



# Title: Análisis comparativo de los métodos estadísticos usados para estimar los parámetros de Weibull

**Author:** Benjayil, RODRÍGUEZ-SOLANO, Rolando, VASQUEZ-CASTELLANOS,  
Reynaldo, IRACHETA-CORTEZ, José Rafael, DORREGO-PORTELA

**Editorial label ECORFAN:** 607-8534  
**BCIERMMI Control Number:** 2018-03  
**BCIERMMI Classification (2018):** 251018-0301

**Pages:** 21  
**Mail:** *benjayil\_solano19@hotmail.com*  
**RNA:** 03-2010-032610115700-14

### ECORFAN-México, S.C.

244 – 2 Itzopan Street  
La Florida, Ecatepec Municipality  
Mexico State, 55120 Zipcode  
Phone: +52 1 55 6159 2296  
Skype: ecorfan-mexico.s.c.  
E-mail: [contacto@ecorfan.org](mailto:contacto@ecorfan.org)  
Facebook: ECORFAN-México S. C.

Twitter: @EcorfanC

[www.ecorfan.org](http://www.ecorfan.org)

### Holdings

Mexico	Colombia	Guatemala
Bolivia	Cameroon	Democratic
Spain	El Salvador	Republic
Ecuador	Taiwan	of Congo
Peru	Paraguay	Nicaragua



# Contenido

1. Introducción
2. Objetivos
3. Descripción de los emplazamientos de estudio
4. Metodología
5. Análisis de los resultados
6. Conclusiones
7. Agradecimientos
8. Referencias



# 1. Introducción

La variabilidad del viento puede ser caracterizada de forma precisa en términos de una función de distribución de la probabilidad. En la literatura especializada se menciona que la distribución Weibull es la más adecuada y la más utilizada para ajustar las distribuciones de la velocidad media del viento.

En este artículo, se analizan los datos de mediciones anuales del viento de tres estaciones anemométricas localizadas en la región del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca con los métodos estadísticos de la Varianza, Justus, Momentos y Mínimos Cuadrados para determinar el potencial energético del viento a través de los parámetros de Weibull, el parámetro adimensional de escala  $c$  y el factor forma  $k$  en m/s. Finalmente, se determina el método más preciso para las características propias del viento en la región del Istmo de Tehuantepec.

*Fuente: Haiyan, 2017; Carta et al., 2009; Wais, 2017*





## 2. Objetivos

### Objetivo General

Determinar el método estadístico que ofrece mayor precisión para estimar los parámetros de Weibull, el parámetro de escala  $c$  y el factor forma  $k$ , para varios emplazamientos en la región del Istmo de Tehuantepec.

### Objetivos Específicos

- Analizar la base de datos de tres estaciones anemométricas ubicadas en los municipios de Ixtepec, Juchitán de Zaragoza y Santo Domingo Tehuantepec.
- Comparar y analizar los resultados obtenidos con los métodos estadísticos: Varianza, Justus, Momentos y Mínimos Cuadrados.
- Determinar el método estadístico que ofrece mayor precisión para las condiciones de viento del Istmo de Tehuantepec.

### 3. Descripción de los emplazamientos de estudio



**Figura 1:** Ubicación de las tres estaciones anemométricas para el análisis del recurso eólico.

*Fuente: Google Earth Pro.*

## 4. Metodología: Conceptos generales

- Velocidad media del viento

$$v = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (1)$$

- Varianza

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - v)^2 \quad (2)$$

- Desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - v)^2} \quad (3)$$

## 4. Metodología: Conceptos generales

La función de Weibull de dos parámetros ha sido durante muchos años la técnica más ampliamente aceptada en aplicaciones de energía eólica.

La distribución de Weibull puede ser descrita como una función de densidad de probabilidad del viento  $f(v)$  y una función de distribución acumulativa  $F(v)$ , determinada por las ecuaciones (4) y (5) respectivamente:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right], \quad v \geq 0; \quad (4)$$

$$F(v) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (5)$$

donde  $c$  y  $k$  son los parámetros de Weibull y  $v$  es la velocidad del viento en m/s.

Fuente: Carta et al., 2009; Conradsen et al., 1984; HaiyanJ. et al., 2017; Kaogaet al., 2014; Rocha et al., 2012; Saleh et al., 2012; Udoakahet al., 2017; Wais, 2017

## 4. Metodología: Método de Varianza

Este método considera los valores de velocidad media en (1) y la desviación estándar en (3) para obtener el **coeficiente de variación  $I$**  del viento.

$$I = \left(\frac{\sigma}{v}\right) * 100 \quad (6)$$

Posteriormente se determina el rango de variación, de acuerdo a los valores que se muestran en la **Tabla 2**, para estimar el factor forma  $k$ .

No.	Rango de Variación $I$ (%)	Tipo de Varianza
1	$0 < I \leq 33$	Baja
2	$33 < I \leq 66$	Media
3	$66 < I \leq 100$	Alta

$\rightarrow k = 1.05(\sqrt{v}) \quad (7)$

$\rightarrow k = 0.94(\sqrt{v}) \quad (8)$

$\rightarrow k = 0.83(\sqrt{v}) \quad (9)$

**Tabla 2.** Rango de coeficiente de variación.

para la obtención del factor escala  $c$ , se emplea la ecuación (10):

$$c = v \left(0.568 + \frac{0.433}{k}\right)^{\frac{1}{k}} \quad (10)$$



## 4. Metodología: Método de Justus

También denominado método empírico, se emplea la ecuación (11) para estimar el factor forma  $k$ .

$$k = \left(\frac{\sigma}{v}\right)^{-1.086} \quad (11)$$

Para el cálculo del factor escala con este método, al igual que el Método de Varianza, se utiliza la expresión (10).

$$c = v \left(0.568 + \frac{0.433}{k}\right)^{\frac{1}{k}} \quad (10)$$

## 4. Metodología: Método de Momentos

Con esta técnica, los parámetros  $k$  y  $c$  se determinan por las ecuaciones (12) y (13) respectivamente.

$$k = \left( \frac{0.9874}{\frac{\sigma}{v}} \right)^{1.983} \quad (12)$$

$$c = \left( \frac{v}{\Gamma \left( 1 + \frac{1}{k} \right)} \right) \quad (13)$$

donde  $\Gamma$  es la función Gamma,  $\sigma$  es la desviación estándar y  $v$  es la velocidad media del viento.

## 4. Metodología: Método de Mínimos Cuadrados

Con el Método de Mínimos Cuadrados se pueden encontrar los parámetros de Weibull  $c$  y  $k$  a partir de la linealización de la función de distribución acumulativa  $F(v)$  descrita en (5)

$$F(v) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (5)$$

Para estimar los parámetros de Weibull de la siguiente forma:

$$k = a, \quad c = \exp\left(-\frac{b}{k}\right) \quad (19)$$

Fuente: Bagriogaset al., 2011, Kaplan, 2017, Udoakah & Ikafia, 2017

## 5. Análisis de resultados

Las estadísticas del viento se resumen en la **Tabla 3**. En dicha tabla se puede observar que el sitio de medición con mayor potencial eólico es la localidad de la venta, para alturas de medición de 15 y 32 metros, seguido por la ciudad de Ixtepec, a 20 y 40 metros. El campus de la Universidad del Istmo es el sitio con el menor potencial.

Estación	Altura del sensor (m)	Velocidad media (m/s)	Desviación Estándar (m/s)
Ixtepec	20	6.24	3.51
	40	7.33	4.02
La Venta	15	9.58	5.45
	32	10.769	5.865
UNISTMO	10	2.85	2.06

**Tabla 3.** Estadísticas del viento de los tres sitios de medición.  
Fuente: Elaboración propia.

## 5. Análisis de resultados

Los resultados correspondientes al factor forma  $k$  para los métodos de Varianza, Justus, Momentos, Mínimos Cuadrados y el software comercial Windographer y para cada una de las distintas alturas de medición se muestran en la **Tabla 4**. Los resultados de esta tabla fueron calculados a partir de los datos estadísticos del viento que se muestran en la **Tabla 3**.

Estación	Altura	Varianza	Justus	Momentos	Mínimos cuadrados	Windographer
Ixtepec	20	2.348	1.866	1.853	1.559	1.575
	40	2.546	1.923	1.91	1.699	1.769
La Venta	15	2.9	1.846	1.833	1.513	1.61
	32	3.084	1.934	1.922	1.625	1.81
UNISTMO	10	1.41	1.42	1.41	1.43	1.21

**Tabla 4.** Resultados obtenidos para el factor forma  $k$ . Fuente: Elaboración propia.

## 5. Análisis de resultados

Con los valores correspondientes del factor forma  $k$  para cada método, se procedió a calcular el factor escala  $c$  con las ecuaciones (10), (13) y (19), y cuyos resultados se muestra en la **Tabla 5**.

Estación	Altura	Varianza	Justus	Momentos	Mínimos cuadrados	Windographer
Iztepec	20	5.52	5.535	7.023	6.554	6.81
	40	6.51	6.502	8.267	7.044	8.15
La Venta	15	10.75	10.801	10.798	10.64	10.53
	32	12.04	12.194	12.147	12.037	12.02
UNISTMO	10	1.44	2.61	2.6	2.56	3.07

**Tabla 5 a).** Resultados obtenidos para el factor escala  $c$ . Fuente: Elaboración propia.

A partir de los parámetros de Weibull  $c$  y  $k$ , mostrados en la **Tabla 4** y en la **Tabla 5**, se calculan las funciones estimadas de densidad de probabilidad de velocidad media para cada uno de los cuatro métodos estadísticos y el software comercial Windographer.

## 5. Análisis de resultados

Para comparar los resultados gráficos se utiliza el criterio del error porcentual absoluto medio como:

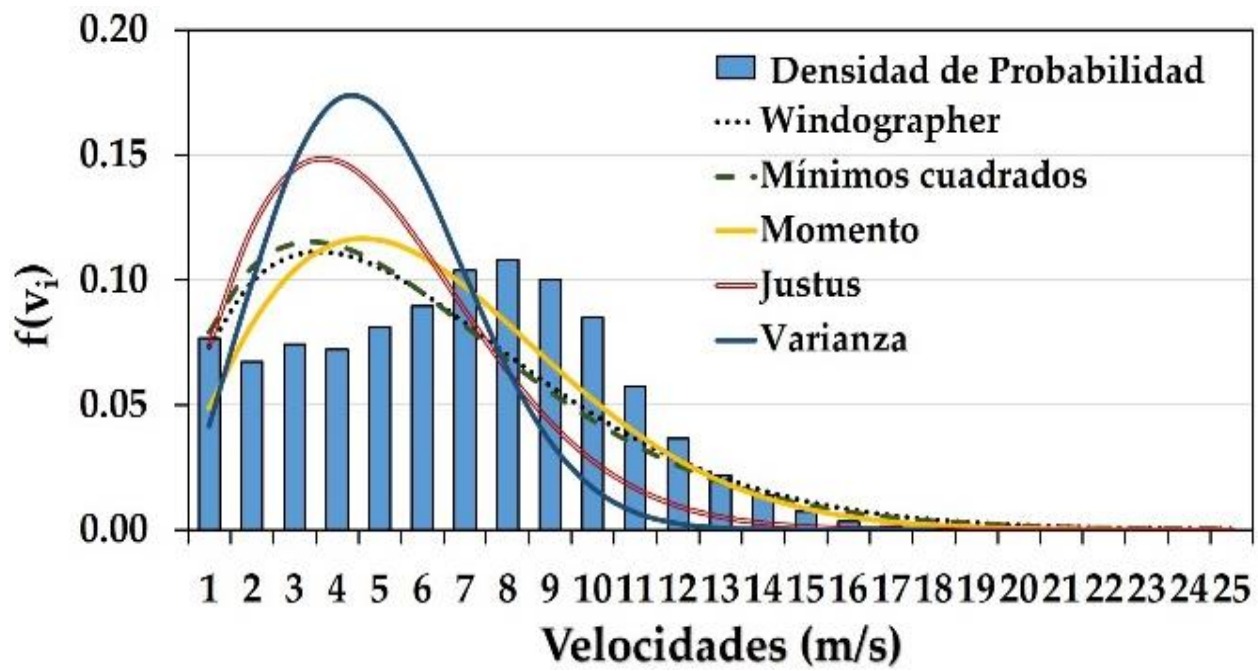
$$\%E_{abs} = \frac{100}{N} \left( \sum_{i=1}^N (p(v_i) - f(v_i)) \right) \quad (27)$$

para comparar la precisión de los métodos estadísticos usados para calcular los parámetros de Weibull.

En dicha ecuación  $N$  es el número de observaciones,  $p(v_i)$  es la probabilidad de las velocidades del viento calculada de las mediciones y  $f(v_i)$  es un valor estimado de la probabilidad para la velocidad del viento  $v_i$ .

## 5. Análisis de resultados

En la **Figura 3** se observa claramente que el uso de estos métodos de la varianza y momentos puede sobreestimar el potencial eólico disponible en la región del Istmo de Tehuantepec.

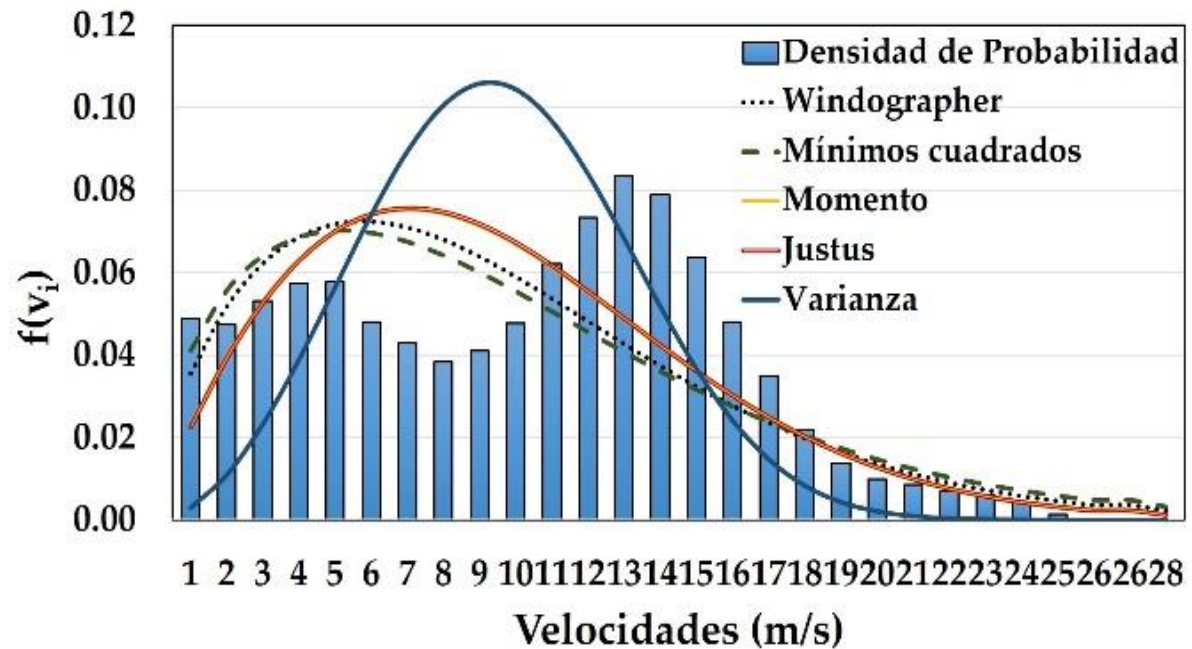


**Figura 3:** Distribución de velocidades del viento en Cd. Ixtepec a 40 m de altura.  
Fuente: Elaboración propia.



## 5. Análisis de resultados

Los resultados de las distribuciones del viento para la localidad de La Venta en la **Figura 4** muestran que los métodos de Momentos y Justus fueron los más precisos, es decir, tuvieron errores porcentuales mínimos de alrededor del 1.20% para una altura de 15 m.



**Figura 4:** Distribución de velocidades medias del viento en localidad de La Venta a 15 m de altura. Fuente: Elaboración propia.

## 5. Análisis de resultados

En la **Tabla 6** se muestra el resumen de los errores porcentuales absolutos medio obtenidos con cada uno de los métodos estadísticos analizados y con el software comercial Windographer, y para cada uno de los tres emplazamientos a distintas alturas.

Estación	Altura	Varianza (%)	Justus (%)	Momentos (%)	Mínimos cuadrados (%)	Windographer (%)
Ixtepec	20	2.748	2.238	1.222	1.422	1.338
	40	2.892	2.286	1.163	1.733	1.246
La Venta	15	2.012	1.202	1.199	1.272	1.263
	32	1.984	1.137	1.140	1.167	1.125
UNISTMO	10	6.13	2.666	2.663	2.9223	2.500

**Tabla 6.** Error porcentual absoluto medio de las distribuciones de Weibull.

Fuente: Elaboración propia.

## 5. Análisis de resultados

En la **Tabla 7**, se muestra un resumen de la estimación de la densidad de potencia para los tres emplazamientos estudiados. El cálculo de la densidad de potencia se obtuvo con los métodos de momentos y mínimos cuadrados ya que fueron los que reportaron los mínimos errores absolutos porcentuales para todos los casos de estudio. Adicionalmente, para facilitar la comparación del potencial eólico en los tres emplazamientos, se extrapolaron los datos del viento de La Venta y la UNISTMO a 20 m y 40 m de altura.

Emplazamiento	Altura (m)	Densidad de potencia (W/m <sup>2</sup> )	Método
Ciudad Ixtepec	20	382.641	Mínimos Cuadrados
	40	526.678	
	20	308.068	Momentos
	40	483.14	
La venta	20	1,645.25	Mínimos Cuadrados
	40	2,033.86	
	20	1284.36	Momentos
	40	1665.743	
UNISTMO Campus Tehuantepec	20	47.197	Mínimos Cuadrados
	40	48.269	
	20	64.478	Momentos
	40	65.941	

**Tabla 7.** Densidad de potencia en los 3 emplazamientos.

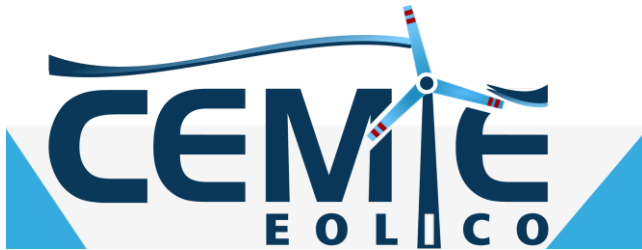
Fuente. Elaboración.

## 6. Conclusiones

- El análisis del recurso eólico en una zona específica es imprescindible para evaluar la viabilidad técnica y financiera de un proyecto eólico.
- El método de momentos se alcanzan los mínimos errores porcentuales absolutos medios para la estimación del recurso eólico en las localidades de Ixtepec y La Venta, respectivamente, donde se cuenta el mayor potencial en la región del Istmo de Tehuantepec.
- De forma general, los métodos de momentos, mínimos cuadrados y Windographer ofrecen buenos resultados para la estimación del recurso eólico en los tres emplazamientos estudiados.
- Finalmente, el método de Varianza registró los mayores errores medios absolutos porcentuales para todos los casos de estudio y, por lo tanto, ser el más impreciso para el cálculo de potencial eólico en la región del Istmo de Tehuantepec.

## 7. Agradecimientos

Los autores agradecen al Fondo SENER-CONACYT-Sustentabilidad Energética y al CEMIE-Eólico por los recursos aportados, así como al Programa Cátedras CONACYT.





## 8. Referencias

Carrillo C., Montaña A. F. O., Cidrás J. A., Dorado D. E. (2013). Review of power curve modelling for wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 21, 572–581.

Elliott D., Schwartz M., Scott. G., Haymes S., Heimiller, D., George, R (Abril 2004). Atlas de Recursos Eólicos del Estado de Oaxaca, Laboratorio Nacional de Energía Renovable, 1-139. *nación multicultural*, UNAM. Recuperado de <http://www.nacionmulticultural.unam.mx/mezinal/docs/330.pdf>

Gautam P., Gautamrao S. (2015). Evaluation of Wind Energy Potential for Four Sites in Ireland using the Weibull Distribution Model. *Journal of Power Technologies*, 48–53.

Reporte de Avance de Energías Limpias, Primer Semestre (2017). Recuperado de: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/279723/Informe Renovables 2017 11122017.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/279723/Informe_Renovables_2017_11122017.pdf).

Kaplan Y. A. (2017). Determination of Weibull parameters by different numerical methods and analysis of wind power density in Osmaniye, Turkey. *Scientia Iranica*. 24, 3204-3212.

Carta J.A., Ramirez P., Velazquez S., (2009). A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis case studies in the Canary islands. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(1), 933–955.



**ECORFAN®**

**© ECORFAN-Mexico, S.C.**

No part of this document covered by the Federal Copyright Law may be reproduced, transmitted or used in any form or medium, whether graphic, electronic or mechanical, including but not limited to the following: Citations in articles and comments Bibliographical, compilation of radio or electronic journalistic data. For the effects of articles 13, 162,163 fraction I, 164 fraction I, 168, 169,209 fraction III and other relative of the Federal Law of Copyright. Violations: Be forced to prosecute under Mexican copyright law. The use of general descriptive names, registered names, trademarks, in this publication do not imply, uniformly in the absence of a specific statement, that such names are exempt from the relevant protector in laws and regulations of Mexico and therefore free for General use of the international scientific community. BCIERMMI is part of the media of ECORFAN-Mexico, S.C., E: 94-443.F: 008- ([www.ecorfan.org/](http://www.ecorfan.org/) booklets)