnm. Daño menor en puentes, inundaciones menores exiguas de agua pueden romper las pilas.	Occurrencia de vientos intensos, lluvias torrenciales, inundaciones en zonas bajas y riesgo de talud en bordos fluviales
H2	Daños menores en la vegetación, con caída de árboles. Daño menor a casas móviles y de techos ligeros, daños en techos, techos de concreto. Daño en ventanas, muros y cancelaría. Daños y caída de cables en altura de 0 a 4 horas antes del arbo del centro del meteorio. Daño menor a las estructuras en puentes, inundaciones menores exiguas de agua pueden romper las pilas.	Occurrencia de vientos intensos, lluvias torrenciales ( hasta 70mm/h), inundaciones en zonas bajas y riesgo de talud en bordos fluviales. Daños considerables a la vegetación y casas construidos con materiales de baja resistencia. Daños a los techos de casas de materiales de construcción resistentes. Daño menor a las pilas y estribos de puentes sobre los cauces
H3	Daños menores en la vegetación, con caída de árboles. Daño menor a casas móviles y de techos ligeros, daños en techos, techos de concreto. Daño en ventanas, muros y cancelaría. Daños y caída de cables en altura de 0 a 4 horas antes del arbo del centro del meteorio. Daño menor a las estructuras en puentes, inundaciones menores exiguas de agua pueden romper las pilas.	Occurrencia de vientos intensos, lluvias torrenciales ( hasta 70mm/h), inundaciones en zonas bajas y riesgo de talud en bordos fluviales. Daños considerables a la vegetación y casas construidos con materiales de baja resistencia. Daños a los techos de casas de materiales de construcción resistentes. Daño menor a las pilas y estribos de puentes sobre los cauces
H4	Daños menores en la vegetación, con caída de árboles. Daño menor a casas móviles y de techos ligeros, daños en techos, techos de concreto. Daño en ventanas, muros y cancelaría. Daños y caída de cables en altura de 0 a 4 horas antes del arbo del centro del meteorio. Daño menor a las estructuras en puentes, inundaciones menores exiguas de agua pueden romper las pilas.	Occurrencia de vientos intensos, lluvias torrenciales ( hasta 70mm/h), inundaciones en zonas bajas y riesgo de talud en bordos fluviales. Daños considerables a la vegetación y casas construidos con materiales de baja resistencia. Daños a los techos de casas de materiales de construcción resistentes. Daño menor a las pilas y estribos de puentes sobre los cauces
H5	Daños menores en la vegetación, con caída de árboles. Daño menor a casas móviles y de techos ligeros, daños en techos, techos de concreto. Daño en ventanas, muros y cancelaría. Daños y caída de cables en altura de 0 a 4 horas antes del arbo del centro del meteorio. Daño menor a las estructuras en puentes, inundaciones menores exiguas de agua pueden romper las pilas.	Occurrencia de vientos intensos, lluvias torrenciales ( hasta 70mm/h), inundaciones en zonas bajas y riesgo de talud en bordos fluviales. Daños considerables a la vegetación y casas construidos con materiales de baja resistencia. Daños a los techos de casas de materiales de construcción resistentes. Daño menor a las pilas y estribos de puentes sobre los cauces

Tabla 7.4. Escala de daños propuesta por Saffir - Simpson, utilizando las escalas de colores propuestas anteriormente.

El NHC clasifico los daños ocasionados por huracanes históricos, y propuso la tabla 7.4, en la cual se presentan diferentes riesgos en función de la intensidad y la elevación sobre el

nivel del mar de la zona. La tabla anterior se modifico utilizando las escalas de colores propuestas anteriormente.

### Nota 2. Descripción del Criterio de Velocidad de Desplazamiento vs. Deflexión

Para el desarrollo del programa de pronóstico de trayectorias fue necesario el análisis de criterios con los cuales evaluar las posibles direcciones a seguir por un ciclón en función de la velocidad de desplazamiento. Con miras a obtener un criterio se consulto la base de datos histórica y se cotejaron los datos de velocidad de desplazamiento contra la deflexión en grados, que presento el fenómeno. En la figura 7.2 se muestra una gráfica en la cual se presentan los eventos en función de la velocidad de desplazamiento vs. la deflexión en grados, en la misma gráfica se muestran los dos ajustes para obtener una ecuación que relacionara la velocidad de desplazamiento contra la posible deflexión.

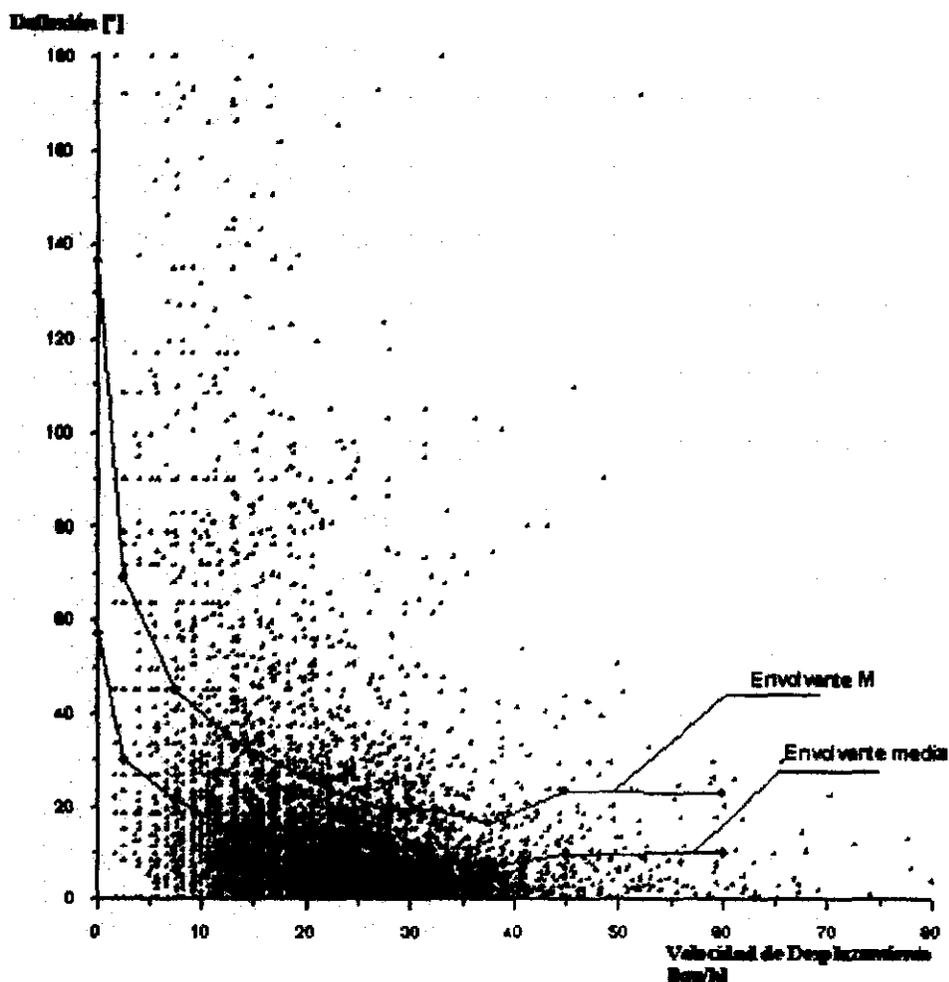


Figura 7.2 Velocidades de desplazamiento vs. deflexión, así como los ajustes con los valores medios y el de los valores 1/3 mayores.

El ajuste que se selecciono fue el resultante de considerar unicamente el 30% de los valores máximos registrados y se obtuvo la media de estos. El incremento  $\Delta v_D$  fue de 5 km/h, en la tabla 7.5 se presentan los valores de deflexión media, media  $M_{1/3}$ , máxima y el número de avisos promediados.

Rango de Velocidades [km/h]	Deflexión media [°]	Deflexión $M_{1/3}$ [°]	Deflexión máxima [°]	Número de Avisos Promediados
0	57.19	136.33	180.00	26
[0 a 5]	30.06	69.11	180.00	210
[5 a 10]	21.71	45.13	180.00	1158
[10 a 15]	15.36	35.39	180.00	1603
[15 a 20]	12.62	29.04	173.66	1721
[20 a 25]	10.49	23.32	165.43	1535
[25 a 30]	8.60	19.54	172.80	1173
[30 a 35]	8.37	19.28	180.00	643
[35 a 40]	7.15	16.52	102.91	375
[40 a 50]	9.78	23.18	109.65	231
[50 a 75]	9.95	22.89	171.87	95

Tabla 7.5 Rangos de velocidades vs. Deflexiones medias y máximas

La ecuación 7.1 es un ajuste con un polinomio de tercer grado a los datos de  $M_{1/3}$ , dicha ecuación queda en función de la velocidad de desplazamiento  $V_D$ .

$$\Phi = 70.610049 - 3.7363823V_D + 0.085967968V_D^2 - 0.00061360888V_D^3 \dots \text{ec. 7.1}$$

### Nota 3. Descripción de las consideraciones Geográficas

Para el manejo de distancias y velocidades en el programa se contemplo la forma del planeta, la cual no es esférica. A continuación se presentan las principales características geométricas del planeta:

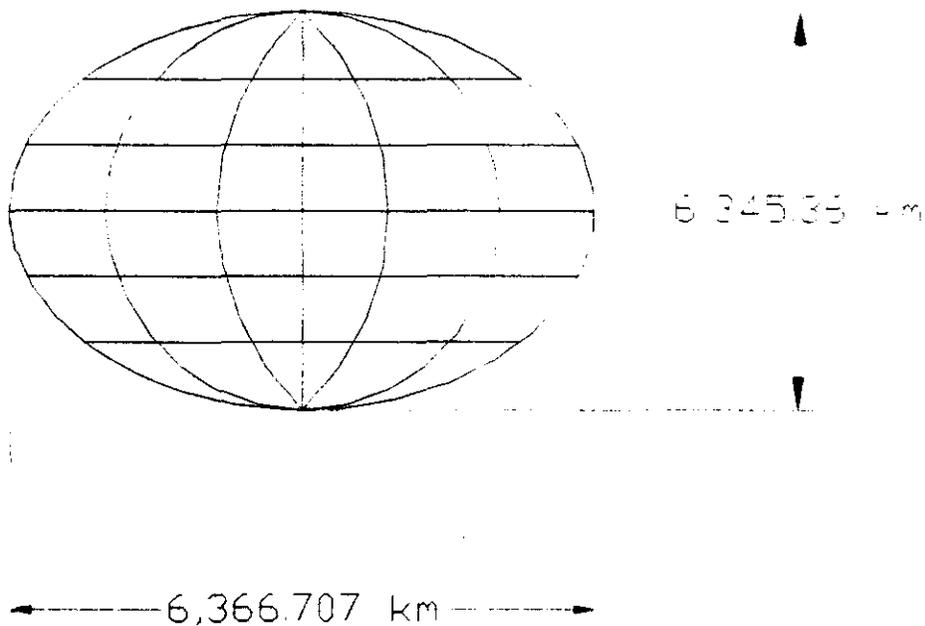


Figura 7.3. El esquema muestra la diferencia entre el diámetro ecuatorial y el polar en el planeta.

$R_e = 6,366.707 \text{ km}$  radio terrestre en el ecuador

$R_p = 6,345.03 \text{ km}$  radio terrestre polar

$$\Theta = \frac{R_e}{298.25} = 42.694 \text{ km} \quad \text{achatamiento}$$

$$R_r = \frac{R_e + R_p}{2} = 6,356.03 \text{ km} \quad \text{radio terrestre medio}$$

En el ecuador un grado de longitud y latitud mide 60 millas náuticas (111.112 km), pero conforme se incrementa la latitud hacia el norte, 1° de longitud comienza a reducir su magnitud. El decremento anterior sigue la siguiente regla:

$$R'_e = \sqrt{\left[ 6,356.03^2 - \left[ \left( \frac{6,345.36}{90} \right) Lat \right]^2 \right]} \dots\dots\dots \text{ec. 7.2}$$

$R'_e$  : es el radio terrestre en un plano paralelo a el ecuador  
 Lat : latitud a la que se desea conocer el valor de 1° de longitud

Si se requiere transformar una distancia a grados de longitud se utiliza la siguiente expresión:

$$\Delta L_{ont} = \frac{[2\pi Re']}{360} \dots\dots\dots \text{ec. 7.3}$$

**Nota 4. Descripción de la relación Presión - Viento**

Tomando como base la escala Saffir - Simpson se realiza la transformación de los datos presión central a velocidad del viento, para lo cual se ajusto un polinomio de tercer grado obteniendo una curva que se ajusta a los datos de la escala. La ecuación queda en función de la presión central y interpola el valor de velocidad del viento.

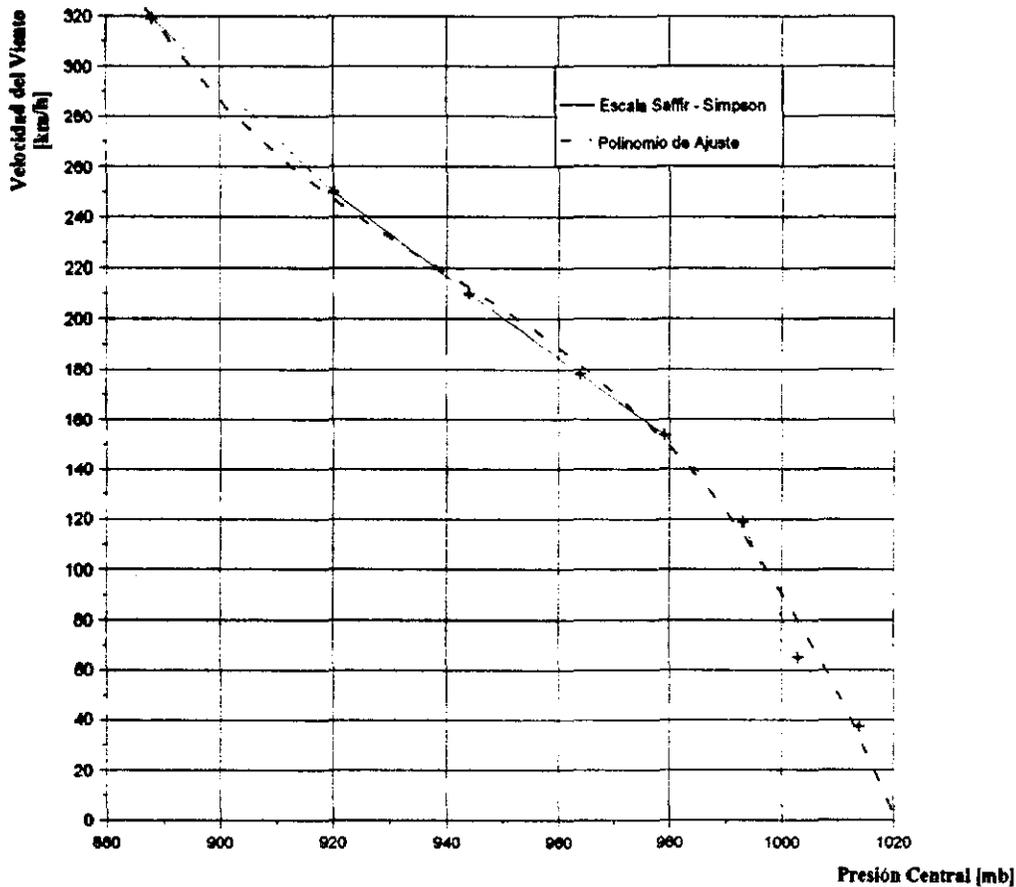


Figura 7.4. Muestra los datos de la escala Saffir - Simpson y el polinomio de ajuste

A los valores de presión central vs. velocidad del viento se les ajusto un polinomio de tercer grado el cual es función de la presión central. El ecuación 7.4 muestra el ajuste.

$$V_v = 171725.83 - 544.40088P_c + 0.57747673P_c^2 - 0.000204719P_c^3 \dots\dots\dots \text{ec. 7.4}$$

**Nota 5. Mareas Meteorológicas**

Durante la ocurrencia de los ciclones se presenta un fenómeno marítimo conocido como marea meteorológica o surgencia. Este fenómeno igual que las mareas astronómicas, está asociado a una sobrelevación y decremento del nivel medio del mar, pero a diferencia de las primeras su fuerza generadora no es la gravedad si no el decremento en la presión atmosférica, y el viento.

Los principales factores que intervendrán en la magnitud de la sobrelevación son:

- Presión central en el ciclón  $P_c$
- Velocidad del viento sostenido  $V_v$
- Velocidad de desplazamiento  $V_D$
- Angulo de incidencia sobre la playa  $\theta$
- Pendiente de la batimetría en la zona de incidencia  $\alpha$

En conjunto los factores determinan la sobrelevación siendo a grandes rasgos de la siguiente manera:

El NHC maneja una sobrelevación de 1 cm por milibar en aguas profundas, la velocidad de desplazamiento influye directamente en el desarrollo de la onda de periodo largo, por lo que a menor velocidad de desplazamiento mayor desarrollo de la onda. El ángulo de incidencia es también fundamental pues si este es perpendicular a la playa se presenta el caso más desfavorable.

La pendiente del fondo ( $\alpha$ ), y su coeficiente de fricción ( $\tau_f$ ), influyen en el peralte de la onda por lo que para el caso de pendientes suaves y material erosivo la marea se ve incrementada, no así para playas de pendientes fuertes como las de la vertiente del Pacífico. Finalmente el factor con mayor peso es la velocidad del viento, pues este provoca un acarreo de masa hacia la playa, el cual en conjunto con los otros factores generan la sobrelevación.

A continuación se presentan diferentes criterios para valorar la sobrelevación meteorológica:

- Ecuación propuesta por Conner, Kraft y Harris (1957), está ecuación semi empírica es función únicamente de la presión central

$$M_T = 0.046939(1019 - P_C) \dots\dots\dots \text{ec. 7.5}$$

donde :

$M_T$  : marea de tormenta [m]

$P_C$  : presión central [mb]

- La Universidad de Cantabria (España), propone el siguiente modelo en el cual se considera la velocidad del viento, la presión atmosférica, la sobrelevación por roptura y la sobrelevación por agrupación de ondas (surf - beat).

a) *Sobrelevación debida a la presión*

$$S_{vp} = 1.026(P_n - P_c) \left( 1 - e^{-\frac{R}{r}} \right) \dots\dots\dots \text{ec. 7.6}$$

donde:

$S_{vp}$  : sobrelevación debida al viento [cm]

$P_c$  : presión central [mb]

$P_n$  : presión en la periferia del ciclón [mb]

$R$  : distancia a la última isobara cerrada en la periferia del ciclón [km]

$r$  : distancia del centro del ciclón al punto donde se desea conocer la sobrelevación [km]

#### b) Sobrelevación debida a la acción del viento

La acción continua del viento sobre la lámina de agua del mar puede provocar el arrastre de la misma. Si este arrastre se produce en dirección de la playa, el agua se acumula en está, produciendo un ascenso del nivel medio del mar. Esta elevación depende de la intensidad del viento, trayectoria, duración, forma de la costa, configuración y rugosidad del fondo. Las ecuaciones que describen este proceso son las ecuaciones de cantidad de movimiento, que representan la segunda ley de Newton.

Una forma simplificada de estas expresiones se obtiene promediando verticalmente todas las ecuaciones que gobiernan el proceso, resultando:

$$\frac{\partial \eta_v}{\partial x} = \frac{(\tau_s + \tau_b)}{\rho g H} \dots\dots\dots \text{ec. 7.7}$$

donde:

$\eta_v$  : sobrelevación debida al viento

$\tau_s$  : tensión tangencial debida al viento

$\tau_b$  : tensión tangencial debida a fricción con el fondo

$g$  : gravedad

$H$  : profundidad

La integración de la ecuación anterior en el supuesto de profundidad variable linealmente y expresando las tensiones tangenciales en función de la velocidad del viento, arroja como resultado:

$$\eta_v = \frac{Kw^2x}{g(h_1 - h - \eta_v)} \ln \left( \frac{h_1}{h + \eta_v} \right) \dots\dots\dots \text{ec.7.8}$$

donde:

$K$  : coeficiente =  $3.310^{-6}$

$w$  : velocidad del viento [m/s]

$h$  : profundidad del punto en que se desea conocer la sobrelevación [m]

$h_1$  : profundidad en la que se inicia la sobrelevación debida al viento [m]

$x$  : distancia horizontal entre  $h$  y  $h_1$  [m]

### c) Sobrelevación por rotura

LA rotura de las olas en la playa provoca variaciones del nivel del mar, tanto en la zona exterior al punto de rotura como en la zona de rompientes.

En esta última zona, la ecuación diferencial que gobierna el movimiento ya simplificado resulta:

$$\frac{d\eta_r}{dx} = k \frac{dh}{dx} \dots\dots\dots \text{ec. 7.9}$$

La solución de dicha ecuación fue dada por Longuet-Higgins y Steward 1964

$$\eta = k(h_b - h) + \eta_b \dots\dots\dots \text{ec. 7.10}$$

donde:

$h_b$  : profundidad estática en el punto de rotura [m]

$\eta_b$  : variación del nivel medio del mar dinámico en el punto de rotura [m]

### d) Sobrelevación por agrupación de ondas. Surf-beat

Los grupos de ondas causan variaciones en el nivel medio del mar que, de este modo, sufre una depresión en la zona de olas mayores y una sobrelevación en la zona de olas menores. La cadencia olas grandes, olas pequeñas conlleva una cadencia de depresión – sobrelevación que, usualmente es conocida como ondas largas asociadas a grupos de ondas.

El análisis de estas ondas largas fue realizado en 1964 por Longuet-Higgins a partir del concepto de tensión radiación y desarrollado posteriormente por Sand, 1982, para oleajes direccionales. Este último se obtiene, a efectos prácticos de estimación de amplitud de onda larga:

$$\eta_L = \frac{GH_s^2}{16} \dots\dots\dots \text{ec. 7.11}$$

donde:

$\eta_L$  : sobrelevación debida a la agrupación de ondas [m]

$G$  : función bimodal de transferencia  $G(T, h)$

$H_s$  : altura de ola significativa oleaje exterior [m]

Cuando estas ondas largas se propagan en aguas de calado reducido, como puede ser una playa con su plataforma, tiene lugar una fuerte interacción entre la batimetría y la onda, de modo tal que es difícil muchas veces determinar si la naturaleza de la oscilación es debida

al oleaje o a su interacción con el fonda. De cualquier modo, se produce una fluctuación del nivel del mar en la zona de costa cuya existencia fue cuantitativamente demostrada por Munk 1984 y Tucker 1950, y se denomina Surf - beat.

Goda, 1975, propuso una fórmula empírica para la estimación de la amplitud cuadrática media de dicha oscilación, basada en datos medidos en campo:

$$\frac{\eta_{rms}}{H_{Os}} = \frac{0.01}{\sqrt{\frac{H_{Os}}{Lo} \left(1 + \frac{h}{H_{Os}}\right)}} \dots\dots ec. 7.12$$

donde:

$\eta_{rms}$  : amplitud cuadrática media [m]

$H_{Os}$  : Altura de ola significativa [m]

$h$  : profundidad a la que se desea conocer la sobrelevación [m]

$Lo$  : longitud de onda en aguas profundas [m]

Como se puede notar el método propuesto por la universidad de Cantabria, resulta más exacta al contemplar mayor cantidad de factores, pero por su aplicación se requiere de mayor cantidad de datos.

- Escala Saffir - Simpson

Utilizando los valores propuestos en la escala Saffir - Simpson, en los cuales se relacionan sobrelevaciones vs. presiones centrales, puede ajustarse una curva como la que se muestra en la figura 7.5 en la que se muestran los valores de la escala S.S. y la curva de ajuste.

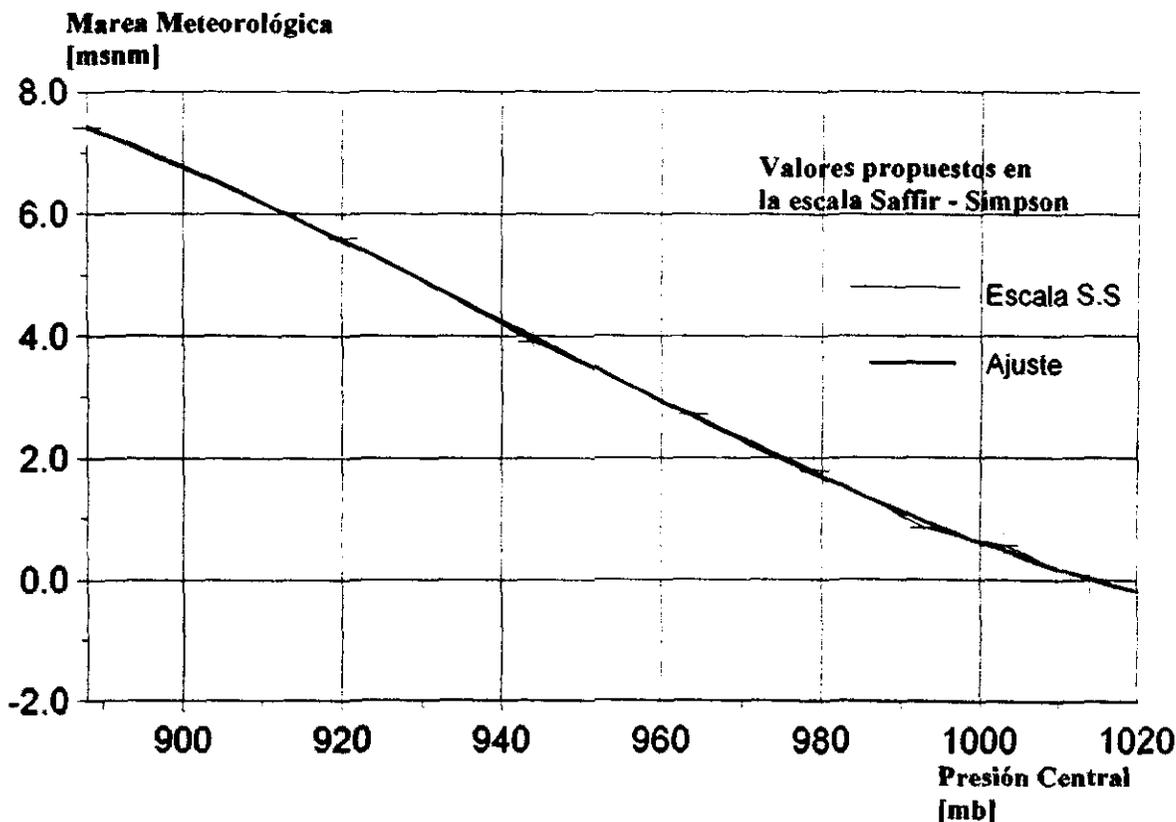


Figura 7.5 Curva presión central vs. sobrelevación así como la curva de ajuste a dichos valores.

La ecuación 7.13 presenta la curva ajuste de presión central vs. sobrelevación.

$$M_T = -1526.3761 + 5.006859P_C - 0.0053852635P_C^2 + 1.905397 \times 10^{-6}P_C^3 \dots\dots\dots \text{ec. 7.13}$$

**Nota 6. Análisis Estadístico de los Eventos Históricos**

El presente artículo presenta los resultados del análisis de registros históricos de los ciclones que han tenido ocurrencia en el océano Atlántico. El análisis de los mismos tuvo como objetivo el de formar criterios, para el pronóstico de eventos futuros, principalmente de aquellos que se acercan a las costas nacionales.

En el desarrollo de este se presentan las gráficas resultado del análisis con diferentes criterios a la base de datos de los eventos registrados en el Atlántico. La base de datos se basa en los eventos ocurridos a partir de 1949 a 1997, período a partir del cual se disponen de datos confiables de presión central o velocidad del viento en las inmediaciones al centro del fenómeno.

**Metodología**

Utilizando la base de datos de eventos históricos se realizaron consultas a la región de interés ((100° lon. W, 16° lat. N), (83°lon. W, 28° lat. N)), estas consultas se orientaron para conocer grado a grado el número de eventos registrados, dirección de la cual habían arribado, dirección con la que habían salido, presión mínima de cada evento, presión mínima histórica, velocidad máxima de viento, velocidad de desplazamiento y mes de ocurrencia.

Con los datos obtenidos con los criterios antes mencionados se creo una malla con tamaño de celda de 1° de longitud por 1° de latitud, a cada nodo de la malla se le relacionaron los indicadores de las consultas previas, discretizando así la información para la toma de decisiones.

Utilizando un programa de interpolación se crearon mapas de isolíneas con los parámetros obtenidos de las consultas. A continuación se muestran los mapas y se describe cuales son las singularidades de cada uno.

En la escala utilizada a colores va de colores claros (menores intensidades, número de eventos, etc.) a oscuros, los cuales corresponden a los máximos.

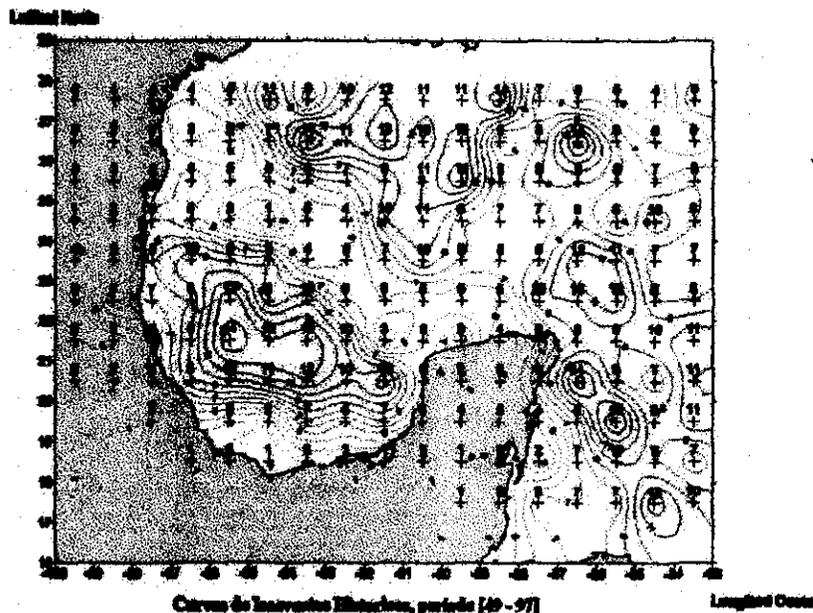


Figura 7.6. Curvas de isopersistencia, y número de eventos registrados en cada nodo.

En la Figura 7.6, puede observarse la zona ciclogénica frente a las costas de los estados de Campeche, Tabasco, así como el corredor "frío", el cual se extiende frente a Yucatán y termina frente a Tamaulipas.

La siguiente figura muestra las direcciones de arribo promedio a cada una de las celdas de la malla, la trascendencia de esta figura es mostrar que para una celda particular, se conoce en número de eventos y las direcciones con las cuales han llegado a la misma, lo que en el

programa de pronóstico se utiliza para determinar la dirección que puede tomar un fenómeno al desplazarse.

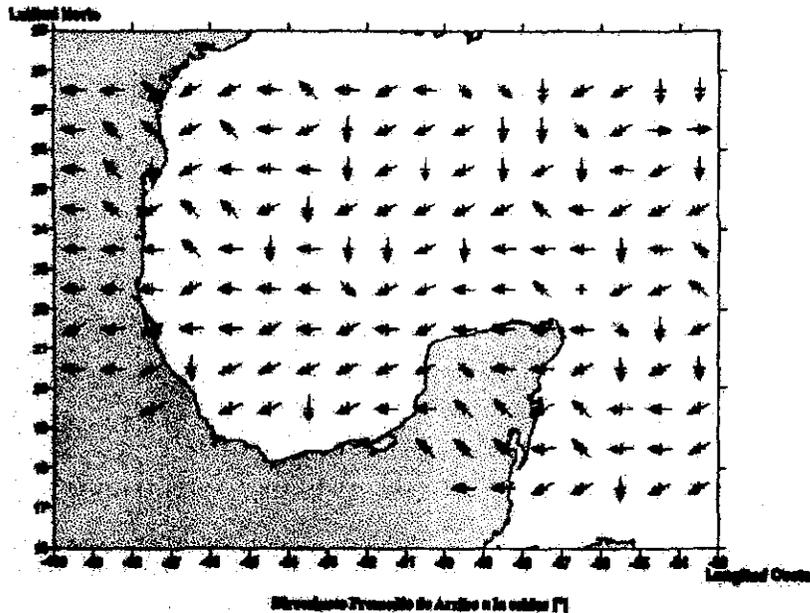


Figura 7.7. Direcciones promedio por cada celda de la malla, la flecha indica la dirección promedio de arriba a la celda

La figura 7.8 muestra las velocidades promedio de desplazamiento, lo interesante del plano es que puede notarse una tendencia de los ciclones más intensos de desplazarse con mayor velocidad al aproximarse a tierra.

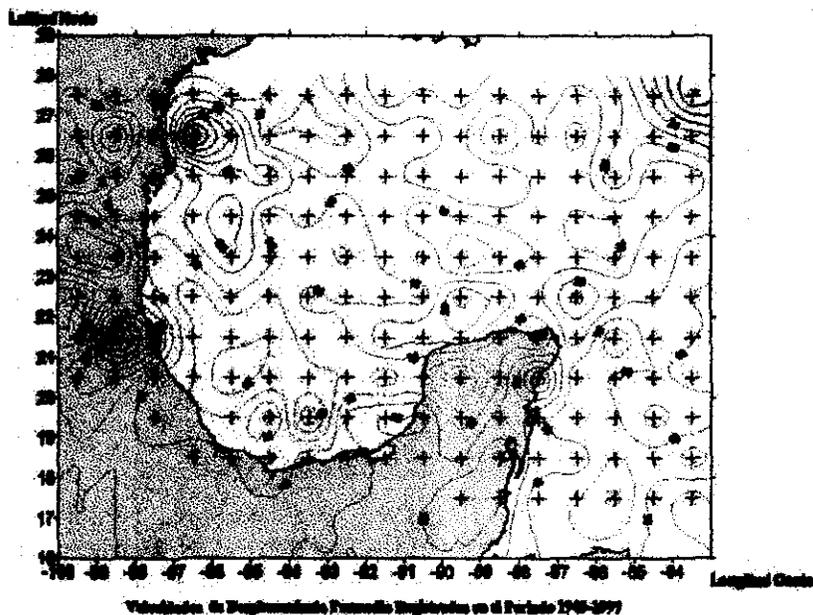


Figura 7.8. Velocidades de desplazamiento promedio, como puede observarse al acercarse a tierra los ciclones muestran tendencia a incrementar su velocidad de desplazamiento.

Se graficaron las isolíneas de mínima presión registrada en cada celda con el objeto de encontrar tendencias en el comportamiento de la presión en la zona de estudio, como puede notarse el huracán Gilberto marca su trayectoria debido a la intensidad registrada durante su ocurrencia.

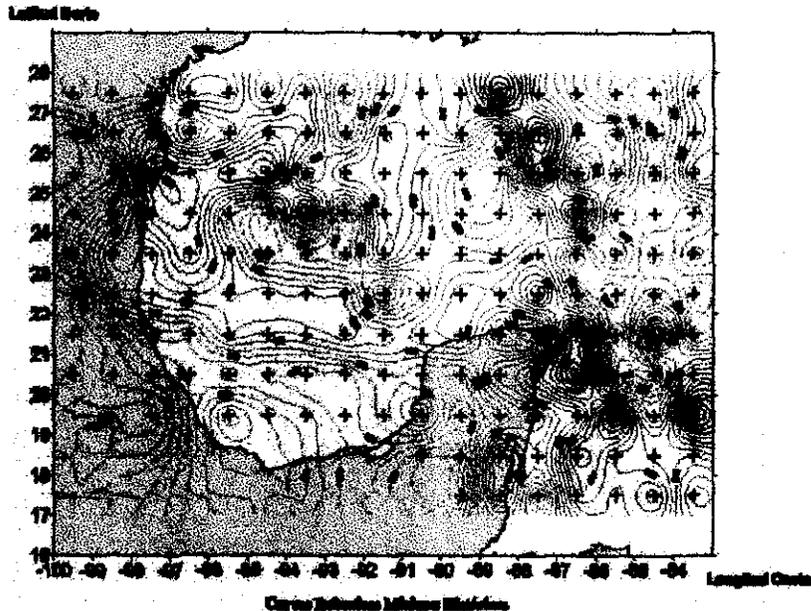


Figura 7.9. Isolíneas de mínima presión histórica registradas en la malla, la coloración a más oscura menor presión.

#### Nota 7. Tipos de Imagen Meteorológica Disponibles en el Internet

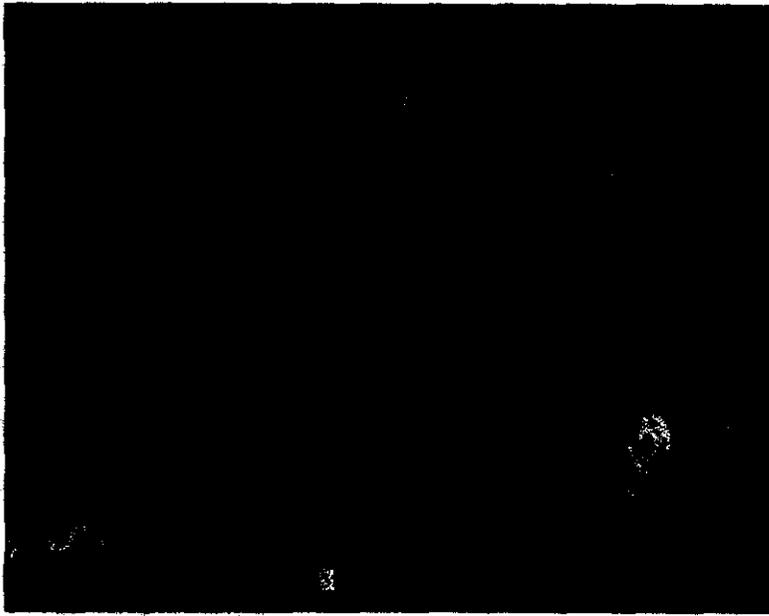
En el Internet se publican básicamente dos tipos de imágenes satelitales, las de espectro visual y las de filtrado infrarrojo, de estas últimas existen dos tipos una en escala de grises y otra en una escala de colores del rojo al morado.

Las imágenes son captadas por los satélites meteorológicos GOES 8 y 10, que son los que cubren el sector terrestre de América central y norte. El uso de las imágenes es de gran utilidad para el pronóstico del comportamiento atmosférico, debido a la facilidad de poder conocer las condiciones generales, lo cual permite emitir criterios más objetivos.

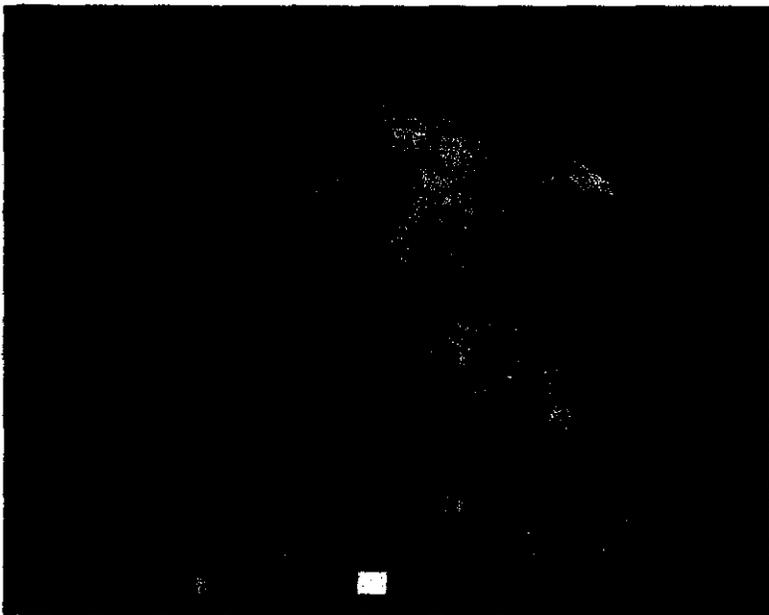
El uso de imágenes infrarrojas además de permitir conocer el comportamiento de la atmósfera en condiciones de oscuridad, al observarlas con un filtrado en escala de grises permite conocer las características de vapor en la atmósfera y por lo mismo el flujo de masas de aire, el filtrado con escala de rojos – morados es útil para conocer la temperatura de la nubosidad pues a más rojo mayor temperatura y viceversa.

A continuación se presentan imágenes de los dos tipos de filtrado infrarrojo, así como un acercamiento al centro de un huracán.

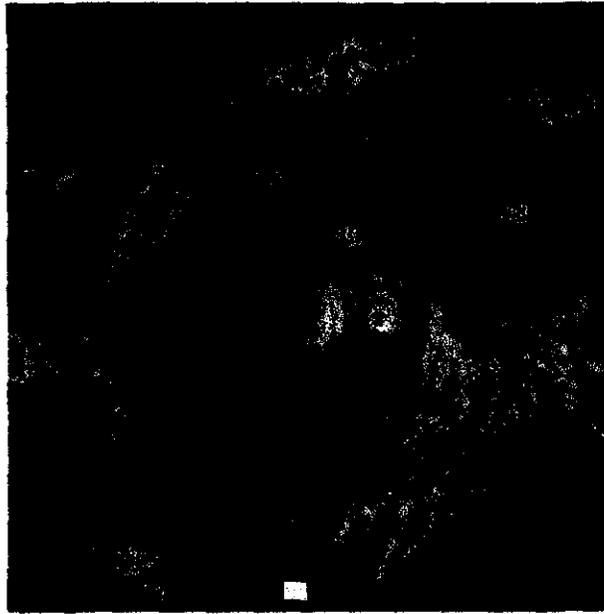
**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**



**Figura 7.10 Foto del huracán Mitch utilizando filtrado infrarrojo con escala de grises.**



**Figura 7.11 Foto del huracán Mitch utilizando filtrado infrarrojo en escalas rojo – moradas. Puede observarse en el centro el color amarillo que muestra la fuerte convección.**



**Figura 7.12 Acercamiento del centro del huracán Mitch utilizando filtrado infrarrojo en escalas rojo – moradas. Puede observarse en el centro el color amarillo que muestra la fuerte convección central así como los cirros (nubes moradas), alejándose del centro en la capa superior de la atmósfera.**

## **BIBLIOGRAFIA**

### **METEOROLOGIA Y OCEANOGRAFIA**

S. Hernandez Yzal  
Editorial Cadi  
Pag. 351-427

### **METEOROLOGIA**

William L. Donn  
Editorial Reverté  
Pag. 372 - 411

### **NUMERICAL PREDICTION AND DYNAMIC METEOROLOGY**

George J. Haltimer & Roger Terry Williams  
John Wiley & Sons  
1980

### **METODOS TOPOGRAFICOS**

Ricardo Toscano B.  
Publicaciones de la Escuela Nacional de Ingenieros  
1950

### **PROBABILIDAD DE PRESENTACION DE CICLONES TROPICALES EN MEXICO**

Oscar A. Fuentes Mariles y Teresa Vázquez Conde  
CENAPRED  
1997

### **APUNTES DE LA MATERIA DE HIDRAULICA MARITIMA**

Rodolfo Silva Casarin  
DEPFI, UNAM  
1998

### **ESTUDIO DE LA TRAYECTORIA DEL HURACAN DIANA MEDIANTE UN PROCESO NUMERICO**

Enrique Buendía et al.  
Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM  
1992

### **AN INITIALITATION SCHEME OF HURRICANE MODELS BY VORTEX SPECIFICATIONS**

Yoshiro Kurihara, Morris Bender & Rebeca Ross  
Geophysical Fluid Dynamics, NOAA  
1992

**MODEL NHC90**

Charles J. Neumann & Colin J. McAdie  
National Hurricane Center, NOAA  
1991

**APUNTES DEL CURSO "EFECTOS DESTRUCTIVOS DE CICLONES TROPICLAES"**

Michel Rossengaus M. et. al.  
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)  
1996

**METEOROLOGÍA**

José M. Lorente  
Edit. LABOR, S.A.  
1966. Barcelona, España  
Quinta Edición  
Cap. 17 al 19. Pag. 166-217

**SHORE PROTECTION MANUAL VOL. I**

Coastal Engineering Research Center  
1984. Washington, D.C. USA  
Cuarta Edición.  
Capitulo 3. Pag. 3.1 a 3.133

**OCEANOGRAPHICAL ENGINEERING**

Robert L. Wiegel  
Edit. PRETICE - HALL, INC.  
1964. Berkeley, Cal. USA.  
Cap. 9 y 10 195 - 246

**VIENTOS MAXIMOS DEBIDOS A CICLONES**

Jorge Sánchez Sesma  
Tesis Profesional  
1985

**MANUAL DE DISEÑO POR VIENTO**

Serie Manual de Diseño de Obras Civiles  
Comisión Federal de Electricidad  
1992

**EXTREME VALUE THEORY IN ENGINEERING**

E. Castillo  
Academic Press, Inc. Capítulos 4, 5, 6 y 7  
1987

**DIRECCIONES DE INTERNET**

**[http://geicweb.cfemex.com/regional/pronos\\*.html](http://geicweb.cfemex.com/regional/pronos*.html)**

**[http://lumahai.soest.hawaii.edu/Tropical Weather/tropical.shtml](http://lumahai.soest.hawaii.edu/Tropical_Weather/tropical.shtml)**

**<http://www.gobeach.com/hurr3.html>**

**<http://www.noaa.com.html>**

**<http://www.stormfront.org/ns/great.html>**

**<http://smn.cna.gob.mx.html>**