



---

**Universidad de Valladolid**

Facultad de Ciencias



**Grupo de  
Contaminación  
Atmosférica**

## **TRABAJO FIN DE GRADO**

Grado en Física

**Estudio de la velocidad del viento:  
análisis espacial y ajuste a una función de distribución**

***Autora: Cristina Herrero Novoa***

***Tutores: Isidro A. Pérez Bartolomé***

***M<sup>a</sup> Luisa Sánchez Gómez***

*Agradecimientos*

*A mis tutores Isidro y María Luisa por sus consejos y colaboración,  
y a todas los que me han apoyado y se han interesado por este trabajo*

# ÍNDICE

<b>Abstract /Resumen .....</b>	<b>5</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>7</b>
<b>Capítulo I Descripción teórica .....</b>	<b>11</b>
1.1. Análisis de la velocidad de viento .....	12
1.1.1. La Escala de Beaufort .....	12
1.1.2. Ley potencial .....	14
1.2. Análisis Estadístico .....	16
1.2.1. Indicadores estadísticos .....	16
1.2.2. La Distribución de Weibull .....	19
1.2.3. Métodos de cálculo del parámetro de forma y de escala .....	21
1.2.4. Coeficiente de correlación .....	25
<b>Capítulo II Descripción experimental .....</b>	<b>28</b>
2.1. Obtención de datos .....	29
2.2. Selección de datos .....	31
2.3. Mapa de altura de las estaciones .....	33
<b>Capítulo III Análisis de la velocidad de viento .....</b>	<b>35</b>
3.1. Tratamiento de datos .....	36
3.2. Resultados de los estadísticos .....	36

3.3. Representación de los indicadores estadísticos .....	38
3.3.1. Media .....	38
3.3.2. Mediana .....	39
3.3.3. Desviación Estándar .....	41
3.3.4. Rango Intercuartílico .....	42
3.3.5. Sesgo .....	43
3.3.6. Asimetría Robusta .....	44
3.3.7. Curtosis .....	45
3.3.8. Curtosis Robusta .....	46
<b>Capítulo IV Parámetros de la distribución de Weibull .....</b>	<b>48</b>
4.1. Histogramas .....	49
4.2. Parámetros $k$ y $c$ de la distribución de Weibull .....	52
4.2.1. El parámetro de forma $k$ .....	53
4.2.2. El parámetro de escala $c$ .....	55
4.3. Densidad de potencia eólica .....	56
4.3.1. Método de los parámetros de la distribución de Weibull .....	56
4.3.2. Método de los datos experimentales .....	59
<b>Conclusiones .....</b>	<b>61</b>
<b>Bibliografía y/o referencias .....</b>	<b>63</b>
<b>Lista de figuras y tablas .....</b>	<b>68</b>
Listado de figuras .....	69
Listado de tablas .....	71

# **Abstract/Resumen**

## Abstract

A theoretical description of wind speed, its statistics, the Weibull distribution and different procedures to calculate its parameters are presented.

Observations from automatic weather stations of the Navarre region are considered. Then, a selection of data has been made and stations with gaps above 15% were discarded.

The power law is used to extrapolate observations.

The main statistics are analysed with observations from 2005 to 2015 for each weather station. Then, maps of the statistics are presented as well as their correlations with the height, which have also been obtained and analysed.

Weibull parameters have been calculated and presented below in the corresponding map. Correlation with height has also been considered.

Wind power density is calculated by two procedures, the first based on observations and the second from the Weibull distribution parameters. These variables are also shown in a map.

## Resumen

Se realiza una descripción teórica inicial relativa a la velocidad de viento, sus principales indicadores estadísticos así como de la distribución de Weibull y algunos métodos de obtención de sus parámetros característicos.

Se extraen los datos de las estaciones meteorológicas automáticas de la Comunidad de Navarra. A partir de los datos disponibles se realiza una selección de los mismos descartando aquellas estaciones con una ausencia mayor del 15% de los datos.

Los datos se extrapolan mediante la ley potencial.

Se realiza un estudio y analizan los principales indicadores estadísticos tomando los datos desde 2005 hasta 2015 para cada estación representándose posteriormente en un mapa y se muestra y analiza su correlación con la altura.

Se calculan los parámetros de la distribución de Weibull a la que se ajustan los datos disponibles representándose también en un mapa de altura junto con su correlación con esta.

Se estudia la posibilidad de obtener energía realizando un cálculo de densidad de potencia eólica tanto basado en los datos experimentales como basado en los parámetros calculados representándose también en un mapa.

# Introducción

El grado de desarrollo del mundo actual descansa tanto en la producción como en el uso de importantes recursos energéticos. Hasta hace pocos años, el origen de esta energía se encontraba en los combustibles fósiles. Sin embargo, la consciencia de que sus reservas son limitadas y las consecuencias adversas del uso de dichos combustibles, tanto en las situaciones de contaminación atmosférica en general como en el cambio climático asociado a las emisiones de dióxido de carbono, han intensificado el desarrollo de fuentes alternativas. En el caso de España, la participación de las fuentes de energía renovable en la generación eléctrica ha pasado de alrededor del 15% en 1999 hasta superar el 24% en 2009 (PANER, 2010).

Entre las energías renovables destaca la de origen eólico, cuyas instalaciones han proliferado de forma significativa. A finales de 2013, la potencia instalada en España se estimaba en casi 23 000 MW, siendo la segunda en la Unión Europea, por detrás de Alemania, que superaba los 34 000 MW. Además, se manejan escenarios para el 2020 en que la potencia instalada se encuentre entre 24 500 y 28 000 MW (EWEA, 2014). Sin embargo, a diferencia países como Alemania o Dinamarca que dispondrán de miles de MW en instalaciones situadas en la costa, en España casi la totalidad de estas instalaciones se situará en tierra, ya que no se prevé crecimiento en las instalaciones marinas, cuya contribución a la potencia instalada es notoriamente marginal.

En cualquier tipo de instalación, un detallado conocimiento de la evolución diaria y estacional de la velocidad del viento es necesario antes de seleccionar un emplazamiento determinado (Ouammi et al., 2010; Rehman y Ahmand, 2004). Aunque lo deseable es medir la velocidad del viento en un determinado lugar, en ocasiones, no están disponibles estos valores por carencia de instrumentación. En esta situación, este inconveniente puede ser, hasta cierto punto, paliado mediante aplicaciones informáticas (Carrasco-Díaz et al., 2015; Santos-Alamillos et al., 2016). En cualquier caso, no solo influye la evolución del viento en la decisión de situar en un lugar una instalación, sino que tiene que considerarse la altura de la torre de la turbina, ya que la velocidad del viento cambia con la altura (Albadi y El-Saadany, 2010).

Debido a la gran cantidad de datos que habitualmente se manejan, lo normal es emplear distribuciones paramétricas que permiten resumir fácilmente el comportamiento del conjunto de velocidades. En cualquier caso, no conviene olvidar que las funciones de distribución son abstracciones, expresiones teóricas, que con frecuencia se aproximan muy bien a los datos reales.

En ocasiones se han utilizado funciones de distribución tales como la gamma o la de Rayleigh, pero usualmente la velocidad del viento viene descrita por la distribución de Weibull (Alavi et al., 2016a; Akpinar y Akpinar, 2005). Sin embargo, aunque se trata de una función de distribución ampliamente utilizada, en ocasiones no representa los datos de la velocidad del viento, por lo que se han considerado distribuciones alternativas (Akgül et al., 2016) o se han investigado distintas modificaciones con el propósito de superar sus restricciones (Saboor et al., 2016). En ocasiones, se han usado

varias funciones de distribución. Alavi et al. (2016b) han comparado el funcionamiento de la distribución de Nakagami con siete funciones de distribución típicas de la velocidad del viento en cinco estaciones en el este y sureste de Irán y han concluido que las características de la velocidad del viento determinan la función de distribución que es más adecuada para cada estación. Shin et al. (2016) han usado una mezcla de distribuciones de probabilidad para describir la velocidad del viento en la península arábiga.

En este trabajo se ha usado la de Weibull. Se trata de una distribución asimétrica descrita por dos parámetros. Hasta la fecha no existe un procedimiento establecido para calcularlos, aunque algunos son frecuentes, como el método gráfico de mínimos cuadrados o el de máxima verosimilitud. Por ello, no es extraño que se presenten varios y se comparen los valores de los parámetros calculados mediante los distintos procedimientos (Mohammadi et al., 2016; Solyali et al., 2016).

Además, puesto que la velocidad del viento cambia con la altura, también se ha investigado la forma en que esta variable influye en los parámetros de la distribución de Weibull (Gryning et al., 2016; Shu et al., 2016). Lo deseable sería disponer de observaciones a distintas alturas (Teyabean, 2015). Sin embargo, cuando no se ha medido la velocidad del viento a la altura deseada, una posibilidad es generar los valores mediante una expresión potencial a partir de las observaciones a 10 m. Zheng y Zhao (2015) lo han hecho para una altura de 60 m. A continuación han procedido a calcular los parámetros de la distribución de Weibull.

Lo habitual es considerar un exponente próximo a 0.145 para la expresión potencial (Gualtieri, 2016). Sin embargo, se ha observado su dependencia con la rugosidad superficial. Una forma sencilla de determinar este exponente consiste en usar las velocidades medias del viento a dos alturas (Bezrukovs et al., 2016). Tamura et al. (2007) utilizaron sodares doppler y, para alturas entre 50 y 340 m, describieron exponentes en torno a 0.1 para el viento procedente del mar, mientras que para vientos en tierra los valores se situaron entre 0.2 y 0.3. Además, con altas rugosidades, el exponente puede alcanzar hasta 0.4 (Song et al., 2016).

Alternativamente, también se han sugerido expresiones que permiten obtener ambos parámetros a una altura determinada sin necesidad de ajustar las velocidades del viento a una función de distribución, sino a partir de los parámetros a una altura conocida (Tar, 2008; Bilir et al., 2015)

Un problema adicional que no se va a abordar en este trabajo es la resolución temporal de las observaciones disponibles. Normalmente las medias diarias se encuentran a disposición del público, mientras que valores más detallados, como las medias horarias no lo están. Veronesi y Grassi (2015) han usado ambas medias y obtenido valores similares para el parámetro de escala y la velocidad media del viento, pero valores inferiores para el factor de forma calculado mediante medias horarias. Además, se han observado diferencias significativas en los valores de los parámetros de

la distribución de Weibull calculados a partir de conjuntos de datos mensuales, estacionales o anuales (Lampert et al., en prensa).

Otra línea de investigación que no considera este estudio es el análisis de las tendencias de la velocidad del viento, donde se ha encontrado un contraste acusado entre la tendencia de los valores en superficie y la de los valores a 80 m de altura, que es una de las alturas típicas para el eje de la turbina (Holt y Wang, 2012). En algunos de estos análisis en que se desea conocer la evolución de las observaciones en el futuro es donde los modelos se muestran especialmente útiles (Jiang et al., 2010).

Tampoco se abordará la persistencia de la serie temporal de la velocidad del viento, cuyo indicador típico es el exponente de Hurst. Este estadístico alcanza un valor de 0.5 si la serie es aleatoria y está comprendido entre 0.5 y 1 cuando el comportamiento es persistente en el sentido de que altas velocidades serán seguidas por altas velocidades. Se ha usado con distintas variables ambientales y también en alguna ocasión con datos de velocidad del viento (Bakker et al., 2012; Akinci et al., 2013).

El siguiente trabajo se ha estructurado en cuatro capítulos, que pueden englobarse en una parte teórica descriptiva y otra parte dedicada al análisis de resultados. Primeramente se realiza un estudio teórico en el Capítulo I, donde se presentan por una parte las secciones relativas a la velocidad de viento y por otra los principales indicadores estadísticos, la distribución de Weibull y algunos métodos de obtención de sus parámetros, así como la correlación.

En el Capítulo II se describen los datos empleados en el trabajo, se muestra su procedencia, cómo han sido obtenidos y cómo se ha trabajado con ellos. Explicándose también los criterios de selección y manejo de datos que se han realizado.

Los Capítulos III y IV corresponden a los resultados obtenidos, en el primero de ellos se presentan los resultados correspondientes a los indicadores estadísticos, tanto sus valores como su rango de variación, representándose también en un mapa. Se calcula también la correlación con la altura y se presenta gráficamente.

Por último, en el capítulo IV se muestran algunas distribuciones de velocidad de viento en forma de histograma de frecuencias. Se presentan también los resultados de los parámetros de la distribución de Weibull, representándose en un mapa y se muestran los resultados de la correlación de estos con la altura. Se concluye con un análisis de la densidad de potencia eólica realizado mediante dos procedimientos uno de ellos basado en dichos parámetros y el otro basado en los datos experimentales de velocidad de viento.

# **Capítulo I**

## **Descripción**

### **Teórica**

## 1. 1. Análisis de Velocidad de Viento

### 1. 1. 1. La Escala de Beaufort

La **escala de viento de Beaufort** (1806) es una escala numérica que fue diseñada por el hidrógrafo de la Marina Real Británica Sir Francis Beaufort. Se trata de un sistema usado para estimar la velocidad del viento que tiene como unidad de medida el Número de Beaufort que se compone de tres partes:

La velocidad del viento, Bf

Un término descriptivo

Los efectos visibles en la superficie marina o sobre los objetos en tierra

Se basa en la observación de los efectos de los vientos para determinar su velocidad, que es expresada en valores Bf, es decir se tienen valores de velocidad de 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12 Bf. Se trata de una medida subjetiva de la velocidad de viento, ya que esta escala no asigna valores medibles, como pueden ser m/s.

La escala es la siguiente, se muestra primero la cifra Beaufort y su nombre descriptivo seguido de los efectos que produce en alta mar:

- 0 calma → Mar como un espejo
- 1 ventolina → Rizos como escamas de pescado pero sin espuma.
- 2 flojito → Pequeñas olas, crestas de apariencia vítrea, sin romperse
- 3 flojo → Pequeñas olas, crestas rompientes, espuma de aspecto vítreo aislados vellones de espuma
- 4 bonancible-moderado → Pequeñas olas creciendo, cabrilleo numeroso y frecuente de las olas
- 5 fresquito → Olas medianas alargadas, cabrilleo (con salpicaduras)
- 6 fresco → Se forman olas grandes, crestas de espuma blanca (salpicaduras frecuentes)
- 7 frescachón → El mar crece, la espuma blanca que proviene de las olas es arrastrada por el viento
- 8 temporal → Olas de altura media y mas alargadas, del borde superior de sus crestas comienzan a destacarse torbellinos de salpicaduras

9 temporal fuerte → Grandes olas, espesas estelas de espuma a lo largo del viento, las crestas de las olas se rompen en rollos, las salpicaduras pueden reducir la visibilidad

10 temporal duro → Olas muy grandes con largas crestas en penachos, la espuma se aglomera en grandes bancos y es llevada por el viento en espesas estelas blancas en conjunto la superficie está blanca, la visibilidad está reducida

11 temporal muy duro → Olas de altura excepcional, (pueden perderse de vista tras ellas barcos de tonelaje pequeño y medio), mar cubierta de espuma, la visibilidad está reducida

12 temporal huracanado → Aire lleno de espuma, salpicaduras, mar cubierto de espuma visibilidad muy reducida

A estos valores Bf corresponde un rango de velocidad, existen diversos trabajos acerca de la conversión de la escala Beaufort a medidas cuantitativas (del Angel, 2004), a continuación se presenta una Tabla de conversión de escala Beaufort a (m/s) y a km/h.

**Tabla 1.1.** Conversión de la Escala de Beaufort a m/s y km/h

Escala Beaufort	Rango de velocidad (m/s)	Rango de velocidad (km/h)
<b>0</b>	0 - 0,2	1
<b>1</b>	0,3 - 1,5	1 - 5
<b>2</b>	1,6 - 3,3	6 - 11
<b>3</b>	3,4 - 5,4	12 - 19
<b>4</b>	5,5 - 7,9	20 - 28
<b>5</b>	8,0 - 10,7	29 - 38
<b>6</b>	10,8 - 13,8	39 - 49
<b>7</b>	13,9 - 17,1	50 - 61
<b>8</b>	17,2 - 20,7	62 - 74
<b>9</b>	20,8 - 24,4	75 - 88
<b>10</b>	24,5 - 28,4	89 - 102
<b>11</b>	28,5 - 32,6	103 - 117
<b>12</b>	> 32,7	> 118

## 1. 1. 2. Ley potencial

El viento viene caracterizado por dos magnitudes: velocidad y dirección.

La **velocidad del viento** mide la componente horizontal del desplazamiento del aire en un punto y en un instante determinado, se mide mediante un anemómetro. La unidad de medida es metros por segundo (m/s).

Un anemómetro es un instrumento que sirve para determinar la velocidad del viento o su velocidad y dirección. Para su funcionamiento se recurre fundamentalmente a la utilización de alguna de las tres propiedades del viento como son su energía cinética (que determina la rotación de las cazoletas del aparato), su presión dinámica (dependiente de la velocidad y la densidad) y su capacidad de producir enfriamiento. De ahí que exista gran variedad de tipos de anemómetros

La **dirección del viento** se mide mediante una veleta, la dirección mide la componente horizontal de la velocidad del viento. En meteorología es importante tener en cuenta que la dirección indica de dónde viene el viento, no hacia dónde va. Se mide en grados, desde 0° (sin incluir este) hasta 360° (incluido), girando en el sentido de las agujas del reloj en el plano horizontal visto desde arriba. Valores cercanos a 1° y 360° indican viento del norte, cercanos a 90° viento del este, 180° del sur y 270° del oeste. Entre estos valores estará el resto de direcciones como son nordeste, sureste, suroeste y noroeste.

Las ausencias de viento se denominan calmas.

En el cálculo de velocidades de viento es frecuente que aparezca la necesidad de extrapolar datos, normalmente los datos medidos de los que se dispone corresponden a alturas de 2 o 10 m , como es el caso que nos ocupa. Y puede resultar útil trabajar con todos los datos a una misma altura para lo que es necesario tomar una altura como referencia y calcular el resto de los datos a esa altura por extrapolación.

Es habitual también utilizar las leyes de extrapolación para obtener datos de velocidad de viento a alturas superiores a las que no se tienen medidas, como pueden ser las alturas a las que se sitúan aerogeneradores, alturas de 40, 50 o 90 metros por ejemplo.

El nombre de **ley potencial** deriva del hecho de que la transformación que cambia los datos de referencia se lleva a cabo elevando sus valores a un exponente. Se expresa matemáticamente de la siguiente forma (Wilks, 2006):

$$F(x) = (x)^k \quad (1.1)$$

siendo k mayor que cero

Las expresiones en el caso en el que  $k$  sea igual a cero y  $k$  sea menor que cero son las siguientes:

$$\begin{aligned} F(x) &= \ln k \\ F(x) &= -(x)^k \end{aligned} \tag{1.2}$$

Su expresión tomada ya con las variables necesarias en nuestro caso que son la velocidad de viento y la altura es la siguiente:

$$v = v_{ref} \left( \frac{h}{h_{ref}} \right)^\alpha \tag{1.3}$$

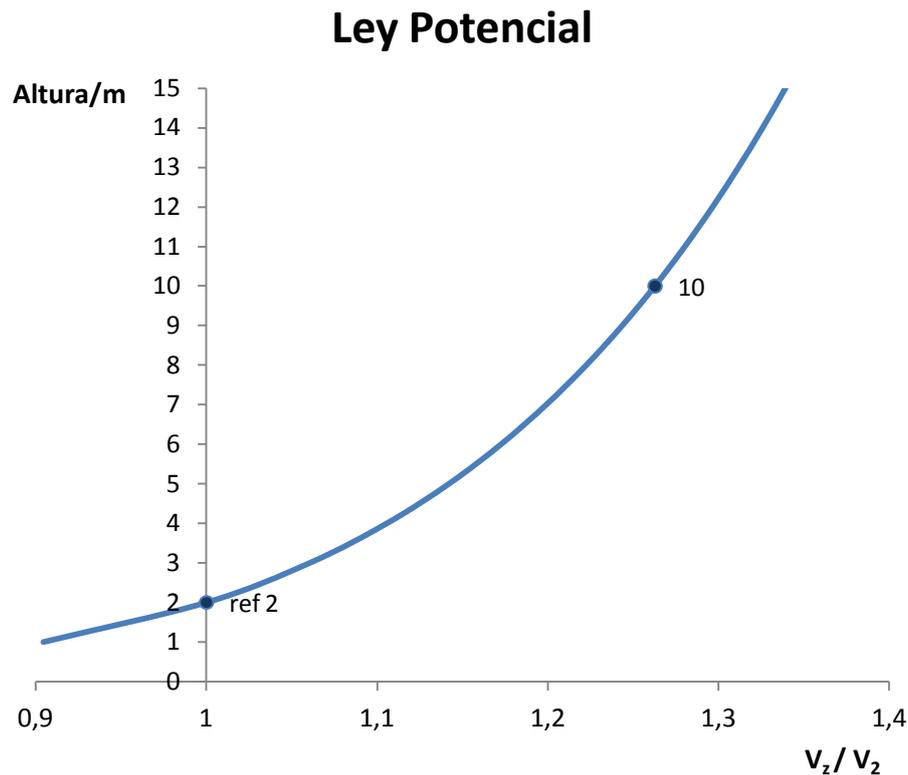
El valor que toma el exponente  $\alpha$  en cada situación dependerá de la rugosidad de la superficie así como de la estabilidad atmosférica. Toma valores dentro de un rango entre 0.05 y 0.5.

Varía de zonas urbanas, donde es mayor, 0.41, a zonas suburbanas, 0.28 o zonas de campo, 0.14 - 0.15. En este trabajo se ha tomado como exponente 0.145 correspondiente a zonas de campo (Beychok, 1994). Es habitual también el exponente  $1/7$  muy similar.

Es habitual su uso en esta forma en estudios de la temática que nos ocupa (Pérez et al, 2004; 2005; 2008)

Será necesaria su utilización más adelante en otras secciones del trabajo para realizar algunos cálculos. Se transformaran las velocidades medidas a 2 m en velocidades a 10 m para unificar así todos los datos. Se empleará para poder realizar así todos los cálculos de velocidades a 10 m , y posteriormente a 50 m .

A continuación se muestra una gráfica en la Figura 1.1. donde se representa la ley potencial, en el eje x el cociente entre la velocidad y la velocidad de referencia tomada a 2 m y en el eje y la altura h. Con ella se extrapolan los datos a cualquier otra altura, en este caso a 10 m .



**Figura 1.1.** Ley potencial tomando la altura a 2 m como referencia y como exponente 0.145

## 1. 2. Análisis estadístico

### 1.2.1. Indicadores estadísticos

El empleo de indicadores estadísticos es muy habitual en observaciones atmosféricas en general. Algunos indicadores típicos empleados son la media aritmética, la desviación estándar, el sesgo o la curtosis.

Se emplean además otros indicadores cuando se desea que estos sean menos sensibles a la distribución de los datos o a la presencia de valores anómalos o extremos para evitar que pudieran enturbiar los resultados obtenidos. Se trata de unos indicadores más robustos como son la mediana, el rango intercuartílico, el sesgo robusto o asimetría robusta y el coeficiente de curtosis robusta.

A continuación se van a describir brevemente estos indicadores, particularizando su expresión para la variable velocidad de viento.

## Media

La **media aritmética** describe el valor de la variable, es el promedio de todos los valores, en este caso, para la velocidad de viento se puede expresar como aparece a continuación.

$$\bar{v} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i \quad (1.4)$$

## Mediana

La **mediana** es la medida más robusta, resistente y más común de la tendencia central de la distribución de datos. A diferencia de la media no se ve afectada por valores extremos que pudieran ser anómalos. Es el valor del segundo cuartil,  $q_{0.5}$ , para un número  $N$  impar de datos y se puede expresar de la siguiente forma:

$$\tilde{v} = v_{(N+1)/2} \quad (1.5)$$

Se expresa de la siguiente manera en el caso de un número  $N$  par de datos:

$$\tilde{v} = \frac{v_{N/2} + v_{[N/2]+1}}{2} \quad (1.6)$$

donde  $N/2$  es el valor central de los datos.

Los **cuartiles** son los tres valores de la variable que dividen un conjunto de datos en cuatro partes iguales, es preciso que los datos de dicho conjunto estén ordenados de menor a mayor.

## Desviación estándar

La **desviación estándar** da cuenta de la dispersión de los datos respecto a su media. Es la raíz cuadrada de la varianza, siendo la varianza igual al momento de orden 2 con respecto a la media o momento central de orden 2.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (v_i - \bar{v})^2} \quad (1.7)$$

Es un indicador equivalente al rango intercuartílico que se muestra a continuación pero menos robusto que este.

### Rango intercuartílico (IQR)

El **rango intercuartílico** (IQR) es la medida más común y más simple, además de ser una medida robusta y resistente a la dispersión de los datos, es una medida de la dispersión estadística.

Es igual a la diferencia entre los cuartiles superior e inferior, su expresión es la siguiente:

$$IQR = v_{0.75} - v_{0.25} \quad (1.8)$$

Es un buen indicador de la dispersión en la parte central de un conjunto de datos ya que está referido únicamente al rango del 50% central de los datos. No considera el 25% superior e inferior de los datos, lo que hace que sea muy resistente a valores atípicos.

### Sesgo

El **sesgo** cuantifica la asimetría de la distribución de los datos. Es igual a cero en el caso de la distribución normal, menor que cero si la distribución presenta asimetría negativa, hacia la derecha y mayor que cero si presenta asimetría positiva, hacia la izquierda.

$$Sesgo = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (v_i - \bar{v})^3}{\sigma^3} \quad (1.9)$$

Se emplea el momento de orden 3 con respecto a la media en el cálculo del coeficiente de asimetría.

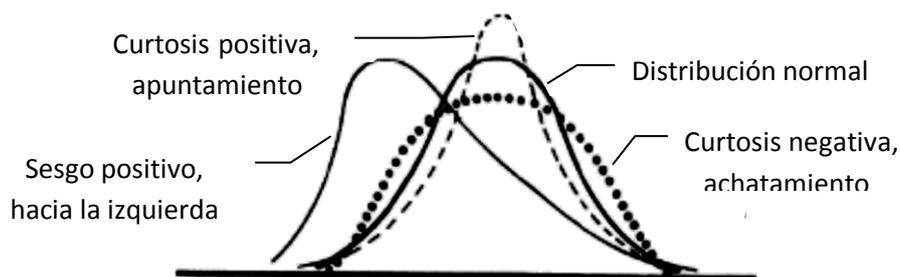


Figura 1.2. Desviación respecto a la distribución normal

### Asimetría Robusta

La **asimetría robusta** es equivalente al sesgo, siendo esta un índice robusto. Estará en un rango entre -1 y +1, su expresión matemática es la siguiente:

$$\text{Asimetría} = \frac{v_{0.75} + v_{0.25} - 2\tilde{v}}{v_{0.75} - v_{0.25}} \quad (1.10)$$

### Curtosis

La **curtosis** sirve para determinar el grado de aplanamiento de la distribución (respecto de la normal). Siendo igual a cero en el caso de la distribución normal, menor que cero si la distribución es aplanada y mayor que cero si es apuntada.

Se emplea el momento de orden 4 con respecto a la media (centrado) en el cálculo de la curtosis.

$$\text{Curtosis} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (v_i - \bar{v})^4}{\sigma^4} \quad (1.11)$$

### Curtosis Robusta

La **curtosis robusta** es el indicador robusto análogo a la curtosis. En el caso de la distribución normal su valor es 0.263.

$$\text{Curtosis robusta} = \frac{v_{0.75} - v_{0.25}}{2(v_{0.90} - v_{0.10})} \quad (1.12)$$

En la expresión anterior aparecen el decil primero y el noveno,  $v_{0.10}$  y  $v_{0.90}$

Los **deciles** son los nueve valores que dividen la serie de datos en diez partes iguales, para su obtención es necesario que la serie de datos este ordenada de menor a mayor.

## 1.2.2. La Distribución de Weibull

La distribución de Weibull, desarrollada detalladamente en 1951 por el sueco Waloddi Weibull del que toma su nombre (Weibull, 1951) es una distribución típicamente utilizada en meteorología especialmente en el análisis de la velocidad de viento. Su expresión matemática es la que se muestra a continuación.

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (1.13)$$

Válida para valores de la variable  $v$  iguales o mayores que cero, valores positivos, y valores de los parámetros  $k$  y  $c$  mayores que cero.

Donde  $k$  es el parámetro de forma, se trata un parámetro adimensional de la distribución de Weibull y  $c$  es el parámetro de escala, cuyas dimensiones dependerán de las variables tomadas en cada caso.

En este caso la variable que se emplea es la velocidad de viento,  $v$  y los valores que toma  $f(v)$  indican la probabilidad de observar cada velocidad del viento  $v$ . El parámetro  $k$  representa el rango de variación de la velocidad del viento durante un período de tiempo y  $c$  tendrá unidades de m/s y está relacionado con la media de la velocidad del viento  $v$ .

Debido a estos dos parámetros ajustables puede tomar formas muy variadas, lo que le confiere gran versatilidad y capacidad de adaptarse a las diferentes formas de los datos más fácilmente. Tiene por tanto una mayor flexibilidad frente a otras distribuciones como pueden ser la exponencial, la normal o Gaussiana, o la Gamma que pueden ser consideradas casos especiales de la distribución de Weibull para valores concretos de los parámetros de esta.

En la Figura 1.3. a continuación se representa la distribución para un valor del parámetro de escala  $c$  fijo, en este caso se ha representado para  $c = 2$ , y diferentes valores del parámetro de forma  $k$ . En ella se aprecian la gran diferencia en la forma que toma la distribución en cada caso. En particular, para valores de  $k$  superiores a 3.6 se aproxima a la distribución gaussiana. Además, un valor de  $k$  próximo a 1 corresponde a un régimen de viento altamente variable, cuando se sitúa alrededor de 2 el régimen presenta cambios moderados, mientras que valores superiores a 3 corresponden a vientos más regulares.

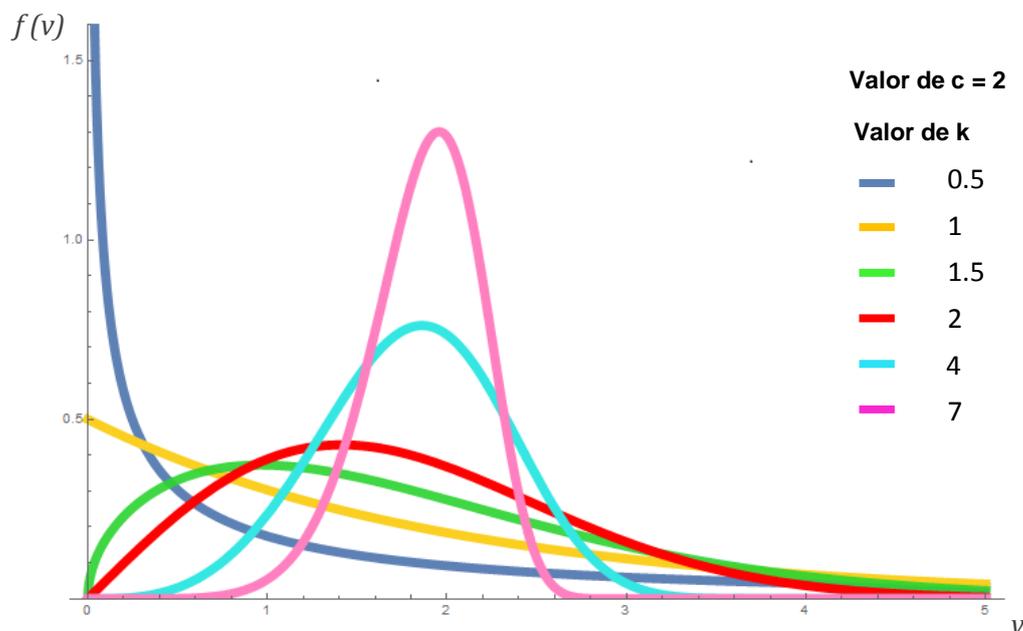
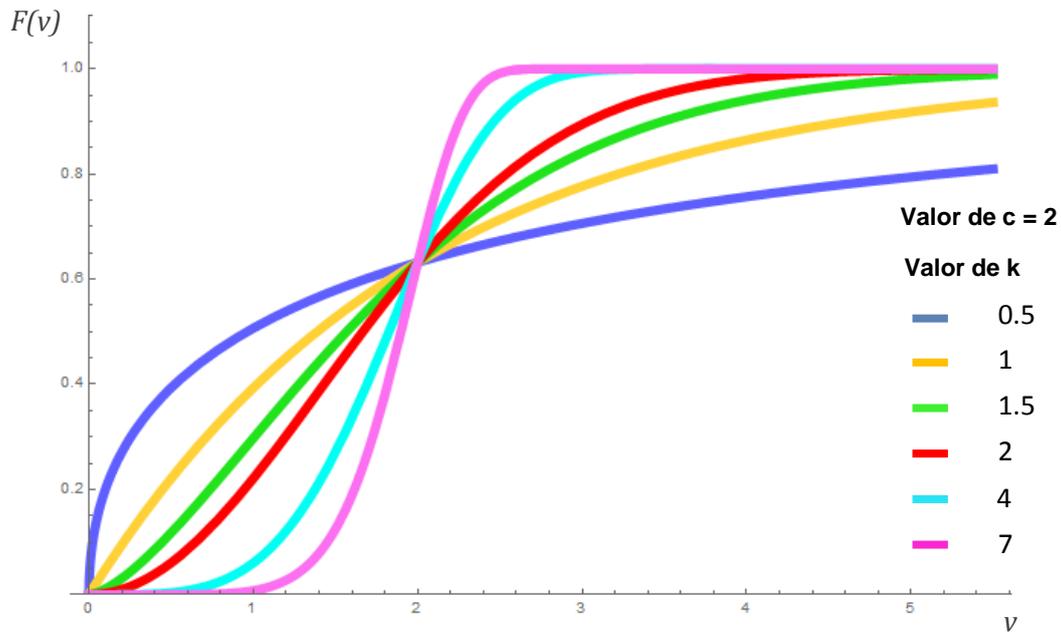


Figura 1.3. Distribución de Weibull para diferentes valores de su parámetro de forma  $k$

Su correspondiente **función de distribución acumulativa** presenta la siguiente expresión matemática:

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (1.14)$$

Representada gráficamente para los valores especificados anteriormente de los parámetros  $k$  y  $c$  tiene la forma que se muestra en la Figura 1.4. siguiente:



**Figura 1.4.** Distribución acumulativa de Weibull para diferentes valores de su parámetro de forma  $k$

En algunas ocasiones se emplea la función de Weibull de tres parámetros, (Cousineau, 2009) dependiente de un tercer parámetro que es el parámetro de localización,  $b$ . Este parámetro lo que hace es desplazar la función a lo largo del eje horizontal. Su expresión matemática es la siguiente.

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v-b}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v-b}{c}\right)^k} \quad (1.15)$$

### 1.2.3. Métodos de cálculo del parámetro de forma y de escala

Existen numerosos métodos diferentes para realizar el cálculo de los parámetros de forma,  $k$ , y escala,  $c$ , de la distribución de Weibull. En general resultan todos ellos equivalentes, variando entre sí su metodología y complejidad. Se escoge uno u otro en

función de la comodidad de los cálculos que se precisen en el análisis que se esté llevando a cabo en cada caso.

A continuación se van a detallar brevemente algunos de los métodos que se emplean, como son el método de regresión lineal, el método de los momentos, el de los momentos de probabilidad ponderada, el método de máxima probabilidad, el de máxima probabilidad modificado, el método de los cuartiles (Pérez et al, 2004; 2007) y también el método de energía equivalente (Solyali, 2015).

Todos ellos son empleados frecuentemente en cálculos de velocidad de viento, el último de ellos puede ser utilizado además para el cálculo de la densidad de potencia media.

### a) Método de regresión lineal

Partiendo de la función de distribución acumulativa y tomando el logaritmo dos veces se obtiene la expresión:

$$\ln\{\ln[1 - F(v)]\} = k \ln(v) - k \ln c \quad (1.16)$$

De donde se pueden obtener los dos parámetros  $k$  y  $c$  por regresión, se trata de un método gráfico. Se representa el doble logaritmo de  $1 - F(v)$  como variable  $x$  frente al  $\ln(v)$  como variable  $y$ , de la pendiente ( $1/k$ ), se extrae el parámetro  $k$  y de la ordenada en el origen,  $\ln c$ , se extrae  $c$ .

### b) Método de los momentos

Para la aplicación de este método es necesario el cálculo de la media de las velocidades y su desviación estándar, una vez obtenidas se aplica la siguiente ecuación:

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}}\right)^{-1.086} \quad (1.17)$$

El parámetro  $c$  se puede obtener de la siguiente ecuación despejando como aparece a continuación

$$\bar{v} = c \Gamma\left[1 + \frac{1}{k}\right] \rightarrow c = \bar{v} \frac{1}{\Gamma\left[1 + \frac{1}{k}\right]} \quad (1.18)$$

O puede obtenerse también despejando  $c$  de la ecuación siguiente, que implica la desviación estándar en vez de la media:

$$\sigma = c \left( \Gamma \left[ 1 + \frac{2}{k} \right] - \Gamma^2 \left[ 1 + \frac{1}{k} \right] \right)^{1/2} \quad (1.19)$$

Será el método elegido en este trabajo para la obtención de los parámetros por ser un método bastante cómodo y directo dado que ya se había hecho previamente el cálculo de la media y la desviación estándar.

### c) Método de los momentos de probabilidad ponderada

Los parámetros se extraen de las siguientes ecuaciones:

$$k = \frac{\ln(2)}{L_{2,(\ln v)}} \quad (1.20)$$

$$c = e^{\left[ L_{1,(\ln v)} + \frac{0.5772}{k} \right]} \quad (1.21)$$

Donde  $L_{1,(\ln v)}$  y  $L_{2,(\ln v)}$  son los momentos primero y segundo del logaritmo de la velocidad de viento cuya expresión se muestra a continuación.

$$L_{1,(\ln v)} = \overline{\ln v} \quad (1.22)$$

$$L_{2,(\ln v)} = 2 \sum_{j=1}^N \frac{(N-j)}{N(N-1)} \ln v_j - L_{1,(\ln v)} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\ln v_j - \overline{\ln v})^2 \quad (1.23)$$

### d) Método de máxima verosimilitud

Este es un método directo y no requiere la manipulación previa de datos como puede ser su ordenación y recuento. Los parámetros  $k$  y  $c$  se obtienen de las siguientes estaciones:

$$k = \left( \frac{\sum_{i=1}^N v_i^k \ln(v_i)}{\sum_{i=1}^k v_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^N \ln(v_i)}{N} \right)^{-1} \quad (1.24)$$

$$c = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^k \right)^{\frac{1}{k}} \quad (1.25)$$

Tiene el inconveniente de que es un procedimiento iterativo que debe ser iniciado con un valor  $k = 2$ .

**e) Método de máxima verosimilitud modificado**

Es igual al método anterior, aunque no iterativo, cambiando la forma de obtener  $k$  que obedece la siguiente ecuación:

$$k = \frac{\pi}{\sqrt{6}} \left( \frac{N(N-1)}{N(\sum_{i=1}^N \ln^2 v_i) - (\sum_{i=1}^N \ln v_i)^2} \right)^{0.5} \quad (1.26)$$

**f) Método de los cuartiles**

Es uno de los métodos más directos y sencillos, obedece las siguientes ecuaciones:

$$k = \frac{\ln(\ln 0.25/\ln 0.75)}{\ln(v_{0.75}/v_{0.25})} \quad (1.27)$$

$$c = \frac{v_{0.5}}{(\ln 2)^{1/k}} \quad (1.28)$$

Aparecen el primer, segundo y tercer cuartiles,  $v_{0.25}$ ,  $v_{0.5}$  y  $v_{0.75}$  respectivamente.

**g) Método de Energía equivalente**

Este método tiene en consideración por una parte los datos reales medidos de velocidad del viento así como los parámetros de la distribución de Weibull obtenidos por otra parte.

Requiere igualar la densidad de potencia media obtenida a partir de las frecuencias de velocidad de los datos medidos con la densidad de potencia obtenida de los parámetros de la distribución de Weibull.

La expresión de la densidad de potencia media para los datos de velocidad de viento observados (WPD) suponiendo la densidad del aire constante es la siguiente:

$$WPD = \frac{1}{2N} \rho \sum_N v_i^3 \quad (1.29)$$

La expresión de la densidad de potencia media de la distribución de Weibull, (WPD) suponiendo también la densidad del aire constante es la siguiente:

$$WPD = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma \left[ 1 + \frac{3}{k} \right] \quad (1.30)$$

Igualando ambas y despejando se obtiene  $c$  de la forma:

$$c = \sqrt[3]{\frac{\sum_i^N v_i^3}{N \Gamma \left[1 + \frac{3}{k}\right]}} \quad (1.31)$$

Para obtener  $k$  se sustituye la expresión de  $c$  anterior en la ecuación de la distribución de probabilidad acumulativa, de manera que  $k$  será la única incógnita y puede obtenerse de la siguiente ecuación:

$$-\ln[1 - F(\bar{v})] = \left( \frac{\bar{v}}{\sqrt[3]{\frac{\sum_i^N v_i^3}{N \Gamma \left[1 + \frac{3}{k}\right]}}} \right)^k \quad (1.32)$$

Se trata de un método mediante el cual se puede calcular también la densidad de potencia media. Será empleado con este propósito más adelante en este trabajo.

### 1.2.4. Coeficiente de Correlación

El **coeficiente de correlación** en estadística es una medida del grado de relación lineal que existe entre dos variables aleatorias. En el caso de dos variables aleatorias se hacen las siguientes suposiciones (Lothar, 1982):

Las unidades equidistantes de medida para ambas variables .

La regresión presenta linealidad.

La normalización de ambas variables.

La primera de ellas es de gran importancia. El hecho de que la segunda no sea cierta no presenta un problema, en este caso el valor de  $r$  será una estimación. La tercera de ellas puede ser omitida.

El coeficiente de correlación puede calcularse mediante las expresiones siguientes:

$$r = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{(\sum (x - \bar{x})^2)(\sum (y - \bar{y})^2)}} \quad (1.33)$$

$$r = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{(n (\sum x^2) - (\sum x)^2)(n (\sum y^2) - (\sum y)^2)}} \quad (1.34)$$

El coeficiente de correlación de Pearson es el más comúnmente empleado.

La correlación de Pearson es independiente de la escala de medida de las variables a diferencia de lo que ocurre con la covarianza.

Una vez determinado el coeficiente de correlación puede ser necesario establecer un criterio para concluir si existe o no correlación relevante entre las variables, puede llevarse a cabo mediante la consulta de tablas o mediante el cálculo de alguna relación de prueba.

El Test de correlación se emplea para determinar si existe o no correlación, si no es nulo existirá una correlación que habrá que valorar si es relevante. Viene dado por la expresión:

$$t = \frac{r}{\sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}}} \quad (1.35)$$

Donde t es una variable con la distribución de Student y n el número de datos, en nuestro caso, como se verá más adelante igual a 46.

De donde se puede calcular el coeficiente de correlación r crítico, a partir de la siguiente ecuación.

$$r = \frac{t}{\sqrt{t^2 + n - 2}} \quad (1.36)$$

En este estudio las variables de las que se quiere calcular la correlación son la altura y los indicadores estadísticos de velocidad de viento, que es la variable aleatoria. Asimismo se considerará la correlación de los parámetros de la distribución de Weibull y de la densidad de potencia con la altura.

Se precisa determinar si el coeficiente de correlación entre las dos variables obtenido en cada caso es o no significativo. Para ello vamos a calcular el valor del coeficiente de correlación r crítico a partir del cual consideraremos que las dos variables estarán correlacionadas.

Para ello se realiza el test de correlación, a un  $p = 0.05$ , tomando la función t inversa. Una vez obtenido este valor de t se despeja r como se muestra en la ecuación 1.36 para obtener así el valor crítico a partir del cual consideraremos que existe correlación significativa.

Estos valores se presentan en la Tabla 1.2. a continuación.

**Tabla 1.2.** Test de correlación t y coeficiente de correlación crítico  $r_{\text{crítico}}$

Valor de t	$r_{\text{crítico}}$
2,015	0,291

**Capítulo II**  
**Descripción**  
**Experimental**

## 2.1. Obtención de datos

Se han consultado los datos de estaciones meteorológicas de la Comunidad de Navarra disponibles en la página de Meteorología y climatología de Navarra. Navarra cuenta con estaciones tanto manuales como automáticas, las estaciones que disponen de registro de la velocidad de viento son únicamente las automáticas.

Una **estación meteorológica automática** es un equipo de adquisición de datos en el cual los instrumentos efectúan, almacenan y transmiten las observaciones de forma automática, sin que sea necesaria la presencia de personal.

La configuración tipo de una estación automática es:

- Torre o trípode, en el caso de las estaciones a 2 m de altura se trata de una estructura de acero galvanizado, con sus tres patas sujetas al suelo con piquetas enterradas y tres brazos que sirven de soporte a los sensores (de temperatura y humedad, de viento y de radiación), en el caso de las estaciones a 10 m se trata de una torre en la que se sitúan los sensores de viento.
- Sensores: características para su elección (resolución, etc.) El sensor de velocidad y dirección del viento es una Anemoveleta RM YOUNG 05103 con un rango de medida de 0 a 100 m/s con una precisión de  $\pm 0.3$  m/s de 1 a 60 m/s y de  $\pm 1$  m/s de 60 a 100 m/s
- Sistema de adquisición de datos (datalogger): es la unidad encargada del examen de los canales de entrada y salida de las señales de los distintos sensores y de la conversión de estas señales de analógico a digital, que es el formato legible por el ordenador.
- Comunicaciones, realizadas por modem o radio. Su función es transmitir los datos obtenidos por el datalogger. En la actualidad esta comunicación se realiza mediante telefonía móvil GSM.

Funciona gracias a un acumulador alimentado habitualmente por un panel solar o por corriente externa también.

Estas estaciones automáticas frente a las manuales son más consistentes en sus medidas ya que registran datos a mayor frecuencia, toman datos de forma continuada todos los días. Y se pueden ubicar en zonas aisladas con dificultad de acceso o en lugares inhóspitos. Su utilización surgió de la necesidad de obtener información en dichas ubicaciones.

Su principal inconveniente es la dificultad de automatizar la captación de cierta información como nieve o nubes, por lo que son menos flexibles que los observadores además de la necesidad de una inversión económica.

Se trata de un total de 56 estaciones automáticas, cada estación presenta datos de sus características como son su altitud, longitud (UTM), latitud, propiedad (organismo del que dependen) y fecha de instalación.

Una parte de las estaciones dispone de registro de datos a una altura de 2 m y otra parte a una altura de 10 m sobre el nivel del suelo. Los datos de velocidad de viento registrados en todas ellas son diarios, la mayoría de las estaciones lo hacen a 10 m , y algunas de ellas registran a 2 m .

A continuación se muestra el aspecto que tienen las estaciones, la imagen de la izquierda corresponde a la estación de Candreita, estación que recoge datos a 2 m de altura. La imagen de la derecha corresponde a Gorramedi, cuya toma de datos es a 10 m .



Figura 2.1. Estación de Candreita a 2 m

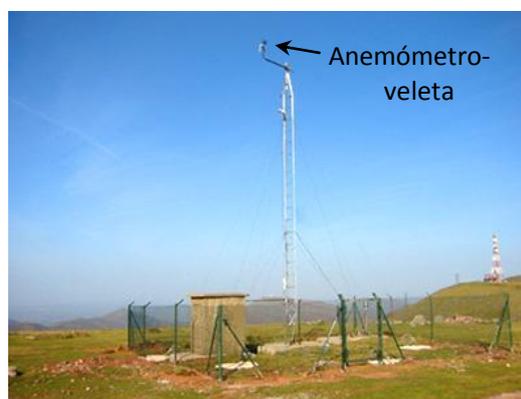


Figura 2.2. Gorramedi a 10 m

Imágenes tomadas de la página de meteorología y climatología de Navarra <http://meteo.navarra.es/estaciones/mapadeestaciones.cfm>

La extracción de datos se lleva a cabo mediante la descarga directa de la página <http://meteo.navarra.es/estaciones/descargardatos.cfm> los datos de cada una de las estaciones se encuentran clasificados en ficheros anuales desde que comenzaron a operar y así son descargados.

Los datos que se han tomado en el presente trabajo van desde 2005 hasta 2015.

Cada fichero descargado cuenta con información de temperatura máxima, temperatura media, temperatura mínima, humedad relativa media (%), máxima y mínima, precipitación acumulada ( $l/m^2$ ), velocidad media del viento 10 m (m/s), dirección del viento 10 m (grados), velocidad rachas (m/s), dirección rachas (grados), radiación global ( $W/m^2$ ), e insolación total. Algunas de las columnas pueden variar de unas estaciones a otras.

Se ve representado el aspecto que presentan los ficheros en la Figura 2.3.

I1														
f <sub>x</sub> Velocidad media viento 10 m m/s														
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Fecha-hora	Temperatura	Temperatura	Temperatura	Humedad re	Humedad re	Humedad re	Precipitación	Velocidad m	Dirección vie	Velocidad ra	Dirección rac	Radiación gl	Insolación total
2	01/01/2014	6,06	4,28	2,07	95,61	98,3	88,8	0,53	1,27	3	5,29	102,4	20,75	0
3	02/01/2014	10,72	8,14	5,01	89,27	98,2	68,96	3,7	2	3	11,56	272,7	37,78	3698
4	03/01/2014	13,43	9,42	7,93	94,43	99,1	74,8	0,95	1,66	3	8,82	279,9	41,59	3872
5	04/01/2014	9,74	5,6	0,74	80,44	99,4	57,07	7,5	3,68	7	17,15	319,2	21,66	2902
6	05/01/2014	11,21	6,61	1,18	76,31	95,2	65,39	0,32	6,43	7	20,19	271	38,94	7208
7	06/01/2014	11,49	7	4,22	88,6	97,4	68,55	0	1,51	3	6,03	107,2	56,3	9494
8	07/01/2014	12,05	8,58	6,32	83,88	89,5	73,7	0	2,48	3	10,14	115	56,26	8930
9	08/01/2014	11,35	8,25	6,53	79,73	89	66,66	0	3,03	3	10,14	113,1	53,41	9778
10	09/01/2014	11,77	7,54	5,47	65,37	74,9	46,91	0	1,92	3	6,37	116,9	49,55	5194
11	10/01/2014	10,46	6,29	3,25	72,11	89,5	55,74	0	1,83	8	6,47	131,8	69,84	20190
12	11/01/2014	8,15	3,39	-1,84	95,38	100	79,1	0	2,03	4	6,08	279,8	72,14	15954
13	12/01/2014	6,95	4,55	3,53	98,68	100	91,5	0,32	1,96	3	7,25	120,8	45,62	4440
14	13/01/2014	7,09	5,56	3,47	72,78	100	55,61	0,53	5,41	7	17,44	271,6	103,21	23094
15	14/01/2014	6,48	5,71	4,8	89,02	98,3	66,76	7,72	5,79	7	19,99	274,7	20,75	0
16	15/01/2014	9,68	6,83	5,71	94,96	98,8	85,9	0,11	2,35	8	8,97	265,5	32,69	1138
17	16/01/2014	8,91	5,88	1,85	75,65	95,5	53,81	2,11	3,03	7	12,74	314,3	83,93	17098
18	17/01/2014	8,57	3,67	-0,85	77,46	95	52,06	0	3,43	3	13,47	123,3	105,87	26610
19	18/01/2014	4,94	3,02	0,68	98,75	100	87,6	12,26	3,47	3	11,51	114,2	15,45	864
20	19/01/2014	4,32	1,48	-1,2	93,04	100	82,9	0,11	4,09	8	15,14	328,9	71,73	13550
21	20/01/2014	2,58	1,14	-0,08	95,54	99,7	84,7	8,99	4,39	8	12,1	285,7	63,29	12246
22	21/01/2014	6,13	3,22	0,9	89,96	97,7	77,4	0,95	2,44	8	8,23	303,4	48	4988
23	22/01/2014	5,92	3,99	2,77	93,69	99,6	75	4,55	4,46	8	18,33	314,7	56,9	8392
24	23/01/2014	7,11	4,38	2,43	92,32	97,1	75	2,86	4,8	8	12,4	328,5	50,51	7016
25	24/01/2014	8,77	6,55	4,59	87,82	96,5	70,6	6,98	5,37	7	16,17	299,5	53,67	7860

Figura 2.3. Hoja de datos descargados de la estación de Aguilar de Codés el año 2014

De esos datos se seleccionan los correspondientes a la velocidad de viento, ya sean a 2 m como a 10.

## 2.2. Selección de datos

Una vez obtenidos los datos disponibles de todas las estaciones, se comprueba el número de años de los que hay datos disponibles y la cantidad de datos de los que se dispone.

De un total de 56 estaciones, 4 de ellas son descartadas directamente por llevar poco tiempo en funcionamiento o por no presentar ningún dato, es el caso de:

Irabia (Sin datos de velocidad de viento)

Pamplona (En funcionamiento desde 2010)

Eltzubura (En funcionamiento desde 2013)

Bera (Larrategaña) (En funcionamiento desde 2013)

Después de esta selección inicial, con las 52 estaciones restantes se procede a realizar un recuento de los datos disponibles. Se toma el criterio de descartar aquellas estaciones cuya falta de datos sea superior al 15%. De esta forma son descartadas un total de 6 estaciones: San Adrián, Tudela (Valdetellas), Los Arcos, Sesma, Funes y Bardenas (Barranco). Esta selección se ve representada a continuación en la Figura 2.4., las estaciones están ordenadas por su porcentaje de ausencia de datos.

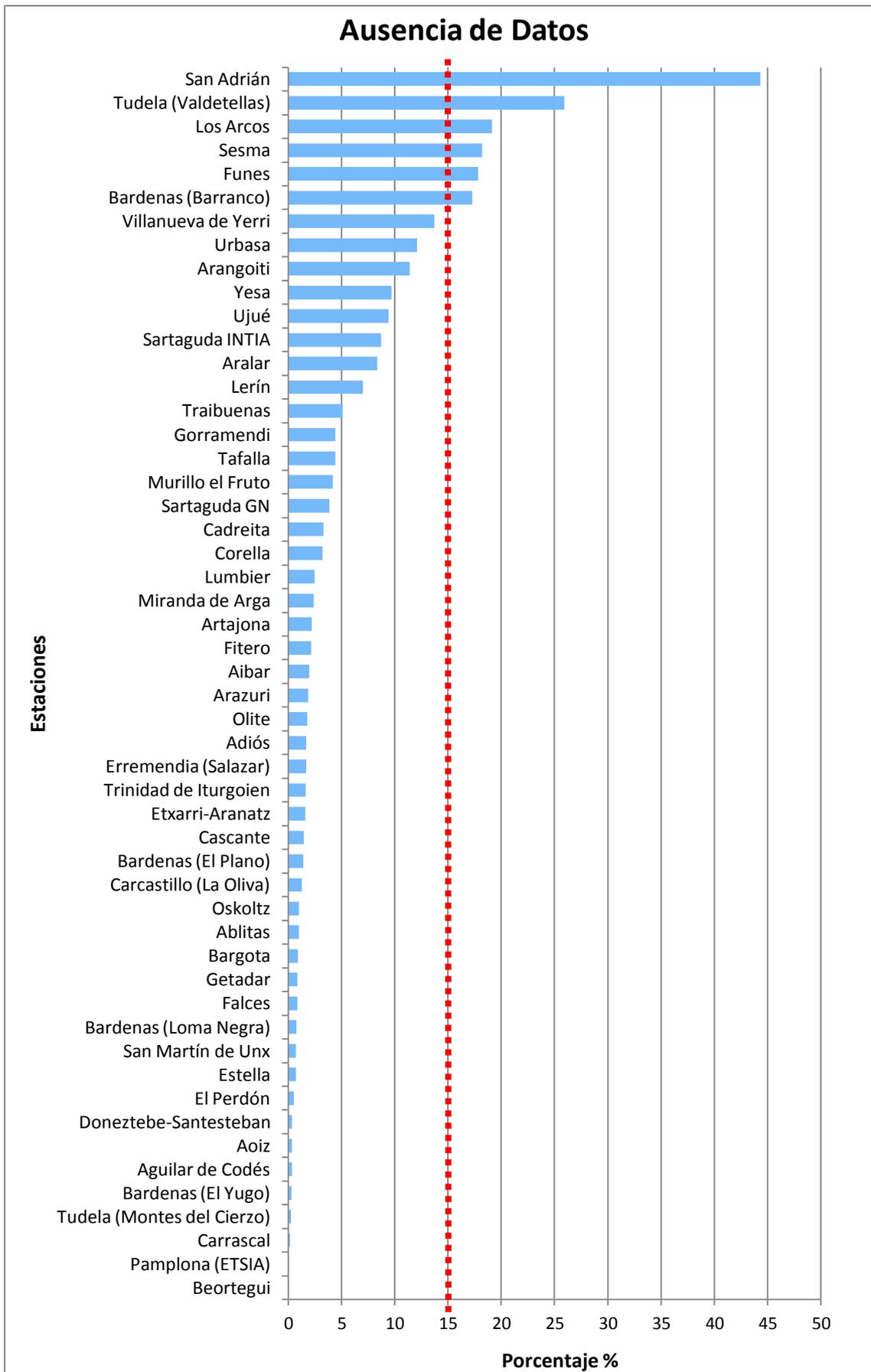


Figura 2.4. Discriminación de estaciones por falta de datos superior al 15%

Finalmente, las estaciones automáticas seleccionadas con las que se va a trabajar son 46, de ellas 26 toman medidas de velocidad de viento a 10 m del suelo y las otras 20 estaciones miden a 2 m .

## 2.3. Mapa de altura de las estaciones

Una vez realizada la pertinente selección, las 46 estaciones automáticas de las que se van a utilizar los datos son las que se representan en el siguiente mapa de la Comunidad de Navarra, Figura 2.5., en su ubicación geográfica real mediante un punto rojo.

Partiendo de los datos de longitud (UTM) y latitud de las estaciones y la altura a la que se encuentran, todos ellos disponibles en la descripción de cada estación, se va a proceder a mostrar su distribución geográfica en la Comunidad de Navarra.

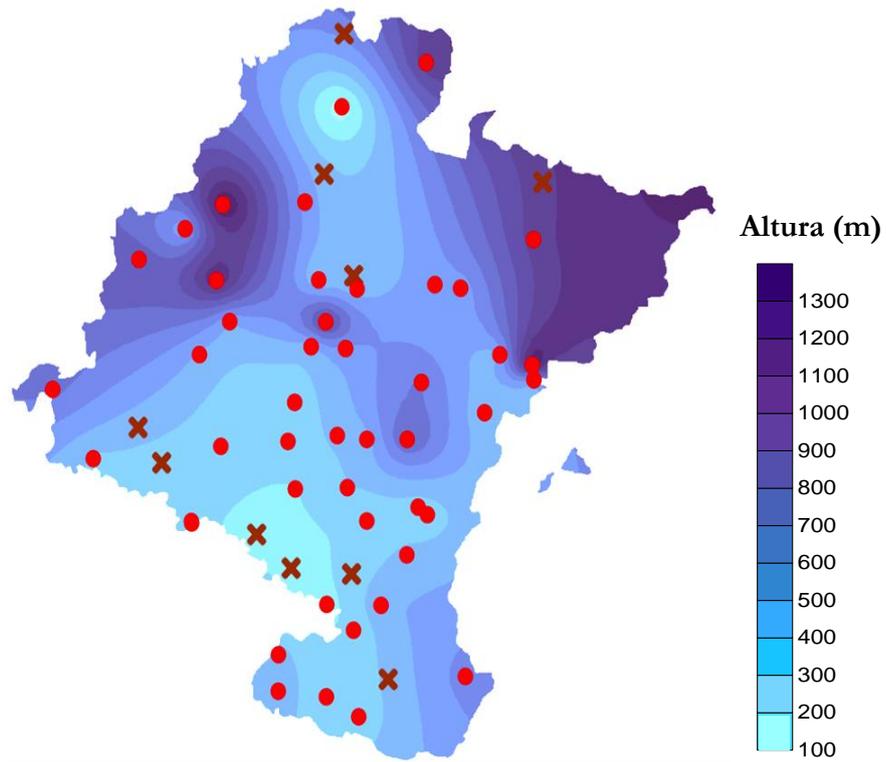
Se emplea para el trazado de curvas de nivel el programa *Surfer*, que será utilizado también en otros apartados del trabajo.

Este programa utiliza tres variables para representar los mapas, los datos de las variables de longitud y altura para representarlos en el plano y una tercera variable que es la que se representa en altura en cada caso, en este caso la altura de la ubicación de la estación.

El resultado es un mapa en el que se puede apreciar el relieve de forma simplificada mediante curvas de nivel. En él se localizan las diferentes estaciones pudiéndose apreciar el relieve de la zona en la que se encuentran y la distribución de todas ellas en la comunidad.

De esta forma se observa que la zona que presenta una menor densidad de estaciones se encuentra a mayor altitud, coincidiendo con la zona más montañosa de Navarra.

Las estaciones que han sido descartadas aparecen también representadas en el mapa con una cruz para diferenciarlas.



**Figura 2.5.** Mapa de altura con las estaciones automáticas representadas. Las estaciones descartadas se marcan con una cruz.

# **Capítulo III**

## **Análisis de la Velocidad de Viento**

### 3.1. Tratamiento de datos

Del total de las 46 estaciones seleccionadas se elige trabajar con los datos de velocidad de viento a 10 m del suelo. Las estaciones que toman medidas a esta altura son 26, un número mayor que las que miden a 2 m , siendo estas 20 estaciones por lo que se extrapolarán los datos de estas últimas para tener también los datos a 10 m . Los datos con los que se trabaja son diarios desde 2005 hasta 2015.

Se empleará la ley potencial para determinar los valores de velocidad a 10 m de altura de los que no se dispone, para ello se toman como referencia los valores medidos a 2 m y mediante la extrapolación que se ha mostrado en la Figura 1.1. se obtienen los valores a 10 m .

De la misma forma, para realizar el cálculo de la potencia eólica a 50 m de altura, se toman como referencia los datos de las estaciones tanto a 2 como a 10 m y se extrapolan convenientemente en cada caso obteniéndose así todos los valores a 50 m.

### 3.2. Resultados de los estadísticos

A continuación se muestra una tabla con los valores medios de las magnitudes calculadas de todas las estaciones. Se presentan los valores a diferentes alturas, a 2 m , a 10 y a 50.

**Tabla 3.1.** Media de los valores de los indicadores de todas las estaciones

	VALORES MEDIOS		
	2 m	10 m	50 m
<b>Media (m/s)</b>	2,80	3,59	4,43
<b>Mediana (m/s)</b>	2,58	3,28	4,08
<b>Desviación Estándar (m/s)</b>	1,41	1,74	2,28
<b>Rango Intercuartílico (m/s)</b>	1,86	2,33	2,99
<b>Sesgo</b>	0,81	0,9	0,76
<b>Asimetría Robusta</b>	0,14	0,14	0,14
<b>Curtosis</b>	1,03	1,14	1
<b>Curtosis Robusta</b>	0,26	0,27	0,26

Los valores medios de la mediana de la velocidad de viento a 2 y 10 m de altura corresponden a 2 Beaufort y a 3 Bf en el caso de la velocidad a 50 m en la escala Beaufort mencionada anteriormente en el Capítulo I.

Algunos de los indicadores muestran dependencia creciente con la altura como son la media, la mediana, la desviación estándar o el rango intercuartílico, en los que se observa un claro crecimiento al aumentar la altura, esta relación se comprobará posteriormente y se verá representada gráficamente.

Otros indicadores no muestran cambios de valor con la altura como es el caso de la asimetría robusta y la curtosis robusta, cuyos valores permanecen constantes.

En el caso del sesgo y la curtosis los valores son distintos para las diferentes alturas pero no parece existir ninguna relación de estos indicadores con la altura.

En Tabla 3.2. a continuación, se muestran los valores mínimo y máximo entre los cuales están comprendidos todos los indicadores calculados a una altura de 10 m .

**Tabla 3.2.** Valor mínimo y máximo de cada indicador a 10 m de altura

Valores a 10 m	Mínimo	Máximo
<b>Media (m/s)</b>	1,26	8,54
<b>Mediana (m/s)</b>	1,17	8
<b>Desviación Estándar (m/s)</b>	0,51	3,83
<b>Rango intercuartílico (m/s)</b>	0,57	5,32
<b>Sesgo</b>	0,5	2,31
<b>Asimetría Robusta</b>	0,04	0,32
<b>Curtosis</b>	- 0,34	7,15
<b>Curtosis Robusta</b>	0,22	0,30

Se observa que el rango de variación de la asimetría robusta, que varía entre 0.037 y 0.318 es mucho menor que el del sesgo, entre 0.5 y 2.309, tratándose siempre de valores positivos correspondientes a distribuciones de datos sesgados hacia la izquierda.

Lo mismo ocurre con el rango de variación de la curtosis normal y la curtosis robusta, la primera entre -0.343 y 7.155 y la segunda entre 0.217 y 0.299. La mayor parte de las distribuciones de datos tiene datos de curtosis y de curtosis robusta mayores que 0 y menores que 0.263 respectivamente (que son los valores correspondientes a la distribución normal en cada caso).

El valor medio de los indicadores es más próximo al mínimo sin embargo se tienen valores mucho mayores como es el caso de la curtosis cuya media es 1.14 y presenta valores desde - 0.34 hasta 7.15.

### 3.3. Representación de los indicadores estadísticos

Esta sección está dedicada a la presentación de los resultados de los indicadores estadísticos que se han manejado y calculado a partir de las observaciones de velocidad a 10 m representándolos en un mapa de la Comunidad de Navarra dibujando las correspondientes isótacas en diferentes colores para su diferenciación.

Las **isótacas** son las líneas que unen puntos donde el viento sopla con la misma intensidad.

Se estudia también la relación de cada indicador con la altura, representándose gráficamente dicha relación.

#### 3.3.1. Media

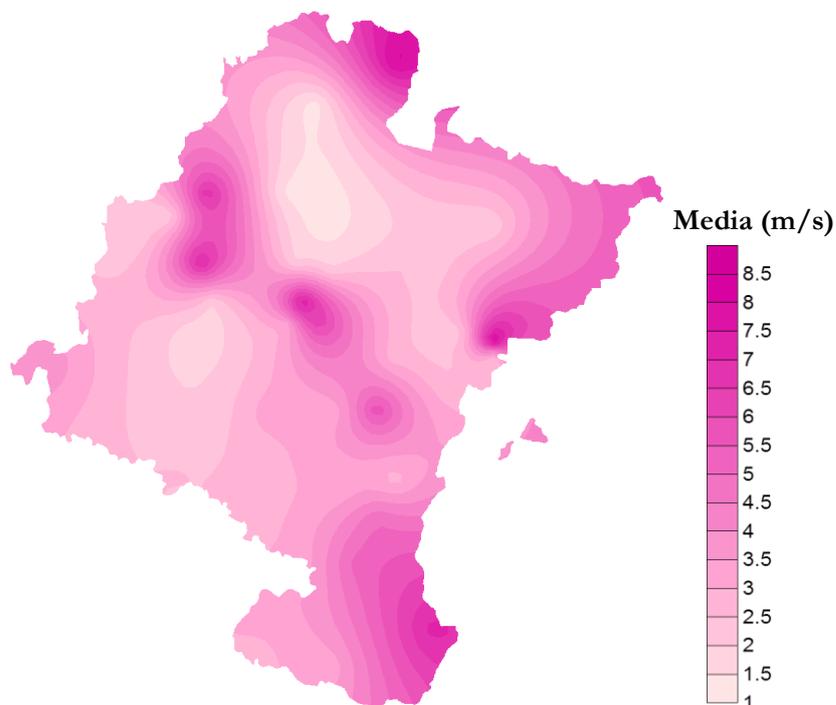
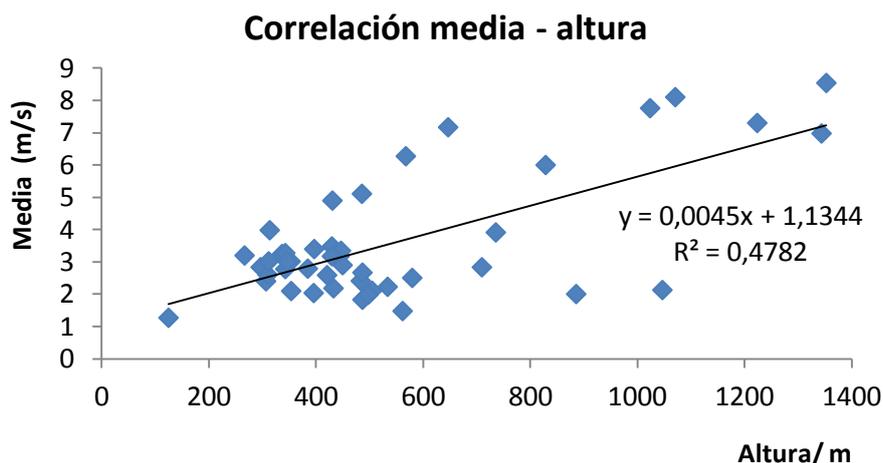


Figura 3.1. Mapa de la media de velocidad de viento

La media de velocidad, a excepción de algunas zonas puntuales en las que se aprecia que es más elevada y de dos zonas diferenciadas donde es ligeramente menor, está entre 3 y 4 m/s. Estas zonas con valores más elevados corresponderían con las estaciones situadas a mayor altitud y las de valores más bajos a las que se encuentran a menor altitud.

A continuación se presenta la **correlación** de la media con la altura y su representación gráfica en la Figura 3.2.



**Figura 3.2.** Gráfica de correlación entre la media y la altura

Observamos que existe correlación entre la media de velocidad de viento y la altura, se trata de una relación lineal y creciente con la altura, a mayor altura de las estaciones la velocidad de viento es mayor. El valor del coeficiente de correlación  $r$  es superior al valor crítico de 0.291 que habíamos determinado previamente, en este caso  $r$  es igual a 0.692.

### 3.3.2. Mediana

En la Figura 3.3. a continuación se observa que los valores mínimos de la mediana corresponden principalmente a las estaciones que se encuentran a menor altura como son (Doneztebe-Santesteban, Lerín o Miranda de Arga) y los valores máximos pertenecen claramente a las estaciones situadas a una mayor altura (Aralar y Trinidad de Iturgoien situadas más al oeste, Gorramendi más al norte, El Perdón más centrado y Arangoiti más al este).

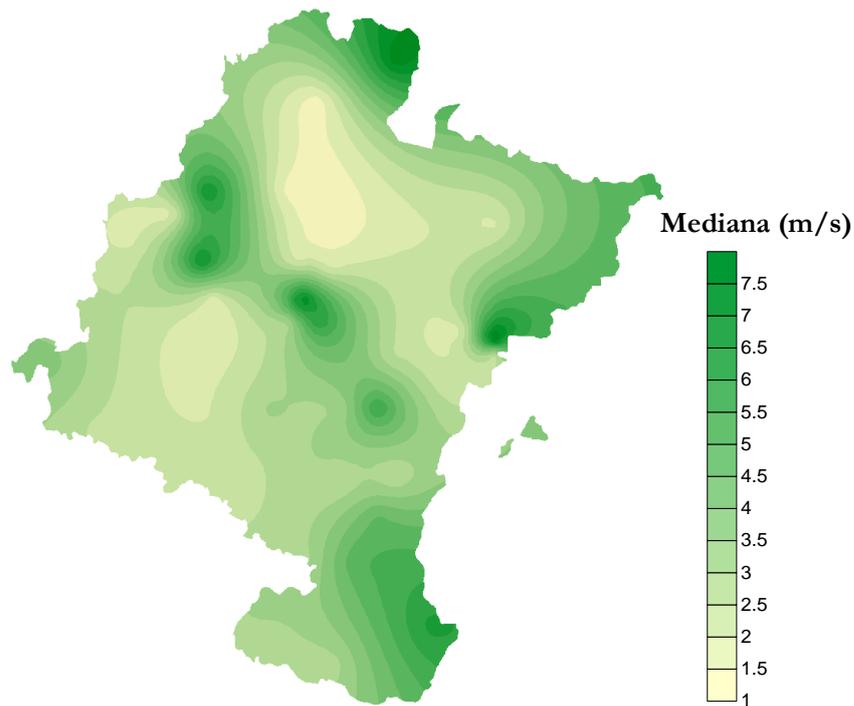


Figura 3.3. Mapa de la mediana de velocidad de viento

La **correlación** de la mediana con la altura y su representación gráfica se muestra en la Figura 3.4. a continuación.

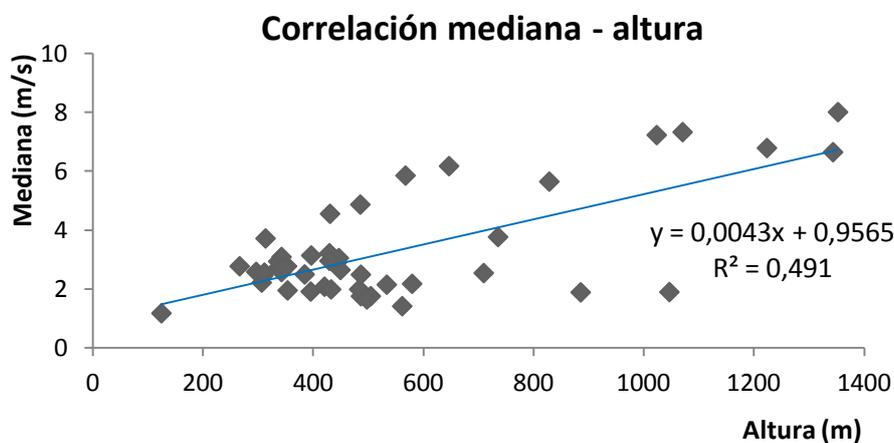


Figura 3.4. Gráfica de correlación entre la mediana y la altura

La relación que se observa es una dependencia lineal directa entre la velocidad y la altura, siendo esta creciente con la altura al igual que ocurría con la media.

El valor del coeficiente de correlación  $r$  es superior al valor crítico que habíamos determinado previamente, en este caso  $r$  es igual a 0.701 siendo mayor también que el coeficiente de correlación obtenido anteriormente en el caso de la media.

### 3.3.3. Desviación Estándar

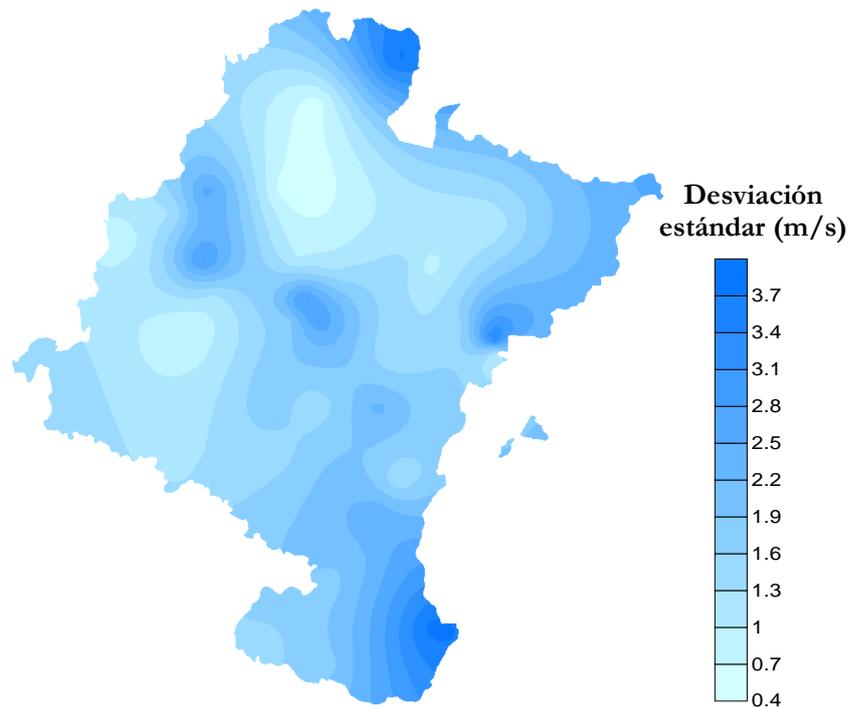


Figura 3.5. Mapa de la desviación estándar de velocidad de viento

Los valores de la desviación estándar se muestran distribuidos en el mapa de forma bastante uniforme a excepción de algunos puntos, correspondientes a alturas destacadamente superiores, donde toma un valor superior.

En la Figura 3.6. a continuación se presenta la **correlación** de la desviación estándar con la altura y su representación gráfica.

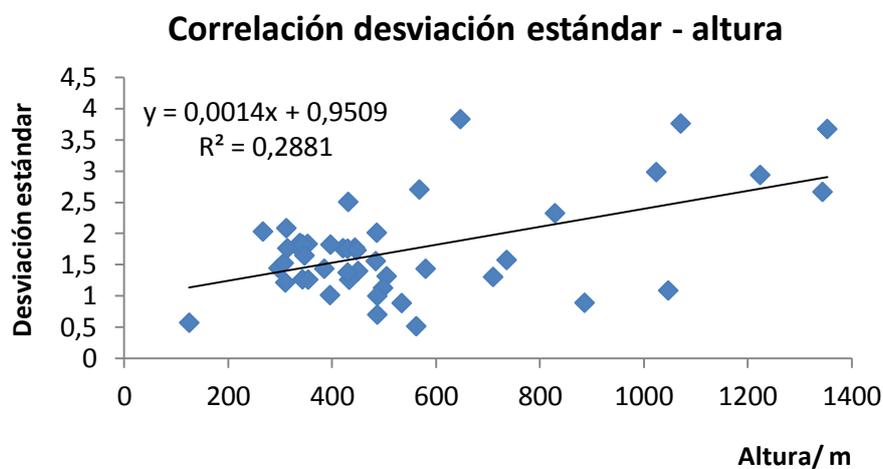


Figura 3.6. Gráfica de correlación entre la desviación estándar y la altura

El valor del coeficiente de correlación  $r$  es superior al valor crítico que habíamos determinado previamente, en este caso  $r$  es igual a 0.537 por tanto la correlación es satisfactoria. Esta correlación es lineal creciente con la altura.

### 3.3.4. Rango intercuartílico (IQR)

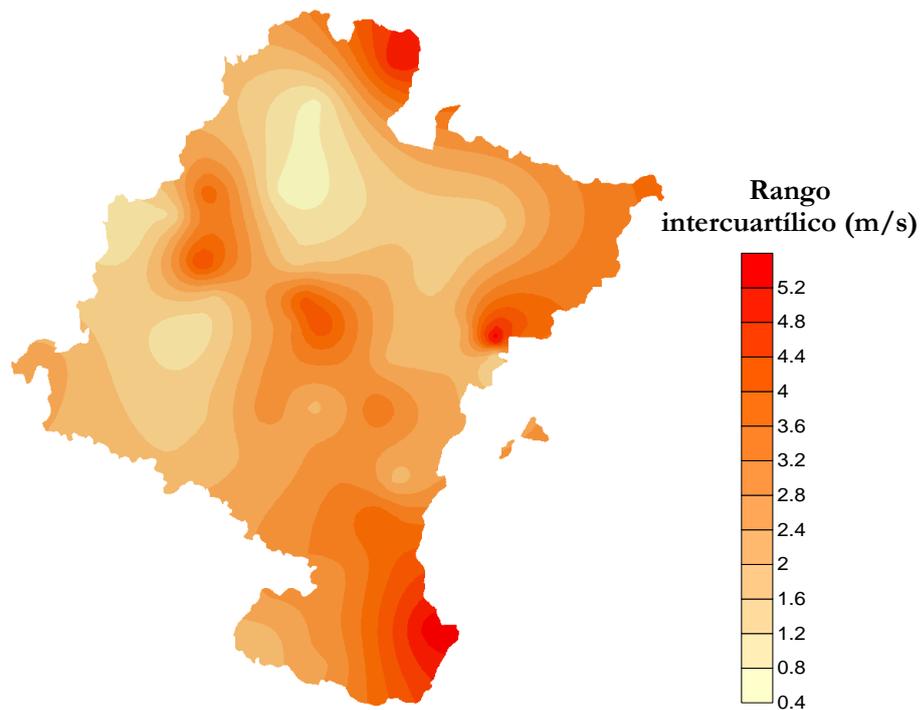
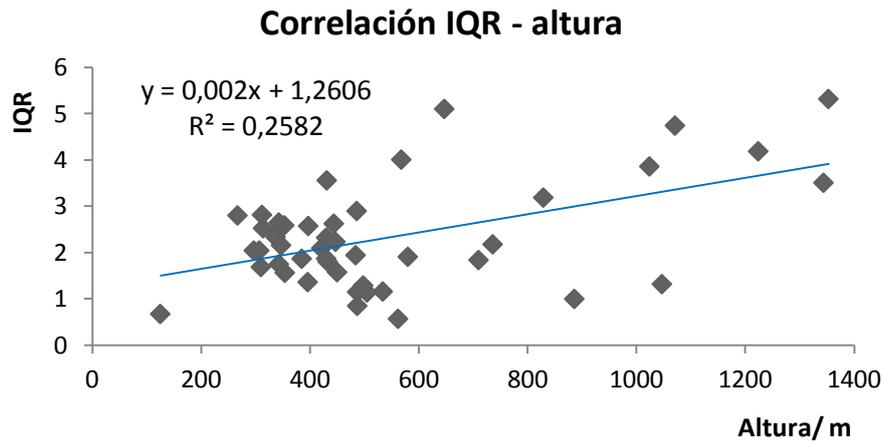


Figura 3.7. Mapa del rango intercuartílico de velocidad de viento

La distribución de valores del rango intercuartílico en el mapa es similar a la de la distribución estándar, aunque en este caso los valores son menos uniformes, valores entre 0.57 y 5.32 en el caso de la desviación estándar variaban entre 0.51 y 3.83

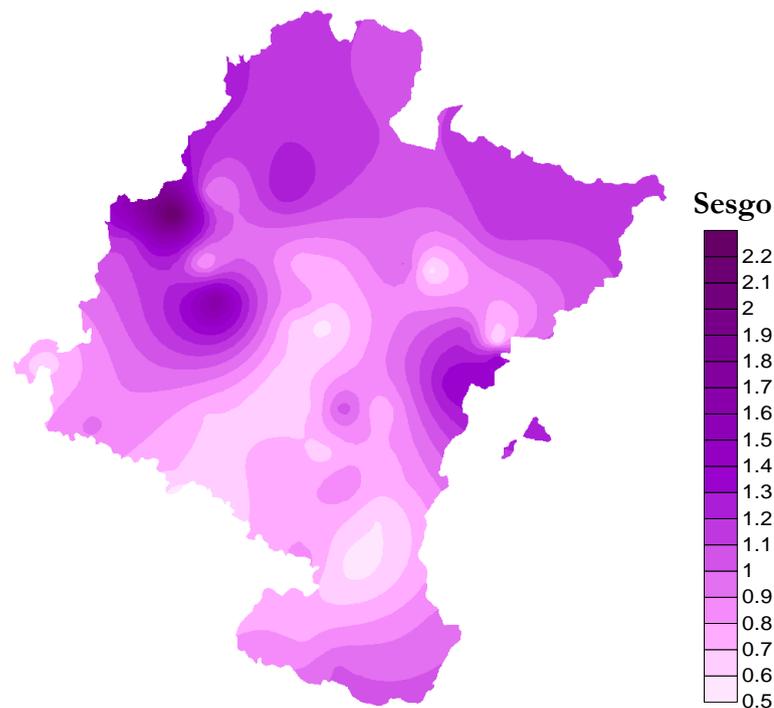
La **correlación** del rango intercuartílico con la altura y su representación se muestra a continuación en la gráfica de la Figura 3.8.

El valor del coeficiente de correlación  $r$  es superior al valor crítico que habíamos determinado previamente, en este caso  $r$  es igual a 0.508, va a existir por tanto correlación lineal con la altura.



**Figura 3.8.** Gráfica de correlación entre el rango intercuartílico y la altura

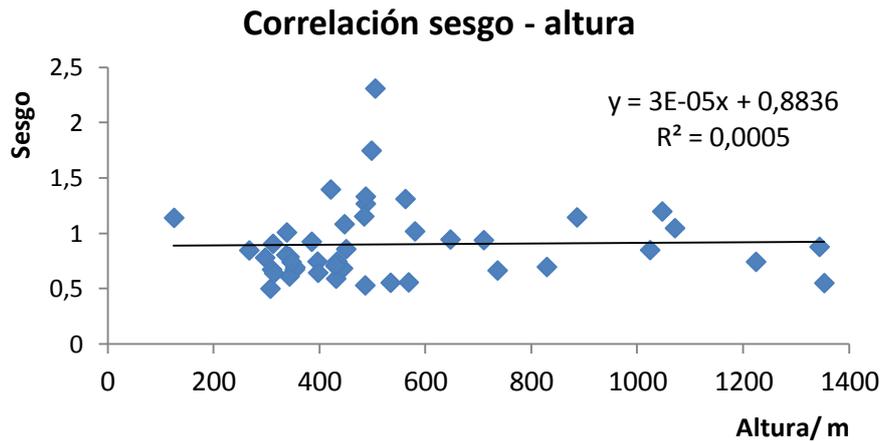
### 3. 3. 5. Sesgo



**Figura 3.9.** Mapa del sesgo de velocidad de viento

Los valores del sesgo obtenidos son positivos en todas las estaciones, no hay ningún valor negativo lo que se traduce en que ninguna estación presenta una distribución de datos sesgada hacia la derecha, todas ellas lo están hacia la izquierda y presentan cola a la derecha.

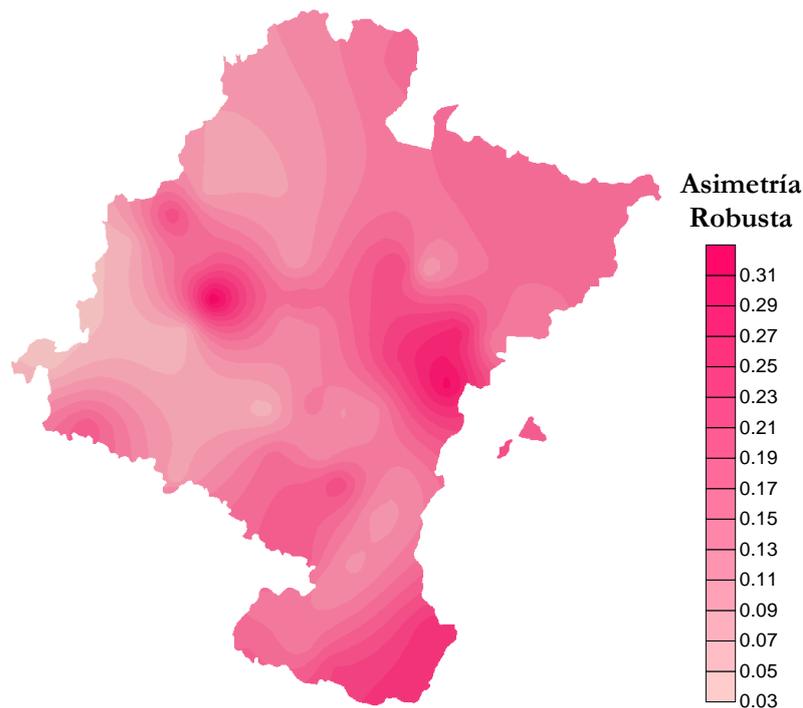
Se presenta a continuación la **correlación** del sesgo con la altura y su representación en la gráfica de la Figura 3.10.



**Figura 3.10.** Gráfica de correlación entre el sesgo y la altura

No se aprecia correlación entre el sesgo y la altura, el valor del coeficiente de correlación para el sesgo es 0.022, menor en este caso que el valor crítico de 0.291.

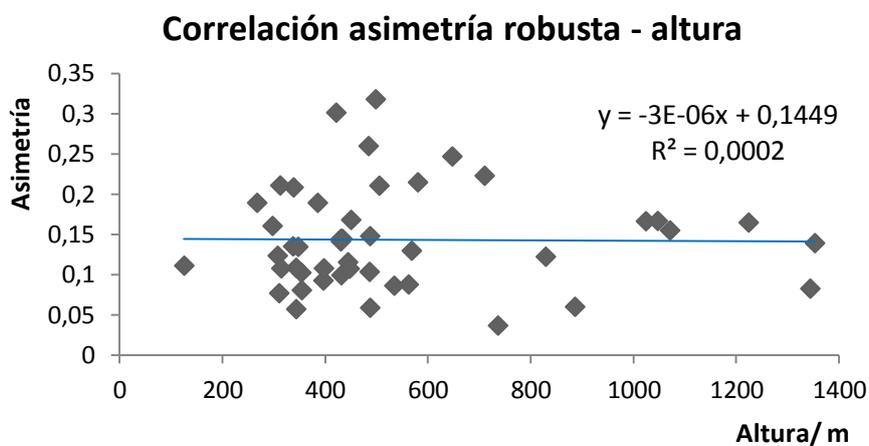
### 3. 3. 6. Asimetría Robusta



**Figura 3.11.** Mapa de la asimetría robusta de la velocidad de viento

Las estaciones a mayor altura presentan una asimetría mayor sin embargo las situadas a menor altura no presentan una clara menor asimetría sino que esta es intermedia.

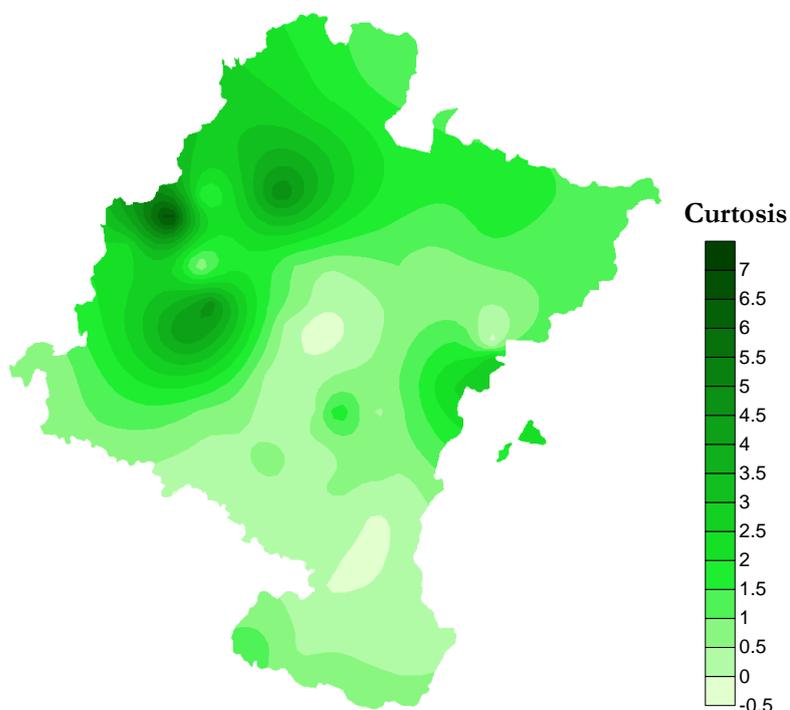
A continuación se muestra en la Figura 3.12. la **correlación** de la asimetría robusta con la altura y su representación gráfica.



**Figura 3.12.** Gráfica de correlación entre la asimetría robusta y la altura

El valor del coeficiente de correlación para la asimetría robusta es 0.014 menor que el valor crítico, al igual que en el caso del sesgo no existe ninguna correlación con la altura.

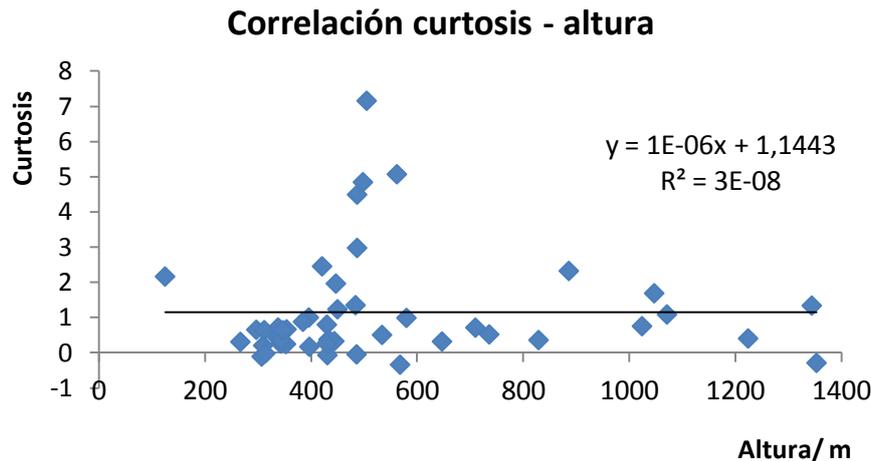
### 3.3.7. Curtosis



**Figura 3.13.** Mapa de la curtosis de la velocidad de viento

El rango de variación de esta curtosis es muy amplio como se observa, teniéndose valores desde -0.343 hasta 7.155. Las zonas que aparecen en color suave en el mapa presentan un ligero achatamiento respecto de la distribución normal. El resto de las zonas presenta apuntamiento, siendo este más acusado en las zonas que se observan más oscurecidas.

En la Figura 3.14. se presenta a continuación la **correlación** de la curtosis con la altura y su representación gráfica.



**Figura 3.14.** Gráfica de correlación entre la curtosis y la altura

El valor del coeficiente de correlación para curtosis es muy pequeño,  $r$  es igual a 0.00017, muy inferior al valor crítico de  $r$  calculado, por lo que podemos determinar que la correlación con la altura es inexistente.

### 3. 3. 8. Curtosis Robusta

En el caso de la curtosis robusta se observa una gran diferencia con la curtosis anterior no robusta, la robusta está en un rango de variación mucho más pequeño, entre 0.217 y 0.299.

En la Figura 3.15. a continuación se puede ver que los valores son más similares, correspondiendo la mayoría a distribuciones de datos con apuntamiento. Las zonas más azuladas corresponden a valores inferiores a 0.263, estas zonas presentan distribuciones ligeramente apuntadas.

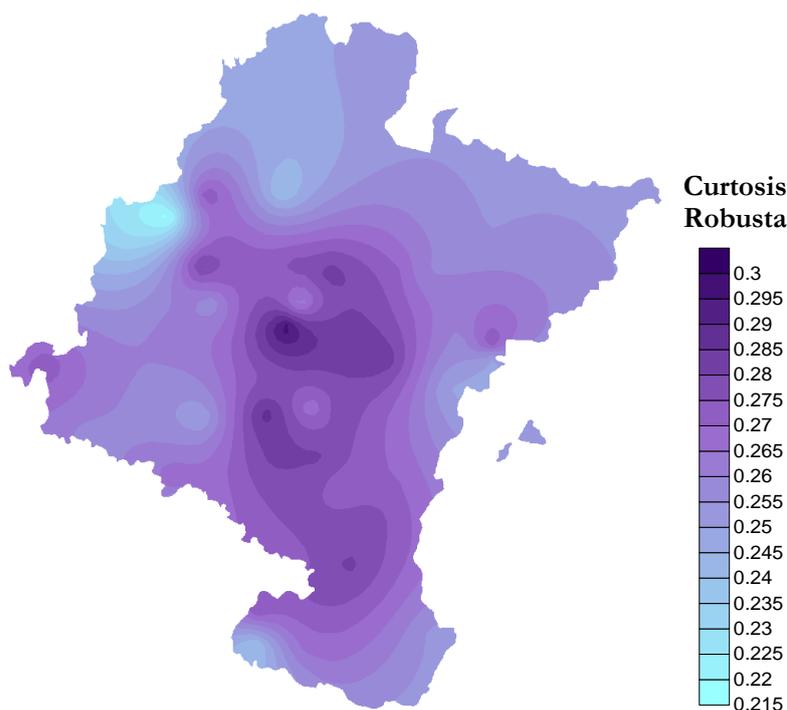


Figura 3.15. Mapa de la curtosis robusta de la velocidad de viento

La **correlación** de la curtosis robusta con la altura y su representación gráfica se muestra a continuación en la Figura 3.16.

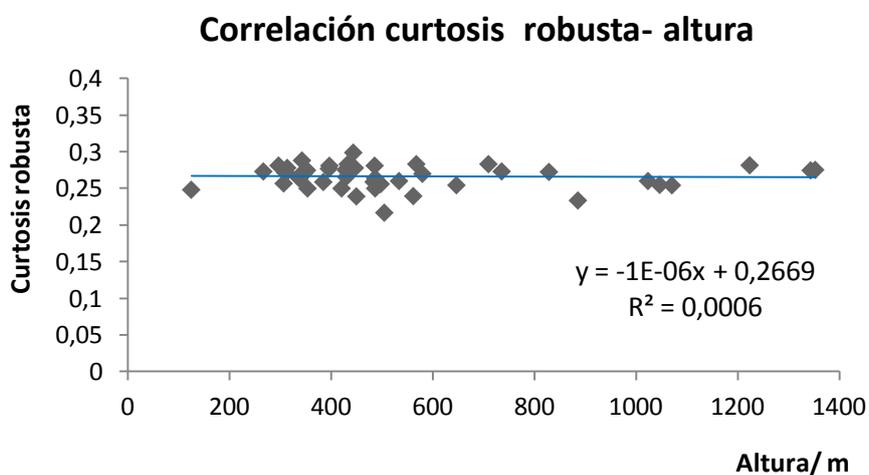


Figura 3.16. Gráfica de correlación entre la curtosis robusta y la altura

El valor del coeficiente de correlación para curtosis robusta es  $r$  es igual a 0.024, mucho menor que el valor crítico de 0.291. En este caso no se observa correlación entre la curtosis robusta y la altura al igual que en el caso de la curtosis no robusta donde tampoco existía dicha correlación.

# **Capítulo IV**

## **Parámetros de la distribución de Weibull**

## 4. 1. Histogramas

Dado que la velocidad del viento cambia continuamente, es necesario describirlo de una forma estadística como variable aleatoria. Surge entonces la necesidad de establecer un modelo para las frecuencias de las velocidades del viento que pueda ser descrito convenientemente por una función matemática continua en vez de por una tabla de valores discretos para facilitar su manejo.

Se parte de unos datos, se determina el número de datos en los que la velocidad del viento tenía un valor medio comprendido entre un cierto intervalo, y se crea así una gráfica de valores, histograma, donde se ven representadas las probabilidades de cada velocidad.

### Obtención de un histograma

Primeramente se establecen unos rangos de velocidad que serán las clases del histograma, se ha tomado una anchura de 0.2, es decir, las clases del histograma son de 0 a 0.2 m/s, de 0.2 a 0.4 m/s, de 0.4 a 0.6, y así sucesivamente hasta incluir el valor de la velocidad más alta medida.

A continuación, con los todos los datos de las velocidades de una determinada estación a lo largo del periodo de estudio, desde 2005 hasta 2015 en este trabajo, se realiza un conteo. Lo que se hace es un recuento del número de datos de velocidad que se encuentran dentro de cada clase del histograma.

Posteriormente se expresan los resultados del conteo obtenidos en forma de porcentaje y se procede a representar el histograma correspondiente a la estación.

### Representación

En las Figuras 4.1., 4.2., 4.3. y 4.4. a continuación se muestran algunos ejemplos de los histogramas obtenidos de los datos de distintas estaciones. En el eje X se representa la velocidad de viento y en el eje Y el porcentaje de mediciones a dicha velocidad.

Se ha elegido mostrar los casos de histogramas con formas más diferentes entre sí para ver la diferencia de forma que puede tomar la distribución de datos, el resto de distribuciones son casos intermedios.

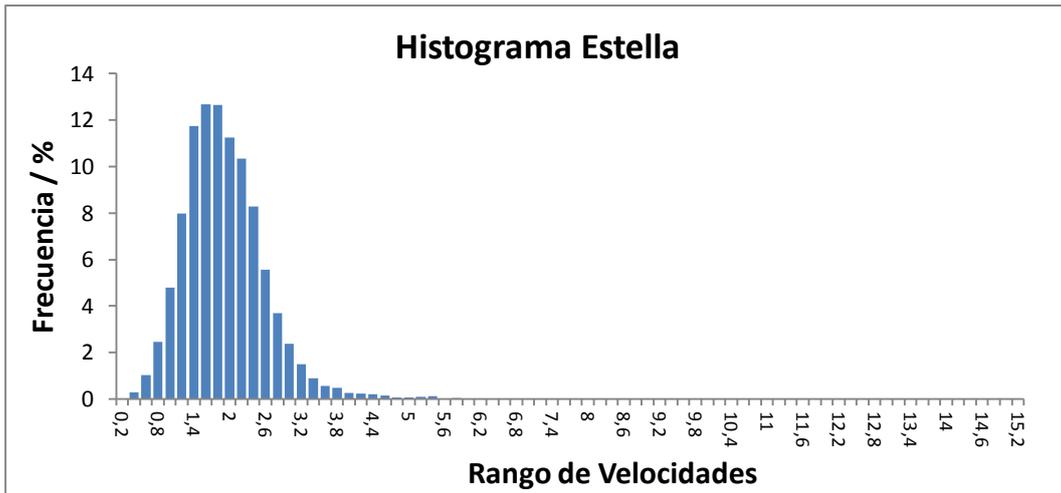


Figura 4.1. Histograma de Estella

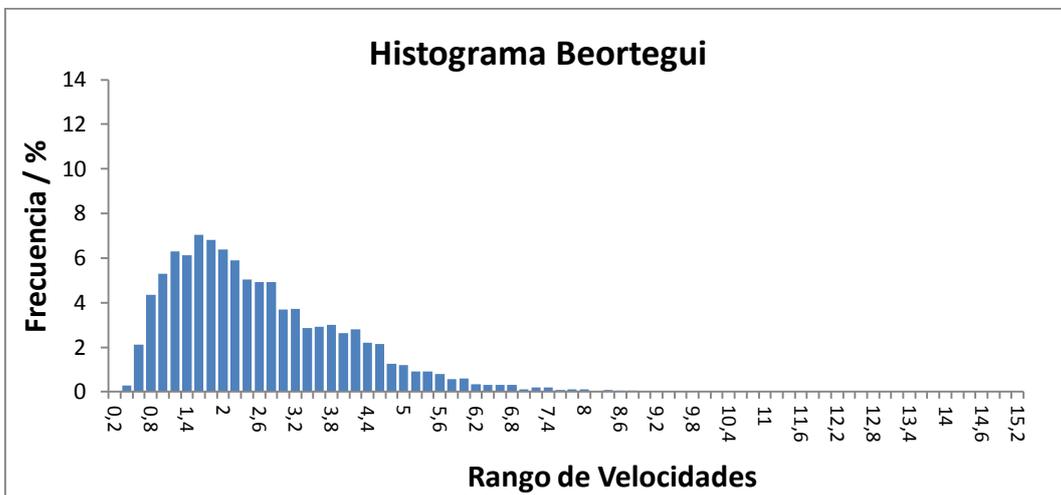


Figura 4.2. Histograma de Beortegui

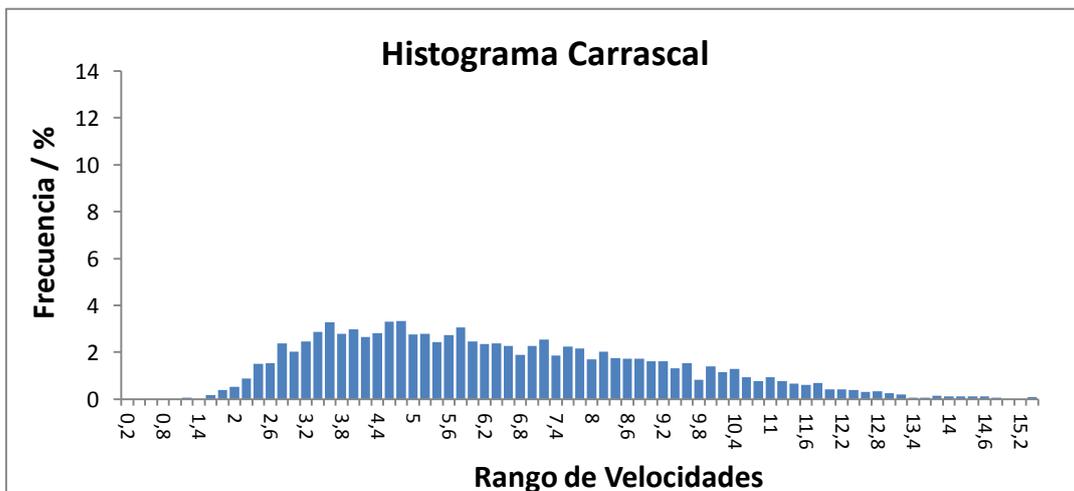


Figura 4.3. Histograma de Carrascal

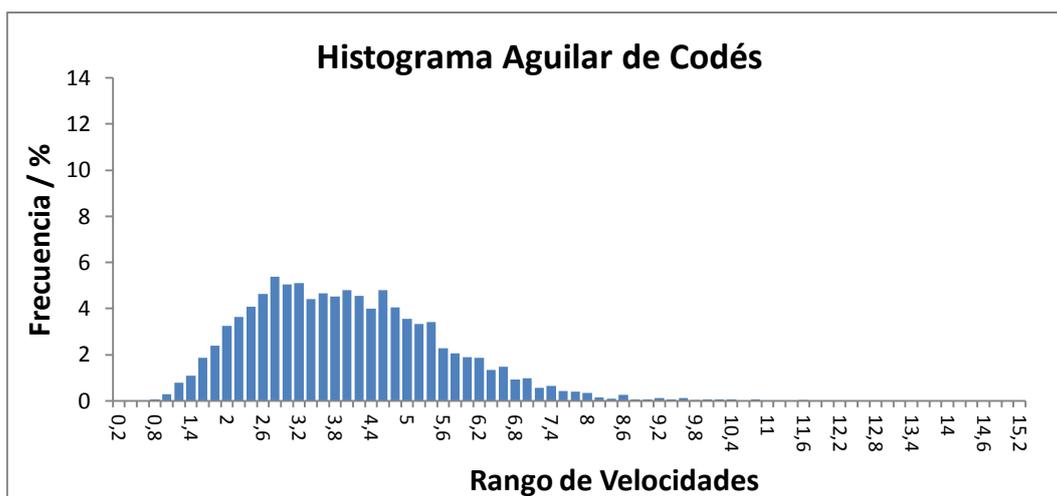


Figura 4.4. Histograma de Aguilar de Codés

El histograma de Estella muestra una distribución con apuntamiento y alta frecuencia de velocidades, estas son bastante bajas en su mayoría.

El de Beortegui representa una distribución con menor apuntamiento, más dispersa y se observa cola a la derecha.

El de Carrascal por ejemplo muestra una distribución muy dispersa con muchas velocidades con frecuencia similar, presenta achatamiento y se observa cola a la derecha. En este caso el rango de velocidades medidas es muy amplio.

El de Aguilar de Codés corresponde a una distribución más cercana a la normal, con pequeño sesgo hacia la izquierda y ligeramente apuntada.

Todos los histogramas presentan valores del sesgo positivo.

La altura a la que se encuentran las estaciones mostradas es la siguiente: Aguilar de Codés a 736 m , Beortegui 580 m , Carrascal 568 m y Estella 487m .

La diferencia entre las distribuciones no se debe en este caso a la altura a la que se encuentran las estaciones sino que podría deberse a la orografía del terreno. Los datos se ven muy influenciados por la situación de la estación, si esta se encuentra por ejemplo en un llano abierto o en una cresta el valor medido será superior al medido en el fondo de un valle o al pie de una sierra. Las medidas realizadas en crestas o cimas de montañas son muy diferentes respecto de las del fondo de los valles incluso dentro de una misma zona.

### Conversión del histograma

El siguiente paso sería la conversión del histograma, representación discreta, a una función continua. Se realiza con este propósito el ajuste a la función de distribución de

Weibull, función continua. Para diferentes distribuciones de velocidades del viento se puede comprobar que la función es flexible y toma diferentes formas ajustándose en cada caso a los datos presentados en forma de histograma.

Una vez extraídos los valores de los parámetros que presenta la distribución de Weibull, esta se puede representar gráficamente en cada caso.

## 4. 2. Parámetros k y c de la distribución de Weibull

Se han calculado los parámetros de la distribución de Weibull y se han representado espacialmente en un mapa mostrándose también la correlación de cada uno de ellos con la altura. Se ha empleado para ello el método de los momentos

A continuación se presenta una tabla con el valor medio de todas las estaciones de los dos parámetros calculados a 2, a 10 y a 50 m .

**Tabla 4.1.** Media de los valores de los parámetros de todas las estaciones

	VALORES MEDIOS		
	2 m	10 m	50 m
<b>k</b>	2,12	2,20	2,07
<b>c (m/s)</b>	3,15	4,04	4,98

Los valores de k están en torno a 2 de media y el valor de c crece linealmente con la altura como se observa siendo proporcional a la media de velocidad.

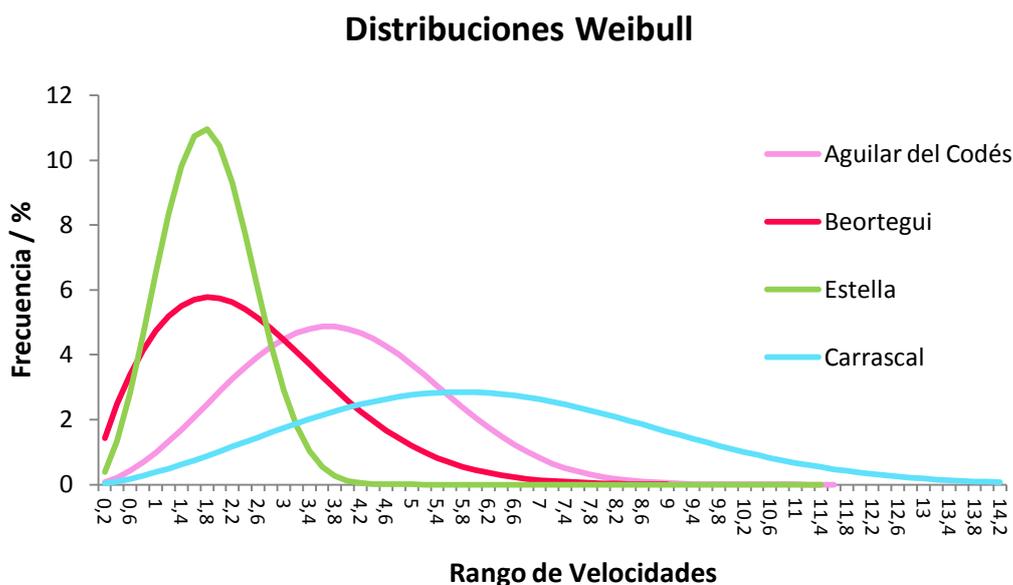
**Tabla 4.2.** Valor mínimo y máximo de cada parámetro a 10 m de altura

Valores a 10 m	Mínimo	Máximo
<b>k</b>	1,49	3,16
<b>c (m/s)</b>	1,43	9,62

Tras haberse calculado los parámetros de la distribución de Weibull de cada estación, a continuación se muestra en la Figura 4.5. las correspondientes a los histogramas presentados anteriormente en las Figuras 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4.

Los parámetros correspondientes a las distintas distribuciones que aparecen la Figura 4.5. son los siguientes:

Aguilar de Codés	$k = 2.69$ y $c = 4.40$
Estella	$k = 2.84$ y $c = 2.05$
Beortegui	$k = 1.83$ y $c = 2.81$
Carrascal	$k = 2.50$ y $c = 7.07$



**Figura 4. 5.** Distribuciones de Weibull correspondientes a los histogramas

Se puede apreciar así la versatilidad de la distribución, que toma diferentes formas ajustándose a la distribución de los datos de cada estación.

### 4.2.1. El parámetro de forma, $k$

El parámetro de forma  $k$  representa el rango de variación de la velocidad del viento durante un período de tiempo, se trata un parámetro adimensional de la distribución de Weibull.

Se representa a continuación el parámetro correspondiente a la altura de 10 m en un mapa de la comunidad de Navarra en la Figura 4.6.

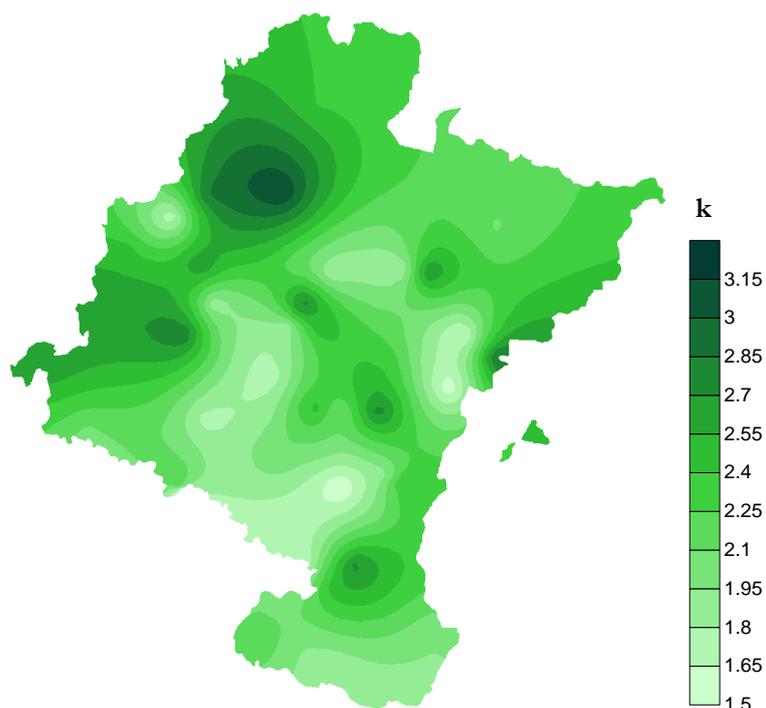


Figura 4.6. Mapa del parámetro k

El rango de variación de k no es muy grande, entre 1.49 y 3.16, lo que da cuenta de lo regular que es el viento (como se ha comentado en el apartado 1.2.2 del Capítulo I) ya que k da cuenta del rango de variación de la velocidad en un periodo de tiempo.

A continuación se presenta la **correlación** del parámetro k con la altura y su representación en la gráfica de la Figura 4.7.

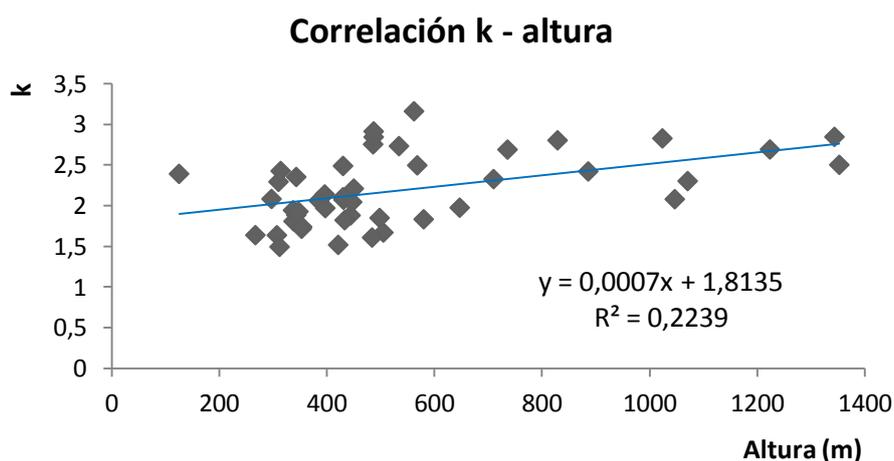


Figura 4.7. Gráfica de correlación entre el parámetro k y la altura

La correlación es satisfactoria, el valor de r es 0.473, superior al valor crítico de 0.291. La relación existente con la altura es creciente linealmente.

### 4.2.2. El parámetro de escala, c

El parámetro de escala  $c$  tiene unidades de m/s y está relacionado con la velocidad del viento  $v$ , tiene relación con la media de la velocidad según la relación que se muestra en la ecuación 1.18.

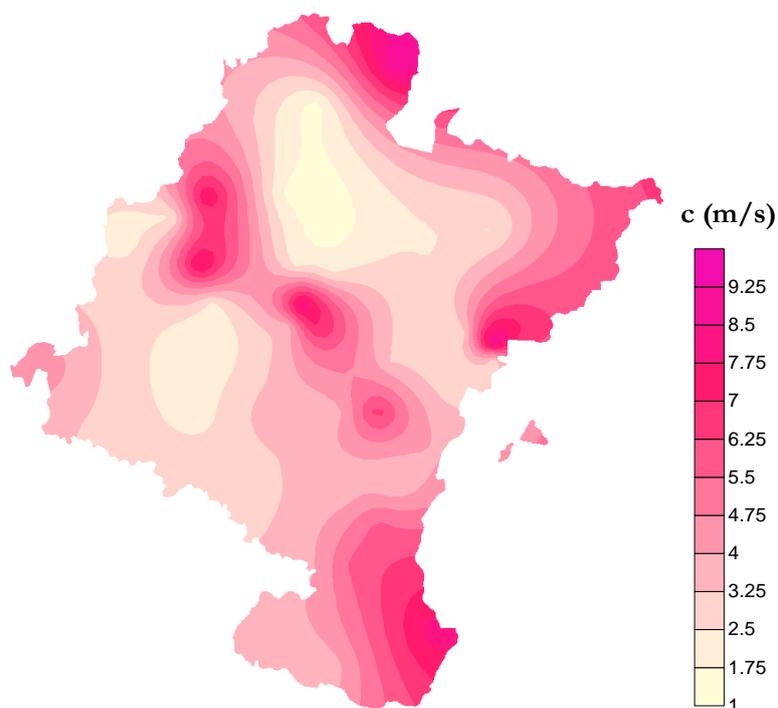


Figura 4.8. Mapa del parámetro  $c$

La **correlación** del parámetro  $c$  con la altura y su representación se muestra en la gráfica de la Figura 4.9. a continuación.

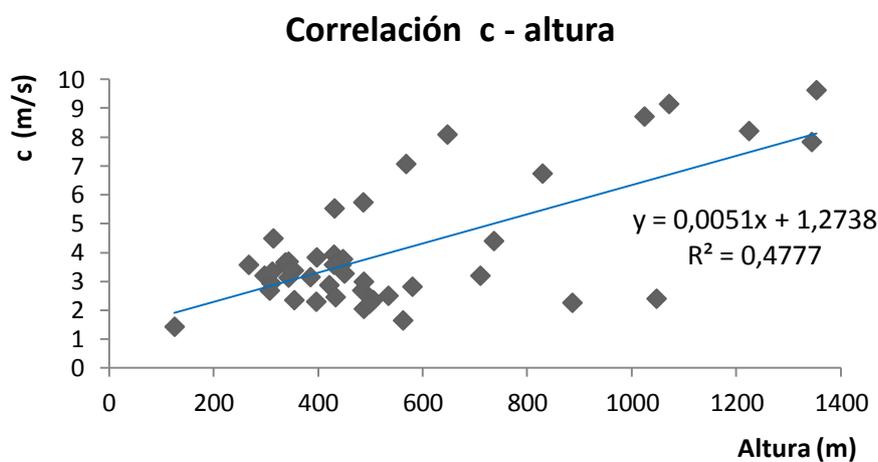


Figura 4.9. Gráfica de correlación entre el parámetro  $c$  y la altura

Existe correlación entre el parámetro  $c$  y la altura aún mejor que la que presenta el parámetro  $k$ , se trata de una relación lineal y creciente con la altura. El valor del coeficiente de correlación  $r$  es superior al valor crítico de 0.291 que habíamos determinado previamente, en este caso  $r$  es igual a 0.692.

### 4.3. Densidad de potencia eólica

Se investigará la posibilidad de obtener un mapa de densidades de potencia de origen eólico.

La energía eólica se obtiene a partir del viento, se ve limitada a la disponibilidad de vientos adecuados en la zona donde se sitúe el aerogenerador. Antes de su instalación resulta conveniente conocer el potencial eólico del lugar, se requiere la realización de estudios previos de la velocidad de viento en la zona ya que es necesaria la presencia de vientos fuertes.

Un **aerogenerador** es un generador de energía eléctrica accionado por la fuerza del viento. Existe una gran cantidad de ellos en funcionamiento así como una gran variedad de modelos.

Se va a realizar el cálculo de la potencia eólica a 50 m de altura para lo que ha sido necesario extrapolar los datos originales a 2 y 10 m como se ha explicado en capítulos previos del trabajo.

Se calculará a esta altura por ser una altura común a la que se sitúan algunos aerogeneradores, aunque también se pueden encontrar en funcionamiento a otras alturas como puede ser a 40, 60 o 90 metros de altura.

Se va a proceder a realizar los cálculos de dos formas diferentes, una de ellas emplea los datos experimentales de velocidad y la otra se basa en los parámetros del ajuste de la distribución de Weibull.

#### 4.3.1. Método de los Parámetros de la Distribución de Weibull

La densidad de potencia media (Wind Power Density) se calcula aplicando la ecuación 4.1 siguiente, en la cual aparecen los parámetros  $k$  y  $c$  de la distribución de Weibull previamente calculados.

$$WPD = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma \left[ 1 + \frac{3}{k} \right] \quad (4.1)$$

Para los cálculos se emplean los datos de densidad del aire a 1atm a diferentes temperaturas, a 10°C, 15 y 20 (Çengel y Cimbala, 2006) mostrados en la siguiente tabla.

**Tabla 4.3.** Densidad del aire a 10°C, 15°C y 20°C

	10 °C	15 °C	20 °C
<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1,246	1,225	1,204

La densidad de potencia disponible en una masa de aire en movimiento es directamente proporcional a la densidad del aire y al cubo de su velocidad.

Los resultados medios obtenidos tomando la densidad del aire a 15°C son los que se muestran a continuación en la Tabla 4.4.

**Tabla 4.4.** Densidad de Potencia eólica a 50 m en W/m<sup>2</sup>

Potencia (10°C)	Potencia (15°C)	Potencia (20°C)
188,017482	184,848648	181,6798142

Habiéndose obtenido resultados de densidad de potencia muy bajos, inferiores a 10 W/m<sup>2</sup> en algunos casos y resultados que superan los 1100 W/m<sup>2</sup> en el caso de algunas estaciones. Estos valores destacablemente más elevados corresponden a las estaciones situadas en lugares a mayor altitud como es el caso de Gorramendi o Arangoiti, los valores más bajos corresponden a las situadas a baja altitud, destacando más las situadas en valles entre montes o montañas.

A continuación en la Figura 4.10. se presenta un mapa donde se muestra la distribución de la potencia eólica.

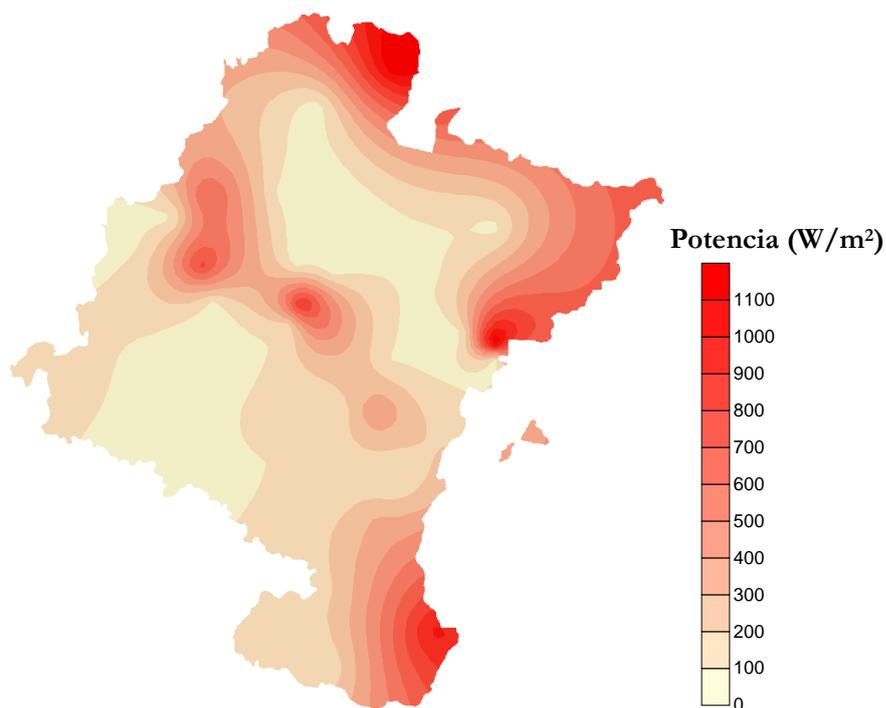


Figura 4.10. Mapa de densidad de potencia media

A excepción de algunos puntos concretos se observa que la densidad de potencia eólica obtenida no es muy elevada.

En la Figura 4.11. a continuación se presenta la **correlación** de la densidad de potencia con la altura.

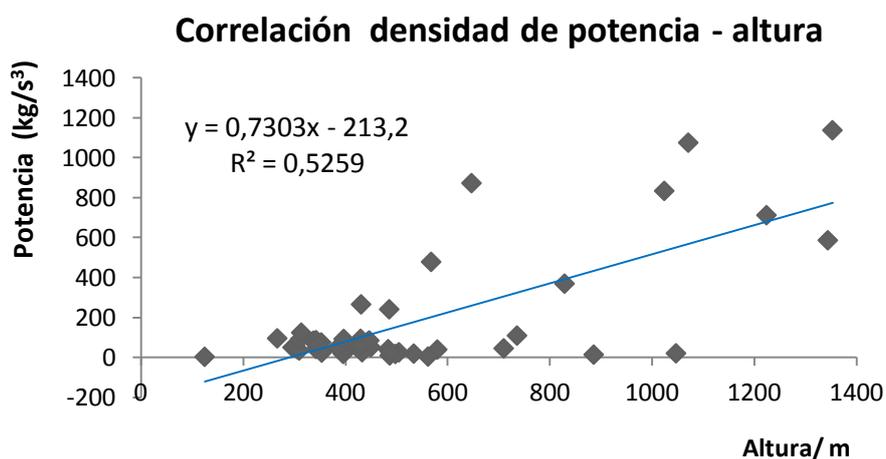


Figura 4.11. Gráfica de correlación entre la densidad de potencia media y la altura

La correlación es buena, el valor del coeficiente de correlación  $r$  es superior al valor crítico de 0.291 que habíamos determinado previamente, en este caso  $r$  es igual a 0.725.

### 4.3.2. Método de los Datos Experimentales

La densidad de potencia se obtiene en este caso mediante la siguiente ecuación, siendo la variable en este caso los datos obtenidos de la velocidad de viento a 50 m .

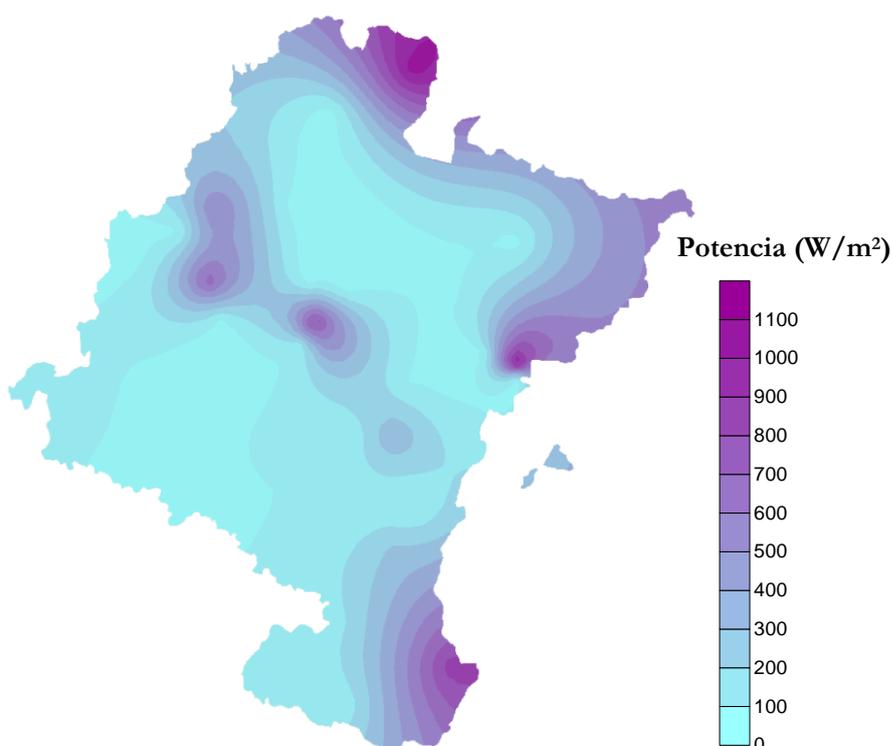
$$WPD = \frac{1}{2N} \rho \sum_N v_i^3 \quad (4.2)$$

Se emplean nuevamente los datos de densidad del aire a 1atm a las temperaturas de 10°C, 15 y 20 mostrados anteriormente en la Tabla 4.3. Los valores obtenidos tomando nuevamente el dato de la densidad del aire a 15°C se representan espacialmente en la Figura 4.12. y los valores medios se muestran en la Tabla 4.5 siguiente.

**Tabla 4.5.** Densidad de Potencia eólica a 50 m en W/m<sup>2</sup>

Potencia (10°C)	Potencia (15°C)	Potencia (20°C)
188,898218	185,71454	182,530863

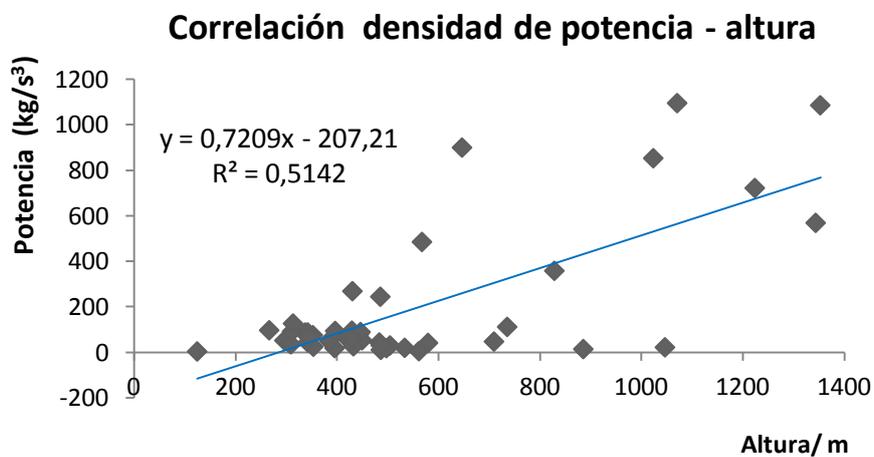
Estos datos son muy similares a los obtenidos empleando el método de los parámetros de la distribución de Weibull en el apartado anterior.



**Figura 4.12.** Mapa de densidad de potencia media

Al igual que con el método anterior a excepción de ciertos puntos concretos la densidad de potencia eólica obtenida no es muy elevada.

La **correlación** con la altura se muestra en la Figura 4.13. siguiente.



**Figura 4.13.** Gráfica de correlación entre la densidad de potencia media y la altura

Es satisfactoria, al igual que con el método anterior el valor del coeficiente de correlación  $r$  es superior al valor crítico de 0.291 que habíamos determinado previamente, en este caso  $r$  es igual a 0.717.

# Conclusiones

Se ha analizado la extensión temporal de datos de velocidad de viento registrados en las estaciones automáticas de la Comunidad de Navarra desde 2005 hasta 2015. Se ha realizado un proceso de selección tras el cual 10 estaciones son descartadas por una falta de datos superior al 15%. Como resultado son seleccionadas 46 estaciones, 20 de ellas con datos a 2 m de altura, mientras que la altura de medida fue de 10 m para el resto.

En aquellas estaciones en que no se midió la velocidad de viento a la altura de 10 m. se utilizó una expresión potencial para transformar los datos.

Se han calculado distintos estadísticos de las velocidades a 10 m. Como resultado se obtuvieron velocidades medianas de 3.28 m/s de media, velocidad equivalente a 2 Beaufort. Se ha presentado también el rango de variación de cada uno de los estadísticos.

Además, se realizaron mapas de dichos estadísticos para conocer su distribución espacial. Se obtuvo una satisfactoria correlación entre la altura y la media, la mediana, la desviación estándar y el rango intercuartílico. Se trata en cada uno de ellos de una relación creciente con la altura.

No se observó en cambio correlación satisfactoria relevante en el caso de la altura y el sesgo, la asimetría, la curtosis y la curtosis robusta.

Se han mostrado también algunos histogramas de estaciones correspondientes a distribuciones de datos con formas muy distintas entre sí. Posteriormente ha sido posible ajustar todas ellas a una distribución de Weibull, habiendo calculado previamente los parámetros característicos de la distribución de Weibull, dando muestra así de la gran versatilidad de esta función de distribución.

Aunque se han presentado distintos métodos de cálculo de los parámetros de la distribución de Weibull. Se siguió el método de los momentos debido a su inmediatez. Como resultado, se obtuvieron valores medios de  $c$  de 4.04 m/s y de  $k$  de 2.20. Se han presentado también los valores mínimo y máximo de cada uno de ellos.

También se han representado los mapas de ambos parámetros y se ha obtenido una correlación satisfactoria con la altura para el parámetro  $k$  y aun mejor para el parámetro  $c$ . En ambos casos creciente con la altura.

Por último, se ha calculado la densidad de potencia, los cálculos se han realizado a 50 m de altura para lo que se han extrapolado los datos hasta esa altura. Se ha representado también espacialmente y se ha obtenido su correlación positiva con la altura. Los resultados son similares a los recogidos en la bibliografía manejada.

A excepción de algunas zonas concretas, los resultados de densidad de potencia eólica obtenidos no son muy altos, tratándose de valores muy similares para los dos métodos de cálculo en torno a 185 W/m<sup>2</sup> a 15°C y 1atm.

# Referencias

Akinci, T.C., Seker, S., Guseinoviene, E., Nayir, A. *Statistical analysis and Hurst parameter estimation for wind speed in Kırklareli area of Turkey* (2013) 2013 8th International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies, EVER 2013, art. no. 6521592.

Alavi, O., Mohammadi, K., Mostafaiepour A. *Evaluating the suitability of wind speed probability distribution models: A case of study of east and southeast parts of Iran* (2016b) Energy Conversion and Management, 119, pp. 101-108.

Alavi, O., Sedaghat, A., Mostafaiepour, A. *Sensitivity analysis of different wind speed distribution models with actual and truncated wind data: A case study for Kerman, Iran* (2016a) Energy Conversion and Management, 120, pp. 51-61.

Akgül, F.G., Şenoğlu, B., Arslan, T. *An alternative distribution to Weibull for modeling the wind speed data: Inverse Weibull distribution* (2016) Energy Conversion and Management, 114, pp. 234-240.

Akpinar, E.K., Akpinar, S. *An assessment on seasonal analysis of wind energy characteristics and wind turbine characteristics* (2005) Energy Conversion and Management, 46 (11-12), pp. 1848-1867.

Bakker, A.M.R., van den Hurk, B.J.J.M. *Estimation of persistence and trends in geostrophic wind speed for the assessment of wind energy yields in Northwest Europe* (2012) Climate Dynamics, 39 (3), pp. 767-782.

Beychok, M. R. *Fundamentals of gas Stack dispersion* (1994).

Bezrukovs, V., Zacepins, A., Bezrukovs, V., Komasilovs, V. *Comparison of methods for evaluation of wind turbine power production by the results of wind shear measurements on the Baltic shore of Latvia* (2016) Renewable Energy, 96, pp. 765-774.

Bilir, L., Imir, M., Devrim, Y., Albostan, A. *An investigation on wind energy potential and small scale wind turbine performance at Incek region - Ankara, Turkey* (2015) Energy Conversion and Management, 103, art. no. 7348, pp. 910-923.

Carrasco-Díaz, M., Rivas, D., Orozco-Contreras, M., Sánchez-Montante, O. *An assessment of wind power potential along the coast of Tamaulipas, northeastern Mexico* (2015) Renewable Energy, 78, pp. 295-305.

Cousineau, D. *Fitting the three-parameter Weibull distribution: review and evaluation of existing and new methods* (2009) IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 16(1), pp. 281-288.

del Angel Ramos, J. A., Sarmiento Sera, A. *Utilización de la escala beaufort en la determinación del potencial eólico* (2004) Ingeniería Energética, 25(1), pp. 13-17.

European Wind Energy Association (EWEA), Wind Energy Scenarios 2020, 2014. Technical Report. Available in: <http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/EWEA-Wind-energy-scenarios-2020.pdf> (acceso el 01.07.16)

Gryning, S.-E., Floors, R., Peña, A., Batchvarova, E., Brümmner, B. *Weibull Wind-Speed Distribution Parameters Derived from a Combination of Wind-Lidar and Tall-Mast Measurements Over Land, Coastal and Marine Sites* (2016) *Boundary-Layer Meteorology*, 159 (2), pp. 329-348.

Gualtieri, G. *Atmospheric stability varying wind shear coefficients to improve wind resource extrapolation: A temporal analysis* (2016) *Renewable Energy*, 87, pp. 376-390.

Holt, E., Wang, J. *Trends in wind speed at wind turbine height of 80 m over the contiguous United States using the north American Regional Reanalysis (NARR)* (2012) *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51 (12), pp. 2188-2202.

Lampert, A., Bernalte Jimenez, B., Gross, G., Wulff, D., Kenull, T. *One-year observations of the wind distribution and low-level jet occurrence at Braunschweig, North German Plain* (en prensa) *Wind Energy*

Lothar, S. *Applied statistics: a handbook of techniques*. Springer-Verlag, New York, 1982.

Milton, R. B. *Fundamentals of stack gas dispersion*, Third edicion, Ed. Irvine, 1994

Mohammadi, K., Alavi, O., Mostafaeipour, A., Goudarzi, N., Jalilvand, M. *Assessing different parameters estimation methods of Weibull distribution to compute wind power density* (2016) *Energy Conversion and Management*, 108, pp. 322-335.

Ouammi, A., Dagdougui, H., Sacile, R., Mimet, A. *Monthly and seasonal assessment of wind energy characteristics at four monitored locations in Liguria region (Italy)* (2010) *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (7), pp. 1959-1968.

PANER, Plan de Acción Nacional de Energías Renovables de España 2011-2012, Informe técnico, Ministerio de Industria, Energía y Turismo, Gobierno de España, 2010. Disponible en: [http://www.minetur.gob.es/energia/desarrollo/EnergiaRenovable/Documents/20100630\\_PANER\\_Espanaversion\\_final.pdf](http://www.minetur.gob.es/energia/desarrollo/EnergiaRenovable/Documents/20100630_PANER_Espanaversion_final.pdf) (acceso, 01.07.16)

Pérez, I. A., Sánchez, M. L., García, M. Á., *Weibull wind speed distribution: Numerical considerations and use with sodar data* (2007) *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D20).

Pérez, I. A., García, M. A., Sánchez, M. L., de Torre, B. *Analysis of height variations of sodar-derived wind speeds in Northern Spain*. (2004) *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 92(10), pp. 875-894.

Pérez, I. A., García, M. A., Sánchez, M. L., de Torre, B. *Analysis and parameterisation of wind profiles in the low atmosphere* (2005) *Solar Energy*, 78(6), pp. 809-821.

Pérez, I. A., Sánchez, M. L., García, M. Á., de Torre, B. *Description and distribution fitting of transformed sodar wind observations* (2008) *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 70(1), pp. 89-100.

Rehman, S., Ahmad, A. *Assessment of wind energy potential for coastal locations of the Kingdom of Saudi Arabia* (2004) *Energy*, 29 (8), pp. 1105-1115.

Saboor, A., Bakouch, H.S., Nauman Khan, M. *Beta Sarhan-Zaindin modified Weibull distribution* (2016) *Applied Mathematical Modelling*, 40 (13-14), pp. 6604-6621.

Santos-Alamillos, F.J., Thomaidis, N.S., Quesada-Ruiz, S., Ruiz-Arias, J.A., Pozo-Vázquez, D. *Do current wind farms in Spain take maximum advantage of spatiotemporal balancing of the wind resource?* (2016) *Renewable Energy*, 96, pp. 574-582.

Shin, J.-Y., Ouarda, T.B.M.J., Lee, T. *Heterogeneous mixture distributions for modeling wind speed, application to the UAE* (2016) *Renewable Energy*, 91, pp. 40-52.

Shu, Z.R., Li, Q.S., He, Y.C., Chan, P.W. *Observations of offshore wind characteristics by Doppler-LiDAR for wind energy applications* (2016) *Applied Energy*, 169, pp. 150-163.

Solyali, D., Altunç, M., Tolun, S., Aslan, Z. *Wind resource assessment of Northern Cyprus* (2016) *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, pp. 180-187.

Song, L., Chen, W., Wang, B., Zhi, S., Liu, A. *Characteristics of wind profiles in the landfalling typhoon boundary layer* (2016) *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 149, pp. 77-88.

Tamura, Y., Iwatani, Y., Hibi, K., Suda, K., Nakamura, O., Maruyama, T., Ishibashi, R. *Profiles of mean wind speeds and vertical turbulence intensities measured at seashore and two inland sites using Doppler sodars* (2007) *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95 (6), pp. 411-427.

Tar, K. *Some statistical characteristics of monthly average wind speed at various heights* (2008) *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12 (6), pp. 1712-1724.

Teyabeen, A.A. *Statistical analysis of wind speed data* (2015) 6th International Renewable Energy Congress, IREC 2015, art. no. 7110866.

Veronesi, F., Grassi, S. *Comparison of hourly and daily wind speed observations for the computation of Weibull parameters and power output* (2016) *Proceedings of 2015 IEEE International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2015*, art. n°. 7455043.

Zheng, Y.-Q., Zhao, R.-Z. *Characteristics for wind energy and wind turbines by considering vertical wind shear* (2015) *Journal of Central South University*, 22 (6), pp. 2393-2398.

Weibull, W. *A Statistical Distribution Function of Wide Applicability* (1951) *Journal of Applied Mechanics, Transactions of the American Society Of Mechanical Engineers*, September 1951, pp. 293-297.

Wilks, D. S. *Statistical methods in the atmospheric sciences*, Second Edition, Elsevier Inc. 2006, chapter 3.

Çengel, Yunus A., Cimbala, John M. *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones*, 1ª edición, McGraw-Hill, 2006. Tabla A-9.

# **Lista de figuras y tablas**

## Listado de Figuras

<b>Figura 1.1.</b> Ley potencial tomando la altura a 2 m como referencia y como exponente 0.145.....	16
<b>Figura 1.2.</b> Desviación respecto a la distribución normal .....	18
<b>Figura 1.3.</b> Distribución de Weibul para diferentes valores de su parámetro de forma k .....	20
<b>Figura 1.4.</b> Distribución acumulativa de Weibul para diferentes valores de su parámetro de forma k .....	21
<b>Figura 2.1.</b> Estación de Candreita a 2 m .....	30
<b>Figura 2.2.</b> Gorramendi a 10 m .....	30
<b>Figura 2.3.</b> Hoja de datos descargados de la estación de Aguilar de Codés el año 2014 .....	31
<b>Figura 2.4.</b> Discriminación de estaciones por falta de datos superior al 15% .....	32
<b>Figura 2.5.</b> Mapa de altura con las estaciones automáticas representadas. Las estaciones descartadas se marcan con una cruz .....	34
<b>Figura 3.1.</b> Mapa de la media de velocidad de viento .....	38
<b>Figura 3.2.</b> Gráfica de correlación entre la media y la altura .....	39
<b>Figura 3.3.</b> Mapa de la mediana de velocidad de viento .....	40
<b>Figura 3.4.</b> Gráfica de correlación entre la mediana y la altura .....	40
<b>Figura 3.5.</b> Mapa de la desviación estándar de velocidad de viento .....	41
<b>Figura 3.6.</b> Gráfica de correlación entre la desviación estándar y la altura .....	41
<b>Figura 3.7.</b> Mapa del rango intercuartílico de velocidad de viento .....	42
<b>Figura 3.8.</b> Gráfica de correlación entre el rango intercuartílico y la altura .....	43
<b>Figura 3.9.</b> Mapa del sesgo de velocidad de viento .....	43
<b>Figura 3.10.</b> Gráfica de correlación entre el sesgo y la altura .....	44
<b>Figura 3.11.</b> Mapa de la asimetría robusta de la velocidad de viento .....	44
<b>Figura 3.12.</b> Gráfica de correlación entre la asimetría robusta y la altura .....	45
<b>Figura 3.13.</b> Mapa de la curtosis de la velocidad de viento .....	45
<b>Figura 3.14.</b> Gráfica de correlación entre la curtosis y la altura .....	46

<b>Figura 3.15.</b> Mapa de la curtosis robusta de la velocidad de viento .....	47
<b>Figura 3.16.</b> Gráfica de correlación entre la curtosis robusta y la altura .....	47
<b>Figura 4.1.</b> Histograma de Estella .....	50
<b>Figura 4.2.</b> Histograma de Beortegui .....	50
<b>Figura 4.3.</b> Histograma de Carrascal .....	50
<b>Figura 4.4.</b> Histograma de Aguilar de Codés .....	51
<b>Figura 4.5.</b> Distribuciones de Weibull .....	53
<b>Figura 4.6.</b> Mapa del parámetro $k$ .....	54
<b>Figura 4.7.</b> Gráfica de correlación entre el parámetro $k$ y la altura .....	54
<b>Figura 4.8.</b> Mapa del parámetro $c$ .....	55
<b>Figura 4.9.</b> Gráfica de correlación entre el parámetro $c$ y la altura .....	55
<b>Figura 4.10.</b> Mapa de densidad de potencia media .....	58
<b>Figura 4.11.</b> Gráfica de correlación entre la densidad de potencia media y la altura .....	58
<b>Figura 4.12.</b> Mapa de densidad de potencia media .....	59
<b>Figura 4.13.</b> Gráfica de correlación entre la densidad de potencia media y la altura .....	60

## Listado de Tablas

<b>Tabla 1.1.</b>	Conversión de la Escala de Beaufort a m/s y km/h .....	13
<b>Tabla 1.2.</b>	Test de correlación t y coeficiente de correlación crítico $r_{\text{crítico}}$ .....	27
<b>Tabla 3.1.</b>	Media de los valores de los indicadores de todas las estaciones .....	36
<b>Tabla 3.2.</b>	Valor mínimo y máximo de cada indicador a 10 m de altura .....	37
<b>Tabla 4.1.</b>	Media de los valores de los parámetros de todas las estaciones .....	52
<b>Tabla 4.2.</b>	Valor mínimo y máximo de cada parámetro a 10 m de altura .....	52
<b>Tabla 4.3.</b>	Densidad del aire a 10°C, 15°C y 20°C .....	57
<b>Tabla 4.4.</b>	Densidad de potencia eólica en $W/m^2$ .....	57
<b>Tabla 4.5.</b>	Densidad de potencia eólica en $W/m^2$ .....	59