



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES**

**CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y LA CONSTRUCCIÓN.
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**ESTIMACIÓN ESTADÍSTICA DE LA VELOCIDAD REGIONAL
DEL VIENTO EN AGUASCALIENTES PARA SU EMPLEO EN
EL ANÁLISIS POR VIENTO DE ESTRUCTURAS**

TESIS

QUE PRESENTA

ING. ANDRÉS RAMOS URTEAGA

**PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO EN
INGENIERÍA CIVIL EN EL ÁREA DE ESTRUCTURAS**

TUTOR:

DR. MARIO EDUARDO ZERMEÑO DE LEÓN

CO-TUTOR:

DR. NETZAHUALCÓYOTL CASTAÑEDA LEYVA

ASESOR:

JOSÉ LUIS LÓPEZ LÓPEZ

NOVIEMBRE 30, 2023

**CARTA DE VOTO APROBATORIO
COMITÉ TUTORAL**

M. en I. Ma. Guadalupe Lira Peralta
Decana Del Centro De Ciencias Del Diseño Y De La Construcción

PRESENTE

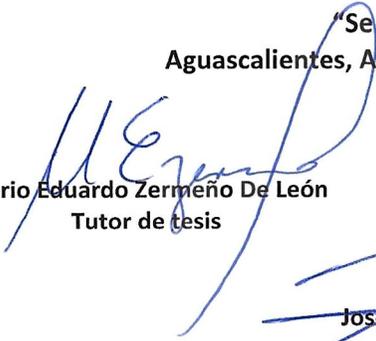
Por medio del presente como **Miembros del Comité Tutorial** designado del estudiante **ANDRÉS RAMOS URTEAGA** con ID 339383 quien realizó la tesis titulada: **ESTIMACIÓN ESTADÍSTICA DE LA VELOCIDAD REGIONAL DEL VIENTO EN AGUASCALIENTES PARA SU EMPLEO EN EL ANÁLISIS POR VIENTO DE ESTRUCTURAS**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia damos nuestro consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que nos permitimos emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Ponemos lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, le enviamos un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 22 de noviembre de 2023


Mario Eduardo Zermeno De León
Tutor de tesis


Netzahualcoyotl Castañeda Leyva
Co-Tutor de tesis


José Luis López López
Asesor de tesis

c.c.p.- Interesado

c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

Fecha de dictaminación dd/mm/aaaa: 22 de noviembre de 2023

NOMBRE: Andres Ramos Urteaga **ID** 339383

PROGRAMA: Maestría en Ingeniería Civil **LGAC (del posgrado):** Área de Estructuras

TIPO DE TRABAJO: () Tesis () Trabajo Práctico

TÍTULO: Estimación Estadística De La Velocidad Regional Del Viento En Aguascalientes Para Su Empleo En El Análisis Por Viento De Estructuras

IMPACTO SOCIAL (señalar el impacto logrado):
Una revisión a la velocidad regional de Aguascalientes que se usa para el diseño de estructuras.

INDICAR SI NO N.A. (NO APLICA) SEGÚN CORRESPONDA:

INDICAR	SI	NO	N.A. (NO APLICA)	SEGÚN	CORRESPONDA:
<i>Elementos para la revisión académica del trabajo de tesis o trabajo práctico:</i>					
SI					El trabajo es congruente con las LGAC del programa de posgrado
SI					La problemática fue abordada desde un enfoque multidisciplinario
SI					Existe coherencia, continuidad y orden lógico del tema central con cada apartado
SI					Los resultados del trabajo dan respuesta a las preguntas de investigación o a la problemática que aborda
SI					Los resultados presentados en el trabajo son de gran relevancia científica, tecnológica o profesional según el área
SI					El trabajo demuestra más de una aportación original al conocimiento de su área
SI					Las aportaciones responden a los problemas prioritarios del país
N.A.					Generó transferencia del conocimiento o tecnológica
SI					Cumple con la ética para la investigación (reporte de la herramienta antiplagio)
<i>El egresado cumple con lo siguiente:</i>					
SI					Cumple con lo señalado por el Reglamento General de Docencia
SI					Cumple con los requisitos señalados en el plan de estudios (créditos curriculares, optativos, actividades complementarias, estancia, predoctoral, etc)
SI					Cuenta con los votos aprobatorios del comité tutorial, en caso de los posgrados profesionales si tiene solo tutor podrá liberar solo el tutor
SI					Cuenta con la carta de satisfacción del Usuario
SI					Coincide con el título y objetivo registrado
SI					Tiene congruencia con cuerpos académicos
SI					Tiene el CVU del Conacyt actualizado
N.A.					Tiene el artículo aceptado o publicado y cumple con los requisitos institucionales (en caso que proceda)
<i>En caso de Tesis por artículos científicos publicados</i>					
N.A.					Aceptación o Publicación de los artículos según el nivel del programa
N.A.					El estudiante es el primer autor
N.A.					El autor de correspondencia es el Tutor del Núcleo Académico Básico
N.A.					En los artículos se ven reflejados los objetivos de la tesis, ya que son producto de este trabajo de investigación.
N.A.					Los artículos integran los capítulos de la tesis y se presentan en el idioma en que fueron publicados
N.A.					La aceptación o publicación de los artículos en revistas indexadas de alto impacto

Con base a estos criterios, se autoriza se continúen con los trámites de titulación y programación del examen de grado:

Sí X
No

FIRMAS

Elaboró:

* NOMBRE Y FIRMA DEL CONSEJERO SEGÚN LA LGAC DE ADSCRIPCIÓN:

Dr. Mario Eduardo Zermeno de León

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO TÉCNICO:

Dr. Martín Hernández Marín

* En caso de conflicto de intereses, firmará un revisor miembro del NAB de la LGAC correspondiente distinto al tutor o miembro del comité tutorial, asignado por el Decano

Revisó:

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO:

Dr. Mario Ernesto Esparza Díaz de León

Autorizó:

NOMBRE Y FIRMA DEL DECANO:

M. en I. Ma. Guadalupe Lira Peralta

Nota: procede el trámite para el Depto. de Apoyo al Posgrado

En cumplimiento con el Art. 105C del Reglamento General de Docencia que a la letra señala entre las funciones del Consejo Académico: Cuidar la eficiencia terminal del programa de posgrado y el Art. 105F las funciones del Secretario Técnico, llevar el seguimiento de los alumnos.

Índice General

ÍNDICE DE FIGURAS	2
ÍNDICE DE TABLAS	3
ÍNDICE DE GRÁFICAS	4
RESUMEN	5
ABSTRACT.....	6
1. INTRODUCCIÓN.....	7
2. ESTADO DEL ARTE	10
2.1 ESTADO DEL ARTE (REGIONAL).....	11
2.2 ESTADO DEL ARTE (NACIONAL)	11
3. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....	13
3.1 NORMATIVIDAD	13
3.2 ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE LA COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA	17
3.3 BASE DE DATOS DE LA COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA	24
3.4 INTERPRETACIÓN DE INFORMACIÓN	27
4. MODELOS DE PROBABILIDAD.....	29
4.1 DISTRIBUCIONES DE EXTREMOS PARA MÁXIMAS	31
4.2 DISTRIBUCIONES DE EXTREMOS Y PROGRAMA DE R	33
5. AJUSTE DEL MODELO.....	37
5.1 AJUSTE POR MES	40
5.2 AJUSTE POR AÑO.....	42
6. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	44
6.1 PERIODO DE RETORNO	58
6.2 TASA DE EXCEDENCIA	62
7. CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES.....	65
7.1 RECOMENDACIONES.....	68
REFERENCIAS	69

Índice de Figuras

FIGURA 1.1 ESPECTACULAR COLAPSADO EN LA CIUDAD DE AGUASCALIENTES (24 HORAS, 2019)	9
FIGURA 3.1 MAPA DE ISOTACAS PARA PERIODO DE RETORNO DE 200 AÑOS. PARA $TR=200$ AÑOS EL $VR=150$ KM/H. (CENAPRED, 2017).....	14
FIGURA 3.2 MAPA DE ISOTACAS PARA PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS. PARA $TR=50$ AÑOS EL $VR=130$ KM/H. (CENAPRED, 2017).....	15
FIGURA 3.3 MAPA DE ISOTACAS PARA PERIODO DE RETORNO DE 10 AÑOS. PARA $TR=10$ AÑOS EL $VR=120$ KM/H. (CFE, 2020)	16
FIGURA 3.4 LOCALIZACIÓN DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE CONAGUA EN AGUASCALIENTES.....	17
FIGURA 3.5 ESTACIÓN CNA, ESTRUCTURA DONDE SE ENCUENTRAN LOS INSTRUMENTOS QUE REGISTRAN LOS VIENTOS	18
FIGURA 3.6 ESTACIÓN CNA, ANEMÓMETRO CON SUS TRES TAZAS Y DOS VELETAS	19
FIGURA 3.7 ESTACIÓN CNA, ANEMOCINEMOGRAFO Y SU VELOCÍMETRO, ROSA DE VIENTOS Y PAPEL GRAFICADOR	20
FIGURA 3.8 ESTACIÓN CNA, PAPEL GRAFICADOR	21
FIGURA 3.9.1 ESTACIÓN CNA, VISTA NORTE	22
FIGURA 3.9.2 ESTACIÓN CNA, VISTA ESTE.....	22
FIGURA 3.9.3 ESTACIÓN CNA, VISTA OESTE	23
FIGURA 3.9.4 ESTACIÓN CNA, VISTA SUR.....	23
FIGURA 3.10 A. ESTACIÓN CNA, BITÁCORA DE REGISTRO DE INFORMACIÓN.....	24
FIGURA 3.10 B. ESTACIÓN CNA, HOJA FÍSICA DE REGISTRO DE INFORMACIÓN.....	25
FIGURA 3.11 ESTACIÓN CNA, ARCHIVO DIGITAL DE REGISTRO DE INFORMACIÓN EN EXCEL	26

Índice de Tablas

TABLA 3.1 CÓDIGO MUNICIPAL DE AGUASCALIENTES, ARTICULO 927 (CÓDIGO MUNICIPAL, 2022).....	13
TABLA 3.2 DATOS ORIGINALES DE CONAGUA	27
TABLA 3.3 DATOS CORREGIDOS Y DEPURADOS	28
TABLA 4.1 BASE DE DATOS CON MÁXIMAS DE VIENTOS DEL PERIODO DE 1981-2021. LOS DATOS FALTANTES SE INDICAN COMO “-”	34
TABLA 5.1 ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DEL MODELO GEV PARA MÁXIMOS; POR MES Y TODOS, ASÍ COMO RESPECTIVO ERROR ESTÁNDAR.	37
TABLA 5.2 CONCLUSIÓN DEL CONTRASTE DE HIPÓTESIS (5.1), PARA EL PARÁMETRO DE FORMA S, PARA CADA MES DEL AÑO Y TODOS LOS DATOS.	39
TABLA 6.1 VALORES DE PROBABILIDAD ACUMULADA DE MÁXIMA DE VIENTOS	59
TABLA 7.1 TABLA DE RIESGO PARA LAS VELOCIDADES DE VIENTO	66
TABLA 7.2 CÓDIGO MUNICIPAL DE AGUASCALIENTES, ARTICULO 927 (CÓDIGO MUNICIPAL, 2022).....	67
TABLA 7.3 VELOCIDADES REGIONALES SEGÚN PERIODO DE RETORNO, CFE 2020	68

Índice de Gráficas

GRÁFICA 5.1 HISTOGRAMA DE VELOCIDAD MÁXIMA DE VIENTOS POR AÑO, DE 1981-2021, CON RESPECTIVO AJUSTE DE DENSIDAD GEV PARA MÁXIMOS.....	39
GRÁFICA 5.2 HISTOGRAMAS DE VELOCIDAD MÁXIMA DE VIENTOS DE CADA MES, DE 1981-2021, CON RESPECTIVOS AJUSTES DE DENSIDAD GEV PARA MÁXIMOS.	41
GRÁFICA 5.3 REGISTRO DE MÁXIMAS POR AÑO	43
GRÁFICA 6.1 GRÁFICAS GENERALES PARA EL MES DE ENERO	45
GRÁFICA 6.2 GRÁFICAS GENERALES PARA EL MES DE FEBRERO	46
GRÁFICA 6.3 GRÁFICAS GENERALES PARA EL MES DE MARZO	47
GRÁFICA 6.4 GRÁFICAS GENERALES PARA EL MES DE ABRIL.....	48
GRÁFICA 6.5 GRÁFICAS GENERALES PARA EL MES DE MAYO	49
GRÁFICA 6.6 GRÁFICAS GENERALES PARA EL MES DE JUNIO	50
GRÁFICA 6.7 GRÁFICAS GENERALES PARA EL MES DE JULIO	51
GRÁFICA 6.8 GRÁFICAS GENERALES PARA EL MES DE AGOSTO.....	52
GRÁFICA 6.9 GRÁFICAS GENERALES PARA EL MES DE SEPTIEMBRE.....	53
GRÁFICA 6.10 GRÁFICAS GENERALES PARA EL MES DE OCTUBRE.....	54
GRÁFICA 6.11 GRÁFICAS GENERALES PARA EL MES DE NOVIEMBRE	55
GRÁFICA 6.12 GRÁFICAS GENERALES PARA EL MES DE DICIEMBRE	56
GRÁFICA 6.13 GRÁFICAS GENERALES DE 1981-2021	57
GRÁFICA 6.14 PERIODO DE RETORNO PARA EL PERIODO DE 1981-2021.....	60
GRÁFICA 6.15 CURVAS DE PERIODO DE RETORNO PARA DATOS DE CADA MES Y TODOS.....	61
GRÁFICA 6.16 CURVA DE TASA DE EXCEDENCIA DE 1981- 2021	63
GRÁFICA 6.17 CURVAS DE TASA DE EXCEDENCIA POR MES	64
GRÁFICA 7.1 PERIODO DE RETORNO DE LAS MÁXIMAS DE VIENTO DE 1821 A 2021	66

Resumen

La velocidad regional del viento es un factor crucial en el diseño de estructuras como puentes y edificios, ya que permiten conocer las fuerzas provocadas por viento para garantizar la estabilidad y seguridad ante condiciones extremas de viento. Las normas y manuales de diseño mencionan la velocidad regional básica de diseño, sin embargo, existen estructuras que han colapsado ante fuertes vientos, menores incluso que los obtenidos con dicha velocidad regional básica. El colapso por viento de diferentes tipos de estructuras pone en riesgo a habitantes de su entorno. Las normas y manuales de diseño carecen de fuentes de información meteorológica actualizada para poder aplicarlas en el análisis de estructuras, lo que puede causar una sobre-estimación, o sub-estimación de las fuerzas actuando en la estructura. En esta investigación se recopilaron, para la Ciudad de Aguascalientes, los registros de viento por magnitud y dirección en un periodo de tiempo de 37 años, de 1981 a 2021. Se analizaron principalmente la magnitud de los vientos y se enfocó en el análisis estadístico de los valores extremos de sus magnitudes, clasificándolos por año y mes. La base de datos se analiza mediante distribuciones de probabilidad de valores extremos. Las funciones de extremos de probabilidad, adecuadas para estos registros de viento, proporcionan información actualizada y cómo se pueden comportar las velocidades del viento en el futuro.

Abstract

The regional wind speed is a crucial factor in the design of structures such as bridges and buildings, as it allows for an understanding of the forces induced by wind to ensure stability and safety under extreme wind conditions. Design standards and manuals mention the basic regional design wind speed; however, there have been instances where structures collapsed under strong winds, even lower than those determined by the basic regional speed. The wind-induced collapse of various types of structures jeopardizes the safety of residents in their vicinity. Design standards and manuals lack updated meteorological information to apply in the structural analysis, leading to potential overestimation or underestimation of the forces acting on the structure. In this research, wind records for magnitude and direction were collected for the City of Aguascalientes over a period of 37 years, from 1981 to 2021. The focus was primarily on the magnitude of the winds, with a specific emphasis on the statistical analysis of extreme values, categorized by year and month. The database is analyzed using probability distributions of extreme values. Probability extreme functions, suitable for these wind records, offer updated information on how wind speeds can behave in the future. This approach aims to address the limitations of current design standards and manuals by incorporating more accurate and localized meteorological data for improved structural analysis and safety considerations.

1. Introducción

En la ingeniería estructural es sumamente importante conocer con precisión las fuerzas y cargas permanentes y temporales que tendrá una estructura. Entre las fuerzas que pueden afectar una estructura se deben contemplar las originadas por el viento. Lo más importante de la recopilación de registros de viento es el enfoque en las magnitudes extremas del viento, más que sus medidas de tendencia central, porque una estructura bien diseñada tendrá que soportar los vientos extremos que en teoría podrían ocurrir.

En (Código Municipal, 2022, Artículo 866) define acción como “todo agente externo inherente a la estructura y a su funcionamiento y cuyos efectos pueden hacer que ésta alcance un estado límite”. Acción se define como “todo agente externo inherente a la estructura y a su funcionamiento y cuyos efectos pueden hacer que ésta alcance un estado límite” (Código Municipal, 2022, Artículo 866). La acción de un diseño estructural se obtiene multiplicando la fuerza nominal por el factor de carga, que en el caso de esta investigación es el factor de viento.

Hay tres tipos de acciones según el Código Municipal de Aguascalientes y se categorizan por la duración de tiempo por la cual actúan sobre la estructura. Los tres tipos de acciones son: acciones permanentes, acciones variables y acciones accidentales. Los vientos se consideran un tipo de acción accidental al igual que otros fenómenos naturales como sismos, nieve, granizo y lluvias. También el manual considera acción accidental las explosiones e incendios.

Para el desarrollo de esta investigación se procesaron y depuraron las bases de datos de máximas de registros de vientos recopiladas por la estación meteorológica de CONAGUA ubicada en el parque Rodolfo Landeros. También se cumplió con los requisitos de cantidad y calidad de información para que los resultados de la investigación pudieran ser confiables. La calidad consiste en que los sistemas de medición registren el movimiento del aire en forma precisa, continua y homogénea, (Brito, 1982). Ya con una base de datos de información validada se procedió a crear los modelos de probabilidad en la cual se definen como qué tipo de extremo probabilístico se distribuyen los vientos en el Estado de Aguascalientes. Incluso con los parámetros obtenidos del estudio probabilístico se armaron curvas de tablas de excedencia por mes y año que muestran como los vientos se comportan por temporadas.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Para el tamaño de muestra de estudio es deseable que sea cuando menos de 10 años (Simiu y Church, 2019). En esta investigación se cuenta con 37 años en total. Del año 1981 a 2008, la información fue obtenida de registros físicos y no se pudo obtener información de los años 1983, 1990, 1991 y 1994. El resto del tiempo, de los años del 2009 al 2021, se cuenta con registros digitales, en donde se medía la magnitud y dirección de vientos cada 15 minutos dando un aproximado de 421,393 registros.

La norma vigente en el Estado de Aguascalientes en materia de construcción menciona que los reglamentos actuales de diseño por viento, usados en Aguascalientes, son el Manual de Diseño de Obras Civiles por Viento de la Comisión Federal de Electricidad y el Código Municipal de Aguascalientes de 2022. La información de las velocidades regionales proporcionada por estos manuales es dada por el Instituto de Investigaciones Eléctricas. En el manual se incluyen varios mapas de isotacas que se distinguen por su tiempo de retorno. Estas velocidades regionales son las que se usan en la provincia mexicana. Se estima que estos mapas de isotacas son muy generales en diferentes partes de México, incluyendo Aguascalientes.

Por otro lado, una estructura en particular que está sujeta a un colapso debido a vientos son los espectaculares. Estas estructuras se caracterizan por su gran superficie y soportadas sólo por un pilar. En julio de 2019, un espectacular colapsó sobre un estacionamiento en la ciudad de Aguascalientes (24 Horas, 2019). Por eso es necesario una revisión, análisis y actualización de las velocidades regionales, a partir de información estadística local.



Figura 1.1 Espectacular colapsado en la ciudad de Aguascalientes (24 Horas, 2019)

En México se aplican las normas de construcción publicadas en cada municipio de la República. Sin embargo, a falta de suficiente información local o de parámetros específicos del lugar, la mayoría de los municipios aplica las normas del Manual de Diseño de Obras Civiles de la CFE 2020. El número de estaciones meteorológicas en la República Mexicana es aún insuficiente para que puedan proporcionar datos estadísticos confiables. Además, los análisis estadísticos de dicha información son escasos. Por este motivo, en la investigación se estudian y analizan los registros de vientos locales para poder obtener valores de diseño más precisos de la velocidad regional de viento para el Estado de Aguascalientes.

2. Estado del Arte

El estudio de máximas de registros de vientos en un tema poco explorado científicamente. La mayoría de información de vientos en las investigaciones se usa como medio para encontrar otra información en las tesis y por eso se dificulta crear un estado del arte extenso para el propósito de esta investigación. Para esta tesis los trabajos que se relacionaron directamente fueron dos, las cuales fueron una investigación de la Universidad Nacional Autónoma de México realizada por Rafael Brito Ramírez en 1982 y la investigación realizada por Juan Carlos López Arellano en 2009 en la Universidad Autónoma de Aguascalientes.

En relación con los estudios mencionados anteriormente la investigación de Rafael Brito en la Ciudad de México D.F. consistió en la recopilación de dos estaciones meteorológicas y una tercera base de datos la cual recababa los extremos más intensos de las dos previas estaciones. Con los registros de viento depurados se realizaba distintos análisis estadísticos que estudiaban qué tipo de distribución de extremos encajaba mejor cada uno de los tres registros de vientos.

López Arellano, en 2009, siguió el mismo proceso de Brito para observar de qué manera se comportan los extremos de viento en el Estado de Aguascalientes. Las diferencias con el estudio de López Arellano fue que la investigación consistió en una sola base de datos obtenida de la estación meteorológica de CONAGUA, situada en el parque Rodolfo Landeros. Los registros de viento consistieron en una base de datos durante el período 1981-2009.

2.1 Estado del Arte (Regional)

En el estudio López López et. Al 2009 se toman los registros meteorológicos del Observatorio Estatal, en un periodo de 14 años, de 1990 a 2003, se tomó el registro de la velocidad y dirección de vientos. Además se usó la herramienta gráfica de “rosa de vientos” para mostrar las distribuciones de velocidades y la frecuencia de variación de las direcciones del viento.

Otra investigación realizada en Aguascalientes con énfasis en el tema de vientos fue hecha por Ávila Castañeda en 2016, “Uso de los patrones de viento del Municipio de Aguascalientes del periodo 2005-2014 en la modelación de la dispersión de las emisiones de CO derivadas de la producción de ladrillo.” En esta investigación se obtiene información de los registros de viento en el Estado de Aguascalientes del periodo del 2005 a 2014 con el fin de simular la dispersión de contaminantes y determinar si una ladrillera en el Valle de Aguascalientes afecta la zona urbana de la ciudad con sus emisiones de CO.

2.2 Estado del Arte (Nacional)

Una investigación realizada en México por Osorio Tai titulada “Estudio De La Intensificación De Los Vientos En El Puerto De Veracruz Mediante Modelación Numérica.” En esta investigación se enfoca en el comportamiento de los vientos del puerto de Veracruz y como los vientos incrementan de velocidad por el factor de la presencia de la Sierra Madre Occidental. Se utilizaron instrumentos como boyas meteoceánicas, radiosondeos y escatemómetro para determinar la relación de los vientos en el puerto y la Sierra Madre.

Un estudio relacionado a vientos en el país de México hecho por Crescencio Sánchez en la Universidad Nacional Autónoma de México llamado “Análisis De Algunas Variables Meteorológicas Y Su Área De Influencia, En Ciudad Universitaria, D.F., Durante El Período 1963 A 1983.” En este estudio se explora diferentes características climatológicas la cual incluye

vientos. Se estudiaron registros de vientos hechos por el Observatorio Meteorológico de la Universidad Nacional Autónoma de México durante 1963 a 1983. De los registros la investigación deduce que al principio del año la presión atmosférica disminuye hasta el mes de marzo, y después la presión sube hasta un máximo de julio en la cual estos comportamientos de vientos también se vieron de forma similar en el estudio de vientos en Aguascalientes.



3. Recopilación de Información

3.1 Normatividad

Los reglamentos actuales de diseño por viento, usados en el Estado de Aguascalientes, son el Manual de Diseño de Obras Civiles por Viento de la Comisión Federal de Electricidad y el Código Municipal de Aguascalientes 2022. En el Código Municipal de Aguascalientes el Capítulo XIII es la sección designada para el diseño de vientos, la cual este capítulo incluye 6 artículos refiriéndose a las normas de diseño por viento. En el artículo 927 determina las velocidades regionales como parámetro básico dependiendo del tipo de estructura, ya se Grupo A o Grupo B.

Importancia de Estructura	Velocidad (km/h)
Grupo A	150
Grupo B	130

Tabla 3.1 Código Municipal de Aguascalientes, Artículo 927 (Código Municipal, 2022)

En el Manual de Diseño de Obras Civiles por Viento de la CFE 2020 los parámetros básicos de velocidades regionales se obtienen a partir de los mapas de isotacas que varían según el periodo de retorno. Además para los mapas de isotacas se toma en cuenta la velocidad que se refiere a las condiciones homogéneas que corresponden a una altura de 10 metros sobre la superficie del suelo en terreno plano (López Arellano, 2009). Del Manual se puede obtener tres diferentes periodos de retorno la cual son 200, 50 y 10 años.

Para la Figura 3.1, se aprecia que el Estado de Aguascalientes tiene período de retorno de 200 para velocidades de vientos entre 140 y 150 km/h (38.9 y 41.7 m/s). Así mismo, de la Figura 3.2, para el rango de velocidades entre 130 y 140 km/h (36.1 y 38.9 m/s) el período de retorno es de 50 años. Para la Figura 3.3, con un periodo de retorno de 10 años la velocidad regional seria entre 114 y 125 km/h (31.7 y 34.7 m/s)

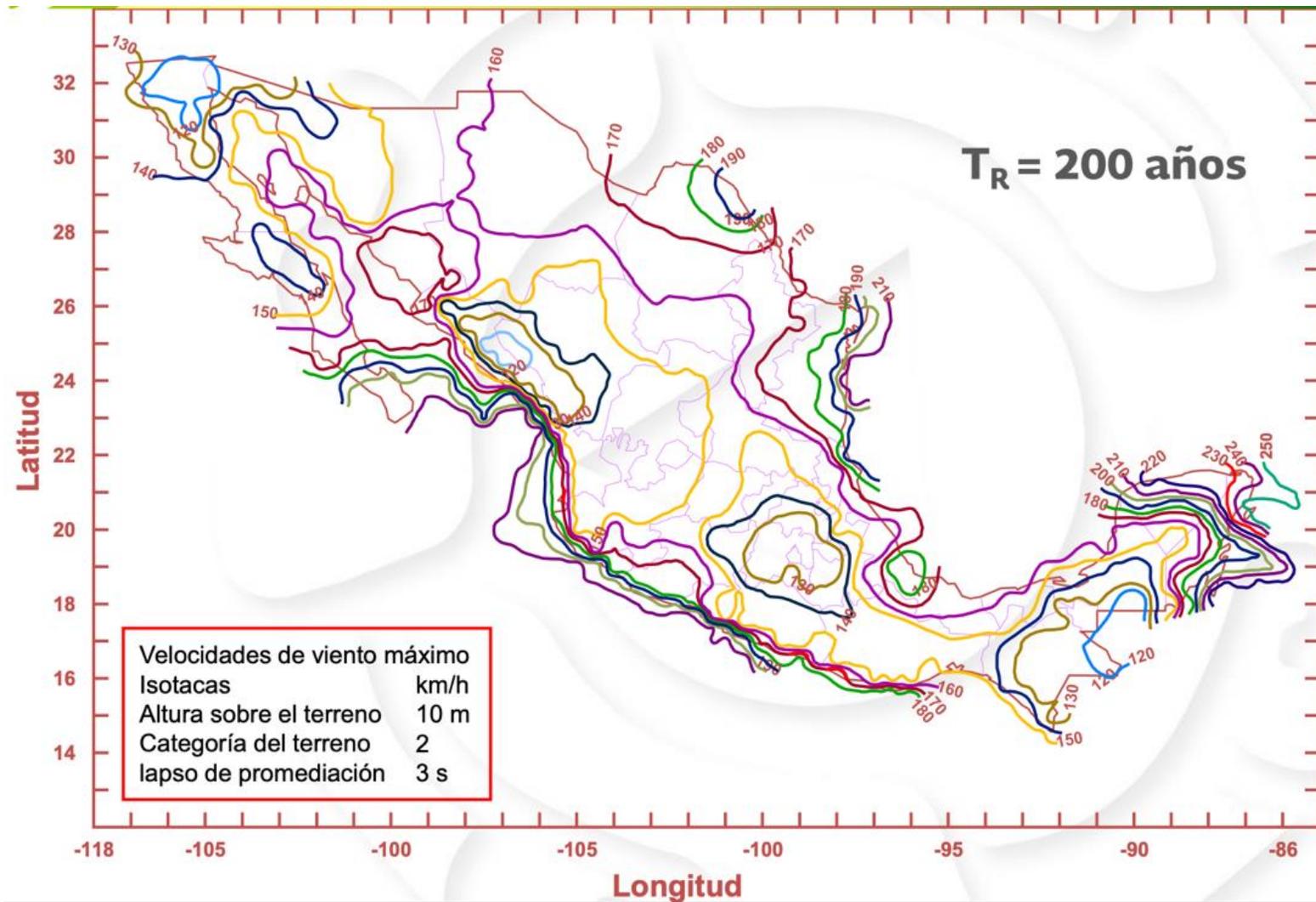


Figura 3.1 Mapa de Isotacas para Periodo de Retorno de 200 Años. Para $T_R = 200$ años el $V_R = 150$ km/h. (CENAPRED, 2017)

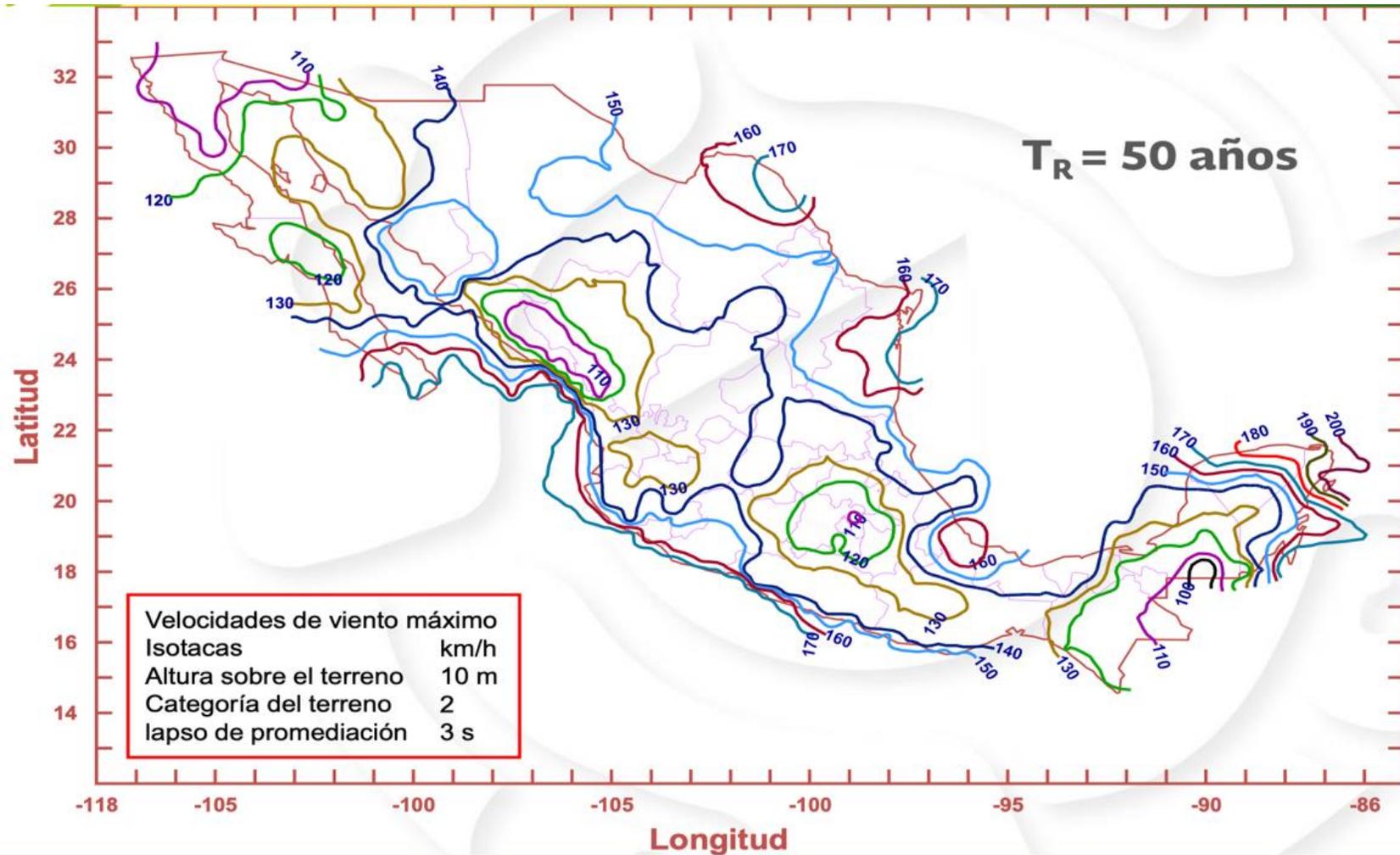


Figura 3.2 Mapa de Isotacas para Periodo de Retorno de 50 Años. Para $T_R=50$ años el $V_R=130$ km/h. (CENAPRED, 2017)

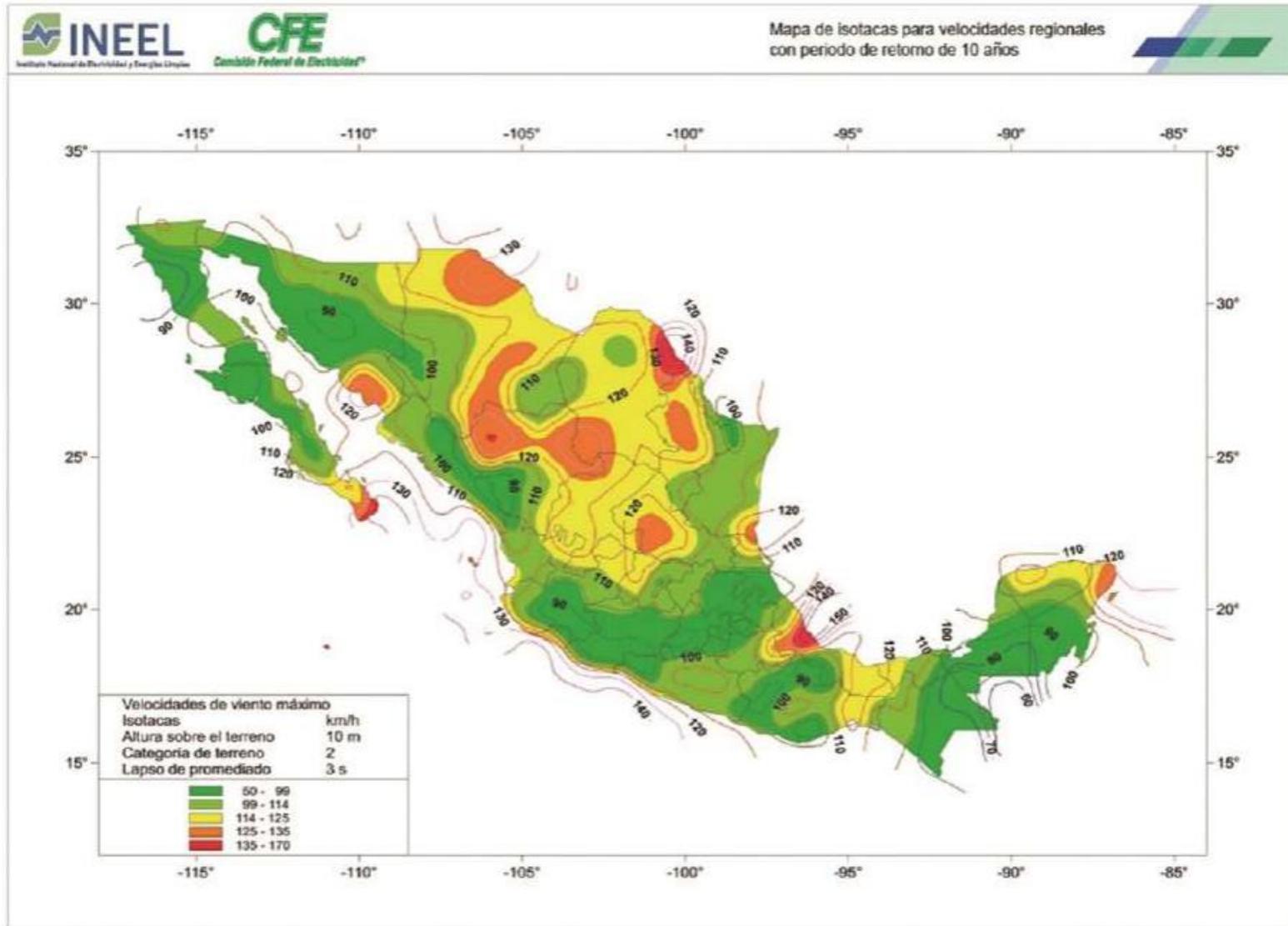


Figura 3.3 Mapa de Isotacas para Periodo de Retorno de 10 Años. Para $T_R=10$ años el $V_R=120$ km/h. (CFE, 2020)

3.2 Estación Meteorológica de la Comisión Nacional del Agua

La estación meteorológica de CONAGUA está situada en el parque Rodolfo Landeros Gallegos por el Boulevard José María Chávez al sur de la ciudad de Aguascalientes. Las coordenadas geográficas de la estación meteorológica son longitud: 102° 17' 28'' y latitud: 21° 51' 03'', a una altura de 1874 metros sobre el nivel del mar.

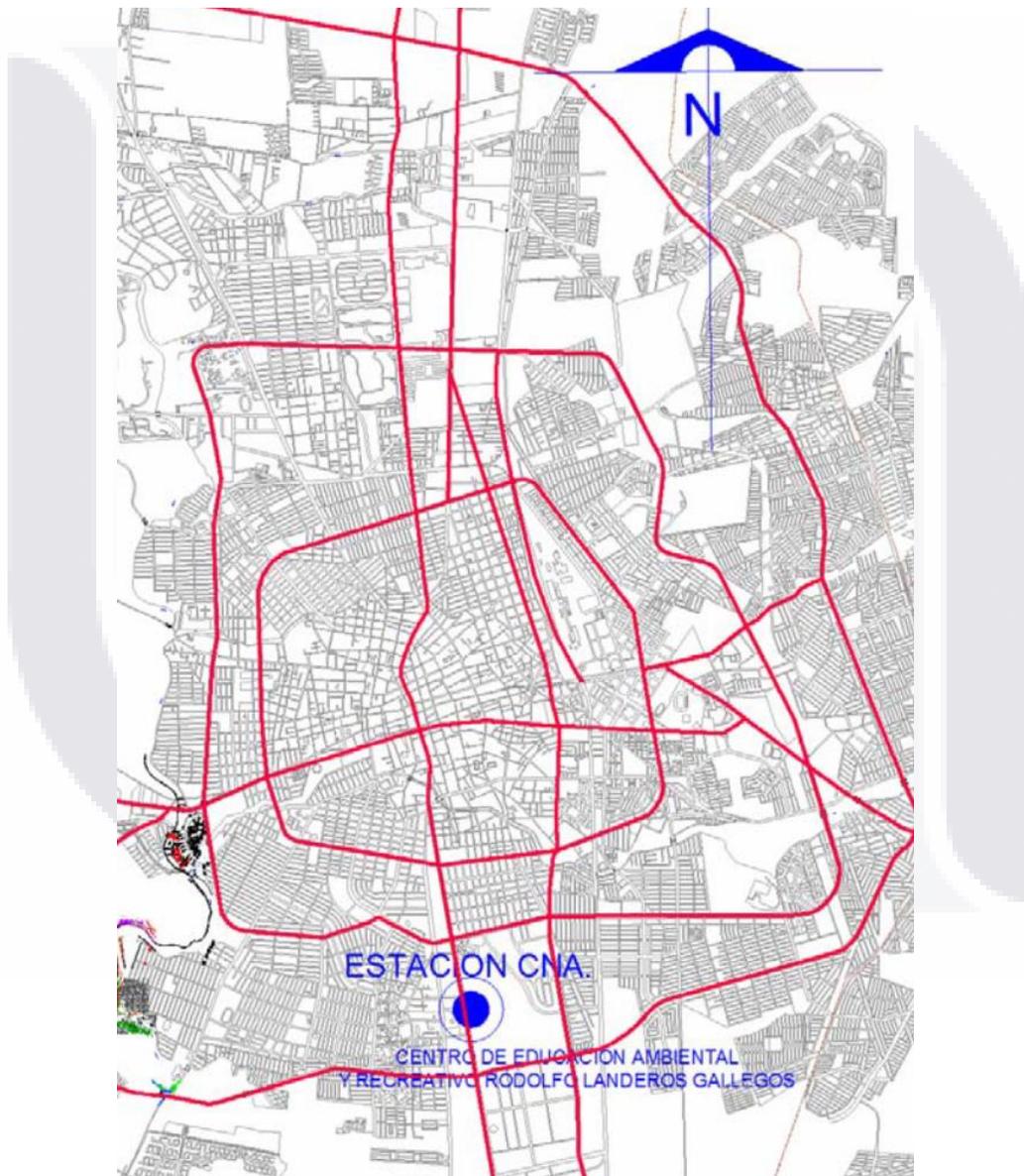


Figura 3.4 Localización de la Estación meteorológica de CONAGUA en Aguascalientes.



Figura 3.5 Estación CNA, Estructura donde se encuentran los instrumentos que registran los vientos

El sistema principal para registrar las magnitudes de vientos cuenta con instrumentos de anemómetro que mide las velocidades y el anemocinemografo que funciona a base de un sistema de relojería, en la cual sirve para registrar las intensidades y direcciones de vientos medidas por el anemómetro.

El anemómetro se encuentra en la planta alta de la estructura y puesto sobre una antena. El instrumento está a 10 metros sobre la superficie del terreno. El anemómetro en la Figura 3.6 muestra que tiene 3 tazas de 5'' de diámetro y dos veletas en los extremos para registrar las direcciones del viento.



Figura 3.6 Estación CNA, Anemómetro con sus tres tazas y dos veletas

Cuando el anemómetro registra una velocidad de viento la información se transmite a un aparato que está adentro de la oficina la cual es el anemocinemografo. Este aparato registra los vientos de manera continua las 24 horas. El anemocinemografo contiene un velocímetro que mide velocidades de 0 a 200 km/h y una rosa de vientos que mide la dirección del viento. Los registros del instrumento se pasan a una hoja papel graficado en la cual tiene intervalos de 40 km/h y los limites son de 0 a 200 km/h.

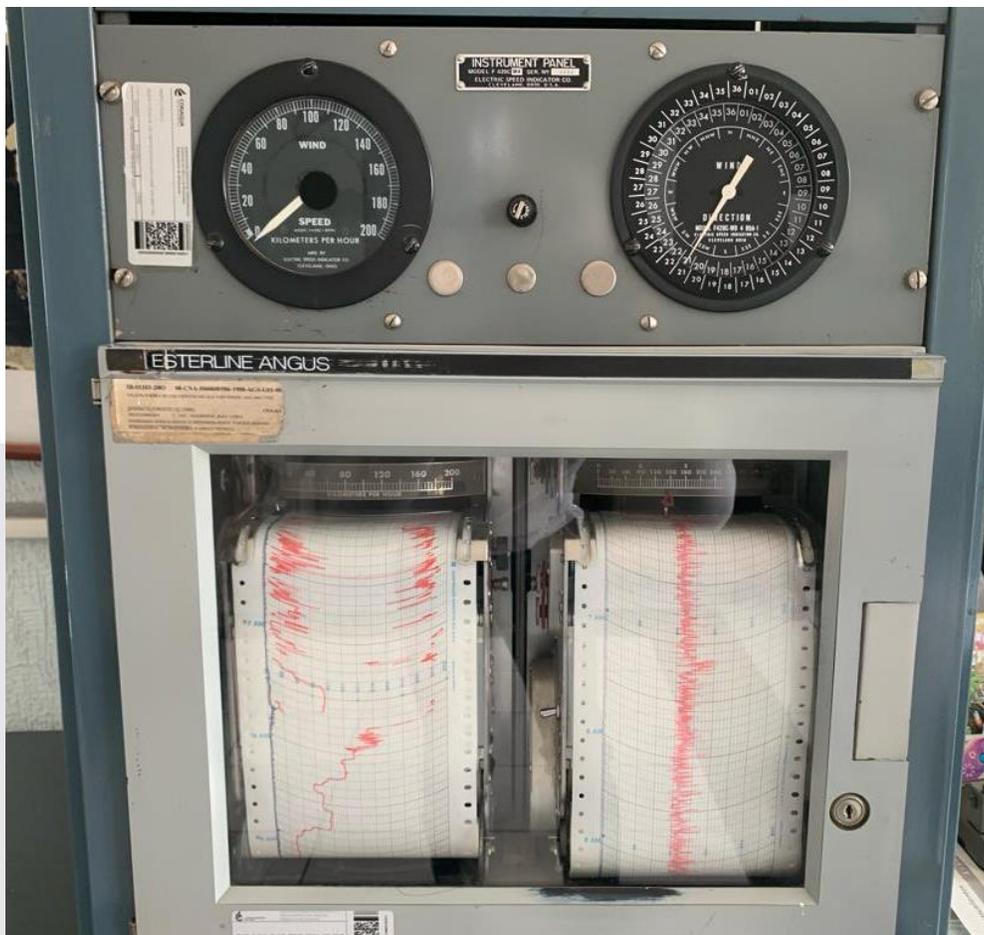


Figura 3.7 Estación CNA, Anemocinemografo y su velocímetro, rosa de vientos y papel graficador

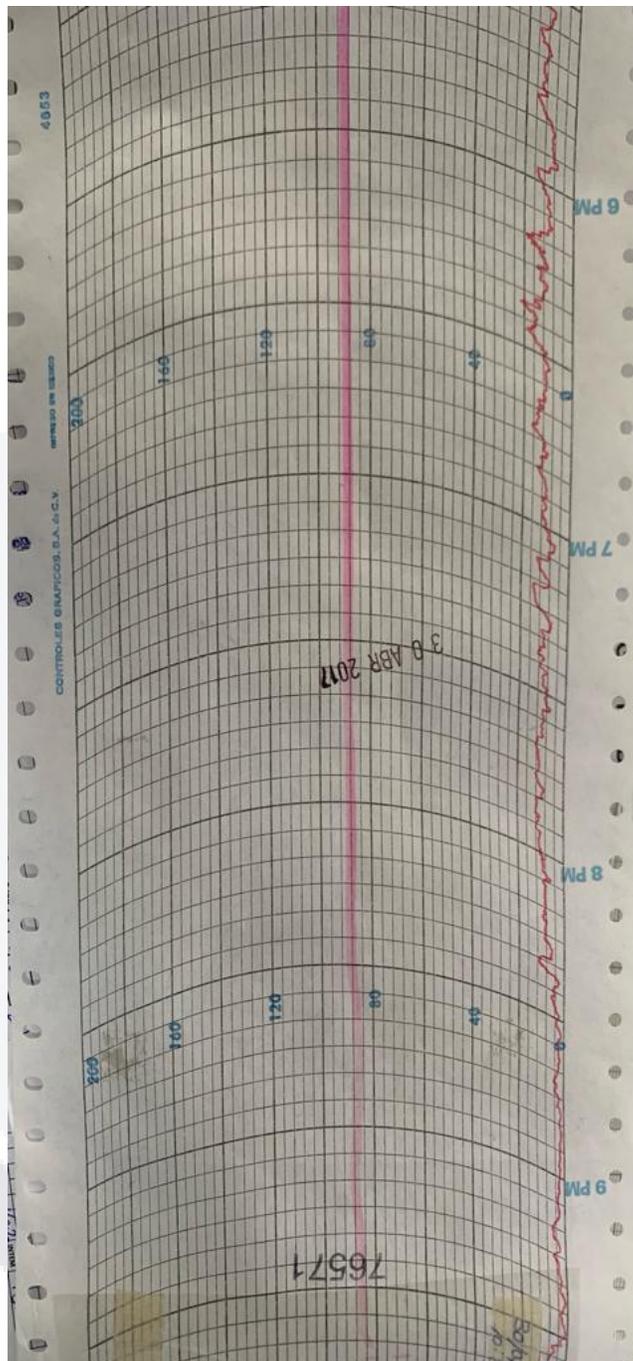


Figura 3.8 Estación CNA, Papel Graficador

Un factor importante que se toma en cuante para el comportamiento de los vientos es la rugosidad del terreno. El terreno de la estación meteorológica es relativamente plano sin grandes obstrucciones que podrían afectar la medición de vientos, solamente al este se encuentre una zona

de lomas a aproximadamente 50 metros. En cuanto a la rugosidad del terreno se tomaron imágenes en la cual se mira los 4 puntos cardinales de donde el anemómetro mide los vientos.



Figura 3.9.1 Estación CNA, Vista Norte



Figura 3.9.2 Estación CNA, Vista Este



Figura 3.9.3 Estación CNA, Vista Oeste



Figura 3.9.4 Estación CNA, Vista Sur

Registro de direcciones y velocidades de los vientos deducidos de los diagrama

Dia: 1 Mes: Junio Año: 2022

h	Cada 15 minutos		Máximo en 1 hora	
	Velocidad k/h	Dirección (Grados)	Velocidad k/h	Dirección (Grados)
0:15	-			
0:30	-			
0:45	-			
1:00	-			
1:15	-			
1:30	-			
1:45	-			
2:00	-			
2:15	-			
2:30	-			
2:45	-			
3:00	-			
3:15	-			
3:30	-			
3:45	-			
4:00	-			
4:15	-			
4:30	-			
4:45	-			
5:00	-			
5:15	-			
5:30	-			
5:45	-			
6:00	-			
6:15	-			
6:30	-			
6:45	-			
7:00	-			
7:15	-			
7:30	-			
7:45	-			
8:00	-			
8:15	-			
8:30	-			

Figura 3.11 Estación CNA, archivo digital de registro de información en Excel

En la Figura 3.10 b se puede observar que al final de la hoja se escribe un resumen donde se registra la máxima velocidad del día, la media de la velocidad del día y la velocidad y dirección dominante del día. En la Figura 3.11 se muestra que se toma 4 medidas por hora, la cual es cada 15 minutos y esto da un total de 96 registros por día y también se toma registros por hora.

3.4 Interpretación de Información

La Comisión Nacional del Agua proporcionó un documento digital en Microsoft Excel con los registros de viento de junio 2009 a noviembre 2021. Los registros de viento se obtienen cada 15 minutos con un total de 96 registros por día. Lo que dio un total de 421,393 registros.

El siguiente paso para el procesamiento de datos fue la depuración de los registros en el documento de Excel. Se revisaron los registros para que la información obtenida fuera la correcta y eliminar los errores que pudieran perjudicar el verdadero valor de los resultados. Se muestra la Tabla 3.2 y Tabla 3.3 de como los datos venían originalmente, dados por CONAGUA y luego el resultado final de cómo se reorganizó los valores y columnas de una manera que se pudiera analizar visualmente más fácil. Se revisó el documento de Excel para que no tuviera duplicados, se creó una columna en Excel donde medía la continuidad de los días y así se pudo verificar que todos los datos durante los 13 años estuvieran registrados correctamente. De los 13 años analizados hay pocos datos faltantes. También se encontraron errores por duplicación de registros, lo cual fue importante para tomar en cuenta solo las magnitudes máximas de viento.

N'mero	Fecha	Hora	Vel_00 :15	Dir_00: 15	Vel_00 :30	Dir_00: 30	Vel_00 :45	Dir_00: 45	Vel_00 :60	Dir_00: 60
39982. 04	18/06/2 009	00:15- 01:00	1.4	130	1.4	90	1.4	80	0	C
39982. 08	18/06/2 009	01:15- 02:00	0	C	1.4	70	0	C	0	C
39982. 13	18/06/2 009	02:15- 03:00	0	C	0	C	0	C	0	C
39982. 17	18/06/2 009	03:15- 04:00	0	C	0	C	0	C	0	C
39982. 21	18/06/2 009	04:15- 05:00	0	C	0	C	0	C	0	C
39982. 25	18/06/2 009	05:15- 06:00	0	C	0	C	0	C	0	C
39982. 29	18/06/2 009	06:15- 07:00	0	C	0	C	0	C	0	C
39982. 33	18/06/2 009	07:15- 08:00	0	C	0	C	0	C	0	C
39982. 38	18/06/2 009	08:15- 09:00	0	C	0	C	0	C	0	C

Tabla 3.2 Datos Originales de CONAGUA

c	fecha	salto fecha	hora	velocidad	direccion
1633	6/18/09	1	00:15-01:00	1.4	130
1634	6/18/09	1	00:15-01:00	1.4	90
1635	6/18/09	1	00:15-01:00	1.4	80
1636	6/18/09	1	00:15-01:00	0.55	NA
1637	6/18/09	0	01:15-02:00	0.55	NA
1638	6/18/09	0	01:15-02:00	1.4	70
1639	6/18/09	0	01:15-02:00	0.55	NA
1640	6/18/09	0	01:15-02:00	0.55	NA
1641	6/18/09	0	02:15-03:00	0.55	NA
1642	6/18/09	0	02:15-03:00	0.55	NA

Tabla 3.3 Datos Corregidos y Depurados

Con la información de Excel depurada, se agregaron los extremos de vientos registrados en la estación de 1981 a 2008, los cuales están registradas en compilaciones de hojas de registro obtenidos físicamente por el Técnico responsable en turno. Con los extremos de vientos de 1981 a 2021, en un total de 37 años, la información se exportó al software estadístico R.

4. Modelos de Probabilidad

Para evitar un accidente en una estructura causado por un desastre natural, como velocidades extremas de vientos, debe medirse el riesgo de que de dicho evento ocurra. Para lo cual, hay que analizar y modelar la distribución de los vientos extremos. En general se puede tener la idea que para poder evitar accidentes se debe de estudio el promedio de una fuerza que actúa sobre una estructura ocasionalmente, pero son los extremos los que causan que una estructura falle.

En estadística se estudia los valores extremos de la cual nos da tres tipos de distribuciones de probabilidad. Con pruebas y modelos estadísticos se puede deducir a qué tipo de distribución pertenecen los vientos y poder tener una confiable predicción de cómo los vientos se comportarían en el futuro. Para saber el tipo de distribución extrema la cual pertenecen los vientos hay que estudiar la cola derecha de la función de densidad correspondiente. (Aryuyuen, Bodhisuwan, 2022)

La teoría de valores extremos es el área de la estadística que estudia la distribución de los máximos y mínimos de una variable aleatoria de interés. En nuestro caso aplica la teoría de valores máximos. El modelo de distribución general de valores extremos (General Extreme Value GEV) es la familia de distribuciones de probabilidad para máximos, que son: Gumbel, Fréchet y Weibull. (Castillo, E., Hadi, Ali, 2005)

Sea X una variable aleatoria de distribución GEV. Su función de distribución es

$$G_{GEV}(x) = \begin{cases} \exp \left(- \left(1 + s \left(\frac{x-a}{b} \right) \right)^{-1/s} \right), & s \neq 0, \\ \exp \left(-e^{-\frac{x-a}{b}} \right), & s = 0, \end{cases} \quad (3.1)$$

con $1 + s \left(\frac{x-a}{b} \right) > 0$, donde los parámetros a , b y s son de localización, escala y forma; respectivamente. El espacio paramétrico es

$$-\infty < a < \infty, \quad b > 0 \quad \text{y} \quad -\infty < s < \infty.$$

El parámetro de mayor interés es el de forma s , el cual caracteriza la forma de la cola derecha de la distribución de probabilidad. La familia de distribuciones GEV es versátil. Esta incluye distribuciones con cola derecha pesadas, ligeras y recortadas. Para clasificar a que tipo de familia de distribuciones de extremos pertenece el comportamiento de vientos, se organizan dependiendo del valor de forma. Si $s > 0$, la distribución es Fréchet. En cambio, cuando $s < 0$, la distribución es Weibull. La distribución Gumbel es el caso $s = 0$, que corresponde al límite cuando $s \rightarrow 0$.

Al derivar respecto de x en la expresión (3.1), se obtiene la función de densidad GEV para máximos

$$g_{GEV}(x) = \begin{cases} \frac{1}{b} \left(1 + s \left(\frac{x-a}{b} \right)^{-(1+1/s)} \right) \exp \left(- \left(1 + s \left(\frac{x-a}{b} \right)^{-1/s} \right) \right), & s \neq 0, \\ \frac{1}{b} e^{-\frac{x-a}{b}} \exp \left(-e^{-\frac{x-a}{b}} \right), & s = 0, \end{cases}$$

La función cuantil es la inversa de la función de distribución (3.1)

$$Q_{GEV}(p) = \begin{cases} a + \frac{b}{s} [(-\log p)^{-s} - 1], & s \neq 0 \\ a - b \log(-\log p), & s = 0 \end{cases}$$

para $0 < p < 1$. En el Capítulo 6, más adelante, se usará esta función para calcular los períodos de retorno de ciertas velocidades de vientos.

La esperanza y varianza de la variable aleatoria X de distribución GEV para máximos son respectivamente:

$$E(X) = a - \frac{b}{s} + \frac{b}{s} \Gamma(1 - s)$$

$$Var(X) = \frac{b^2}{s^2} [\Gamma(1 - 2s) - (\Gamma(1 - s))^2]$$

donde $\Gamma(\alpha)$ denota la función gamma

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} t^{\alpha-1} e^{-t} dt, \quad \alpha > 0.$$

Note que la esperanza de la variable aleatoria X es finita siempre que $s < 1$. Este es el caso de las distribuciones Weibull, Gumbel, junto con Fréchet cuando $0 < s < 1$. La varianza de X es también finita, siempre que $s < 1/2$. Este es el caso de todas las distribuciones GEV para máximos, excepto para la distribución Fréchet cuando $s \geq 1/2$. El hecho que la distribución Fréchet tenga esperanza infinita cuando $s \geq 1$ o varianza infinita si $s \geq 1/2$, se explica por el rol del parámetro s en la pesadez de la cola derecha, donde la cola es más pesada conforme crece s .

4.1 Distribuciones de Extremos para Máximas

En esta sección se describirán las propiedades básicas de las tres distribuciones GEV para máximos: Fréchet, Weibull y Gumbel.

La teoría de valores de valores extremos incluye tres familias de distribución extrema las cuales son Gumbel, Fréchet y Weibull. (Kotz, S., Nadarajah, S., 2000) La función de distribución Gumbel o Tipo I es

$$G(x) = \exp\left(-e^{-\frac{x-a}{b}}\right) \quad -\infty < x < \infty. \tag{3.2}$$

donde $-\infty < a < \infty$ y $b > 0$. Su función de densidad es

$$g(x) = \frac{1}{b} e^{-\frac{x-a}{b}} \exp\left(-e^{-\frac{x-a}{b}}\right).$$

Esta distribución de probabilidad tiene una cola derecha ligera y representa una transición entre los modelos de probabilidad Fréchet y Weibull. De hecho, como ya se mencionó, corresponde al límite cuando s tiende a cero. La expresión (3.2) se escribe como

$$G(x) = \exp(-e^{-y})$$

donde $y = (x-a)/b$ y $-\infty < x < \infty$. La correspondiente función de densidad es

$$g(x) = e^{-y} \exp(-e^{-y})$$

La función de distribución de Fréchet o Tipo II es

$$G(x) = \exp(-y^{-1/s}),$$

donde $y = 1 + s \left(\frac{x-a}{b}\right) > 0$ y $s > 0$. Su función de densidad es

$$g(x) = \frac{1}{b} y^{-(1+1/s)} \exp(-y^{-1/s})$$

Esta distribución de probabilidad tiene una cola derecha pesada. Su pesadez se modula por el parámetro de forma s . En cambio, la cola izquierda está recortada, según $x > a - b/s$.

La función de distribución Weibull o Tipo III es

$$G(x) = \exp(-(-y)^{-1/s}), \tag{3.3}$$

donde $y = -\left(1 + s \left(\frac{x-a}{b}\right)\right) < 0$ y $s < 0$. Su función de densidad es

$$g(x) = \frac{1}{b} (-y)^{-(1+1/s)} \exp(-(-y)^{-1/s}) \tag{3.4}$$

Esta distribución de probabilidad tiene una ligera cola derecha, de hecho recortada, según $x < a - b/s$. En cambio, la cola izquierda es ligera sin restricciones. A esta distribución Weibull para máximos también se le conoce como distribución Weibull Reversa (Reversed Weibull). Cabe mencionar que las expresiones (3.3) y (3.4) se obtiene de (6) en (Aryuyuen, Bodhisuwan, 2022), luego de corregir un error en el paréntesis de la base de la potencia. De hecho, la forma de las expresiones (3.3) y (3.4) son compatibles con (3.60) y (3.59) respectivamente en (Castillo, E., Hadi, Ali, 2005).

4.2 Distribuciones de Extremos y Programa de R

La base de datos analizada se compone de la máxima la velocidad de vientos por cada mes y año, durante el período 1981-2021. Por lo que se analizaron 13 muestras de datos con un tamaño de muestra global de 37 años. Recuerde que hay datos faltantes o que fueron suprimidos por su poca confiabilidad. En el último renglón de la Tabla 4.1 se muestra el tamaño de muestra en años de cada conjunto de datos.

La información se analizó en el programa de estadística y probabilidad de R. El análisis estadístico de los vientos se realizó mediante este software de R, (RStudio, 2022) así como con el paquete “EVD (Extreme Value Distributions)”, lo cual ayudó a identificar el tipo de extremo que se ajustaba por mes y por año. El programa de R también se usó para crear tablas de estimaciones, que incluían los parámetros de forma, escala y localización, y el error estándar que permitieron determinar el tipo de distribución que aplicaba a cada una de las 13 poblaciones en estudio.

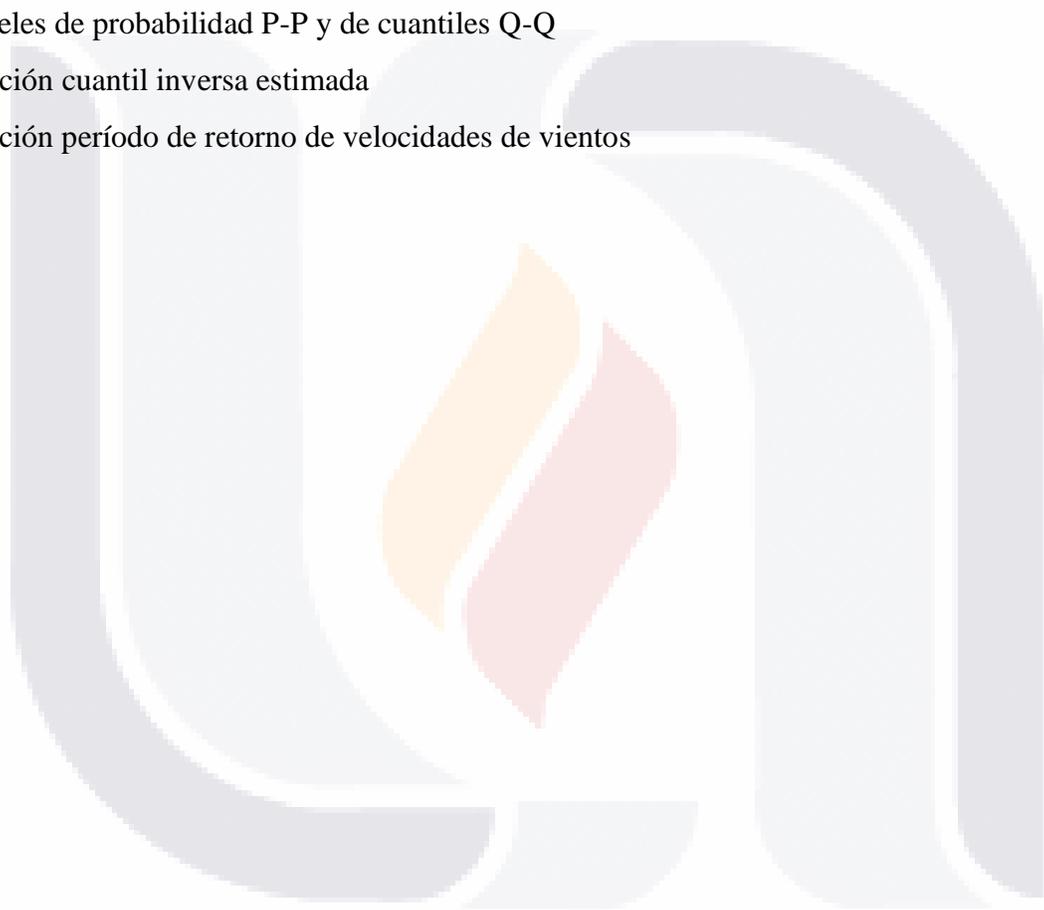
año	ene	feb	mar	abril	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	máxima anual
1981	14	10	-	-	15	-	-	-	-	-	-	-	15
1982	12	15	8	15	12	20	17	18	16	16	9	16	20
1983	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1984	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9	10.1	14	14
1985	12.5	8.1	11	9	8	14	6	10	6	6	7	7	14
1986	7	8	8	8	7	12	8	6	6	5	7	10	12
1987	10	8	8	7	2.5	7	8	5	6	12	8	6	12
1988	9	9	8	7	9	-	7	7	7	5	7	7	9
1989	8	7	9	7	11	10	8	-	-	-	-	-	11
1990	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1991	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1992	7	8	8	7	9	13	7	7	13	7	6	8	13
1993	8	8	7	6	7	21	8	9	-	-	-	5	21
1994	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1995	8	-	-	-	12	8	9	8	8	8	7	10	12
1996	9	10	11	12	11	10	8	10	9	8	7	7	12
1997	12	12	14.5	12	11	12	6	11	8	8	9	10	14.5
1998	9	12	10	10	9	9	10	16	7	9	7	7	16
1999	8	9	10	12	18	7	8	5	6	7	6	-	18
2000	6.7	-	9.4	11.1	11.1	7.8	10.8	8.9	9.4	-	9.2	5.6	11.1
2001	11.9	8.9	13.3	9.2	8.9	8.9	10	8.9	7.8	-	-	7.8	13.3
2002	-	-	8	8	8	6	6	12.2	8.3	9.4	9.7	10.6	12.2
2003	7.2	11.1	10.6	7.8	11.1	8.9	8.3	11.1	8.9	9.4	7.2	7.8	11.1
2004	9.4	8.1	9.4	10	9.7	8.9	8.6	9.4	7.8	8.9	8.9	8.9	10
2005	7.8	8.9	11.9	10.3	10.3	8.3	10	11.1	8.1	7.8	7.8	7.3	11.9
2006	8.9	8.6	10	10	12.8	9.4	20	8.1	7.8	10.6	7.8	10.8	20
2007	10	10.3	10.6	12.2	10.6	10.3	7.8	8.1	10.3	9.2	8.9	6.4	12.2
2008	7.2	7.2	11.7	10	10.6	9.4	8.9	10	6.4	6.7	7.5	8.9	11.7

2009	-	-	-	-	-	6.9	7.2	6.7	4.4	5.6	3.3	7.8	7.8
2010	5.6	6.7	4.4	3.9	4.4	5.8	6.7	6.1	5.6	5.3	4.4	-	6.7
2011	4.7	10	6.7	6.1	10.6	8.3	5.6	6.4	5.6	7.2	6.7	7.8	10.6
2012	6.7	7.2	6.4	6.1	6.7	7.2	8.3	6.7	5.6	6.1	4.2	5.6	8.3
2013	8.9	6.7	10	4.4	7.8	6.7	7.8	5.6	5	6.7	4.4	5.3	10
2014	5.6	4.4	7.8	5.6	6.7	8.3	5	5.6	5.6	4.4	6.7	5.6	8.3
2015	6.7	5.6	7.2	5.6	6.1	5.6	6.7	5.6	5.6	10	5.6	7.8	10
2016	6.1	5.6	10	7.8	8.3	7.8	6.7	6.7	5.6	6.7	7.8	9.4	10
2017	7.2	11.1	7.8	7.8	8.9	8.9	7.2	7.8	5.6	6.7	5.6	7.2	11.1
2018	6.1	6.7	11.1	8.3	8.9	10.6	10.6	11.1	5.6	5.6	8.1	8.3	11.1
2019	5.6	9.4	8.1	6.7	6.7	7.2	6.9	6.1	3.9	6.7	6.4	6.7	9.4
2020	11.1	12.2	6.7	10	9.7	5.6	6.1	7.2	8.3	5.6	6.1	6.7	12.2
2021	5.6	7.8	6.7	6.7	7.8	6.7	5.6	6.7	4.4	4.4	4.4	-	7.8
n	34	32	33	33	35	34	35	34	33	32	33	32	37

Tabla 4.1 Base de Datos con máximas de vientos del periodo de 1981-2021. Los datos faltantes se indican como “-”.

Con la estimación de los parámetros del modelo GEV para máximos de la velocidad de vientos se obtienen los siguientes elementos característicos del fenómeno de la velocidad de vientos:

- Función de densidad estimada y correspondiente ajuste de densidad en los histogramas
- Función de distribución estimada, con correspondiente ajuste en función de distribución empírica
- Tasa de excedencia o función de supervivencia estimada, con correspondiente ajuste en función de supervivencia empírica
- Papeles de probabilidad P-P y de cuantiles Q-Q
- Función cuantil inversa estimada
- Función período de retorno de velocidades de vientos



5. Ajuste del modelo

Para los modelos de probabilidad se utilizó el programa de R y la base de datos depurada. Se creó un código de programación del software estadístico R, específicamente ciclos, para estimar los parámetros del modelo GEV para máximos, tanto para cada mes como todos los datos del año. Los paquetes utilizados fueron “evd” y “fExtremes” (Stephenson and Ferro, 2022) y (Wuertz et al 2022) que pudieron interpretar las ecuaciones de distribución de extremos y sus parámetros de escala, forma y localización. Incluso se crearon gráficas para visualizar los tres parámetros y los extremos de los registros de vientos. La Tabla 5.1 muestra los valores de cada uno de los tres parámetros de la distribución de extremos de probabilidad.

Mes	Parámetro			Error Estándar		
	Localización	Escala	Forma	Localización	Escala	Forma
Enero	7.2526	1.793	0.0052	0.3586	0.268	0.1605
Febrero	7.861	1.9667	-0.1283	0.3841	0.2663	0.1092
Marzo	8.4528	2.0488	-0.2165	0.3935	0.2733	0.1095
Abril	7.4399	2.2312	-0.1357	0.4377	0.3129	0.1303
Mayo	8.4492	2.2270	-0.0813	0.4190	0.2886	0.0959
Junio	7.6647	1.8571	0.2491	0.3659	0.2987	0.1537
Julio	7.0303	1.4987	0.2117	0.2837	0.2245	0.1264
Agosto	6.9949	1.7781	0.2273	0.3618	0.2959	0.1789
Septiembre	6.0622	1.5688	0.132	0.3084	0.2358	0.1349
Octubre	6.479	1.6828	0.0811	0.3405	0.2572	0.1464
Noviembre	6.5153	1.7449	-0.4132	0.3348	0.2483	0.1222
Diciembre	6.9796	1.5591	0.1306	0.3154	0.2424	0.1487
Todos	10.6543	2.5812	0.0084	0.4762	0.3438	0.1192

Tabla 5.1 Estimación de parámetros del modelo GEV para máximos; por mes y todos, así como respectivo error estándar.

Después con los parámetros y máximas de registro de vientos se creó los histogramas que por último daba las curvas de densidad y de distribución. Las gráficas de ajuste de densidad en los histogramas validan el modelo considerado. Por ejemplo, al considerar la muestra aleatoria de $n = 37$ velocidades máximas de vientos, durante el período 1981-2021, el histograma correspondiente se aprecia en la Gráfica 5.1. Note que el ajuste de densidad GEV para máximos describe la forma

de la distribución de probabilidad de la población en estudio. Lo cual valida el modelo considerado. En particular, se aprecia que la distribución de probabilidad está sesgada a la derecha. De hecho, el valor estimado del parámetro de forma es $s = 0.0084$; véase Tabla 5.1. Por lo cual, la población de estudio tiene una distribución Fréchet, aunque muy cercana a la distribución Gumbel.

La Tabla 5.1 incluye además el error estándar de las estimaciones de los parámetros del modelo GEV para máximos. Por aproximación normal, se prueba el contraste de hipótesis $H_0: \theta = 0$ versus $H_1: \theta \neq 0$, donde θ es el parámetro de interés. Tanto la hipótesis nula como alternativa puede ser también de cola derecha o izquierda. En particular, es de interés el contraste de cola derecha para el parámetro de forma s :

$$H_0: s \leq 0 \text{ (Gumbel o Weibull para máximos)} \quad \text{vs.} \quad H_1: s > 0 \text{ (Fréchet para máximos)}. \quad (5.1)$$

Con esta idea, el estadístico de prueba es $Z = s/e.e.(s)$, de modo que se rechaza la hipótesis nula H_0 , con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$, siempre que

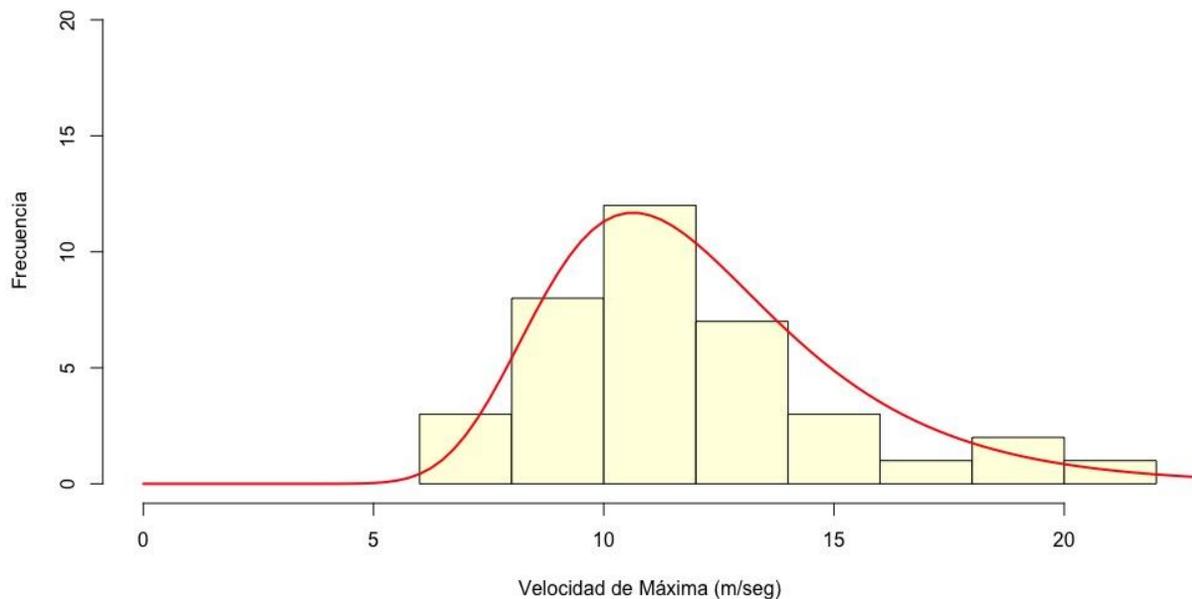
$$Z > z_\alpha = z_{0.05} = 1.649,$$

donde z_α denota el α -cuantil superior de la distribución normal estándar. La Tabla 5.2 muestra las conclusiones del contraste de hipótesis (5.1), para los datos de cada mes del año, así como de todo el año, junto con el respectivo estadístico de prueba y valor p .

mes	parámetro de forma s	estadístico de prueba z	valor p	conclusión
enero	0.0052	0.0324	0.4871	No se rechaza H_0 ; a favor de Gumbel o Weibull
febrero	-0.1283	-1.1749	0.8800	No se rechaza H_0 ; a favor de Gumbel o Weibull
marzo	-0.2165	-1.9772	0.9760	No se rechaza H_0 ; a favor de Gumbel o Weibull
abril	-0.1357	-1.0414	0.8512	No se rechaza H_0 ; a favor de Gumbel o Weibull
mayo	-0.0813	-0.8478	0.8017	No se rechaza H_0 ; a favor de Gumbel o Weibull
junio	0.2491	1.6207	0.0525	No se rechaza H_0 ; a favor de Gumbel o Weibull
julio	0.2117	1.6748	0.0470	Se rechaza H_0 ; a favor de Fréchet
agosto	0.2273	1.2705	0.1020	No se rechaza H_0 ; a favor de Gumbel o Weibull
septiembre	0.1320	0.9785	0.1639	No se rechaza H_0 ; a favor de Gumbel o Weibull
octubre	0.0811	0.5540	0.2898	No se rechaza H_0 ; a favor de Gumbel o Weibull
noviembre	-0.4132	-3.3813	0.9996	No se rechaza H_0 ; a favor de Gumbel o Weibull
diciembre	0.1306	0.8782	0.1899	No se rechaza H_0 ; a favor de Gumbel o Weibull
todos	0.0084	0.0705	0.4719	No se rechaza H_0 ; a favor de Gumbel o Weibull

Tabla 5.2 Conclusión del contraste de hipótesis (5.1), para el parámetro de forma s , para cada mes del año y todos los datos.

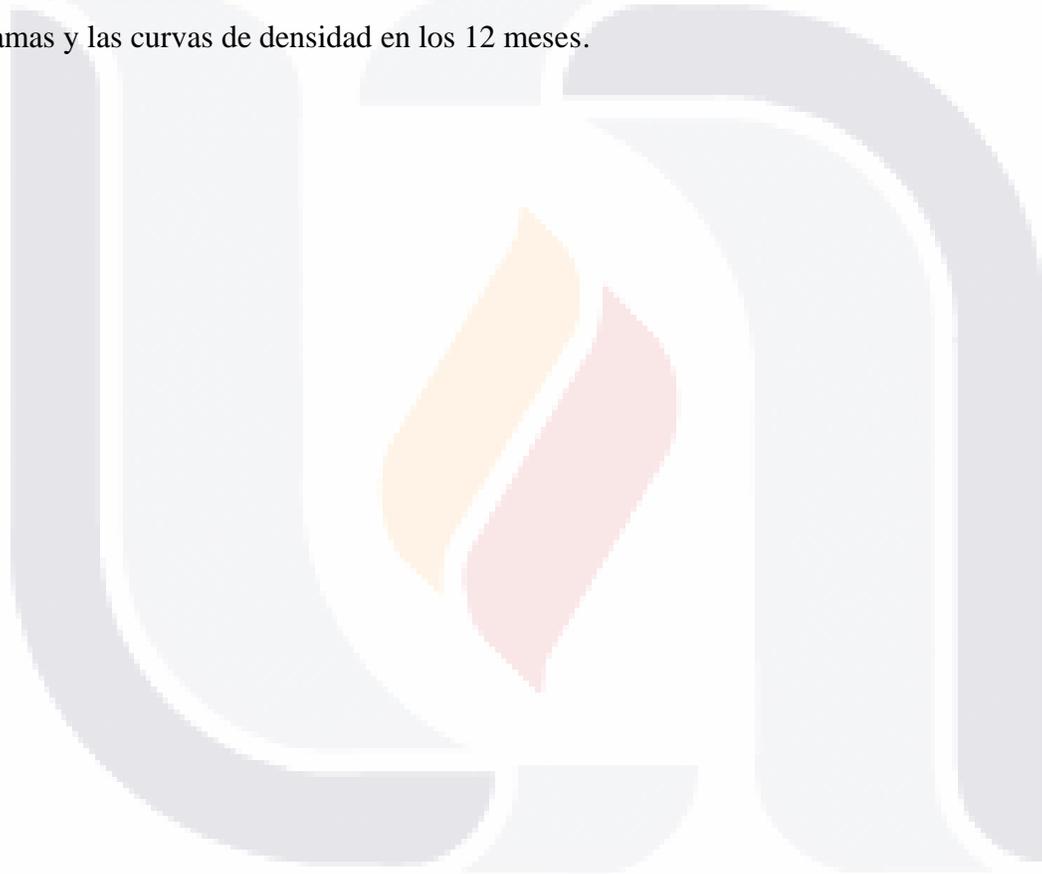
Distribuciones de valor extremo de vientos de 1981-2021

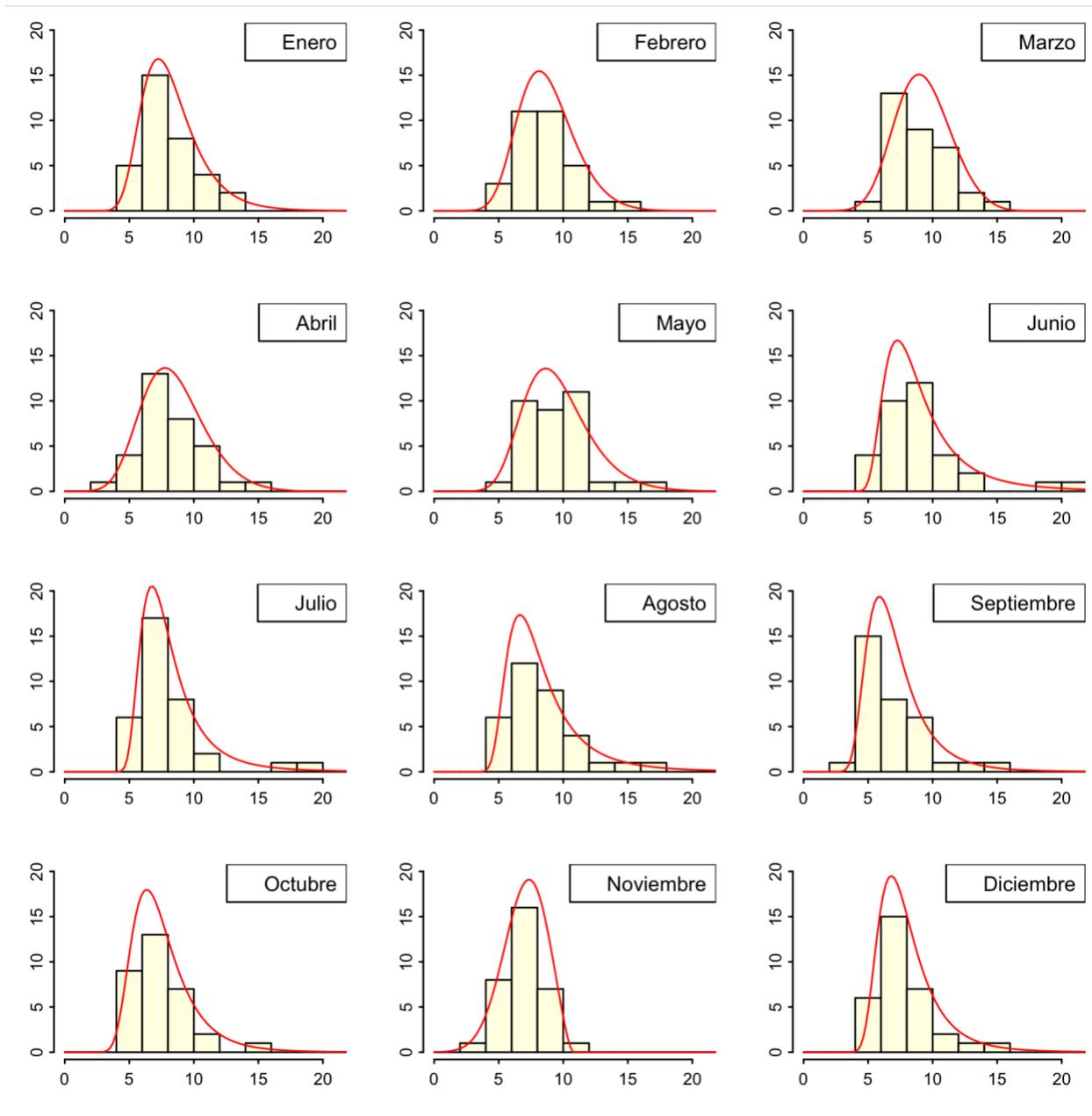


Gráfica 5.1 Histograma de velocidad máxima de vientos por año, de 1981-2021, con respectivo ajuste de densidad GEV para máximos.

5.1 Ajuste por Mes

La interpretación de los registros de viento no solo pueden ser analizados para diseñar una estructura sino también estudios de aeropuertos, trayectoria de emisiones CO de fábricas, etc. Por eso en esta investigación también se analizó las intensidades de vientos por mes. Ver los comportamientos de vientos por mes ayuda a visualizar cuales son las temporadas más tranquilas e intensas, porque los histogramas muestran cuales como se distribuyen los máximos, y a que meses les pertenece los máximos más intensos. En la Grafica 5.2 muestra como se ve los histogramas y las curvas de densidad en los 12 meses.

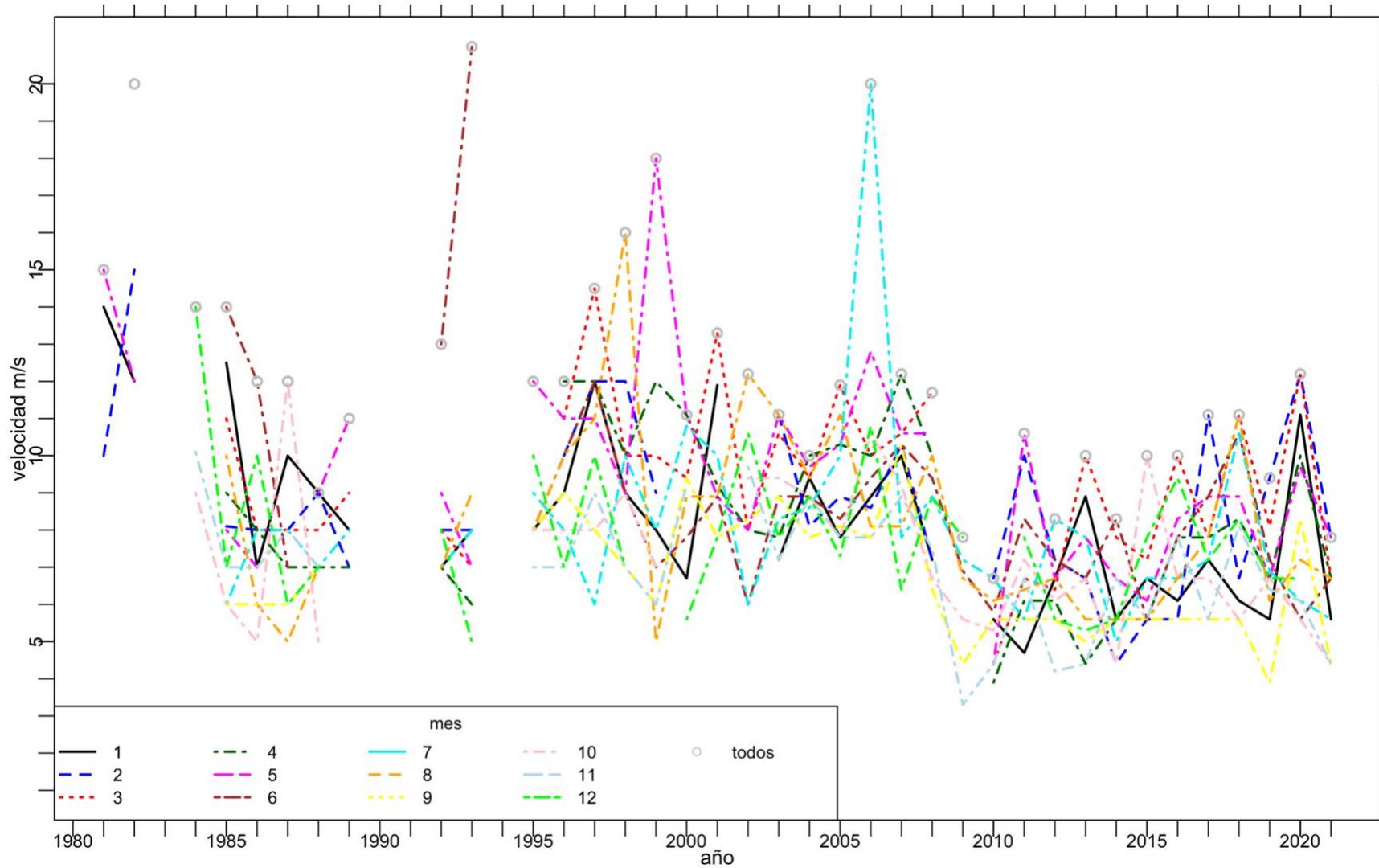




Gráfica 5.2 Histogramas de velocidad máxima de vientos de cada mes, de 1981-2021, con respectivos ajustes de densidad GEV para máximos.

5.2 Ajuste por Año

La base de datos de los registros de vientos se acota al período de 1981 al 2021. Cabe mencionar que la base de datos está incompleta. Además, hay algunas inconsistencias numéricas de la información obtenida en los años 80, pues la magnitud de la velocidad de vientos aparenta ser del orden de 10% de su valor típico. Por lo cual se omitieron datos de algunos meses completos. Analizando las máximas de registro de vientos por años se pueden notar otras tendencias que no se pueden visualizar por mes. En las gráficas de máximas muestra como unas décadas pueden tener intensidades substanciales comparado a otras décadas. Por esa razón las gráficas de periodo de retorno, mostradas más adelante, ayudan en el diseño de estructuras usando el valor de viento regionales. Ayuda porque las curvas de periodo de retorno nos dan el valor de cuantos años deberá de mantenerse una estructura. La Gráfica 5.3 muestra la gráfica de los datos de velocidad de vientos que fue analizada en este trabajo. Note los huecos de información de los años 80 y 90. Por otro lado, en el año 2009 parece ocurrir un quiebre estructural en la velocidad de vientos, en donde su magnitud disminuye drásticamente.

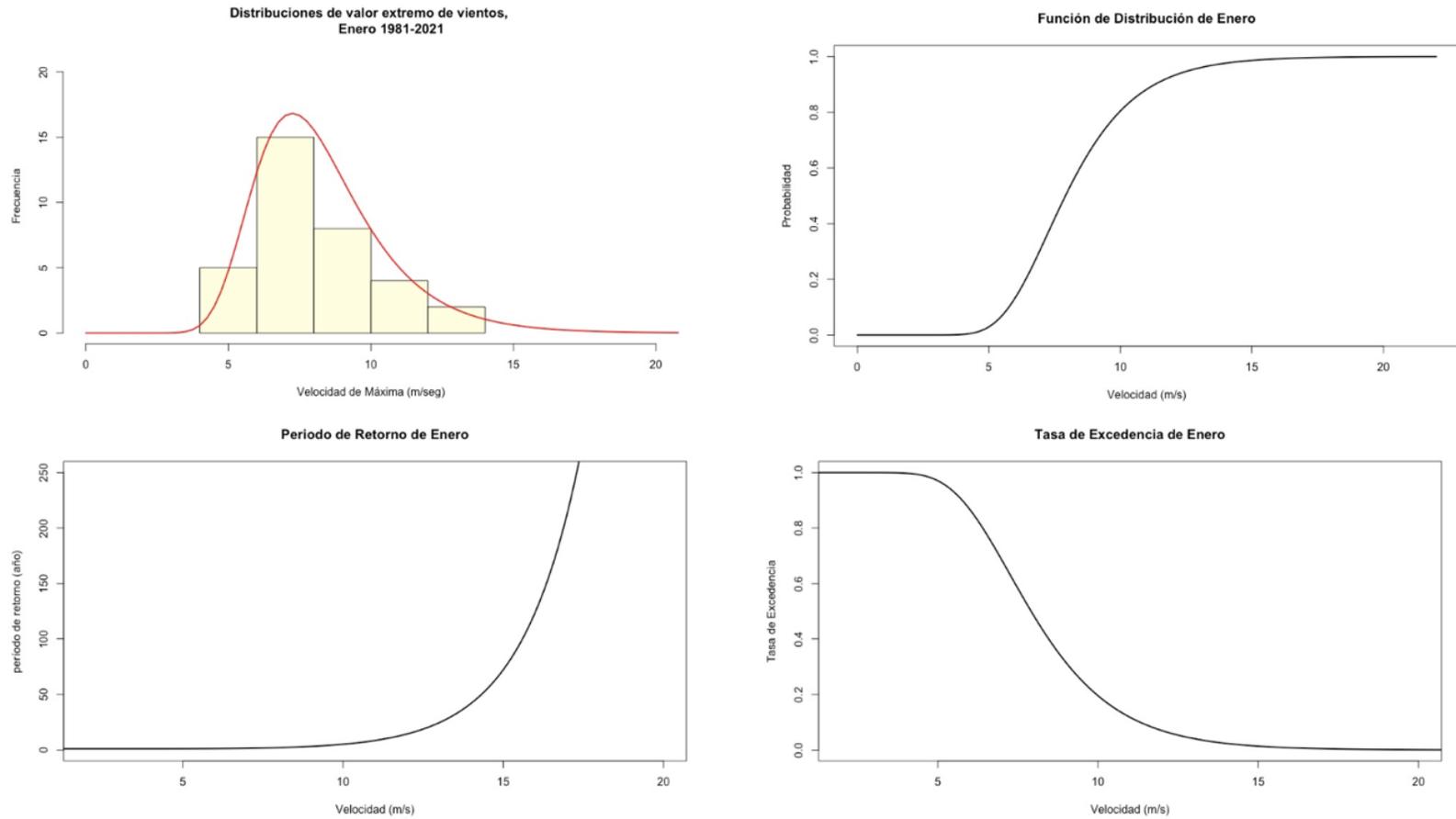


Gráfica 5.3 Registro de Máximas por Año

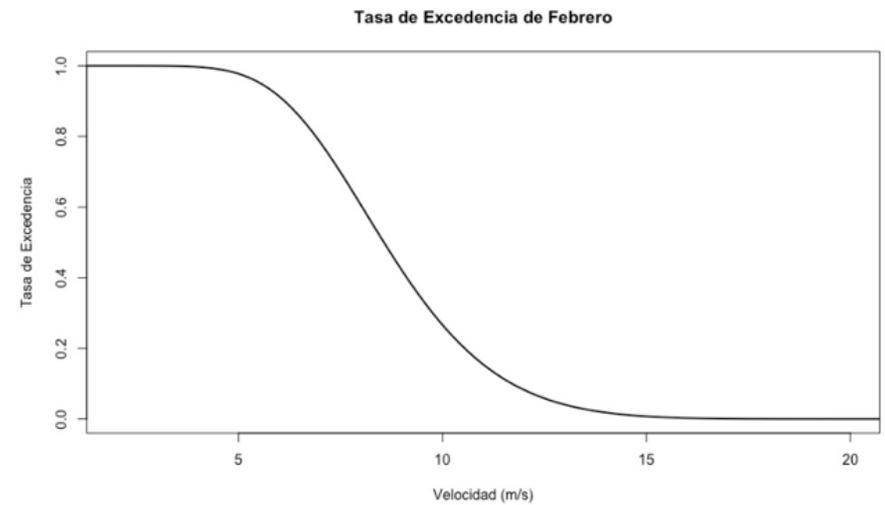
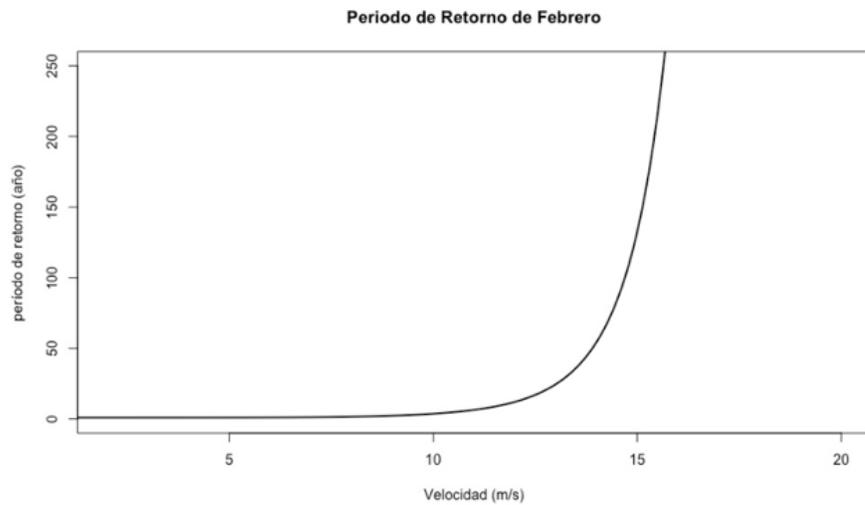
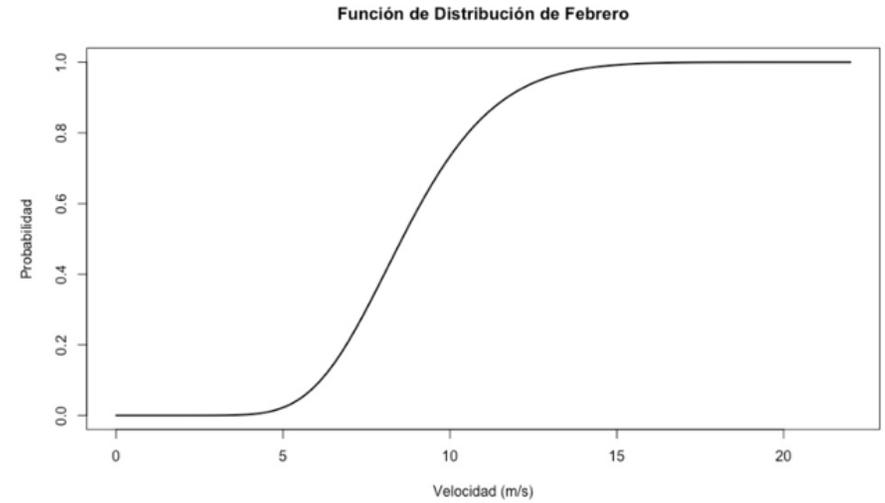
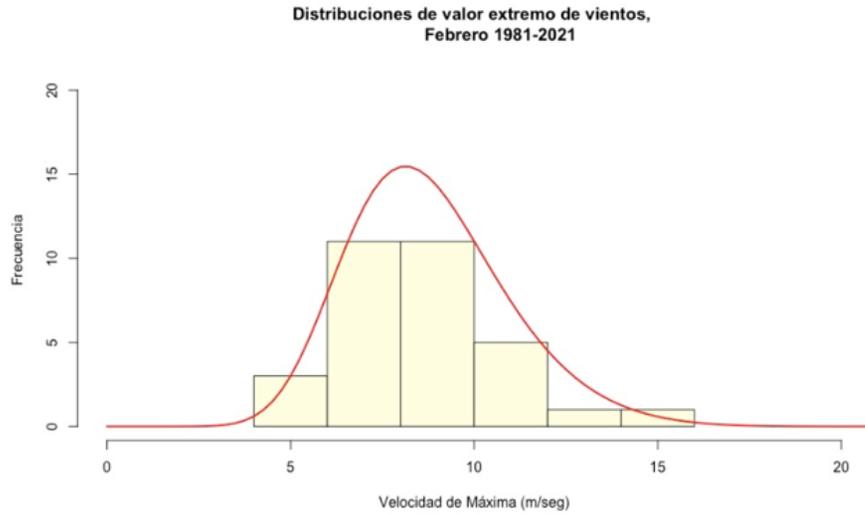
6. Interpretación de Resultados

Para analizar y entender resultados en estadística la manera más eficiente es a través de gráficas. El propósito es ver el panorama completo del estudio, como su distribución de las intensidades de vientos, los parámetros de localización, escala y forma, que temporadas son las más intensas o calmadas, etc. A continuación se presentan las gráficas de densidad, distribución, periodo de retorno y tasa de excedencia, por cada mes del año.

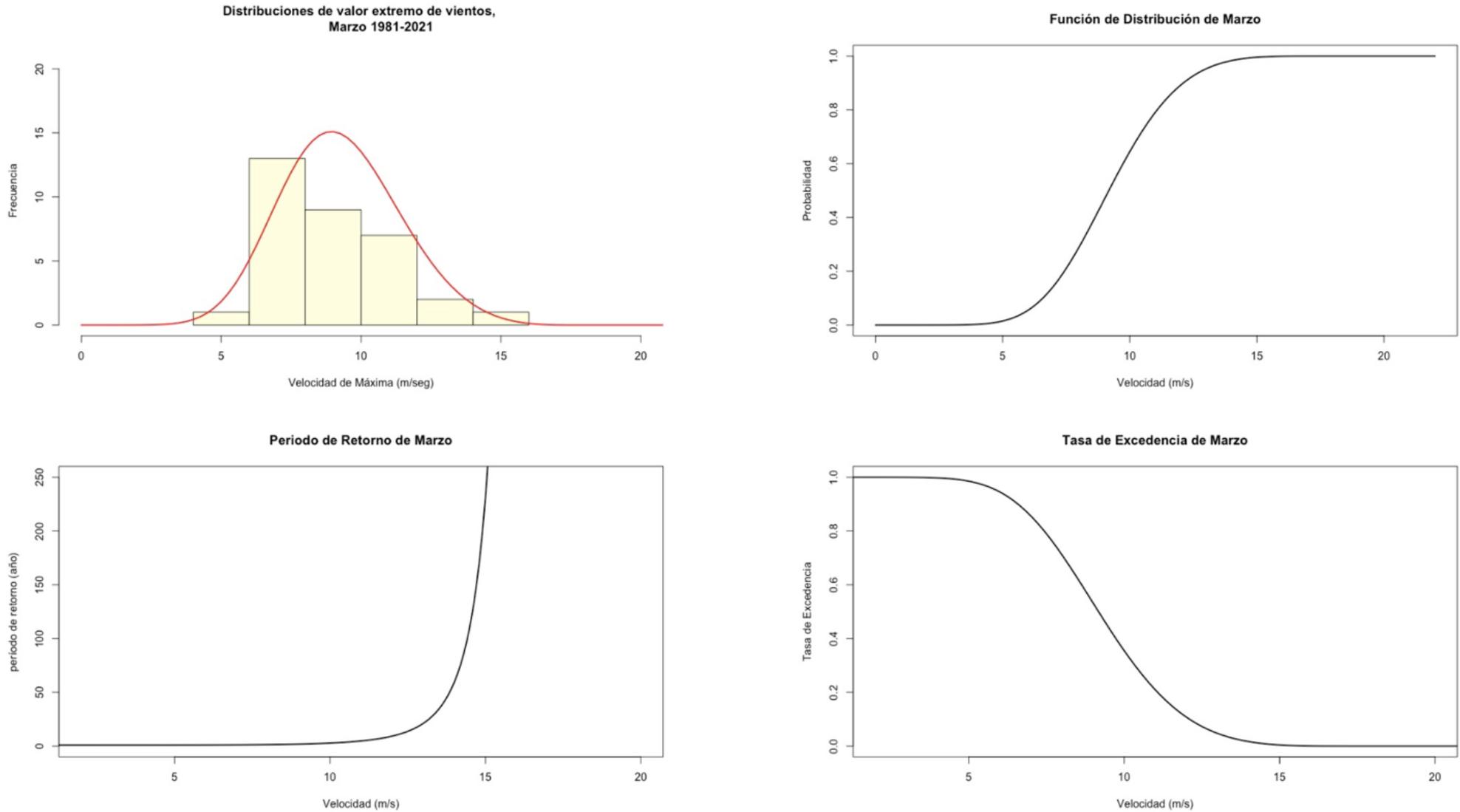




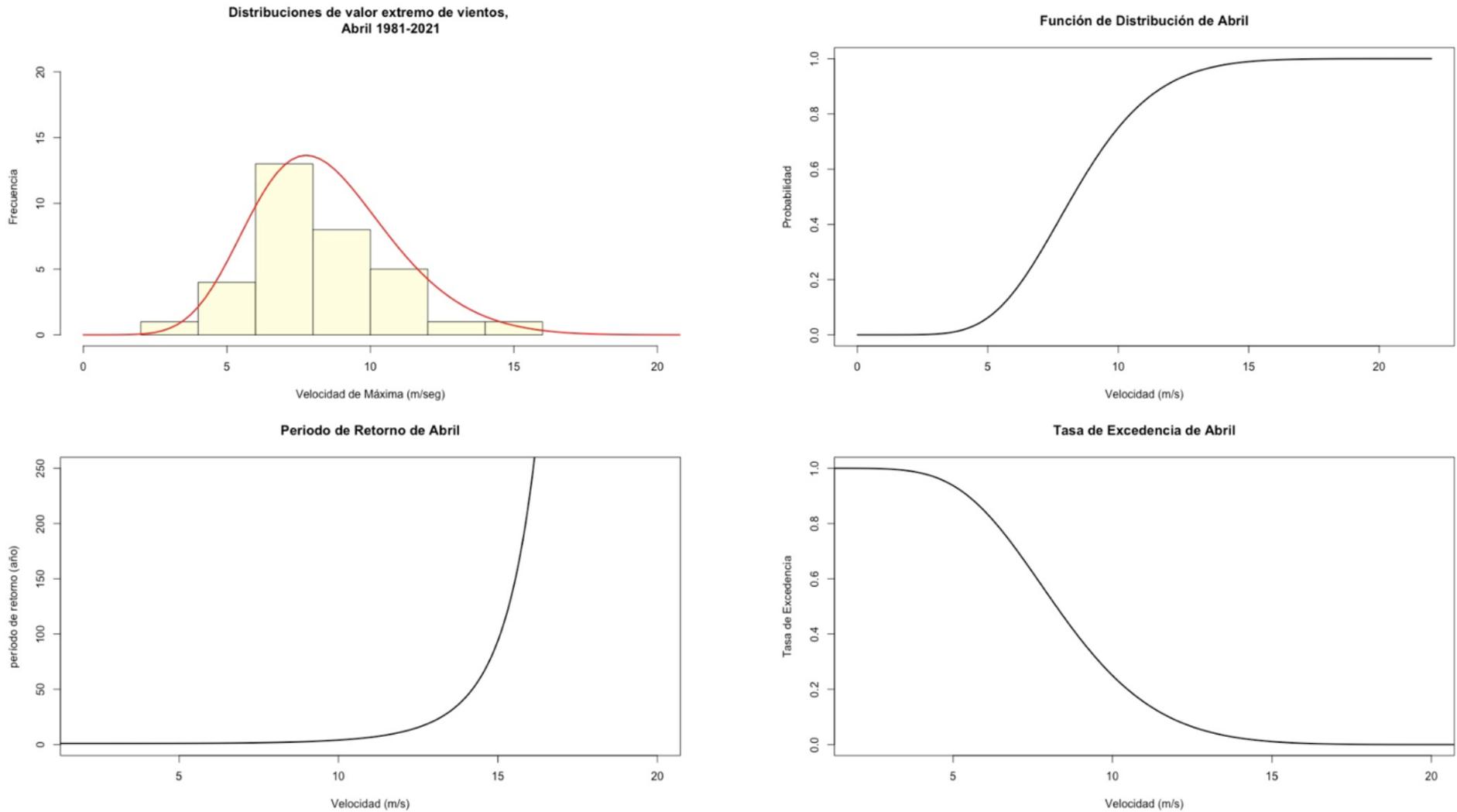
Gráfica 6.1 Gráficas generales para el mes de enero



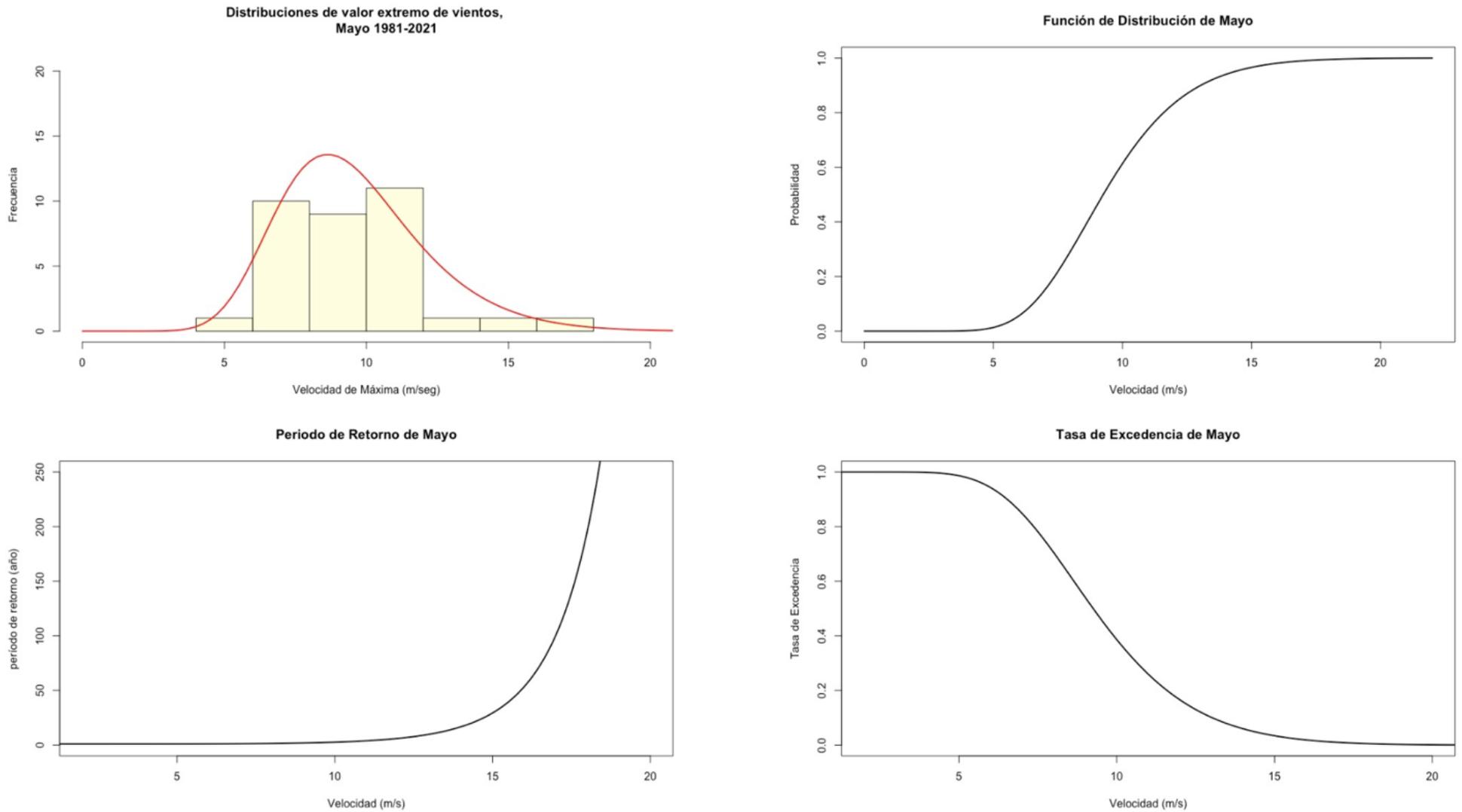
Gráfica 6.2 Gráficas generales para el mes de febrero



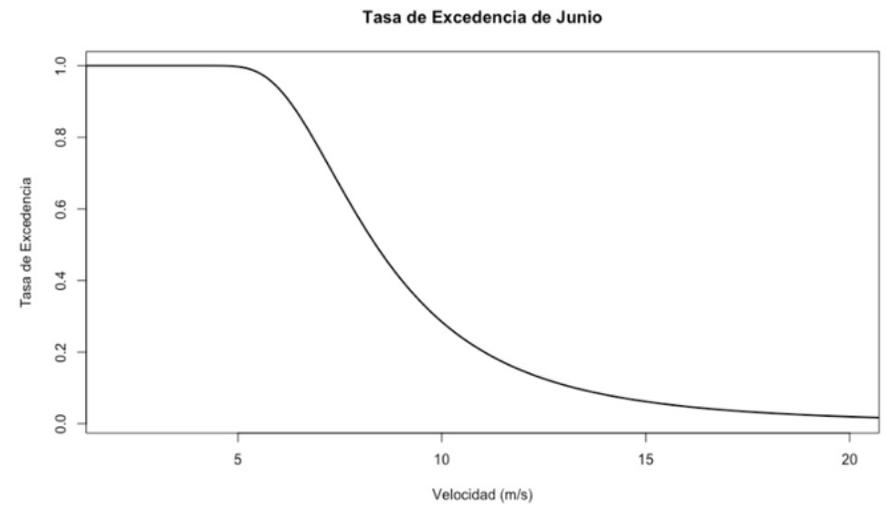
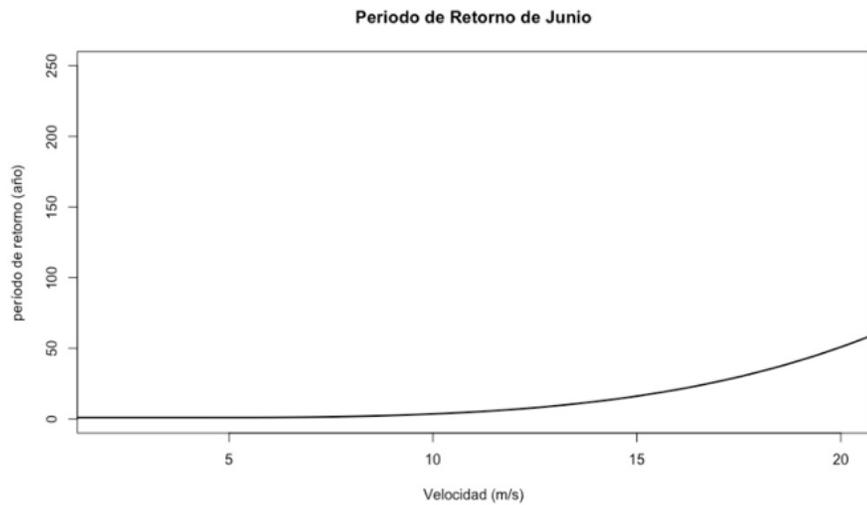
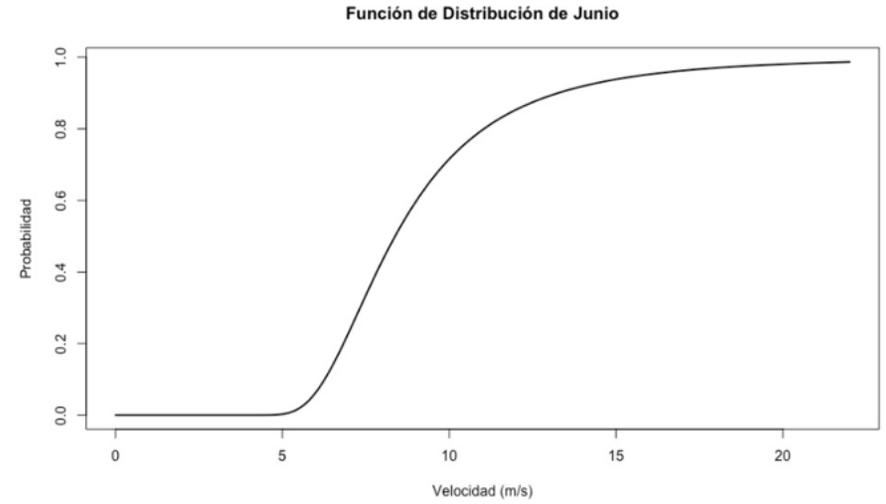
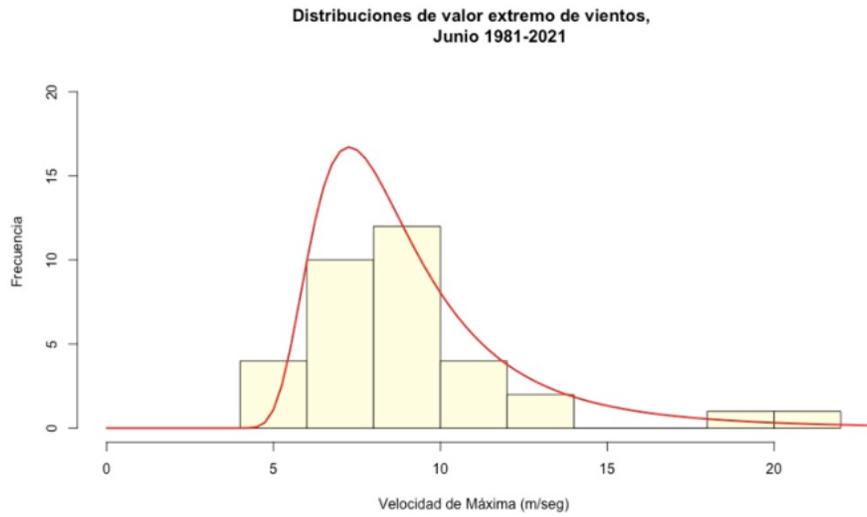
Gráfica 6.3 Gráficas generales para el mes de marzo



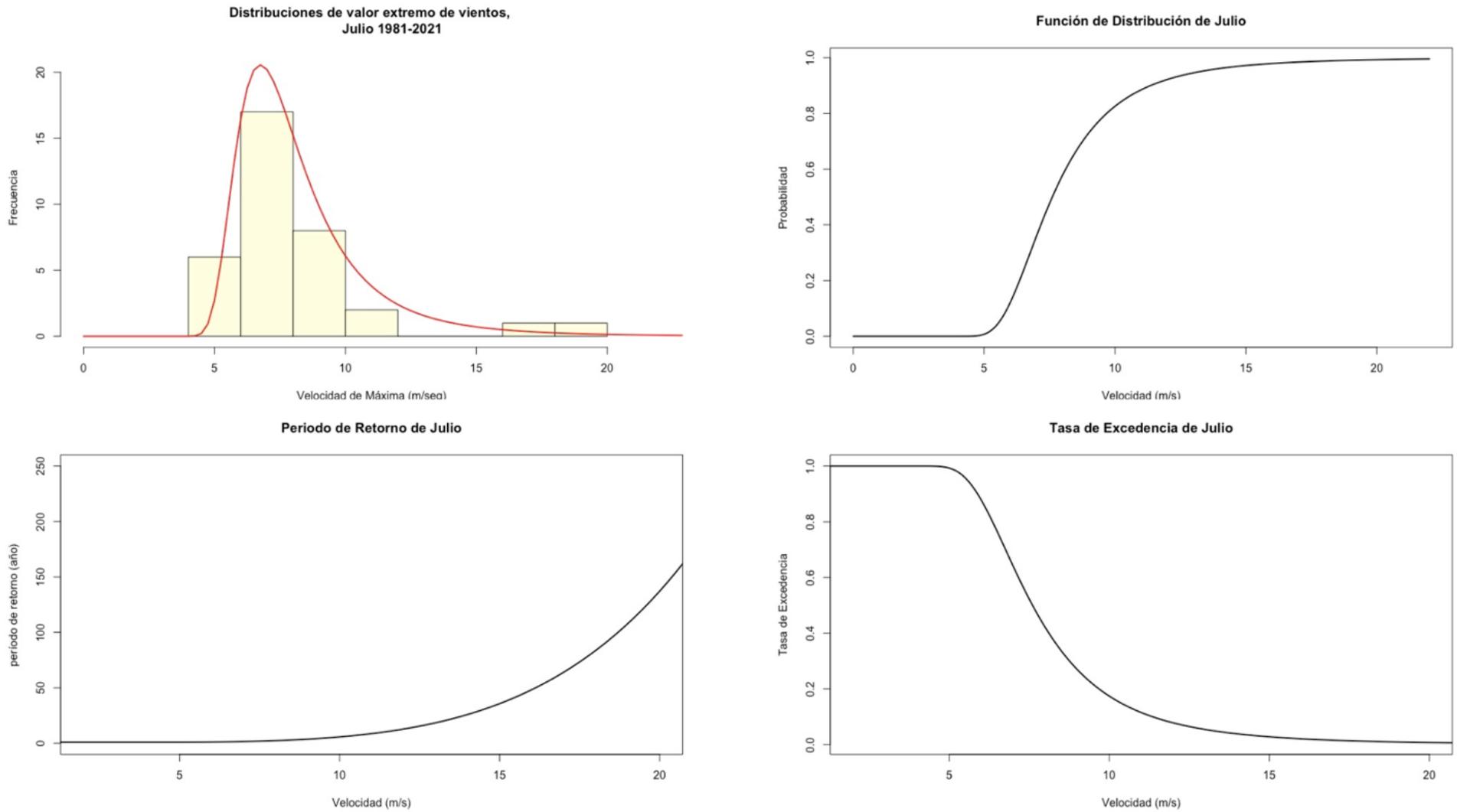
Gráfica 6.4 Gráficas generales para el mes de abril



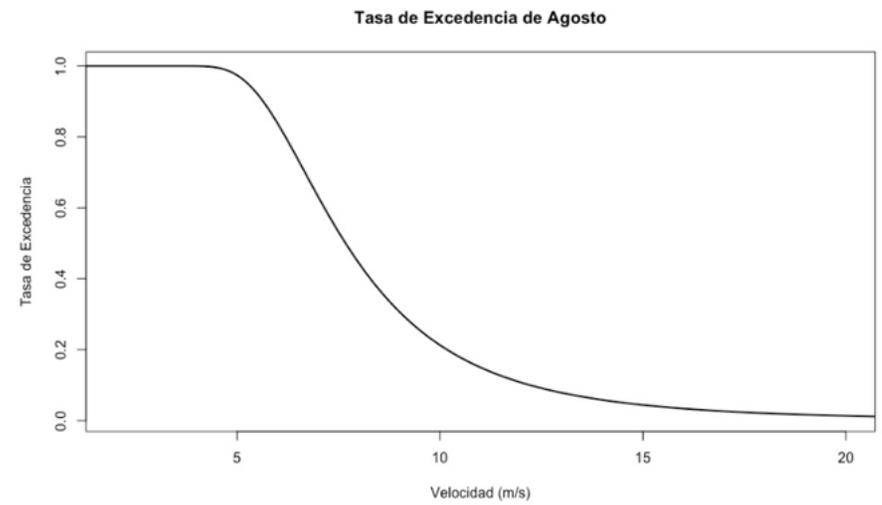
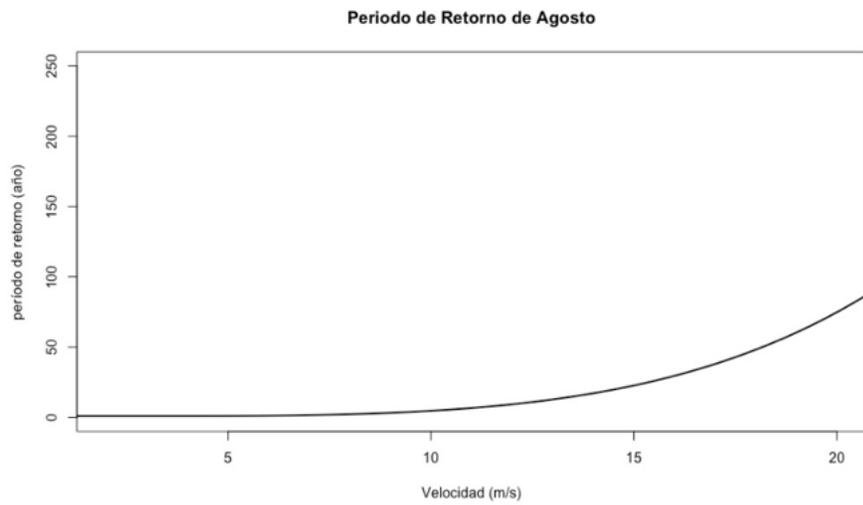
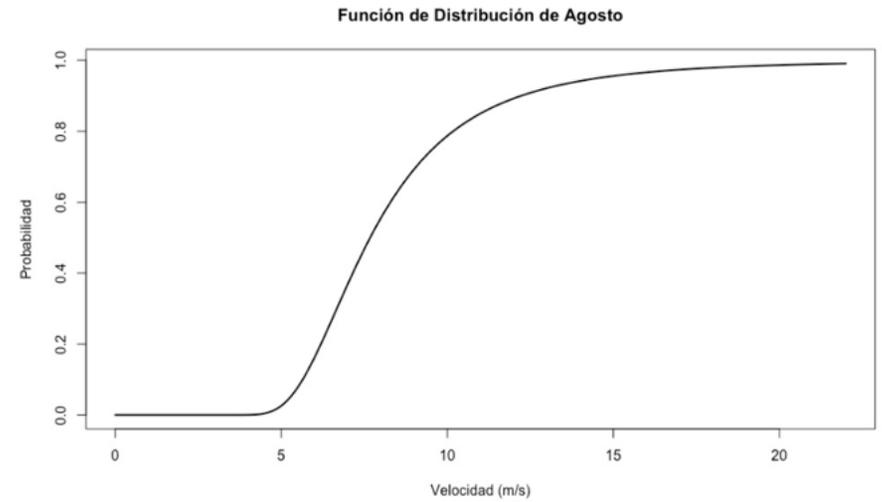
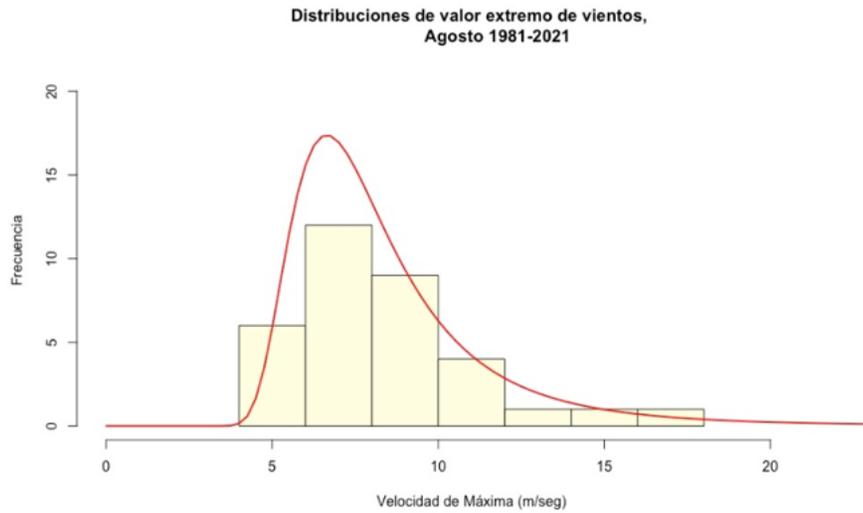
Gráfica 6.5 Gráficas generales para el mes de mayo



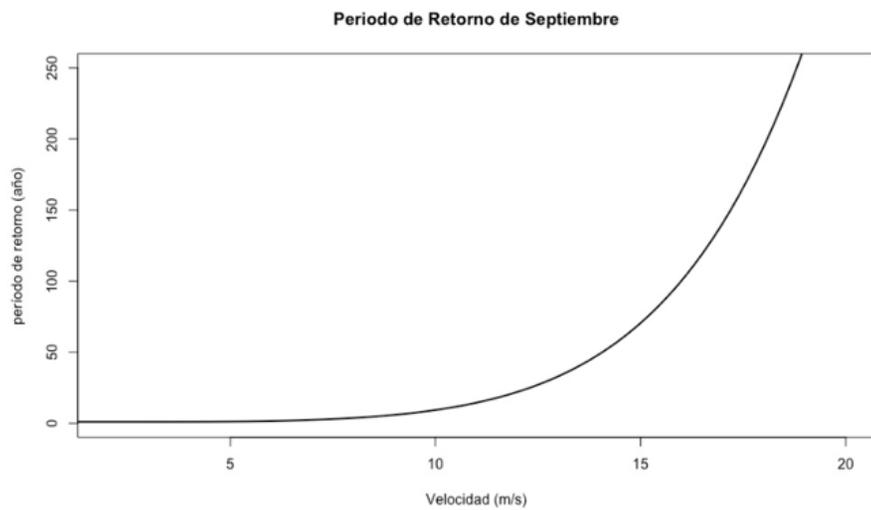
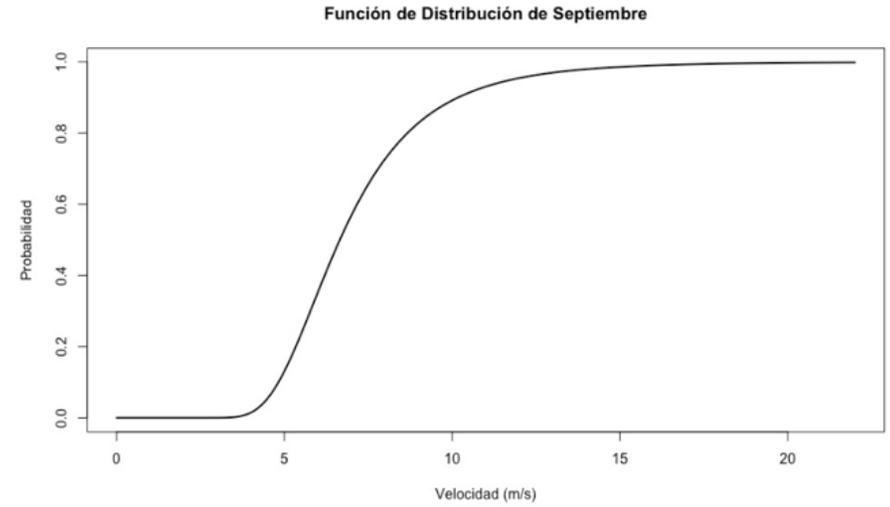
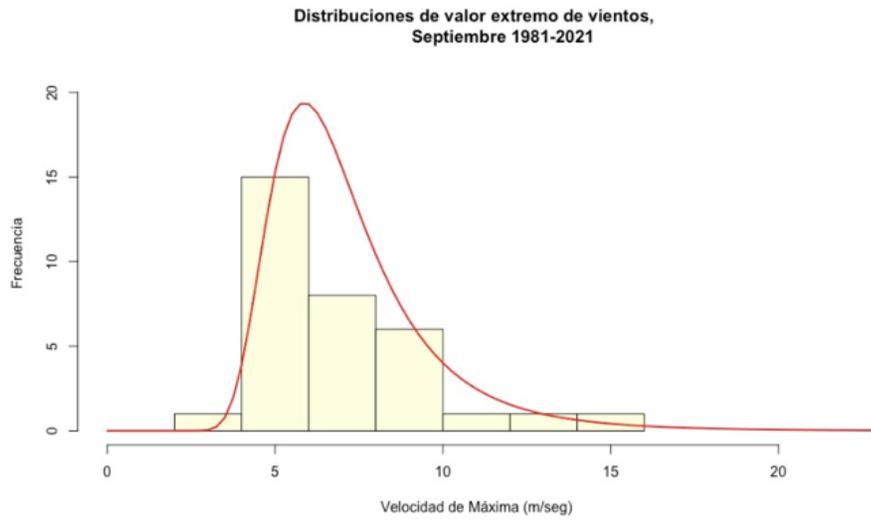
Gráfica 6.6 Gráficas generales para el mes de junio



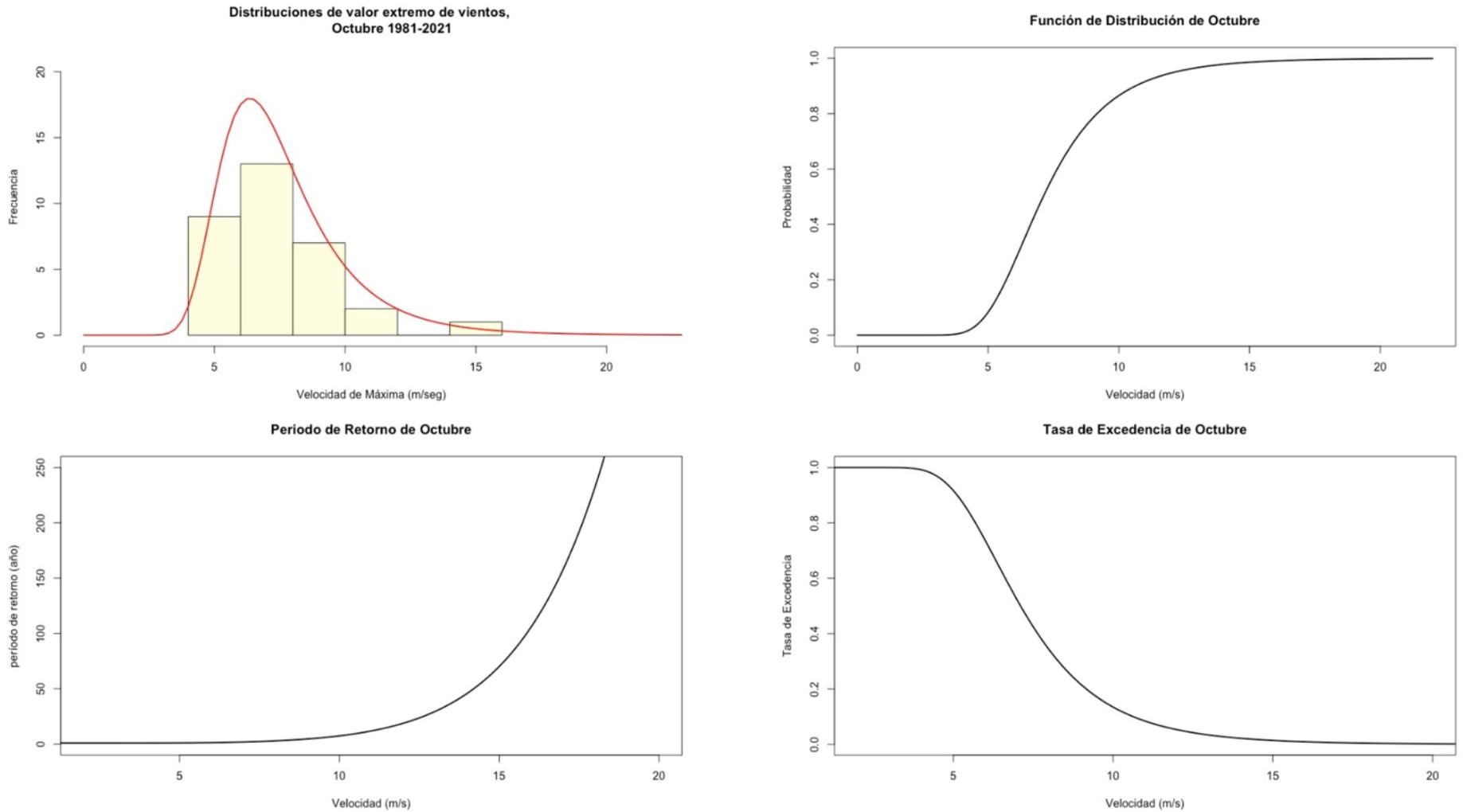
Gráfica 6.7 Gráficas generales para el mes de Julio



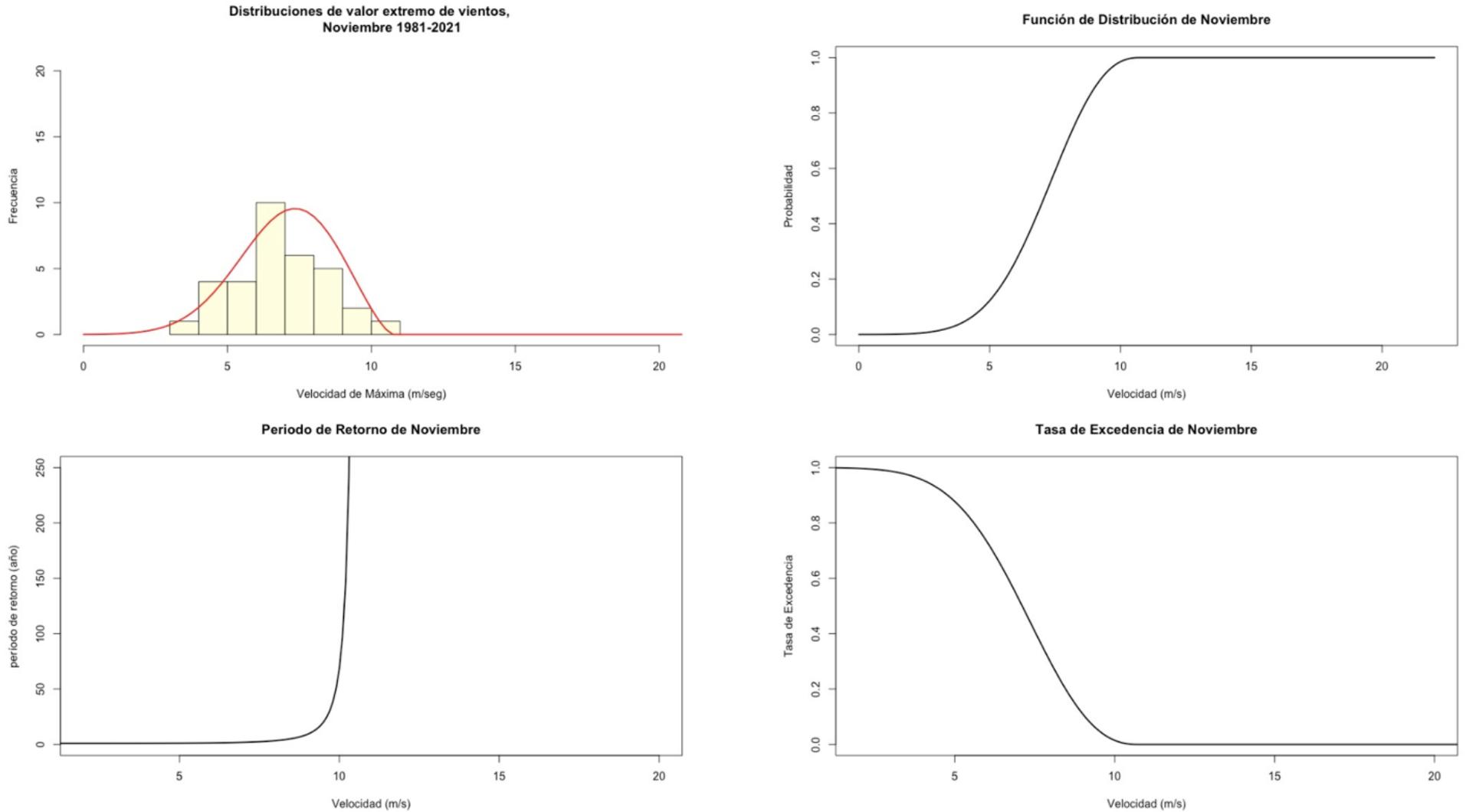
Gráfica 6.8 Gráficas generales para el mes de agosto



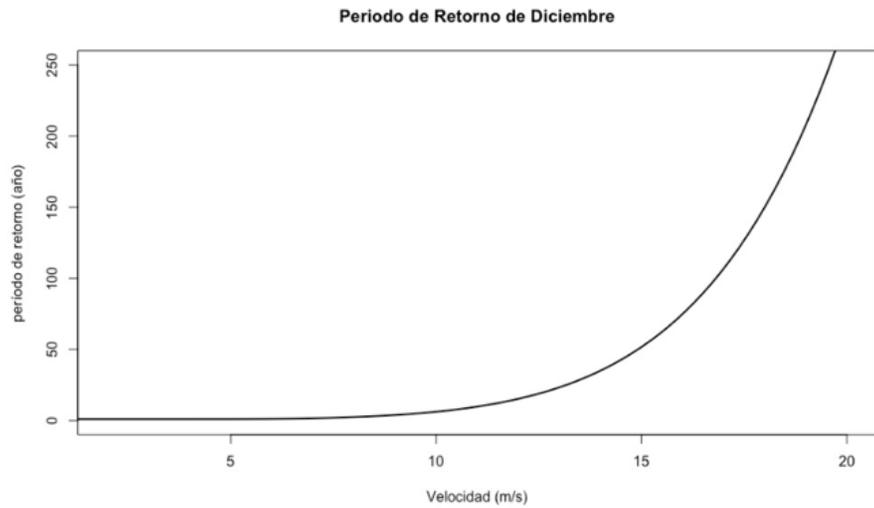
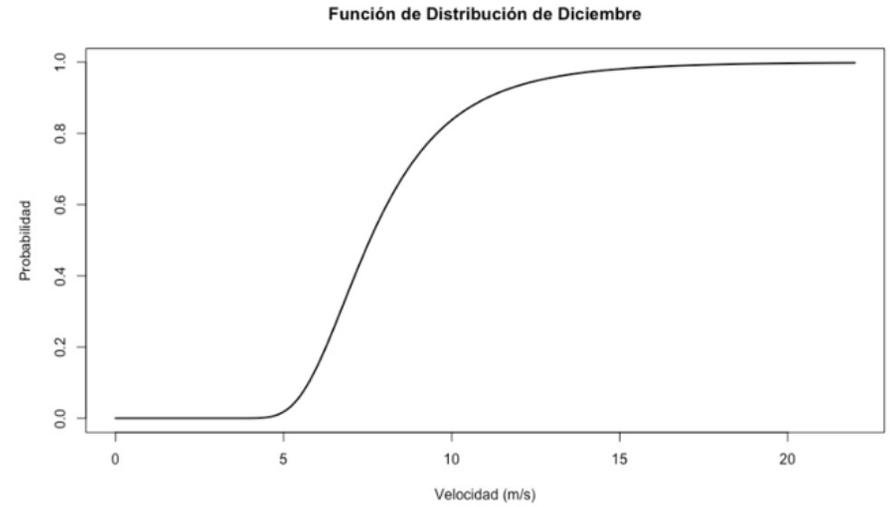
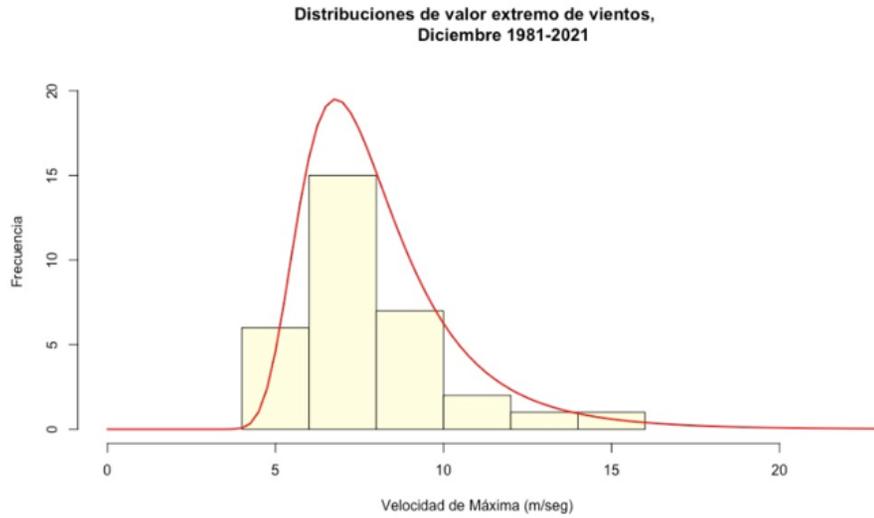
Gráfica 6.9 Gráficas generales para el mes de septiembre



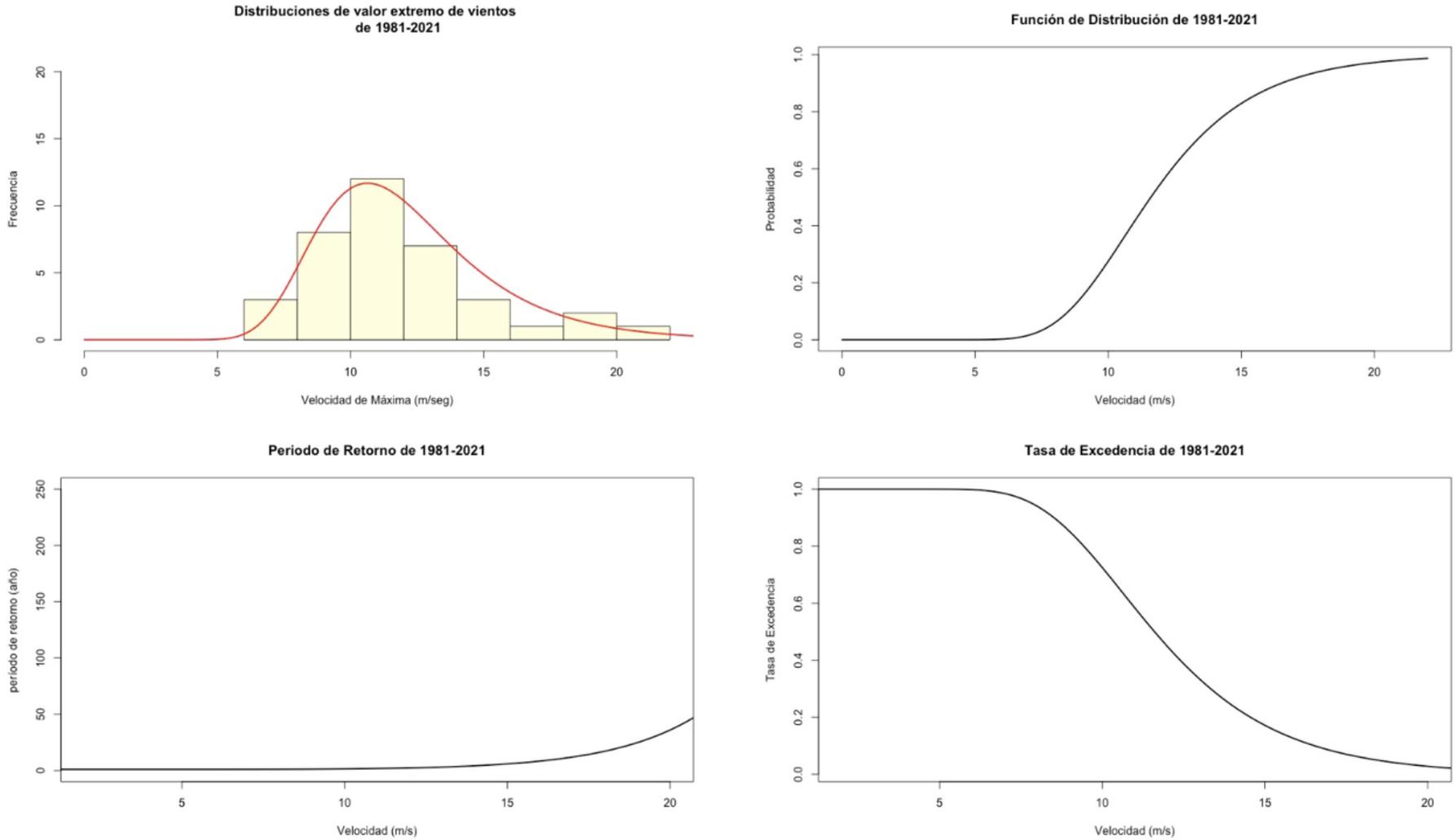
Gráfica 6.10 Gráficas generales para el mes de octubre



Gráfica 6.11 Gráficas generales para el mes de noviembre



Gráfica 6.12 Gráficas generales para el mes de diciembre



Gráfica 6.13 Gráficas generales de 1981-2021

6.1 Periodo de Retorno

Uno de los resultados finales que proporciona el análisis estadístico de los registros de viento son los periodos de retorno. En la investigación se crearon las curvas de periodo de retorno y se analizó por meses y año. El periodo de retorno de un evento extremo se define como la cantidad o lapso de número de años en promedio en la cual el evento será igualado o excedido (Lozano y Tristán, 2022). La unidad para el periodo de retorno es en años. El valor o magnitud de un periodo de retorno tiene una relación inversa a la cantidad de veces que el evento ocurre. En la siguiente ecuación se muestra la relación entre el periodo de retorno y la cantidad de veces que el evento ocurrió:

$$T(x) = \frac{1}{P(X \geq x)}, \quad x > 0,$$

donde $T(x)$ es el periodo de retorno que un evento en escala de años y $P(X \geq x)$ es la función de supervivencia, que representa la probabilidad que ocurra el evento que se exceda la magnitud de velocidad x .

Para obtener el periodo de retorno se debe de armar una tabla con los valores de la probabilidad acumulada de la curva de distribución de registros de vientos máximos. En la Tabla 6.1 se muestra la probabilidad acumulada y sus respectivas velocidades en el eje de x .

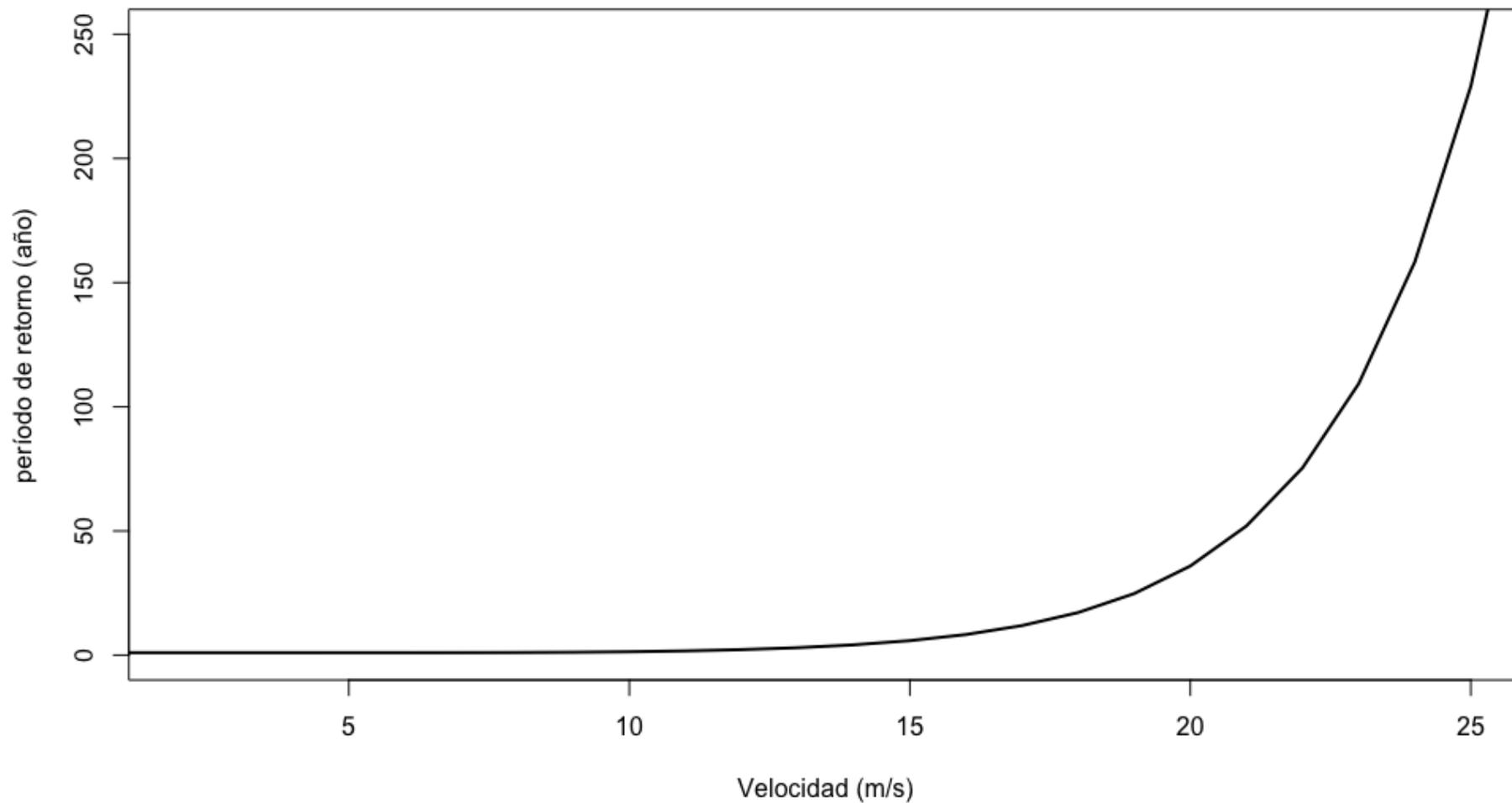
x (m/s)	$F(x)$
1.00	0.000
2.00	0.000
3.00	0.000
4.00	0.000
5.00	0.000
6.00	0.002
7.00	0.016
8.00	0.060
9.00	0.149
10.00	0.276
11.00	0.417

D	0.552
13.00	0.667
14.00	0.759
15.00	0.829
16.00	0.880
17.00	0.916
18.00	0.942
19.00	0.960
20.00	0.972
21.00	0.981
22.00	0.987
23.00	0.991
24.00	0.994
25.00	0.996
26.00	0.997
27.00	0.998
28.00	0.999
29.00	0.999
30.00	1.000

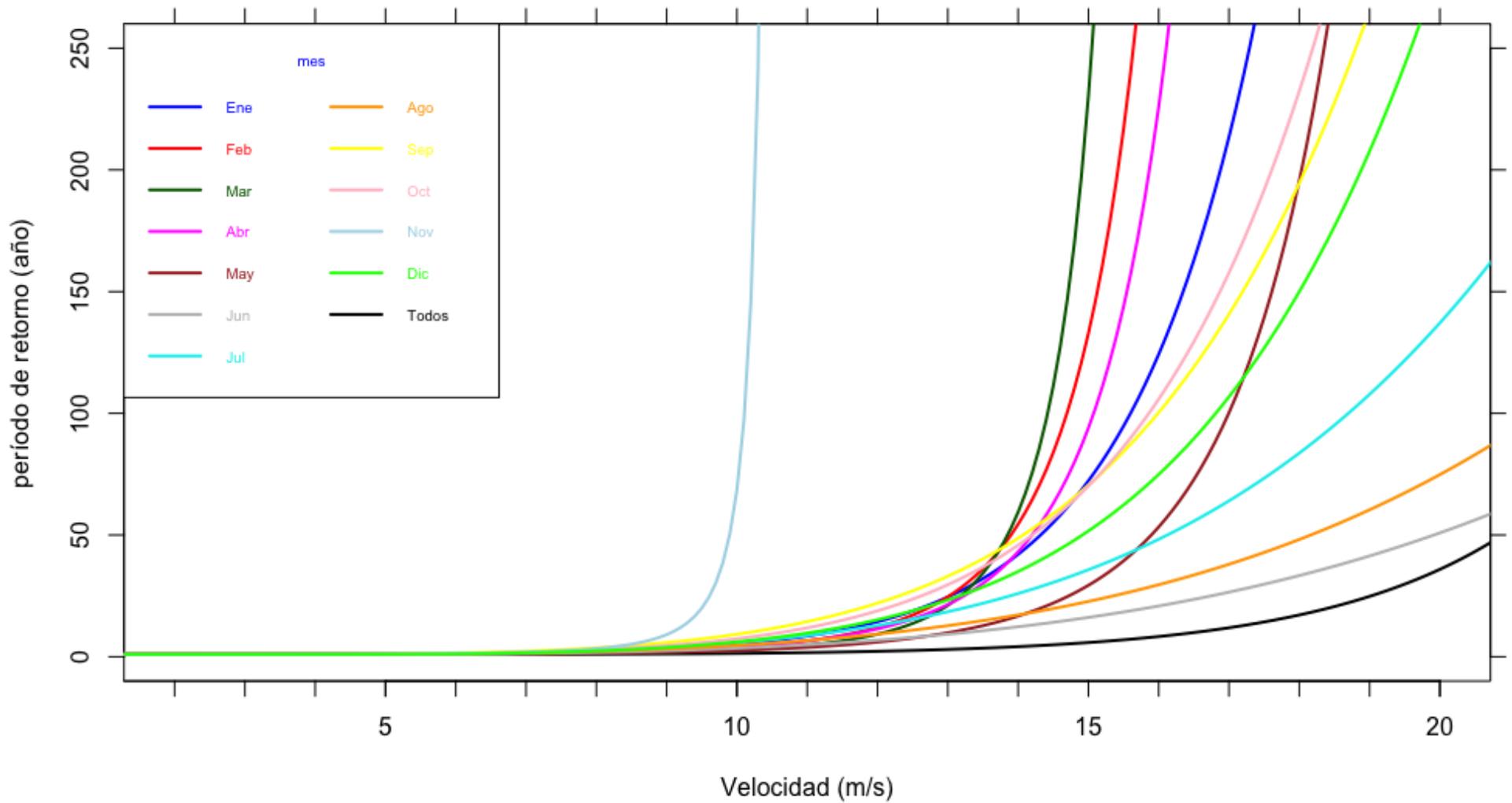
Tabla 6.1 Valores de probabilidad acumulada de Máxima de vientos

Evaluando la probabilidad acumulada y usando los valores inversos se gráfica en el programa de R la curva de periodo de retorno para los 37 años evaluados, la cual se enseña en la gráfica 6.14. Además se suma otra grafica con el periodo de retorno de los 12 meses, y colocando todas las curvas de los meses en una sola gráfica se muestra cuáles son las temporadas más tranquilas y temporadas más violentas, que se reflejan en la Gráfica 6.15.

Periodo de Retorno de 1981-2021



Gráfica 6.14 Periodo de retorno para el periodo de 1981-2021



Gráfica 6.15 Curvas de periodo de retorno para datos de cada mes y todos

En la Figura 6.15 se muestran las 13 gráficas de períodos de retorno, una por cada mes y de todos los datos. Por esta figura, se aprecia que los meses de mayor riesgo son junio, agosto y julio, pues presenta bajos períodos de retorno para velocidades de vientos grandes. En dichos meses, hay que tener cuidado en el levantamiento de andamios de gran altura, así como de cimbras complejas. Por la Tabla 5.2. en los mencionados meses de riesgo se tienen las mayores estimaciones del parámetro del parámetro de forma s . Recuerde que, al ser de signo positivo, corresponde a la distribución Fréchet; la cual se asocia a una cola derecha pesada. Por el contrario, la tendencia de la gráfica del mes de noviembre es muy muy diferente a la del resto, pues se disparan los períodos de retorno para moderadas velocidades de vientos. Esto significa que el mes de noviembre es el más tranquilo del año en Aguascalientes. En ese sentido, le siguen como meses más tranquilos marzo, febrero y abril. Note que los valores estimados de menor magnitud del parámetro de forma s se obtienen en los meses de noviembre, marzo, abril y febrero; en ese orden.

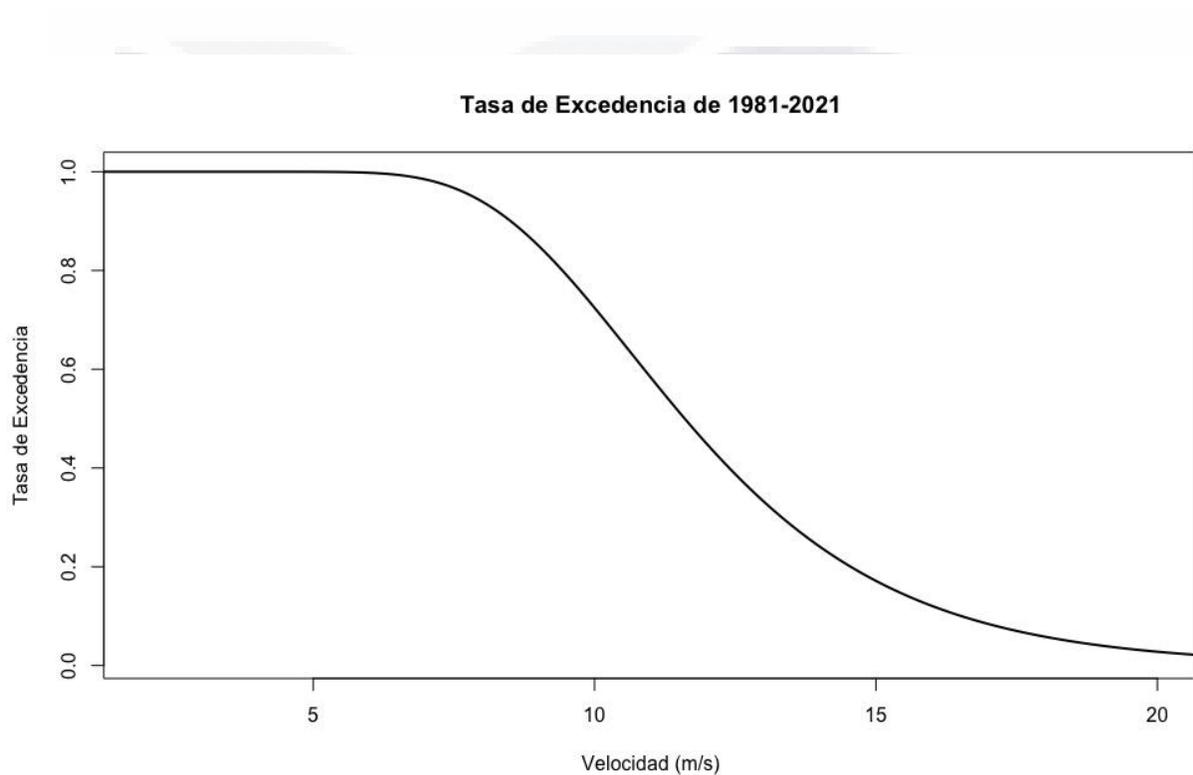
Por el signo negativo del parámetro s , la distribución de probabilidad que corresponde es Weibull para máximos. Esta información es útil para planear la construcción y mantenimiento de edificios de gran altura. Por otro lado, el mes de mayo tiene un patrón aparente paradójico. Por un lado, presenta bajos períodos de retorno hasta velocidades de vientos de 15 m/s, para luego dispararse los períodos de retorno. Esto significa que este es un mes relativamente peligroso en cuanto a magnitudes de viento altas, aunque no tan intensas. Al apreciar las estimaciones de los parámetros del modelo, el valor estimado del parámetro de forma es $s = -0.0813$; que se refiere a una distribución Weibull, cercana a la de Gumbel. Note también que el parámetro de localización estimado es de los más grandes, del orden de $a = 8.4492$.

6.2 Tasa de Excedencia

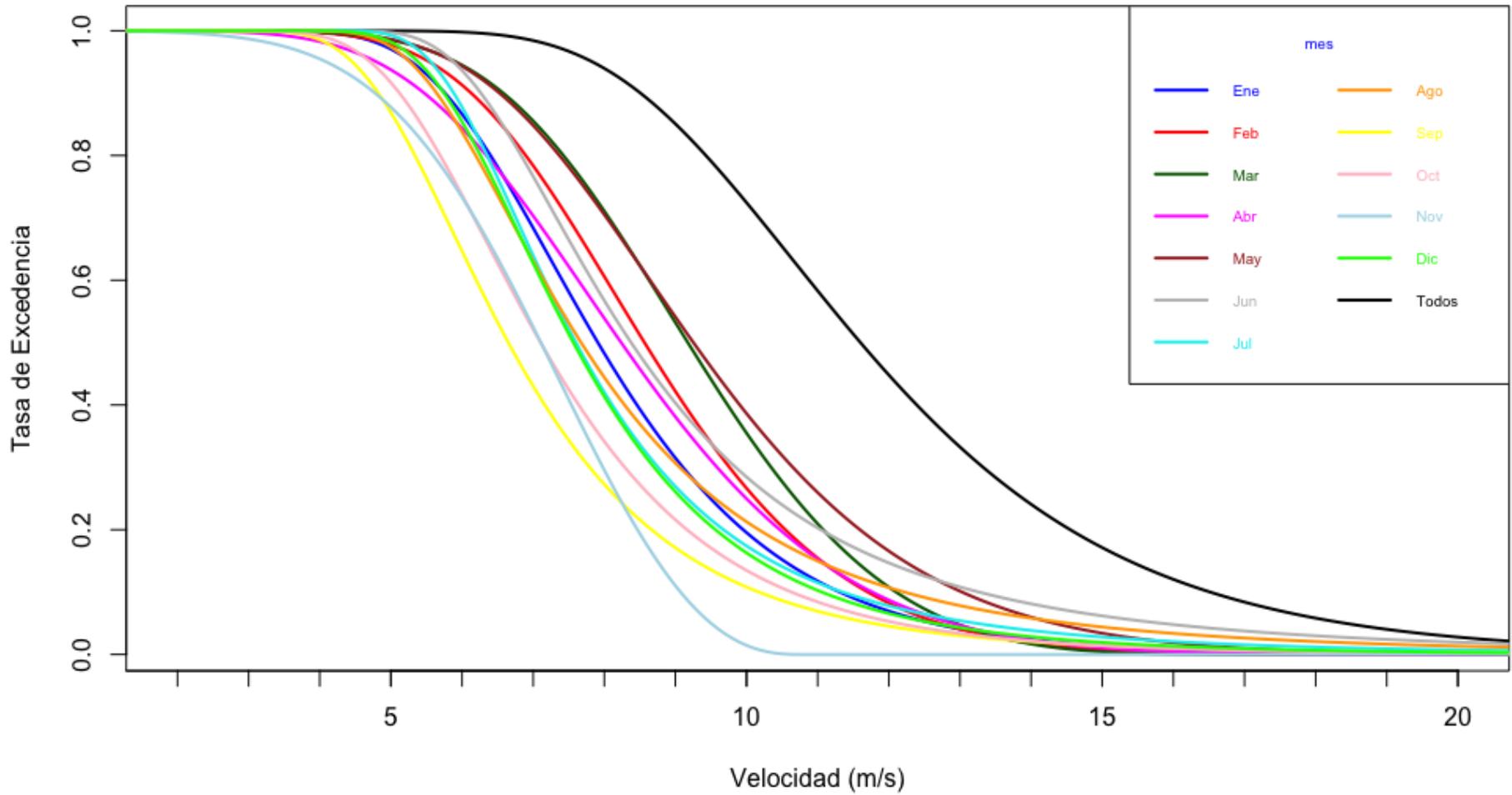
Otro resultado que se obtuvo de las pruebas probabilísticas de la investigación es la curva de la tasa de excedencia. Estas curvas pueden ser gran herramienta para los ingenieros estructurales porque la tasa de excedencia indica la relación del valor de una fuerza para un diseño y la probabilidad que esa fuerza vuelva a pasar o sea excedida. La inversa de una curva de retorno de periodos es la tasa de excedencia. La tasa de excedencia de una velocidad, en este caso la

intensidad de los vientos se define como el número medio de veces, por unidad tiempo, en el que el valor de la velocidad es igualado o excedido. (Diario Oficial de la Federación, 1999)

Con los valores de probabilidad acumulada de la Tabla 6.14 se usa para graficar las curvas de tasas de excedencia por meses y los 37 años de las máximas de viento. En la gráfica 6.16 se muestra la curva de tasa de excedencia con las máximas de los 37 años y en la gráfica 6.17 la tasa de excedencia por cada mes.



Gráfica 6.16 Curva de tasa de excedencia de 1981- 2021



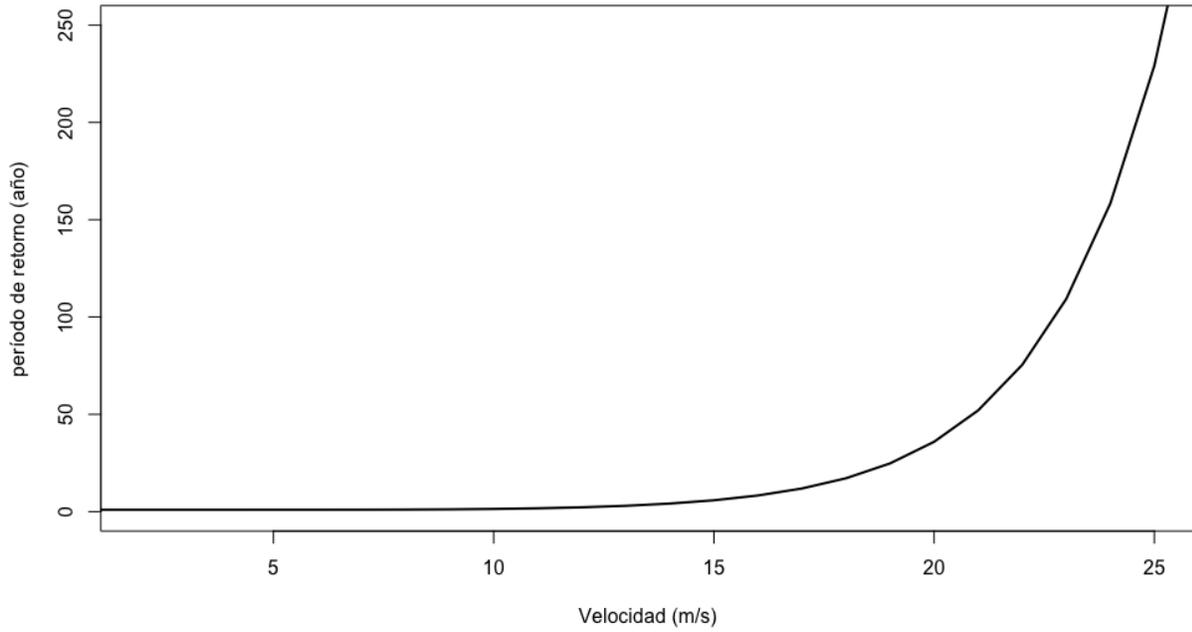
Gráfica 6.17 Curvas de tasa de excedencia por mes

7. Conclusión y Recomendaciones

Según el registro de velocidades de vientos máximas, en la ciudad de Aguascalientes, de la estación meteorológica de la Comisión Nacional del Agua los análisis estadísticos, obtiene como resultado que la forma de distribución de extremos es la distribución Fréchet o Tipo II. Este resultado se concluye dado el valor de forma de distribución de las máximas de vientos de los 37 años da el valor de 0.0084, y este valor positivo confirma que los vientos se comportan con la distribución de Fréchet en la ciudad de Aguascalientes.

El Manual de Diseño de Obras Civiles por Viento de la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 2020) y el Código Municipal de Aguascalientes 2022 son las fuentes de información que establecen las normas de las velocidades regionales para su diseño de estructuras. El Manual de Diseño de Obras Civiles proporciona mapas de isotacas basados en retornos de periodo de la cual la estructura se planea diseñar. El Código Municipal de Aguascalientes proporciona en el capítulo XIII, Diseño por Vientos, dos velocidades regionales que se deben de usar en el proceso de diseño de una estructura. Con la curva de periodos de retorno de las máximas de viento de los 37 años se extrae el análisis de riesgo de la probabilidad que una velocidad pueda ser igualada o excedida, mostrado en la Tabla 7.1.

Periodo de Retorno de 1981-2021



Gráfica 7.1 Periodo de Retorno de las máximas de viento de 1821 a 2021

Velocidad (m/s)	Período de Retorno
0.00	1
1.00	1
2.00	1
3.00	1
4.00	1
5.00	1
6.00	1
7.00	1
8.00	1
9.00	1
10.00	1
11.00	2
12.00	2
13.00	3
14.00	4
15.00	6

16.00	8
17.00	12
18.00	17
19.00	25
20.00	36
21.00	52
22.00	75
23.00	109
24.00	158
25.00	229

Tabla 7.1 Tabla de Riesgo Para las Velocidades de Viento

Con la Tabla 7.1 se puede entender la probabilidad que un viento sea excedido en la ciudad de Aguascalientes. Por ejemplo en los últimos 10 años la magnitud de velocidad más grande fue de 11.1 m/s. Si utilizamos la tabla de riesgos una velocidad de 11 m/s solo podría ocurrir dos veces por año. Ahora si consideramos toda la base de datos desde 1981 el máximo de magnitud de vientos fue de 21.0 m/s en el año 1993, viendo la Tabla 7.1 una velocidad de esta magnitud solo ocurriría en teoría cada 52 años. Además las Tablas 7.2 y 7.3 muestran las velocidades regionales establecidas por ambas normas que se usan para diseño en Aguascalientes. Por ejemplo si comparamos la intensidad de viento más grande registrada, 21 m/s, con el menor parámetro de velocidad de diseño, 33.33 m/s, nos da una diferencia de porcentaje de 58.71%

Importancia de Estructura	Velocidad (km/h)	Velocidad (m/s)
Grupo A	150	41.67
Grupo B	130	36.11

Tabla 7.2 Código Municipal de Aguascalientes, Artículo 927 (Código Municipal, 2022)

T_R (años)	Velocidad (km/h)	Velocidad (m/s)
200	150	41.67
50	140	38.89
10	120	33.33

Tabla 7.3 Velocidades Regionales según periodo de Retorno, CFE 2020

7.1 Recomendaciones

La primera recomendación que se puede hacer según la información proporcionada por esta investigación es que se instalen más estaciones meteorológicas en el Estado de Aguascalientes. Ya que la única estación que cumplía los requisitos de calidad y cantidad era la estación de la Comisión Nacional del Agua. Se necesita incrementar la cantidad de estaciones en el Estado porque de esa manera futuros estudios podrán concluir resultados con mayor precisión y verificar errores en las bases de datos comparando con la base de datos de otras estaciones.

La segunda según los resultados obtenidos por las pruebas estadísticas es que los parámetros de velocidad regional para el Estado de Aguascalientes son conservadoras. Comparando las velocidades de vientos registradas más grande con los parámetros de diseño tienen una diferencia substancial. Pero aun así para el cambio o modificaciones de las normas se necesitaría más información otras variables para poder confirmar que el diseño de una estructura siga siendo seguro y más económico.

Referencias

- 24 Horas. (2019, 14 julio). Se desploma espectacular en Aguascalientes. 24 Horas. <https://www.24-horas.mx/2019/07/13/se-desploma-espectacular-en-aguascalientes-video/>
- Aryuyuen, S., y Bodhisuwan, W. (2022, Nov.-Dec.) The Topp-Leone generalized extreme value distribution: Extreme value analysis and return level estimation of the PM2.5 in Chiang Mai, Thailand. *Songklanakarin Journal of Science and Technology (SJST)*, 44(6), 1450-1461.
- Ávila Castañeda, Mónica Elizabeth. (2016) *Uso de los patrones de viento del Municipio de Aguascalientes del periodo 2005-2014 en la modelación de la dispersión de las emisiones de CO derivadas de la producción de ladrillo*. Tesis para obtener el grado de Maestría en Ingeniería Ambiental, Universidad Autónoma de Aguascalientes, México.
- Brito Ramírez, Rafael Pedro (1982). *Revisión de la velocidad básica de viento del reglamento de construcciones para el distrito federal*. Tesis para obtener el grado de Maestría en Ingeniería, Universidad Autónoma de México, México.
- Castillo, E., Hadi, A. S., Balakrishnan, N., & Sarabia, J. M. (2004). *Extreme value and related models with applications in engineering and science*. John Wiley & Sons.
- CENAPRED, Coordinación Nacional de Protección Civil (2019). Evaluación de la Seguridad Estructural de Edificios. Gobierno de México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/247555/300617_EvaluacionEstructuras_02-Viento.pdf
- Código Municipal de Aguascalientes, Reformado, Artículo 866 y 927 del 2022, 27 de junio de 2022.
- Comisión Federal de Electricidad. (2020). Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por viento. México, D. F.: Instituto de Investigaciones Eléctricas.
- Crescencio Sánchez Huerta, José Benito (1990). *Análisis De Algunas Variables Meteorológicas Y Su Área De Influencia, En Ciudad Universitaria, D.F., Durante El Período 1963 A 1983*. Tesis para obtener el grado de Licenciatura en Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Número 41, (20-27), Mayo-Agosto 2008.
- Kotz, Samuel, and Saralees Nadarajah. *Extreme Value Distributions: Theory and Applications*. Imperial College Press, 2000.

- Lopez Arellano, Juan Carlos (2009). *Determinación de la velocidad regional de ráfaga de viento, correspondiente a los periodos de retorno de 200, 50 y 10 años, para diseño de estructuras en el municipio de Aguascalientes*. Tesis para obtener el grado de Maestría en Ingeniería de Seguridad Estructural, Universidad Autónoma de Aguascalientes, México.
- López López, L., González García, C., Zermeño De León, M., Mendoza Otero, E., Pacheco Martínez, J., Ortiz Lozano, J. Á., & Araiza Garaygordóbil, G. (2008). *Estadística Preliminar de los Vientos para la Zona Urbana de Aguascalientes*. Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Número, 41, 20–27.
<https://investigacion.uaa.mx/RevistaIyC/archivo/revista41/Articulo%203.pdf>
- Osorio Tai, María Elena (2015). *Estudio De La Intensificación De Los Vientos En El Puerto De Veracruz Mediante Modelación Numérica*. Tesis para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- R Core Team (2023). R: A language and environment for statistical computing. R version 4.3.2, released on 2023-10-31. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- RStudio Team (2020). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>.
- Sachs, P., 1978, *Wind Forces in Engineering*, Pergamon Press Inc., New York, U.S.A.
- Simiu, E. y Scanlan, R., 2019, *Wind Effects on Structures, Fundamentals and Applications to Design*, John Wiley & Sons, Inc., 4ta ed.
- Stephenson, Alec and Ferro, Chris. (2022). *evd: functions for extreme value distributions*. Version 2.3-6.1, publicado 2022-07-04. <https://cran.r-project.org/web/packages/evd/index.html>
- Wuertz, Diethelm, Setz, Tobias, Chalabi Yohan, and Northrop, Paul J. (2022). *fExtremes: Rmetrics - modelling extreme events in finance*. Version 4021.83, publicado 2022-08-06. <https://cran.r-project.org/web/packages/fExtremes/index.html>