



---

---

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**UNIDAD DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**“MODELACIÓN PROBABILISTA DE VELOCIDADES  
REGIONALES DE VIENTO PARA EL DISEÑO  
ESTRUCTURAL EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN”**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**I.C. MARIEL ANDREA OJEDA TUZ**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE:**

**MAESTRA EN INGENIERÍA  
OPCIÓN ESTRUCTURAS**

**MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO  
2016**

Aunque este trabajo hubiere servido para el Examen de Grado y hubiera sido aprobado por el sínodo, sólo el autor es responsable de las doctrinas emitidas en él.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para realizar mis estudios de posgrado y a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán por todas las facilidades otorgadas para el desarrollo de mi tesis.

## RESUMEN

La Península de Yucatán es una zona propensa a los ciclones tropicales. Por lo que es necesario diseñar las estructuras para que sean capaces de resistir las acciones del viento. Para este propósito se requiere conocer la velocidad regional de viento en sitios de interés asociadas a distintos periodos de retorno.

El objetivo de esta investigación es la determinación de las velocidades regionales de viento para el diseño estructural en la Península de Yucatán empleando un modelo probabilista para generar ciclones tropicales sintéticos y un modelo determinista que considere los ciclones tropicales históricos. Para este propósito se realizó la depuración y organización de la base de datos histórica de ciclones tropicales, con registros de los últimos 165 años, en la que se seleccionaron los ciclones tropicales que afectaron a la Península de Yucatán y posteriormente se clasificaron éstos de acuerdo a su trayectoria. Se realizaron análisis estadísticos de las variables que describen a los ciclones tropicales de acuerdo a su trayectoria y se determinó la correlación entre variables. Se seleccionaron las distribuciones de probabilidad con mejor ajuste para cada una de las variables de ciclones tropicales. Se elaboró un modelo para generar ciclones tropicales sintéticos. En este modelo se realizó una simulación de Monte Carlo para generar las variables de los ciclones tropicales sintéticos correspondiente a una población de 2000 años. Los números aleatorios de las variables generadas son los datos de entrada de un programa de cómputo para generar las trayectorias y las velocidades superficiales de los ciclones tropicales sintéticos. Se simuló computacionalmente el campo de velocidades superficiales para los ciclones tropicales sintéticos (simulación probabilista) y los ciclones tropicales históricos (simulación determinista) con base en un Modelo de Campo de Velocidades de Vientos Huracanados (MCVVH). Se realizó el análisis estadístico y el ajuste de funciones probabilísticas extremas de las velocidades para cada sitio de interés obtenidas mediante la simulación determinista y la simulación probabilista. Se elaboraron los mapas de isotacas correspondientes a diferentes periodos de retorno. Se compararon las velocidades regionales de viento del Manual de Diseño por Viento

de la Comisión Federal de Electricidad, las velocidades regionales obtenidas por medio de la simulación determinista y las velocidades regionales obtenidas por medio de la simulación probabilista.

Los resultados del trabajo de investigación permiten concluir que la Distribución de Probabilidades extrema tipo I (Forma doble exponencial) es la que presenta el mejor ajuste de las velocidades regionales en la Península de Yucatán. Las velocidades regionales obtenidas por medio de la simulación determinista para el diseño estructural en las principales ciudades de la Península de Yucatán son mayores a las especificadas en el Manual de Diseño por Viento de la Comisión Federal de Electricidad para un periodo de retorno de 200 años. Por otra parte, las velocidades regionales obtenidas de la simulación probabilista son menores a las especificadas en dicho manual para un periodo de retorno de 200 años.

## **ABSTRACT**

The Yucatan Peninsula is a zone prone to tropical cyclones. Therefore, it is necessary to design structures that are capable to resist wind actions. For this purpose, it is necessary to know the regional wind speeds at sites of interest associated with different return periods.

The objective of this research work is to determine the regional wind speeds for structural design in the Yucatan Peninsula using a probabilistic model to generate synthetic tropical cyclones and a deterministic model that considers historical tropical cyclones. For this purpose, the debugging and organization of the historical database of tropical cyclones with records of the last 165 years was carried out; the cyclones that did not affect the Yucatan Peninsula were removed and those that affected were classified according to their track. Statistical analysis of the variables that describe the tropical cyclones according to their trajectory was carried. The correlation between those variables was determined. For each variable of a tropical cyclone, the probability distribution that better fits was selected. A model to generate synthetic tropical cyclones was developed. In this model a Monte Carlo simulation was carried out to generate the variables of the synthetic tropical cyclones for a 2,000 years population. The random numbers of the variables generated were the input data for a computer program used to generate the trajectories and surface speeds of synthetic tropical cyclones. The speed field of synthetic tropical cyclones (probabilistic simulation) and historical tropical cyclones (deterministic simulation) was computationally simulated based on the Model of Hurricane Wind Speed Field (MCVVH). For each site of interest, the statistical analysis and the fitting of probabilistic extreme distribution of the wind speeds obtained from deterministic and probabilistic simulations were carried out. Wind speed contours for different return periods were made. A comparison between regional wind speeds of the Design Manual for wind of the Federal Electricity Commission, regional wind speeds obtained from deterministic simulation and regional wind speeds obtained from probabilistic simulation was carried out.

From the results of this work it can be concluded that the Type I extreme distribution better fits regional wind speeds in the Yucatan Peninsula. The regional wind speeds for structural design obtained from deterministic simulation in the main cities of the Yucatan Peninsula are greater than those specified in the Design Manual for wind of the Federal Electricity Commission for the 200 years return period. On the other hand, the regional wind speeds for structural design obtained from the probabilistic simulation are less than those specified in that manual for the 200 years return period.

# CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	V
ÍNDICE DE TABLAS.....	XV
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Objetivos .....	3
1.2.1 Objetivo general .....	3
1.2.1 Objetivos particulares .....	3
1.3 Alcances.....	3
1.4 Contenido.....	4
CAPÍTULO II.....	7
REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	7
2.1 Ciclones tropicales .....	7
Variables de un huracán.....	8
2.2 Modelo del campo de velocidades de viento de huracán.....	10
2.3 Modelos probabilísticos .....	19
2.3.1 Periodo de retorno.....	19
2.3.2 Probabilidades de excedencia.....	21
2.3.3 Distribuciones de Probabilidad Extrema .....	24
2.4 Cálculo de las velocidades regionales de viento de huracán .....	28
2.4.1 Manual CFE (2008) .....	28
2.4.2 Investigaciones Nacionales .....	29

2.4.3 Investigaciones Internacionales.....	32
2.5 Conclusiones de la revisión de la literatura .....	33
CAPÍTULO III.....	35
METODOLOGÍA.....	35
3.1 Depuración y organización de la base de datos histórica de ciclones tropicales .....	36
3.2 Análisis estadístico de las variables de ciclones tropicales y determinación de la correlación entre variables.....	40
3.3 Ajuste de distribuciones de probabilidad para las variables de ciclones tropicales .....	45
3.4 Simulación del paso de ciclones tropicales históricos .....	47
3.5 Desarrollo de un modelo para la generación de ciclones tropicales sintéticos .....	48
3.5.1 Procedimiento general .....	48
3.5.2 Generación de variables aleatorias .....	48
3.5.3 Generación de trayectorias y velocidades superficiales.....	52
3.6 Simulación del paso de ciclones tropicales sintéticos .....	66
3.7 Análisis estadístico de las velocidades para cada sitio de interés....	66
3.8 Ajuste probabilístico de las velocidades para cada sitio de interés ..	67
3.9 Construcción de mapas de isotacas.....	68
3.10 Análisis comparativo de las velocidades regionales de viento obtenidas con las distintas bases de datos .....	69
CAPÍTULO IV .....	71
RESULTADOS .....	71
4.1 Base de datos de ciclones tropicales históricos .....	71

4.2	Análisis estadístico de las variables de ciclones tropicales .....	75
4.3	Distribuciones de probabilidad para las variables de ciclones tropicales .....	88
4.4	Base de datos de ciclones tropicales sintéticos .....	98
4.5	Mapas de isotacas .....	100
4.5.1	Mapas de isotacas de la simulación determinista.....	100
4.5.2	Mapas de isotacas de la simulación probabilista para el escenario 1 .....	102
4.5.3	Mapas de isotacas de la simulación probabilista para el escenario 2 .....	105
CAPÍTULO V .....		108
DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....		108
5.1	Selección de la distribución de probabilidad para las velocidades regionales .....	108
5.2	Efecto de los ciclones tropicales de trayectoria irregular en la simulación de ciclones tropicales históricos.....	110
5.3	Comparación de las velocidades regionales de viento de la simulación probabilista para diferentes bases de datos .....	113
5.4	Comparación de las velocidades regionales de viento del escenario 1 contra las velocidades regionales de viento del escenario 2 .....	116
5.5	Comparación de las velocidades regionales de viento de la simulación probabilista contra las velocidades regionales de viento de la simulación determinista .....	120
5.6	Comparación entre las velocidades regionales de viento de la CFE, las velocidades regionales obtenidas de la simulación determinista y las velocidades regionales obtenidas de la simulación probabilista .....	124
CAPÍTULO VI .....		129

	IV
CONCLUSIONES.....	129
REFERENCIAS .....	132
APÉNDICE A.....	136
Análisis de la velocidad superficial en mar.....	136
APÉNDICE B.....	138
Análisis de los ciclones tropicales de trayectoria irregular .....	138
APÉNDICE C.....	140
Papel de probabilidad para el cálculo de las velocidades regionales de viento .....	140

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Principales variables de un huracán	10
Figura 2.2	Velocidades superficiales en el radio de velocidades máximas, de acuerdo con la propuesta de Landsea et al. (2003) para $V_t$	11
Figura 2.3	Esquema del parámetro H	14
Figura 2.4	Equilibrio de fuerzas a la altura gradiente	15
Figura 2.5	Intervalo de promediación y probabilidad de excedencia	17
Figura 2.6	Efecto de la rugosidad del terreno	18
Figura 3.1	Perfil radial de velocidades para un huracán categoría 5 ( $V_s=280$ km/hr)	37
Figura 3.2	Zona de afectación de la Península de Yucatán	38
Figura 3.3	Ejemplo de la trayectoria recta del huracán Emily (2005)	39
Figura 3.4	Ejemplo de la trayectoria curva de la tormenta tropical Eloise (1975)	39
Figura 3.5	Ejemplo de la trayectoria irregular del huracán Isidore (2002)	40
Figura 3.6	Definición de variables de ciclones tropicales de trayectoria recta	41
Figura 3.7	Definición de variables de ciclones tropicales de trayectoria curva que pasan por la Península de Yucatán	42
Figura 3.8	Definición de variables de ciclones tropicales de trayectoria curva que pasan por el mar Caribe	43
Figura 3.9	Correlación lineal entre variables $CL_2$ vs $CL_3$	44

Figura 3.10	Correlación lineal entre variables <i>CW2</i> vs <i>CW3</i>	44
Figura 3.11	Ajuste de distribuciones normal y lognormal para la velocidad de traslación de ciclones tropicales de trayectoria recta	46
Figura 3.12	Ajuste de distribución uniforme para la latitud de tormentas tropicales de trayectoria recta	47
Figura 3.13	Diagrama de flujo para la generación de las variables que definen los ciclones tropicales sintéticos	51
Figura 3.14	Generación de ciclones tropicales sintéticos de trayectoria irregular	52
Figura 3.15	Ubicación del punto inicial de la trayectoria de ciclones tropicales sintéticos de trayectoria recta	53
Figura 3.16	Generación de la trayectoria de ciclones tropicales sintéticos de trayectoria recta	54
Figura 3.17	Generación del tiempo acumulado de ciclones tropicales sintéticos	55
Figura 3.18	Ubicación del punto inicial de la trayectoria de ciclones tropicales sintéticos de trayectoria curva que pasan por la Península de Yucatán	56
Figura 3.19	Ubicación del punto inicial de la trayectoria de ciclones tropicales sintéticos de trayectoria curva que pasan por el mar Caribe	56
Figura 3.20	Generación de la trayectoria de ciclones tropicales sintéticos de trayectoria curva	57

Figura 3.21	Generación del tiempo acumulado de ciclones tropicales sintéticos	58
Figura 3.22	Revisión de la categoría del terreno de ciclones tropicales sintéticos de trayectoria recta cuando entran a tierra	59
Figura 3.23	Revisión de la categoría del terreno de ciclones tropicales sintéticos de trayectoria curva cuando pasan por la Península de Yucatán	60
Figura 3.24	Revisión de la categoría del terreno de ciclones tropicales sintéticos de trayectoria recta que pasan por el mar Caribe	61
Figura 3.25	Revisión de la categoría del terreno de ciclones tropicales sintéticos de trayectoria curva que pasan por el mar Caribe	61
Figura 3.26	Adición de puntos de entrada y salida a la Península de Yucatán de ciclones tropicales sintéticos de trayectoria recta	62
Figura 3.27	Adición de puntos de entrada y salida a la Península de Yucatán de ciclones tropicales sintéticos de trayectoria curva	63
Figura 3.28	Velocidad superficial constante en mar o velocidad superficial de acuerdo a la ley de atenuación en tierra de los ciclones tropicales sintéticos	65
Figura 3.29	Mallado de Sitios de interés	69
Figura 4.1	Ciclones tropicales dentro de la región definida	71
Figura 4.2	Ciclones tropicales con trayectoria recta	73
Figura 4.3	Ciclones tropicales con trayectoria curva	73
Figura 4.4	Ciclones tropicales con trayectoria irregular	74

Figura 4.5	Histograma de frecuencia de la velocidad superficial de tormentas tropicales de trayectorias rectas y curvas	76
Figura 4.6	Histograma de frecuencia de la velocidad superficial de huracanes de trayectorias rectas y curvas	76
Figura 4.7	Histograma de frecuencia de la velocidad superficial de ciclones tropicales de trayectorias rectas y curvas	77
Figura 4.8	Histograma de frecuencia de la velocidad de traslación de tormentas tropicales de trayectorias rectas y curvas	77
Figura 4.9	Histograma de frecuencia de la velocidad de traslación de huracanes de trayectorias rectas y curvas	78
Figura 4.10	Histograma de frecuencia de la velocidad de traslación de ciclones tropicales	78
Figura 4.11	Histograma de frecuencia del ángulo de trayectoria de tormentas tropicales	79
Figura 4.12	Histograma de frecuencia del ángulo de trayectoria de huracanes	79
Figura 4.13	Histograma de frecuencia del ángulo de trayectoria de ciclones tropicales	80
Figura 4.14	Histograma de frecuencia de la latitud de tormentas tropicales de trayectoria recta	81
Figura 4.15	Histograma de frecuencia de la latitud de huracanes de trayectoria recta	81

Figura 4.16	Histograma de frecuencia de la latitud de ciclones tropicales de trayectoria recta	82
Figura 4.17	Histograma de frecuencia de ciclones tropicales de trayectoria recta graficado con respecto a la Península de Yucatán	82
Figura 4.18	Histograma de frecuencia del coeficiente constante $CL1$ de ciclones tropicales de trayectoria curva que pasan por la Península de Yucatán	83
Figura 4.19	Histograma de frecuencia del coeficiente constante $CL2$ de ciclones tropicales de trayectoria curva que pasan por la Península de Yucatán	84
Figura 4.20	Histograma de frecuencia del coeficiente constante $CW1$ de ciclones tropicales de trayectoria curva que pasan por el mar Caribe	84
Figura 4.21	Histograma de frecuencia del coeficiente constante $CW2$ de ciclones tropicales de trayectoria curva que pasan por el mar Caribe	85
Figura 4.22	Polígono de probabilidad acumulada de la velocidad superficial de ciclones tropicales de trayectoria recta y curva	86
Figura 4.23	Polígono de probabilidad acumulada de la velocidad de traslación de ciclones tropicales de trayectoria recta y curva	86
Figura 4.24	Polígono de probabilidad acumulada del ángulo de incidencia de ciclones tropicales de trayectoria recta	87

Figura 4.25	Polígono de probabilidad acumulada de la latitud de ciclones tropicales de trayectoria recta	88
Figura 4.26	Distribución tipo Weibull que describe la velocidad superficial de ciclones tropicales	89
Figura 4.27	Distribución tipo lognormal que describe la velocidad de traslación de ciclones tropicales	90
Figura 4.28	Distribución uniforme para cada marca de clase que describe el ángulo de incidencia de ciclones tropicales	91
Figura 4.29	Distribución uniforme para la latitud de tormentas tropicales	93
Figura 4.30	Distribución uniforme para la latitud de huracanes	93
Figura 4.31	Distribución normal para el coeficiente constante $CL1$ de los ciclones tropicales de trayectoria curva que pasan por la Península de Yucatán	94
Figura 4.32	Distribución normal para el coeficiente constante $CL2$ de los ciclones tropicales de trayectoria curva que pasan por la Península de Yucatán	95
Figura 4.33	Distribución normal para el coeficiente constante $CW1$ de los ciclones tropicales de trayectoria curva que pasan por el mar Caribe	96
Figura 4.34	Distribución uniforme para el coeficiente constante $CW2$ de los ciclones tropicales de trayectoria curva que pasan por el mar Caribe	96
Figura 4.35	Ciclones tropicales sintéticos de trayectoria recta	98

Figura 4.36	Ciclones tropicales sintéticos de trayectoria curva	99
Figura 4.37	Ciclones tropicales sintéticos de trayectoria irregular	99
Figura 4.38	Mapa de isotacas de la simulación determinista para un periodo de retorno de 50 años	100
Figura 4.39	Mapa de isotacas de la simulación determinista para un periodo de retorno de 100 años	101
Figura 4.40	Mapa de isotacas de la simulación determinista para un periodo de retorno de 200 años	101
Figura 4.41	Mapa de isotacas de la simulación determinista para un periodo de retorno de 500 años	102
Figura 4.42	Mapa de isotacas de la simulación probabilista para el escenario 1 y un periodo de retorno de 50 años	103
Figura 4.43	Mapa de isotacas de la simulación probabilista para el escenario 1 y un periodo de retorno de 100 años	103
Figura 4.44	Mapa de isotacas de la simulación probabilista para el escenario 1 y un periodo de retorno de 200 años	104
Figura 4.45	Mapa de isotacas de la simulación probabilista para el escenario 1 y un periodo de retorno de 500 años	104
Figura 4.46	Mapa de isotacas de la simulación probabilista para el escenario 2 y un periodo de retorno de 50 años	105
Figura 4.47	Mapa de isotacas de la simulación probabilista para el escenario 2 y un periodo de retorno de 100 años	106

Figura 4.48	Mapa de isotacas de la simulación probabilista para el escenario 2 y un periodo de retorno de 200 años	106
Figura 4.49	Mapa de isotacas de la simulación probabilista para el escenario 2 y un periodo de retorno de 500 años	107
Figura 5.1	Mapa de isotacas determinista de ciclones tropicales de trayectorias rectas y curvas para un periodo de retorno de 50 años	111
Figura 5.2	Mapa de isotacas determinista de todos los ciclones tropicales para un periodo de retorno de 50 años	111
Figura 5.3	Mapa de isotacas determinista de ciclones tropicales de trayectorias rectas y curvas para un periodo de retorno de 200 años	112
Figura 5.4	Mapa de isotacas determinista de todos los ciclones tropicales para un periodo de retorno de 200 años	112
Figura 5.5	Mapa de isotacas de ciclones tropicales sintéticos de la primera base de datos para un periodo de retorno de 50 años	114
Figura 5.6	Mapa de isotacas de ciclones tropicales sintéticos de la segunda base de datos para un periodo de retorno de 50 años	114
Figura 5.7	Mapa de isotacas de ciclones tropicales sintéticos de la primera base de datos para un periodo de retorno de 200 años	115
Figura 5.8	Mapa de isotacas de ciclones tropicales sintéticos de la segunda base de datos para un periodo de retorno de 200 años	115

Figura 5.9	Mapa de isotacas probabilista del escenario 1 para un periodo de retorno de 50 años	117
Figura 5.10	Mapa de isotacas probabilista del escenario 2 para un periodo de retorno de 50 años	117
Figura 5.11	Mapa de isotacas probabilista del escenario 1 para un periodo de retorno de 200 años	118
Figura 5.12	Mapa de isotacas probabilista del escenario 2 para un periodo de retorno de 200 años	118
Figura 5.13	Relaciones en porcentaje de la simulación probabilista con respecto a la simulación determinista y ciclones tropicales más fuertes que han afectado la Península de Yucatán para un periodo de retorno de 50 años	122
Figura 5.14	Relaciones en porcentaje de la simulación probabilista con respecto a la simulación determinista y ciclones tropicales más fuertes que han afectado la Península de Yucatán para un periodo de retorno de 200 años	123
Figura 5.15	Huracanes históricos con velocidades superficiales máximas registradas de la simulación determinista (naranja) vs huracanes sintéticos de velocidades superficiales mayores a 280 km/hr de la simulación probabilista (verde).	124
Figura A.1	Determinación de la variación de la velocidad superficial de ciclones tropicales en mar	136
Figura A.2	Velocidad superficial de ciclones tropicales en mar: $V_0$ vs $V_1$	137

		XIV
Figura C.1	Papel de probabilidad extremo tipo I para Campeche	140
Figura C.2	Papel de probabilidad extremo tipo I para Cancún	141
Figura C.3	Papel de probabilidad extremo tipo I para Chetumal	141
Figura C.4	Papel de probabilidad tipo I para Mérida	142

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Etapas de un ciclón tropical	7
Tabla 2.2	Escala de huracanes de Saffir-Simpson	8
Tabla 2.3	Valores de $\alpha$ y $\delta$	18
Tabla 3.1	Distribución de probabilidad para las variables de los ciclones tropicales	45
Tabla 3.2	Población idealizada histórica y sintética de ciclones tropicales para la Península de Yucatán	49
Tabla 4.1	Clasificación de los ciclones tropicales de acuerdo a su trayectoria	72
Tabla 4.2	Clasificación idealizada de los ciclones tropicales de acuerdo a su trayectoria para efecto de modelación	75
Tabla 4.3	Probabilidad para cada marca de clase en el modelo del ángulo de incidencia	90
Tabla 4.4	Probabilidad para cada marca de clase en el modelo de la latitud de tormentas tropicales	92
Tabla 4.5	Probabilidad para cada marca de clase en el modelo de la latitud de huracanes	92
Tabla 4.6	Distribuciones de probabilidad seleccionadas para las variables de los ciclones tropicales	97

Tabla 5.1	Correlaciones calculadas del ajuste probabilístico de distribuciones extremas en las principales ciudades de la Península de Yucatán	109
Tabla 5.2	Velocidades regionales de las principales ciudades de la Península de Yucatán para periodos de retorno de 50 años y 200 años (escenario 1 vs escenario 2)	119
Tabla 5.3	Velocidades regionales de las principales ciudades de la Península de Yucatán para un periodo de retorno de 50 años (simulación probabilista vs simulación determinista)	120
Tabla 5.4	Velocidades regionales de las principales ciudades de la Península de Yucatán para un periodo de retorno de 200 años (simulación probabilista vs simulación determinista)	121
Tabla 5.5	Comparativa de velocidades regionales de las principales ciudades de la Península de Yucatán para un periodo de retorno de 50 años (CFE 2008, obtenida de la simulación determinista y obtenida de la simulación probabilista)	126
Tabla 5.6	Comparativa de velocidades regionales de las principales ciudades de la Península de Yucatán para un periodo de retorno de 200 años (CFE 2008, obtenida de la simulación determinista y obtenida de la simulación probabilista)	127
Tabla B.1	Ciclones tropicales atípicos y su consideración	138

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Planteamiento del problema

Los tipos de cargas consideradas en el diseño estructural de una edificación son las vivas, las muertas y las accidentales. Éstas últimas pueden ser debidas a múltiples sucesos, como lo son las presiones del viento causadas por los ciclones tropicales. La Península de Yucatán es una zona propensa al embate de ciclones tropicales, por lo que este tipo de carga puede regir el diseño estructural.

Para calcular las acciones causadas por el viento en las estructuras es necesario determinar las presiones de diseño, que son a su vez función de la velocidad de diseño del viento. Esta última es función de la velocidad regional de viento del lugar donde se construirá la estructura.

Las velocidades regionales de viento son las velocidades máximas probables de presentarse con un cierto periodo de recurrencia en una zona o región determinada del país. Estas velocidades se refieren a condiciones homogéneas que corresponden a una altura de 10 metros sobre la superficie del suelo en terreno plano; es decir, no considera las características de rugosidad locales del terreno, ni la topografía específica del sitio. Asimismo se debe tomar en cuenta la posibilidad de que se presenten vientos debido a huracanes en las zonas propensas a la actividad de este fenómeno meteorológico (CFE, 2008).

El Manual de Diseño por Viento de la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 2008) establece que las velocidades regionales de viento consideran la actividad de huracanes a través de un análisis probabilístico conjunto entre las distribuciones de vientos normales y vientos huracanados. La combinación de distribuciones entre vientos normales y huracanados es recomendable cuando se observan ciclones tropicales con baja magnitud y frecuencia (Simiu y Scanlan, 1996). Sin embargo, en la

Península de Yucatán se observan ciclones tropicales con alta magnitud y frecuencia, por lo que la velocidad máxima observada para un período de retorno únicamente depende de la distribución de velocidades observadas en dichos eventos meteóricos (Fernández, 2008).

Para analizar la distribución de probabilidad de vientos de huracán es necesario contar con información de vientos registrados por el paso de huracanes en la región de interés. Debido a que los datos históricos son limitados, se recurre a modelos que simulan los campos de viento de huracán a partir de la trayectoria y las velocidades superficiales máximas. Las velocidades regionales de viento propuestas por el manual de la CFE (2008) se basan en el modelo desarrollado por Sánchez-Sesma (1988); este modelo tiene una buena base teórica, pero no incluye los desarrollos meteorológicos de los últimos años. Fernández-Baqueiro *et. al.* (2009) propuso un modelo que incluye algunos de los desarrollos meteorológicos y que a su vez fueron complementados por Fernández-Baqueiro *et. al.* (2010).

Para determinar la distribución de probabilidad de vientos de huracán se puede calcular por medio de dos métodos: simulación determinística y simulación probabilista. En México se ha utilizado la simulación determinista; tal es el caso del trabajo realizado por Sánchez-Sesma (2009) para el país y el de Fernández-Baqueiro *et. al.* (2010) para la Península de Yucatán. Por otra parte, en otros países, como Estados Unidos, se ha utilizado una simulación probabilista. La simulación probabilista simula los procesos de ocurrencia, movimiento (velocidad y dirección), e intensidad, y para cada una de las variables utiliza una distribución de probabilidad (López *et. al.* 2008). Una de las ventajas de la simulación probabilista es que se considera la generación de nuevos ciclones tropicales que no han ocurrido con anterioridad. Esto es de interés debido a que difícilmente se presentarán nuevos ciclones tropicales con las mismas características (*e.g.* velocidad y trayectoria) que los ocurridos previamente.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

El objetivo general de esta investigación es la determinación de las velocidades regionales de viento para el diseño estructural en la Península de Yucatán empleando un modelo probabilista para generar ciclones tropicales sintéticos y un modelo determinista que considere los ciclones tropicales históricos.

### **1.2.1 Objetivos particulares**

Para llevar a cabo el objetivo general de esta investigación se han establecido los siguientes objetivos particulares:

- Desarrollar un modelo probabilista para generar ciclones tropicales sintéticos.
- Elaborar un programa de cómputo para generar ciclones tropicales sintéticos.
- Elaborar mapas de isotacas de velocidades regionales para el diseño estructural asociados a distintos períodos de retorno con base en la simulación probabilista de ciclones tropicales.
- Elaborar mapas de isotacas de velocidades regionales para el diseño estructural asociados a distintos períodos de retorno con base en la simulación determinista de ciclones tropicales.

## **1.3 Alcances**

En este trabajo se desarrolla un modelo probabilista que genera ciclones tropicales sintéticos con el fin de obtener velocidades regionales de viento para el diseño estructural en la Península de Yucatán. En el modelo probabilista se consideraron tres tipos de trayectorias de ciclones tropicales: trayectorias rectas, trayectorias curvas y trayectorias irregulares. Se consideraron eventos con velocidades de viento no

menores a las de una tormenta tropical. Con dicho modelo se pueden generar bases de datos de ciclones tropicales sintéticos, similar a la información contenida en la base de datos del HURDAT de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos. Por lo tanto, este modelo no es para predecir el comportamiento de un ciclón tropical en específico.

Las velocidades regionales de viento se representan por medio de mapas de isotacas para los periodos de retorno de 50, 100, 200 y 500 años. Para obtener las velocidades regionales de viento se realiza una simulación probabilista con ciclones tropicales históricos y con ciclones tropicales sintéticos generados el modelo probabilista propuesto.

Se consideraron dos posibles escenarios para la simulación de los ciclones tropicales sintéticos. En el primer escenario se consideró que la velocidad máxima a observarse en un ciclón tropical permanecería constante de acuerdo a los registros históricos. En el segundo escenario se consideró que las velocidades superficiales máximas a observarse pudieran ser mayores hasta en un 10% con respecto a los registros históricos.

## **1.4 Contenido**

En el Capítulo I se presenta la introducción, el planteamiento del problema, el objetivo general, los objetivos particulares, los alcances de esta investigación y el contenido de esta tesis.

En el Capítulo II se presenta brevemente la revisión de la literatura. Se incluye la clasificación de los ciclones tropicales, las características principales, su estructura y las variables que los describen. Se describe el Modelo del Campo de Velocidades de Viento de Huracán con cada uno de los pasos para el cálculo de las velocidades. Adicionalmente se presenta el cálculo de las velocidades regionales de viento de huracán de acuerdo al Manual de Diseño por Viento de la CFE (2008), investigaciones nacionales e investigaciones internacionales. Finalmente se presentan las conclusiones principales de la revisión de la literatura.

En el capítulo III se presenta la metodología del trabajo de investigación. La metodología incluye la depuración y organización de la base de datos histórica de los ciclones tropicales. Se presenta el análisis estadístico de los ciclones tropicales y la determinación de la correlación entre variables para posteriormente realizar el ajuste de distribuciones de probabilidad de cada una de las variables de los ciclones tropicales. Posteriormente se presenta la simulación de los ciclones tropicales históricos. Se presenta la elaboración de un programa de cómputo para generar ciclones tropicales sintéticos en los que se describe paso a paso la generación de los puntos que define la trayectoria, la revisión de la categoría del terreno y los puntos de entrada y salida a la Península de Yucatán y la generación de la velocidad para cada punto de la trayectoria. Se ilustra la generación y organización de la base de datos de ciclones tropicales sintéticos por medio de un diagrama de flujo. Finalmente se describe cómo se realiza la simulación de los ciclones tropicales sintéticos, el ajuste probabilístico de las velocidades para cada sitio de interés, el procedimiento utilizado para la obtención de los diferentes mapas de isotacas y el análisis comparativo de las velocidades regionales obtenidas con las distintas bases de datos.

En el Capítulo IV se presentan los resultados de la investigación. En la primera parte se presentan los resultados de la depuración y organización de la base de datos de los ciclones tropicales históricos y la clasificación de los ciclones tropicales de acuerdo a su trayectoria. En la segunda parte se incluyen los resultados del análisis estadístico de las variables de los ciclones tropicales. En la tercera parte se presentan las distribuciones de probabilidad seleccionadas para cada una de las variables. Posteriormente se ilustran algunas trayectorias de los ciclones tropicales sintéticos de trayectorias rectas, trayectorias curvas y trayectorias irregulares. Finalmente se presentan los mapas de isotacas para la Península de Yucatán y las velocidades regionales de viento en las principales ciudades. Los mapas de isotacas y las velocidades calculadas se realizaron para distintos períodos de retorno obtenidos de la simulación determinista de ciclones tropicales históricos y de la simulación probabilista de ciclones tropicales sintéticos considerando el escenario 1 y el escenario 2.

En el Capítulo V se presenta la discusión de los resultados, en la que primero se selecciona el tipo de distribución que mejor ajusta a la simulación probabilista. Posteriormente se realiza un análisis determinista para conocer el efecto de los ciclones tropicales de trayectoria irregular mediante la simulación de los ciclones tropicales históricos. Después se comparan las velocidades regionales de viento obtenidas de la simulación probabilista de diferentes bases de datos de ciclones tropicales sintéticos. Se realiza la comparación entre las velocidades regionales de viento obtenidas en el escenario 1 contra las velocidades regionales de viento obtenidas en el escenario 2. Se realiza la comparación de las velocidades regionales de viento de la simulación probabilista del escenario 1 contra las velocidades regionales de viento de la simulación determinista. Finalmente se realiza una comparación de las velocidades regionales de viento obtenidas de la simulación determinista y la simulación probabilista con respecto a las velocidades regionales de viento propuestas por el Manual de Diseño por Viento de la CFE.

En el Capítulo VI se presentan las conclusiones del trabajo. En el Apéndice A se presenta el análisis que permite asumir que los ciclones tropicales mantienen la velocidad superficial constante en el mar. En el Apéndice B se incluye el análisis detallado de los ciclones tropicales históricos de trayectoria irregular. En el Apéndice C se realiza el papel de probabilidad de la simulación histórica y de la simulación probabilista para cuatro ciudades importantes de la Península de Yucatán, respectivamente para su análisis.

## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LA LITERATURA

#### 2.1 Ciclones tropicales

El ciclón tropical es un mecanismo que sirve para transportar el exceso de calor desde zonas tropicales hasta zonas más frías, esto con el fin de equilibrar el calor en la atmósfera, ya que el sol no calienta a todo el planeta de la misma manera. Se conoce como ciclón tropical al viento que se traslada girando a gran velocidad, donde la presión disminuye en su interior y adquiere una circulación rotacional organizada en el sentido contrario a las manecillas del reloj en el hemisferio norte, y en el sentido opuesto en el hemisferio sur (Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales – SEMARNAT – 2002).

El ciclón tropical puede desarrollar tres etapas, las cuales se desglosan en la Tabla 2.1. Las etapas de un ciclón tropical y su clasificación son función de la velocidad de viento máxima que éste provoca.

Tabla 2.1 Etapas de un ciclón tropical

<b>Etapas</b>	<b>Velocidad (km/h)</b>
Depresión Tropical	$V \leq 62$
Tormenta Tropical	$62 < V \leq 119$
Huracán	$V > 119$

Los huracanes corresponden a la etapa de mayor intensidad de los ciclones tropicales. Los huracanes por su naturaleza tienen una propia clasificación debido a que, por su intensidad y gran tamaño son una fuente importante de desastres naturales.

Para clasificar los huracanes de acuerdo a las velocidades máximas sostenidas de viento y sus daños potenciales, en 1969 el Ingeniero Civil Herbert Saffir y el Director del Centro Nacional de Huracanes de Estados Unidos, representado por sus siglas en inglés NHC's (National Hurricane Center's), Bob Simpson, desarrollaron la escala de huracanes Saffir-Simpson. En la Tabla 2.2 se presentan las cinco categorías de esta escala como función de la velocidad máxima del viento promediada a un minuto y la presión central aproximada. En dicha tabla se indica el nivel de los daños observados con el paso de un huracán.

Tabla 2.2 Escala de huracanes de Saffir-Simpson

<b>Categoría</b>	<b>Daños</b>	<b>Velocidad (km/h)</b>	<b>Presión Central (mb)</b>
1	Mínimos	119 a 153	$\geq 980$
2	Moderados	154 a 177	965 a 979
3	Extensos	178 a 209	945 a 964
4	Extremos	210 a 249	920 a 944
5	Catastróficos	$\geq 250$	$< 920$

## VARIABLES DE UN HURACÁN

El estudio de las variables de un huracán es de importancia para entender su comportamiento. La recopilación de información acerca de dichas variables permite establecer ecuaciones que son necesarias para la modelación del campo de

velocidades del viento de un huracán. A continuación se enlistan las principales variables y factores que se utilizan para el cálculo del campo de velocidades de acuerdo a la revisión de literatura (Fernández, 2008), y se ilustran en la Figura 2.1:

- *Velocidad superficial máxima ( $V_{s\_max}$ ).*- La velocidad superficial máxima es aquella que se registra a una altura de 10 metros sobre el nivel del mar; se presenta en el radio de velocidades máximas a un ángulo de  $90^\circ$  de la trayectoria del huracán, medido en sentido horario.
- *Presión central ( $P_o$ ).*- La presión central es la presión en el ojo del huracán.
- *Radio de velocidades máximas ( $R_{max}$ ).*- Es la distancia de donde se presentan las velocidades superficiales máximas al centro del huracán.
- *Parámetro H.*- Es la relación que existe entre la velocidad superficial a 10 metros de altura y la velocidad a la altura gradiente en un mismo sitio.
- *Velocidad de traslación ( $V_t$ ).*- La velocidad de traslación es aquella con la que se desplaza el ojo del huracán.
- *Latitud ( $L$ ).*- La latitud donde se ubica la posición del centro los huracanes en la superficie terrestre.
- *Factor de Ráfaga ( $F_{t(j)/t(i)}$ ).*- Es el factor que relaciona dos velocidades en el mismo sitio y a la misma altura, pero con distintos tiempos de promediación.
- *Factor de rugosidad  $F_{r(N)/r(M)}$ .*- Es el factor que relaciona dos velocidades en distintos sitios con diferente categoría (rugosidad) de terreno.

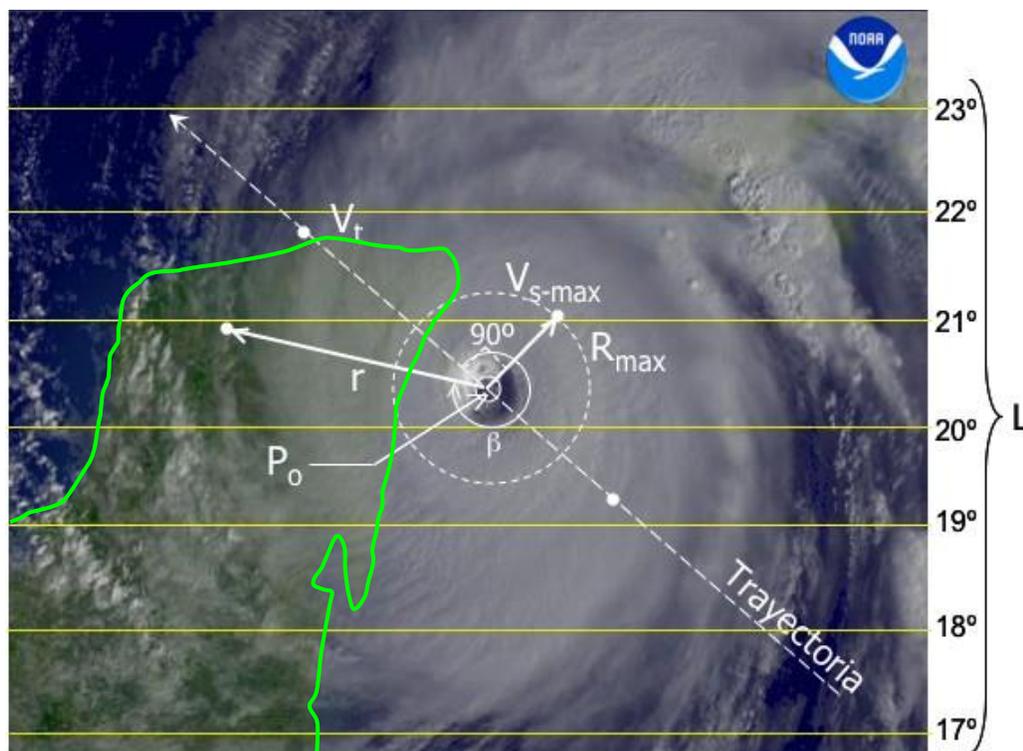


Figura 2.1 Principales variables de un huracán (Félix, 2006)

De la revisión de la literatura se han obtenido las ecuaciones para determinar las variables y factores necesarios en el cálculo del campo de velocidades de un huracán. La mayoría de estas ecuaciones y formulaciones fue realizada por Fernández-Baqueiro *et. al.* (2009) y posteriormente fueron revisados por Fernández-Baqueiro *et. al.* (2010) donde se incluyeron recientes desarrollos meteorológicos.

## 2.2 Modelo del campo de velocidades de viento de huracán

Fernández-Baqueiro *et. al.* (2009) desarrolló un Modelo de Campo de Velocidades (MCVVH) de viento que producen los huracanes al pasar por la Península de Yucatán. Se realizó un programa de cómputo que se calibró por medio de dos bases de datos; las Estaciones Meteorológicas y el HURDAT.

El MCVVH considera las principales variables que caracterizan a los huracanes, tales como la velocidad superficial máxima  $V_{s\_max}$ , el radio de velocidades máximas  $R_{max}$ , la velocidad de traslación  $V_t$ , la presión central  $P_o$ , la localización geográfica del ciclón (latitud y longitud), la relación entre velocidad superficial y velocidad a la altura gradiente  $H$ .

Este modelo considera la asimetría en el campo de velocidades de viento huracanado producida por la velocidad de traslación ( $V_t$ ). La velocidad de traslación de un huracán es una variable importante, ya que afecta el campo de velocidades de viento huracanado. Landsea *et al.* (2003) mencionan que el efecto de la velocidad de traslación tiene un factor aditivo de acuerdo a la zona del huracán. A noventa grados en sentido horario de la trayectoria se ha observado que la velocidad superficial es mayor en dos veces la velocidad de traslación que a 90° en sentido antihorario de la trayectoria del huracán (Figura 2.2).

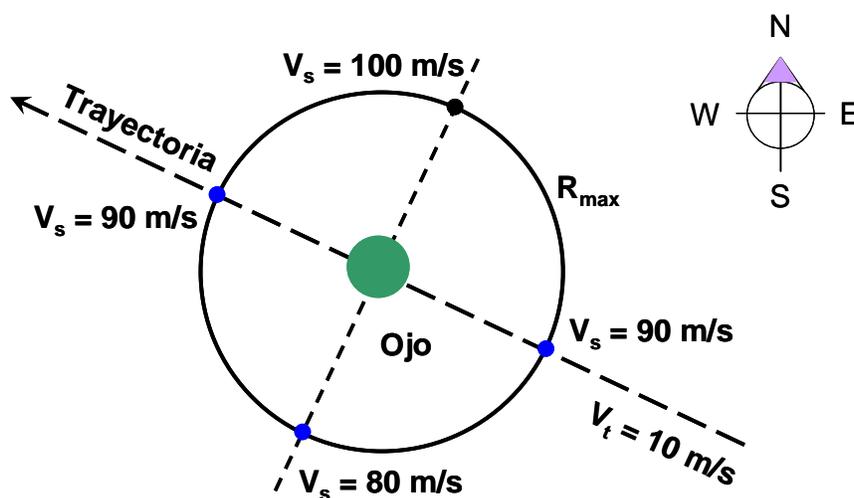


Figura 2.2 Velocidades superficiales en el radio de velocidades máximas, de acuerdo con la propuesta de Landsea *et al.* (2003) para  $V_t$

El modelo desarrollado se basa en el equilibrio de fuerzas a la altura gradiente y en el modelo propuesto por Holland en 1980. Los datos de entrada requeridos por el modelo son la posición geográfica (latitud y longitud) y la velocidad superficial máxima del

viento en un instante de tiempo. A continuación se presentan los pasos que corresponden al modelo del campo de velocidades de viento de huracán.

### **Paso 1 Datos de entrada del modelo**

Obtener los datos de entrada del modelo: velocidad superficial máxima  $V_{s\_max}$  (m/s), velocidad de traslación  $V_t$  (m/s), latitud  $L$  (grados) y categoría del terreno donde se localiza el huracán.

### **Paso 2 Cálculo de la presión central superficial $P_{os}$**

La ecuación 2.1 fue la utilizada en el trabajo de Fernández-Baqueiro *et al.* (2009) para el cálculo de la presión central superficial  $P_{os}$  (mb). A partir de dicha ecuación se puede calcular la presión central en función de la velocidad superficial máxima.

$$P_{os}=1013-\left(\frac{V_{s\_max}}{12.016}\right)^{\frac{1}{0.5337}} \quad (2.1)$$

La ecuación 2.1 fue propuesta Landsea *et al.* (2003) y está basada en la regresión de datos obtenidos mediante mediciones registradas de 1990 hasta 1997. Esta ecuación es válida para latitudes menores a los 25° N. donde se encuentra ubicada la Península de Yucatán.

### **Paso 3 Radio de velocidades máximas $R_{max}$**

La estimación del valor del radio de velocidades máximas es uno de los cálculos más complejos, por lo que su determinación siempre se había realizado mediante métodos simples. Por ejemplo, el radio de velocidades máximas se calculaba de acuerdo al diámetro del ojo del huracán o se empleaban valores preestablecidos definidos para ciertos rangos de presión central.

Félix (2006) realizó un análisis de sensibilidad de fórmulas para el cálculo del radio de velocidades máximas en función de la presión central y de la latitud de la posición del ojo de huracán presentadas por Vickery *et al.* (2000), y encontró que la ecuación 2.2

que se presenta a continuación es la más adecuada para utilizarse en el modelo debido a que presenta una buena correlación y es la recomendada en el trabajo de Landsea *et al.* (2003) para el reanálisis de datos para el HURDAT.

$$R_{max} = e^{[2.636 - 0.00005086(P_n - P_{os})^2 + 0.0394899(L)]} \quad (2.2)$$

Donde  $R_{max}$  es el radio de velocidades máximas en km,  $P_n$  es la presión atmosférica en la periferia del ciclón (mb),  $P_o$  es la presión central y  $L$  es la latitud. La ecuación 2.2 se caracteriza por no tener restricciones con respecto a la latitud para su aplicación y se ajusta satisfactoriamente a las mediciones de campo.

#### **Paso 4 Cálculo del parámetro $H$**

El parámetro  $H$  es la proporción que existe entre las velocidades superficiales a diez metros de altura y la velocidad que se presenta a la altura gradiente, en un mismo lugar (Figura 2.3. Fernández-Baqueiro *et al.* (2009), propone en su trabajo la ecuación 2.3 para el cálculo del parámetro  $H$ , de acuerdo al radio del sitio de interés.

$$\begin{aligned} H &= 0.865 && \text{si } R_n \leq 1 \\ H &= -0.020045R_n + 0.88545 && \text{si } 1 < R_n \leq 12 \\ H &= 0.64 && \text{si } R_n > 12 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Donde  $R_n$  es el radio normalizado y  $r$  es el radio (Km). Esta propuesta emplea tres ecuaciones para el cálculo de  $H$ ; presenta un valor constante cuando se evalúa la velocidad dentro del radio de velocidades máximas ( $R_{max}$ ) y fuera de un radio de 12  $R_{max}$ , mientras que para valores intermedios presenta una relación lineal. Otros autores como Simiu y Scanlan (1996) emplean un valor constante de 0.865.

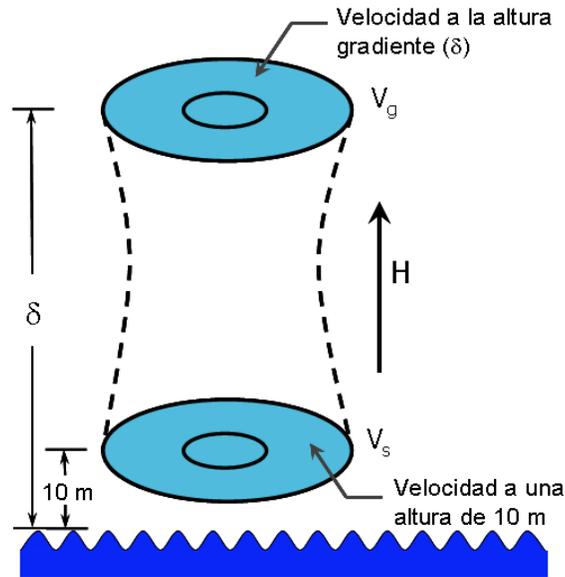


Figura 2.3 Esquema del parámetro H (Félix, 2006)

### **Paso 5 Cálculo de la velocidad de gradiente máxima $V_{g\_m\acute{a}x}$**

La velocidad gradiente máxima se puede calcular como:

$$V_{g\_m\acute{a}x} = \frac{V_{s\_m\acute{a}x}}{H} \quad (2.4)$$

### **Paso 6 Cálculo de la presión central a la altura del gradiente $P_{og}$**

La presión central en el ojo del huracán se puede calcular con base en el equilibrio de fuerzas a la altura gradiente (ecuación 2.5), en donde se equilibran la fuerza de coriolis que es la fuerza aparente que se genera por el efecto de la rotación de la tierra (Simiu y Scanlan, 1996), la fuerza centrífuga que se genera al girar alrededor del vórtice, y la fuerza que se genera por el diferencial de presiones entre isobaras (Figura 2.4).

$$P_{og} = P_n - \frac{\rho R_n^B [V_{g\_max}^2 + (V_{g\_max} r a)]}{10.197 B e^{(-R_n^B)}} \quad (2.5)$$

Donde  $P_o$  es la presión central en el ojo del huracán en milibares,  $P_n$  es la presión en la periferia del ciclón,  $\rho$  es la densidad normalizada del aire ( $\text{kg s}^2/\text{m}^4$ ),  $V_{g\_max}$  es la velocidad gradiente máxima (m/s),  $r$  es el radio en km,  $f$  es el parámetro de coriolis ( $\text{s}^{-1}$ ),  $B$  es el parámetro de presiones de Holland (adimensional),  $R_n$  es el radio normalizado definido como  $R_n = r/R_{max}$  y  $a$  es la variable que considera la velocidad de traslación ( $\text{s}^{-1}$ ) de acuerdo con la ecuación 2.6:

$$a = f - \frac{V_t \sin(\varphi)}{r} \quad (2.6)$$

$$f = 2\omega \sin(L) \quad (2.7)$$

En donde  $\varphi$  es el ángulo medido en sentido horario desde la trayectoria del huracán al sitio de interés (grados);  $f$  es el parámetro de Coriolis,  $r$  es el radio y  $\omega$  es la velocidad angular de rotación de la tierra (rad/s).

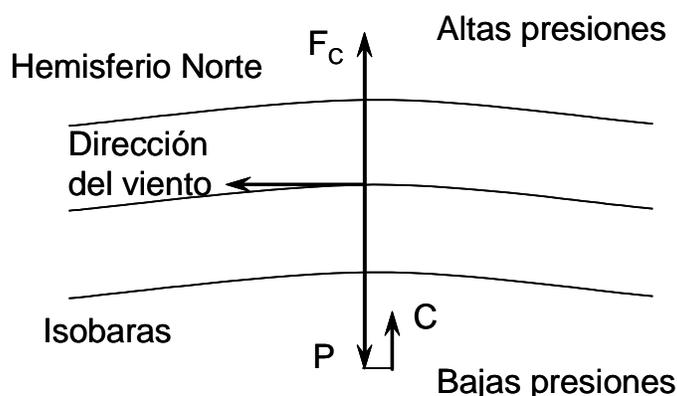


Figura 2.4 Equilibrio de fuerzas a la altura gradiente (Félix, 2006)

### **Paso 7 Obtener la velocidad del gradiente $V_g$**

Se calcula la velocidad del gradiente ( $V_g$ ) para los sitios de interés localizados a un radio ( $r$ ) del centro del huracán y a un ángulo  $\varphi$  respecto a la trayectoria del huracán, empleando la ecuación 2.8 de Vickery *et al.* (2000), Sánchez-Sesma (1985), Springall (1974) y Tryggvason *et al.* (1976)

$$V_g = \frac{ra}{2} + \sqrt{\frac{ra^2}{2} + \frac{10.197(Pn-PoB)}{\rho} * \left(\frac{1}{Rn}\right)^B e^{-\left(\frac{1}{Rn}\right)^B}} \quad (2.8)$$

### ***Paso 8 Calcular H***

Se calcula el parámetro  $H$  para los diferentes sitios de interés utilizando la ecuación 2.3.

### ***Paso 9 Calcular la velocidad superficial ( $V_s$ )***

Se obtiene la velocidad superficial para los sitios de interés utilizando la ecuación 2.9.

$$V_s = V_g H \quad (2.9)$$

### ***Paso 10 Cálculo del factor de ráfaga $F_{t(J)/t(I)}$***

El factor de ráfaga es la relación de las velocidades máximas promediadas en un intervalo de tiempo y aquellas que son promediadas en un intervalo de tiempo distinto al anterior. La velocidad media y máxima del viento depende del intervalo tiempo considerado para su promediación (Figura 2.5). Se emplea la ecuación 2.10 en función de la categoría del terreno donde se localiza el ciclón tropical.

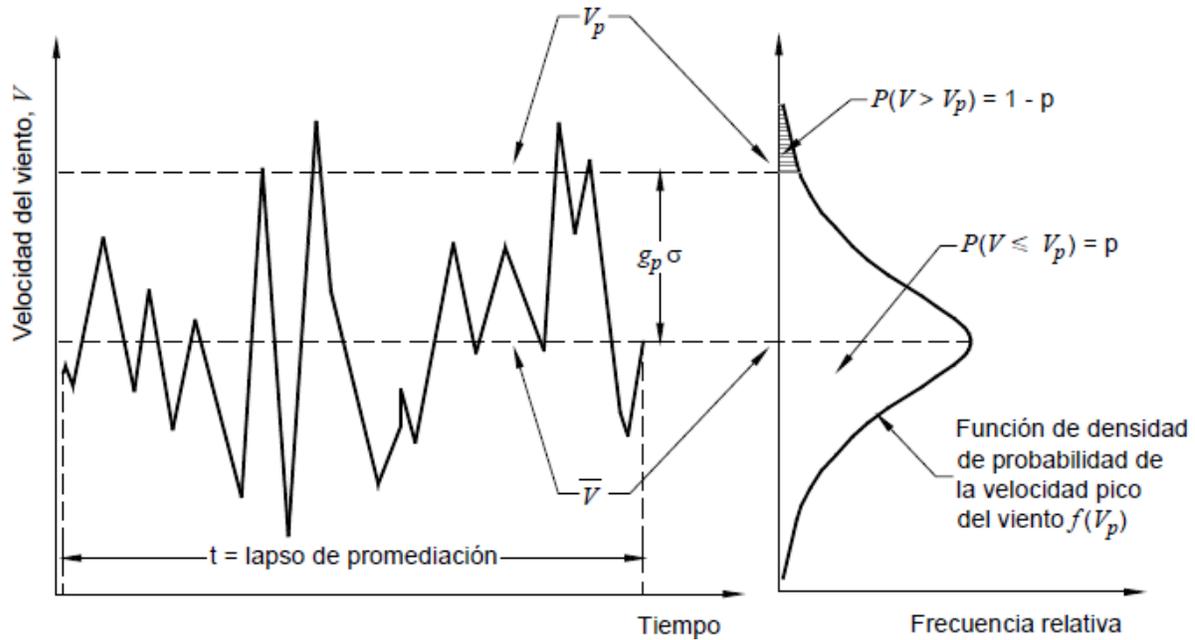


Figura 2.5 Intervalo de promediación y probabilidad de excedencia (CFE, 2008)

$$F_{t(J)/t(I)} = \frac{F_{t(J)/t(3600)}}{F_{t(I)/t(3600)}} \quad (2.10)$$

### **Paso 11 Calcular el factor de rugosidad $F_{r(N)/r(M)}$**

El factor de rugosidad es la relación que existe entre dos velocidades que se encuentran en diferente categorías de terreno, ya que la rugosidad es uno de los principales factores de la variación de la velocidad dentro de la capa límite.

En el Manual de Diseño de Obras Civiles para el Diseño por Viento de la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 2008) se presenta la ecuación 2.11 para calcular dicho factor y que a su vez, fue utilizada por Fernández-Baqueiro *et. al.* (2009) para el desarrollo del modelo:

$$Fr(N)/r(M) = \left[ \left( \frac{\delta r(M)}{Zr(M)} \right)^{ar(M)} \left( \frac{Zr(N)}{\delta r(N)} \right)^{ar(N)} \right] \quad (2.11)$$

Donde  $\alpha$  es el coeficiente de ley exponencial (adimensional),  $\delta$  es la altura gradiente en metros;  $\alpha$  y  $\delta$  se obtienen de la Tabla 2.3;  $Z$  es la altura a la que se presentan las velocidades a relacionar en metros. En la Figura 2.6 se ilustra el efecto de la rugosidad del terreno, ya que para una misma velocidad gradiente se tienen diferentes velocidades superficiales a 10 m.

Tabla 2.3 Valores de  $\alpha$  y  $\delta$  (CFE, 2008)

Categoría del 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	0.16	0.171	390
4	0.17	0.177	0.193	455

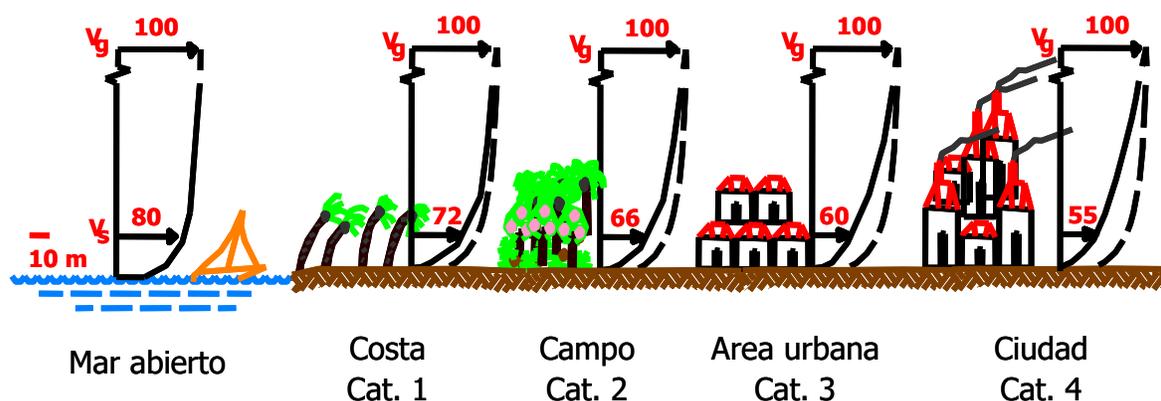


Figura 2.6 Efecto de la rugosidad del terreno (Félix, 2006)

### **Paso 12 Calcular la velocidad superficial modificada $F_s(T(j), r(N))$**

La velocidad superficial modificada por los factores de ráfaga y rugosidad  $V_s(t_{(j)}, r_{(N)})$  para el sitio de interés se calculó por medio de la ecuación 2.12.

$$V_s(t_{(j)}, r_{(N)}) = F_{t_{(j)}/t_{(l)}} F_{r_{(N)}/r_{(M)}} V_s(t_{(l)}, r_{(M)}) \quad (2.12)$$

## **2.3 Modelos probabilísticos**

Cuando las acciones se relacionan con fenómenos naturales excepcionales, como huracanes o sismos, lo que interesa es el valor máximo que puede llegar a adquirir la acción durante la vida de la construcción (Meli, 2002). La información estadística disponible consiste, en el mejor de los casos, en datos como los relativos a la velocidad instantánea máxima anual de viento en el sitio de interés. De estos datos se puede determinar el valor de la velocidad que tiene una probabilidad  $p$  de ser excedida en un año cualquiera (Meli, 2002). Esta probabilidad es la que se asocia a un período de retorno dado.

Para poder hallar dicha probabilidad es necesario relacionar la información estadística con modelos probabilísticos que ajusten el comportamiento de la variable con respecto a sus frecuencias de ocurrencia. En este apartado se abordan los aspectos teóricos que permiten relacionar la probabilidad con el período de retorno, así como el modelo probabilístico empleado para ajustar las velocidades de viento huracanado, y las distribuciones de probabilidad extrema.

### **2.3.1 Período de retorno**

En los diseños realizados en la ingeniería civil, cuando las acciones se deben a eventos excepcionales, lo que interesa es el valor máximo que puede llegar a tener dicha acción. Debido a lo anterior, los ingenieros buscan estimar la probabilidad  $p$ , de que en un tiempo determinado, comúnmente un año, este valor máximo se vea excedido (Benjamín y Cornell, 1970). La probabilidad promedio  $p$  de que la velocidad  $V$ , exceda el valor máximo  $V_m$ , puede denotarse como:

$$p = P[V \geq V_m] \quad (2.13)$$

La probabilidad promedio de que la velocidad  $V$  no exceda el valor máximo  $V_m$  es el complemento de la probabilidad promedio ( $1-p$ ) y se puede calcular a partir de la función de distribución acumulada  $F(v)$ :

$$F(v) = 1 - p = P[V < V_m] \quad (2.14)$$

El período de tiempo  $T$  necesario para que la velocidad de viento  $V$  exceda al menos una vez el valor de la velocidad máxima  $V_m$ , se define como periodo de retorno promedio o simplemente período de retorno (Benjamín y Cornell, 1970):

$$p = P[V \geq V_m] = \frac{1}{T} \quad (2.15)$$

Por lo tanto, la probabilidad promedio  $F(v)$  de que la velocidad  $V$  no exceda el valor máximo  $V_m$  puede relacionarse con el período de retorno sustituyendo en la ecuación (2.14) en la ecuación (2.15):

$$F(v) = P[V \geq V_m] = 1 - \frac{1}{T} \quad (2.16)$$

Para calcular la probabilidad de que la velocidad  $V$ , exceda el valor máximo  $V_m$ , durante la vida útil de la estructura  $N$ , se puede asumir que el fenómeno es estacionario en el tiempo, es decir, que la probabilidad  $p$  se mantiene constante a lo largo de los años, independientemente de lo que haya ocurrido en años anteriores. Para un lapso de años sucesivos  $N$ , la probabilidad de excedencia se puede calcular como un proceso de Bernoulli. En un proceso de Bernoulli, la probabilidad de que en  $N$  años de la vida útil de una estructura, no se exceda el valor de  $V_m$ , se calcula como:

$$P_N[V < V_m] = (P[V < V_m])^N \quad (2.17)$$

Por lo tanto, la probabilidad de que en  $N$  años de la vida útil de una estructura se exceda el valor de  $V_m$ , se puede calcular como el complemento de la probabilidad calculada en la ecuación (2.17):

$$P_N[V \geq V_m] = 1 - (P[V < V_m])^N \quad (2.18)$$

Sustituyendo la ecuación (2.14) en la ecuación (2.18):

$$P_N[V \geq V_m] = 1 - (1 - p)^N \quad (2.19)$$

Sustituyendo la ecuación (2.15) en la ecuación (2.19):

$$P_N[V \geq V_m] = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^N \quad (2.20)$$

Finalmente, con la ecuación (2.20) se calcula la probabilidad de la que la velocidad  $V$ , exceda el valor máximo  $V_m$  asociado a un período de retorno  $T$ , durante la vida útil de la estructura  $N$ .

La finalidad de la ecuación (2.20) es determinar la probabilidad de excedencia de una velocidad  $V_m$  durante la vida útil de la estructura. Las velocidades regionales propuestas en las normatividades se basan en probabilidades promedios o períodos de retornos promedios, y no se asocian a las vidas útiles de la estructuras.

### 2.3.2 Probabilidades de excedencia.

La probabilidad promedio  $p$  de que una velocidad  $V$  exceda el valor  $V_m$  en un año, puede calcularse considerando que la ocurrencia de un viento normal es independiente de la ocurrencia de un viento ciclónico; consecuentemente, la probabilidad  $p$  es la suma de la probabilidad de que ante vientos normales la velocidad  $V$  exceda la velocidad  $V_m$  más la probabilidad de que ante un viento provocado por un ciclón tropical la velocidad  $V$  exceda la velocidad  $V_m$  (Simiu, 1996):

$$Pa(V \geq Vm) = P(x = 1)P(Vc \geq Vm) + P(x = 0)P(Vn \geq Vm) \quad (2.21)$$

Donde  $Pa(V \geq Vm)$  es la probabilidad  $p$  de que una velocidad  $V$  exceda la velocidad  $Vm$  en un año,  $P(x=1)$  es la probabilidad de que en un año se presente un ciclón tropical,  $P(Vc \geq Vm)$  es la probabilidad de que una velocidad  $Vc$  provocada por un ciclón tropical exceda la velocidad  $Vm$ ,  $P(x=0)$  es la probabilidad de que en un año no se presente ningún ciclón tropical y  $P(Vn \geq Vm)$  es la probabilidad de que un viento normal provoque una velocidad  $Vn$  que exceda la velocidad  $Vm$ .

Si la velocidad  $Vm$  es una velocidad de magnitud considerable, entonces la probabilidad  $P(Vn \geq Vm)$  de que un viento normal provoque una velocidad  $Vn$  que exceda la velocidad  $Vm$  es despreciable en relación al valor de  $P(Vc \geq Vm)$ . En este caso la ecuación (2.21) se simplifica:

$$Pa(V \geq Vm) = P(x = 1)P(Vc \geq Vm) \quad (2.22)$$

La probabilidad  $p$  de que una velocidad  $V$  exceda el valor  $Vm$  en un año ( $Pa(V \geq Vm)$ ) se relaciona con un período de retorno  $T$  de la ecuación (2.16). De manera análoga las probabilidades  $P(x=1)$  y  $P(Vc \geq Vm)$  pueden asociarse a períodos de retorno como se presenta en las ecuaciones (2.23) y (2.24):

$$P(x = 1) = \frac{1}{Tm} \quad (2.23)$$

$$P(Vc \geq Vm) = \frac{1}{Tc} \quad (2.24)$$

Donde  $Tm$  se define como el tiempo promedio en años (número de años) necesario para se presente un ciclón tropical y  $Tc$  es el número de ciclones tropicales necesario para que la velocidad de viento  $Vc$  provocada por un ciclón tropical exceda la velocidad  $Vm$ .

Sustituyendo las ecuaciones (2.23) y (2.24) en la ecuación (2.22):

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_m} \cdot \frac{1}{T_c} \quad (2.25)$$

Se puede calcular el período de retorno  $T_c$  despejando este término de la ecuación (2.25):

$$T_c = \frac{T}{T_m} \quad (2.26)$$

Denominando a la probabilidad  $(1/T_m)$  como  $M$ , que corresponde al número de ciclones tropicales que se presentan en un año, la ecuación (2.26) es:

$$T_c = T \cdot M \quad (2.27)$$

Si la función de distribución de probabilidad acumulada  $F(v)$  está asociada a probabilidades calculadas con velocidades de viento provocadas por un ciclón tropical ( $V_c$ ), entonces:

$$F(v_c) = 1 - \frac{1}{T_c} \quad (2.28)$$

Sustituyendo la ecuación (2.27) en la ecuación (2.28):

$$F(v_c) = 1 - \frac{1}{M \cdot T} \quad (2.29)$$

La ecuación (2.29) permite relacionar un período de retorno promedio  $T$  asociado a la probabilidad de que una velocidad  $V$  exceda la velocidad  $V_m$  en un año, con una probabilidad acumulada asociada a una velocidad de viento  $V_c$  provocada por un ciclón tropical.

### 2.3.3 Distribuciones de Probabilidad Extrema

Una distribución de probabilidad es el conjunto de pares ordenados  $[x, f(x)]$ , donde  $f(x)$  es la probabilidad de que una variable aleatoria tome el valor de  $x$  (Walpole, 1999). En esta tesis se realiza un ajuste probabilístico con el cual se busca la distribución de probabilidad que proporcione las mejores estimaciones de las velocidades de viento para la Península de Yucatán.

Las distribuciones de probabilidad que mejor ajustan las velocidades de viento huracanado son las distribuciones de probabilidad asintótica de extremo. La distribución del viento se caracteriza por tener un valor mínimo que es cero (cuando hay calma), es decir, está acotado en su límite inferior. Las distribuciones de probabilidad asintóticas de extremo tienen tres formas:

- Tipo I: Forma doble exponencial
- Tipo II: Forma exponencial
- Tipo III: Forma exponencial con límite superior

#### **2.3.1.1 Distribución Extrema Tipo I: Forma doble exponencial**

La función de distribución acumulada  $F(v)$  para la distribución del valor más grande se calcula mediante la ecuación 2.30 (Ang y Tang, 2007):

$$P(v \leq u) = F(v) = e^{-e[-\gamma(v-\beta)]} \quad (2.30)$$

$$-\infty \leq v \leq \infty$$

La función densidad  $f(v)$  de esta distribución se expresa mediante la ecuación 2.31:

$$f(v) = \gamma \cdot e^{-\gamma(v-\beta)} \cdot -e^{-\gamma(v-\beta)} \quad (2.31)$$

$$-\infty \leq v \leq \infty$$

Donde  $\gamma$  y  $\beta$  son parámetros,  $f(v)$  denota probabilidad. Los valores de  $\gamma$  y  $\beta$  se pueden estimar mediante el ajuste de una línea recta de frecuencias acumuladas trazadas en papel de probabilidad con un sistema de coordenadas  $(v, \ln[\ln(1/F(v))])$ . La recta ajustada se expresa como:

$$\ln\ln\left(\frac{1}{F(v)}\right) = Av + B \quad (2.32)$$

Donde A es la pendiente y B es el valor de la ordenada en el origen. Los parámetros  $\gamma$  y  $\beta$  se calculan como:  $A = -\gamma$ , y  $B = \gamma\beta$ .

Despejando la velocidad  $v$  de la ecuación (2.33):

$$v = \frac{\ln\ln[1/F(v)] - B}{A} \quad (2.33)$$

Si  $T$  tiende hacia infinito,  $F(v)$  es igual a uno (ecuación 2.16); en este caso,  $v = \infty$ , ya que  $\ln[\ln(1/F(v))] = \ln[\ln(1)] = -\infty$ ; esto quiere decir que para períodos de retorno grandes, la velocidad resultante puede tener valores grandes o exagerados, lo cual podría no tener sentido físico.

### **2.3.1.2 Distribución extrema tipo II: Forma exponencial**

La función de distribución acumulada  $F(v)$  para la distribución del valor más grande se calcula mediante la ecuación 2.34 (Ang y Tang, 2007):

$$P(v \leq u) = F(v) = e^{-\left(\frac{v}{\beta}\right)^\gamma} \quad (2.34)$$

$$-\infty \leq v \leq \infty$$

La función densidad  $f(v)$  de esta distribución se expresa mediante la ecuación 2.35:

$$f(v) = e^{-\left(\frac{v}{\beta}\right)^\gamma} \cdot \frac{\gamma}{\beta} \left(\frac{v}{\beta}\right)^{\gamma-1} \quad (2.35)$$

$$-\infty \leq v \leq \infty$$

Donde  $\gamma$  y  $\beta$  son parámetros,  $f(v)$  denota probabilidad. Los valores de  $\gamma$  y  $\beta$  se pueden estimar mediante el ajuste de una línea recta de frecuencias acumuladas trazadas en papel de probabilidad con un sistema de coordenadas  $(\ln(v), \ln[\ln(1/F(v))])$ . La recta ajustada se expresa como:

$$\ln \ln \left( \frac{1}{F(v)} \right) = A \ln(v) + B \quad (2.36)$$

Donde A es la pendiente, y B es el valor de la ordenada en el origen, donde  $A = -\gamma$ , y  $B = \gamma \beta$ , donde  $\beta = e^{(\gamma/\gamma)}$ .

Despejando la velocidad  $v$  de la ecuación (2.36):

$$v = \exp \left( \frac{\ln \ln [1/F(v)] - B}{A} \right) \quad (2.37)$$

Si  $T$  tiende hacia infinito,  $F(v)$  es igual a uno (ecuación 2.24); en este caso,  $v = \infty$ , ya que  $\exp[\ln[\ln(1/F(v))]] = \exp(\ln[\ln(1)]) = \infty$ ; esto quiere decir que para períodos de retorno grandes, la velocidad resultante puede tener valores grandes o exagerados, lo cual podría no tener sentido físico.

### **2.3.1.3 Distribución Extrema Tipo III: Forma exponencial con límite superior.**

La función de distribución acumulada  $F(v)$  para la distribución del valor más grande se calcula mediante la ecuación 2.38 (Ang y Tang, 2007):

$$P(v \leq u) = F(v) = e^{-\left(\frac{w-v}{w-\beta}\right)^{\gamma}} \quad (2.38)$$

$$-\infty \leq v \leq \infty$$

La función densidad  $f(v)$  de esta distribución se expresa mediante la ecuación 2.39:

$$f(v) = \frac{\gamma}{w - \beta} \cdot \left( \frac{w - v}{w - \beta} \right)^{(\gamma-1)} \cdot e^{-\left( \frac{w-v}{w-\beta} \right)^\gamma} \quad (2.39)$$

$$-\infty \leq v \leq \infty$$

Donde  $\gamma$  y  $\beta$  son parámetros,  $F(v)$  denota probabilidad, y  $w$  es el límite superior de la función densidad. Los valores de  $\gamma$  y  $\beta$  se pueden estimar mediante el ajuste de una línea recta de frecuencias acumuladas trazadas en papel de probabilidad con un sistema de coordenadas  $(\ln(w-v), \ln[\ln(1/F(v))])$ . La recta ajustada se expresa como:

$$\ln \ln \left( \frac{1}{F(v)} \right) = A \ln(w - v) + B \quad (2.40)$$

Donde  $A$  es la pendiente, y  $B$  es el valor de la ordenada en el origen, donde  $A = -\gamma$ , y  $B = \gamma \beta$ , donde  $\beta = w - e^{(-\gamma \beta / \gamma)}$ .

Despejando la velocidad  $v$  de la ecuación (2.40):

$$v = w - \exp \left( \frac{\ln \ln [1/F(v)] - B}{A} \right) \quad (2.41)$$

Si  $T$  tiende hacia infinito,  $F(v)$  es igual a uno (ecuación 2.16); en este caso,  $v = w$ , ya que  $w - \exp[-\ln[\ln(1/F(v))]] = w - \exp(-\ln[\ln(1)]) = w$ ; esto quiere decir que para períodos de retorno grandes, la velocidad resultante tiende a valores cercanos al valor de  $w$ , el cual es el límite superior de la función densidad.

En este trabajo se plantean dos posibles escenarios en los que la diferencia entre uno y otro es el valor de  $w$  en el cálculo de las velocidades regionales.

## 2.4 Cálculo de las velocidades regionales de viento de huracán

La velocidad regional de viento es la velocidad máxima probable de presentarse en cierto periodo de recurrencia. Existe gran variación entre las velocidades de ráfaga máximas y medias correspondientes a años diferentes. Sin embargo, si se tienen registros suficientes de las velocidades máximas mensuales de un número de años, es posible estimar la velocidad máxima del viento que puede presentarse en un cierto periodo, utilizando técnicas de la estadística de valores extremos (CFE, 2008).

### 2.4.1 Manual CFE (2008)

Para determinar las velocidades regionales de viento incluidas en el Manual de Diseño de Obras Civiles para el Diseño por Viento de la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 2008) se estudiaron tres funciones de distribución de valores extremos para cada una de las estaciones meteorológicas del país, las cuales se definen de la siguiente manera (Benjamín y Cornell, 1970):

(1) Función de distribución acumulada extrema, no acotada (Fisher Tippet I):

$$F(v) = \exp\{-\exp[-\psi(v-u)]\} \quad -\infty \leq v \leq \infty \quad (2.42)$$

(2) Función de distribución acumulada extrema, acotada en la parte superior (Fisher Tippet III):

$$F(v) = \exp\left[-\left(\frac{w-v}{w-u}\right)^k\right] \quad v \leq w, u < w \quad (2.43)$$

(3) Función de distribución acumulada extrema, acotada en la parte inferior (Weibull):

$$F(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v-\varepsilon}{u-\varepsilon}\right)^k\right] \quad v \geq \varepsilon, u > \varepsilon \quad (2.44)$$

- $F(v)$  es la función de distribución acumulada (FDA) que representa la probabilidad de que la variable aleatoria (en este caso, la velocidad del viento) sea menor o igual que un cierto valor de  $v$ , adimensional,
- $\varepsilon$  el límite inferior de la variable aleatoria  $v$ ,
- $w$  el límite superior de la variable aleatoria  $v$ , y
- $\psi, u, k$  parámetros de forma de la función  $F(v)$  que se estiman a partir de los datos observados de la variable aleatoria  $v$ .

Adicionalmente, para el cálculo de los mapas de isotacas, puede demostrarse que una función aproximada y razonable entre la Función de Distribución Acumulada y el periodo de retorno ( $T$ ) es la siguiente expresión:

$$F(v) = \frac{T}{T+1} \quad (2.45)$$

El análisis de las funciones de extremos con las velocidades de los periodos que se tienen registrados hasta 2005 en las estaciones meteorológicas, se realizó con un ajuste de mínimos cuadrados de las ecuaciones anteriores. El mejor ajuste se seleccionó con base en la tendencia de los datos y del coeficiente de variación asociado. Esta metodología es señalada en Aguirre y Sánchez-Sesma (1983), Aguirre y Sánchez-Sesma (1986) y López y Muñoz (2007).

#### 2.4.2 Investigaciones Nacionales

En los años 1981, 1990 y 2006 en el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) se iniciaron programas de investigación para proveer información actualizada para el diseño estructural contra los efectos de Ciclones Tropicales y otros vientos. Los estudios fueron hechos con la información disponible de velocidades de viento extremo en México (Sánchez-Sesma *et al.* 1984; CFE, 1993; CFE, 2008), los cuales resultaron en mapas de isotacas para diferentes periodos de retorno. Estos estudios fueron

desarrollados con base en un método de reconstrucción histórica propuesto por Sánchez-Sesma (1985), para estimar la velocidades de viento máximo por medio del modelo fluido-dinámico. El modelo está basado en los estudios previos de Graham y Nunn (1959), Scholoeimer (1954), Springall (1974) y Holland (1980). Los resultados de este método fueron publicados por Sánchez-Sesma *et al.* (1988) y se determinaron velocidades regionales de viento a lo largo de la costa de Estados Unidos, dando resultados similares a esos obtenidos en dos investigación previas, que emplearon la simulación probabilística de campos de viento de ciclones tropicales.

Fernández-Baqueiro *et al.* (2009) desarrolló un Modelo de Campo de Velocidades de Viento de Huracán (MCVVH) y lo implementó en un programa de cómputo que permite calcular, dada la trayectoria y el registro de las velocidades superficiales máximas de un huracán, el campo de velocidades que éste genera y la historia de velocidades en sitios de interés. De la comparación del modelo del campo de velocidades de vientos huracanados (MCVVH) desarrollado y el modelo propuesto por Sánchez-Sesma (1985), se observó que las velocidades superficiales calculadas con ambos modelos son similares para huracanes de baja intensidad (categoría 1 y 2); sin embargo, las velocidades superficiales calculadas con el modelo desarrollado por Sánchez-Sesma (1985) son significativamente menores a las calculadas con el MCVVH desarrollado para huracanes de media y alta intensidad (categoría 3, 4 y 5). En dicho trabajo se concluye que deben revisarse las velocidades regionales de viento propuestas en el Manual de Diseño de Obras Civiles para el Diseño por Viento de la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 1993), ya que dichas velocidades se calcularon empleando el modelo desarrollado por Sánchez-Sesma (Sánchez-Sesma1985, Sánchez-Sesma *et al.* 2003).

Fernández-Baqueiro *et al.* (2010) mejoró el modelo desarrollado por Fernández-Baqueiro *et al.* (2009) y lo comparó con el modelo utilizado por Sánchez-Sesma (1985) para el cálculo de mapas de isotacas en la región. Utilizó la distribución de probabilidades extrema tipo III (Forma exponencial con límite superior) debido a que es la que presenta la mejor estimación de las velocidades regionales de viento y a que se encuentra acotada. Obtuvo que su modelo proporciona valores

menores al modelo de Fernández-Baqueiro *et. al.* (2009) conforme va aumentando el radio a partir del radio de velocidades máximas, debido a que el modelo utilizado atenúa el efecto de la velocidad de traslación conforme el radio aumenta. Para categorías de huracanes mayores o iguales a 3, el modelo de Sánchez-Sesma (1985) proporciona valores por debajo de los modelos de Fernández-Baqueiro *et. al.*(2009) y Fernández-Baqueiro *et. al.* (2010). Asimismo comparó las velocidades regionales de viento para distintos periodos de retorno con lo establecido por la CFE (2003) y obtuvo valores mayores a los de dicho manual.

Sánchez-Sesma (2009), calculó nuevamente las velocidades regionales de viento utilizando el modelo fluido-dinámico propuesto en 1988. Utilizó una distribución de probabilidad Tipo I de valores extremos (Gumbel) para ajustar la distribución de las velocidades regionales de viento. Una característica de las investigaciones nacionales antes mencionadas es que tiene un enfoque determinístico, en el que el análisis se basa en la simulación computacional de una base de datos histórica de ciclones tropicales.

Avelar (2008) utilizó un modelo paramétrico de viento (Silva *et al.*, 2002) para calcular el campo de velocidades. Realizó la simulación de huracanes y sus trayectorias para el cálculo de velocidades de viento en puntos específicos en los que el ojo del huracán se localizara al menos a 200 km de las costas. Para la simulación de los ciclones tropicales utilizó la técnica de “perturbación de trayectorias”. La perturbación de la trayectoria se realiza como en un proceso bidimensional de Wiener, con media igual a la posición observada y varianza creciendo linealmente con el tiempo. Se definieron puntos en que se calculó la tasa de excedencia de velocidad de viento para el catálogo de huracanes históricos y sus simulaciones. A partir de los resultados de curvas de periodo de retorno de velocidad de viento (inverso de tasa de excedencia) en los 314 puntos de cálculo, se obtuvieron mapas de igual periodo de retorno empleando métodos de interpolación.

### 2.4.3 Investigaciones Internacionales

Landsea *et al.* (2003) desarrollaron mediante la regresión de datos medidos de 1970 a 1997, ecuaciones que relacionan la velocidad superficial máxima y la presión central para distintas latitudes y regiones, como parte del proyecto de reanálisis de huracanes del Océano Atlántico denominado HURDAT de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos, representado por sus siglas en inglés NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Estas ecuaciones permiten determinar la velocidad superficial máxima ( $V_{s\_max}$ ) en función de la presión central ( $P_o$ ) para distintas regiones debido a una tendencia asociada a diferir de acuerdo con la latitud ( $L$ ).

Vickery y Twisdale (1995a) utilizaron una metodología actualizada de simulación de huracanes incorporando un nuevo modelo del campo de viento para obtener las velocidades regionales de viento asociados a diversos periodos de retorno a lo largo de la línea costera propensa a los huracanes de los Estados Unidos. Las variables consideradas para estimar la velocidad del viento en un huracán fueron la diferencial de la presión central ( $\Delta_p$ ), la velocidad de traslación del huracán ( $V_t$ ) y el tamaño del huracán según lo definido por el área para vientos máximos ( $R_{max}$ ) y el ángulo de aproximación ( $\theta$ ). Los datos se obtuvieron del HURDAT de 1886 a 1991. Para cada una de las variables a modelar se consideraron distribuciones de probabilidad para cada sitio específico para  $\Delta_p$ ,  $V_t$ ,  $\theta$ ; en conjunto con un modelo de campo de viento para simular miles de huracanes. Cada huracán que se simuló se hizo a lo largo de una línea recta usando los valores muestreados de la distancia máxima de aproximación ( $d_{min}$ ) y el ángulo de aproximación ( $\theta$ ) en la subregión de simulación. El valor de  $\Delta_p$  se mantuvo constante hasta tocar tierra y después la tormenta decae en función del tiempo de acuerdo al modelo de Vickery y Twisdale (1995b). La velocidad de traslación se mantuvo constante en cada una de las simulaciones. La velocidad máxima de viento en el sitio producida por el modelo fue independiente de la dirección.

La velocidad de traslación de la tormenta tropical ( $V_t$ ) y el radio de velocidades máximas ( $R_{max}$ ) se modelaron con una distribución lognormal, el ángulo de

aproximación ( $\theta$ ) con una distribución binormal,  $\Delta_p$  con una distribución de Weibull y la distancia máxima de aproximación ( $d_{min}$ ) con una distribución trapezoidal. Se realizaron simulaciones para 30 estaciones costeras y 16 estaciones tierra dentro. Se determinaron las velocidades regionales de viento para 50 y 100 años de retorno. Todas las simulaciones se realizaron en las subregiones con un diámetro de 500 km y se simularon 10 000 tormentas para cada sitio. Se obtuvieron valores de velocidades regionales de viento inferiores a los de Batts *et al.* (1980) para todos los lugares y todos los períodos de retorno. Las principales diferencias se dan en que, a pesar de utilizar la simulación de Monte Carlo, existieron diferencias significativas en el modelo físico.

## 2.5 Conclusiones de la revisión de la literatura

De la revisión de la literatura se concluye que:

- Entre las principales variables que caracterizan a los huracanes se encuentran la velocidad superficial máxima, el radio de velocidades máximas, la velocidad de traslación, la presión central, la localización geográfica del ciclón (latitud y longitud), la relación entre velocidad superficial y la velocidad a la altura gradiente (Félix, 2006).
- Si se tienen registros suficientes de las velocidades máximas mensuales de un número de años, es posible estimar la velocidad máxima del viento que puede presentarse en un cierto periodo utilizando técnicas de la estadística de valores extremos.
- Para determinar la distribución de probabilidad de vientos de huracán, ésta se puede calcular por medio de dos métodos: la simulación determinística y la simulación probabilista.
- En México se ha utilizado la simulación determinística; tal es el caso del trabajo realizado por Sánchez-Sesma (2009) para el país y el de Fernández-Baqueiro *et al.* (2010) para la península de Yucatán.
- Sánchez-Sesma (2009) utilizó el modelo del fluido-dinámico propuesto en 1988, aplicando una Distribución de Probabilidades extrema Tipo I de valores extremos.

- Fernández-Baqueiro *et. al.* (2010) utilizó el modelo de Fernández-Baqueiro (2009) para el cálculo de mapas de isotacas en la región aplicando una Distribución de Probabilidades extrema Tipo III.
- Para analizar la distribución de probabilidad de vientos de huracán es necesario contar con información de vientos registrados por el paso de huracanes en la región de interés, pero debido a que los datos históricos son limitados, es necesario extender los datos por medio de la generación de huracanes artificiales. Avelar (2008) utilizó la técnica de “perturbación de trayectorias” para la simulación de los ciclones tropicales.
- Vickery y Twisdale (1995a) utilizaron la técnica de Monte Carlo para generar huracanes sintéticos. Para cada una de las variables se consideraron diferentes distribuciones de probabilidad.

## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA

El objetivo de este trabajo de investigación es determinar las velocidades regionales de viento para el diseño estructural en la Península de Yucatán empleando un modelo probabilista para generar ciclones tropicales sintéticos y un modelo determinista que considere los ciclones tropicales históricos. Para este propósito se realizaron los siguientes pasos:

1. Depuración y organización de la base de datos histórica de ciclones tropicales.
2. Análisis estadístico de las variables de ciclones tropicales y determinación de la correlación entre variables.
3. Ajuste de distribuciones de probabilidad para las variables de ciclones tropicales.
4. Simulación del paso de ciclones tropicales históricos.
5. Desarrollo de un modelo para la generación de ciclones tropicales sintéticos.
  - a. Procedimiento general
  - b. Generación de variables aleatorias de ciclones tropicales sintéticos.
  - c. Generación de trayectorias y velocidades superficiales de ciclones tropicales sintéticos.
6. Simulación del paso de ciclones tropicales sintéticos.
7. Análisis estadístico de las velocidades para cada sitio de interés.
8. Ajuste probabilístico de las velocidades para cada sitio de interés.
9. Elaboración de mapas de isotacas de las velocidades regionales de viento.
10. Análisis comparativo de las velocidades regionales de viento obtenidas con las simulaciones probabilista y determinista.

### **3.1 Depuración y organización de la base de datos histórica de ciclones tropicales**

El Modelo de Campo de Velocidades de Viento de Huracán (MCVVH) determina el campo de velocidades a partir de valores de la velocidad superficial máxima, de la velocidad de traslación y de la posición del ojo del huracán en determinado punto de su trayectoria. Por lo anterior, es necesario contar con una base de datos que proporcione dichos datos de la trayectoria de los ciclones tropicales que han afectado a la Península de Yucatán. Para la realización de esta investigación se dispuso del Hurricane Database (HURDAT) (2015), la cual fue depurada de acuerdo con los requerimientos de esta investigación.

La depuración de la base de datos del HURDAT se realizó en dos etapas. En la primera etapa se seleccionaron los ciclones tropicales que han afectado la Península de Yucatán, considerando como criterio un radio de afectación máximo de un huracán de acuerdo con el MCVVH. Se consideró conservadoramente que un huracán de categoría 5 ( $V_s=280 \text{ km/hr}$ ) puede generar velocidades de viento superiores a los 62 Km/hr (que corresponde a la menor velocidad superficial para considerar al evento como una tormenta tropical) a 300 km de distancia con respecto a la posición del ciclón tropical, como se observa en su perfil radial para un ángulo de  $90^\circ$  (Figura 3.1). A un ángulo de  $90^\circ$  con respecto a la trayectoria del ciclón tropical es donde se presentan las velocidades máximas.

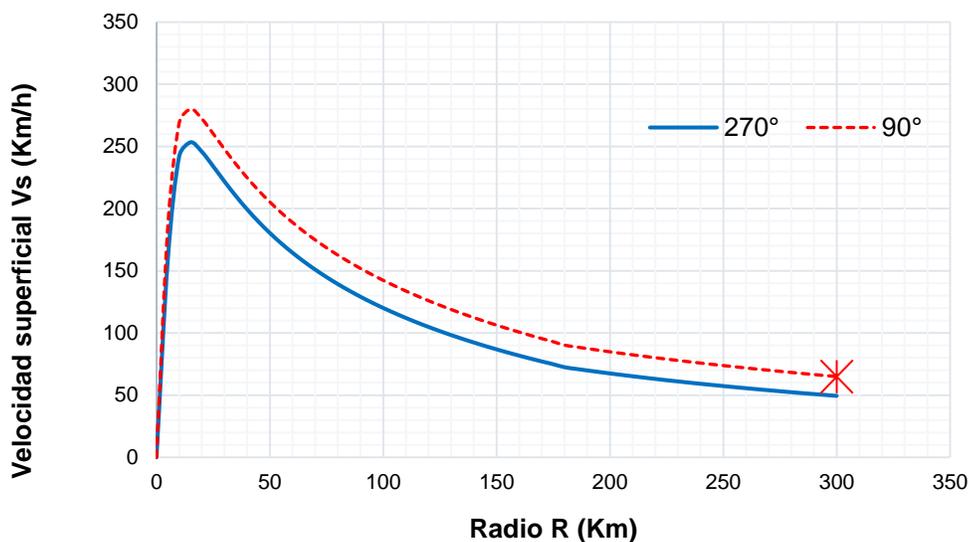


Figura 3.1 Perfil radial de velocidades para un huracán categoría 5 ( $V_s=280$  km/hr)

El dato anterior permitió definir la zona de afectación de la Península de Yucatán, considerando una región cuyos puntos más alejados están a una distancia de la Península de Yucatán de 300 km (Figura 3.2). Este recuadro está definido por medio de latitudes ( $15.12^\circ\text{N}$  a  $24.32^\circ\text{N}$ ) y longitudes ( $83.84^\circ\text{W}$  a  $95.31^\circ\text{W}$ ). En la primera etapa de depuración, los ciclones tropicales cuyas trayectorias pasaron por esa zona fueron incluidos en este estudio. Se elaboró un programa en lenguaje fortran para realizar esta depuración.

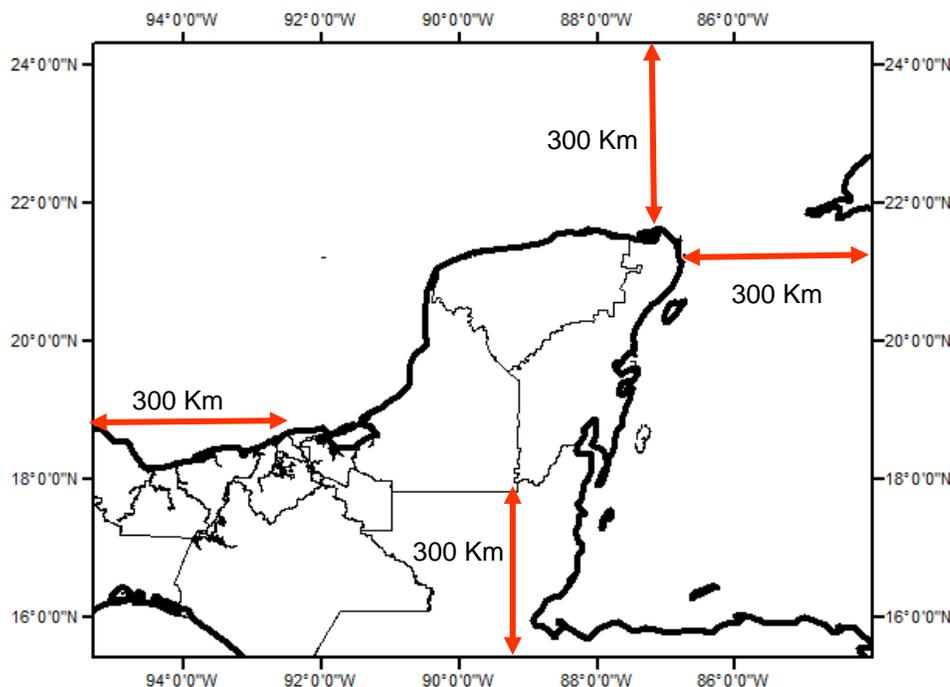


Figura 3.2 Zona de afectación de la Península de Yucatán

En la segunda etapa de depuración, se eliminaron los ciclones tropicales con velocidades menores a 62 km/hr y bajas presiones que no se consideran como ciclones tropicales, tormentas tropicales u otro evento similar. Se eliminaron también las trayectorias con número de puntos insuficientes dentro de la zona de afectación y se detectaron algunas inconsistencias en la base de datos del HURDAT con velocidades superficiales incongruentes.

Una vez depurada la base de datos, se procedió a realizar una clasificación de los ciclones tropicales de acuerdo a su trayectoria. Las trayectorias se clasificaron como:

- Rectas, en las que no se observa ningún cambio de dirección a lo largo de su paso por la península de Yucatán (Figura 3.3).
- Curvas, en las que ocurren ligeros cambios de dirección pero que mantienen forma regular (Figura 3.4).
- Irregulares, en las que el ciclón tropical tiene cambios notables en la dirección de la trayectoria, por lo que no es posible considerarla como alguna de las anteriores (Figura 3.5).

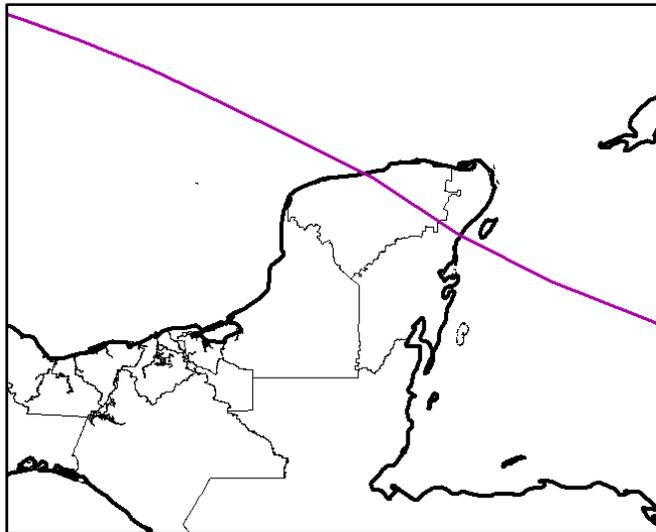


Figura 3.3 Ejemplo de la trayectoria recta del huracán Emily (2005)

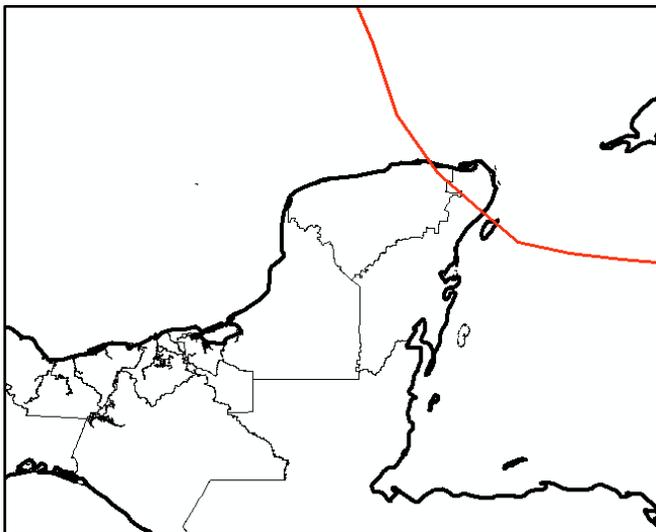


Figura 3.4 Ejemplo de la trayectoria curva de la tormenta tropical Eloise (1975)

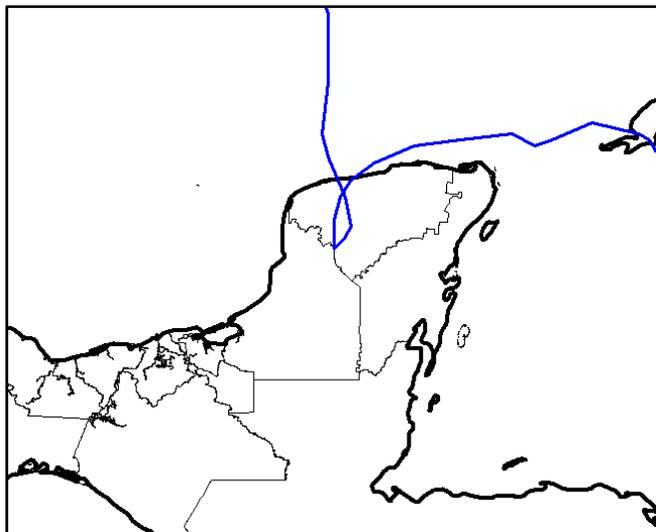


Figura 3.5 Ejemplo de la trayectoria irregular del huracán Isidore (2002)

Se organizaron en tres archivos las bases de datos de acuerdo a la clasificación de la trayectoria. Cada archivo contenía para cada ciclón tropical su clave de identificador y nombre, así como para cada punto de su trayectoria: tiempo, velocidad superficial máxima y posición geográfica del centro del ciclón tropical.

### 3.2 Análisis estadístico de las variables de ciclones tropicales y determinación de la correlación entre variables

Se realizó un análisis estadístico de variables de un ciclón tropical. Las variables consideradas son función del tipo de trayectoria:

- Trayectoria recta. Las variables consideradas son: velocidad superficial ( $V_{s-máx}$ ), velocidad de traslación ( $V_t$ ), ángulo de la trayectoria ( $\theta$ ) y latitud ( $L$ ) (Figura 3.6).

Para el análisis de las variables se estableció una línea de referencia en la longitud de  $-86.8^\circ$ , ubicada en el borde derecho de la Península de Yucatán. Las variables analizadas están asociadas al punto donde la trayectoria del ciclón tropical cruza la línea de referencia. El ángulo de traslación se midió con respecto a la horizontal y la velocidad de traslación que se consideró fue el promedio de cada uno de los intervalos conformados por puntos medidos cada

seis horas de la base de datos del HURDAT, considerando un intervalo correspondiente a la parte del ciclón tropical que pasa por la Península de Yucatán.

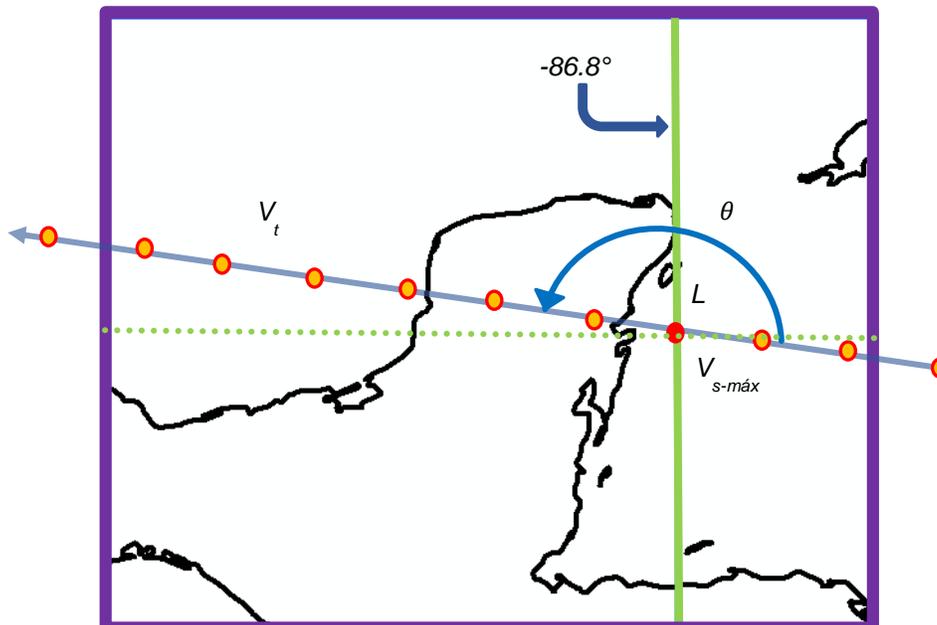


Figura 3.6 Definición de variables de ciclones tropicales de trayectoria recta

En el análisis estadístico se identificaron 117 ciclones tropicales de trayectoria recta. Se dividieron los datos en tormentas tropicales y en huracanes para determinar si alguna de las variables depende de la velocidad superficial. En el capítulo 4 se presentan los histogramas correspondientes a dicho análisis para cada una de las variables. Se elaboraron histogramas de frecuencia relativa de cada una de las variables de los ciclones tropicales históricos y sus correspondientes polígonos de distribución acumulada.

- Trayectoria curva. Las variables consideradas son: velocidad superficial ( $V_{s-máx}$ ), velocidad de traslación ( $V_t$ ) y tres constantes para describir con una función cuadrática la trayectoria. Las trayectorias se dividieron en dos: trayectorias que pasan por sobre la Península de Yucatán y trayectorias que pasan por el mar Caribe. Las constantes  $CL1$ ,  $CL2$  y  $CL3$  son para los primeros (Figura 3.7) y las constantes  $CW1$ ,  $CW2$  y  $CW3$  son para los segundos (Figura 3.8).

Para el análisis de las variables se estableció una línea de referencia en la longitud de  $-86.8^\circ$  para los ciclones tropicales de trayectoria curva que pasan por la Península de Yucatán y de  $-84.8^\circ$  para los ciclones tropicales de trayectoria curva que pasan por el mar Caribe. Las variables analizadas están asociadas al punto donde la trayectoria del ciclón tropical cruza la línea de referencia. La velocidad de traslación que se consideró fue el promedio de cada uno de los intervalos conformados por puntos medidos cada seis horas de la base de datos del HURDAT.

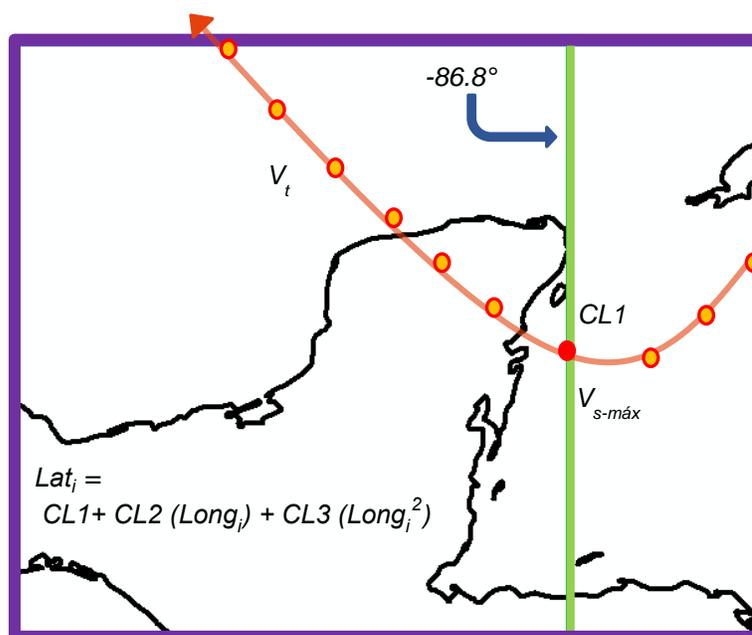


Figura 3.7 Definición de variables de ciclones tropicales de trayectoria curva que pasan por la Península de Yucatán

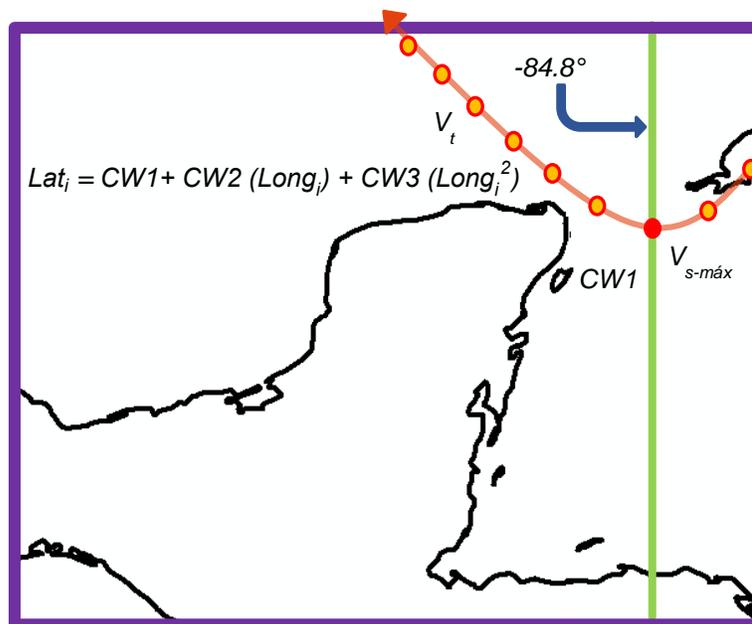


Figura 3.8 Definición de variables de ciclones tropicales de trayectoria curva que pasan por el mar Caribe

En el análisis estadístico se identificaron 18 ciclones tropicales de trayectoria curva. Se dividieron los datos en aquellos que pasan por la Península de Yucatán y aquellos que pasan por el mar Caribe. En el capítulo 4 se presentan los histogramas correspondientes a dicho análisis para cada una de las variables. Se elaboraron histogramas de frecuencia relativa de cada una de las variables de los ciclones tropicales históricos y sus correspondientes polígonos de distribución acumulada.

En el caso de las trayectorias curvas, se identificó que existía correlación entre los coeficientes constantes  $CL3$  con  $CL2$  y  $CW2$  con  $CW3$  como se presenta en la Figura 3.9 y la Figura 3.10, respectivamente. Por lo tanto, en el modelo las constantes  $CL2$  y  $CW2$  son variables independientes, mientras que las variables  $CL3$  y  $CW3$  son variables dependientes.

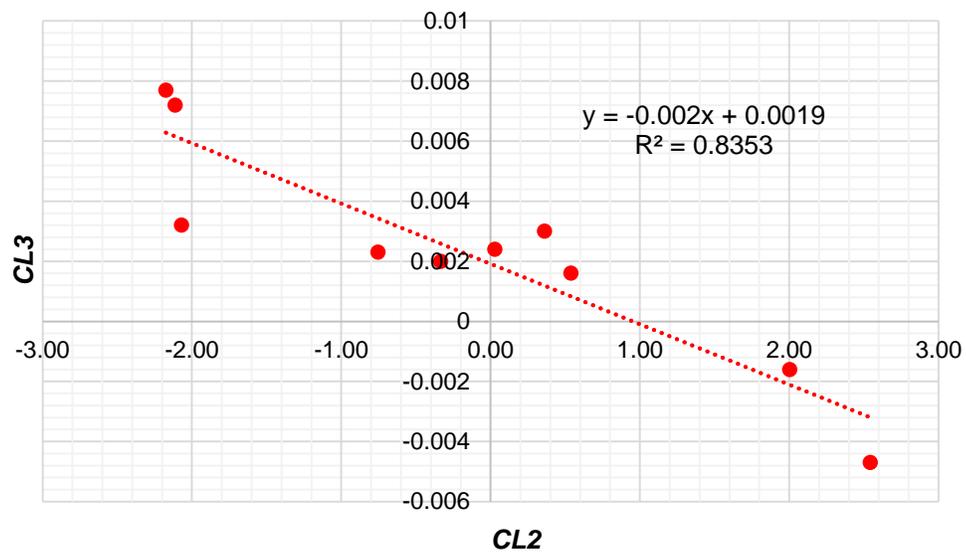


Figura 3.9 Correlación lineal entre variables  $CL2$  vs  $CL3$

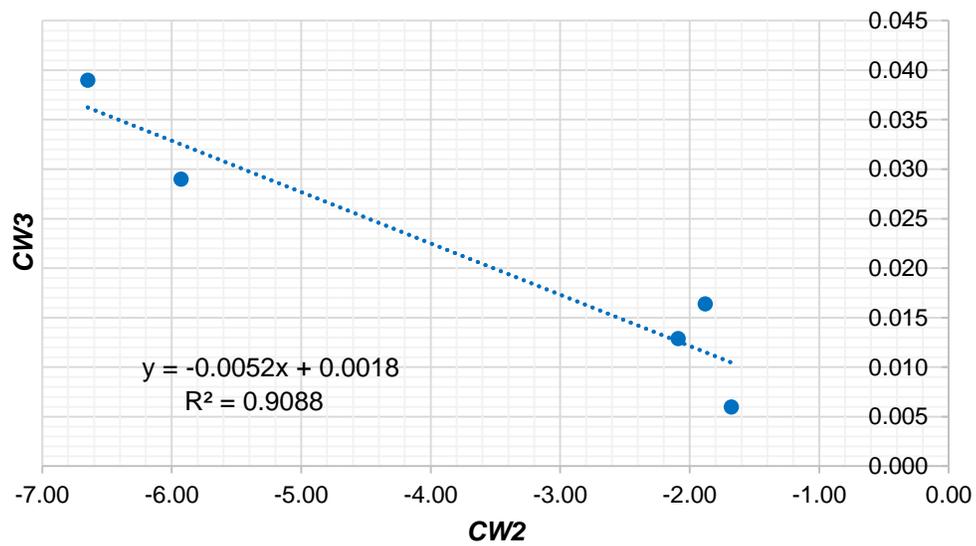


Figura 3.10 Correlación lineal entre variables  $CW2$  vs  $CW3$

### 3.3 Ajuste de distribuciones de probabilidad para las variables de ciclones tropicales

Con base en los histogramas se identificaron las distribuciones de probabilidad que mejor ajustan a las variables de los ciclones tropicales. Se utilizó el software Statgraphics (2010) para realizar el ajuste de diferentes distribuciones de probabilidad para las distintas variables. Para cada distribución de probabilidad se realizó la prueba de bondad de ajuste Chi cuadrada (Ang y Tang, 2007). En la tabla 3.1 se presenta el tipo de trayectoria, las variables de un ciclón tropical y las distribuciones de probabilidad consideradas.

Tabla 3.1. Distribución de probabilidad para las variables de los ciclones tropicales

<b>Trayectoria</b>	<b>Variable</b>	<b>Distribución de probabilidad</b>
Recta	Velocidad Superficial	Weibull, lognormal, Gamma, Exponencial
	Velocidad de traslación	Normal, lognormal
	Latitud	Normal, lognormal, uniforme
	Ángulo	Normal, lognormal, uniforme
Curva	Velocidad Superficial	Weibull, lognormal, Gamma, Exponencial
	Velocidad de traslación	Normal, lognormal
	CL1	Normal, lognormal, uniforme
	CL2	Normal, lognormal, uniforme
	CL3	Normal, lognormal, uniforme
	CW1	Normal, lognormal, uniforme
	CW2	Normal, lognormal, uniforme
	CW3	Normal, lognormal, uniforme
Irregular	Longitud	Normal

A manera ilustrativa, en la Figura 3.11 se presenta el histograma de frecuencia relativa junto con la distribución normal y lognormal propuestas para el ajuste de la velocidad

de traslación de ciclones tropicales con trayectoria recta. Algunas variables no presentaron un ajuste satisfactorio con distribuciones de probabilidad clásicas, dados los resultados de las pruebas de bondad de ajuste. , se determinó una distribución de probabilidad diferente para cada marca de clase

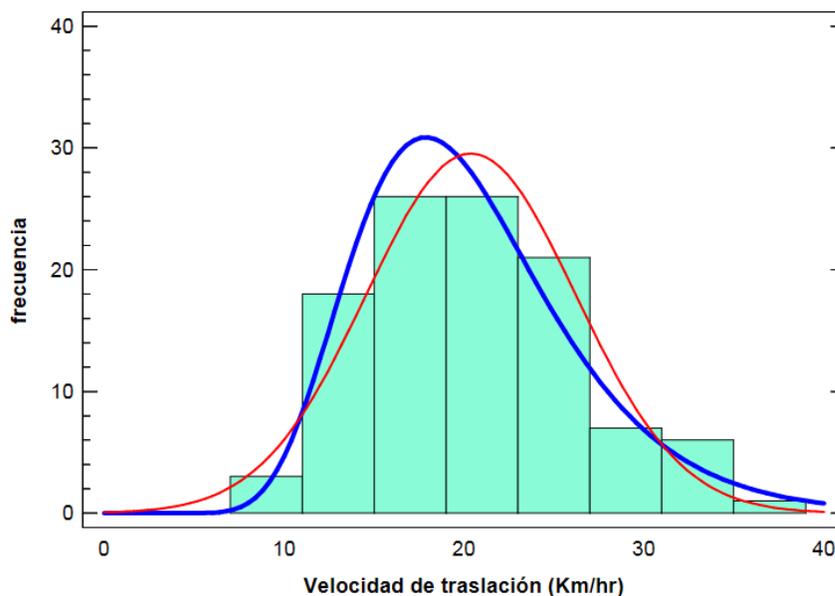


Figura 3.11 Ajuste de distribuciones normal y lognormal para la velocidad de traslación de ciclones tropicales de trayectoria recta

Algunas variables (latitud y ángulo) no presentaron un ajuste satisfactorio con distribuciones de probabilidad clásicas, dados los resultados de las pruebas de bondad de ajuste. Por lo tanto, se determinó una distribución de probabilidad diferente para cada marca de clase. Por ejemplo, para la latitud de los ciclones tropicales de trayectoria recta se determinó que su distribución cambia en función de la velocidad superficial. Por lo que se agruparon los datos en tormentas tropicales y ciclones tropicales. Se consideró una distribución uniforme, la cual se presenta en la Figura 3.12 para el caso de las tormentas tropicales.

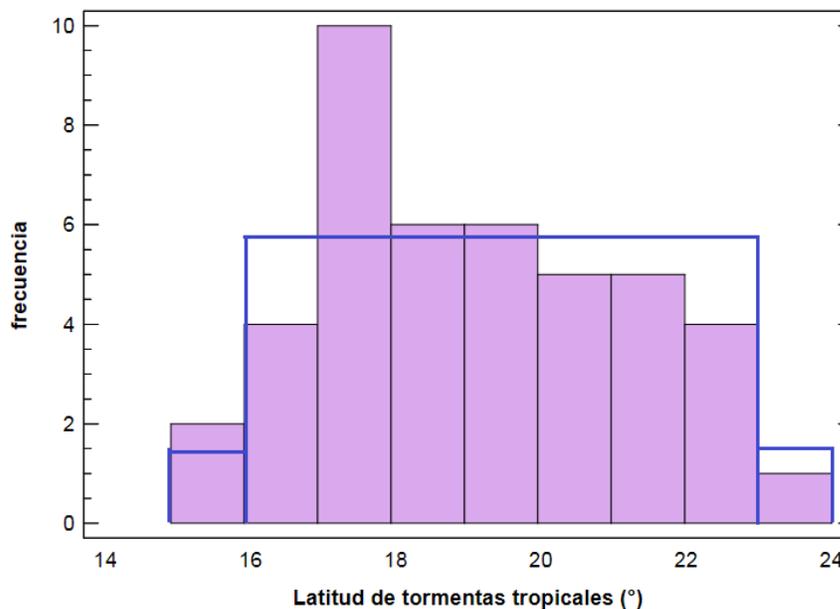


Figura 3.12 Ajuste de distribución uniforme para la latitud de tormentas tropicales de trayectoria recta

### 3.4 Simulación del paso de ciclones tropicales históricos

En este paso se obtuvo un registro de las máximas velocidades que se presentan en cada sitio de interés producidas por el paso de los ciclones tropicales históricos. Los sitios de interés son puntos que se localizan en la península de Yucatán y sirvieron de referencia para graficar los mapas de isotacas.

Los datos de entrada para el MCVVH fueron obtenidos por la base de datos de ciclones tropicales históricos del HURDAT. Se calculó el campo de velocidades de vientos huracanados de cada ciclón tropical para cada intervalo de tiempo  $t_i$  en su trayectoria y se determinó la velocidad para el sitio de interés. Se seleccionó la máxima velocidad obtenida en un sitio por cada ciclón tropical.

Para obtener una mejor precisión en los resultados fue necesario refinar la trayectoria de los ciclones tropicales debido a que la base de datos tiene un registro de cada seis horas. Esto es, se considerarán en la modelación puntos en la trayectoria a un espaciamiento de una hora.

### **3.5 Desarrollo de un modelo para la generación de ciclones tropicales sintéticos**

Se presenta el desarrollo de un modelo para la generación de ciclones tropicales sintéticos en el cual se plantea el procedimiento general, posteriormente la generación de las variables aleatorias y finalmente la generación de las trayectorias y de las velocidades superficiales de los ciclones tropicales sintéticos.

#### **3.5.1 Procedimiento general**

Se realizó una simulación de Monte Carlo mediante el programa Statgraphics (2010), para generar números aleatorios de las variables independientes mediante sus funciones de probabilidad. Después de generados los números aleatorios se verificó que las probabilidades acumuladas resultaran ser similares a las obtenidas del análisis estadístico. Con las variables de los ciclones tropicales sintéticos definidas, se generaron las trayectorias y velocidades para una población de ciclones tropicales sintéticos mediante el programa de cómputo que se describe en la sección 3.5.3.

#### **3.5.2 Generación de variables aleatorias**

La primera actividad que se consideró en la generación de las variables aleatorias fue la definición del tamaño de la población de ciclones tropicales sintéticos. Un tamaño de población de ciclones tropicales está asociado a un periodo de tiempo. La población de estudio fue de 2000 años, que es mayor que los periodos de retorno considerados para elaborar los mapas de isotacas (50, 100, 200 y 500 años).

En la tabla 3.2 se presenta la población idealizada de ciclones tropicales históricos y sintéticos que se consideran en el presente trabajo de investigación de acuerdo al tipo de trayectoria.

Tabla 3.2 Población idealizada histórica y sintética de ciclones tropicales para la Península de Yucatán

<b>Tipo de trayectoria</b>	<b>165 años Históricos</b>	<b>2000 años Sintéticos</b>
Trayectoria recta	117	1418
Trayectoria curva	18	218
Trayectoria irregular	1	12
Total	136	1648

En la Figura 3.13 se presenta el diagrama de flujo del procedimiento utilizado para la generación de los números aleatorios de ciclones tropicales sintéticos.

El primer paso fue determinar si el ciclón tropical es de trayectoria irregular ( $TT=I$ ). Si el ciclón tropical no se consideró como irregular ( $I$ ) entonces se consideró como un ciclón tropical de trayectoria regular (*i.e.* trayectoria recta o trayectoria curva). Se generaron números aleatorios para la velocidad superficial ( $V_s$ ) y la velocidad de traslación ( $V_t$ ) de acuerdo a las distribuciones de probabilidad observadas para los ciclones tropicales de trayectorias regulares.

Posterior a la generación de  $V_s$  y  $V_t$  fue necesario conocer si las trayectorias de los ciclones tropicales son rectas ( $TT=R$ ). En caso de que las trayectorias sean rectas se generaron números aleatorios de acuerdo a la distribución de probabilidad para los ángulos de incidencia ( $\theta$ ). Se revisó si  $V_s$  de los ciclones tropicales de trayectorias rectas fue mayor que 119 km/hr. En caso de que  $V_s$  fuera mayor que 119 km/hr se generaron números aleatorios para la latitud ( $L$ ) de acuerdo a la distribución de la latitud para los huracanes. En caso de que  $V_s$  fuera menor que 119 km/hr se generaron números aleatorios para  $L$  de acuerdo a la distribución correspondiente para las

tormentas tropicales. Con todas las variables definidas se generó la base de datos de ciclones tropicales sintéticos de trayectoria recta.

Cuando las trayectorias no fueron rectas, entonces los ciclones tropicales se consideraron de trayectoria curva ( $TT=C$ ). Se revisó si  $V_s$  de los ciclones tropicales de trayectorias curvas fueron mayores que 119 km/hr para determinar si son huracanes o tormentas tropicales.

Si  $V_s$  resultó ser mayor que 119 km/hr entonces se consideró como huracán que puede pasar por el mar Caribe ( $W$ ) o la Península de Yucatán ( $L$ ). En caso de que el ciclón tropical resultó ser un huracán que pasa por la Península de Yucatán, se generaron las variables  $CL1$ , y  $CL2$  (de acuerdo a sus distribuciones de probabilidad) e inmediatamente después de generar  $CL2$  se calculó  $CL3$  en función de la anterior. En caso de que el ciclón tropical resultó ser un huracán que pasa por el mar Caribe, se generaron las variables  $CW1$ , y  $CW2$  (de acuerdo a sus distribuciones de probabilidad) e inmediatamente después de generar  $CW2$  se calcula  $CW3$  en función de la anterior.

Si  $V_s$  fue menor que 119 km/hr entonces se consideró como tormenta tropical, y por tanto, para que haya afectado a la Península de Yucatán necesariamente tuvo que pasar por tierra ( $L$ ). Se generaron los números aleatorios correspondientes a  $CL1$ ,  $CL2$  y  $CL3$ . Finalmente con las variables ya definidas se obtuvo la base de datos de ciclones tropicales sintéticos de trayectoria curva.

Si el ciclón tropical de acuerdo a su trayectoria resultó ser irregular ( $TT=I$ ) se consideró  $V_s$ ,  $V_t$  y  $L$  constante (Figura 3.14). Para un ciclón tropical se generó una familia de 12 ciclones tropicales sintéticos por medio del método de “perturbación de trayectorias”, se generaron diferentes valores de la longitud ( $Lon$ ) del punto de ingreso a la Península de Yucatán de acuerdo a una distribución normal con media observada en el punto de ingreso y desviación estándar de  $1^\circ$ . Con las nuevas trayectorias perturbadas, se obtuvo la base de datos de ciclones tropicales sintéticos de trayectoria irregular.

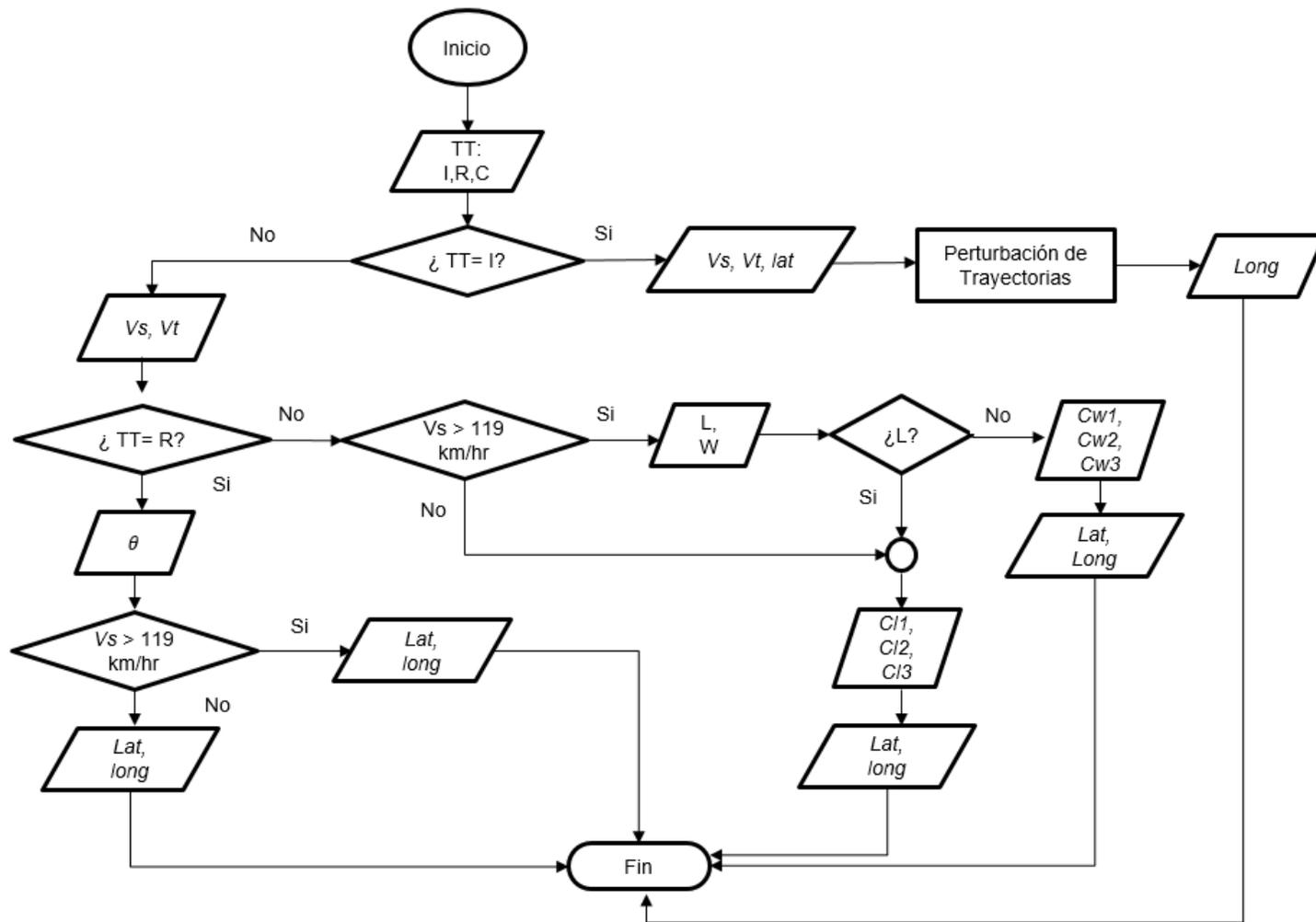


Figura 3.13 Diagrama de flujo para la generación de las variables que definen los ciclones tropicales sintéticos

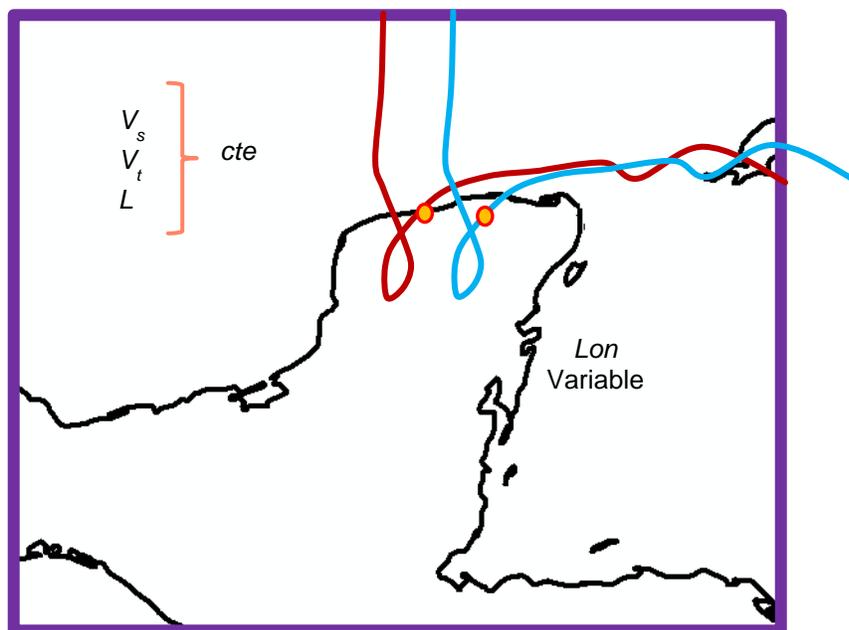


Figura 3.14 Generación de ciclones tropicales sintéticos de trayectoria irregular

### 3.5.3 Generación de trayectorias y velocidades superficiales

Se elaboró un programa de cómputo para generar las trayectorias y las velocidades superficiales de ciclones tropicales sintéticos. El archivo de entrada del programa contiene el número de ciclones tropicales que se desea generar y las variables independientes para cada ciclón tropical, las cuales fueron generadas de manera aleatoria en el paso anterior.

El programa se divide en tres partes principales. En la primera parte se generaron los puntos que definen la trayectoria del ciclón tropical; en la segunda parte se identificó la categoría del terreno para cada punto (mar o tierra) y se añadieron a la trayectoria los puntos de entrada y salida a la Península de Yucatán; en la tercera parte se calculó la velocidad superficial para cada uno de los puntos que definen la trayectoria.

#### 3.5.3.1 *Generación de puntos que definen las trayectorias*

##### 3.5.3.1.1 *Generación de puntos que definen la trayectoria recta*

**Paso 1**

Se realizó la lectura de las variables de un archivo de datos (SINTETICOS.txt). Las variables para los ciclones tropicales de trayectoria recta son la velocidad superficial máxima ( $V_{s-máx}$ ) en km/hr, la velocidad de traslación ( $V_t$ ) en km/hr, el ángulo de incidencia ( $\theta$ ) en grados y la latitud ( $L$ ) en grados.

**Paso 2**

Para los ciclones tropicales de trayectoria recta se definió una línea recta próxima a la Península de Yucatán de longitud  $-86.8^\circ$ . Se posicionó un punto con latitud ( $L$ ) como variable de entrada sobre la línea de referencia, como se presenta en la Figura 3.15, donde se intersecta la trayectoria del ciclón tropical.

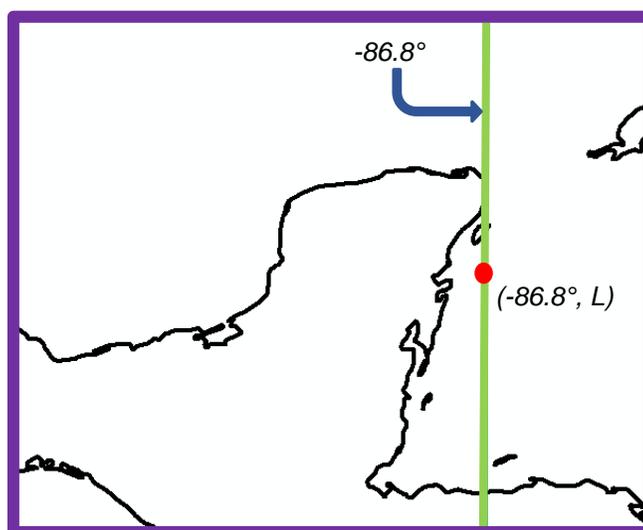


Figura 3.15 Ubicación del punto inicial de la trayectoria de ciclones tropicales sintéticos de trayectoria recta

**Paso 4**

Se calculó la distancia ( $d$ ) que recorre el ciclón tropical para cada 6 horas empleando la variable de entrada velocidad de traslación (ecuación 3.1).

$$d=6 \cdot V_t \quad (3.1)$$

### Paso 5

Con la variable de entrada del ángulo de incidencia ( $\theta$ ), la distancia ( $d$ ), y la longitud ( $Lon_i$ ) y latitud inicial ( $L_i$ ), se calculó la longitud ( $Lon_{i+1}$ ) y la latitud ( $L_{i+1}$ ) de los siguientes puntos mediante la ecuación 3.2 y la ecuación 3.3. Éste cálculo se realizó hasta que la posición del ciclón tropical se encontró fuera de los límites de la zona de afectación como se presenta en la Figura 3.16.

$$Lon_{i+1} = Lon_i - (d (\cos \theta) / 107.5 \text{ km}^\circ) \quad (3.2)$$

$$L_{i+1} = L_i + (d (\sin \theta) / 110.9 \text{ km}^\circ) \quad (3.3)$$

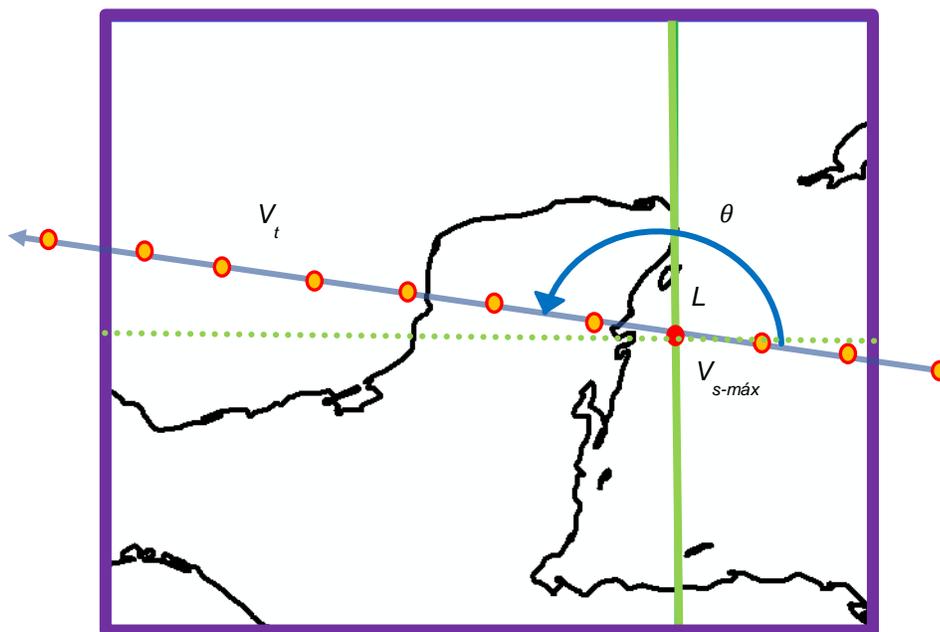


Figura 3.16 Generación de la trayectoria de ciclones tropicales sintéticos de trayectoria recta

### Paso 6

Se calculó el tiempo acumulado del ciclón tropical para cada posición adicionando 6 horas de diferencia entre una posición y la siguiente tal como se presenta en la Figura 3.17.

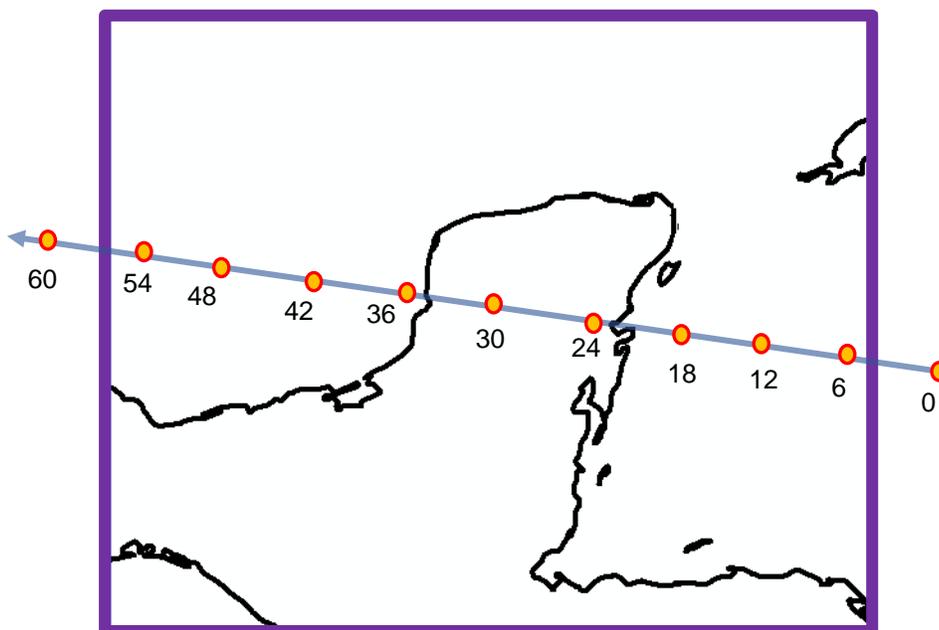


Figura 3.17 Generación del tiempo acumulado de ciclones tropicales sintéticos

Finalmente el programa generó puntos (latitud y longitud) cada 6 horas con un ángulo de incidencia constante y los imprimió en un primer archivo de salida (BACK1.txt).

### 3.5.3.1.2 Generación de puntos que definen la trayectoria curva

#### Paso 1

Se realizó la lectura de las variables de un archivo de datos (SINTETICOS.txt). Las variables para los ciclones tropicales de trayectoria curva que pasan por la Península de Yucatán son la velocidad superficial máxima ( $V_{s-máx}$ ) en km/hr, la velocidad de traslación ( $V_t$ ) en km/hr y los coeficientes constantes  $CL1$ ,  $CL2$  y  $CL3$ . Las variables para los ciclones tropicales de trayectoria curva que pasan por el mar Caribe son la velocidad superficial máxima ( $V_{s-máx}$ ) en km/hr, la velocidad de traslación ( $V_t$ ) en km/hr y los coeficientes constantes  $CW1$ ,  $CW2$  y  $CW3$ .

#### Paso 2

Para los ciclones tropicales de trayectoria curva que pasan por la Península de Yucatán se definió una línea recta de referencia a una longitud de  $-86.8^\circ$ , mientras que

para los ciclones tropicales de trayectoria curva que pasan por el mar caribe se definió a una longitud de  $-84.8^\circ$ . Se posicionó un punto con latitud  $CL1$  donde se intersecta la trayectoria del ciclón tropical de trayectoria curva que pasa por la Península de Yucatán (Figura 3.18) y  $CW2$  donde se intersecta la trayectoria del ciclón tropical de trayectoria curva que pasa por el mar Caribe (Figura 3.19).

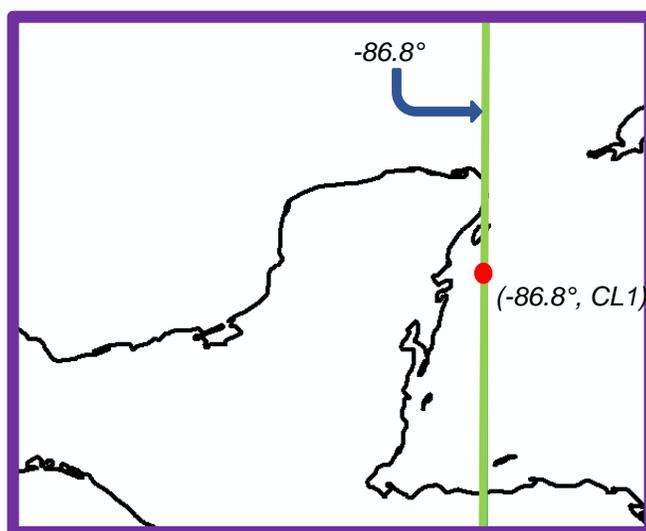


Figura 3.18 Ubicación del punto inicial de la trayectoria de ciclones tropicales sintéticos de trayectoria curva que pasan por la Península de Yucatán

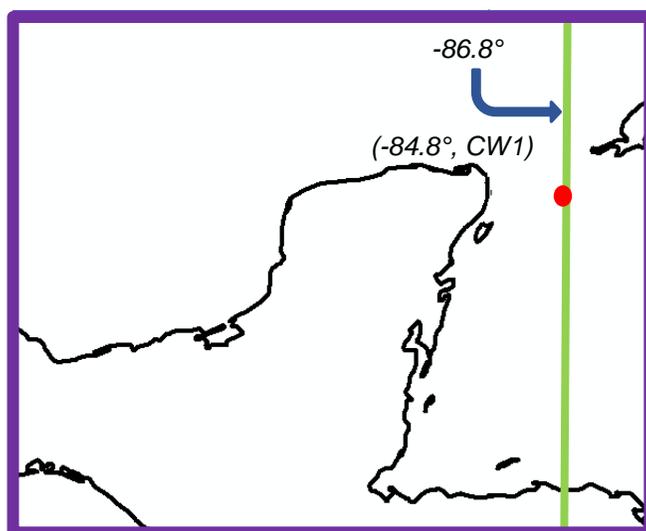


Figura 3.19 Ubicación del punto inicial de la trayectoria de ciclones tropicales sintéticos de trayectoria curva que pasan por el mar Caribe

#### Paso 4

Se calculó la distancia ( $d$ ) que recorre el ciclón tropical para cada 6 horas empleando la variable de entrada velocidad de traslación.

#### Paso 5

Con los coeficientes constantes ( $C1$ ,  $C2$  y  $C3$ ), la distancia ( $d$ ), y la longitud ( $Lon$ ) y latitud inicial ( $L_i$ ), se calculó la longitud ( $Lon_{i+1}$ ) y la latitud ( $L_{i+1}$ ) de los siguientes puntos mediante la resolución simultánea de la ecuación 3.2 y la ecuación 3.3 por medio del método de bisecciones. Éste cálculo se realizó hasta que la posición del ciclón tropical se encontró fuera de los límites de la zona de afectación como se presenta en la Figura 3.20.

$$L_{i+1} = \sqrt{d^2 - (Lon_{i+1} - Lon_i)^2} + L_i \quad (3.4)$$

$$L_{i+1} = C1 + C2 Lon_{i+1}^2 + C3 Lon_{i+1}^3 \quad (3.5)$$

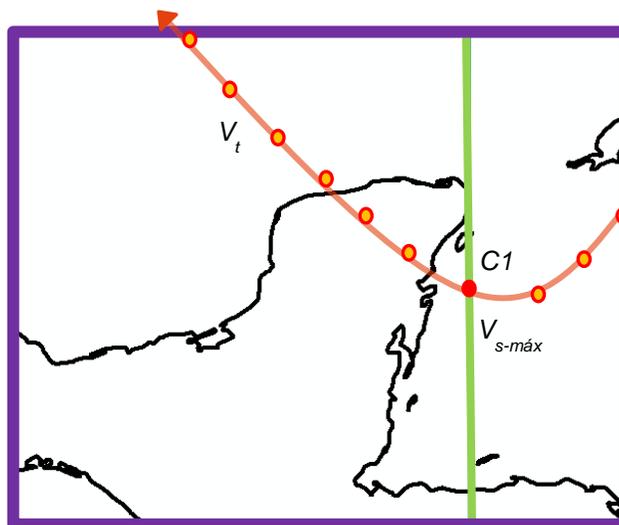


Figura 3.20 Generación de la trayectoria de ciclones tropicales sintéticos de trayectoria curva

### **Paso 6**

Se calculó el tiempo acumulado del ciclón tropical para cada posición establecida por lo que se inició el primer punto con 0 horas, y los siguientes se calcularon adicionando 6 horas como se presenta en la Figura 3.21.

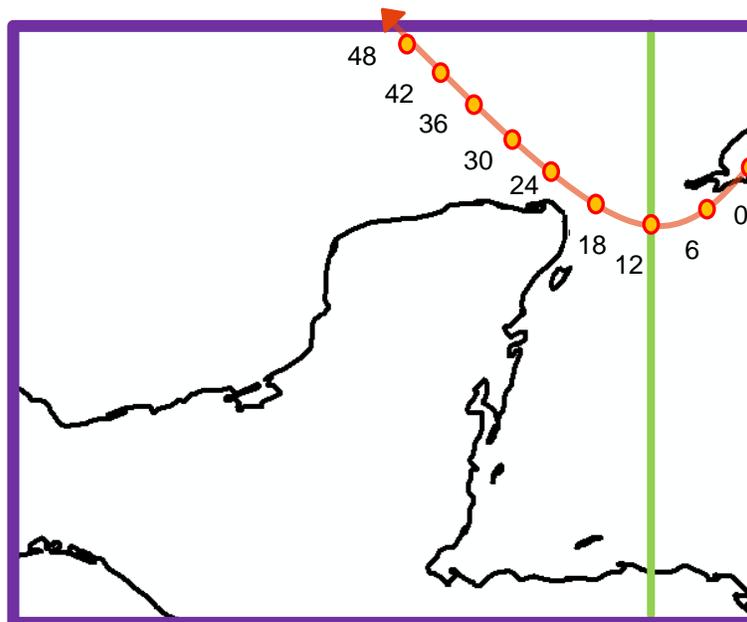


Figura 3.21 Generación del tiempo acumulado de ciclones tropicales sintéticos

Finalmente el programa generó puntos (latitud y longitud) cada 6 horas y se guardaron un primer archivo de salida (BACK1.txt).

#### **3.5.3.2 Revisión de la categoría del terreno y adición de puntos de entrada y salida a la Península de Yucatán**

Con la trayectoria parcialmente definida, se procedió a revisar la ubicación de cada uno de los puntos que definen la trayectoria para saber si se encontraban en mar o tierra.

### **Paso 1**

Se realizó la lectura de los archivos de entrada correspondientes a los puntos que conforman la Península de Yucatán (PER.txt) y el archivo de salida del paso anterior

(BACK1.txt). Del archivo PER.txt se leyeron los datos correspondientes a la latitud y longitud, mientras que del archivo BACK1.txt se leyeron los datos de tiempo acumulado del ciclón tropical en horas, latitud y longitud en grados.

### **Paso 2**

Para cada uno de los puntos que describen la trayectoria del ciclón tropical se realizó una revisión con cada pareja de puntos del archivo PER.txt, se revisa que el ciclón se encuentre dentro o fuera de la Península de Yucatán. Cuando el ciclón tropical se encuentra en mar, se asigna la categoría del terreno igual 0, mientras que cuando el ciclón tropical entra a tierra se asigna una categoría de terreno igual a 2 (Figura 3.22 y Figura 3.23). El tiempo acumulado, la latitud, la longitud y la categoría del terreno se imprimieron en un archivo de salida llamado BACK2.txt.



Figura 3.22 Revisión de la categoría del terreno de ciclones tropicales sintéticos de trayectoria recta cuando entran a tierra

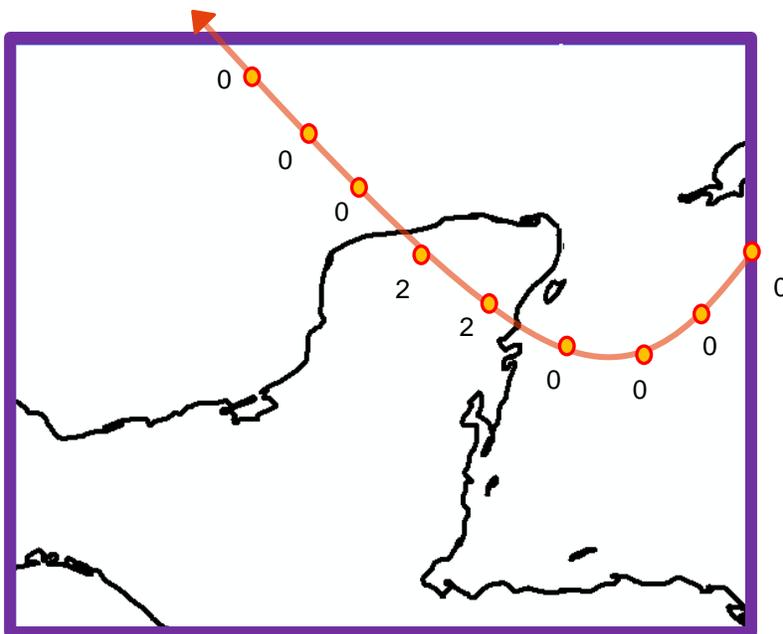


Figura 3.23 Revisión de la categoría del terreno de ciclones tropicales sintéticos de trayectoria curva cuando pasan por la Península de Yucatán

### **Paso 3**

Con el archivo BACK2.txt se realizó una revisión para cada pareja de puntos consecutivos para identificar si existe cambio o no en el valor de la categoría del terreno. Cuando no existe ningún cambio en la categoría el ciclón tropical tiene una trayectoria únicamente en el mar Caribe (Figura 3.24 y Figura 3.25). Cuando existe un cambio en la categoría quiere decir que entre esa pareja de puntos el ciclón tropical entró a tierra en algún momento de las 6 horas.

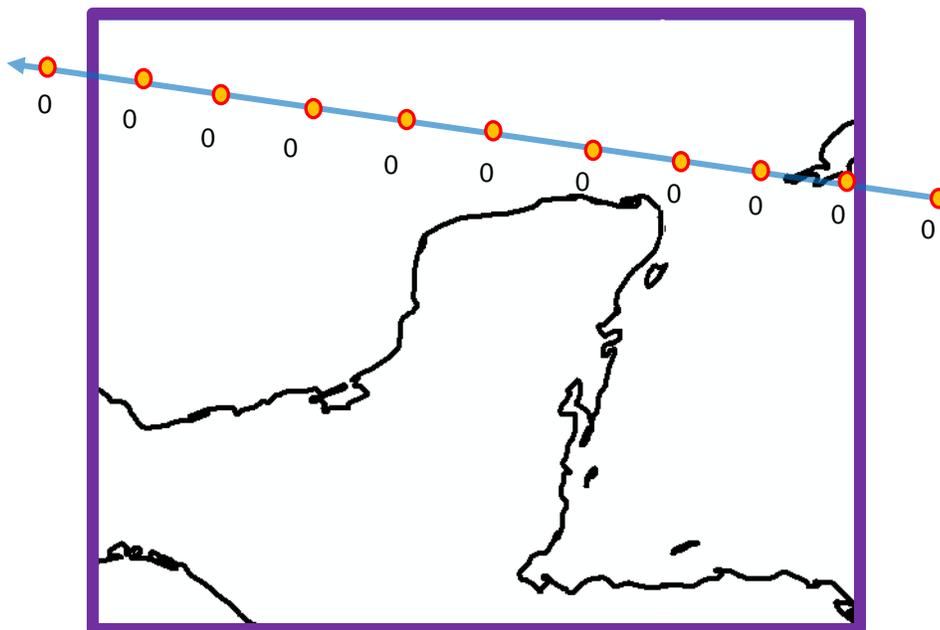


Figura 3.24 Revisión de la categoría del terreno de ciclones tropicales sintéticos de trayectoria recta que pasan por el mar Caribe

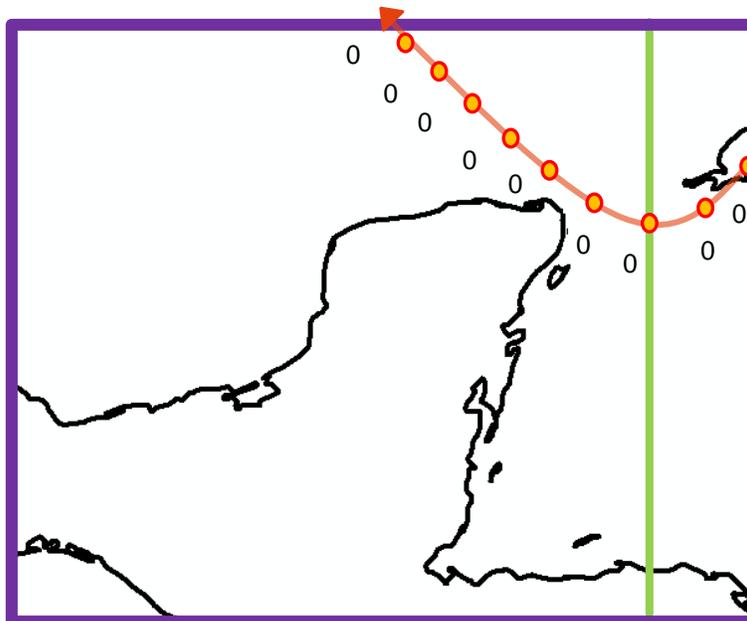


Figura 3.25 Revisión de la categoría del terreno de ciclones tropicales sintéticos de trayectoria curva que pasan por el mar Caribe

#### Paso 4

En caso que el ciclón tropical tenga una trayectoria por mar, se imprime en un archivo BACK3.txt los mismos puntos definidos en el paso 3.

En caso de que el ciclón tropical entre a tierra, se determina el punto de intersección entre la trayectoria y el borde de la Península de Yucatán. Para este propósito, se identifican los puntos donde ocurre un cambio en la categoría del terreno y se dividen las 6 horas en intervalos de 15 min. Para cada uno de esos puntos, espaciados a cada 15 min, se realiza la revisión de la categoría del terreno. Cuando ocurre un cambio en la categoría se selecciona el punto más próximo al borde de la Península de Yucatán. Finalmente, se imprime en el archivo BACK3.txt con cada uno de los puntos que describen la trayectoria, incluyendo los puntos añadidos correspondientes a la entrada y salida a la Península de Yucatán para cada uno de los ciclones tropicales (Figura 3.26 y Figura 3.27).

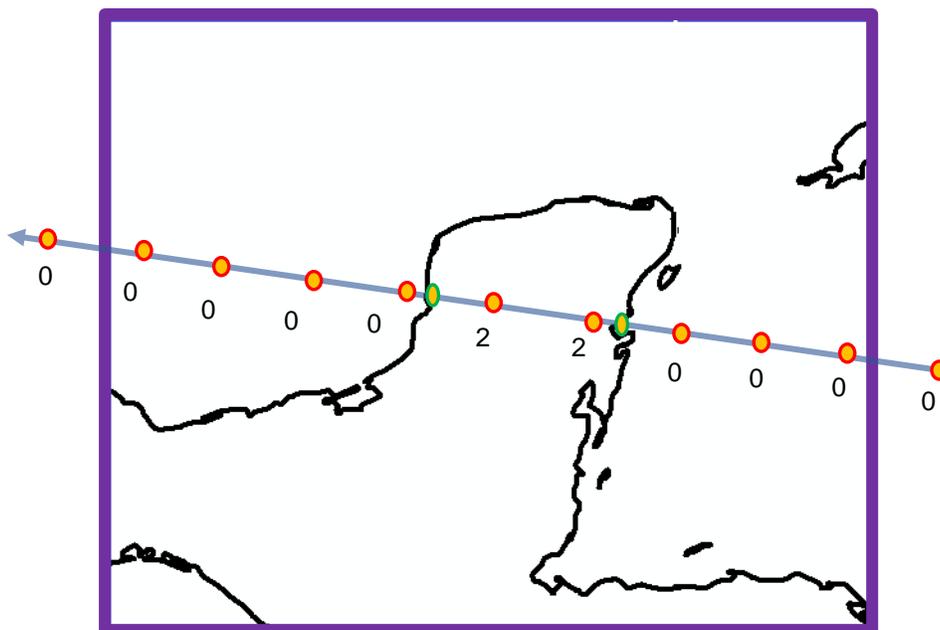


Figura 3.26 Adición de puntos de entrada y salida a la Península de Yucatán de ciclones tropicales sintéticos de trayectoria recta

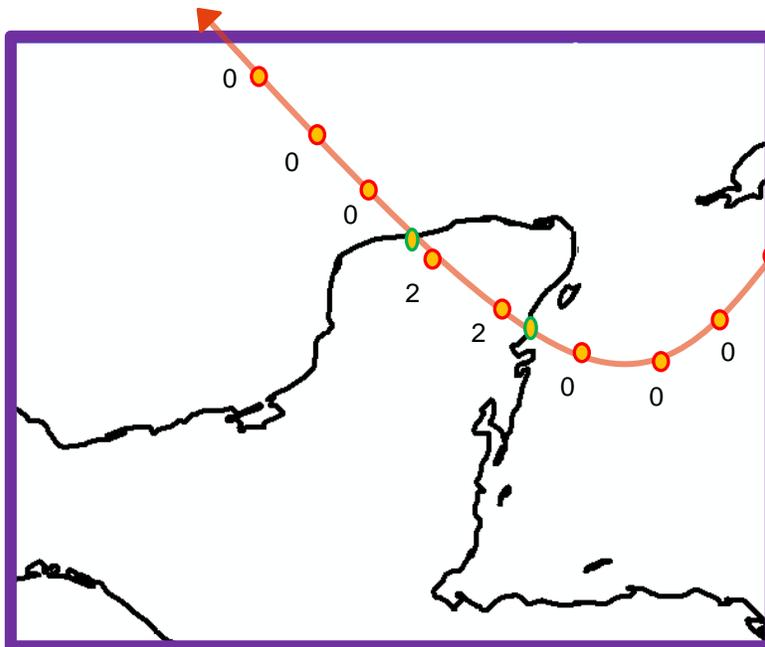


Figura 3.27 Adición de puntos de entrada y salida a la Península de Yucatán de ciclones tropicales sintéticos de trayectoria curva

### 3.5.3.3 *Generación de la velocidad superficial de cada punto*

Con la trayectoria definida se procedió a calcular la velocidad superficial para cada punto. Se determinó que cuando la trayectoria del ciclón tropical sea únicamente por mar, la velocidad superficial permanecerá constante. Cuando el ciclón tropical entre en la Península de Yucatán, se identifican tres posibles situaciones:

- A) La velocidad superficial se mantiene constante en el mar, hasta el momento de entrar a tierra.
- B) La velocidad superficial decae en tierra, de acuerdo al Modelo de atenuación para ciclones tropicales en la Península de Yucatán (Echeverría, 2009).
- C) La velocidad superficial se mantiene constante en el mar en caso de que salga de tierra.

**Paso 1**

Se realizó la lectura de los datos del archivoBACK3.txt. Como datos se tiene el tiempo acumulado del ciclón tropical en horas, la latitud y la longitud en grados, y la categoría del terreno.

**Paso 2**

Se definió la velocidad superficial igual a  $V_{s-máx}$  como una constante para el primer punto, y para los puntos en los cuales la categoría sea igual a 0.

**Paso 3**

Se realizó la revisión del cambio de la categoría en la posición del ciclón tropical. Cuando el ciclón tropical no cambia de categoría se considera la velocidad superficial igual a la inicial a lo largo de toda la trayectoria.

Cuando el ciclón tropical cambia de categoría se realiza un cálculo del tiempo en tierra del ciclón tropical para cada posición y se calcula la velocidad superficial de acuerdo al Modelo de atenuación para ciclones tropicales en la Península de Yucatán (Echeverría, 2009).

**Paso 4**

Con el tiempo acumulado en tierra se calculó la velocidad superficial ( $V_s$ ) dependiendo de  $V_{s-máx}$ . Cuando  $V_{s-máx}$  es menor a 119 km/hr se considera que el ciclón tropical es una tormenta tropical, por lo que el cálculo de la velocidad superficial para cada punto se realiza con la ecuación 3.4.

$$V_s(t_i, V_t) = 40 + (0.9 V_0 - 40) e^{(-0.0458 \pm 0.0010 V_t) t_i} \quad (3.4)$$

Cuando  $V_{s-máx}$  es mayor o igual 119 km/hr se considera que el ciclón tropical es un huracán, por lo que el cálculo de la velocidad superficial para cada punto se realiza con la ecuación 3.5.

$$V_s(t_i) = 60 + (V_0 - 60) e^{(-0.0752 + 0.0007t_i)t_i} \quad (3.5)$$

### Paso 5

Si el ciclón tropical volvió a cambiar de categoría significa que salió de tierra, por lo que la velocidad superficial en mar tendrá un valor igual al de la velocidad superficial en el último punto en tierra del ciclón tropical. En la Figura 3.28 se presentan los valores de la velocidad superficial para diferentes casos: para A se asume velocidad constante, para B se calcula la velocidad superficial conforme a la ley de atenuación para tormentas tropicales o huracanes y para C velocidad constante.

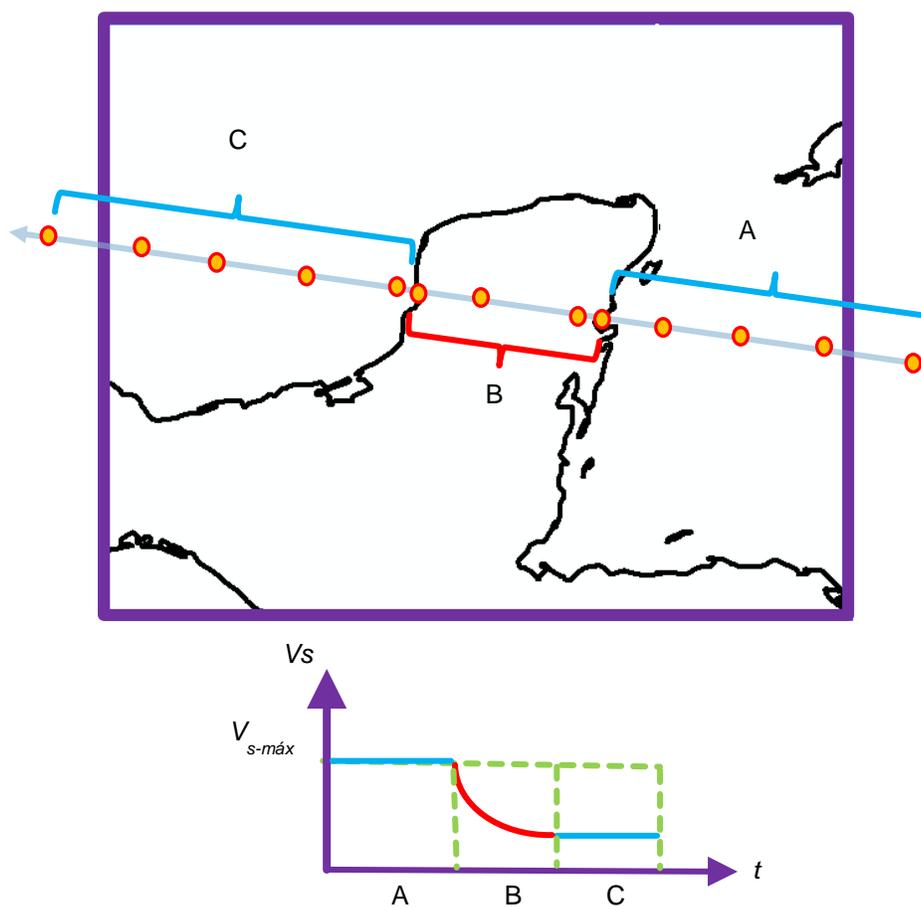


Figura 3.28 Velocidad superficial constante en mar o velocidad superficial de acuerdo a la ley de atenuación en tierra de los ciclones tropicales sintéticos

El archivo de resultados que generó dicho programa (SINTETICOS.txt) es similar a la base de datos del HURDAT. Los datos de salida del programa de cómputo son el tiempo acumulado del ciclón tropical, la ubicación geográfica (latitud y longitud) en intervalos de seis horas, la velocidad de traslación y la velocidad superficial para cada punto. Con este archivo se procederá a la simulación de los ciclones tropicales sintéticos.

### **3.6 Simulación del paso de ciclones tropicales sintéticos**

En este paso se obtuvo un registro de las máximas velocidades que se presentaron en cada sitio de interés producidas por el paso de los ciclones tropicales sintéticos. Los datos de entrada fueron obtenidos por la base de datos de ciclones tropicales sintéticos. Se calculó el campo de velocidades de vientos huracanados de cada ciclón tropical para cada intervalo de tiempo  $t_i$  en su trayectoria y se determinó la velocidad para el sitio de interés. Se seleccionó la máxima velocidad obtenida en un sitio por cada ciclón tropical.

Para obtener una mayor cantidad de datos fue necesario refinar la trayectoria de los ciclones tropicales debido a que la base de datos tiene un registro de cada seis horas. Esto es, se considerarán en la modelación puntos en la trayectoria a un espaciamiento de una hora.

### **3.7 Análisis estadístico de las velocidades para cada sitio de interés**

El análisis estadístico consistió en organizar los datos en rangos para cada sitio de interés. Cada uno de los rangos es representado por una marca de clase que representa el promedio del límite inferior y el límite superior para cada intervalo. Para cada rango se calcularon sus frecuencias relativas y acumuladas para posteriormente calcular sus respectivas probabilidades relativas y acumuladas.

Para la determinación del número mínimo de rangos se consideró la ecuación 3.6 en base al número de datos  $n$ , recomendada por Benjamín y Cornell (1970):

$$N_r = 1 + 3.3 \log(n) \quad (3.6)$$

Donde  $N_r$  es el número mínimo de rangos, y  $n$  es el número de datos.

Una vez obtenido el número mínimo de rangos fue necesario proceder al cálculo de la frecuencia relativa, la frecuencia acumulada, y su respectiva probabilidad acumulada para cada rango.

### **3.8 Ajuste probabilístico de las velocidades para cada sitio de interés**

Para el cálculo de las velocidades regionales de viento fue necesario realizar un ajuste probabilístico con la distribución de probabilidad acumulada extrema que mejor describa al comportamiento de los datos. En el presente trabajo se realizó el ajuste probabilístico con la distribución extrema tipo I, Forma doble exponencial.

En este trabajo se estudiaron dos posibles escenarios que dependen del valor de la velocidad superficial máxima a observarse en un periodo de tiempo de 2000 años. En el escenario 1 se tomó en cuenta el valor máximo observado en la base de datos, el cual por facilidad se redondea a un valor cerrado de trescientos diez kilómetros por hora (310 km/hr), esto suponiendo que no se presenten aumentos significativos en los valores de las velocidades de viento. En el escenario 2 se emplea el valor máximo observado en la base de datos del HURDAT, el cual se incrementa en un diez por ciento para proponer un valor límite que puede alcanzar un huracán; este valor es de trescientos treinta y seis kilómetros por hora (336 km/h)

La probabilidad acumulada obtenida en el análisis estadístico se denominó como  $F(v)$  y es la probabilidad de que cierta velocidad  $V$  no sea excedida. Este valor de  $F(v)$ , junto con su marca de clase correspondiente, son los datos que se graficaron en un sistema de coordenadas de acuerdo con el tipo de distribución probabilística extrema (papel de probabilidad).

Para seleccionar la mejor distribución se determinó para cada ciudad la correlación entre la distribución de velocidades máximas en el papel de probabilidad y la recta ajustada por mínimos cuadrados. La mejor correlación fue aquella cuyo valor tiende hacia la unidad.

Una vez realizado el papel de probabilidad correspondiente, se determinó una velocidad en función de una probabilidad de no excedencia. Esta velocidad obtenida del papel de probabilidad corresponde a la velocidad regional de viento para un cierto periodo de retorno.

Para relacionar la probabilidad de no excedencia  $F(V_c)$  asociada a velocidades de viento provocadas por un ciclón tropical, con un determinado período de retorno  $T$ , se utilizó la ecuación 3.7:

$$F(V_c) = 1 - \frac{1}{T \cdot M} \quad (3.7)$$

Donde  $T$  es el período de retorno en años al cual se desea calcular la velocidad regional de viento, y la probabilidad  $M$  puede calcularse fácilmente como la relación entre el número de registros de velocidades producidas por vientos ciclónicos y el número de años de la base de datos utilizada.

### **3.9 Construcción de mapas de isotacas**

Con los valores obtenidos de las velocidades regionales de viento máximas de cada sitio por medio de la simulación histórica y la simulación probabilista, se elaboraron mapas de isotacas para cada período de retorno para los periodos de retorno de 50, 100, 200 y 500 años, considerando que todos los puntos dentro de la península tienen una categoría de terreno tipo II, y una velocidad con tiempo de promediación de tres segundos.

Para los mapas de isotacas en la Península de Yucatán, fue necesario contar con diversos puntos para los que se calcularon las velocidades regionales correspondientes. Con la ayuda de estas velocidades regionales se realizó una

interpolación para encontrar y generar las líneas de iso-velocidad. Por lo anterior se utilizaron una cantidad de sitios de interés suficientes para generar una interpolación más confiable.

En este trabajo de investigación se determinó un mallado de sitios de interés sobre la Península de Yucatán con una separación en ambos sentidos de 0.125 grados (Figura 3.29)

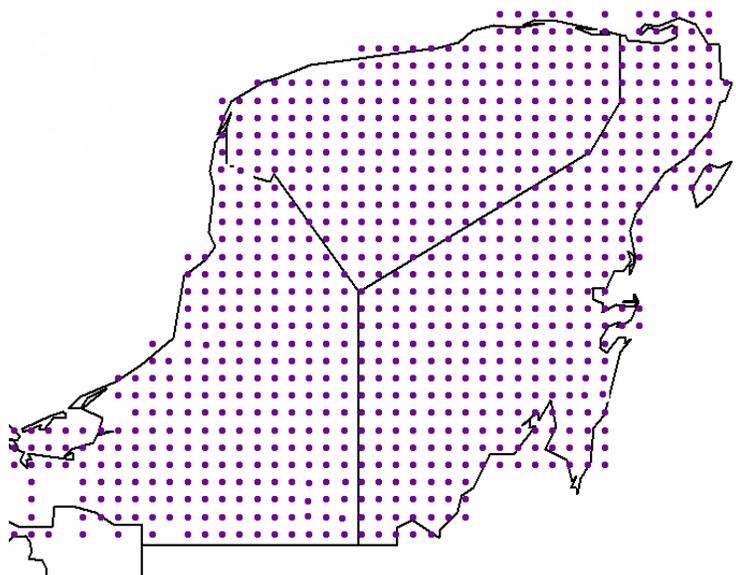


Figura 3.29 Mallado de Sitios de interés

### **3.10 Análisis comparativo de las velocidades regionales de viento obtenidas con las distintas bases de datos**

Debido a que el objetivo de este trabajo de investigación fue la determinación de velocidades regionales para el diseño estructural, se realizó una comparación de los resultados obtenidos con los valores propuestos por normatividades vigentes en la actualidad para dicho diseño e investigaciones afines.

Los diseños estructurales en la ciudad de Mérida deben satisfacer los requisitos del Reglamento de Construcciones del Municipio de Mérida; en el cual se proponen velocidades regionales de viento para la ciudad de Mérida, pero a su vez éste

reglamento permite el uso de las especificaciones elaboradas por otras instituciones, tales como el Instituto de Investigaciones Eléctricas de la Comisión Federal de Electricidad. Este Instituto elaboró el Manual de Diseño de Obras Civiles para el Diseño por Viento (CFE, 2008) para el cálculo de las acciones eólicas. En este manual se encuentran velocidades regionales de viento para distintas ciudades de la República Mexicana entre las que se incluyen los sitios de interés referentes a esta investigación.

Se realizó una comparación entre las velocidades regionales de viento obtenidas en este trabajo para la ciudad de Mérida, con las propuestas en el Reglamento de Construcciones del Municipio de Mérida, así como también las velocidades regionales de viento de las ciudades de la Península de Yucatán que se encuentren con valores propuestos en el Manual de Diseño de Obras Civiles para el Diseño por Viento (CFE, 2008). Adicionalmente se realizó una comparación con los valores generados por la simulación determinista con la simulación probabilista realizados en la investigación.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS

#### 4.1 Base de datos de ciclones tropicales históricos

De la primera etapa de la depuración se obtuvo una población de 434 ciclones tropicales que se ubicaron dentro de la zona de afectación (Figura 4.1).

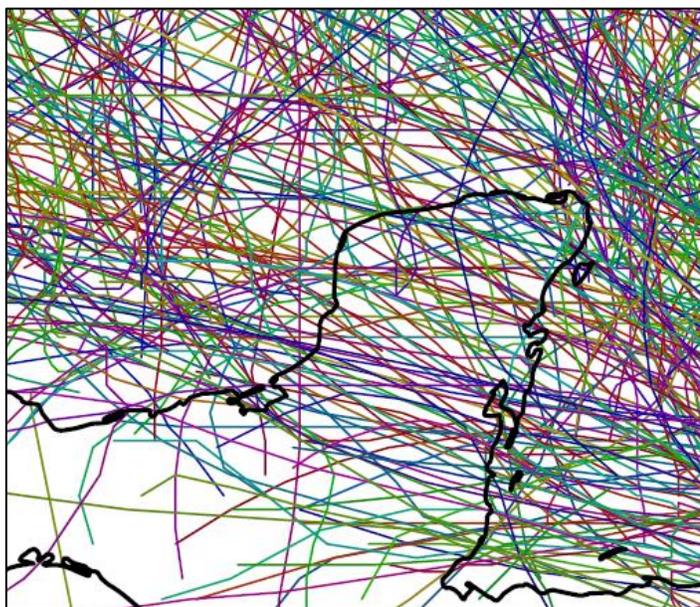


Figura 4.1 Ciclones tropicales dentro de la región definida

Fue necesario realizar una segunda etapa de depuración por lo que se eliminaron los ciclones tropicales con velocidades superficiales menores a 62 km/hr (70 depresiones tropicales y 4 bajas presiones), así como también las trayectorias con número de datos insuficientes dentro de la zona de afectación (16 ciclones tropicales). Se detectaron algunas inconsistencias en la base de datos del HURDAT en el registro de las velocidades superficiales que también fueron eliminados (6 ciclones tropicales) y también se eliminaron aquellos ciclones tropicales que no tuvieran ningún tipo de afectación para la Península de Yucatán (192 ciclones tropicales). Debido a que en este trabajo de investigación se consideraron únicamente los ciclones tropicales

generados en el Océano Atlántico, un ciclón tropical fue eliminado al no cumplir con dicha característica. De la segunda etapa de la depuración se obtuvo un total de 145 ciclones tropicales.

Posterior a la segunda etapa de depuración se procedió a realizar una clasificación de los ciclones tropicales de acuerdo a su trayectoria. Las trayectorias se clasificaron como trayectorias rectas, trayectorias curvas y trayectorias irregulares.

El número y el porcentaje de ciclones tropicales de acuerdo a la clasificación de su trayectoria se presentan en la tabla 4.1. El número de ciclones tropicales con trayectoria recta, de trayectoria curva y de trayectoria irregular fue de 115, 19 y 12 respectivamente.

Tabla 4.1 Clasificación de los ciclones tropicales de acuerdo a su trayectoria

<b>Trayectoria</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Porcentaje</b>
Recta	115	79.3%
Curva	18	12.4%
Irregular	12	8.3 %
Total	145	100%

En la Figura 4.2, Figura 4.3 y Figura 4.4 se presenta la clasificación de los ciclones tropicales históricos en trayectorias rectas, curvas e irregulares, respectivamente.



Figura 4.2 Ciclones tropicales con trayectoria recta

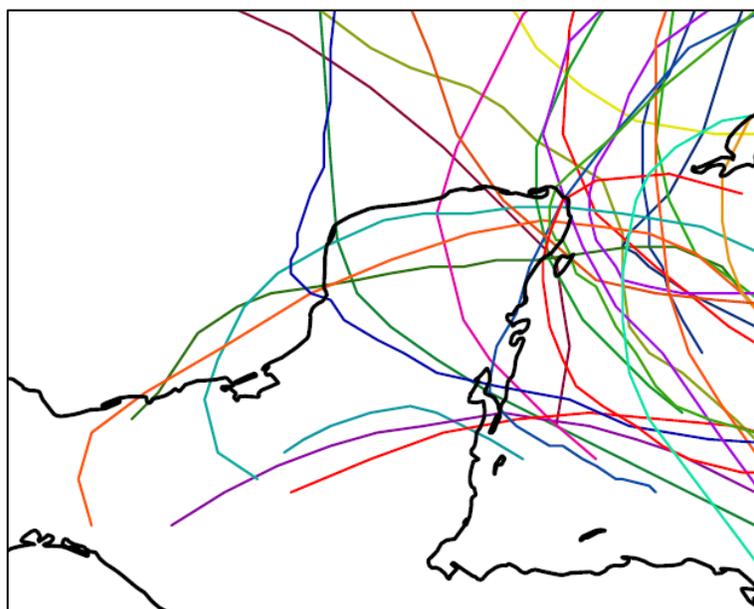


Figura 4.3 Ciclones tropicales con trayectoria curva

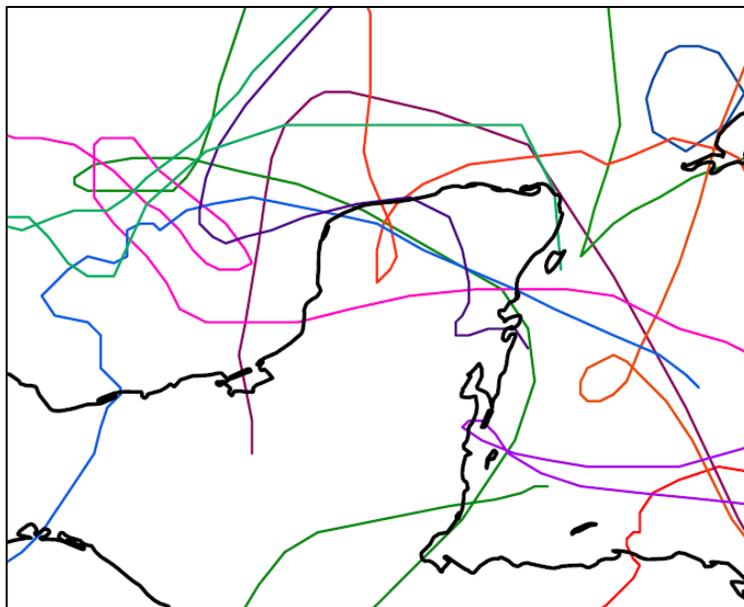


Figura 4.4 Ciclonés tropicales con trayectoria irregular

Posterior a la clasificación de trayectorias se procedió a revisar los ciclones tropicales de trayectoria irregular para efecto de simplificar su modelación. Se eliminaron aquellos que no afectaron la Península de Yucatán debido a que nunca llegaron a tierra y que a su vez las velocidades superficiales eran cercanas a las de una tormenta tropical (9 eventos). Dos de los ciclones tropicales irregulares cambiaron su clasificación a trayectorias rectas, debido a que al atravesar la Península de Yucatán es posible calcular una trayectoria recta equivalente. Esta revisión de los ciclones tropicales de trayectoria irregular se presenta a detalle en el Apéndice B.

El número y el porcentaje de ciclones tropicales de acuerdo a la clasificación de su trayectoria después de la revisión de los ciclones tropicales de trayectoria irregular se presentan en la tabla 4.2. El número de ciclones tropicales con trayectoria recta, de trayectoria curva y de trayectoria irregular fue de 117, 18 y 1 respectivamente. Esta clasificación es la considerada en la generación de ciclones tropicales sintéticos.

Tabla 4.2 Clasificación idealizada de los ciclones tropicales de acuerdo a su trayectoria para efecto de modelación

<b>Trayectoria</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Porcentaje</b>
Recta	117	86.0%
Curva	18	13.2%
Irregular	1	0.7%
Total	136	100%

## **4.2 Análisis estadístico de las variables de ciclones tropicales**

Del análisis estadístico se obtuvieron los histogramas de frecuencia correspondientes a las variables. En la Figura 4.5, Figura 4.6 y Figura 4.7 se presentan los histogramas de frecuencias de la distribución de la velocidad superficial para las tormentas tropicales, para huracanes y para la totalidad de los ciclones tropicales, respectivamente. Estos histogramas agrupan datos de trayectoria rectas y curvas de los ciclones tropicales.

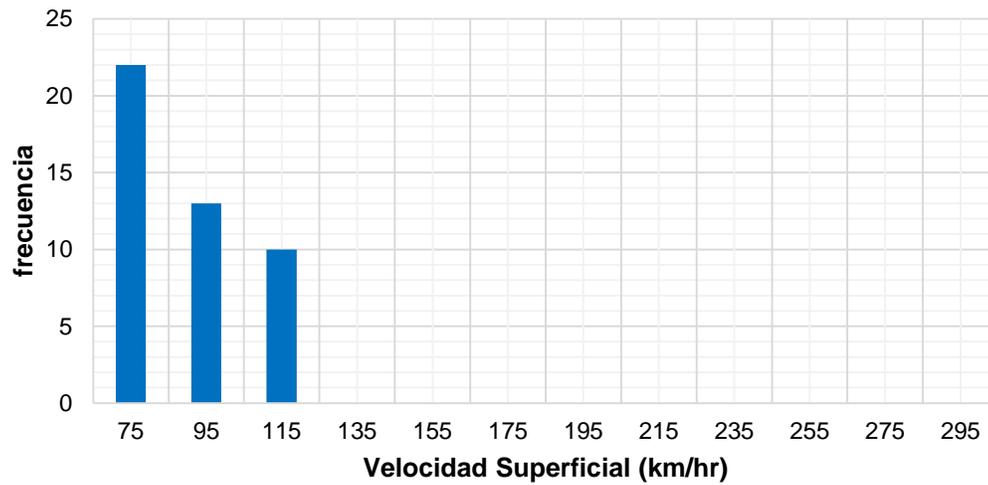


Figura 4.5 Histograma de frecuencia de la velocidad superficial de tormentas tropicales de trayectorias rectas y curvas

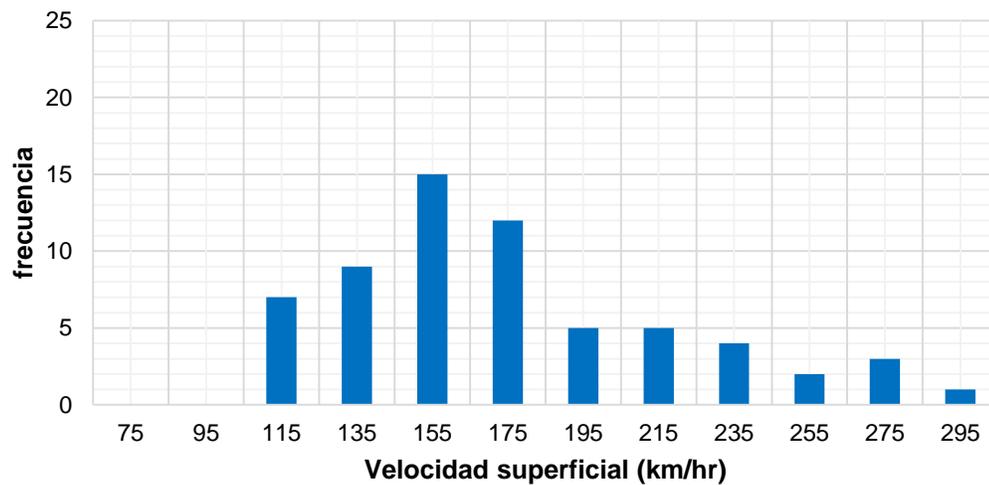


Figura 4.6 Histograma de frecuencia de la velocidad superficial de huracanes de trayectorias rectas y curvas

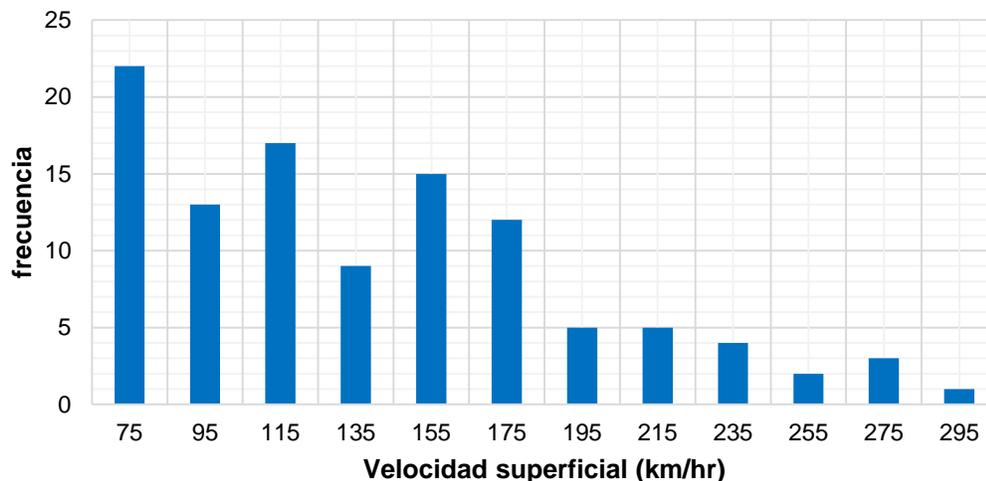


Figura 4.7 Histograma de frecuencia de la velocidad superficial de ciclones tropicales de trayectorias rectas y curvas

En la Figura 4.8, Figura 4.9 y Figura 4.10 se presentan los histogramas de frecuencias la velocidad de traslación de tormentas tropicales, huracanes y para la totalidad de los ciclones tropicales, respectivamente. Estos histogramas agrupan datos de trayectorias rectas y curvas de los ciclones tropicales.

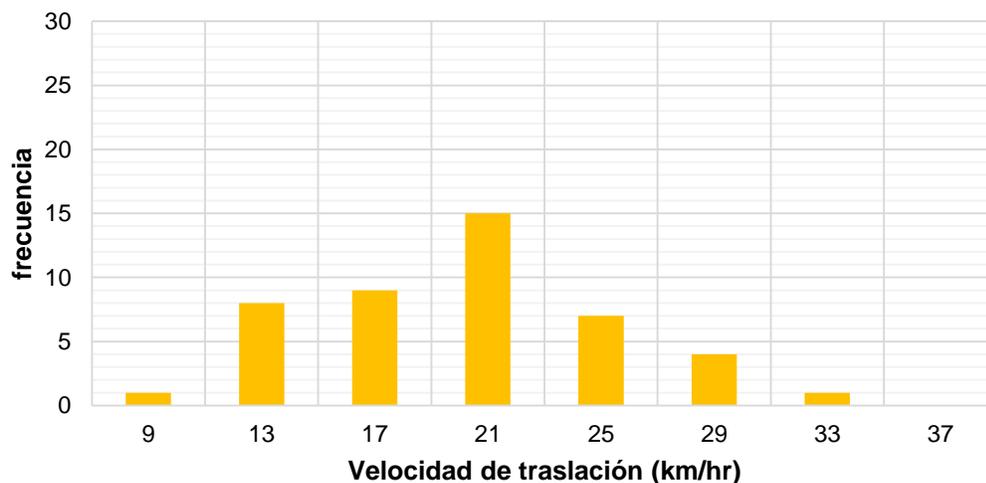


Figura 4.8 Histograma de frecuencia de la velocidad de traslación de tormentas tropicales de trayectorias rectas y curvas

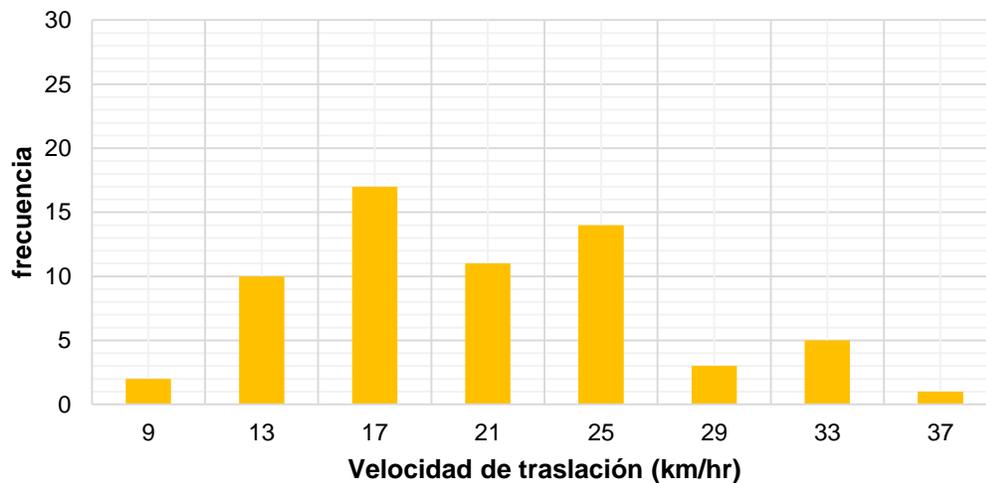


Figura 4.9 Histograma de frecuencia de la velocidad de traslación de huracanes de trayectorias rectas y curvas

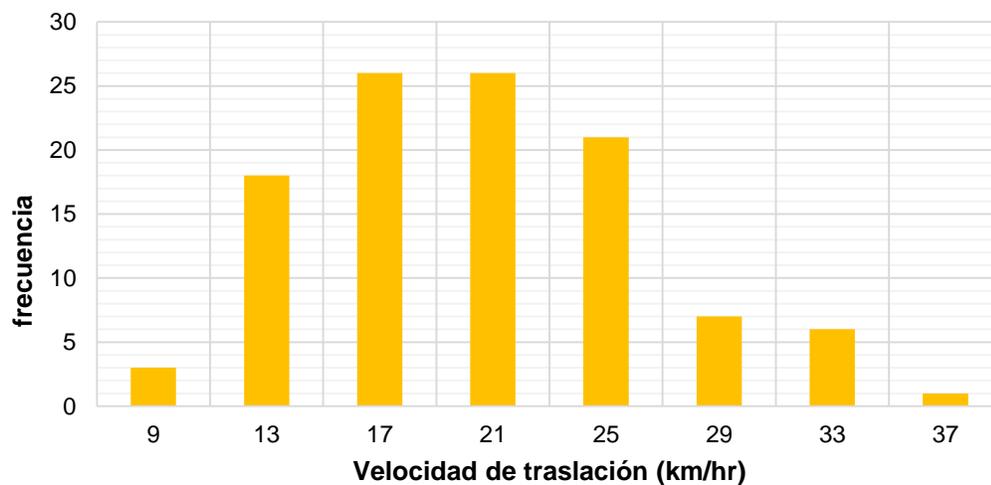


Figura 4.10 Histograma de frecuencia de la velocidad de traslación de ciclones tropicales

En la Figura 4.11, Figura 4.12 y Figura 4.13 se presentan los histogramas de frecuencias del ángulo de la trayectoria de tormentas tropicales, huracanes y para la totalidad de los ciclones tropicales, respectivamente, de trayectoria recta.

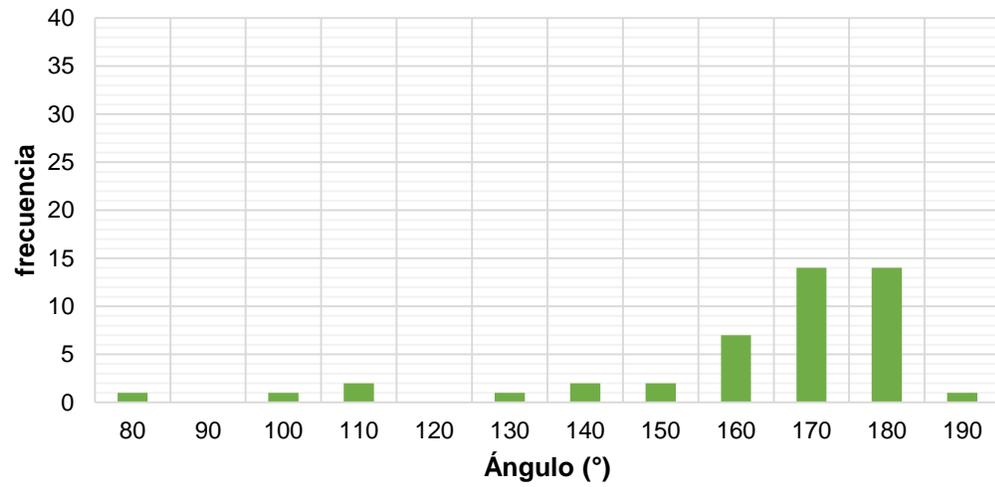


Figura 4.11 Histograma de frecuencia del ángulo de trayectoria de tormentas tropicales

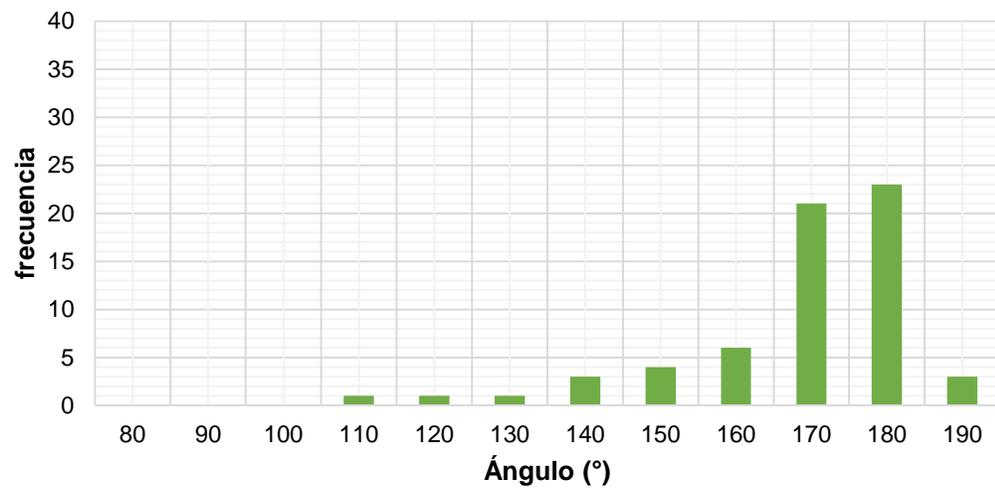


Figura 4.12 Histograma de frecuencia del ángulo de trayectoria de huracanes

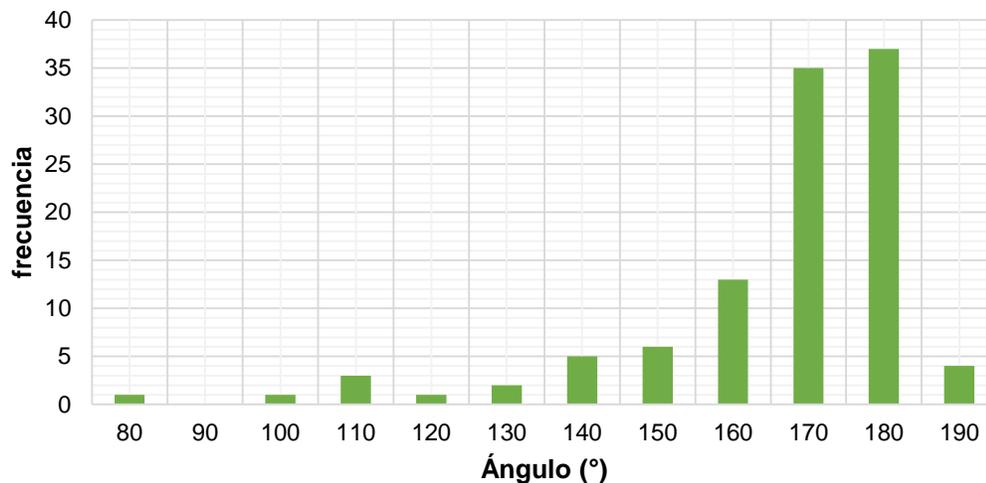


Figura 4.13 Histograma de frecuencia del ángulo de trayectoria de ciclones tropicales

En la Figura 4.14, Figura 4.15 y Figura 4.16 se presentan los histogramas de frecuencias de la distribución de la latitud para las tormentas tropicales, para huracanes y para la totalidad de los ciclones tropicales, respectivamente, de trayectoria recta. Esta latitud corresponde a la intersección de la trayectoria del ciclón tropical con la longitud de  $86.8^\circ$ . En la Figura 4.17 se presenta el histograma de frecuencia de la latitud de los ciclones tropicales de trayectoria recta graficado con referencia a un mapa de la Península de Yucatán.

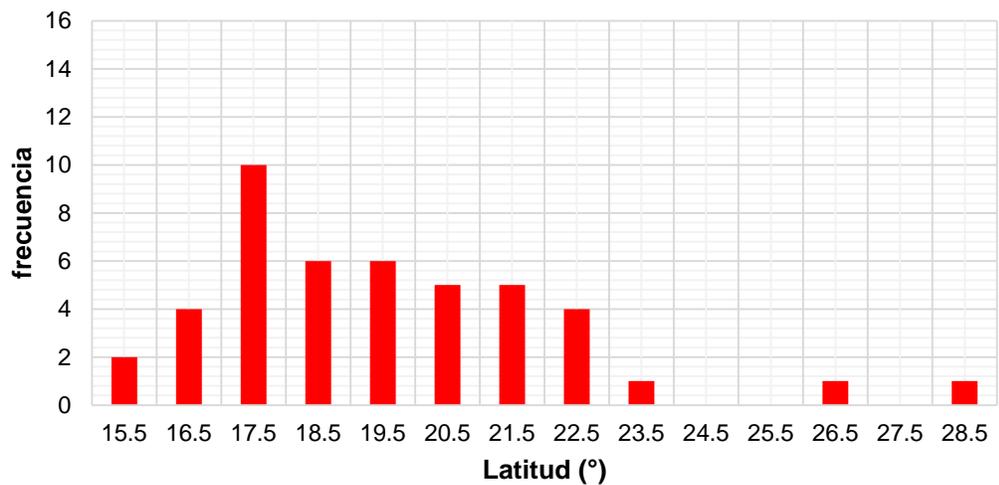


Figura 4.14 Histograma de frecuencia de la latitud de tormentas tropicales de trayectoria recta

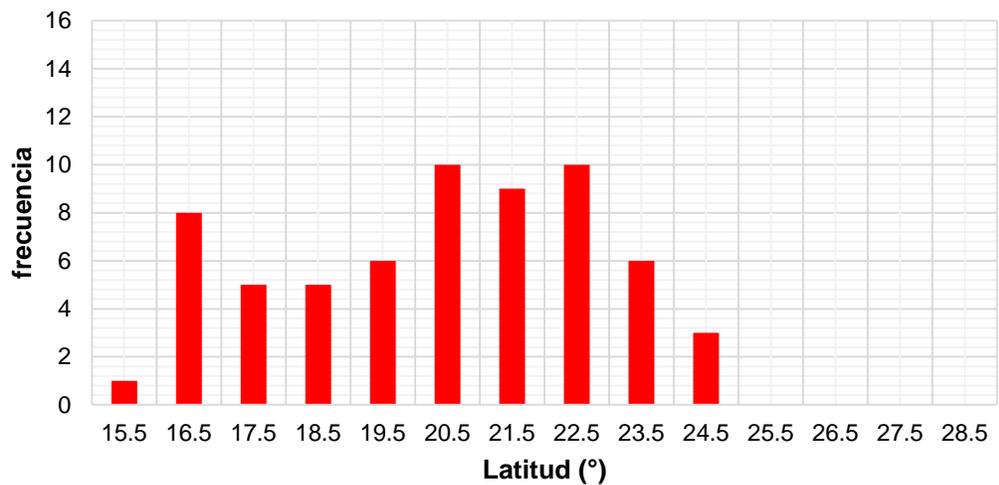


Figura 4.15 Histograma de frecuencia de la latitud de huracanes de trayectoria recta

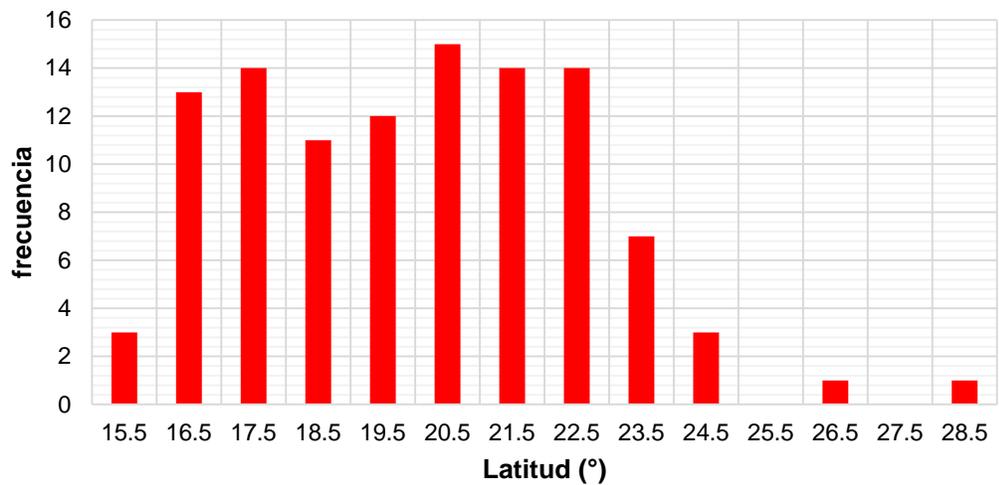


Figura 4.16 Histograma de frecuencia de la latitud de ciclones tropicales de trayectoria recta

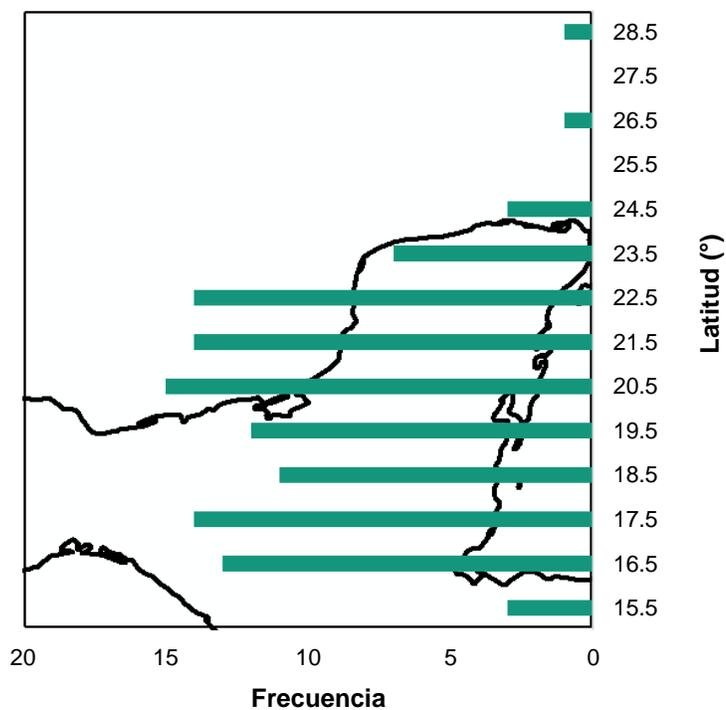


Figura 4.17 Histograma de frecuencia de ciclones tropicales de trayectoria recta graficado con respecto a la Península de Yucatán

En el caso de los ciclones tropicales de trayectoria recta, el análisis estadístico determinó que la latitud depende de la velocidad superficial, por lo que para el ajuste de distribuciones de probabilidad se consideraron casos diferentes.

En el caso de los ciclones tropicales de trayectorias curvas no se dividieron en tormentas tropicales y huracanes debido a que el número de datos es muy pequeño. En la Figura 4.18 y la Figura 4.19 se presentan los histogramas de frecuencias de los coeficientes constantes  $CL1$  y  $CL2$  de los ciclones tropicales de trayectorias curvas que pasan por la Península de Yucatán.

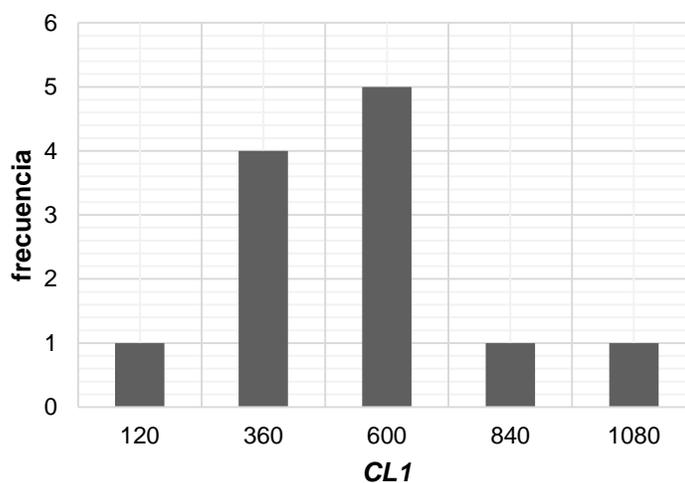


Figura 4.18 Histograma de frecuencia del coeficiente constante  $CL1$  de ciclones tropicales de trayectoria curva que pasan por la Península de Yucatán

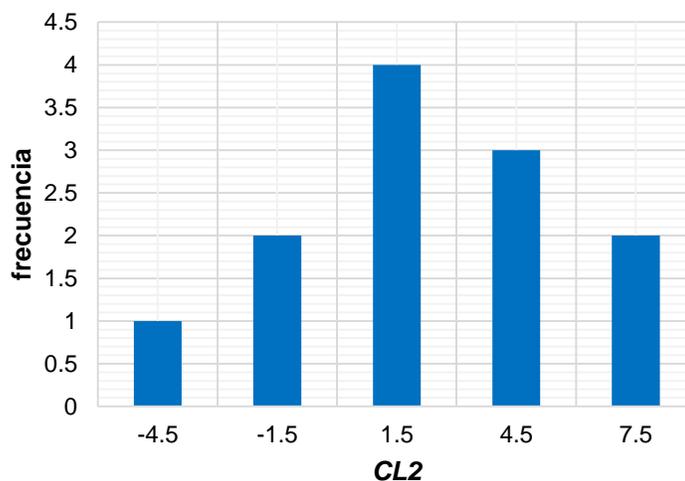


Figura 4.19 Histograma de frecuencia del coeficiente constante  $CL2$  de ciclones tropicales de trayectoria curva que pasan por la Península de Yucatán

En la Figura 4.20 y la Figura 4.21 se presentan los histogramas de frecuencias de los coeficientes constantes  $CW1$  y  $CW2$ , respectivamente, de los ciclones tropicales de trayectorias curvas que pasan por el mar Caribe.

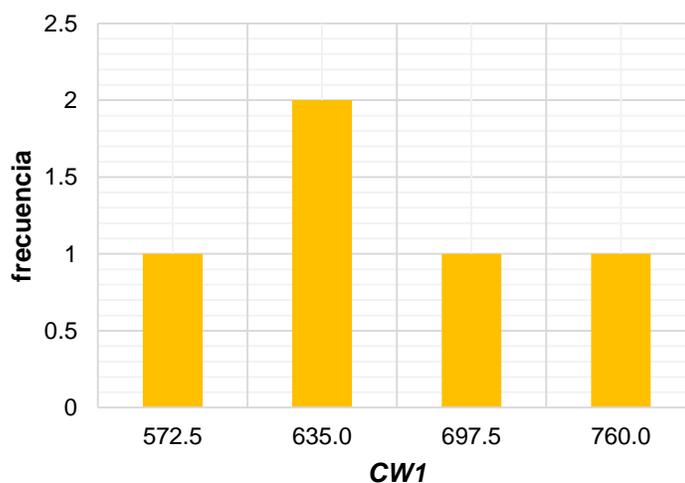


Figura 4.20 Histograma de frecuencia del coeficiente constante  $CW1$  de ciclones tropicales de trayectoria curva que pasan por el mar Caribe



Figura 4.21 Histograma de frecuencia del coeficiente constante  $CW2$  de ciclones tropicales de trayectoria curva que pasan por el mar Caribe

Posterior a los histogramas de frecuencias relativas se realizaron los polígonos de distribución acumulada para las variables de los ciclones tropicales de trayectoria recta y curva, con el propósito de determinar si se emplea una (independiente de la velocidad superficial) o dos (dependiente de la velocidad superficial: tormentas tropicales y huracanes) distribuciones de probabilidad para cada variable.

En la Figura 4.22 se presenta el polígono de distribución acumulada para la velocidad superficial de los ciclones tropicales. En este caso se consideró una sola distribución de probabilidad que incluye ciclones tropicales de trayectoria recta y curva.

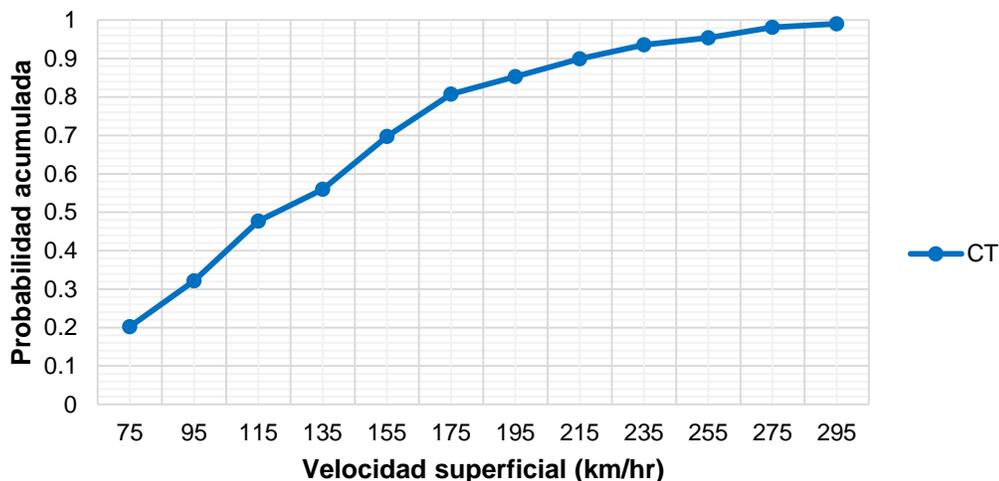


Figura 4.22 Polígono de probabilidad acumulada de la velocidad superficial de ciclones tropicales de trayectoria recta y curva

En la Figura 4.23 se presenta el polígono de distribución acumulada para la velocidad de traslación de las tormentas tropicales, los huracanes y los ciclones tropicales de trayectoria recta y curva. En este caso se consideró una sola distribución debido a que las probabilidades acumuladas resultaron ser similares para los casos de tormentas tropicales y huracanes independientemente del tipo de trayectoria.

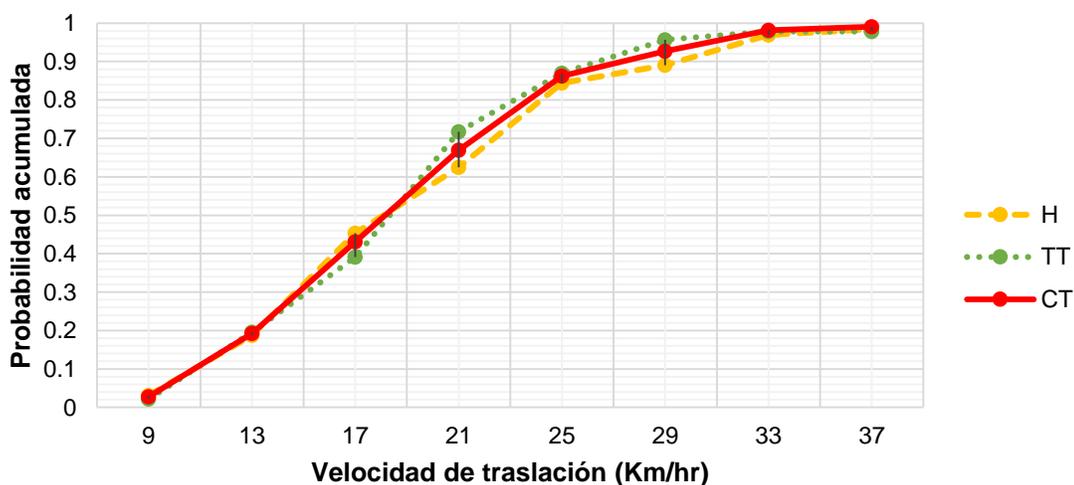


Figura 4.23 Polígono de probabilidad acumulada de la velocidad de traslación de ciclones tropicales de trayectoria recta y curva

En la Figura 4.24 se presenta el polígono de distribución acumulada para el ángulo de incidencia de las tormentas tropicales, los huracanes y los ciclones tropicales de trayectoria recta. En este caso se consideró una sola distribución debido a que las probabilidades acumuladas resultaron ser similares para los casos de tormentas tropicales y huracanes.

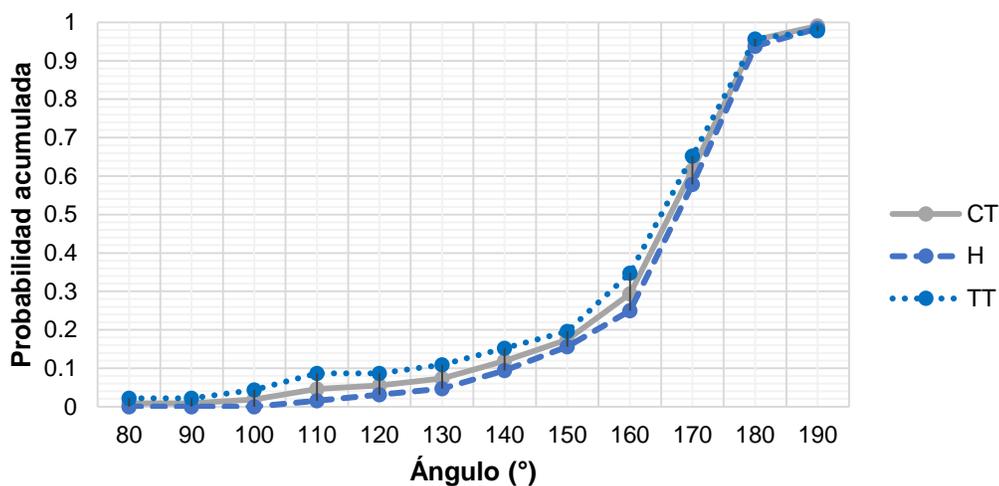


Figura 4.24 Polígono de probabilidad acumulada del ángulo de incidencia de ciclones tropicales de trayectoria recta

En la Figura 4.25 se presenta el polígono de distribución acumulada para la latitud de las tormentas tropicales, los huracanes y los ciclones tropicales de trayectoria recta. En este caso se consideraron dos distribuciones debido a que las probabilidades acumuladas resultaron ser considerablemente diferentes para los casos de tormentas tropicales y huracanes.

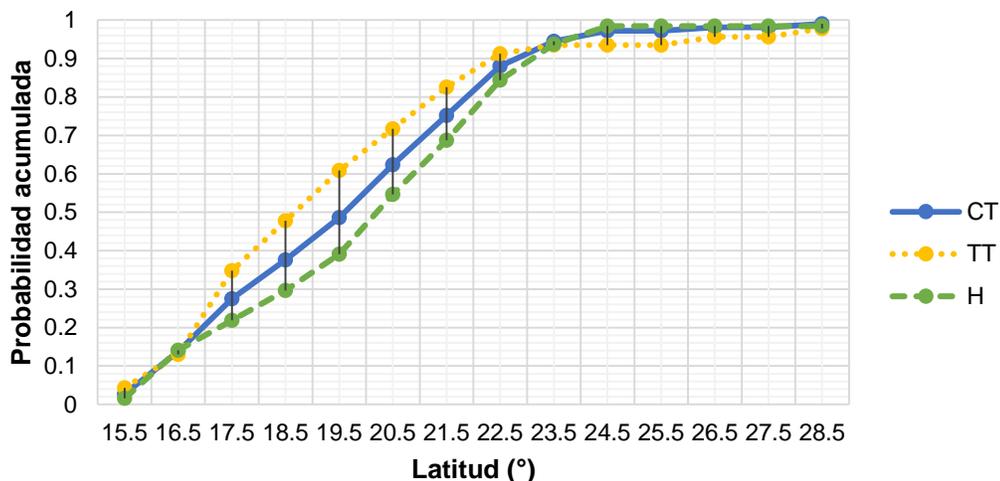


Figura 4.25 Polígono de probabilidade acumulada de la latitud de ciclones tropicales de trayectoria recta

### 4.3 Distribuciones de probabilidad para las variables de ciclones tropicales

Se seleccionaron las distribuciones de probabilidad para cada una de las variables mediante los resultados favorables de las pruebas de bondad de ajuste. En el caso de la velocidad superficial se obtuvo un mejor ajuste con la distribución tipo Weibull (Ec. 4.1), con una media de 138.82 y una desviación estándar de 55.033. La ecuación 4.1 describe la distribución de las velocidades de los ciclones tropicales y en la Figura 4.26 se presenta dicha distribución.

$$f(x) = \frac{1.268}{81.163^{1.268}} (x-63.423)^{0.26822} e^{-[(x-63.423)/81.163]^{1.268}} \quad (4.1)$$

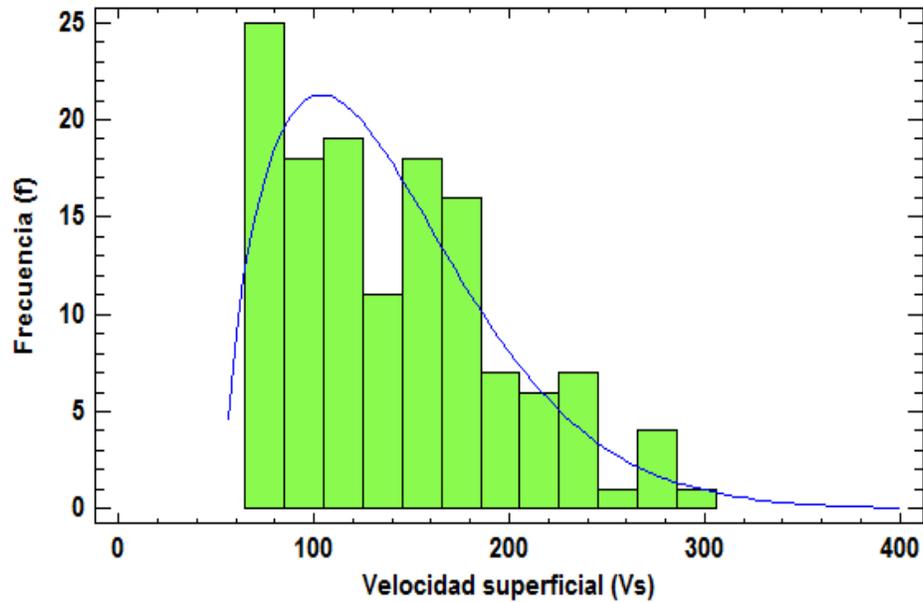


Figura 4.26 Distribución tipo Weibull que describe la velocidad superficial de ciclones tropicales

Para la velocidad de traslación se obtuvo un ajuste favorable en el caso de la distribución lognormal (Ec. 4.2), con una media de 20.426 y una desviación estándar de 6.240. La ecuación 4.2 describe la distribución de la velocidad de traslación y en la Figura 4.27 se presenta dicha distribución.

$$f(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi} \cdot 6.240} e^{-\frac{(\ln x - 20.426)^2}{2(6.240)^2}} \quad (4.2)$$

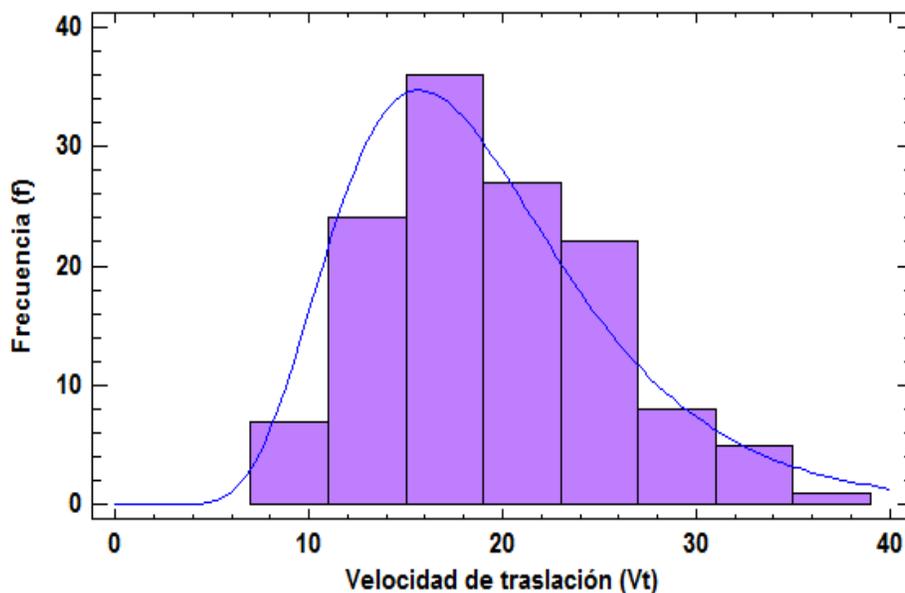


Figura 4.27 Distribución tipo lognormal que describe la velocidad de traslación de ciclones tropicales

Para el ángulo de incidencia se determinó una distribución de probabilidad constante para cada una de las marcas de clase como se describió en el capítulo 3. Las probabilidades para cada marca de clase se presentan en la Tabla 4.3 y en la Figura 4.28 se presenta la distribución uniforme para marca de clase. Para esta variable la media fue 167.67 y la desviación estándar fue 19.688.

Tabla 4.3 Probabilidad para cada marca de clase en el modelo del ángulo de incidencia

Marca de clase	Probabilidad
140°	0.055
150°	0.055
160°	0.130
170°	0.350
180°	0.370
190°	0.040

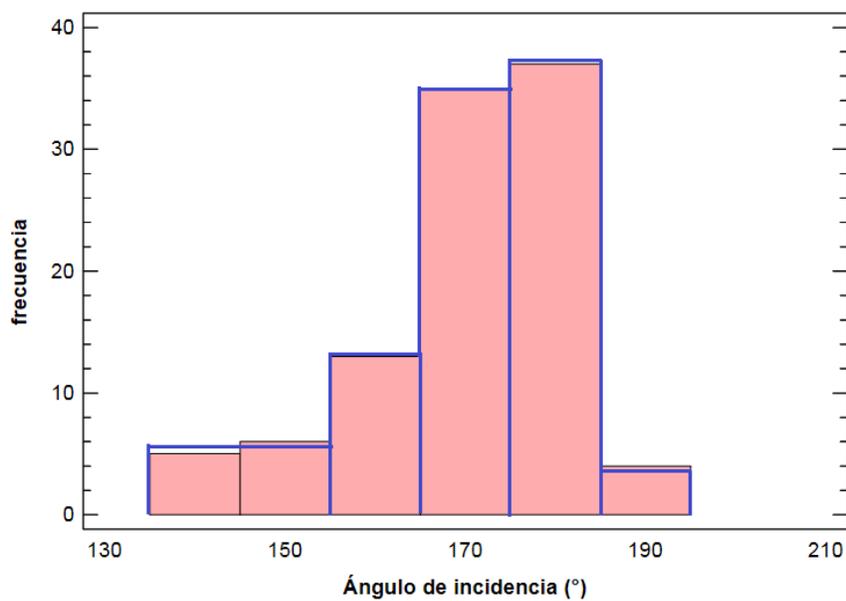


Figura 4.28 Distribución uniforme para cada marca de clase que describe el ángulo de incidencia de ciclones tropicales

Para la latitud se determinó una distribución constante para cada una de las marcas de clase. Las probabilidades para cada marca de clase se presentan en la tabla 4.4 y la tabla 4.5 y las distribuciones se presentan en la Figura 4.29 y Figura 4.30 para las tormentas tropicales y los huracanes, respectivamente. Las correspondientes medias fueron 19.43 y 20.27, respectivamente, y las desviaciones estándar fueron 2.64 y 2.41, respectivamente.

Tabla 4.4 Probabilidad para cada marca de clase en el modelo de la latitud de tormentas tropicales

<b>Marca de clase</b>	<b>Probabilidad</b>
15.5	0.055
16.5	0.127
17.5	0.127
18.5	0.127
19.5	0.127
20.5	0.127
21.5	0.127
22.5	0.127
23.5	0.055

Tabla 4.5 Probabilidad para cada marca de clase en el modelo de la latitud de huracanes

<b>Marca de clase</b>	<b>Probabilidad</b>
15.5	0.032
16.5	0.117
17.5	0.117
18.5	0.117
19.5	0.117
20.5	0.117
21.5	0.117
22.5	0.117
23.5	0.117
24.5	0.032

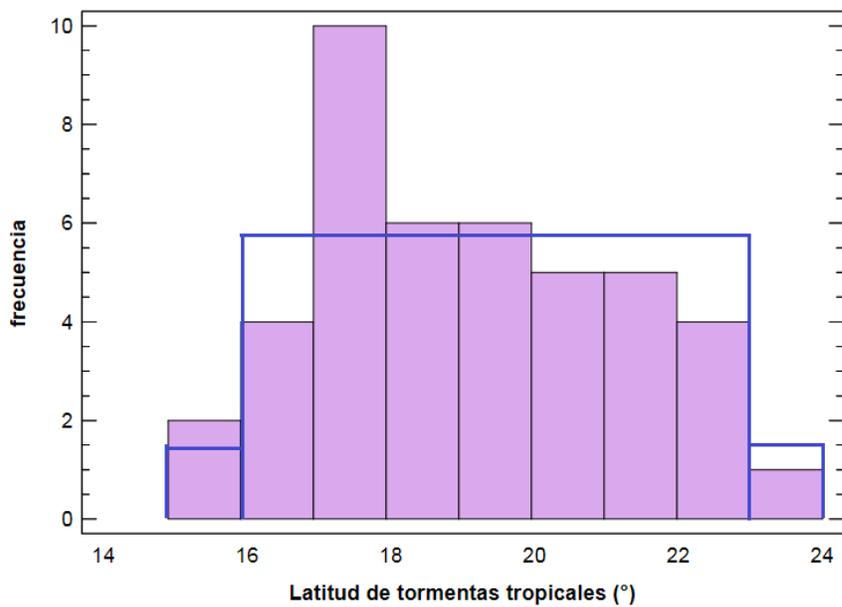


Figura 4.29 Distribución uniforme para la latitud de tormentas tropicales

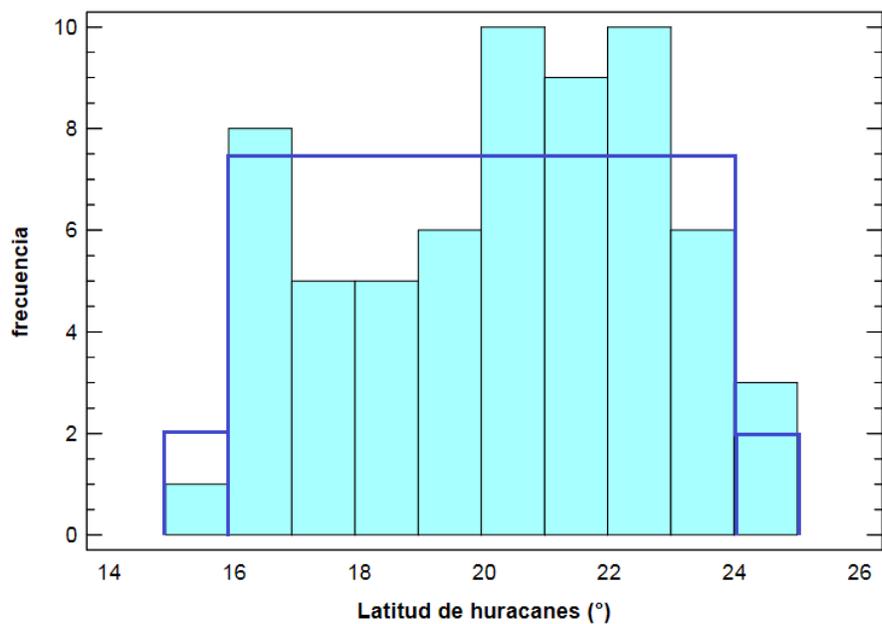


Figura 4.30 Distribución uniforme para la latitud de huracanes

Para el coeficiente constante  $CL1$  se obtuvo un ajuste favorable en el caso de la distribución normal (Ec. 4.3), con una media de 508.725 y una desviación estándar de

188.311. La ecuación 4.3 describe la distribución de la velocidad de traslación y en la Figura 4.31 se presenta dicha distribución.

$$f(x) = \frac{1}{188.311\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-508.725}{188.311}\right)^2} \quad (4.3)$$

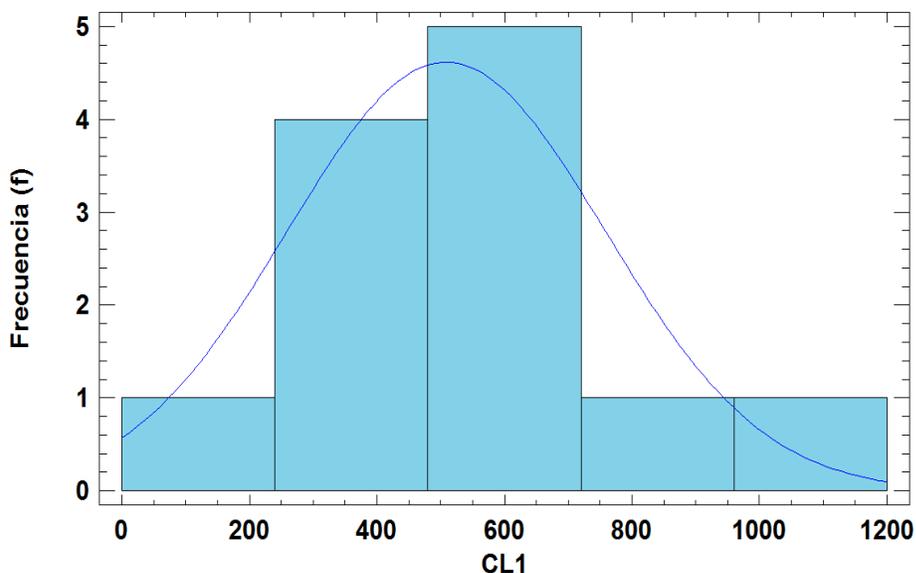


Figura 4.31 Distribución normal para el coeficiente constante  $CL1$  de los ciclones tropicales de trayectoria curva que pasan por la Península de Yucatán

Para el coeficiente constante  $CL2$  se obtuvo un ajuste favorable en el caso de la distribución normal (Ec. 4.4), con una media de 0.0655 y una desviación estándar de 1.72. La ecuación 4.4 describe la distribución de la velocidad de traslación y en la Figura 4.32 se presenta dicha distribución.

$$f(x) = \frac{1}{1.72\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-0.0655}{1.72}\right)^2} \quad (4.4)$$

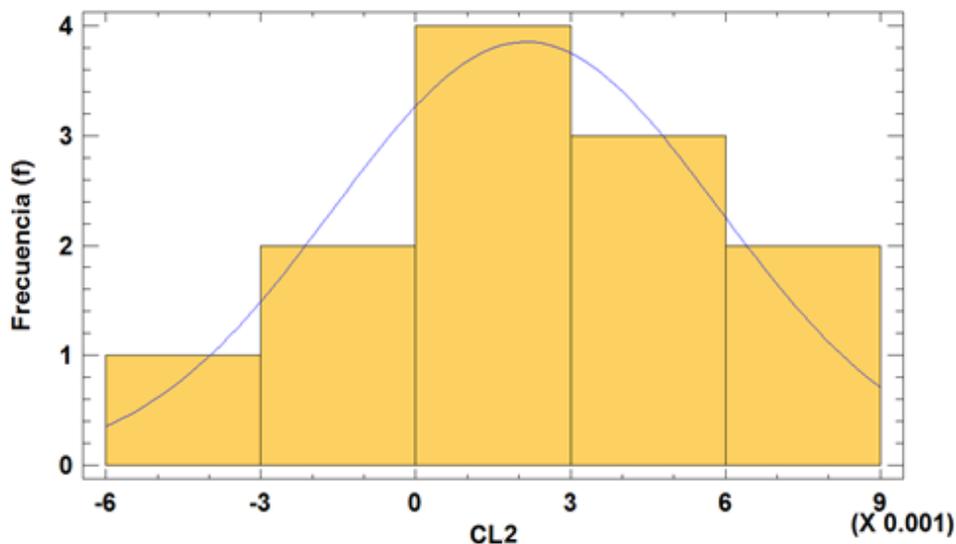


Figura 4.32 Distribución normal para el coeficiente constante  $CL2$  de los ciclones tropicales de trayectoria curva que pasan por la Península de Yucatán

Para el coeficiente constante  $CW1$  se obtuvo un ajuste favorable en el caso de la distribución normal (Ec. 4.5), con una media de 621.75 y una desviación estándar de 79.138. La ecuación 4.5 describe la distribución de la velocidad de traslación y en la Figura 4.33 se presenta dicha distribución.

$$f(x) = \frac{1}{79.138\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-621.75}{79.138}\right)^2} \quad (4.5)$$

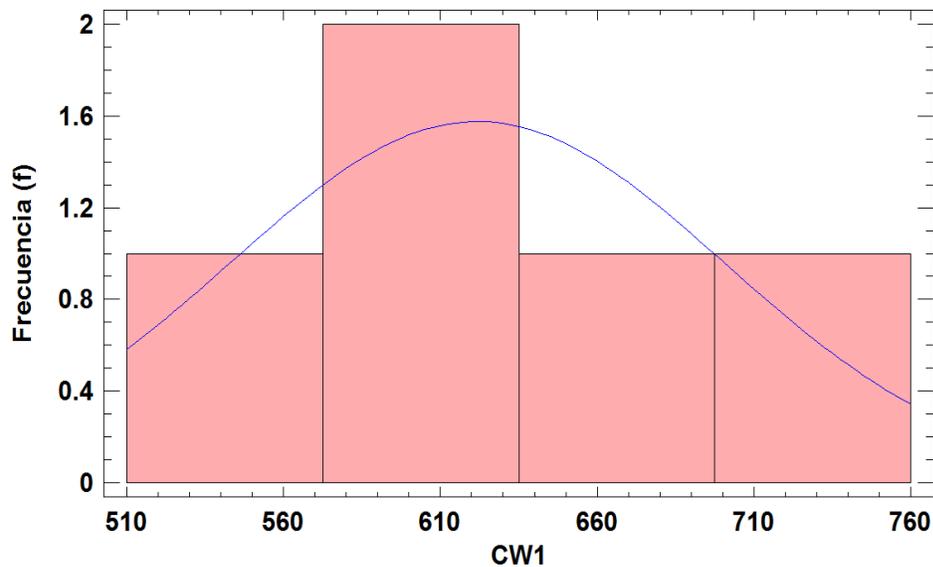


Figura 4.33 Distribución normal para el coeficiente constante  $CW1$  de los ciclones tropicales de trayectoria curva que pasan por el mar Caribe

Para el coeficiente constante  $CW2$  se propuso una distribución uniforme de -6.9 a -0.9 como se presenta en la Figura 4.34. Para esta variable la media fue -3.64 y la desviación estándar fue 2.431.

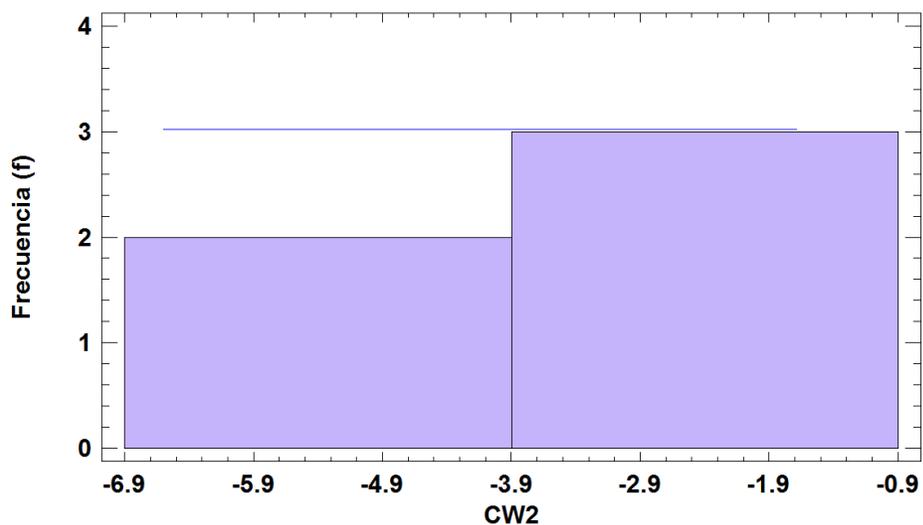


Figura 4.34 Distribución uniforme para el coeficiente constante  $CW2$  de los ciclones tropicales de trayectoria curva que pasan por el mar Caribe

A manera de resumen, en la tabla 4.6 se presenta el tipo de trayectoria, las variables de un ciclón tropical y las distribuciones de probabilidad seleccionadas de acuerdo a las propuestas en la tabla 3.1.

Tabla 4.6. Distribuciones de probabilidad seleccionadas para las variables de los ciclones tropicales

<b>Trayectoria</b>	<b>Variable</b>	<b>Distribución de probabilidad seleccionada</b>
Recta	Velocidad Superficial	Weibull
	Velocidad de traslación	Lognormal
	Latitud	Uniforme
	Ángulo	Uniforme para cada marca de clase
Curva	Velocidad Superficial	Weibull
	Velocidad de traslación	Lognormal
	<i>CL1</i>	Normal
	<i>CL2</i>	Normal
	<i>CL3</i>	En función de <i>CL2</i>
	<i>CW1</i>	Normal
	<i>CW2</i>	Uniforme
	<i>CW3</i>	En función de <i>CW2</i>
Irregular	Longitud	Normal

#### 4.4 Base de datos de ciclones tropicales sintéticos

Se generaron 1418 ciclones tropicales de trayectoria recta por medio del programa de cómputo y se obtuvo una base de datos de ciclones tropicales sintéticos similar a la base de datos histórica del HURDAT.

En la Figura 4.35 se presentan los primeros 100 años de ciclones tropicales sintéticos de trayectoria recta generados por medio de la simulación de Montecarlo y el programa de cómputo.

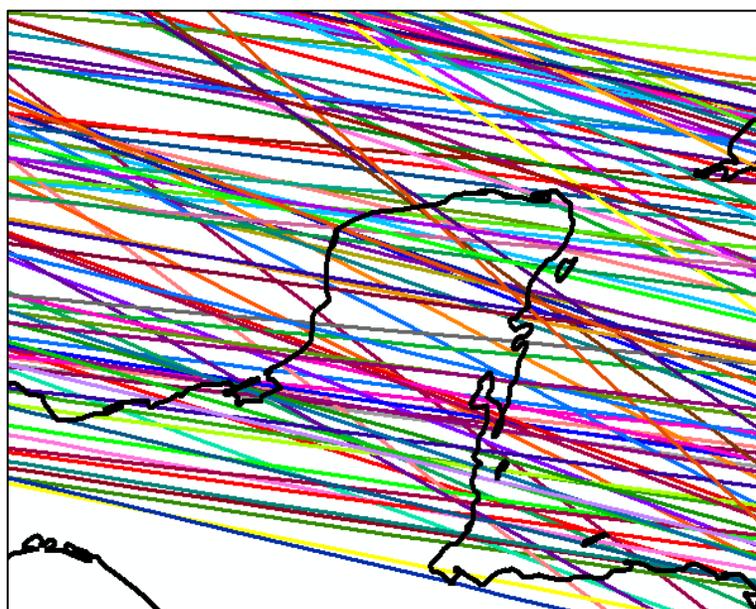


Figura 4.35 Ciclones tropicales sintéticos de trayectoria recta

En la Figura 4.36 se presentan los primeros 100 ciclones tropicales sintéticos de trayectoria curva generados por medio de la simulación de Montecarlo y el programa de cómputo.

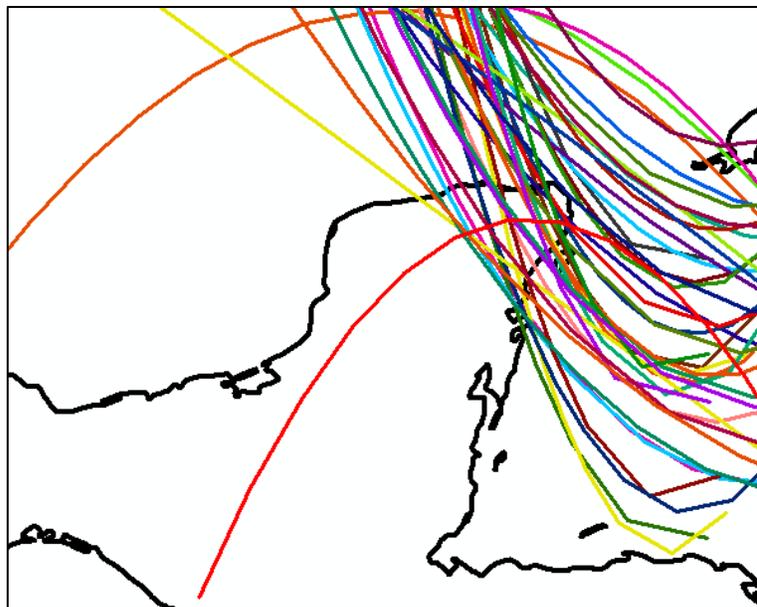


Figura 4.36 Ciclones tropicales sintéticos de trayectoria curva

En la Figura 4.37 se presentan los 12 ciclones tropicales sintéticos de trayectoria irregular generados por medio de la técnica de perturbación de trayectorias.

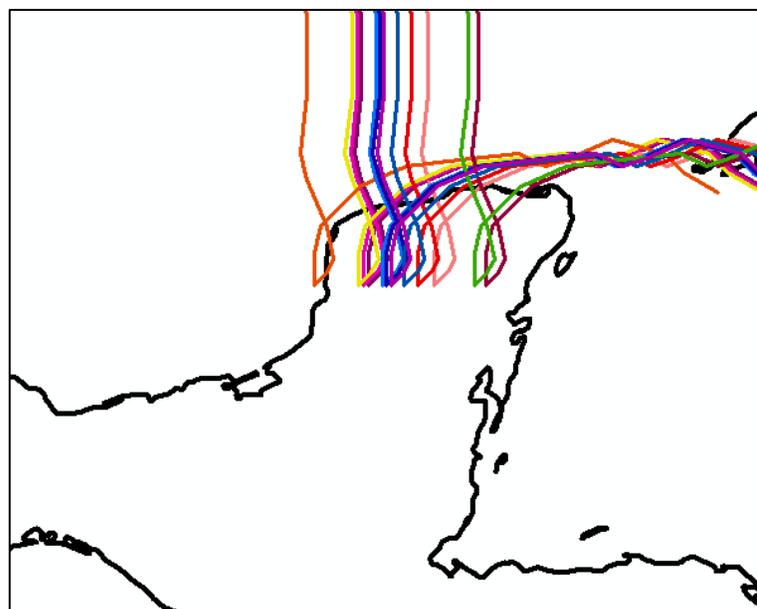


Figura 4.37 Ciclones tropicales sintéticos de trayectoria irregular

## 4.5 Mapas de isotacas

### 4.5.1 Mapas de isotacas de la simulación determinista

De la Figura 4.38 a la Figura 4.41 se presentan los mapas de isotacas obtenidos de la simulación determinista para los periodos de retorno de 50 años, 100 años, 200 años y 500 años, respectivamente. Se consideraron que todos los puntos ubicados dentro de la Península de Yucatán corresponden a una categoría de terreno tipo 2 y que la velocidad superficial de viento tiene un tiempo de promediación de tres segundos. El tipo de ajuste considerado para la simulación determinista es el Tipo I.

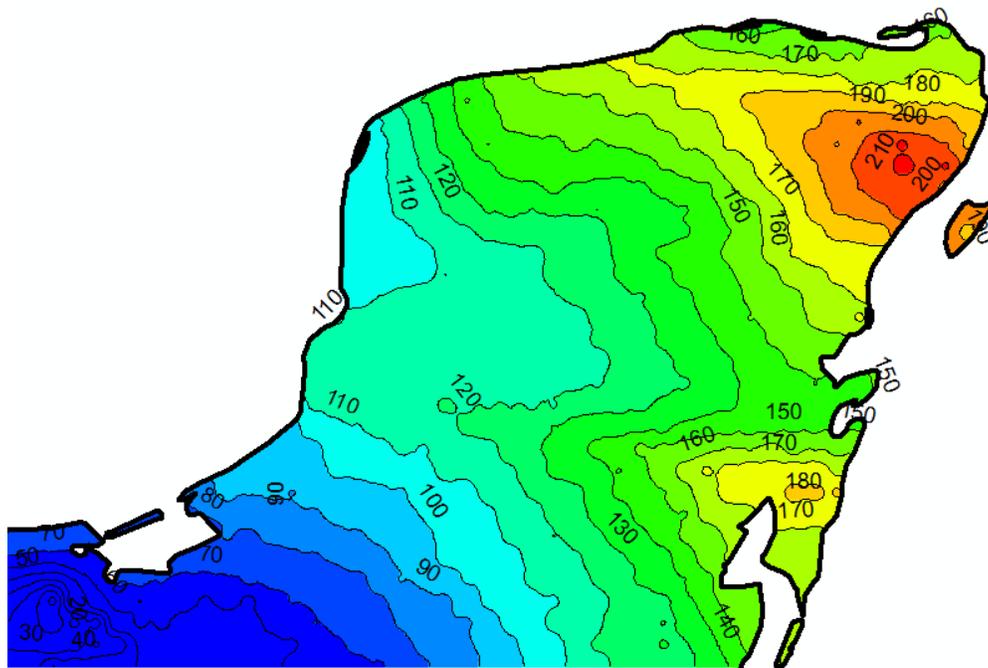


Figura 4.38 Mapa de isotacas de la simulación determinista para un periodo de retorno de 50 años

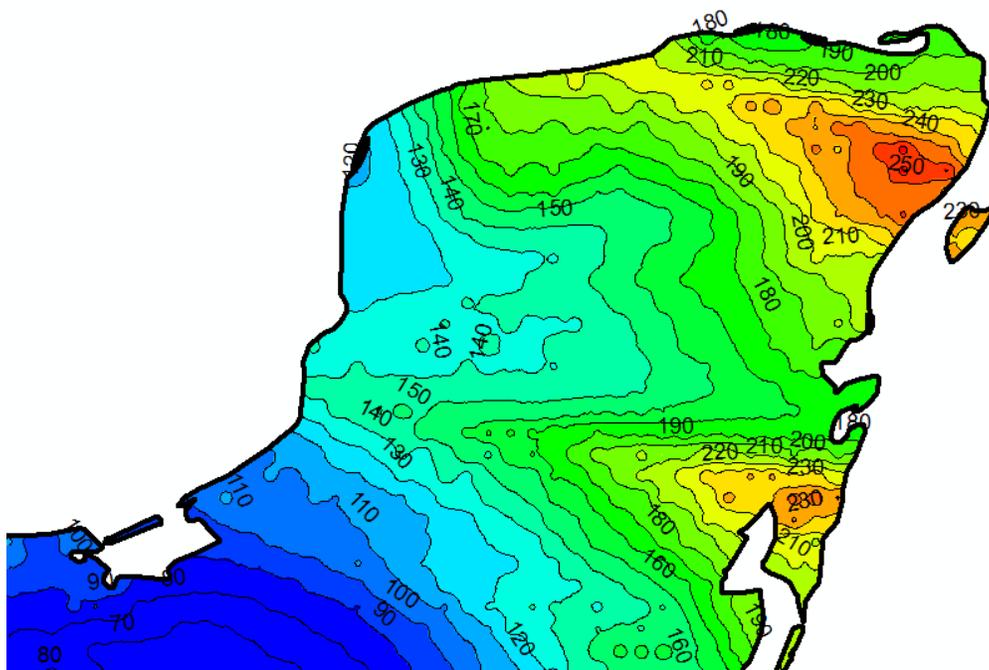


Figura 4.39 Mapa de isotacas de la simulación determinista para un periodo de retorno de 100 años

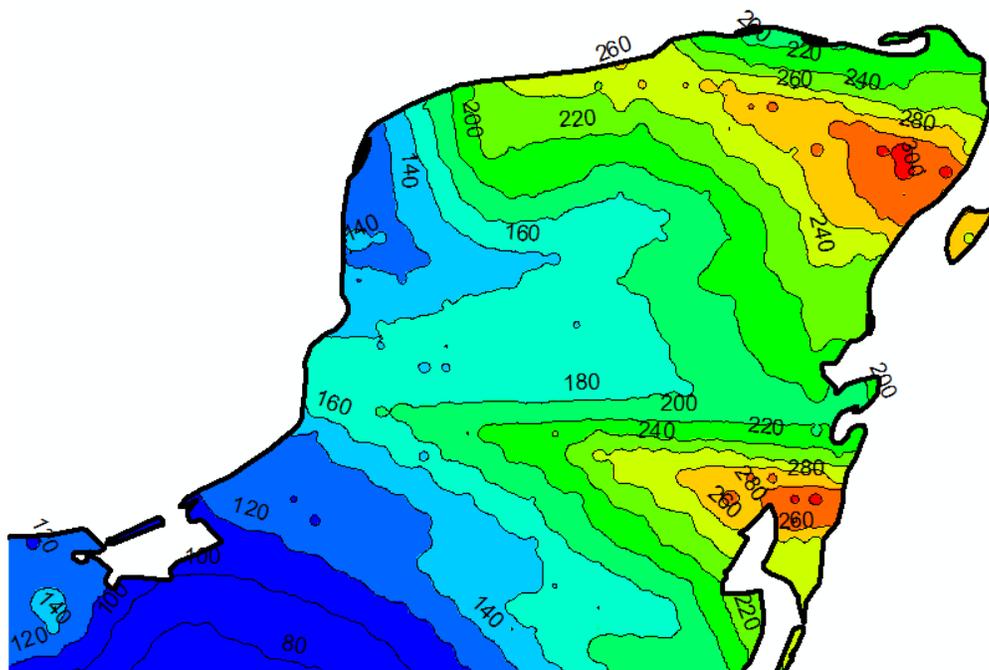


Figura 4.40 Mapa de isotacas de la simulación determinista para un periodo de retorno de 200 años

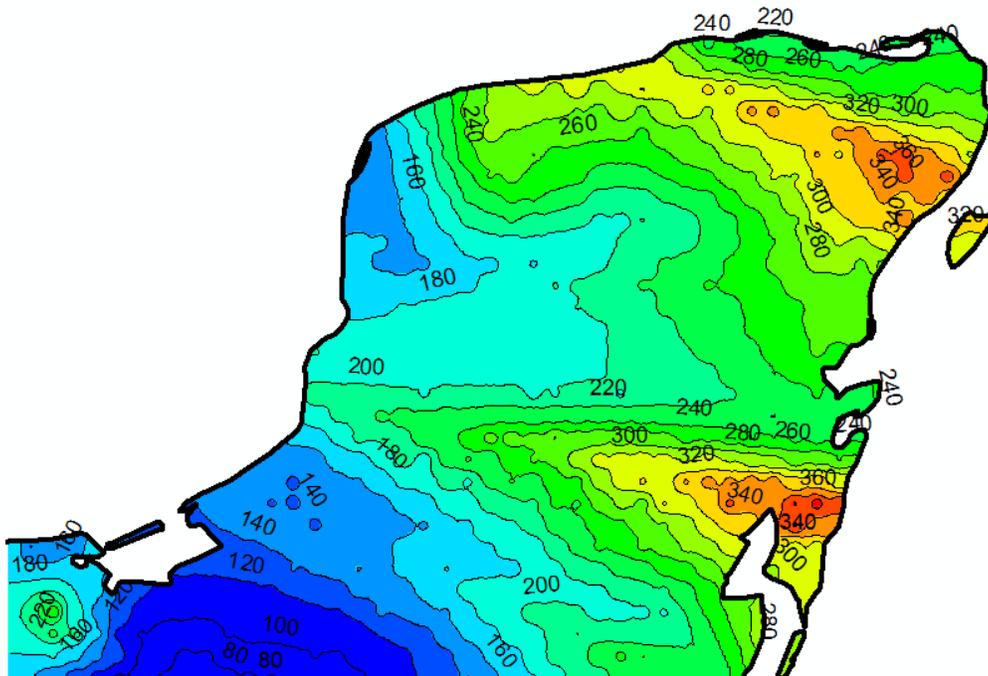


Figura 4.41 Mapa de isotacas de la simulación determinista para un periodo de retorno de 500 años

#### 4.5.2 Mapas de isotacas de la simulación probabilista para el escenario 1

De la Figura 4.42 a la Figura 4.45 se presentan los mapas de isotacas obtenidos de la simulación probabilista para los periodos de retorno de 50 años, 100 años, 200 años y 500 años, respectivamente. Se consideraron que todos los puntos ubicados dentro de la Península de Yucatán corresponden a una categoría de terreno tipo 2 y que la velocidad tiene un tiempo de promediación de tres segundos. Los mapas de isotacas corresponden a una población de 2000 años de ciclones tropicales sintéticos. El tipo de ajuste considerado para la simulación determinista es el Tipo I. El escenario 1 considera velocidades de viento generadas por la simulación de Montecarlo hasta la velocidad máxima observada; esto es, un valor de  $V_s$  de 310 km/hr en la función de probabilidad Weibull utilizada para la velocidad de los ciclones tropicales de trayectoria recta y curva.

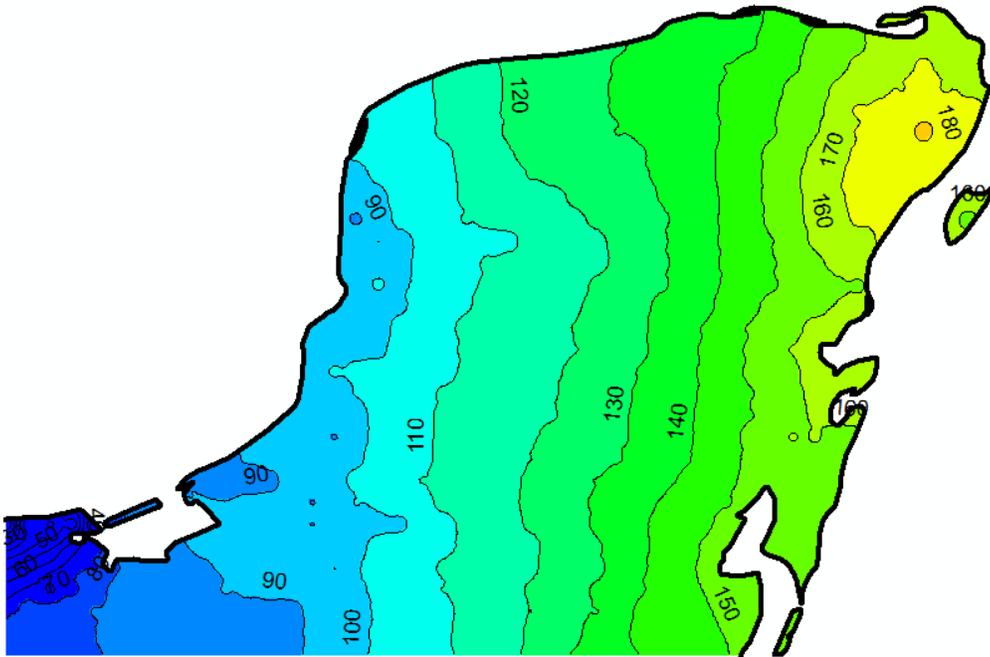


Figura 4.42 Mapa de isotacas de la simulación probabilista para el escenario 1 y un periodo de retorno de 50 años

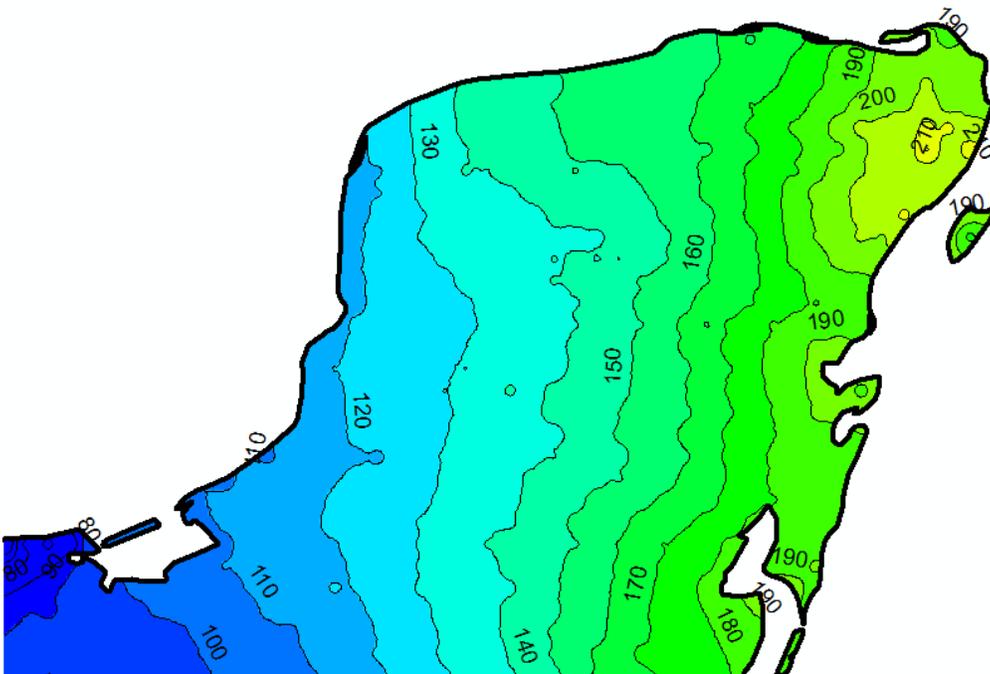


Figura 4.43 Mapa de isotacas de la simulación probabilista para el escenario 1 y un periodo de retorno de 100 años

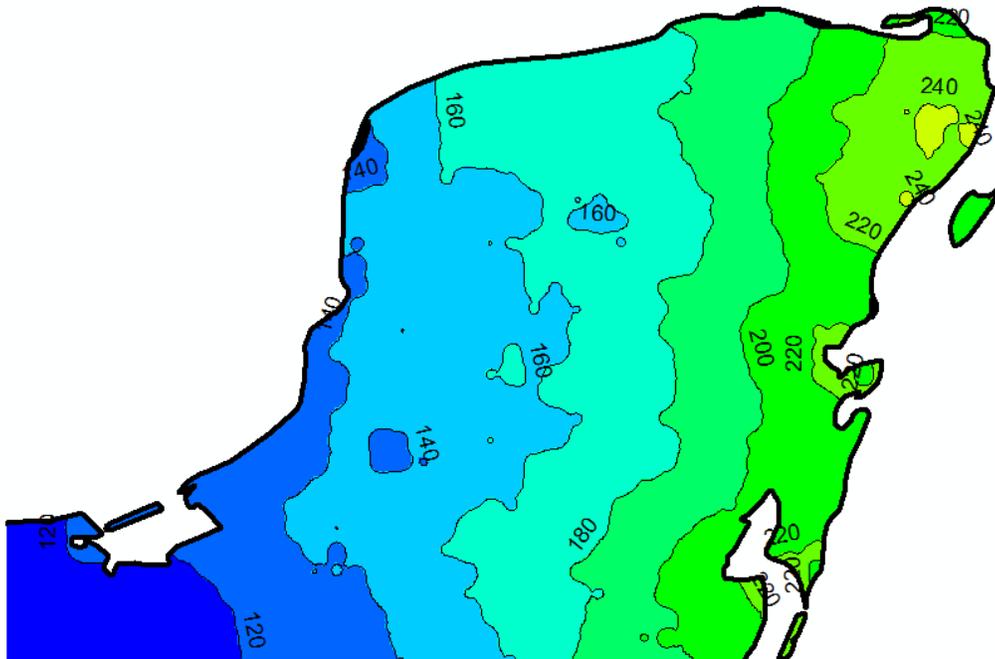


Figura 4.44 Mapa de isotacas de la simulación probabilista para el escenario 1 y un periodo de retorno de 200 años

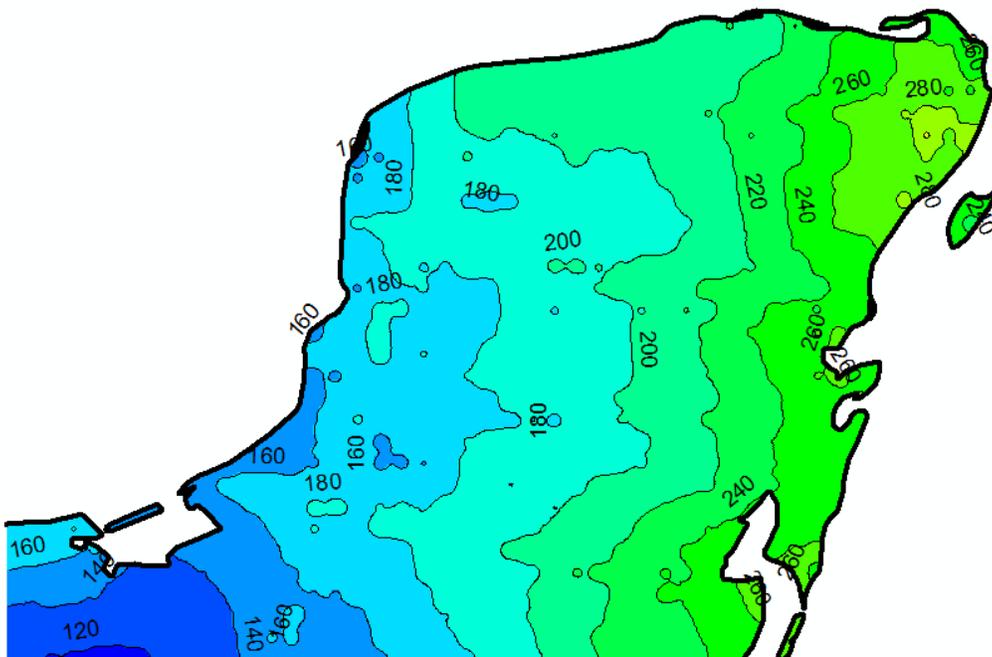


Figura 4.45 Mapa de isotacas de la simulación probabilista para el escenario 1 y un periodo de retorno de 500 años

### 4.5.3 Mapas de isotacas de la simulación probabilista para el escenario 2

De la Figura 4.46 a la Figura 4.49 se presentan los mapas de isotacas obtenidos de la simulación probabilista para los periodos de retorno de 50 años, 100 años, 200 años y 500 años, respectivamente. Se consideraron que todos los puntos ubicados dentro de la Península de Yucatán corresponden a una categoría de terreno tipo 2 y que la velocidad tiene un tiempo de promediación de tres segundos. Los mapas de isotacas corresponden a una población de 2000 años de ciclones tropicales sintéticos. El tipo de ajuste considerado para la simulación determinista es el Tipo I. El escenario 2 considera velocidades de viento generadas por la simulación de Montecarlo hasta un 10% mayor de la velocidad máxima observada; esto es, un valor de  $V_s$  de 336 km/hr en la función de probabilidad Weibull utilizada para la velocidad de los ciclones tropicales de trayectoria recta y curva.

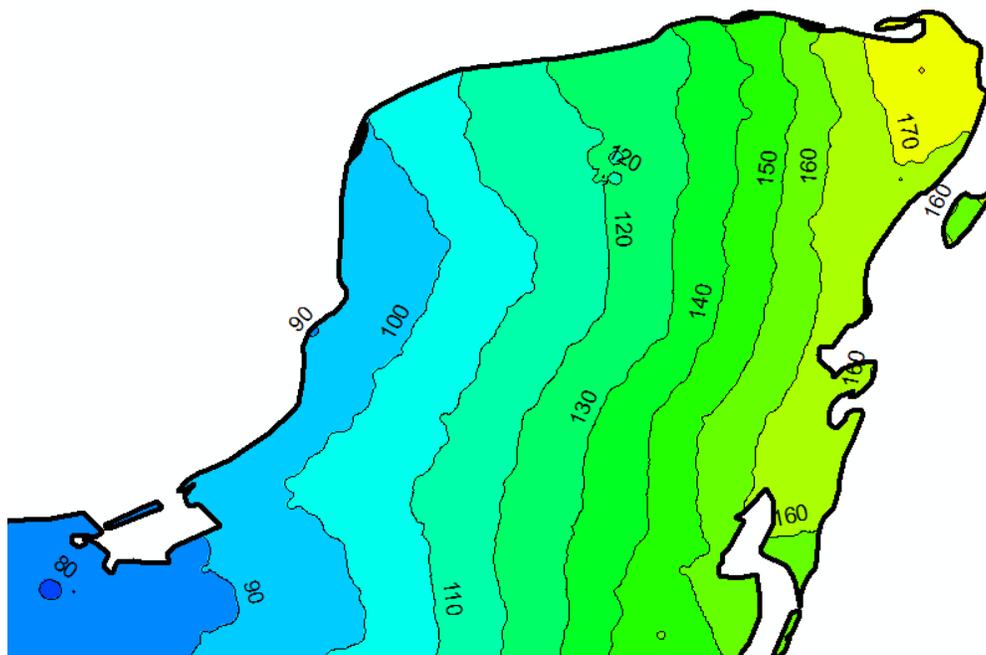


Figura 4.46 Mapa de isotacas de la simulación probabilista para el escenario 2 y un periodo de retorno de 50 años

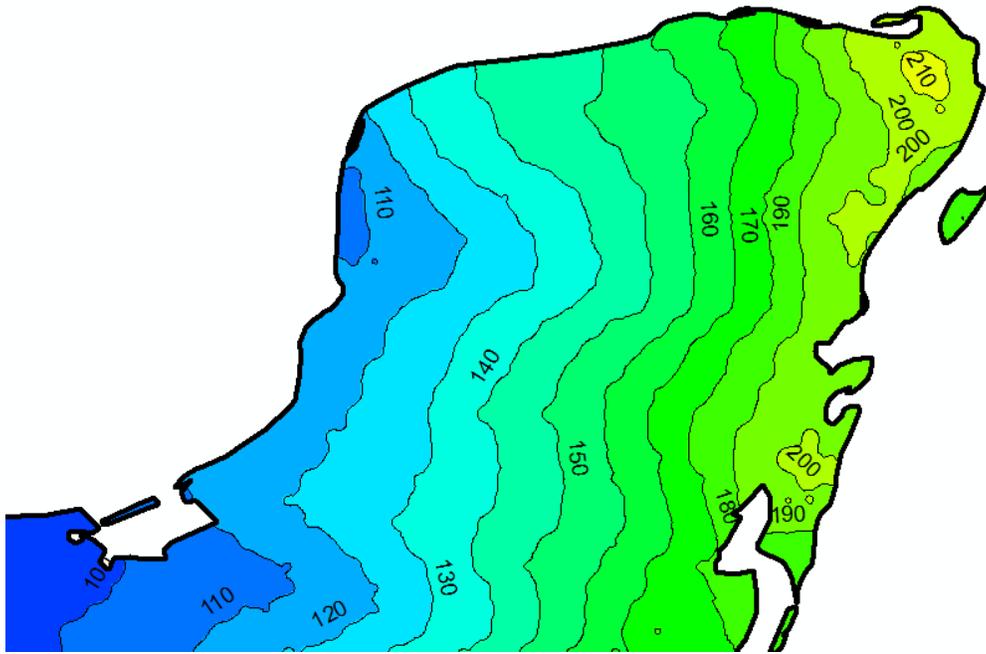


Figura 4.47 Mapa de isotacas de la simulación probabilista para el escenario 2 y un periodo de retorno de 100 años

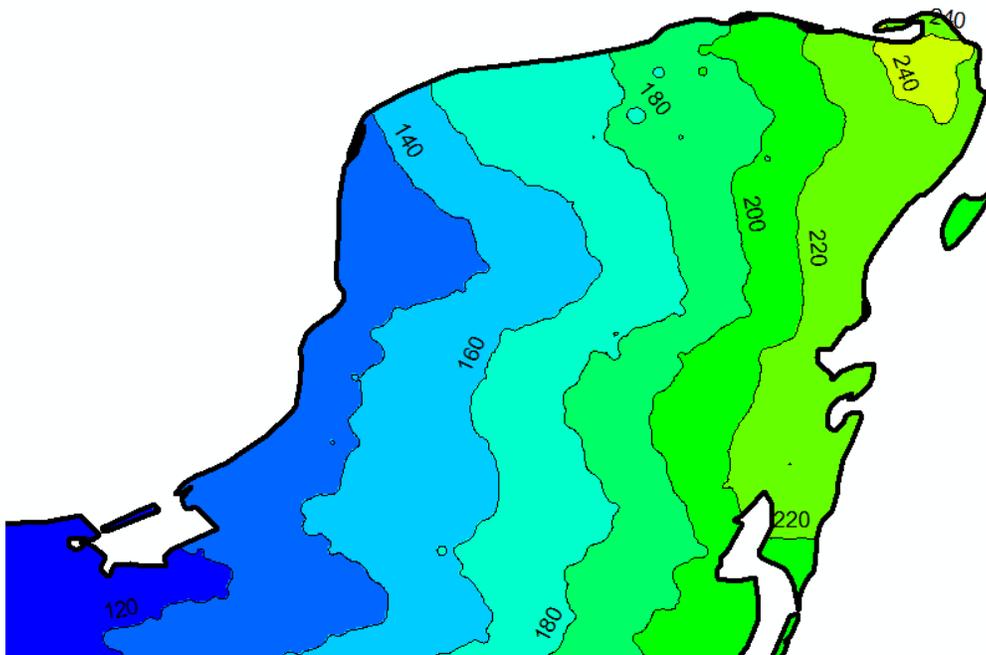


Figura 4.48 Mapa de isotacas de la simulación probabilista para el escenario 2 y un periodo de retorno de 200 años

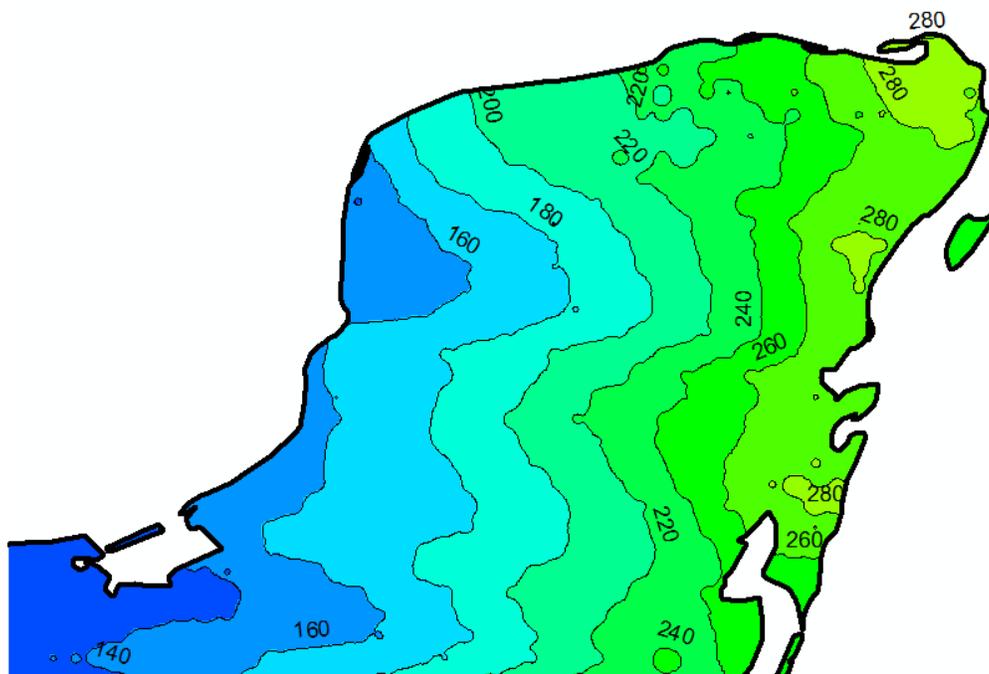


Figura 4.49 Mapa de isotacas de la simulación probabilista para el escenario 2 y un periodo de retorno de 500 años

## CAPÍTULO V

### DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 5.1 Selección de la distribución de probabilidad para las velocidades regionales

En este trabajo de investigación se analizaron distintas distribuciones de probabilidades extremas para determinar las velocidades regionales en la Península de Yucatán. La base de datos de ciclones tropicales del HURDAT proporcionó los datos necesarios para introducir en el programa de cómputo del Modelo del Campo de Velocidades de Vientos Huracanados y calcular las velocidades máximas producidas en distintos sitios de la Península de Yucatán con el paso de los ciclones tropicales. Se calculó un histograma de velocidades máximas para cada sitio de interés y se realizó un ajuste de distribución de probabilidades. Las distribuciones de probabilidad consideradas en este trabajo son las tres distribuciones extremas mencionadas en el marco teórico de este trabajo:

- Distribución extrema tipo I (Forma doble exponencial)
- Distribución extrema tipo II (Forma exponencial)
- Distribución extrema tipo III (Forma exponencial con límite superior)

Se seleccionó la distribución probabilística extrema a emplearse con base en el ajuste de las distribuciones observado en nueve ciudades de la Península de Yucatán. Las ciudades seleccionadas se caracterizan por ser de importancia y por contar con valores de velocidades regionales en el Manual de Diseño de Obras Civiles para el Diseño por Viento (CFE 2008), los cuales se emplearon como referencia. Las ciudades seleccionadas son:

- Campeche
- Cancún
- Chetumal

- Cozumel
- Mérida
- Playa del Carmen
- Progreso
- Valladolid

Para seleccionar la mejor distribución se determinó para cada ciudad la correlación entre la distribución de velocidades máximas en el papel de probabilidad y la recta ajustada por mínimos cuadrados. La mejor correlación es aquella cuyo valor tiende hacia la unidad. En la tabla 5.1 se presentan las correlaciones obtenidas para cada distribución de probabilidad en las distintas ciudades.

Tabla 5.1 Correlaciones calculadas del ajuste probabilístico de distribuciones extremas en las principales ciudades de la Península de Yucatán

<i>Ciudad</i>	<i>TIPO I</i>	<i>TIPO II</i>	<i>TIPO III</i>
	<i>Correlación</i>	<i>Correlación</i>	<i>Correlación</i>
<i>Campeche</i>	0.9881	0.9757	0.9745
<i>Cancún</i>	0.9915	0.9244	0.8089
<i>Chetumal</i>	0.9794	0.8926	0.9763
<i>Cozumel</i>	0.9851	0.9235	0.9575
<i>Mérida</i>	0.9429	0.9195	0.9368
<i>Playa del Carmen</i>	0.9876	0.9529	0.6705
<i>Progreso</i>	0.9788	0.9384	0.9757
<i>Valladolid</i>	0.9760	0.9826	0.7013
<i>Promedio</i>	0.9787	0.9387	0.8752

Con base en los resultados presentados en la Tabla 5.1, la distribución probabilística extrema que mejor ajusta a los datos es la tipo I, ya que presenta en la mayoría de las ciudades la mejor correlación.

## **5.2 Efecto de los ciclones tropicales de trayectoria irregular en la simulación de ciclones tropicales históricos**

En la Figura 5.1 y la Figura 5.2 se presentan los mapas de isotacas de la simulación determinista con trayectorias rectas y curvas, y con todas las trayectorias respectivamente para un periodo de retorno de 50 años. En la Figura 5.3 y la Figura 5.4 se presentan los mapas de isotacas de la simulación determinista con trayectorias rectas y curvas, y con todas las trayectorias respectivamente para un periodo de retorno de 200 años. En el cuadro de dichas figuras se presentan las principales diferencias en las isotacas. El ciclón tropical de trayectoria irregular corresponde a 1 (Isidoro, 2002) de 136 ciclones tropicales y dado que afecta notablemente en las velocidades regionales de viento en la parte norte de la Península de Yucatán, se consideró importante considerarlo en la simulación probabilista.

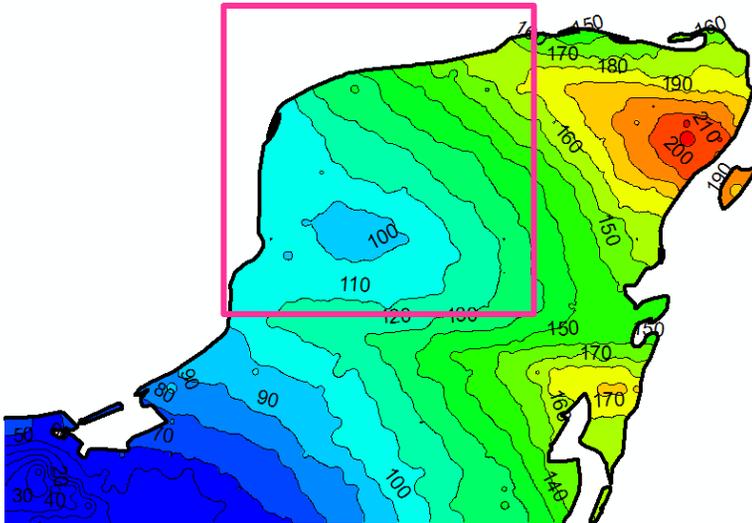


Figura 5.1 Mapa de isotacas determinista de ciclones tropicales de trayectorias rectas y curvas para un periodo de retorno de 50 años

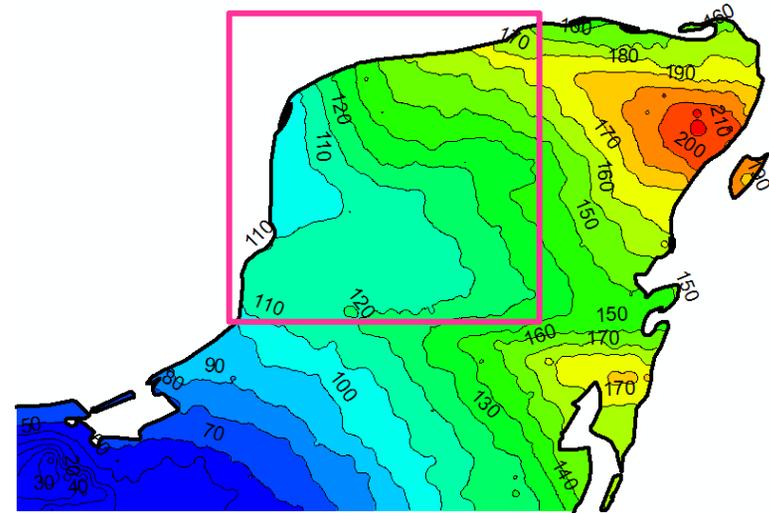


Figura 5.2 Mapa de isotacas determinista de todos los ciclones tropicales para un periodo de retorno de 50 años

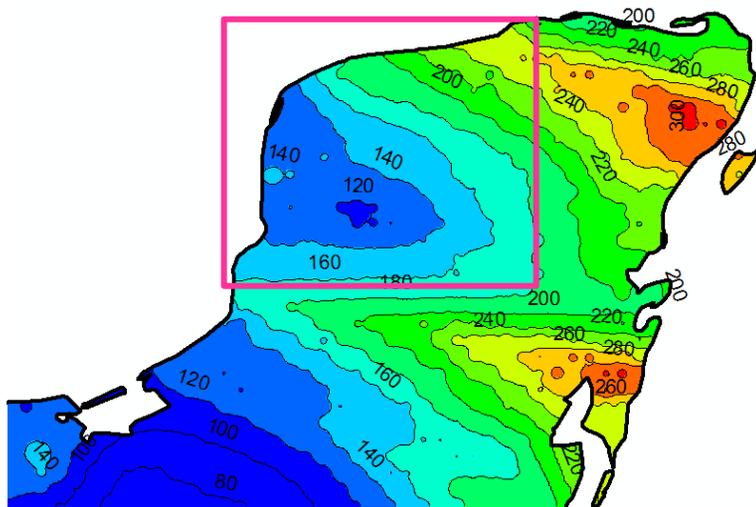


Figura 5.3 Mapa de isotacas determinista de ciclones tropicales de trayectorias rectas y curvas para un periodo de retorno de 200 años

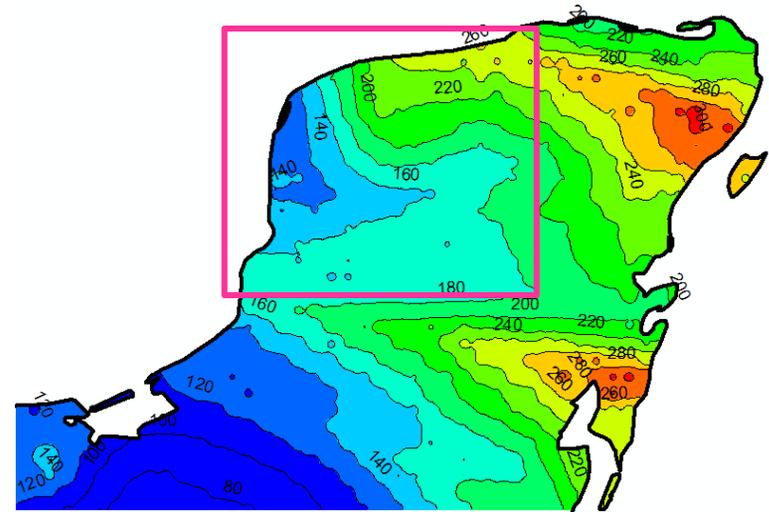


Figura 5.4 Mapa de isotacas determinista de todos los ciclones tropicales para un periodo de retorno de 200 años

### **5.3 Comparación de las velocidades regionales de viento de la simulación probabilista para diferentes bases de datos**

Para verificar que los valores de velocidades regionales obtenidas no son sensibles a la base de datos de ciclones tropicales sintéticos generada, se generó una segunda base de datos de ciclones tropicales sintéticos con las mismas funciones de probabilidad que la primera. Con la segunda base de ciclones tropicales sintéticos se obtuvieron nuevos mapas de isotacas que se compararon con los primeros.

En la Figura 5.5 y la Figura 5.6 se presentan los mapas de isotacas obtenidos de la simulación probabilista para un periodo de retorno de 50 años para la primera base de datos y la segunda base de datos, respectivamente. En la Figura 5.7 y la Figura 5.8 se presentan los mapas de isotacas obtenidos de la simulación probabilista para un periodo de retorno de 200 años para la primera base de datos y la segunda base de datos, respectivamente. La base de datos utilizada para la Figura 5.5 y la Figura 5.7 corresponde a aquella de la que se obtienen resultados correspondientes a la simulación probabilista en esta tesis.

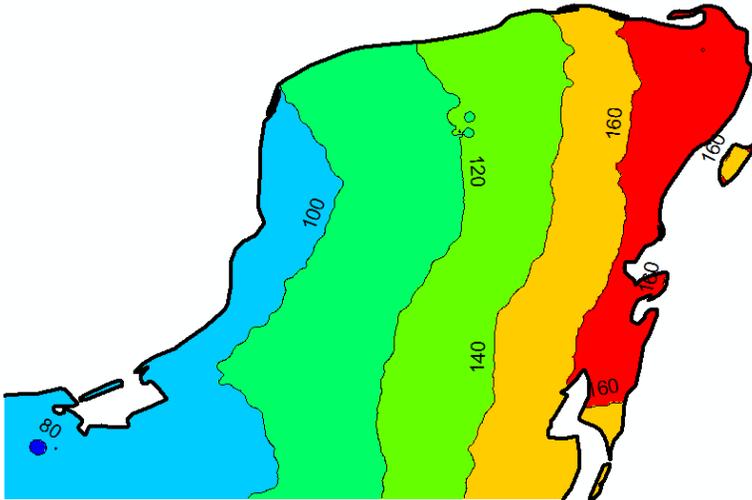


Figura 5.5 Mapa de isotacas de ciclones tropicales sintéticos de la primera base de datos para un periodo de retorno de 50 años

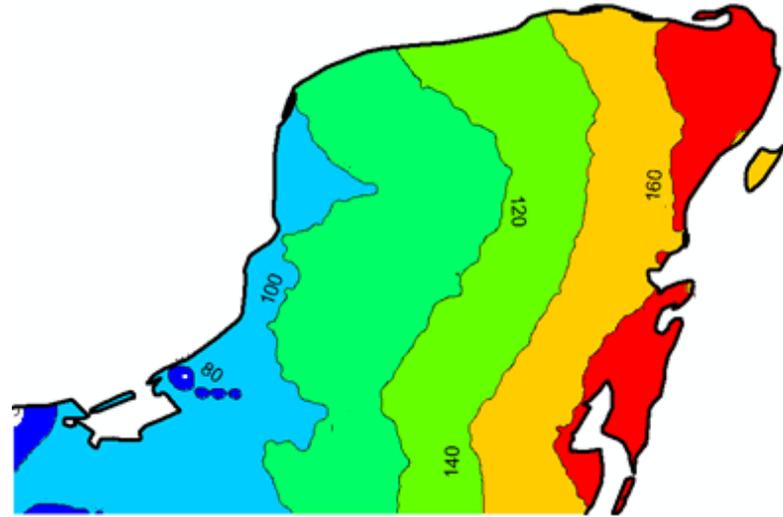


Figura 5.6 Mapa de isotacas de ciclones tropicales sintéticos de la segunda base de datos para un periodo de retorno de 50 años

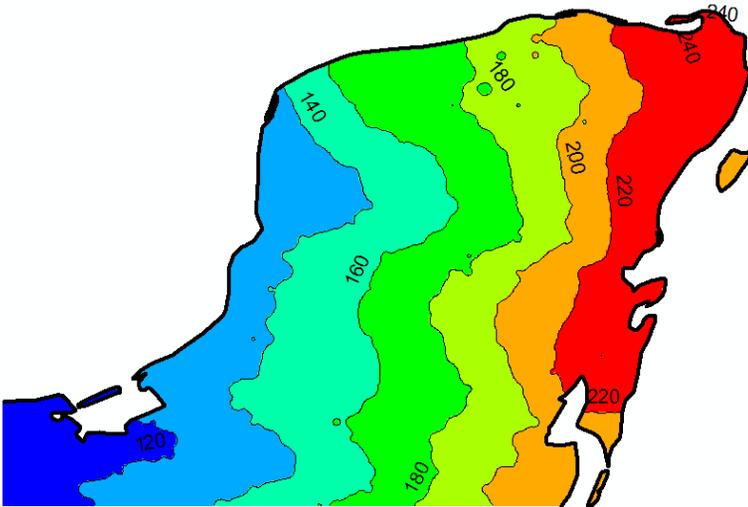


Figura 5.7 Mapa de isotacas de ciclones tropicales sintéticos de la primera base de datos para un periodo de retorno de 200 años

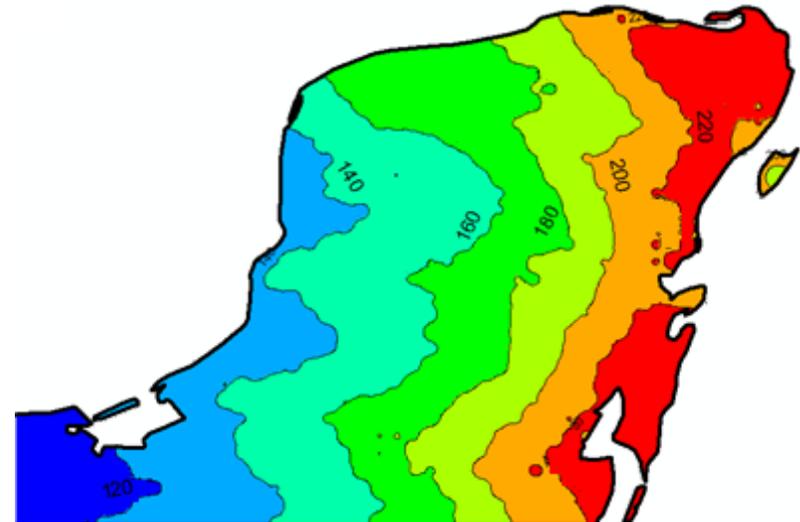


Figura 5.8 Mapa de isotacas de ciclones tropicales sintéticos de la segunda base de datos para un periodo de retorno de 200 años

En las figuras anteriores se observa que a pesar de ser mapas de isotacas generados con diferentes bases de datos, los valores de las velocidades regionales resultan ser similares. Por tanto, las velocidades regionales obtenidas son poco sensibles a las bases de datos a pesar de que están conformadas con diferentes trayectorias de ciclones tropicales sintéticos.

#### **5.4 Comparación de las velocidades regionales de viento del escenario 1 contra las velocidades regionales de viento del escenario 2**

En este trabajo de investigación se consideraron dos posibles escenarios. El escenario 1 es en el cual se consideraron ciclones tropicales sintéticos con una velocidad igual a la máxima registrada en la base de datos (310 km/hr). En el escenario 2 se consideraron ciclones tropicales sintéticos con una velocidad superficial máxima de hasta el 10% mayor a la velocidad observada históricamente (336 km/hr).

En la Figura 5.9 y la Figura 5.11 se presentan los mapas de isotacas de la modelación probabilista para el escenario 1 para periodos de retorno de 50,200 y 50 años, respectivamente. En la Figura 5.10 y la Figura 5.12 se presentan los mapas de isotacas de la modelación probabilista para el escenario 2 para periodos de retorno de 50 y 200 años, respectivamente.

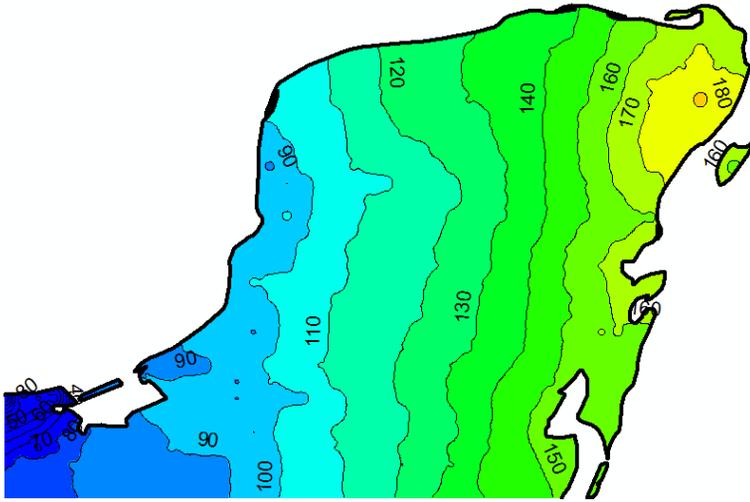


Figura 5.9 Mapa de isotacas probabilista del escenario 1 para un periodo de retorno de 50 años

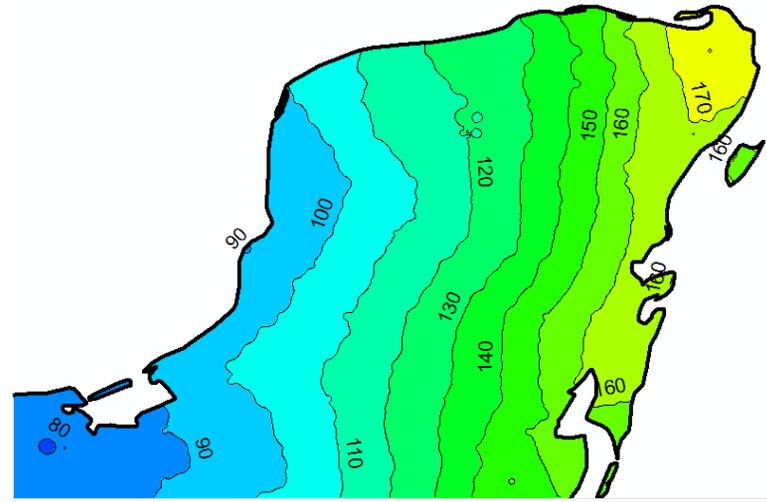


Figura 5.10 Mapa de isotacas probabilista del escenario 2 para un periodo de retorno de 50 años

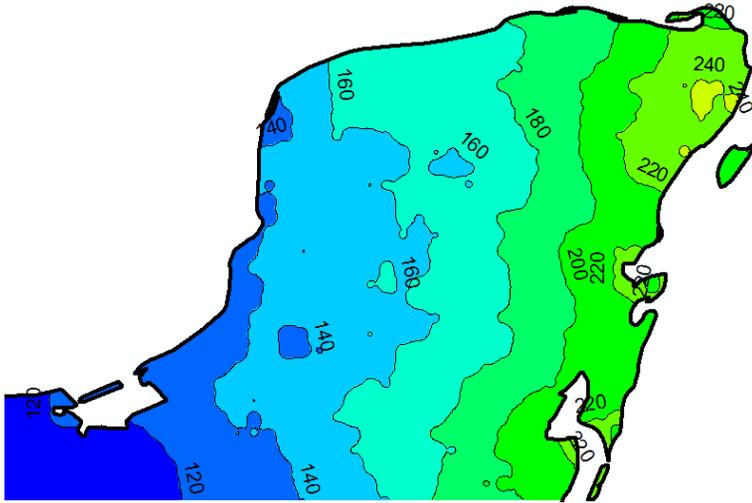


Figura 5.11 Mapa de isotacas probabilista del escenario 1 para un periodo de retorno de 200 años

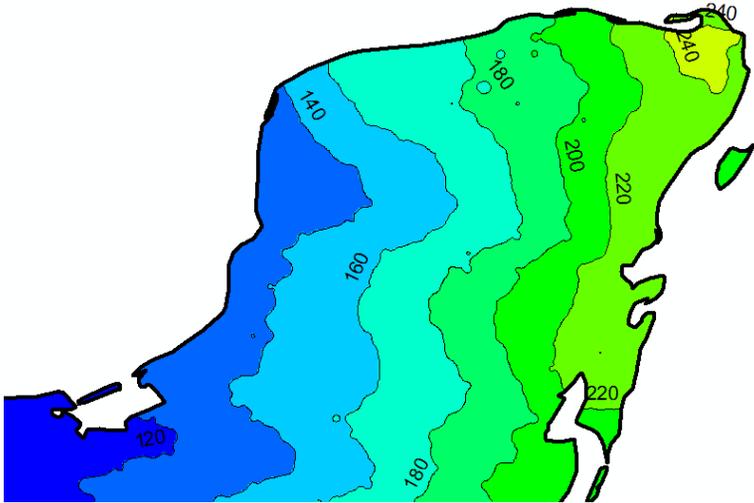


Figura 5.12 Mapa de isotacas probabilista del escenario 2 para un periodo de retorno de 200 años

En la Tabla 5.2 Se presenta una comparación de las velocidades regionales de la simulación probabilista obtenidas para las principales ciudades de la Península de Yucatán para los periodos de retorno de 50 y 200 años, considerando estos dos escenarios.

Tabla 5.2 Velocidades regionales de las principales ciudades de la Península de Yucatán para periodos de retorno de 50 años y 200 años (escenario 1 vs escenario 2)

CIUDAD	V <sub>prob</sub> Escenario 1		V <sub>prob</sub> Escenario 2		Escenario 1/Escenario 2	
	50 años	200 años	50 años	200 años	50 años	200 años
CAMPECHE	98	136	92	134	107%	101%
CANCÚN	167	225	170	232	98%	97%
CHETUMAL	155	214	153	205	102%	104%
COZUMEL	166	218	160	216	104%	101%
MÉRIDA	120	170	113	166	106%	102%
PLAYA DEL CARMEN	175	235	168	236	104%	100%
PROGRESO	116	168	114	166	102%	101%
VALLADOLID	146	194	139	206	105%	94%
PROMEDIO					103%	100%

En promedio, se observa que a pesar de ser velocidades generadas con diferentes bases de datos y diferentes valores máximos de la velocidad superficial, los valores de las velocidades regionales obtenidas resultan ser similares. Para el caso del periodo de retorno de 50 años, las velocidades regionales de viento en la Península de Yucatán son mayores en el escenario 1 con respecto al escenario 2, en promedio, 3%. Para el caso del periodo de retorno de 200 años, las velocidades regionales de viento en la Península de Yucatán son mayores en el escenario 1 con respecto al escenario 2, sin embargo, para las ciudades principales no ocurre un cambio evidente. Debido a lo anterior, en este trabajo de investigación se consideró que las velocidades regionales obtenidas no son sensibles a la velocidad superficial máxima propuesta (observada o 10% mayor a la observada) para periodos de retorno menores a 500 años. Las velocidades regionales obtenidas con el escenario 1 fueron las que se seleccionaron como los resultados de la simulación probabilista.

## 5.5 Comparación de las velocidades regionales de viento de la simulación probabilista contra las velocidades regionales de viento de la simulación determinista

En la Tabla 5.3 y la Tabla 5.4 se presentan las velocidades regionales obtenidas por medio de la simulación probabilista ( $V_{prob}$ ) y a la simulación determinista ( $V_{det}$ ) para diferentes ciudades de la Península de Yucatán para periodos de retorno de 50 años y 200 años, respectivamente.

Tabla 5.3 Velocidades regionales de las principales ciudades de la Península de Yucatán para un periodo de retorno de 50 años (simulación probabilista vs simulación determinista)

CIUDAD	Velocidad regional de viento de la simulación probabilista	Velocidad regional de viento de la simulación determinista	$V_{det}/V_{prob}$
	$V_{prob}$ (km/hr)	$V_{det}$ (km/hr)	
CAMPECHE	98	111	113%
CANCÚN	167	176	105%
CHETUMAL	155	159	103%
COZUMEL	166	195	117%
MÉRIDA	120	149	124%
PLAYA DEL CARMEN	175	203	116%
PROGRESO	116	151	130%
VALLADOLID	146	161	110%
PROMEDIO:			115%

En la Tabla 5.3 se observa que las velocidades obtenidas por medio de la simulación probabilista son, en general, menores a los valores obtenidos por medio de la simulación determinista. En sitios como Mérida y Progreso, los valores de las velocidades regionales de viento obtenidas por medio de la simulación probabilista resultaron ser hasta 30% menores con respecto a los valores obtenidos para la simulación determinista. En sitios como Cancún y Chetumal, los valores de las velocidades regionales de viento obtenidas por medio de la simulación probabilista resultaron ser hasta un 5% menores con respecto a los valores obtenidos para la simulación determinista.

Tabla 5.4 Velocidades regionales de las principales ciudades de la Península de Yucatán para un periodo de retorno de 200 años (simulación probabilista vs simulación determinista)

CIUDAD	Velocidad regional de viento de la simulación probabilista	Velocidad regional de viento de la simulación determinista	$V_{det}/V_{prob}$
	$V_{prob}$ (km/hr)	$V_{det}$ (km/hr)	
CAMPECHE	136	161	118%
CANCÚN	225	234	104%
CHETUMAL	214	234	109%
COZUMEL	218	276	127%
MÉRIDA	170	231	136%
PLAYA DEL CARMEN	235	287	122%
PROGRESO	168	229	136%
VALLADOLID	194	220	113%
PROMEDIO:			121%

En la Tabla 5.4 se observa que, en general, las velocidades regionales de viento obtenidas por medio de la simulación probabilista resultan ser menores a las obtenidas por medio de la simulación determinista. En sitios como Mérida y Progreso, los valores de las velocidades regionales de viento obtenidas por medio de la simulación probabilista resultó ser 36% menores con respecto a los valores obtenidos para la simulación determinista. En sitios como Cancún y Chetumal, los valores de las velocidades regionales de viento obtenidas por medio de la simulación probabilista resultaron 4% y 9% menores con respecto a los valores obtenidos para la simulación determinista, respectivamente. Estos análisis se discuten de mejor manera empleando el papel de probabilidad en el Apéndice C para algunas de las ciudades principales de la Península de Yucatán.

En la Figura 5.13 y 5.14 se grafica la relación, en porcentaje, entre las velocidades regionales obtenidas por medio de la simulación probabilista y la simulación determinista. En estas gráficas se señalan las trayectorias de los últimos huracanes importantes (Gilberto 1988, Isidoro 2002, Emily 2005, Wilma 2005 y Dean 2007). Se observa que en las zonas donde pasaron estos eventos las velocidades regionales

obtenidas de la simulación probabilista son menores a los obtenidos de la simulación determinista, mientras que en las zonas que no han pasado los eventos importantes pasa lo contrario. Asimismo, se observa que las ciudades importantes de la Península de Yucatán han sido afectadas por eventos meteóricos importantes.

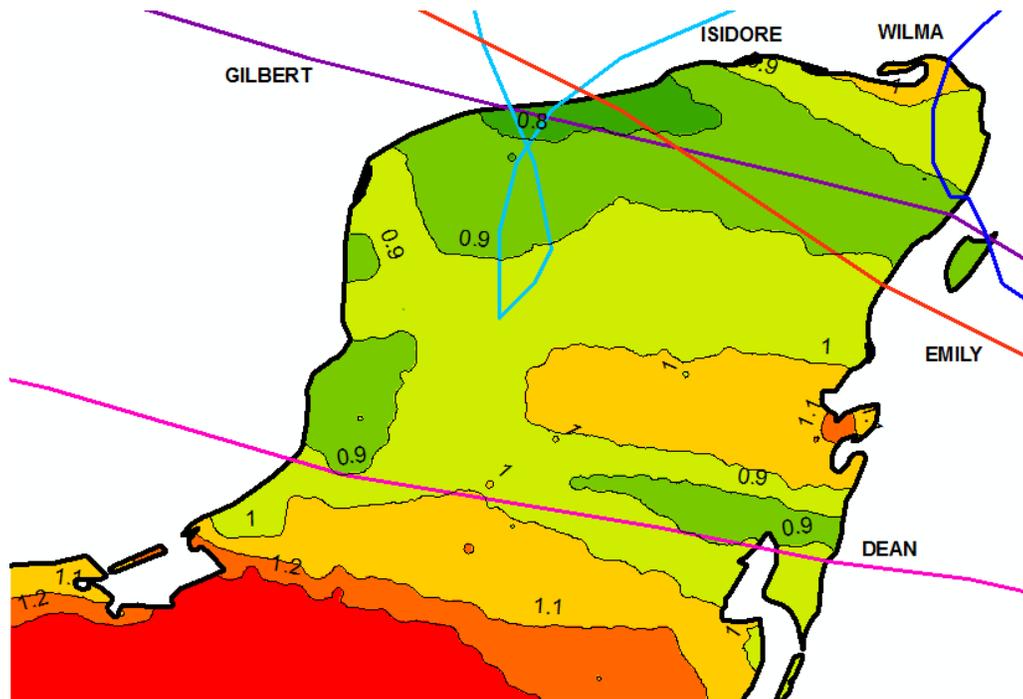


Figura 5.13 Relaciones en porcentaje de la simulación probabilista con respecto a la simulación determinista y ciclones tropicales más fuertes que han afectado la Península de Yucatán para un periodo de retorno de 50 años

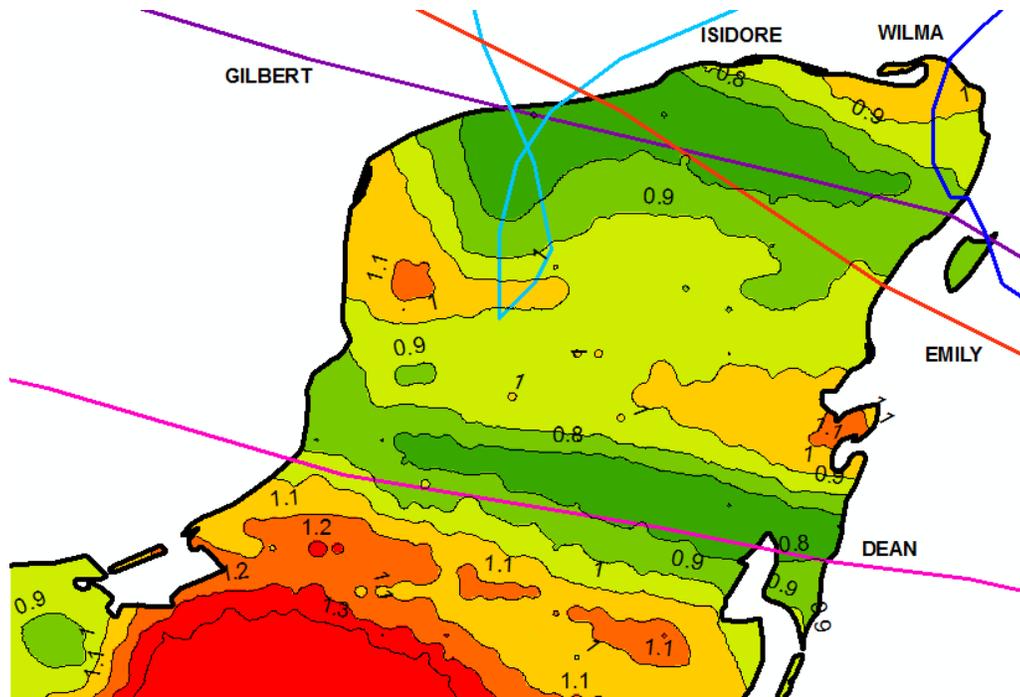


Figura 5.14 Relaciones en porcentaje de la simulación probabilista con respecto a la simulación determinista y ciclones tropicales más fuertes que han afectado la Península de Yucatán para un periodo de retorno de 200 años

En la Figura 5.15 se presentan en color naranja las trayectorias de los huracanes históricos de la simulación determinista con las velocidades superficiales máximas registradas que han afectado de manera directa a la Península de Yucatán, mientras que se presentan en color verde las trayectorias generadas para los huracanes sintéticos con velocidades superficiales mayores a 280 km/hr. Se observa que los huracanes históricos únicamente han afectado zonas particulares de la Península de Yucatán, que es donde se generan los picos de velocidades máximas en los mapas de isotacas deterministas. Sin embargo, en el caso de los huracanes sintéticos, éstos tienen trayectorias en todas las latitudes que pudieran afectar la Península de Yucatán, por lo que no existen zonas de concentraciones de velocidades máximas en los mapas de isotacas probabilistas. Las principales diferencias en las velocidades superficiales probabilistas y deterministas en la Tabla 5.3 y la Tabla 5.4 se deben a lo anterior.

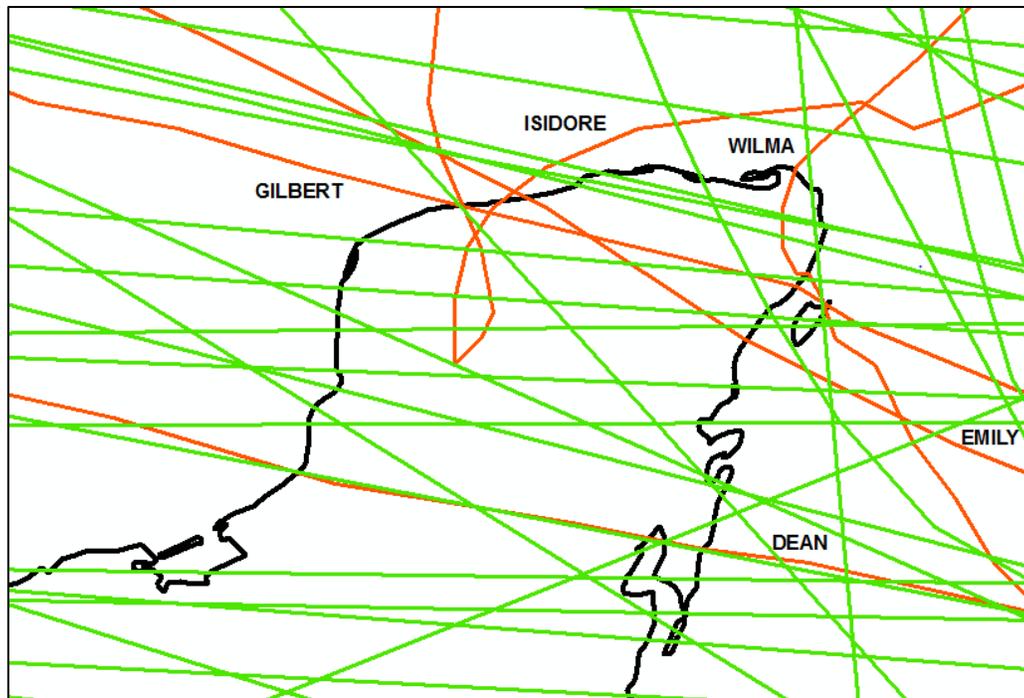


Figura 5.15 Huracanes históricos con velocidades superficiales máximas registradas de la simulación determinista (naranja) vs huracanes sintéticos de velocidades superficiales mayores a 280 km/hr de la simulación probabilista (verde).

## 5.6 Comparación entre las velocidades regionales de viento de la CFE, las velocidades regionales obtenidas de la simulación determinista y las velocidades regionales obtenidas de la simulación probabilista

La finalidad de este trabajo de investigación es la determinación de velocidades regionales para el diseño estructural, por lo que es necesaria la comparación de los resultados obtenidos con los valores propuestos por normatividades vigentes en la actualidad para dicho diseño. Los diseños estructurales en la ciudad de Mérida deben satisfacer los requisitos del Reglamento de Construcciones del Municipio de Mérida. Dicho reglamento permite el uso de especificaciones elaboradas por otras instituciones, tales como el Instituto de Investigaciones Eléctricas de la Comisión Federal de Electricidad. Este Instituto elaboró el Manual de Diseño de Obras Civiles para el Diseño por Viento (CFE, 2008) para el cálculo de las acciones eólicas. En este

manual se encuentran velocidades regionales para distintas ciudades de la República Mexicana. Por lo tanto, se realizó una comparación entre las velocidades regionales propuestas en el Manual de Diseño de Obras Civiles para el Diseño por Viento (CFE, 2008) con las velocidades regionales obtenidas de la simulación determinista y probabilista para las principales ciudades de la Península de Yucatán.

Para la realización de este análisis comparativo se observó que para la elaboración de dicho manual se contaba con datos hasta el año 2005. Sin embargo, en la simulación determinista, la base de datos de los ciclones tropicales históricos se consideró hasta el año 2015. Este es un aspecto interesante, ya que en los últimos años no se han presentado huracanes de velocidades superficiales importantes en la región. Si no se presentan huracanes, las velocidades regionales disminuyen.

En la Tabla 5.5 y la Tabla 5.6 se presentan las velocidades regionales especificadas en el Manual de Diseño de Obras Civiles para el Diseño por Viento de la CFE ( $V_{CFE}$ ), las obtenidas de la simulación determinista ( $V_{det}$ ) y las obtenidas de la simulación probabilista ( $V_{prob}$ ) para diferentes ciudades de la Península de Yucatán para periodos de retorno de 50 años y 200 años respectivamente. En dichas tablas se presenta la relación entre las velocidades obtenidas por el Manual de Diseño de Obras Civiles para el Diseño por Viento de la CFE con respecto a la velocidad regional obtenida de la simulación determinista y a la velocidad regional obtenida de la simulación probabilista, así como el promedio de dicha relación.

Tabla 5.5 Comparativa de velocidades regionales de las principales ciudades de la Península de Yucatán para un periodo de retorno de 50 años (CFE 2008, obtenida de la simulación determinista y obtenida de la simulación probabilista)

CIUDAD	Velocidad regional de viento del manual de diseño por viento CFE (2008)	Velocidad regional de viento de la simulación determinista		Velocidad regional de viento de la simulación probabilista	
	$V_{cfe}$ (km/hr)	$V_{det}$ (km/hr)	$V_{det}/V_{vcfe}$	$V_{prob}$ (km/hr)	$V_{prob}/V_{vcfe}$
CAMPECHE	117	111	95%	98	84%
CANCÚN	179	176	98%	167	93%
CHETUMAL	170	159	94%	155	91%
COZUMEL	210	195	93%	166	79%
MÉRIDA	154	149	97%	120	78%
PLAYA DEL CARMEN	204	203	100%	175	86%
PROGRESO	170	151	89%	116	68%
VALLADOLID	171	161	94%	146	85%
PROMEDIO:			95%		83%

Tabla 5.6 Comparativa de velocidades regionales de las principales ciudades de la Península de Yucatán para un periodo de retorno de 200 años (CFE 2008, obtenida de la simulación determinista y obtenida de la simulación probabilista)

CIUDAD	Velocidad regional de viento del manual de diseño por viento CFE (2008)	Velocidad regional de viento de la simulación determinista		Velocidad regional de viento de la simulación probabilista	
	$V_{cfe}$ (km/hr)	$V_{det}$ (km/hr)	$V_{det}/V_{cfe}$	$V_{prob}$ (km/hr)	$V_{prob}/V_{cfe}$
CAMPECHE	160	161	101%	136	85%
CANCÚN	243	234	96%	225	93%
CHETUMAL	189	234	124%	214	113%
COZUMEL	250	276	110%	218	87%
MÉRIDA	213	231	108%	170	80%
PLAYA DEL CARMEN	236	287	122%	235	100%
PROGRESO	220	229	104%	168	76%
VALLADOLID	195	220	113%	194	99%
PROMEDIO:			110%		92%

Con base en los resultados presentados de la Tabla 5.5 y la Tabla 5.6 se concluyó que las velocidades regionales que se obtienen mediante la simulación determinista con respecto a las propuestas por el Manual de Diseño de Obras Civiles Diseño por Viento (CFE 2008) son menores en un 5% en promedio para un periodo de retorno de 50 años y mayores en un 10% en promedio para un periodo de retorno de 200 años. Asimismo, se concluyó que las velocidades regionales obtenidas mediante la simulación probabilista en esta tesis con respecto a las propuestas por el Manual de Diseño de Obras Civiles Diseño por Viento (CFE 2008) son menores en un 17% y en un 8% en promedio para periodos de retorno de 50 y 200 años, respectivamente. Las diferencias entre las velocidades obtenidas por medio de la simulación determinista y las velocidades obtenidas por medio de la simulación probabilista con respecto a las del Manual de Diseño de Obras Civiles por Viento (CFE 2008) se atribuyen principalmente al tipo de ajuste de distribuciones probabilísticas extremas empleado, el tamaño de la población analizada es de un diferente periodo de tiempo, en el cual no se han presentado ciclones tropicales con velocidades extremas que hayan afectado a la Península de Yucatán, y a que en dicho manual se considera una aproximación determinista.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación se determinaron las velocidades regionales de viento para el diseño estructural en la Península de Yucatán empleando un modelo probabilista para generar ciclones tropicales sintéticos y un modelo determinista que considere los ciclones tropicales históricos. Se realizó una clasificación de los ciclones tropicales, así como el análisis estadístico y el ajuste de distribuciones de probabilidad de las principales variables de los ciclones tropicales. Se desarrolló un modelo para la generación de ciclones tropicales sintéticos. Se utilizó un Modelo del Campo de Velocidades de Viento Huracanado para la simulación de ciclones tropicales históricos y sintéticos. Los ciclones tropicales sintéticos se generaron por medio de una simulación de Monte Carlo, considerando los tres tipos de trayectoria. Con base en los resultados de la investigación se formulan las siguientes conclusiones:

1. Se observaron tres tipos de trayectorias en los ciclones tropicales históricos: rectas, curvas e irregulares. Los ciclones tropicales se presentaron en la Península de Yucatán en porcentajes de 79.3%, 12.4% y 8.3%, para las trayectorias rectas, curvas e irregulares, respectivamente. Sin embargo, para la modelación probabilista se realizó la idealización de dichas trayectorias, considerando su trayectoria sobre tierra en la península, obteniéndose que los porcentajes corresponden al 86%, 13.2% y 0.8%, respectivamente. La trayectoria irregular corresponde a 1 de 136 ciclones tropicales idealizados (Huracán Isidoro) y dado que afecta notablemente en las velocidades regionales de viento en la parte norte de la Península de Yucatán, fue necesario considerarlo en la simulación probabilista.
2. La velocidad superficial y la velocidad de traslación de los ciclones tropicales presentan un buen ajuste con una distribución de probabilidad tipo Weibull y tipo lognormal, respectivamente. Se utilizó una sola función de distribución de probabilidad que integraba los datos de las trayectorias rectas y curvas para cada una de las variables.

3. La velocidad superficial máxima de los ciclones tropicales se ajusta a una distribución tipo Weibull y la velocidad de traslación de los ciclones tropicales se ajusta a una distribución lognormal.
4. La trayectoria de los ciclones tropicales sintéticos de trayectoria recta se define en este trabajo de investigación mediante una ecuación lineal, función de la latitud, el ángulo de incidencia y la velocidad de traslación. La trayectoria de los ciclones tropicales de trayectoria curva se define en este trabajo de investigación mediante una ecuación cuadrática, función de la velocidad de traslación y tres constantes. En el caso de los ciclones tropicales de trayectoria irregular se emplea la técnica de perturbación de trayectoria, en la cual se mantiene constante la velocidad superficial, la velocidad de traslación y la latitud. Se propone generar la longitud de los ciclones tropicales de trayectoria irregular mediante una distribución normal.
5. La Distribución de Probabilidades extrema tipo I (Forma doble exponencial) presenta un mejor ajuste para las velocidades regionales de viento.
6. Las velocidades regionales de viento obtenidas de la simulación probabilística son poco sensibles a la bases de datos generada por medio del método de Monte Carlo, considerando que se generó una población asociada a un periodo de 2,000 años.
7. Los valores de las velocidades regionales de viento de la simulación probabilística son mayores cuando en el sitio de interés no haya pasado históricamente un huracán, mientras que las velocidades regionales de viento de la simulación determinística son mayores cuando en el sitio de interés haya pasado históricamente un huracán.
8. Las velocidades regionales de viento de la simulación determinista con respecto a las establecidas en el Manual de Diseño de Obras Civiles Diseño por Viento (CFE 2008) son en promedio menores en un 5% y mayores en un 10 para periodos de retorno de 50 y 200 años, respectivamente.
9. Las velocidades regionales obtenidas de la simulación probabilista con respecto a las establecidas en el Manual de Diseño de Obras Civiles Diseño por Viento (CFE 2008) son en promedio menores en un 17% y un 8% para periodos de

retorno de 50 y 200 años, respectivamente. Las diferencias se atribuyen a que las bases de datos de los ciclones tropicales históricos son de un mayor periodo en el cual no se han presentado ciclones tropicales con velocidades superficiales extremas y al tipo de ajuste seleccionado.

10. Las diferencias entre las velocidades regionales de la simulación determinista y las de la simulación probabilista con respecto a las del Manual de Diseño de Obras Civiles por Viento (CFE 2008), se atribuyen principalmente al tipo de ajuste de distribuciones probabilísticas extremas empleado y a que el tamaño de la población analizada es de un diferente periodo de tiempo, en el cual no se han presentado ciclones tropicales con velocidades extremas que hayan afectado a la Península de Yucatán.

## REFERENCIAS

Aguirre, J. E.; Sánchez Sesma, J. (1986). Probabilistic considerations in transmission line wind design for Mexico. Probabilistic Methods Applied to Electric Power Systems, Proceedings of the First International Symposium, Toronto, Canada, edited by Ontario Hydro, 11-13.

Aguirre, J. E.; Sánchez Sesma, J. (1983). Actualización de los valores de diseño por viento en líneas de transmisión. Instituto de Investigaciones Eléctricas, México. (Reporte Interno núm. 3245 Departamento de Equipos Mecánicos)

Ang, A. H-S. y Tang, W. H. (2007). Probability concepts in engineering: Emphasis on Applications to Civil and Environmental Engineering. Volume I: Basic Principles. 2nd edition, Jhon Wiley & Sons. U.S.A.

Environmental Systems Research Institute, Inc (2010). ArcGIS 10 User Manual. Environmental Systems Research Institute, Inc, U.S.A.

Avelar F. C. (2008). Mapas de isotacas de velocidad de viento por ciclones tropicales para la República Mexicana. En "Memorias del XVI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural", Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, Puerto Vallarta, Jalisco.

Batts M. E., Cordes M. R., Russell C. R., Shaver J. R. y Simiu E. (1980). Hurricane wind speeds in the United States. "National bureau of standards republic," No. BBS-124, U.S. Dept. of commerce, Washington, D. C.

Benjamin, J. R. y Cornell, C. A. (1970). Probability, statistics, and decision for civil engineers. McGraw-Hill. U.S.A.

Comisión Federal de Electricidad – CFE – (1993). Manual de Diseño de Obras Civiles – Diseño por Viento –. Instituto de Investigaciones Eléctricas. México – IIE –, D. F.

Comisión Federal de Electricidad – CFE – (2008). Manual de Diseño de Obras Civiles – Diseño por Viento –. Instituto de Investigaciones Eléctricas. México – IIE –, D. F.

Echeverría O. J. (2009). Modelo de atenuación para ciclones tropicales en la península de Yucatán. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Yucatán, México.

Félix S. E. (2006). Modelación del campo de velocidades de vientos huracanados en la península de Yucatán. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Yucatán, México.

Fernández O. A. (2008). Análisis de las velocidades regionales de viento huracanado para el diseño estructural en la península de Yucatán. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Yucatán, México.

Fernández-Baqueiro, L. E., Varela Rivera, J. L. y Félix Solís, E. J. (2009) "Desarrollo y Calibración de un Modelo para la Determinación del Campo de Velocidades de Vientos Huracanados en la Península de Yucatán", Revista Ingeniería, Investigación y Tecnología, Vol. X., No. 1, pp. 29-37, Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, México. ISSN: 1405-7743

Fernandez-Baqueiro, L. E., Fernandez-Ojeda, A. J. y Varela-Rivera, J. L. (2010) "Determination of design wind speeds based on the simulation of historical tropical cyclones", Proceedings of the Sixth International Conference on Concrete under Severe Conditions. Environment and loading, 7 al 9 de Junio, Mérida, Yucatán, México. Publicado en: P. Castro-Borges, E. I. Moreno, K. Sakai, O. E. Gjørv y N. Banthia (editores) (2010) "Concrete under Severe Conditions. Environment and loading", Vol. 2, CRC Press, pp. 1685-1690.

Graham H. E. y Nunn D. E. (1959). Meteorological Considerations Pertinent to Standard Project Hurricane, Atlantic and Gulf Coasts of the United States. "National Hurricane Research Project" Report No. 33, Weather Bureau, U.S. Department of Commerce, Washington, D.C., 76 pp.

Holland G. J. (1980). An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes. "Monthly weather review", 108(8), 1212-1218.

National Hurricane Center, National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA – (2015). Atlantic hurricane database (HURDAT) 1851-2015. Disponible en: <http://www.nhc.noaa.gov/data/#hurdat>. Recuperado el 15 de enero de 2015.

Landsea Ch. W., Feurer S., Hagen A., Glenn D. A., Anderson N. T., Sims J., Pérez R. y Chenoweth M. (2003). Re-analysis Project: The Atlantic hurricane database Re-

analysis Project documentation for 1851-1910 alterations and addition to the HURDAT database. Hurricane Research Division, Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory.

López A., Muñoz C.M. (2007). Actualización de isotacas en la república mexicana para fines de diseño contra viento de líneas de transmisión y subtransmisión y subestaciones eléctricas. Instituto de Investigaciones Eléctricas, México. (Informe Final IIE/42/13083/I01/F/DC).

López L. A., Sánchez-Sesma J., Muñoz B. C., Pérez R. L. y Cordero M. C. (2008) Criterios óptimos de diseño por viento para México. En “Memorias del XVI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural”, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, Puerto Vallarta, Jalisco.

Sánchez-Sesma J. (2009). Análisis de la frecuencia e intensidad de los ciclones tropicales (CTs) para prevenir los efectos, presentes y futuros, debido a la variabilidad y el cambio climático en México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (Proyecto TH0918.3)

Sánchez-Sesma J., López A., Aguirre J.E. y Muñoz C.J. (2003). Wind design for Mexico: A review of the period 1964-2003. “11th International Conference on Wind Engineering” Lubbock, Texas, June 2-5.

Sánchez–Sesma J., Aguirre J. y Sen M. (1988). Simple Modeling Procedure for Estimation of Cyclonic Wind Speeds. “Journal of Structural Engineering”, 114(2):352–370.

Sánchez-Sesma J. (1985). Vientos máximos debidos a ciclones tropicales. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de México, México.

Sánchez-Sesma J., Aguirre, R.J. y Villegas, V.A. (1984).Maximum wind speeds in México for structural design purposes. En “IV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural”. León, Guanajuato, México, G110-G119.

Schloemer R. (1954). Analysis and synthesis of hurricane wind patterns over Lake Okeechobee, Florida. Hydrometeorological Report No. 31, Weather Bureau, Department of Commerce and U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C., 1-49.

Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales – SEMARNAT – (2015). Huracanes (Información General). Disponible en: <http://www.semarnat.gob.mx> Recuperado el 15 de enero de 2015.

Simiu E. y Scanlan R. (1996). Wind effects on structures: Fundamentals and applications to design. 3ª edición, Publicaciones Wiley-Interscience, E.U.A.

Silva R., Gorvaere G., Salles P., Bautista G. y Díaz G. (2002) Oceanographic vulnerability to hurricanes on the Mexican Coast. International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Cardiff, Wales.

Springall R. (1974). Estudio y análisis estadístico del oleaje generado por huracanes en el suroeste del Golfo de México. Tesis de doctorado, Universidad Autónoma de México, México.

StatPoint Technologies, Inc (2010). Statgraphics Centurion XVI User Manual. StatPoint Technologies, Inc, U.S.A.

Tryggvason B. V. Davenport A. G. y Surri D. (1976). Predicting wind-induced response in hurricane zones. “Journal of Structural Engineering”, ASCE, 102(12), 2333-2348.

Vickery P. J., Skerlj P. F. y Twisdale L. A. (2000). Simulation of hurricane risk in the U.S. using empirical track model. “Journal of Structural Engineering”, 126(10), 1222-1237.

Vickery, P. J., y Twisdale, L. A (1995a). Prediction of hurricane wind speeds in the United States. “Journal of Structural Engineering”, ASCE, 122(11), 1691-1699.

Vickery, P. J., y Twisdale, L. A (1995b). Wind-field and filling models for hurricane wind speed predictions. “Journal of Structural Engineering”, ASCE, 122(11), 1700-1709.

Walpole Ronald E., Myers Raymond, Myers Sharon (1999). Probabilidad y estadística para ingenieros. 6ª edición, Editorial Prentice Hall.

## APÉNDICE A

### Análisis de la velocidad superficial en mar

Para analizar la variación de la velocidad superficial de los ciclones tropicales sintéticos en su trayectoria en el mar, se analizaron las velocidades superficiales de los ciclones tropicales históricos en dos diferentes longitudes constantes.

Se consideró el paso de los ciclones tropicales por dos longitudes ( $-84.8^\circ$  y  $-86.8^\circ$ ), en las cuales se midieron las velocidades superficiales de los ciclones tropicales históricos. Se determinaron  $V_0$  y  $V_1$  como la velocidad superficial medida en la longitud  $84.8^\circ$  y  $86.8^\circ$ , respectivamente, como se ilustra en la Figura A.1.

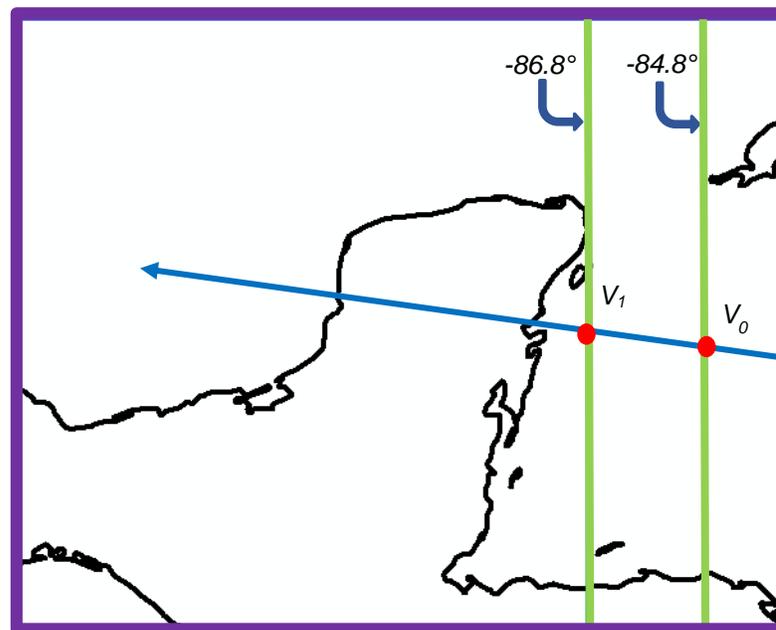


Figura A.1 Determinación de la variación de la velocidad superficial de ciclones tropicales en mar

En la Figura A.2. se grafican los valores de  $V_0$  en el eje horizontal y  $V_1$  en el eje vertical para cada uno de los ciclones tropicales históricos. Adicionalmente, se presenta el ajuste lineal de los datos junto con la ecuación de ajuste. Se observa que la ecuación de ajuste es  $V_0 = V_1$  y que la correlación de los valores es alta. Por lo anterior, se

propone simplificar el modelo considerando que la velocidad superficial de los ciclones tropicales se mantiene constante en el mar.

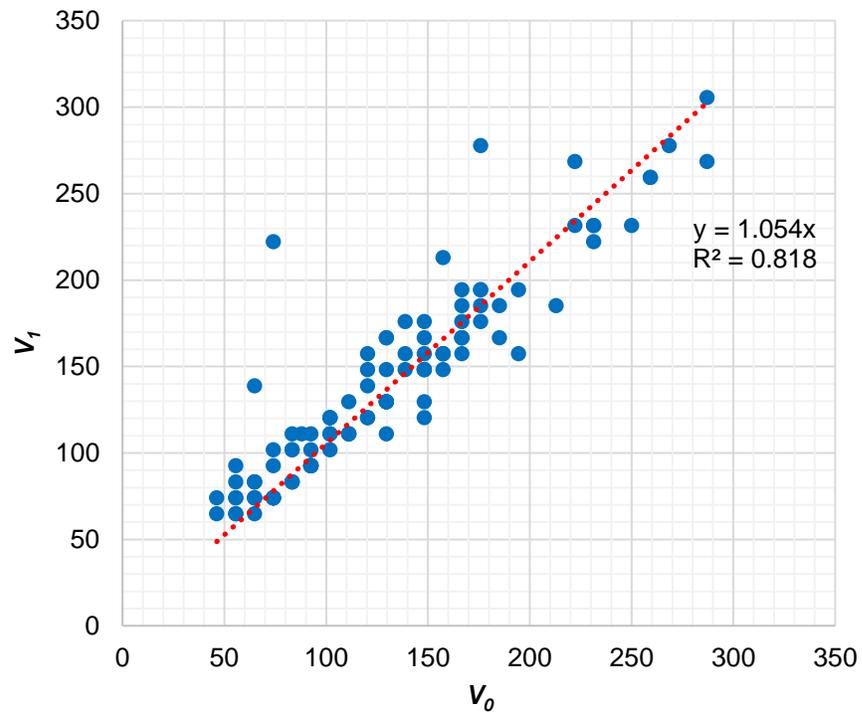


Figura A.2 Velocidad superficial de ciclones tropicales en mar:  $V_0$  vs  $V_1$

## APÉNDICE B

### Análisis de los ciclones tropicales de trayectoria irregular

En la Tabla B.1 se presenta un análisis de los ciclones tropicales de trayectoria irregular. Se realizó una revisión de cada uno de ellos de manera individual y se determinó si se podía simplificar su modelado considerando como una trayectoria como recta sobre la Península de Yucatán o si se despreciaba su afectación.

Tabla B.1 Ciclones tropicales atípicos y su consideración

Identificador	Nombre	Observaciones
AL011933	UNNAMED	V <sub>máx</sub> = 83.34 km/hr, no entra a tierra. No se considera.
AL011934	UNNAMED	V <sub>máx</sub> = 129 km/hr al atravesar la Península de Yucatán. Se calcula la trayectoria recta equivalente debido a que es una recta al momento de atravesar la Península de Yucatán.
AL051910	UNNAMED	Alejada de la Península de Yucatán a 190 km. V <sub>máx</sub> =240 km/hr. No se considera.
AL061911	UNNAMED	V <sub>máx</sub> =74.08 km/hr, no entra a tierra. No se considera
AL101924	UNNAMED	Alejada de la Península de Yucatán a 135 km. V <sub>máx</sub> =148 km/hr. No se considera.
AL101943	UNNAMED	V <sub>máx</sub> =64.82 km/hr. No se considera.
AL102002	ISIDORE	Trayectoria irregular, altas velocidades que afectan el norte de la Península de Yucatán. Se considera.
AL131998	MITCH	Se divide en dos eventos: * El evento 1 no afecta a la península de Yucatán debido a que la V <sub>máx</sub> =280 km/hr a una distancia de 470 km. * El segundo evento afecta el norte de la península de Yucatán con velocidades menores a V <sub>máx</sub> =64.82 km/hr. No se consideran.

AL151979	HENRI	V <sub>máx</sub> menor a 64.82 km/hr en puntos cercanos a la Península de Yucatán. No se considera.
AL171995	OPAL	V <sub>máx</sub> = 64.82 km/hr en la Península de Yucatán, aumento de velocidad en el Golfo de México. No se considera.
AL172003	LARRY	V <sub>máx</sub> =46.3 km/hr al atravesar la Península de Yucatán. No se considera.
AL191995	ROXANNE	V <sub>máx</sub> =185.2 km/hr al entrar a la Península de Yucatán. Se calcula trayectoria recta equivalente debido a que es una recta al momento de atravesar la Península de Yucatán.

En el caso de los ciclones tropicales de identificador AL011934 y AL191995 fue posible describir la trayectoria a su paso por la Península de Yucatán con una trayectoria recta equivalente.

En el caso del ciclón tropical AL102002 (Isidoro, 2002) fue el único ciclón tropical con una trayectoria irregular con velocidades superficiales de viento importantes. En este trabajo de investigación se tomará este último ciclón tropical para la generación de una familia de 12 ciclones tropicales sintéticos de una trayectoria similar; es decir, se mantienen constante las velocidades superficiales, la velocidad de traslación y la latitud de cada uno de los puntos que describen su trayectoria, y se varía su longitud de manera constante.

## APÉNDICE C

### Papel de probabilidad para el cálculo de las velocidades regionales de viento

En la Figura C.1, Figura C.2, Figura C.3 y Figura C.4 se presentan los papeles de probabilidad de las simulaciones histórica y probabilista de las ciudades de Campeche, Cancún, Chetumal y Mérida, respectivamente. Para la simulación probabilística se consideró el escenario 2. Se utiliza papel de probabilidad para una función extrema tipo I, ya que esta presentó el mejor ajuste. Los sistemas coordenados para la construcción del papel de probabilidad de esta función fueron presentados en el Capítulo 2.

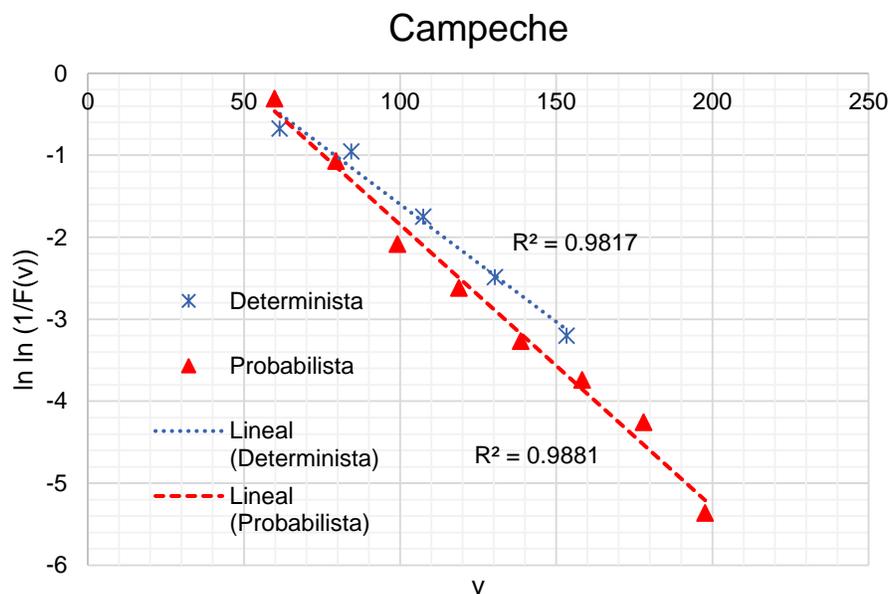


Figura C.1 Papel de probabilidad extremo tipo I para Campeche

En la figura C.1 Se observa, en general, que los valores de las velocidades regionales para los diferentes periodos de retorno son mayores en la simulación determinista que en la simulación probabilista.

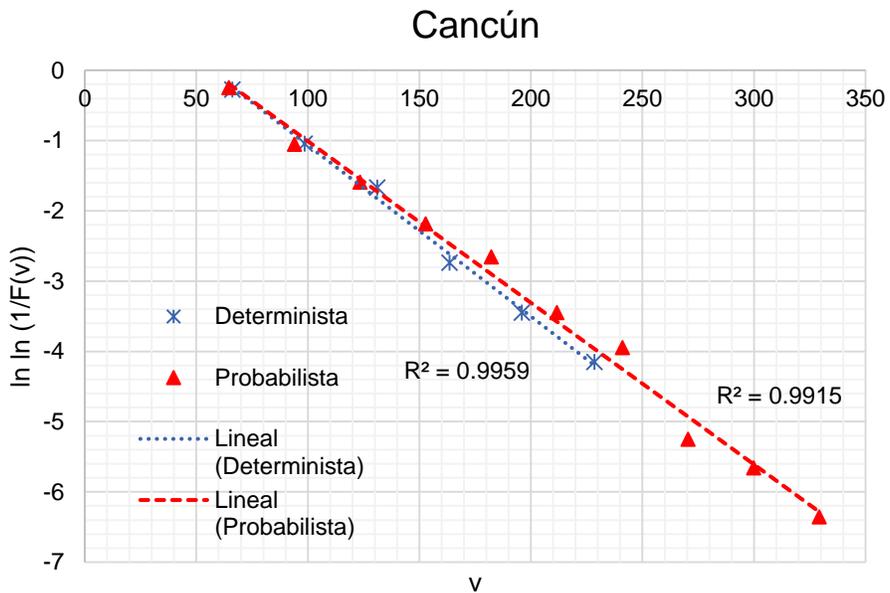


Figura C.2 Papel de probabilidad extremo tipo I para Cancún

En la figura C.2 Se observa que los valores de las velocidades regionales para los diferentes periodos de retorno son similares en la simulación determinista y probabilista para cualquier periodo de retorno.

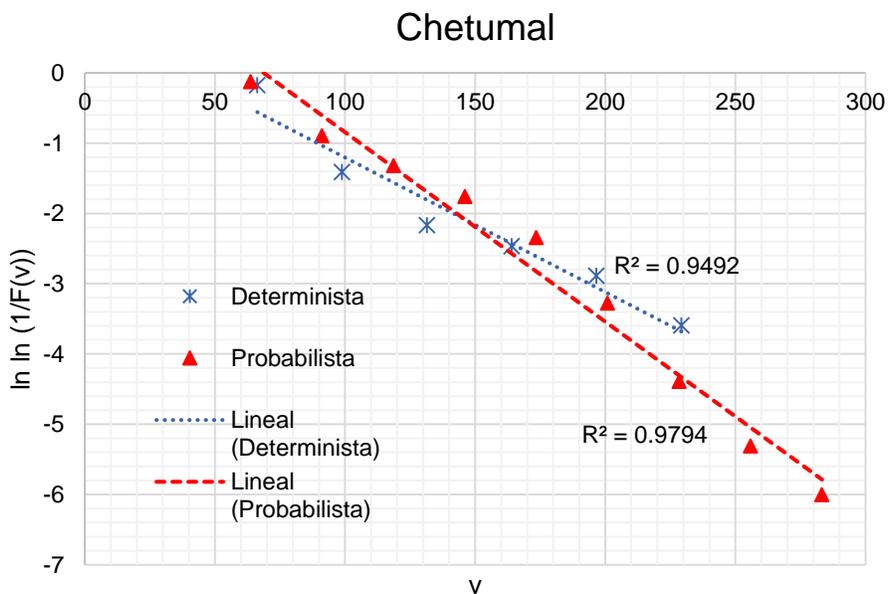


Figura C.3 Papel de probabilidad extremo tipo I para Chetumal

En la figura C.3 Se observa que los valores de las velocidades regionales para los diferentes periodos de retorno son mayores para la simulación determinista para los periodos de retorno de 50 y 200 años ( $\ln(\ln(1/F(v))) = -5.7, -3.35$ ).

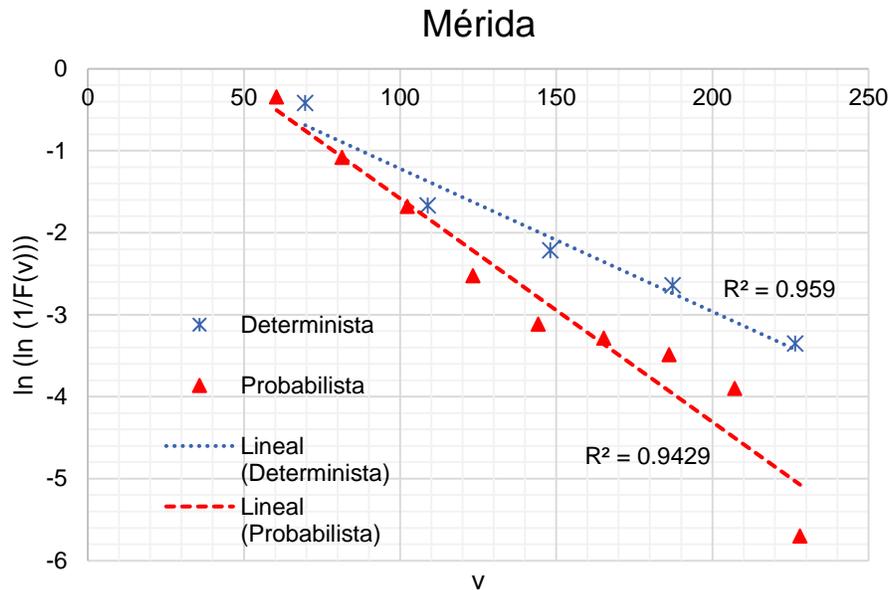


Figura C.4 Papel de probabilidad tipo I para Mérida

En la figura C.4 Se observa, en general, que los valores de las velocidades regionales para los diferentes periodos de retorno en la simulación probabilista son menores que en la simulación determinista. Adicionalmente se observa que en el caso de Mérida la velocidad máxima observada corresponde a un mismo valor tanto para la simulación histórica como para la simulación probabilista (228 km/hr). Lo anterior se debe a que los ciclones tropicales no impactan directamente en la ciudad de Mérida, sino que primero pasan a través de la Península de Yucatán y atenúan sus velocidades. Ésta velocidad máxima observada en la simulación histórica, como en la probabilista, corresponde a los ciclones tropicales de trayectoria irregular (*i.e.* Isidoro), por lo que independientemente del aumento de la cantidad de años de la base de datos, este valor no se ve modificado.