

Análisis de extremos de la velocidad de viento promedio diario de 179 estaciones en  
Colombia

Leidy Tatiana Malagon De La Ossa

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Civil

Ingeniería Civil

Bogotá D.C

2020

Análisis de extremos de la velocidad de viento promedio diario de 179 estaciones en  
Colombia

Leidy Tatiana Malagon De La Ossa

Proyecto de grado en modalidad pasantía presentado como requisito para optar por el título  
de:

**INGENIERA CIVIL**

Director:

Dr. Edison Osorio Bustamante

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Civil

Ingeniería Civil

Bogotá D.C

2020

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

**Firma jurado 1**

**Bogotá D.C, Junio de 2020**

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a:

Mis padres, por siempre apoyarme incondicionalmente, tenerme paciencia, ser comprensivos conmigo y formarme con increíbles valores los cuales me hicieron seguir adelante en cada paso, a mi hermana Laura, que siempre tuvo una sonrisa para mí y además de eso, me ve como su ejemplo a seguir y admirar.

Mis abuelas, que aunque cada una se fue en el transcurso de este sueño, me enseñaron que este es el camino que debo transitar.

## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecerle a Dios por la vida que me regaló, a mis padres José Malagon y Denis De La Ossa, por darme la oportunidad de estudiar una carrera universitaria y formarme como una ingeniera civil, a toda mi familia por ese apoyo que nunca faltó y esa voz de aliento que me hacía continuar cada vez y decir que el esfuerzo valdrá la pena...y por supuesto que está valiendo la pena.

A las amigas que hice, que aunque al inicio éramos muchas al final quedaron las incondicionales, gracias Lorena López y María José Galindo. A todos mis compañeros de carrera con los cuales sufrí pero al final dijimos “Lo logramos”.

También quiero agradecer a los ingenieros Alexandra Morales, Edison Osorio y Juan Pablo Rodríguez, por la paciencia, comprensión y amor con el que enseñan cada día y me guiaron en este camino.

A la Universidad Antonio Nariño, gracias por abrirme las puertas y hacerme parte de esta gran familia.

## CONTENIDO

RESUMEN.....	12
ABSTRACT.....	13
1. INTRODUCCIÓN .....	14
2. OBJETIVOS.....	15
2.1 General.....	15
2.2 Específicos.....	15
3. MARCO TEÓRICO.....	16
3.1 Transferencia de calor .....	16
3.2 Convección .....	17
3.3 Convección natural .....	19
3.4 Convección forzada .....	19
3.4.1 Convección interna forzada.....	20
3.4.2 Convección externa forzada .....	21
3.5 El viento.....	21
3.5.1 Fuerza de presión .....	22
3.5.2 Fuerza de Coriolis .....	23
4. Serie de datos .....	24
4.1 La media, mediana y moda.....	24

4.2	Diagrama de caja .....	25
4.3	Desviación estándar .....	26
4.4	Homogeneidad.....	27
4.5	Transformación de datos .....	27
4.6	Histograma.....	27
4.7	Frecuencia acumulada .....	28
4.8	Cuartiles.....	29
4.9	Valores extremos .....	29
4.9.1	Distribución de Gumbel .....	30
4.9.2	Distribución de Rayleigh.....	31
4.9.3	Distribución de Weibull .....	31
4.9.4	Distribución generalizada de valor extremo.....	32
4.9.5	Distribución exponencial.....	33
4.9.6	Distribución logística generalizada .....	33
4.9.7	Distribución Log-Normal.....	34
4.10	Tipos de series.....	34
4.10.1	Serie de tiempo de un pico sobre umbral (POT) .....	35
4.11	Periodo de retorno.....	36
4.12	Validación del modelo .....	38
4.12.1	La prueba de Kolmogorov-Smirnov .....	38

4.12.2	Prueba de bondad del ajuste $X^2$ .....	39
4.12.3	Método del error cuadrático mínimo .....	39
4.13	Programa R software.....	40
4.13.1	Librería R “extremeStat” .....	41
4.13.2	Librería R “EnvStats” .....	41
5.	METODOLOGÍA .....	42
5.1	Recolección de datos .....	42
5.2	Datos organizados.....	43
5.3	Conteo de datos .....	43
5.4	Selección final de datos .....	44
5.5	Datos atípicos .....	44
5.6	Métricas .....	44
5.7	Funciones de probabilidad.....	45
5.8	Calculo de periodo de retorno .....	45
6.	RESULTADOS .....	46
6.1	Tratamiento de los datos obtenidos .....	46
6.2	Resultados de las estaciones.....	47
6.3	Comparación con datos del IDEAM .....	58
7.	CONCLUSIONES .....	61
8.	REFERENCIAS .....	63



## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Escala de velocidades del viento.....	22
Tabla 2 Periodo de retorno velocidad del viento en m/s para 5, 10, 20, 50, 100 años.....	36
Tabla 3 Estaciones con más de 24 datos diarios .....	46
Tabla 4 Métricas de las estaciones .....	47
Tabla 5 Función de probabilidad de las 4 estaciones.....	56
Tabla 6 Periodo de retorno Estación N°1.....	57
Tabla 7 Periodo de retorno Estación N°2.....	57
Tabla 8 Periodo de retorno Estación N°3.....	57
Tabla 9 Periodo de retorno Estación N°4.....	58
Tabla 10 Velocidad del viento Atlas IDEAM.....	58
Tabla 11 Velocidad del viento estaciones descargadas.....	59
Tabla 12 Error entre estaciones.....	60

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Convección de aire en un tornillo .....	17
Figura 2 Distribución de la velocidad y temperatura en un flujo por convección forzada .....	18
Figura 3 Convección forzada (Nu).....	20
Figura 4 Fuerza vs Aceleración.....	23
Figura 5 Pasos para un análisis de frecuencia .....	24
Figura 6 Media, mediana, moda Estación 26155230 Caldas .....	25
Figura 7 Diagrama de caja Estación 26155230 Caldas.....	26
Figura 8 Histograma Estación 26155230 Caldas .....	28
Figura 9 Frecuencia acumulada Estación 26155230 Caldas.....	28
Figura 10 Distribución de Gumbel.....	30
Figura 11 Rayleigh densidad.....	31
Figura 12 Probabilidad Weibull .....	32
Figura 13 Distribución exponencial .....	33
Figura 14 Tipos de serie .....	35
Figura 15 Estación 26155230 Caldas.....	37
Figura 16 Validación del modelo.....	38
Figura 17 Programa R .....	40
Figura 18 Descarga de datos .....	42
Figura 19 Consolidar datos .....	43
Figura 20 Diagrama de caja Estación N°1 .....	48
Figura 21 Histograma Estación N°1 .....	49
Figura 22 Datos atípicos Estación N°1 .....	49

Figura 23 Diagrama función de probabilidad Estación N°1 .....	50
Figura 24 Diagrama de caja Estación N°2 .....	50
Figura 25 Histograma Estación N°2 .....	51
Figura 26 Datos atípicos Estación N°2 .....	51
Figura 27 Diagrama función de probabilidad Estación N°2 .....	52
Figura 28 Diagrama de caja Estación N°3 .....	52
Figura 29 Histograma Estación N°3 .....	53
Figura 30 Datos atípicos Estación N°3 .....	53
Figura 31 Diagrama función de probabilidad Estación N°3 .....	54
Figura 32 Diagrama de caja Estación N°4 .....	54
Figura 33 Histograma Estación N°4 .....	55
Figura 34 Datos atípicos Estación N°4 .....	55
Figura 35 Diagrama función de probabilidad Estación N°4 .....	56
Figura 36 Comparación de la velocidad del viento promedio de las estaciones en estudio y las estaciones presentes en el Atlas del IDEAM .....	60

## RESUMEN

Dado los efectos que tiene el cambio climático en la infraestructura civil se está realizando una caracterización del clima para estimar las cargas por temperatura donde la convección hace parte de los tres mecanismos de transferencia de calor que influyen en el balance térmico de los puentes.

Entonces se puede decir que la convección en los puentes depende de la velocidad del viento que se maneje en el área de estudio, siendo así, esta velocidad será utilizada para primero realizar predicciones estadísticas, segundo aplicar a modelos estas predicciones halladas y tercero, con ayuda de estos modelos será posible estimar las cargas térmicas que maneja cada puente que se requiera estudiar.

Palabras claves: Cambio climático, Velocidad del viento, Convección, Puentes, Balance térmico.

## **ABSTRACT**

Given the effects of climate change on civil infrastructure, a climate characterization is being carried out to estimate the temperature charges where convection is part of the three heat transfer mechanisms that influence the thermal balance of the bridges.

Then it can be said that the convection in the bridges depends on the speed of the wind that is managed in the area of study, being so, this speed will be used first to make statistical predictions, second to apply to models these predictions found and third, with the help of these models it will be possible to estimate the thermal loads handled by each bridge to be studied.

Keywords: Climate change, Wind speed, Convection, Bridges, Thermal balance.

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente documento se realiza como trabajo de grado en la modalidad de pasantía de investigación, desarrollada en la Universidad Antonio Nariño. El foco de este documento es mostrar la influencia del viento, la velocidad promedio que maneja en diferentes zonas del país y cómo se puede llegar a analizar utilizando distintas funciones probabilísticas.

La transferencia de calor es energía que viaja a través de la temperatura por tres mecanismos, conducción, convección y radiación. En la convección, la energía viaja por un fluido de manera natural o forzada; cuando se realiza de manera forzada, el fluido viaja por un conducto o un tubo haciendo más difícil su manera de transferirse y allí interfieren factores como la viscosidad; para la convección forzada externa, la velocidad se conduce por superficies planas y dicha velocidad lleva el nombre de velocidad de la corriente libre.

La velocidad del viento se puede medir de 2 hasta 250 metros del suelo y con una frecuencia de 10 minutos en la toma de datos para poder obtener datos confiables y así, a los 10 metros, el viento logra generar energía para ser medida con anemómetros.

Para tratar los datos de la velocidad del viento se utilizan herramientas estadísticas como, la moda, media, mediana, desviación estándar, periodo de retorno entre otros. Para el análisis de extremos se emplean modelos de distribución estadística como Gumbel, Weibull, Rayleigh y la distribución exponencial, cada una de estas funciones tiene parámetros de ayuda en el análisis de los datos.

## **2. OBJETIVOS**

### 2.1 General

Realizar el análisis de extremos de la velocidad de viento promedio diario para los valores representativos de las 179 estaciones obtenidas.

### 2.2 Específicos

1. Analizar las series de datos de las estaciones descargadas teniendo en cuenta parámetros como lo son las variables probabilísticas, la cantidad de datos a tratar, las funciones de distribución, tipos de series y su periodo de retorno.
2. Comparar los datos de velocidad del viento promedio diario tratados en el estudio con los datos de velocidad del viento existentes en el IDEAM.

### 3. MARCO TEÓRICO

Para estudiar el viento debemos indagar desde su nacimiento hasta sus componentes, pero en esta parte es importante darle centro al análisis de extremos en la velocidad del viento; se verá como inicialmente la transferencia de calor en convección forzada afecta las superficies de una u otra manera, continuando con el viento, las fuerzas que actúan sobre él y finalmente llegando a las series de datos que nos dará una vista previa de cómo se da trato a los datos estadísticos, los modelos y herramientas que se pueden utilizar pero dando énfasis en los valores extremos que es nuestro tema de interés.

#### 3.1 Transferencia de calor

La transferencia de calor se puede definir como la energía que viaja por dos o más cuerpos cuando existe un cambio de temperatura, asimismo la transferencia de calor quiere conocer la rapidez a la cual ocurre este cambio de energía para averiguar cuándo estará en equilibrio y lograr predecir a que temperatura podrá llegar el cuerpo en función de x tiempo (Holman, 1998; Panana, 2007).

El calor se mueve por medio de un gradiente de temperatura adaptándose desde la zona de temperatura más alta hasta la zona más baja; el proceso que ocurre en estos cuerpos no puede llegar a ser observado pero el producto o resultado si se puede analizar. Se encuentran tres mecanismos por los cuales se puede realizar transferencia de calor: Conducción, Radiación y Convección. En nuestro caso particular vamos a tratar el mecanismo de transferencia de calor por conducción, que a diferencia de los otros mecanismos ya mencionados, este en su operación también tiene en cuenta el transporte mecánico de la masa (Kreith et al., 2012).



### 3.2 Convección

La transferencia de calor por convección se da por el movimiento de calor a través de uno o varios fluidos que se encuentren en movimiento. Es una de las tres maneras de transportar energía de un cuerpo a otro pero en este caso la convección se logra producir solo por fluidos o la evaporación del agua (Cengel & Castellanos, 2007).



Figura 1 Convección de aire en un tornillo  
Fuente: Tomada de (Dontpanic, 2006).

La convección se puede clasificar en dos: Convección libre y convección forzada. La convección libre es cuando el movimiento se produce de manera natural sin tener ninguna alteración, mientras que la convección forzada, se presenta cuando el fluido está siendo obligado a transportarse a través de un tubo o por una superficie que a su vez es alterada por medios mecánicos como lo es un ventilador.

La transferencia de calor por convección se emplea principalmente cuando se maneja un líquido o un gas que tiene un excesivo movimiento del fluido, este movimiento logra que se pueda mejorar la transferencia de calor, dado que, al tener una actividad más intensiva produce

que los índices de conducción sean cada vez mayores por lograr poner en contacto partículas tanto calientes como frías del fluido en estudio.

La convección se hace un método de transferencia de calor un poco complejo ya que emplea múltiples propiedades tales como: conductividad, viscosidad, densidad, la velocidad del fluido entre otras, pero a pesar de ser tan compleja se encuentra correlacionada con la ley de Newton de enfriamiento Figura 2 (Cengel & Castellanos, 2007):

$$q''_{conv} = h(T_s - T_{\infty}) \quad (W/m^2) \quad 3.2-1$$

$$Q''_{conv} = hA_s (T_s - T_{\infty}) \quad (W) \quad 3.2-2$$

Donde:

$h$ : Coeficiente de transferencia por convección,  $W/m^2 \cdot ^\circ C$

$A_s$ : Área superficial de transferencia de calor,  $m^2$

$T_s$ : Temperatura de la superficie,  $^\circ C$

$T_{\infty}$  : Temperatura del fluido suficientemente lejos de la superficie,  $^\circ C$

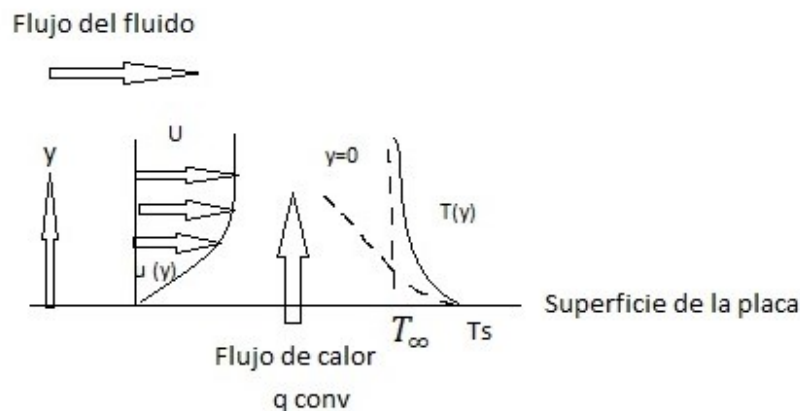


Figura 2 Distribución de la velocidad y temperatura en un flujo por convección forzada  
Fuente: Adaptado de: (Kreith et al., 2012).

### 3.3 Convección natural

Este proceso ocurre cuando un cuerpo se coloca en un fluido el cual maneja una temperatura mayor o menor que la del cuerpo, esto genera un cambio de densidades las cuales si son provocadas únicamente por la temperatura y no por factores externos como un ventilador, se llama convección natural. Esta convección natural transfiere energía que esta almacenada internamente en el fluido de la misma manera que lo hace una convección forzada, pero la convección natural, maneja rangos de temperatura menores los cuales suelen utilizarse en procesos de enfriamiento y en mecanismos de transferencia como lo son paredes de un edificio, el cuerpo humano en reposo o radiadores de vapor (Kreith et al., 2012).

### 3.4 Convección forzada

Podemos reconocer la convección forzada cuando un cuerpo mueve un fluido con determinada velocidad sobre una superficie que maneja una temperatura mayor o menor que la del fluido; en este caso al ser convección forzada, la velocidad del fluido será mayor que en convección natural y su propagación de calor también lograra ser más alta. La velocidad en convección forzada la impulsa un mecanismo el cual puede ser un ventilador o una bomba y se mide de la siguiente manera (Panana, 2007):

$$V_f = \frac{Q_v}{A} \tag{3.4-1}$$

Tanto en la convección forzada como convección natural se emplean números adimensionales tales como:

Número de Nusselt (Nu): Expresa la correlación existente por el calor transferido por convección a través del fluido y el que se pudiera transferir dado el caso donde hubiese conducción Figura 3.

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad ; \quad Nu = \frac{h L_C}{k} \quad 3.4-2$$

Donde:

$h$ : Coeficiente de transferencia de calor

$k$ : Conductividad térmica

$D$ : Diámetro

$L_C$ : Longitud característica



Figura 3 Convección forzada (Nu)  
Fuente: Adaptado de: (dir-pi.com & Alba, 2020).

### 3.4.1 Convección interna forzada

Comúnmente se utiliza un flujo de líquido o gas que viaja a través de tubos o ductos; en estos casos el fluido es forzado a distribuirse por el tubo mediante un ventilador hasta alcanzar la transferencia de calor que se requiere (Cengel & Castellanos, 2007).

### 3.4.2 Convección externa forzada

La convección forzada de flujo externo se caracteriza por llevar su flujo hacia y desde superficies planas y curvas las cuales no entienden gradientes de velocidad ni temperatura. La velocidad que tiene un cuerpo estando sumergido lleva el nombre de velocidad de la corriente libre, suele adaptarse a cuerpos delgados o cuerpos sumamente redondos, esta velocidad va desde un punto cero hasta el valor de la corriente que puede tender a infinito.

Para expresar como actúa la velocidad en la convección forzada, se tiene la siguiente ecuación la cual lleva como nombre “Coeficiente de resistencia al movimiento o de arrastre” que indica la fuerza que tiene de resistencia el movimiento. (Cengel & Castellanos, 2007)

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad 3.4-3$$

Donde:

$C_D$ : Coeficiente de resistencia al movimiento

$F_D$ : Fuerza de resistencia al movimiento

$\rho$ : Densidad del fluido

$V$ : Velocidad corriente arriba

$A$ : Área frontal proyectada sobre un plano perpendicular a la dirección del flujo

### 3.5 El viento

El viento es aire que se encuentra en movimiento el cual lleva una velocidad medida por anemómetros o anemógrafos y su dirección por veletas; suele llamarse viento solo al componente horizontal dado que el componente vertical es casi despreciable. Un anemómetro es un aparato que mide la velocidad del viento de manera instantánea, la manera más conveniente

de medir la velocidad del viento es tomando intervalos de 10 minutos para asegurar que su medición será acertada (Agroinfo, 2020; Aparicio Mijares, 1993).

Tabla 1 Escala de velocidades del viento

Escala de velocidades de viento		
Velocidades del viento a 10 m de altura		
m/s	nudos	Clasificación del viento
0,0 - 0,4	0,0 - 0,9	Tranquilo
0,4 - 1,8	0,9 - 3,5	Ligero
1,8 - 3,6	3,5 - 7,0	
3,6 - 5,8	7-11.	
5,8 - 8,5	11-17.	Moderado
8,5 - 11	17 - 22	Fresco
11.-14	22 - 28	Fuerte
14 - 17	28 - 34	
17 - 21	34 - 41	Temporal
21 - 25	41- 48	
25 - 29	48 - 56	Fuerte temporal
29 - 34	56 - 65	
>34	> 65	Huracán

Fuente: Adaptada de: (Agroinfo, 2020).

El viento se ve determinado por dos fuerzas específicas, fuerzas de gradiente de presión y la fuerza de coriolis.

### 3.5.1 Fuerza de presión

La presión se mide cada tres horas y es representada en isobaras o líneas que se unen por puntos, el movimiento del viento resulta de la acción que ejerce una fuerza sobre la masa de un cuerpo causando una aceleración como se expresa en la segunda ley de Newton Figura 4 (Ruiz & Serna, 2020):

$$Fx = ma$$

3.5-1

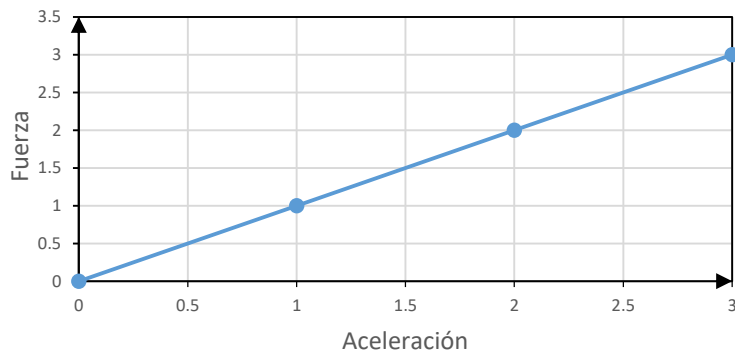


Figura 4 Fuerza vs Aceleración  
Fuente: Adaptado de: (Ruiz & Serna, 2020).

### 3.5.2 Fuerza de Coriolis

Coriolis es la fuerza debido a la rotación de la tierra en la que la velocidad es constante y se mueve de un punto a otro. La aceleración asociada a la fuerza de Coriolis se expresa de la siguiente manera (IDEAM, 2020b):

$$G = 2 v \omega \text{ sen } \Phi \quad 3.5-2$$

Donde:

$v$ : Velocidad del viento

$\omega$ : Velocidad angular rotacional de la tierra, rad/s;  $\omega = 2.272 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$

$\Phi$ = Latitud

## 4. Serie de datos

Para un apropiado análisis de series de datos es necesario seguir una secuencia de pasos el cual se ve plasmado en la Figura 5.

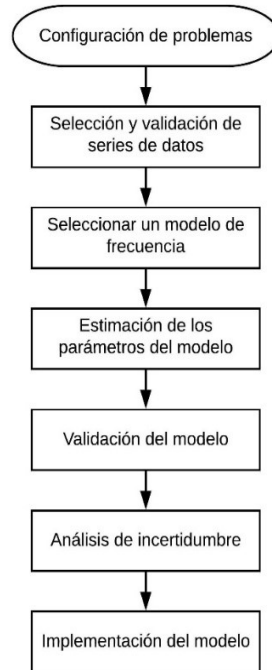


Figura 5 Pasos para un análisis de frecuencia  
Fuente: Adaptado de: (Meylan et al., 2012).

### 4.1 La media, mediana y moda

La media y mediana están diseñadas para darle localización al dato dentro de toda la muestra, simplemente se puede conseguir por medio del promedio de todos los datos. La mediana ocupa ese lugar central que de forma creciente o decreciente se ubica en el centro, la moda es el dato que dentro de toda la muestra más se repite, es decir, que presenta una mayor frecuencia absoluta, si se llegase a presentar otro dato con igual frecuencia absoluta entonces se puede decir que hay dos modas en la muestra (Educativo, 2020; Walpole et al., 1999).



Demostrando lo anterior, en la Figura 6 se tomaron en cuenta 4393 datos de viento de la estación 26155230 del departamento de Caldas, los cuales se sometieron a los análisis estadísticos mencionados anteriormente evidenciándose en un histograma.

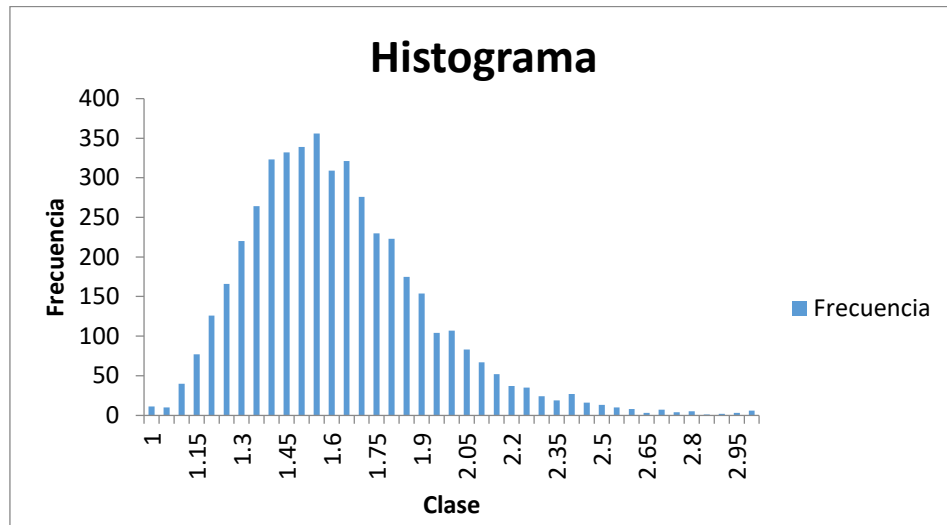


Figura 6 Media, mediana, moda Estación 26155230 Caldas  
Fuente: Elaboración propia datos Estación 26155230 Caldas.

La moda es la barra más alta que toma el valor de aproximadamente 1.55, la mediana se ubica en el valor 1.56 y la media adquiere el valor de 1.60.

#### 4.2 Diagrama de caja

En el diagrama de caja se representa en un rectángulo alineado con el primer y tercer cuartil de la muestra en estudio, como se muestra en la Figura 7, los datos que arroja este diagrama incluyen la media, mediana, primer cuartil, tercer cuartil, desviación estándar, entre otros (Naghetini, 2016).

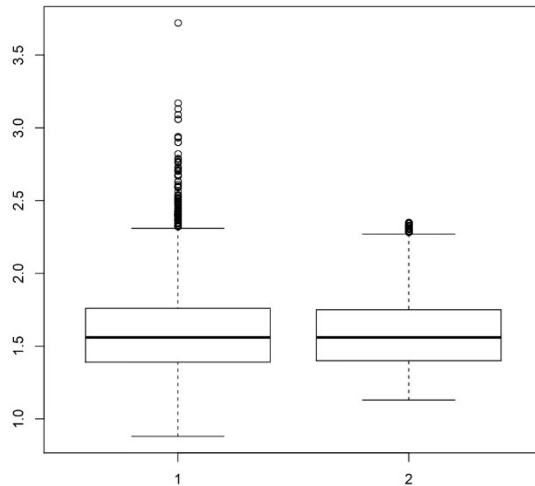


Figura 7 Diagrama de caja Estación 26155230 Caldas  
Fuente: Estación 26155230 Caldas.

### 4.3 Desviación estándar

La desviación estándar sirve para indicar que tan alejados están los datos de la media, entre más lejos estén de ese punto, más grande será la desviación estándar. La desviación jamás será negativa, puede llegar a tener un valor de cero pero esto solo va a indicar que tan cerca se encuentra de la media. En la ecuación 4.3-1, se expresa cómo se puede llegar a calcular la desviación de una muestra donde  $x$  es un valor del conjunto de datos y  $\bar{x}$  es la media de la muestra,  $n$  es el número total de datos y se le resta 1 por no ser una muestra poblacional (Academy, 2020).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum |x - \bar{x}|^2}{n - 1}} \quad 4.3-1$$

Según la norma internacional de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), la velocidad del viento en una superficie se está refiriendo a la velocidad que la variable en estudio alcanza a tan solo 10 metros de altura, esta altura se establece con la finalidad que la velocidad no sea alterada por la fricción.

La desviación estándar proporciona a los datos una medida variable en su velocidad promedio, es decir, si se halla una velocidad promedio considerable en algunos casos esta se puede tomar como un recurso energético que podría ser utilizado. Valores significativos se han tomado entre 2.0 y 3.0 m/s ubicados en la Guajira, Norte de Santander, Cesar y el golfo de Urabá a lo largo de un año. Por otro lado los demás departamentos presentaron desviaciones estándar de manera estacionaria tomando periodos de dos a tres meses (IDEAM, 2006).

#### 4.4 Homogeneidad

Se debe partir inicialmente pensando que los datos analizados están exentos de errores por los instrumentos en su medición o errores humanos. Para una adecuada homogenización lo más importante es contar con suficientes datos y que dicha toma de datos se haya realizado de manera continua, es decir, los valores tomados cada día son más fiables que aquellos que se toman con intervalos de un mes o en otra escala (OMM, 2011).

#### 4.5 Transformación de datos

En este paso es importante utilizar una distribución que ayude a ajustar los datos para volverlos homogéneos, se sabrá que el ajuste no modificó la naturaleza de los datos cuando estos estén representados en diagramas de probabilidad, dispersión o histogramas (OMM, 2011).

#### 4.6 Histograma

Los histogramas son muestras graficas de series hidrológicas que evidencian la distribución de unos datos que pueden ser arbitrarios Figura 8 (Naghetini, 2016).

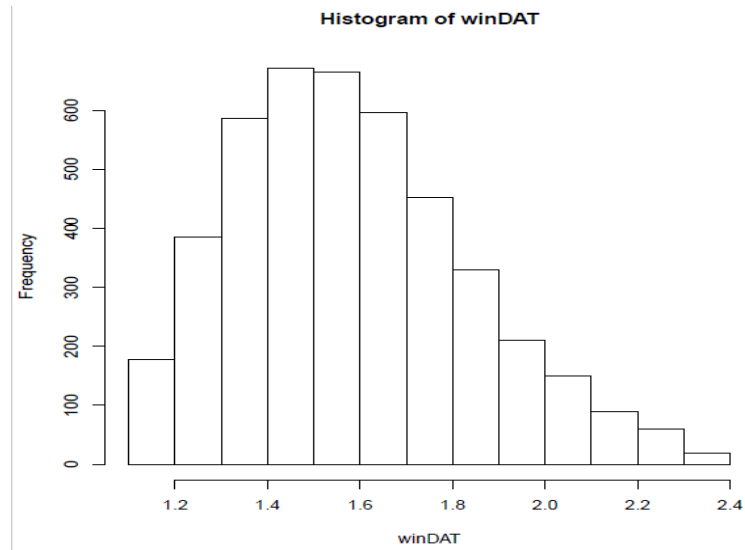


Figura 8 Histograma Estación 26155230 Caldas  
Fuente: Estación 26155230 Caldas.

#### 4.7 Frecuencia acumulada

Una vez los límites superiores de cada intervalo, se proporciona la frecuencia con la que una variable puede ser igual o mayor que un valor  $x$  Figura 9 (Naghetini, 2016).

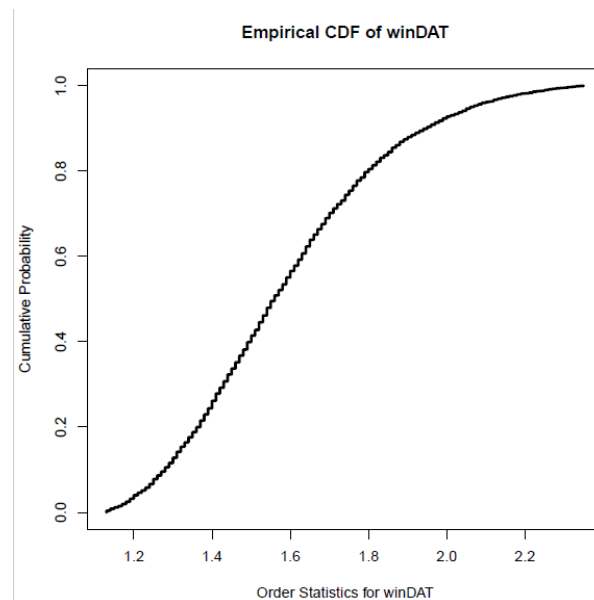


Figura 9 Frecuencia acumulada Estación 26155230 Caldas  
Fuente: Estación 26155230 Caldas.

#### 4.8 Cuartiles

Esta medida estadística indica la posición que adquiere un valor dentro de toda la serie logrando así que la muestra se divida en cuatro grupos de números iguales formando los cuartiles Q1, Q2, Q3. En la fórmula 4.8-1 se expresa el lugar k-ésimo cuartil (Mendoza et al., 2020; Sanchez Bajaras, 2020).

$${}^{\circ}Q_k = \frac{k * (n + 1)}{4} \quad 4.8-1$$

#### 4.9 Valores extremos

Es la secuencia de una serie de datos con valores máximos y mínimos, dado que estos valores se encuentran en los extremos de los datos, se puede presentar que su distribución probabilística sea diferente. La distribución del valores extremos se utiliza en hidrología para el análisis de frecuencia de la lluvia y los flujos de estiraje; el valor extremo se centra en determinar el límite de n función (Chow, 1994; Naghettini, 2016).

La función de distribución de probabilidad de valor extremo se expresa de la siguiente manera:

$$F(x) = \exp \left[ - \exp \left( - \frac{x - u}{\alpha} \right) \right] \quad 4.9-1$$

El valor extremo de un conjunto de variables aleatorias también es una variable aleatoria, la distribución de probabilidad de esta variable aleatoria de valor extremo dependerá en general del tamaño de la muestra y la distribución principal de la que se obtuvo la muestra (Haan, 2002).

#### 4.9.1 Distribución de Gumbel

Si se tienen  $n$  datos de los cuales cada uno contiene  $n$  eventos, si se selecciona el máximo  $x$  de la  $n$  eventos se puede demostrar que cada vez que  $n$  crece,  $x$  tiende a:

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}} \quad 4.9-2$$

Donde  $x$  y  $\beta$  son parámetros de la función Figura 10 (Aparicio Mijares, 1993).

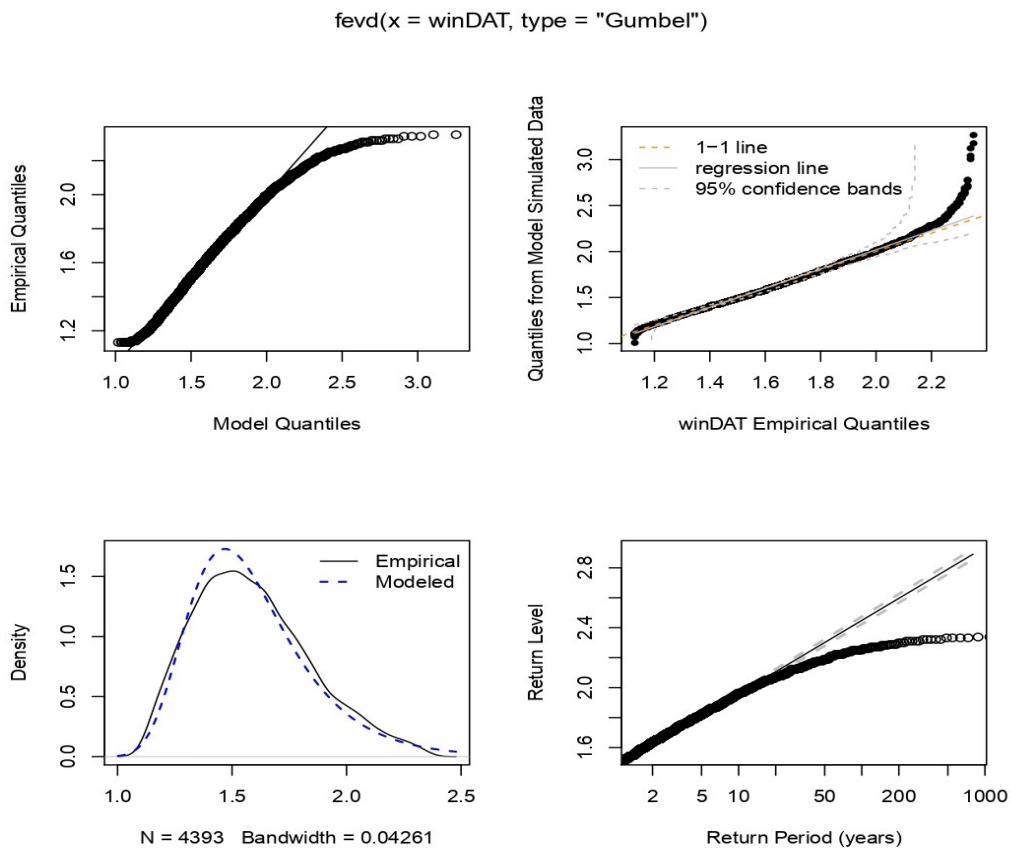


Figura 10 Distribución de Gumbel  
Fuente: Elaborado con programa R.

#### 4.9.2 Distribución de Rayleigh

Si se encuentran parámetros como  $\alpha = 2$ ;  $\lambda = 1\sqrt{2\theta}$ ,  $x$  tiene una distribución de Rayleigh donde se describe la amplitud de un campo electromagnético difundido cuyas características son (Suárez Cifuentes, 2002):

$$E(X^2) = 2\theta^2 ; \quad \sigma^2 = \left(\frac{4 - \pi}{2}\right)\theta^2 \quad 4.9-3$$

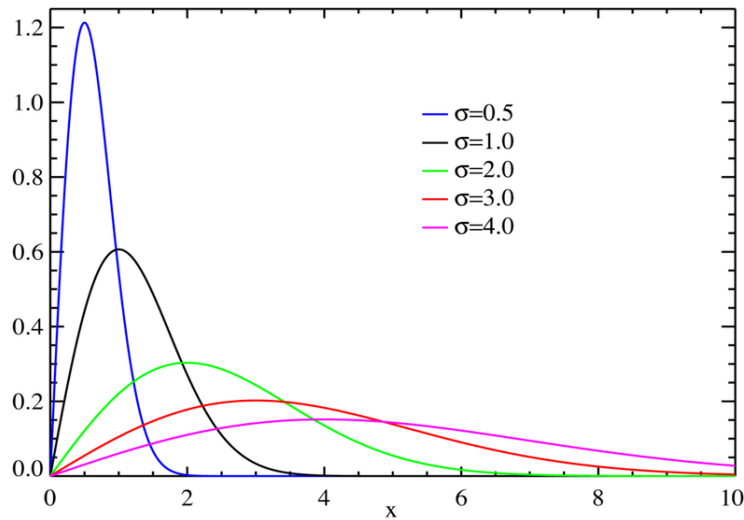


Figura 11 Rayleigh densidad  
Fuente: Tomado de: (PAR, 2005).

#### 4.9.3 Distribución de Weibull

La distribución de Weibull se define en tres parámetros ubicación, escala y forma y se definen en las siguientes ecuaciones:

$$f(x) = \frac{\delta Y^{\delta-1} \exp(-Y^\delta)}{\beta} \quad 4.9-4$$

$$F(x) = 1 - \exp(-Y^\delta) \quad 4.9-5$$

$$x(F) = \beta[-\log(1 - F)]^{\frac{1}{\delta}} - \zeta \quad 4.9-6$$

Donde:

$$Y = \frac{x - \zeta}{\beta} \quad 4.9-7$$

Y el rango de distribución es (Asquith, 2012):

$$\zeta \leq x < \infty \quad 4.9-8$$

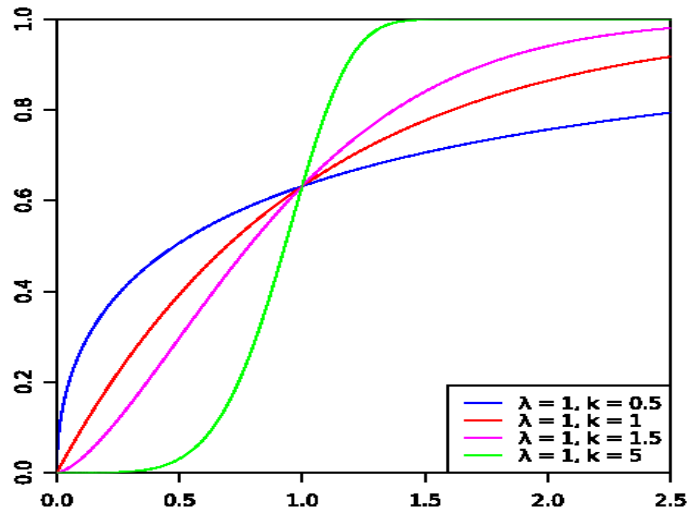


Figura 12 Probabilidad Weibull  
Fuente: Tomado de: (Leitch, 2010).

#### 4.9.4 Distribución generalizada de valor extremo

La distribución generalizada de valor extremo es una distribución común en aplicaciones que involucran análisis de valor extremo de fenómenos naturales. En el caso de que la distribución  $k > 0$  se convierte en distribución de tipo II, ecuación 4.9-9 (Asquith, 2012; Medialdea Villanueva, 2016).



$$G(z) = \exp \left\{ - \left[ 1 + \xi \left( \frac{z - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-\frac{1}{\xi}} \right\} \quad 4.9-9$$

#### 4.9.5 Distribución exponencial

Esta distribución es fácil y útilmente para tasas de falla constante, por ende la distribución exponencial se convierte en la primera opción para el análisis distributivo, para la versión que se incorpora al programa R, solo contiene un parámetro (Asquith, 2012; GrupsInnovacio, 2020).

$$F(x) = \begin{cases} 1 - \exp \left( -\frac{x}{\alpha} \right) & \text{si } x > 0 \\ 0 & \text{si } x \leq 0 \end{cases} \quad 4.9-10$$

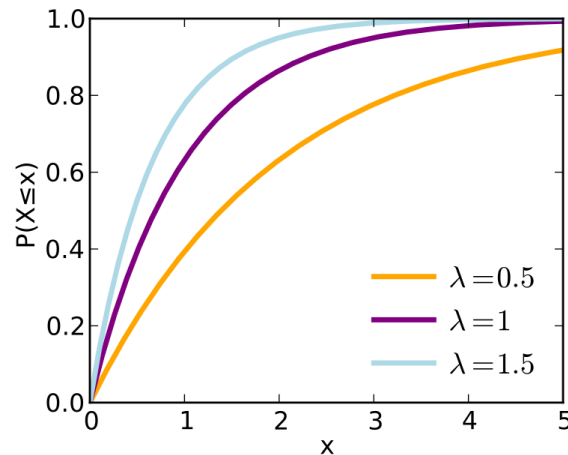


Figura 13 Distribución exponencial  
Fuente: Tomado de: (Skbkekas, 2010).

#### 4.9.6 Distribución logística generalizada

Puede llegar a ser la menos utilizada del valor de extremos conteniendo tres parámetros: localización, escala y forma ecuación 4.9-11 y 4.9-12 (Asquith, 2012).

$$f(x) = \frac{\alpha^{-1} \exp[-(1-k)Y]}{[1 + \exp(-Y)]^2} \quad 4.9-11$$

$$F(x) = \frac{1}{[1 + \exp(-Y)]} \quad 4.9-12$$

#### 4.9.7 Distribución Log-Normal

Esta distribución es un caso de la distribución normal generalizada. Esta tiene el parámetro que cuando  $x > 0$  tiene la misma función que la distribución normal (Asquith, 2012; Bury, 1999).

$$Y = \frac{\log(x - \zeta) - \mu \log}{\sigma \log} \quad 4.9-13$$

#### 4.10 Tipos de series

Al iniciar una serie temporal básica, como se muestra en la Figura 14, es posible encontrar cuatro tipos de series de tiempo:

1. Una serie de duración completa
2. Series de tiempo extremas anuales (la más utilizada en hidrología)
3. Serie de pico sobre umbral (POT)
4. Series de k valores mayores anuales (Parámetro inflable, serie)

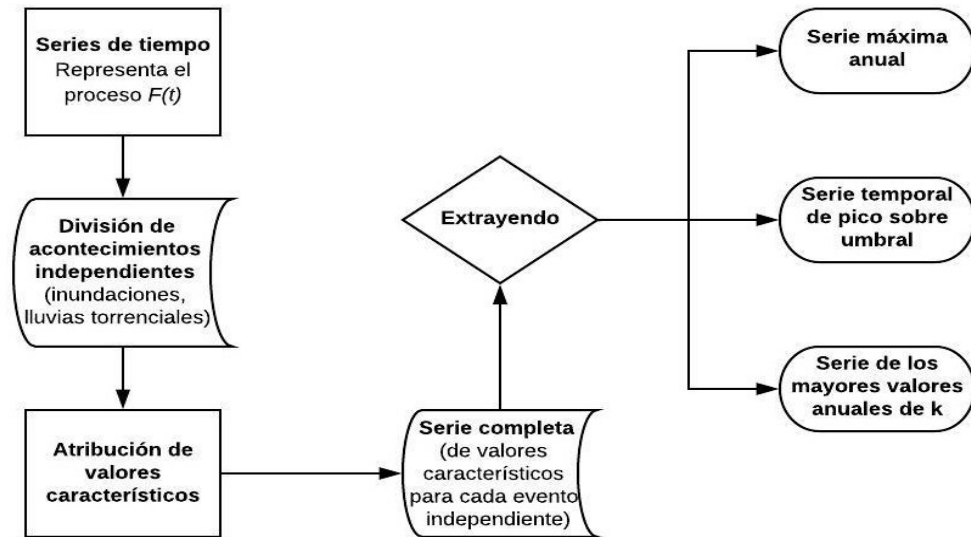


Figura 14 Tipos de serie

Fuente: Adaptado de: (Meylan et al., 2012).

#### 4.10.1 Serie de tiempo de un pico sobre umbral (POT)

En un segundo teorema de la teoría de valores extremos, se habla acerca de la consideración de todos los valores excedentes del umbral, por ende puesto en práctica se puede ejemplificar del siguiente modo en la ecuación 4.10-1, donde  $X$  es una distribución  $F$ , ecuación 4.9-1, y sea  $u > 0$  dentro del umbral (Mochales, 2013):

$$(X - u \mid X > u) \quad 4.10-1$$

Para el manejo de estos datos es necesarios tomar valores arbitrarios de la muestra que estén por encima de un umbral  $x_0$ , esta serie adquiere el nombre de serie de duración parcial o pico sobre serie. Por ende para poder realizar este procedimiento, los datos deben tener una media de eventos superior a 1.65 por año, estos datos deben presentar cierta homogeneidad (Meylan et al., 2012).

#### 4.11 Periodo de retorno

El periodo de retorno de x evento es el valor esperado de su valor promedio medido sobre un número de ocurrencias suficientemente grandes, se puede definir como el intervalo de ocurrencias promedio entre eventos que pueden igualar o exceder una magnitud especificada. La probabilidad de que pueda suceder algún evento se puede relacionar con el periodo de retorno en la forma que puede tener éxito o fallar. Cada muestra tiene su probabilidad pero no es normal conocerla a priori, por ende, existe la necesidad de extraer un grupo pequeño de datos de la gran muestra para así conocer la frecuencia que tienen dentro del gran espacio muestral y entender cuál es su probabilidad de obtener un resultado favorable (Aparicio Mijares, 1993; Chow, 1994).

Acorde a lo mencionado, en la Tabla 2 se pueden observar datos de periodo de retorno equivalente a 5, 10, 20, 50 y 100 años los cuales en la Figura 15 se ven representados gráficamente.

Tabla 2 Periodo de retorno velocidad del viento en m/s para 5, 10, 20, 50, 100 años

	RP.5	RP.10	RP.20	RP.50	RP.100
wei	2.58	2.65	2.72	2.81	2.87
ln3	2.71	2.82	2.94	3.10	3.23
gev	2.74	2.87	3.01	3.20	3.35
gum	2.61	2.70	2.79	2.90	2.99
exp	2.82	2.94	3.06	3.22	3.34
ray	2.44	2.48	2.53	2.58	2.62

Fuente: Estación 26155230 Caldas.

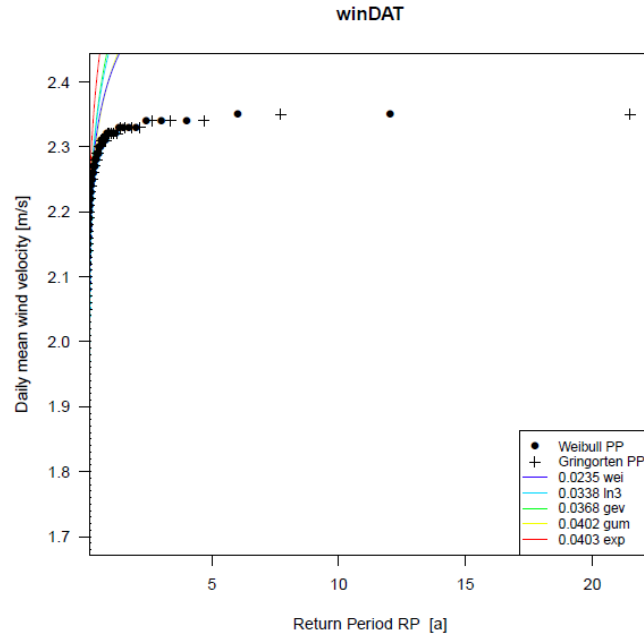


Figura 15 Estación 26155230 Caldas  
Fuente: Estación 26155230 Caldas.

Para calcular el periodo de retorno en serie de datos hidrológicos se pueden emplear diferentes fórmulas, la principal sería la ecuación 4.11-1 la cual se expresa de la siguiente manera, donde p es la probabilidad de que suceda el evento (Sanchez, 2013; Ugr.es, 2020).

$$Periodo\ de\ retorno = \frac{1}{P} \quad 4.11-1$$

Con la fórmula de Weibull, ecuación 4.11-2, también se puede de forma empírica estimar el periodo de retorno de una serie de datos (Mariles & Franco, 1999).

$$Tr = \frac{n + 1}{m} \quad 4.11-2$$

Donde:

m: Número de orden

n= Número total de años del registro

## 4.12 Validación del modelo

Esta validación se aplica para lograr elegir los mejores modelos de frecuencia, entre esos modelos esta las Pruebas de bondad del ajuste Kolmogorov-Smirnov y  $X^2$ , y el Método del error cuadrático mínimo.

### 4.12.1 La prueba de Kolmogorov-Smirnov

Consiste en medir para una variable continua la mayor diferencia entre la frecuencia teórica  $F_0(x)$  y la frecuencia empírica  $F(x)$  Figura 16. Intrínsecamente esta es una prueba para conocer la conformidad del modelo dado que se verifica si la distribución experimental puede considerarse idéntico a uno de referencia.

Según esta teoría, la frecuencia observada se calcula utilizando la tradicional ecuación 4.12-1 (Meylan et al., 2012).

$$\hat{F}(x_{[r]}) = \frac{r}{n}$$

4.12-1

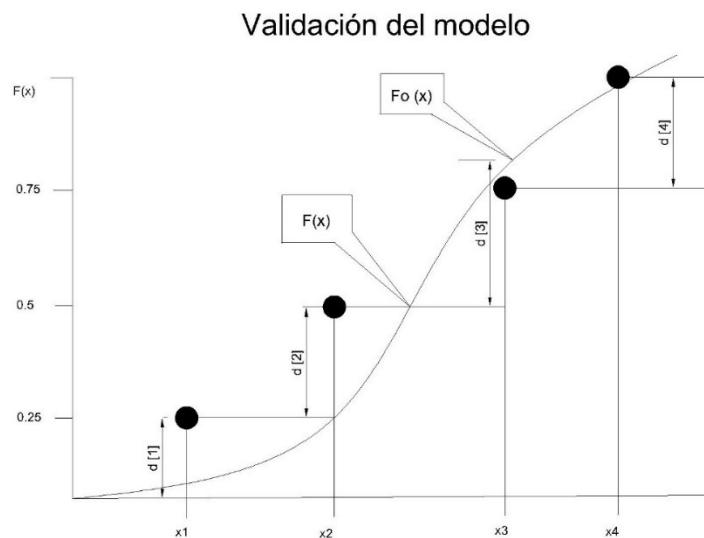


Figura 16 Validación del modelo  
Fuente: Adaptado de (Meylan et al., 2012).

#### 4.12.2 Prueba de bondad del ajuste $X^2$

Esta prueba es la más popular calculando el parámetro estadístico de la siguiente manera:

$$D = \sum_{i=1}^k (\theta_i - \epsilon_i)^2 / \epsilon_i \quad 4.12-2$$

Donde:

$\theta_i$  = Número observado de eventos en el intervalo

$\epsilon_i$  = Número esperado de eventos en el intervalo

Dicha prueba acepta las distribuciones de Log-normal, Pearson III y Gumbel en algunos casos (Aparicio Mijares, 1993).

#### 4.12.3 Método del error cuadrático mínimo

Este método consiste en hallar el error cuadrático mínimo, con la ecuación 4.12-3, en cada distribución utilizada. Las distribuciones que parecen ser más adecuadas para este método son la distribución de Log-normal, distribución de Pearson III y distribución de Gumbel (Aparicio Mijares, 1993).

$$C = \left[ \sum_{i=1}^n (x_{e_i} - x_{o_i})^2 \right]^{1/2} \quad 4.12-3$$

Donde:

$x_{e_i}$  = i-ésimo dato estimado

$x_{o_i}$  = i-ésimo dato calculado con la función de distribución bajo análisis

#### 4.13 Programa R software

R es un programa diseñado para analizar datos estadísticos, maneja un código abierto como se evidencia en la Figura 17 y de fácil acceso, permite aplicar cálculos a la vez a un grupo de datos sin tener que utilizar un algoritmo más sofisticado como lo es un bucle (loop). Permite crear graficas de alta calidad que se pueden exportar en diferentes formatos (Ferrero, 2020).

Es un lenguaje y entorno especializado en estadística y graficas similar al lenguaje S diseñado por John Chambers. La diferencia de R es que proporciona técnicas estadísticas como: modelos lineales y no lineales, análisis de series temporales, clasificación, graficas, entre otros (R, 2020).

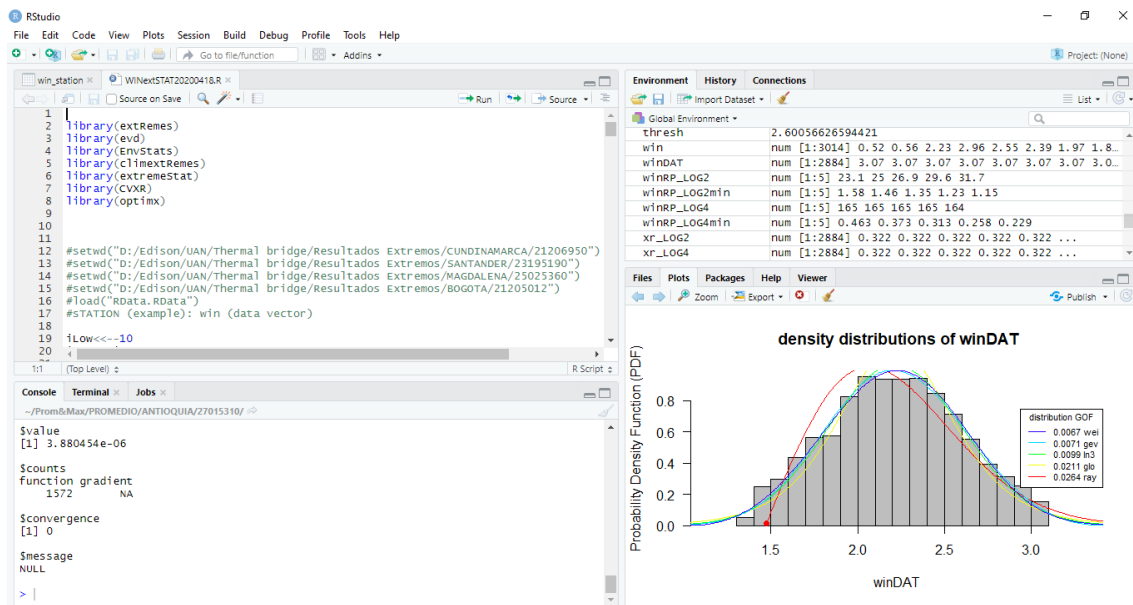


Figura 17 Programa R  
Fuente: Elaboración propia.



#### 4.13.1 Librería R “extremeStat”

Se codifica para ajustar, trazar y comparar varias funciones de distribución (valor extremo). También puede calcular estimaciones de cuartiles de distribución (truncados) y dibujar un gráfico con períodos de retorno en una escala lineal (Cran.r, 2020).

#### 4.13.2 Librería R “EnvStats”

Proporciona un conjunto de potentes funciones para el análisis gráfico y estadístico de datos ambientales, con un enfoque en el análisis las concentraciones químicas y los parámetros físicos, generalmente en el contexto del seguimiento (Millard & Kowarik, 2018).

## 5. METODOLOGÍA

El análisis de series de datos temporales radica en mostrar por medio de gráficas el cambio que esta serie pueda presentar. En su análisis grafico se presentan diagramas de tipo histograma, diagrama de cajas, diagramas de validación como la prueba de la bondad de ajuste, donde se puede comprobar la distribución de los datos, y una prueba de homogeneidad (Castro, 2010).

### 5.1 Recolección de datos

Para obtener los datos necesarios para realizar el análisis de extremos, se procedió a visitar la página virtual del IDEAM donde en la sección (DHIME, 2020) se descargaron datos de todos los departamentos de Colombia iniciando en el departamento del Amazonas hasta el Valle del cauca.

El parámetro descargado es velocidad del viento, la variable en estudio es VV\_10\_MEDIA\_H (Velocidad 10 minutal del viento media horaria), desde el 01/enero/1990 hasta el 01/10/2019.

The screenshot shows a web interface for data consultation and download. At the top, there are tabs: 'Consultar', 'Descargar', 'Información Especial', and 'Recursos'. The 'Descargar' tab is active. Below the tabs, there are two sections: 'Periodo' and 'Serie de Tiempo y Frecuencia'. In the 'Periodo' section, 'Fecha Inicial' is set to '01/01/1990' and 'Fecha Final' is set to '01/10/2019'. In the 'Serie de Tiempo y Frecuencia' section, the 'Estándar' radio button is selected, and the 'Parámetro' dropdown menu is set to 'VEL VIENTO'. Under 'Variable', the 'Lista Completa' radio button is selected. Below these options is a table with a header 'Descripción' and several rows of data options, each with a radio button. The option 'Velocidad 10 minutal del viento media horaria...' is selected.

	Descripción
<input type="radio"/>	Velocidad vectorial del viento media diaria...
<input type="radio"/>	Velocidad vectorial 10 minutal del viento media di...
<input type="radio"/>	Velocidad del viento cada 2 min
<input type="radio"/>	Velocidad del viento cada 10 min
<input type="radio"/>	Velocidad del viento 2 minutal media horaria...
<input type="radio"/>	Velocidad del viento de las 24 horas
<input checked="" type="radio"/>	Velocidad 10 minutal del viento media horaria...
<input type="radio"/>	Velocidad del viento máxima diaria
<input type="radio"/>	Velocidad 10 minutal del viento media diaria...

Figura 18 Descarga de datos  
Fuente: Adaptado de: (DHIME, 2020).

## 5.2 Datos organizados

Los datos de cada estación se organizaron en un Excel para proceder a utilizar la herramienta “Consolidar” la cual selecciona todos los datos y los organiza según la función que se le asigne, en este caso la función a utilizar fue “Promedio” para obtener la velocidad promedio diario de cada estación Figura 19 (Microsoft, 2020).

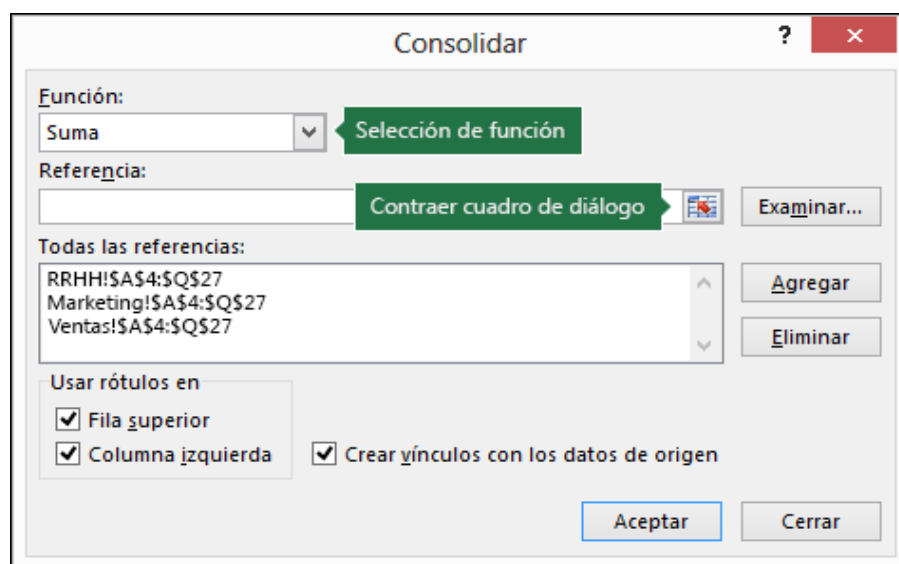


Figura 19 Consolidar datos  
Fuente: Tomado de: (Microsoft, 2020).

## 5.3 Conteo de datos

Se procede a realizar un conteo de los datos pero añadiendo un filtro en el cual solo se tienen en cuenta las estaciones con más de 10 datos de velocidad de viento por día.

En esta parte se excluyeron los datos de estaciones correspondientes a Aeropuertos para analizarlos en otro programa y también la estación 21206960-Tibaitata-Cundinamarca por no cumplir con el conteo.

#### 5.4 Selección final de datos

Después de correr los datos por el programa se eligen únicamente a las estaciones que tengan más de 700 datos equivalentes a aproximadamente 2 años, siendo así, solo quedan 134 estaciones que cumplen con los parámetros para realizar el análisis de extremos.

#### 5.5 Datos atípicos

Se eliminan los datos atípicos para 2.5 desviaciones estándar; esta desviación hace parte de la función de distribución acumulativa de la distribución normal.

#### 5.6 Métricas

En las métricas se recolecta toda la información obtenida de las estaciones de forma individual, se presenta una tabla con la siguiente información:

- Número de datos en la estación
- Media
- Mediana
- Mínimo
- Máximo
- Rango
- Desviación estándar
- Cuartiles
- Coeficiente de variación
- Entre otros.

## 5.7 Funciones de probabilidad

Se hace un análisis de funciones de probabilidad en el cual escoge la función que tenga menor error medio cuadrático, esto se verá visualizado por la curva que mejor se ajuste a su distribución.

## 5.8 Calculo de periodo de retorno

El periodo de retorno se calcula para un transcurso de 5, 10, 20, 50 y 100 años. Se procede a realizar el cálculo de manera tradicional empírica y también con las funciones de distribución utilizadas en el proceso.

## 6. RESULTADOS

### 6.1 Tratamiento de los datos obtenidos

- En la recolección de datos se obtuvo información de 179 estaciones en Colombia contando con 31 departamentos y 147 municipios.  
No se tiene información de los municipios Baraya, Neiva, Pitalito y San Agustín del departamento del Huila, del municipio de VillaMaria en el departamento de Caldas, falta información de las estaciones PNN Nevados y Nevado Santa Isabel.
- Para el conteo de los datos el filtro que se utilizó tomaba en cuenta que cada estación debía como mínimo tener 10 datos diarios de velocidad de viento y un máximo de 24, pero 2 estaciones en el departamento de Casanare contaban con un máximo de 144 datos diarios. Estas estaciones no tomaban datos con un intervalo de 1 hora sino que se tomaban intervalos más cortos, Tabla 3.
- Finalmente, los departamentos como Amazonas, el Archipiélago de San Andrés, Arauca y Casanare, se quedaron fuera de la lista por no tener datos suficientes para el análisis.

Tabla 3 Estaciones con más de 24 datos diarios

ESTACIÓN 35235040		ESTACIÓN 35215020	
Fecha	# Datos	Fecha	# Datos
1/12/2017	111	1/01/2017	144
2/12/2017	131	2/01/2017	144
3/12/2017	134	3/01/2017	144
4/12/2017	57	4/01/2017	144
5/12/2017	15	5/01/2017	144
6/12/2017	128	6/01/2017	144
7/12/2017	74	7/01/2017	142
8/12/2017	43	8/01/2017	98
9/12/2017	32	9/01/2017	142
10/12/2017	83	10/01/2017	17
11/12/2017	55	11/01/2017	142

<b>ESTACIÓN 35235040</b>		<b>ESTACIÓN 35215020</b>	
12/12/2017	59	17/01/2017	11
6/05/2018	69	18/01/2017	142
7/05/2018	144	20/01/2017	142
8/05/2018	144	1/02/2017	144
9/05/2018	144	2/02/2017	144
10/05/2018	144	3/02/2017	144
11/05/2018	144	4/02/2017	144
12/05/2018	144	5/02/2017	144
13/05/2018	144	6/02/2017	144
14/05/2018	144	7/02/2017	144
15/05/2018	144	8/02/2017	144

Fuente: Elaboración propia.

## 6.2 Resultados de las estaciones

Para modelar mejor los resultados de las 134 estaciones se eligieron 4 estaciones que estratégicamente se encuentran ubicadas en diferentes zonas de Colombia. La estación N°1 se encuentra en la parte norte del mapa en el departamento de Magdalena, la estación N°2 corresponde a la zona central en Bogotá, la estación N°3 a la zona occidental en Nariño y la estación N°4 a la zona sur oriente en Guaviare.

Tabla 4 Métricas de las estaciones

<b>Estación</b>	<b>29065130 Magdalena</b>	<b>21205012 Bogotá</b>	<b>52045080 Nariño</b>	<b>32105080 Guaviare</b>
<b>N</b>	3324	2152	1484	1070
<b>Mean</b>	1.147	1.655	1.498	0.5328
<b>Median</b>	1.13	1.65	1.44	0.52
<b>10% Trimmed Mean</b>	1.139	1.646	1.475	0.5262
<b>Geometric Mean</b>	1.136	1.634	1.471	0.5249
<b>Skew</b>	0.3937	0.2717	0.6758	0.6266
<b>Kurtosis</b>	-0.5286	-0.3116	-0.07852	0.096
<b>Min</b>	0.84	1.1	1	0.36
<b>Max</b>	1.57	2.38	2.39	0.82
<b>Range</b>	0.73	1.28	1.39	0.46
<b>1st Quartile</b>	1.02	1.46	1.28	0.46

Estación	29065130 Magdalena	21205012 Bogotá	52045080 Nariño	32105080 Guaviare
<b>3rd Quartile</b>	1.26	1.83	1.69	0.59
<b>Standard Deviation</b>	0.1627	0.2645	0.2898	0.09366
<b>Geometric Standard Deviation</b>	1.151	1.174	1.207	1.188
<b>Interquartile Range</b>	0.24	0.37	0.41	0.13
<b>Median Absolute Deviation</b>	0.1779	0.2669	0.2965	0.08896
<b>Coefficient of Variation</b>	0.1419	0.1599	0.1934	0.1758

Fuente: Elaboración propia.

En las siguientes figuras se evidencian los resultados que arrojó el programa de manera gráfica. Se puede encontrar diagramas de caja, histogramas, diagrama de valores atípicos y diagramas de función de probabilidad.

#### Estación N° 1 - 29065130 Magdalena

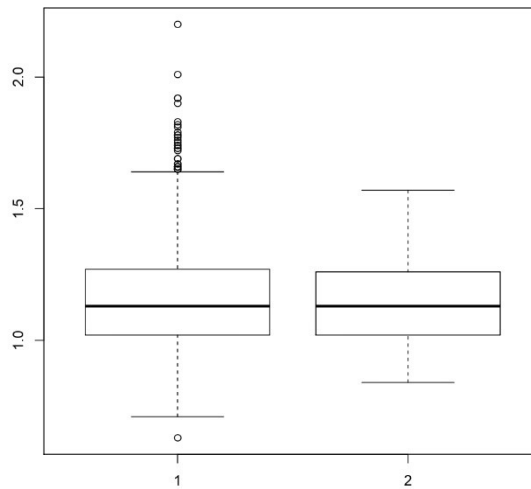


Figura 20 Diagrama de caja Estación N°1  
Fuente: Estación 29065130 Magdalena.



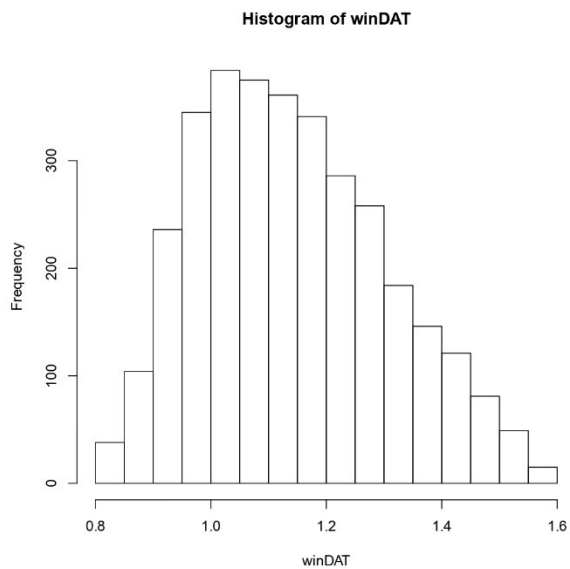


Figura 21 Histograma Estación N°1  
Fuente: Estación 29065130 Magdalena.

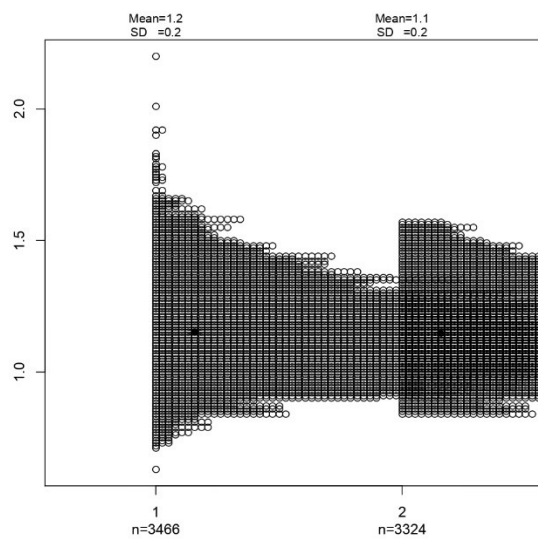


Figura 22 Datos atípicos Estación N°1  
Fuente: Estación 29065130 Magdalena.

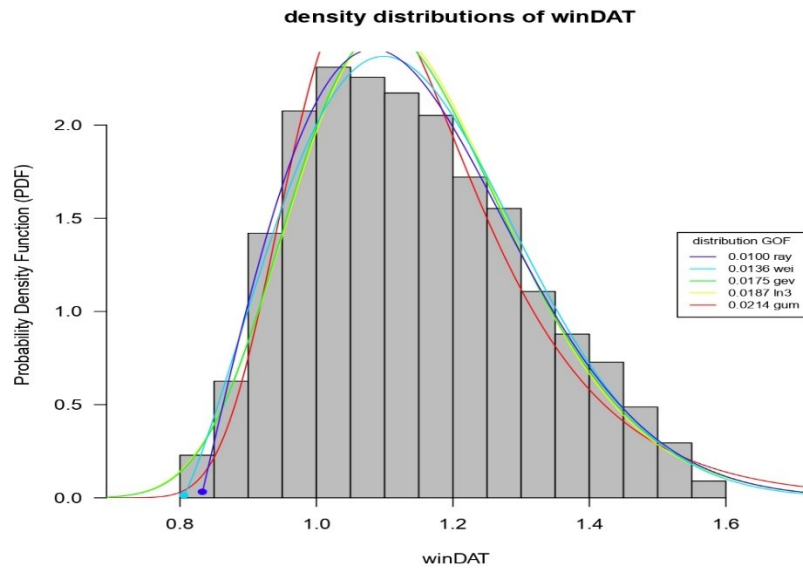


Figura 23 Diagrama función de probabilidad Estación N°1  
Fuente: Estación 29065130 Magdalena.

**Estación N° 2 - 21205012 Bogotá**

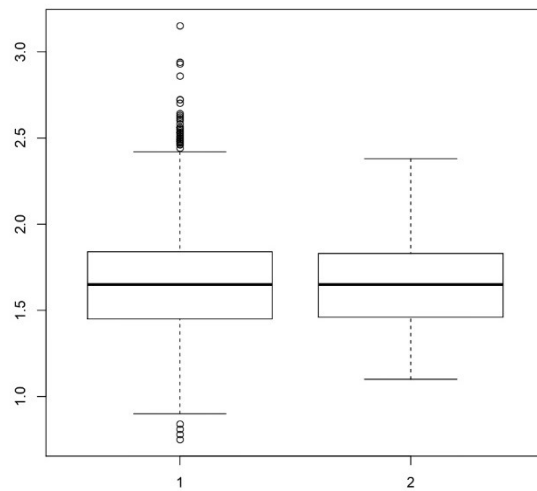


Figura 24 Diagrama de caja Estación N°2  
Fuente: Estación 21205012 Bogotá

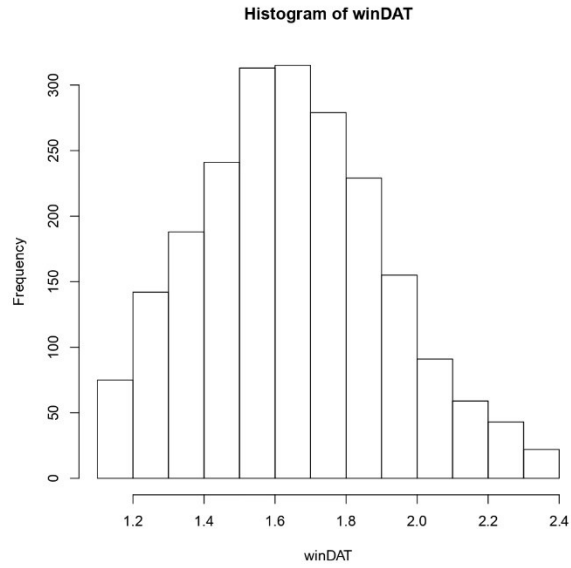


Figura 25 Histograma Estación N°2  
Fuente: Estación 21205012 Bogotá.

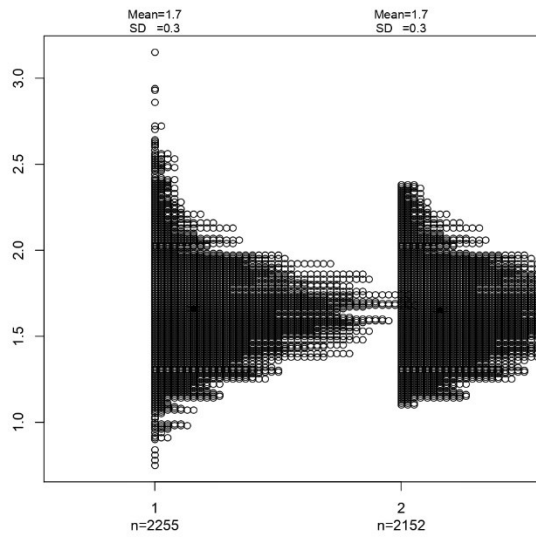


Figura 26 Datos atípicos Estación N°2  
Fuente: Estación 21205012 Bogotá.

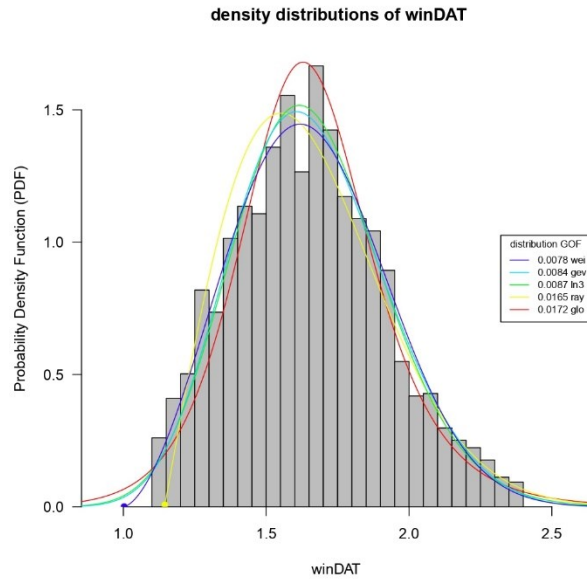


Figura 27 Diagrama función de probabilidad Estación N°2  
Fuente: Estación 21205012 Bogotá.

**Estación N° 3 - 52045080 Nariño**

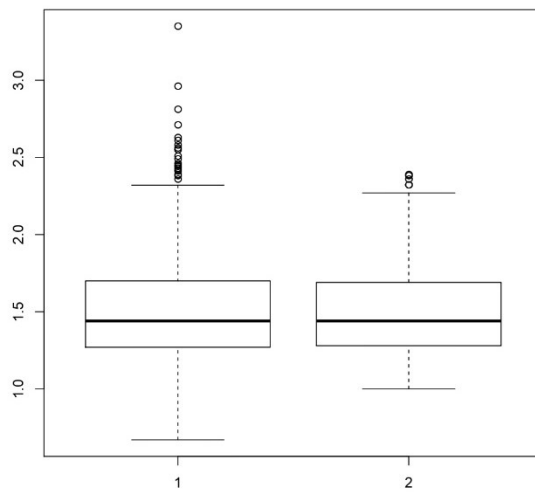


Figura 28 Diagrama de caja Estación N°3  
Fuente: Estación 52045080 Nariño.

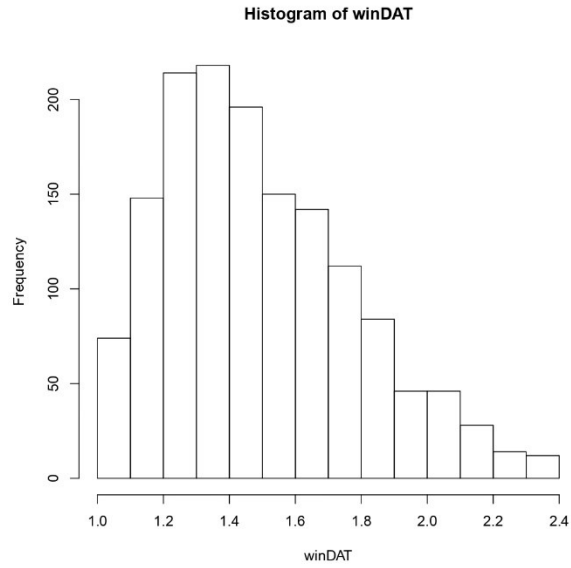


Figura 29 Histograma Estación N°3  
Fuente: Estación 52045080 Nariño.

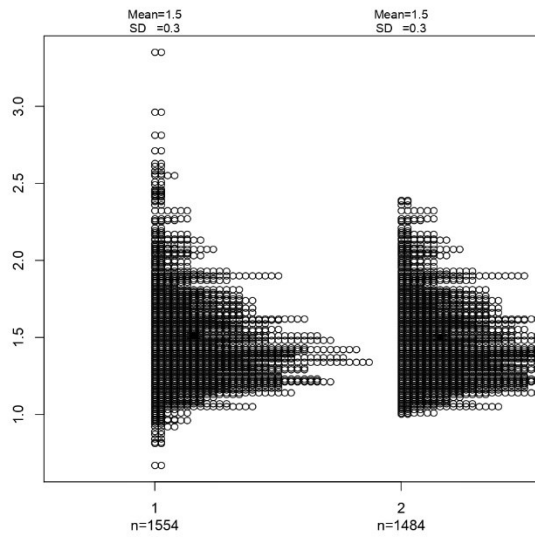


Figura 30 Datos atípicos Estación N°3  
Fuente: Estación 52045080 Nariño.

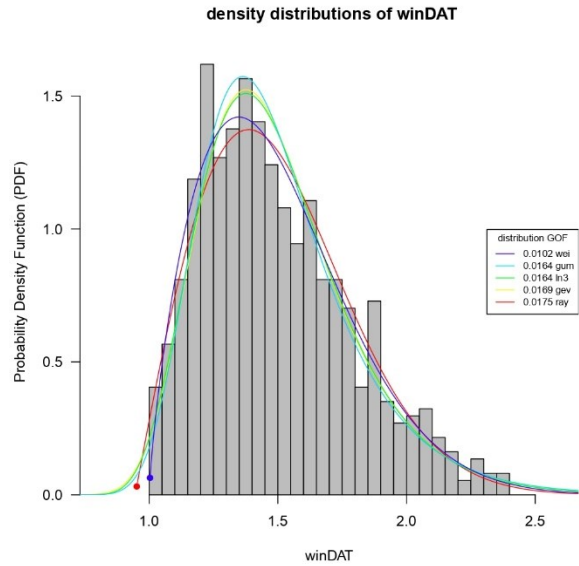


Figura 31 Diagrama función de probabilidad Estación N°3  
Fuente: Estación 52045080 Nariño.

**Estación N° 4 - 32105080 Guaviare**

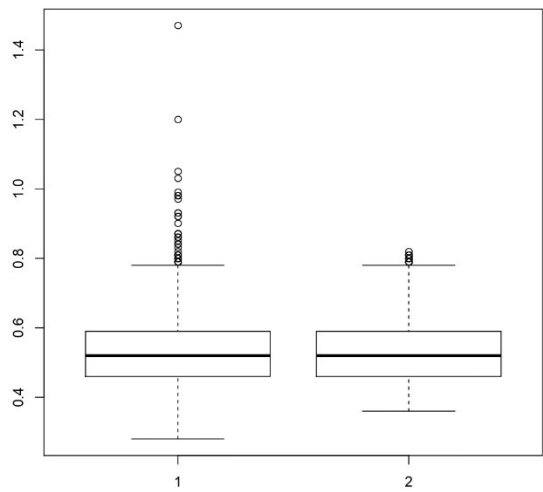


Figura 32 Diagrama de caja Estación N°4  
Fuente: Estación 32105080 Guaviare.

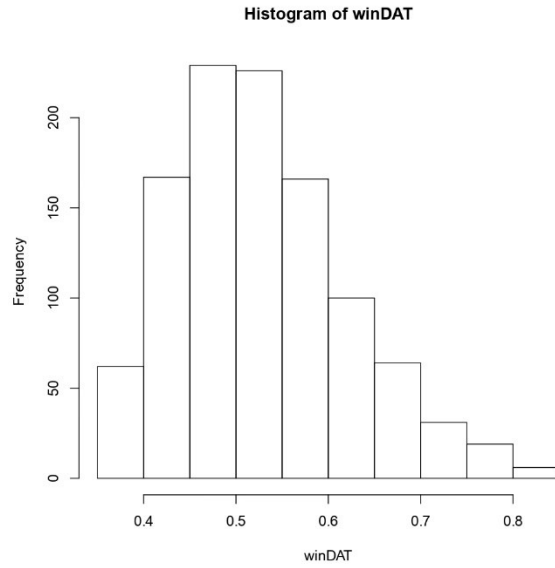


Figura 33 Histograma Estación N°4  
Fuente: Estación 32105080 Guaviare.

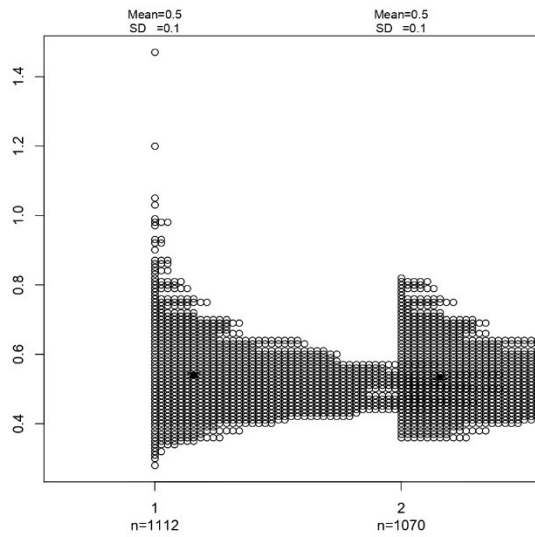


Figura 34 Datos atípicos Estación N°4  
Fuente: Estación 32105080 Guaviare.

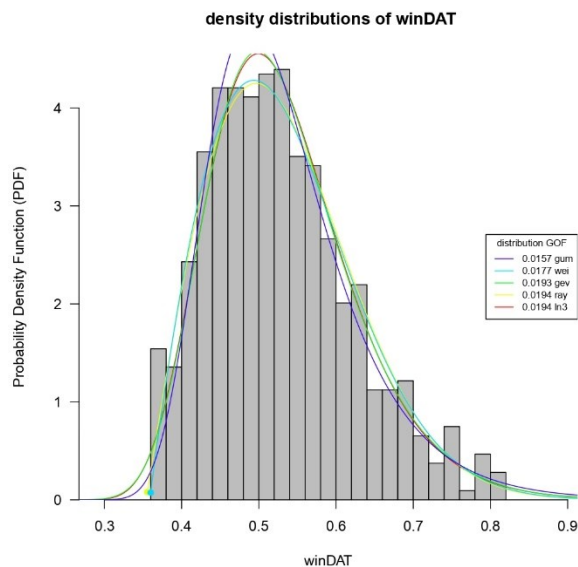


Figura 35 Diagrama función de probabilidad Estación N°4  
Fuente: Estación 32105080 Guaviare.

En la Tabla 5 se encuentra la lista de las estaciones elegidas con su respectiva función de probabilidad y la figura en la cual se muestra la curva que mejor se ajustó a la distribución.

Tabla 5 Función de probabilidad de las 4 estaciones

<b>Estación</b>	<b>Función</b>	<b>Figura</b>
29065130 Magdalena	Rayleigh	Figura 23
21205012 Bogotá	Weibull	Figura 27
52045080 Nariño	Weibull	Figura 31
32105080 Guaviare	Gumbel	Figura 35

Fuente: Elaboración propia.

Los periodos de retorno se tomaron teniendo en cuenta un valor máximo y valor mínimo, también se evidencia en la primera columna de cada tabla, la función a la que mejor se adaptaba el periodo de retorno de cada estación como se evidencia a continuación:



Tabla 6 Periodo de retorno Estación N°1

<b>Estación 29065130</b>											
<b>Max</b>	<b>PR5</b>	<b>PR10</b>	<b>PR20</b>	<b>PR50</b>	<b>PR100</b>	<b>Min</b>	<b>PR5</b>	<b>PR10</b>	<b>PR20</b>	<b>PR50</b>	<b>PR100</b>
<b>wei</b>	1.70	1.73	1.76	1.80	1.83	<b>wei</b>	0.76	0.74	0.73	0.70	0.69
<b>ray</b>	1.66	1.68	1.71	1.74	1.76	<b>ray</b>	0.78	0.76	0.75	0.73	0.72
<b>ln3</b>	1.75	1.80	1.85	1.92	1.97	<b>gum</b>	0.72	0.69	0.66	0.62	0.59
<b>gum</b>	1.76	1.81	1.86	1.92	1.97	<b>gev</b>	0.74	0.71	0.69	0.65	0.63
<b>gev</b>	1.75	1.80	1.85	1.92	1.96	<b>exp</b>	0.65	0.60	0.56	0.51	0.47
<b>exp</b>	1.87	1.94	2.01	2.10	2.17	<b>ln3</b>	0.73	0.71	0.68	0.64	0.61
<b>empírica</b>	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	<b>empírica</b>	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7 Periodo de retorno Estación N°2

<b>Estación 21205012</b>											
<b>Maz</b>	<b>PR5</b>	<b>PR10</b>	<b>PR20</b>	<b>PR50</b>	<b>PR100</b>	<b>Min</b>	<b>PR5</b>	<b>PR10</b>	<b>PR20</b>	<b>PR50</b>	<b>PR100</b>
<b>wei</b>	2.64	2.72	2.79	2.88	2.95	<b>wei</b>	0.97	0.94	0.91	0.87	0.85
<b>ln3</b>	2.77	2.89	3.02	3.19	3.33	<b>ray</b>	0.98	0.95	0.92	0.88	0.85
<b>exp</b>	2.83	2.95	3.06	3.21	3.32	<b>gev</b>	0.94	0.90	0.87	0.82	0.79
<b>gev</b>	2.83	2.97	3.12	3.34	3.52	<b>gum</b>	0.86	0.80	0.74	0.66	0.60
<b>gum</b>	2.64	2.72	2.80	2.91	2.99	<b>exp</b>	0.72	0.64	0.55	0.44	0.36
<b>ray</b>	2.48	2.52	2.56	2.61	2.65	<b>ln3</b>	0.93	0.88	0.84	0.78	0.73
<b>empírica</b>	2.38	2.38	2.38	2.38	2.38	<b>empírica</b>	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8 Periodo de retorno Estación N°3

<b>Estación 52045080</b>											
<b>Max</b>	<b>PR5</b>	<b>PR10</b>	<b>PR20</b>	<b>PR50</b>	<b>PR100</b>	<b>Min</b>	<b>PR5</b>	<b>PR10</b>	<b>PR20</b>	<b>PR50</b>	<b>PR100</b>
<b>wei</b>	2.65	2.73	2.81	2.91	2.98	<b>wei</b>	0.91	0.89	0.86	0.84	0.82
<b>ln3</b>	2.79	2.92	3.05	3.23	3.38	<b>ray</b>	0.91	0.89	0.87	0.84	0.82
<b>gev</b>	2.83	2.97	3.11	3.32	3.47	<b>gum</b>	0.82	0.78	0.73	0.67	0.63
<b>gum</b>	2.71	2.81	2.92	3.05	3.16	<b>gev</b>	0.89	0.86	0.83	0.80	0.78
<b>ray</b>	2.50	2.56	2.61	2.67	2.72	<b>exp</b>	0.72	0.66	0.59	0.51	0.45
<b>exp</b>	2.95	3.10	3.24	3.43	3.58	<b>ln3</b>	0.88	0.84	0.81	0.77	0.73
<b>empírica</b>	2.39	2.39	2.39	2.39	2.39	<b>empírica</b>	1	1	1	1	1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9 Periodo de retorno Estación N°4

Estación 32105080											
Max	PR5	PR10	PR20	PR50	PR100	Min	PR5	PR10	PR20	PR50	PR100
wei	0.93	0.96	0.99	1.03	1.06	wei	0.31	0.30	0.29	0.27	0.26
ln3	0.98	1.03	1.09	1.16	1.22	gev	0.29	0.27	0.25	0.22	0.20
gev	1.01	1.07	1.13	1.22	1.30	gum	0.29	0.28	0.26	0.24	0.22
gum	0.93	0.96	1.00	1.04	1.08	ray	0.33	0.32	0.31	0.30	0.29
exp	1.01	1.06	1.11	1.17	1.22	exp	0.25	0.23	0.21	0.18	0.15
ray	0.86	0.88	0.89	0.91	0.93	ln3	0.29	0.27	0.25	0.23	0.21
empírica	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	empírica	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36

Fuente: Elaboración propia.

### 6.3 Comparación con datos del IDEAM

En la comparación de la Tabla 10 y Tabla 11, se logró obtener la *Figura 36* en la cual se ve representada la velocidad del viento promedio obtenida en cada estación y en cada estudio.

De la estación 1 a la estación 4 se evidencia que el valor de la velocidad del viento promedio es muy similar, variando su valor en solo décimas, pero en la estación 5 el promedio cambia notoriamente; en el Atlas del IDEAM, el promedio para la estación 5 correspondiente a Boyacá asume un valor de 1.6 m/s, mientras que dicha estación en el estudio asume un dato 1.48 puntos arriba con valor de 3.08 m/s. Finalmente para las estaciones 6 y 7 los datos no varían de manera significativa en la gráfica.

Tabla 10 Velocidad del viento Atlas IDEAM

VELOCIDAD DEL VIENTO ATLAS IDEAM							
CÓDIGO	26225030	29035070	29015020	29035170	24035240	15065130	35025020
ESTACIÓN	HDA. COTOVE	REPELON	CARMEN DE BOLIVAR	SINCERIN	SIERRA NEVADA DEL COCUY	LA MINA	LA LIBERTAD
DEPARTAM ENTO	ANTIOQUIA	ATLANTIC O	BOLIVAR	BOLIVAR	BOYACA	LA GUAJIRA	META

<b>VELOCIDAD DEL VIENTO ATLAS IDEAM</b>							
<b>CÓDIGO</b>	<b>26225030</b>	<b>29035070</b>	<b>29015020</b>	<b>29035170</b>	<b>24035240</b>	<b>15065130</b>	<b>35025020</b>
<b>MUNICIPIO</b>	SANTAFE DE ANTIOQUIA	REPELON	EL CARMEN DE BOLIVAR	ARJONA	GUICAN	HATONUEVO	VILLAVICENCIO
LATITUD	6.53	10.5	9.72	10.14	6.41	11.14	4.06
LONGITUD	-75.83	-75.12	-75.11	-75.28	-72.37	-72.62	-73.47
PERIODO	1981 - 2009	1981 - 2008	1982 - 2009	1981 - 2009	2002 - 2008	1988 - 2008	1981 - 2010
MÍN	0	0	0	0	0	0	0
PROM	1	2	2	2	2	4	2
Q1	0.6	1.3	0.9	0.6	0	2.9	0.9
MODA	0	1.3	1	1.3	1.6	3.7	0.9
DESVIACIÓN	1	1	1	1	1	2	1
Q3	1.3	3.4	2.2	2.6	3.2	5.2	2
MÁX	9.9	9.7	9.4	9.8	9.7	9.8	9.1

Fuente: Adaptado de: (IDEAM, 2020a)

Tabla 11 Velocidad del viento estaciones descargadas

<b>VELOCIDAD DEL VIENTO DE LAS ESTACIONES DESCARGADAS</b>							
<b>CÓDIGO</b>	<b>26225060</b>	<b>29035200</b>	<b>29015040</b>	<b>29035170</b>	<b>24035000</b>	<b>15065501</b>	<b>35025110</b>
<b>ESTACIÓN</b>	HDA. COTOVE	REPELON	CARMEN DE BOLIVAR	SINCERIN	SIERRA NEVADA DEL COCUI	LA MINA	LA LIBERTAD
<b>DEPARTAMENTO</b>	ANTIOQUIA	ATLANTICO	BOLIVAR	BOLIVAR	BOYACA	LA GUAJIRA	META
<b>MUNICIPIO</b>	SANTAFE DE ANTIOQUIA	REPELON	EL CARMEN DE BOLIVAR	ARJONA	GUICAN	HATONUEVO	VILLAVICENCIO
LATITUD	6.53	10.5	9.72	10.14	6.41	11.14	4.06
LONGITUD	-75.83	-75.12	-75.11	-75.28	-72.37	-72.62	-73.47
F.INSTALACIÓN	25/11/2004	9/12/2007	10/12/2007	11/12/2007	12/11/2005	27/08/2014	25/03/2007
MÍN	0.47	1.28	0.65	1.2	1.27	1.57	0.7
PROM	0.7769	2.006	2.182	1.829	3.416	3.468	0.9915
Q1	0.65	1.62	0.93	1.6	2.08	2.968	0.87
MEDIANA	0.74	1.83	1.09	1.8	3.08	3.656	0.98
DESVIACIÓN	0.1667	0.6402	4.099	0.3615	1.563	0.781	0.1536
Q3	0.87	2.19	1.31	2.1	4.5	4.063	1.1
MÁX	1.25	6.52	20.67	2.8	7.75	4.721	1.41

VELOCIDAD DEL VIENTO DE LAS ESTACIONES DESCARGADAS							
CÓDIGO	26225060	29035200	29015040	29035170	24035000	15065501	35025110
N	3181	1056	3075	1621	3420	726	738

Fuente: Elaboración propia.

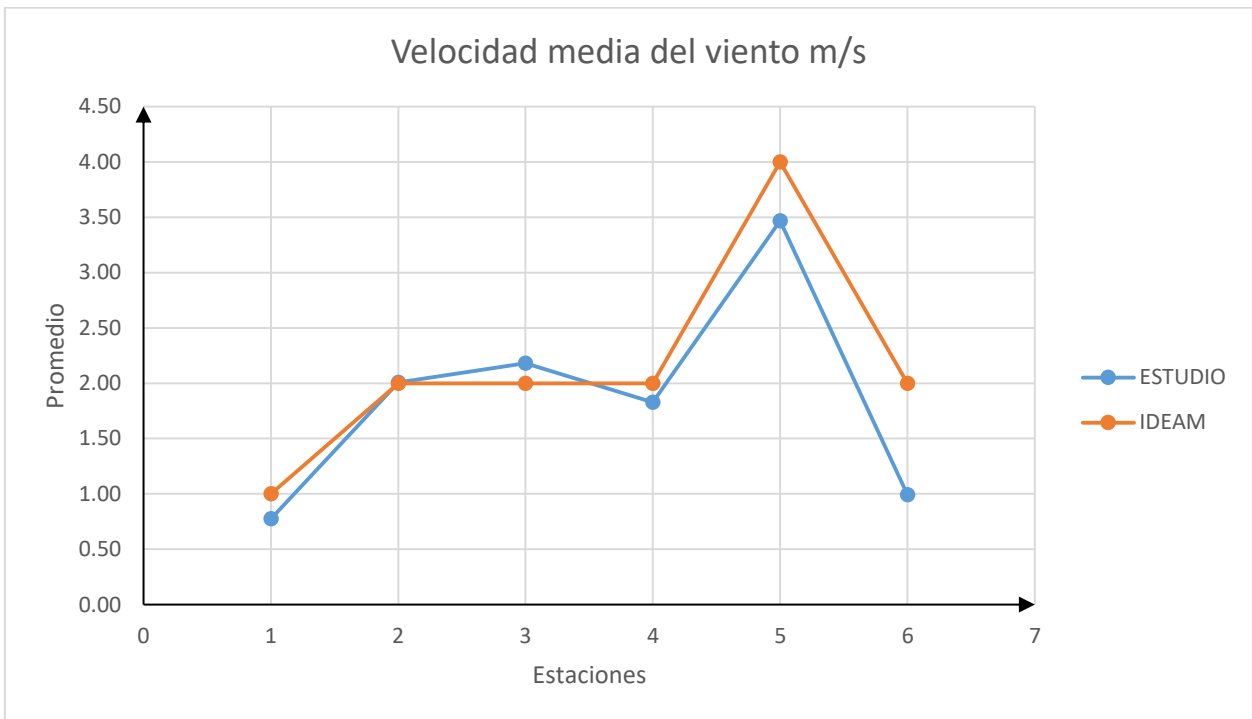


Figura 36 Comparación de la velocidad del viento promedio de las estaciones en estudio y las estaciones presentes en el Atlas del IDEAM

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12 Error entre estaciones

Ref	Est	Error %
1.0	0.8	22.3
2.0	2.0	0.0
2.0	2.2	9.1
2.0	1.8	8.6
4.0	3.5	13.3
2.0	1.0	50.4

Fuente: Elaboración propia.

## 7. CONCLUSIONES

Durante el análisis de los resultados se demostró que solo el 75% de las estaciones descargadas eran apropiadas para someterse a un análisis de valores extremos sin llegar a presentar errores por tener datos faltantes. Para San Andrés y Providencia, no se logró hacer el análisis de datos porque la estación existente contaba con menos de 100 datos, esto hizo imposible realizar el análisis de extremos ya que el programa utilizado arrojaba error al tratar de realizar graficas con datos tan mínimos.

La velocidad del viento promedio diaria más alta se registró en Nariño con 9.5 m/s, mientras que la velocidad más baja se registró en el Guaviare con un valor de 0.53 m/s. En la guajira donde se esperaban los datos más altos se registraron velocidades promedio diarias de 3.45 m/s hasta 7.60 m/s.

En la estación N°4, el periodo de retorno calculado de manera empírica y con la función Weibull, es el que tiene menor margen de error, su aproximación solo cambia de 3 a 10 puntos frente a las otras estaciones que muestran variaciones más altas.

Se llegó a la conclusión que al comparar los datos del estudio con los datos del IDEAM, la velocidad del viento promedio en estos no variaba de manera significativa en ciertas regiones del país, el mayor error se entró en la estación N°6 correspondiente al departamento de La Guajira donde hay un error del 50%. El menor error esta en la estación N°2, departamento del Atlántico presentando un error del 0%.

Se deja una base de datos en drive que contiene todos los diagramas y métricas de las 134 estaciones estudiadas; carpetas que contienen la información desde cero hasta el punto final de esta pasantía.

Cada estación queda organizada por carpetas en las cuales se encuentran mas de 20 diagramas y alrededor de 7 archivos de Excel donde se encuentra la información suficiente para seguir realizando estudios de la velocidad del viento.

## 8. REFERENCIAS

- Academy, K. (2020). *Calcular la desviación estándar paso a paso (artículo) | Khan Academy*.  
<https://es.khanacademy.org/math/probability/data-distributions-a1/summarizing-spread-distributions/a/calculating-standard-deviation-step-by-step>
- Agroinfo. (2020). *Anemómetros*.  
[https://www.infoagro.com/instrumentos\\_medida/doc\\_anemometro\\_velocidad\\_viento.asp?k=80](https://www.infoagro.com/instrumentos_medida/doc_anemometro_velocidad_viento.asp?k=80)
- Aparicio Mijares, F. J. (1993). *Fundamentos de Hidrología de superficie*. Limsa.
- Asquith, W. (2012). *Distributional analysis with L-moment statistics using the R environment for statistical computing*.
- Bury, K. (1999). *Statistical Distributions in Engineering*. Cambridge University Press.  
<https://books.google.com.co/books?id=CCMaQZDO7hAC>
- Castro, L. M. (2010). ANÁLISIS DE TENDENCIA Y HOMOGENEIDAD DE SERIES CLIMATOLÓGICAS. *Revista Eidenar*.  
<http://revistaeidenar.univalle.edu.co/revista/ejemplares/9/c.htm>
- Cengel, Y. A., & Castellanos, J. H. P. (2007). *Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico*. McGraw-Hill. <https://books.google.com.co/books?id=uxLCMQAACA AJ>
- Chow, V. Te. (1994). *Hidrología Aplicada*.
- Cran.r. (2020). *CRAN - Paquete extremeStat*. <https://cran.r-project.org/web/packages/extremeStat/index.html>

- DHIME, I. (2020). *ArcGIS Web Application*. <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/dir-pi.com>, & Alba, R. (2020). *Transferencia de calor. Convección*. [http://pi-dir.com/calor/transferencia\\_de\\_calor\\_05\\_conveccion.htm](http://pi-dir.com/calor/transferencia_de_calor_05_conveccion.htm)
- Dontpanic. (2006). *Hobo stove convection*.  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hobo\\_stove\\_convection\\_2.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hobo_stove_convection_2.jpg)
- Educativo, P. (2020). *Media, moda, mediana, rango*. <https://www.portaleducativo.net/octavo-basico/790/Media-moda-mediana-rango>
- Ferrero, R. (2020). *Qué es R Software | Máxima Formación*.  
<https://www.maximaformacion.es/blog-dat/que-es-r-software/>
- GrupsInnovacio. (2020). *La distribución Exponencial*.  
<http://www.ub.edu/stat/GrupsInnovacio/Statmedia/demo/Temas/Capitulo4/B0C4m1t3.htm>
- Haan, C. T. (2002). *Statistical Methods in Hydrology* (2002 Wiley (ed.); 2nd, ilustra ed.). Wiley.  
<https://books.google.com.co/books?id=gfmKQgAACAAJ>
- Holman, J. P. (1998). *Transferencia de calor*. MCGRAW-HILL.  
[https://books.google.com.co/books?id=tf\\_MSgAACAAJ](https://books.google.com.co/books?id=tf_MSgAACAAJ)
- IDEAM. (2020a). *Diagramas Boxplot -Datos*.  
[http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/Diagramas\\_Boxplot.pdf](http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/Diagramas_Boxplot.pdf)
- IDEAM. (2020b). *Marco conceptual viento*.  
[http://bart.ideam.gov.co/wrfideam/ATLAS/documentos/Marco\\_Conceptual\\_Viento.pdf](http://bart.ideam.gov.co/wrfideam/ATLAS/documentos/Marco_Conceptual_Viento.pdf)
- IDEAM, U. (2006). *Atlas de viento y energía eólica de Colombia*. Unidad de Planeación



- Minero Energética,UPME. <https://books.google.com.co/books?id=-EjsoAEACAAJ>
- Kreith, F., Manglik, R., & Bohn, M. (2012). *Principios de Transferencia de Calor*. Cengage Learning Editores S.A. de C.V. <https://books.google.com.co/books?id=xr4uAzjOquoC>
- Leitch, P. ; C. (2010). *Weibull*. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Weibull\\_CDF.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Weibull_CDF.svg)
- Mariles, O. A. F., & Franco, V. (1999). *Estudio hidrológico para obras de protección: capítulo 3 del Manual de ingeniería de rios* (1999 Universidad Autónoma de México, Instituto de Ingeniería (ed.)). Universidad Autónoma de México, Instituto de Ingeniería. <https://books.google.com.co/books?id=Q9JiGwAACAAJ>
- Medialdea Villanueva, A. (2016). *Análisis de Valores Extremos*.
- Mendoza, F. R., Fernández, D., & Guitart, M. (2020). *Estadística Descriptiva y Análisis de Datos Cátedra: Probabilidad y Estadística*.
- Meylan, P., Favre, A. C., & Musy, A. (2012). *Predictive Hydrology: A Frequency Analysis Approach*. CRC Press. <https://books.google.com.co/books?id=MjvOBQAAQBAJ>
- Microsoft. (2020). *Consolidar datos en varias hojas de cálculo - Excel*. <https://support.office.com/es-es/article/consolidar-datos-en-varias-hojas-de-cálculo-007ce8f4-2fae-4fea-9ee5-a0b2c9e36d9b>
- Millard, S. P., & Kowarik, M. A. (2018). *Package “EnvStats.”* <http://www.springer.com/book/9781461484554>
- Mochales, I. S. (2013). *Modelos estadísticos para valores extremos y aplicaciones Statistical models for tails and applications* [Universidad Autonoma de Barcelona].

<https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/129396/ism1de1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Naghetini, M. (2016). *Fundamentals of Statistical Hydrology*. Springer International Publishing.  
<https://books.google.com.co/books?id=c5BjDQAAQBAJ>

OMM. (2011). *Guía de prácticas climatológicas*.

Panana, A. E. (2007). *Introducción a la transferencia de calor*.

[https://unac.edu.pe/documentos/organizacion/vri/cdcitra/Informes\\_Finales\\_Investigacion/Se  
tiembre\\_2011/IF\\_PANANA\\_GIRIO\\_FIQ/Informe final Texto.pdf](https://unac.edu.pe/documentos/organizacion/vri/cdcitra/Informes_Finales_Investigacion/Se<br/>tiembre_2011/IF_PANANA_GIRIO_FIQ/Informe_final_Texto.pdf)

PAR, commonswiki. (2005). *Rayleigh Densidad*.

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rayleigh\\_distributionPDF.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rayleigh_distributionPDF.png)

R, L. fundacion. (2020). *R: ¿Qué es R?* <https://www.r-project.org/about.html>

Ruiz, F., & Serna, J. (2020). *VIENTO*. IDEAM.

Sanchez Bajaras, G. (2020). *La estadística aplicada al análisis económico*.

Sanchez, F. J. (2013). *Cálculos Estadísticos en Hidrología*. <http://hidrologia.usal.es>

Skbkekass. (2010). *Distribución exponencial*.

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Exponential\\_cdf.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Exponential_cdf.svg)

Suárez Cifuentes, J. F. (2002). *Introducción a la Teoría de Probabilidad*. Univ. Nacional de  
Colombia. <https://books.google.com.co/books?id=Wct30x12M5sC>

Ugr.es. (2020). *Calculo Periodo de retorno*.

[https://www.ugr.es/~iagua/LICOM\\_archivos/SolucionProblema1.pdf](https://www.ugr.es/~iagua/LICOM_archivos/SolucionProblema1.pdf)

Walpole, R. E., Myers, R. H., & Myers, S. L. (1999). *Probabilidad y estadística para ingenieros*.

Pearson Educación. <https://books.google.com.co/books?id=9DWw696jLbMC>