

Análisis Estadístico de Mediciones de la Velocidad del Viento Utilizando la Técnica de Valores Desviados

E. Cadenas,^a W. Rivera^b

^a Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Santiago Tapia 403, Centro, 58000, Michoacán, México.
ecadenas@zeus.umich.mx

^b Centro de Investigación en Energía, Universidad Nacional Autónoma de México
Apartado Postal 34, Temixco, 62580, Morelos, México.

RESUMEN

Se presenta el análisis de las mediciones de la velocidad del viento generadas en el Istmo de Tehuantepec (México), por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), en el año de 1999, utilizando la técnica de valores desviados (*outliers*) propuesta por Barnett y Lewis [1]. Se compararon las curvas de probabilidad que resultaron de los histogramas, antes y después de la aplicación de la técnica. Se apreció un mejor ajuste de las curvas una vez tratados los datos, así como la disminución de los errores estadísticos en el análisis cuantitativo. Lo anterior representa la posibilidad de mejorar la planeación energética de la planta a través del cálculo de los volúmenes de energía con mayor precisión.

1. INTRODUCCIÓN

En noviembre del 2007 la capacidad eólica instalada en el mundo superaba los 82,000 MW, siendo líderes Alemania, Estados Unidos y España. Figuran también de manera importante Dinamarca, Holanda, y La India. La tasa de crecimiento anual de la capacidad instalada mundial ha alcanzado más del 25 %, lo cual refleja claramente la actitud de la comunidad internacional ante el aprovechamiento de esta fuente de energía [2].

En la zona de La Venta, en Oaxaca México, se ha instalado la central eólica denominada La Venta II, la cual esta conformada con 90 aerogeneradores que producen 83 MW de energía y que tienen a México como líder en Latinoamérica en lo que a generación de energía eólica se refiere [3].

El estado de Oaxaca está localizado en la parte sur de México, ocupa una superficie de aproximadamente 95,364 km², y es el quinto lugar en cuanto a territorio en el país. Su orografía incluye zonas montañosas, mesetas planas, valles y costas, cuenta con gran variedad de climas, tropical a lo largo de la costa y templado al interior del estado.

La lluvia generalmente se presenta del final de abril hasta octubre y la temperatura oscila entre 26 °C y 28 °C a lo largo de la costa, de 20 °C a 22 °C en los valles centrales y de 12 °C a 15 °C en las montañas.

La Venta, se encuentra 60 km al NNE (Norte-Noreste) del Puerto de Salina Cruz, Oaxaca, y es una zona reconocida por sus fuertes y persistentes vientos, diversos estudios realizados han determinado un potencial eólico alrededor de 6,000 MW en las zonas más productivas y mayor a 30,000 MW en todo el estado [4].

La caracterización de regiones en el planeta con potencial eólico, se lleva a cabo generalmente a través de técnicas implementadas por la estadística descriptiva. Las medidas de tendencia central y de dispersión, se complementan con los modelos de probabilidad (generalmente Normal ó Weibull), para generar conocimiento del comportamiento del viento en la zona estudiada. El istmo de Tehuantepec ha sido objeto de diversos estudios de caracterización del potencial eólico [4-6], la CFE y el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), han enfocado sus esfuerzos en plantear una caracterización adecuada de la zona, destacada por su comportamiento bimodal, la estadística descriptiva ha sido desarrollada de manera diversa, desembocando en modelos de conversión de energía muy cercanos al comportamiento real, sin embargo, no existe antecedente del tratamiento de los datos con la técnica propuesta en el presente estudio.

2. MEDICIONES UTILIZADAS EN EL ANÁLISIS

La Comisión Federal de Electricidad (CFE), ha realizado mediciones de la velocidad del viento desde el año de 1994, a través de una red de

estaciones de medición ubicadas en el lugar de interés, con sensores ubicados a diferentes alturas en las torres de medición (20 m, 30 m, 40 m sobre el nivel del terreno), y cuyas características se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Especificación de los sensores de medición.

Especificación	Anemómetro	Veleta
Intervalo de Medición	0.78 – 45 m/s	0 – 360°
Exactitud	±5%	±5%
Resolución	0.78 m/s	1 m/s

La información generada por los sensores es acumulada en equipos de adquisición de datos a través de chips o tarjetas de memoria que posteriormente son descargados en una computadora para su procesamiento.

Las mediciones proporcionadas por CFE y utilizadas para el presente análisis son las generadas en el año de 1999, específicamente para el mes de enero (aunque se muestran los resultados de las medidas estadísticas de los doce meses), suficientes para ejemplificar la técnica propuesta para su análisis.

3. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

Es necesario exponer las medidas estadísticas utilizadas en el presente trabajo, con la finalidad de dar un seguimiento puntual al desarrollo del mismo, las expresiones aunque de uso común se recomienda consultar la referencia [7].

3.1. Media (Primer Momento)

La tendencia central se refiere al punto medio de una distribución; también se conocen como medidas de posición. Cuando nos referimos al promedio de algo, se habla de la media aritmética; representada por la siguiente expresión para una muestra:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \tag{1}$$

3.2. Varianza (Segundo Momento)

La varianza (medida de dispersión) al igual que la desviación estándar (para una muestra), nos dan una distancia promedio de cualquier observación del conjunto de datos con respecto a la media de distribución, se define de la manera siguiente:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \tag{2}$$

3.3. Coeficiente de Asimetría (Sesgo), (Tercer Momento)

Es una medida de asimetría de la distribución, el valor que se obtiene es adimensional, y su cálculo queda definido por la siguiente expresión:

$$S_k = \frac{n^{\frac{1}{2}} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \tag{3}$$

3.4. Coeficiente de Curtosis (Cuarto Momento)

Esta medida, también adimensional, es la medida de la concentración entorno a la media de la distribución de probabilidad de una variable aleatoria, se define de la siguiente manera:

$$k = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^2} \tag{4}$$

3.5. Modelo Normal de Probabilidad

Existen dos razones básicas por las cuales la distribución normal ocupa un lugar tan prominente en la estadística. Primero, tiene algunas propiedades que la hacen aplicable a un gran número de situaciones en las que es necesario hacer inferencias mediante la toma de muestras. Segundo, la distribución normal casi se ajusta a las distribuciones de frecuencias reales observadas en muchos fenómenos, dentro de los cuales las mediciones de la velocidad del viento no son la excepción, se representa mediante una función que depende básicamente de la media y la desviación estándar:

$$f(u) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(u-\bar{u})^2}{2\sigma^2}\right]; \quad (-\infty < u < \infty) \tag{5}$$

donde u es la velocidad del viento (m/s), \bar{u} es la media de la velocidad del viento (m/s), y σ es la desviación estándar (m/s).

3.6. Modelo de Weibull de Probabilidad

La distribución de probabilidad de Weibull, es utilizada con gran frecuencia en la caracterización de regiones con potencial eólico, esto se debe a que la cola alargada al final de la distribución refleja en gran medida el comportamiento del viento en la mayoría de las regiones, se caracteriza por dos parámetros el de forma (k) y el de escala (c), la expresión que la define se presenta a continuación:

$$f(u) = \frac{k}{c} \left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{u}{c}\right)^k\right]; \quad (k > 0, u > 0, c > 1) \quad (6)$$

Otra distribución utilizada en el presente trabajo es la distribución de Rayleigh, que es un caso especial de la de Weibull, con el factor de forma k=2.

4. PRUEBAS DE DISCORDANCIA APLICADAS EN EL ANÁLISIS DE LOS DATOS

Las pruebas de discordancia son para evaluar si los datos extremos de una muestra ordenada de la población son los *outliers* (contaminantes) bajo la hipótesis de que vienen de otra población con la misma varianza, pero media diferente ó la misma media pero con varianza diferente ó ambas tanto la media como la varianza diferente. Si este fuera el caso, los datos no pertenecen a la misma población [7].

La detección de los *outliers*, mediante dichas pruebas nos permite generar un análisis adicional de estas medidas, y tomar decisiones respecto de ellas, investigando si pertenecen a otra población, si ocurrió un error de transcripción, algún error en el equipo de experimentación al momento de medir ó si efectivamente pertenecen al comportamiento del fenómeno y por consiguiente deben de seguir integrando la muestra ó por el contrario eliminarlos si es que afectan de sobremanera la medidas estadísticas representativas.

Existen diversas pruebas de discordancia que pueden ser consultadas en [7], sin embargo, debido a la naturaleza de nuestro problema, se utilizarán dos pruebas denominadas del “Estadístico de alto orden”, que involucran a las medidas estadísticas denominadas sesgo y curtosis, la justificación es que dichas pruebas manejan en su planteamiento un número de datos mínimo de cinco y un número máximo de mil datos

para poder ser aplicadas (consultar referencia [7], y considerando que para poder desarrollar el presente trabajo las mediciones anuales se dividieron de una manera mensual, conteniendo alrededor de 870 datos por cada mes, las pruebas antes mencionadas se ajustan de una manera correcta.

5. APLICACIÓN DE LA TÉCNICA

Para iniciar el análisis de los datos, se generaron los histogramas de los meses que se analizaron, los resultados se aprecian en la Fig. 1.

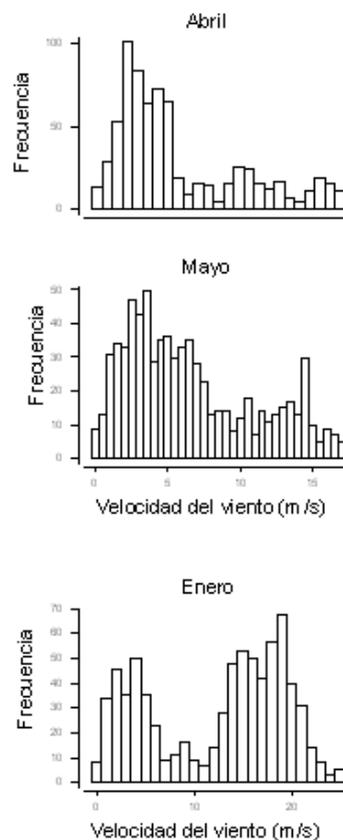


Fig. 1. Histograma de velocidades correspondientes a los meses de enero, abril y mayo en La Venta Oaxaca, en 1999.

Para el mes de enero se aprecia el comportamiento bimodal característico de la zona, la primera moda es de vientos moderados (0 m/s a 10 m/s) aproximadamente y la segunda moda de vientos fuertes (10 m/s a 25 m/s) aproximadamente.

Para el mes de abril se aprecia un comportamiento más típico de la velocidad del viento, dejando una cola al final del histograma, representativa de frecuencias bajas de vientos fuertes.

El mes de mayo también tiene un comportamiento en el cual los vientos de mayor intensidad se aprecian poco.

Es conveniente realizar las medidas estadísticas correspondientes para conocer el panorama general de las muestras antes de aplicar las pruebas de discordancia, los resultados se aprecian en la Tabla 2.

En el resumen estadístico presentado en la Tabla 2, para el mes de enero, se aprecia que las medidas de tendencia central no guardan cierta semejanza, lo que indica que con mucha probabilidad que la muestra no tiene un comportamiento normal, situación que se aprecia también en el histograma de los datos.

El mismo caso ocurre para los meses de abril y mayo, adicionalmente las medidas de dispersión parecen elevadas, al igual que los errores. El análisis posterior dará bases de comparación.

La cercanía a cero en los valores del tercer momento (sesgo), sugiere normalidad, en cambio la curtosis esta por debajo del valor ideal normal $k=3$.

Finalmente, de acuerdo a los comentarios anteriores, será necesario realizar pruebas de normalidad a las muestras, en este caso, las pruebas del sesgo y la curtosis, por ser las pruebas que manejan un número de datos adecuado para el tamaño de las muestras.

5.1. Prueba del Sesgo para Conocer la Normalidad del Mes de Enero

Los datos necesarios para realizar la prueba se muestran a continuación. Para el valor más alejado de la media los valores críticos se pueden consultar en [7]:

1. Prueba estadística: $s_k = \frac{\frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{\frac{3}{2}}}$
2. La media de la muestra es: $\bar{x} = 12.334$ m/s.

3. El valor probado es el más alejado de la media, en este caso: 24.97 m/s.
4. $s_k = -0.3332$ (Para realizar la comparación con los valores críticos se toma el valor absoluto).
5. El valor crítico con un 99 % de confianza: 0.220 0
6. La comparación es: $0.333 2 > 0.220 0$
7. Por lo tanto el valor probado es un *outlier*.

El valor encontrado como *oulier*, será eliminado, y la muestra será modificada, los nuevos valores son:

1. $\bar{x} = 12.317$ m/s.
2. El valor probado será: 24.70 m/s.
3. $s_k = -0.336 1$.
4. Valor crítico con un 99 % de confianza: 0.20128
5. La comparación es: $0.336 1 > 0.201 28$
6. Por lo tanto el valor probado es *outlier*.

Nuevamente modificando la muestra tenemos:

1. $\bar{x} = 12.301$ m/s.
2. El valor probado será: 24.64 m/s.
3. $s_k = -0.3386$.
4. Valor crítico con un 99 % de confianza: 0.221 4
5. La comparación es: $0.338 6 > 0.221 4$.
6. Por lo tanto el valor probado es *outlier*.

El procedimiento es tedioso, la computadora es una herramienta fundamental, finalmente la muestra censurada, es decir sin *outliers*, es de 482 datos para el mes de enero, sin embargo, se han eliminado 262 datos de la muestra; los cuales se analizarán en conjunto para conocer su comportamiento.

5.2. Prueba de Normalidad de la Curtosis

Los datos necesarios para realizar la prueba se muestran a continuación para el valor más alejado de la media:

1. Prueba estadística: $k = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^2}$
2. $\bar{x} = 12.334$ m/s.
3. El valor probado es el más alejado de la media, en este caso: 24.97 m/s.
4. $k = -1.3152$.
5. El valor crítico con un 99 % de confianza es: 3.507 6
6. La comparación es: $1.315 2 < 3.507 6$
7. Por lo tanto el punto probado no es un *outlier*.

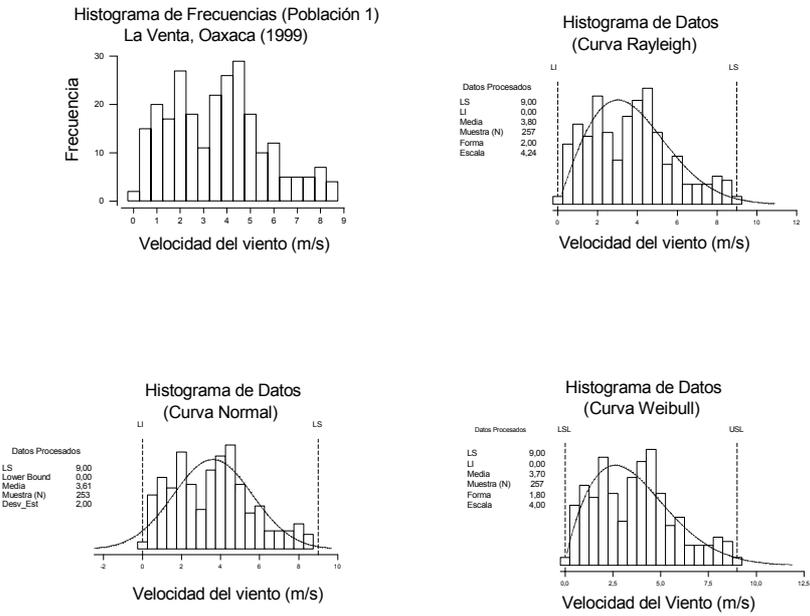


Fig. 3 Distribución de Probabilidad (Población 1), enero (1999), La Venta Oaxaca.

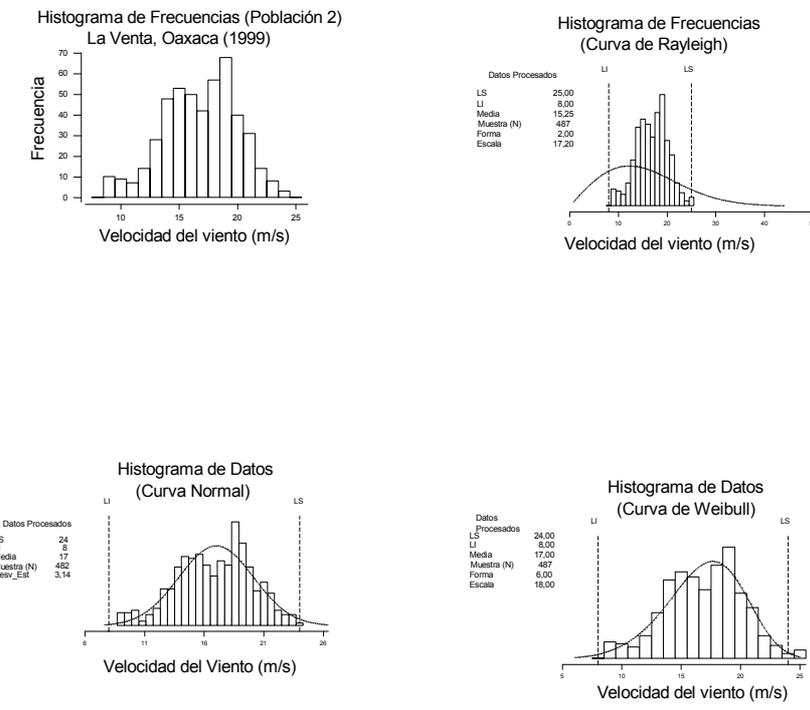


Fig. 4. Distribución de Probabilidad (Población 2), enero (1999), La Venta Oaxaca.

Tabla 2. Estadística descriptiva de La Venta, Oaxaca (1999).
 Altura de la medición: 30 metros, sobre el nivel del terreno.

Mes/Medida	Medidas de Tendencia Central								Medidas de Dispersión						Momentos			
	Media (m/s)	Mediana (m/s)	Moda (m/s)	Tij. (37,37) (m/s)	Wins. (m/s)	Q1 (m/s)	Q2 (m/s)	Q3 (m/s)	Varianza	Desv_Est. (m/s)	Int_Tot. (m/s)	Desv_Media (m/s)	Sv	%RSD	Error_Est.	Sesgo	Curtosis	Int. De C. (m/s)
Enero (744)	12.334	14.445	18.640	12.403	12.323	4.725	11.532	18.340	47.850	6.917	24.760	6.143	0.561	58.080	0.254	-0.333	-1.315	(11.00-13.00)
Febrero (672)	11.582	12.640	16.020	11.277	11.374	5.448	10.684	15.920	43.653	6.607	29.590	5.506	0.570	57.000	0.255	0.350	-0.299	(11.00-12.50)
Marzo (744)	9.261	8.845	15.590	9.226	9.253	3.893	9.291	14.690	33.042	5.748	20.060	5.186	0.621	62.100	0.211	0.045	-1.394	(8.50-10.00)
Abril (720)	7.949	5.760	6.980	7.510	7.928	3.343	7.431	11.518	39.877	6.315	24.500	5.136	0.794	79.400	0.235	1.096	0.060	(7.00-8.50)
Mayo (744)	6.536	5.390	14.530	6.352	6.506	3.010	6.382	9.753	19.865	4.457	17.050	3.704	0.682	68.200	0.163	0.668	-0.683	(6.00-7.00)
Junio (720)	4.721	4.155	4.130	4.548	4.661	2.270	4.573	6.875	9.499	3.082	14.770	2.521	0.653	65.300	0.115	0.750	0.001	(4.00-5.00)
Julio (744)	9.666	11.200	14.180	9.815	9.690	5.133	9.357	13.580	21.560	4.643	16.960	4.038	0.480	48.000	0.170	-0.540	-1.064	(9.00-10.00)
Agosto (744)	6.949	6.765	10.580	6.906	6.921	2.978	6.984	10.990	19.136	4.374	15.720	3.881	0.629	62.900	0.160	0.094	-1.304	(6.50-7.50)
Septiembre (720)	6.211	5.575	5.590	6.127	6.182	2.753	6.352	9.950	16.216	4.027	15.380	3.504	0.648	64.800	0.150	0.281	-1.160	(6.00-6.50)
Octubre (744)	10.053	10.610	15.010	9.979	9.977	4.935	9.933	14.930	36.897	6.074	22.780	5.256	0.604	60.400	0.223	-0.035	-1.070	(9.50-10.50)
Noviembre (720)	14.382	15.380	16.730	14.683	14.455	12.005	14.827	17.648	24.744	4.974	14.382	3.854	0.346	34.580	0.185	-0.937	0.604	(14.00-15.00)
Diciembre (744)	13.832	14.890	17.560	14.043	13.813	11.700	14.895	18.090	34.352	5.861	24.950	4.586	0.424	42.370	0.215	-0.765	-0.293	(13.00-14.50)

Q1= Primer Cuartil.

Q2 = Segundo Cuartil.

Q3 = Tercer Cuartil.

Sv = Coeficiente de variación.

%RSD = Desviación Estándar Relativa.

Int. De C. = Intervalo de Confianza.

Nota: La cantidad de datos obtenidos se anotan enseguida del nombre del mes.

Nota: El redondeo se aplica hasta que se obtengan los valores finales.

La probabilidad utilizada es del 99 % en el intervalo de confianza.

Las medidas estadísticas son también las utilizadas en los métodos robustos.

Tabla 3. Medidas estadísticas con la muestra normalizada.

Muestras Normalizadas											
Mes(#)/Medida	Media (m/s)	Varianza	Des_Est.	Des_Media	Sv	%RSD	Error_Est.	Sesgo	Curtosis	Int. de C.(m/s)	Horas (%)
Enero P_1 (253)	3.61	4.00	2.00	1.70	0.55	55	0.13	0.40	-0.5	(3.30-4.00)	41
Enero P_2 (482)	17.00	9.85	3.00	2.60	0.18	18	0.14	-0.24	-0.38	(16.50-17.50)	99
Febrero (662)	11.32	40.00	6.31	5.60	0.56	56	0.25	0.22	-0.52	(5.50-7.00)	86
Marzo (744)	9.30	33.00	5.75	5.20	0.62	62	0.21	0.05	-1.40	(8.80-9.90)	82
Abril P_1 (520)	4.40	4.60	2.14	5.20	0.50	50	0.01	0.21	-0.50	(4.00-4.70)	58
Abril P_2 (200)	16.70	18.00	4.24	3.64	0.25	25	0.30	0.22	-1.15	(16.00-17.50)	90
Mayo P_1 (558)	4.32	5.57	2.36	2.00	0.55	55	0.10	0.28	-0.82	(4.00-4.60)	54
Mayo P_2 (186)	13.20	4.00	2.00	1.63	0.15	15	0.14	-0.01	-0.91	(13.00-13.60)	94
Junio P_1 (578)	3.52	4.00	2.00	1.65	0.57	57	0.08	0.25	-0.94	(3.00-4.00)	38
Junio P_2 (142)	8.80	0.77	0.88	0.75	0.10	10	0.08	0.55	-0.83	(8.50-9.00)	92
Julio P_1 (515)	7.57	16.00	4.00	3.70	0.53	53	0.18	-0.25	-1.42	(3.50-4.50)	72
Julio P_2 (218)	14.27	0.57	0.75	0.63	0.05	5.0	0.05	0.37	-0.64	(14.00-14.50)	94
Agosto (744)	7.00	19.18	4.38	3.88	0.63	63	0.16	0.09	-1.39	(6.50-7.50)	75
Septiembre (720)	6.20	16.00	4.00	3.50	0.65	65	0.15	0.26	-1.20	(3.50-4.50)	71
Octubre (744)	10.00	36.00	6.00	5.25	0.60	60	0.22	-0.03	-1.07	(5.50-6.50)	83
Noviembre (135)	6.00	10.90	3.30	2.90	0.55	55	0.28	-0.49	-1.16	(5.00-7.00)	73
Noviembre (584)	16.30	8.40	2.90	2.33	0.18	18	0.12	0.11	-0.60	(2.50-3.50)	98
Diciembre (321)	8.54	23	4.80	4.37	0.56	56	0.26	-0.31	-1.51	(4.00-5.50)	72
Diciembre (407)	17.70	4.84	2.20	1.81	0.13	13	0.11	0.27	-0.81	(17.50-18.00)	94

= Número de datos

La prueba no detecta los *outliers* en esta muestra.

Es necesario, mencionar que las pruebas en ocasiones no coinciden al señalar los *outliers*, por lo que será necesario utilizar el conocimiento y criterio que se tenga sobre el procedimiento de la medición.

5.3. Resultado de la Aplicación de las Pruebas a Datos Eliminados de la Primera Muestra

El primer análisis elimina una cantidad de datos considerable (262), estos se retomaron y se aplicaron las pruebas de normalidad, los resultados de las pruebas se presentan en la Fig. 2, para el mes de enero.

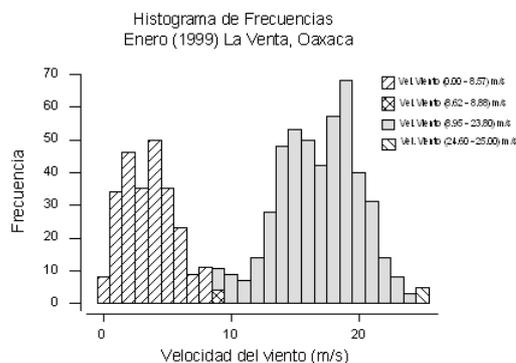


Fig. 2. Histograma de Frecuencias del mes de enero de 1999, La Venta, Oaxaca.

La Fig. 2, presenta un panorama interesante de los datos, se destacan las siguientes observaciones:

1. Desde el punto de vista estadístico, el modelo de probabilidad de los datos, estará compuesto al menos de dos muestras (en el caso de la función normal de probabilidad). Sin embargo, la revisión de los datos sobrantes indica que los datos relegados (nueve datos) en una distribución normal, son comunes en el análisis de los vientos (colas al final de los datos); esto sugiere una distribución de Weibull ó Raleigh. Las Figs. 3 y 4 y la Tabla 3 muestran los modelos de probabilidad posibles y el cálculo de las horas aprovechables.

2. Físicamente las dos modas reflejan los vientos dominantes (segunda moda), los cuales se presentan en la dirección nornoroeste (NNO), vientos que presentan velocidades promedio de 17 m/s; y los vientos de la primera moda que reflejan el resto de los vientos que soplan en las diferentes direcciones en el lugar.

3. Una vez realizado el tratamiento de los datos, los resultados de la Tabla 3, reflejan errores estadísticos de menor magnitud, desviaciones estándar más pequeñas, y modelos de probabilidad más ajustados a los histogramas, debido a que se generaron con las muestras estadísticas censuradas, es decir después de aplicar las pruebas de discordancia.

5.4. Pruebas Estadísticas a las Muestras Restantes

El procedimiento descrito para el mes de enero se realizó para los meses restantes.

Los resultados son satisfactorios, reducen los errores estadísticos y las curvas de probabilidad tienen un mejor ajuste a los histogramas.

6. CONCLUSIONES

De acuerdo al desarrollo del presente análisis podemos comentar lo siguiente:

- Se identificaron diferentes muestras poblacionales de velocidad de viento.
- Una vez aplicadas las pruebas de normalidad, la estadística descriptiva de las muestras censuradas, presentan modelos de probabilidad con un mejor ajuste.
- La dispersión de los datos tratados y los errores estadísticos calculados disminuyen de una manera considerable.
- Se calcula un 76 % de horas aprovechables de viento anuales, esto significa alrededor de 6,615 horas, de las 8,760 disponibles.
- Para el mes de enero (Población 1), el mejor ajuste es el modelo de Rayleigh; para enero (Población 2), el modelo de Weibull es el mejor.
- El análisis anterior involucra un uso adecuado de la estadística, en cuanto a su teoría normal, lo que da relevancia al mismo, no se destaca algún modelo de probabilidad en particular, por lo que de acuerdo al sitio analizado deberá realizarse un análisis puntual.
- La técnica aplicada genera dos muestras, que permiten tener muestras individuales con modelos de probabilidad más ajustados y disminuir las medidas de errores estadísticos, esto lleva necesariamente a obtener una caracterización del lugar más acertada y obtener modelos de conversión viento-electricidad más adecuados.

REFERENCIAS

- [1] Barnett, V., and Lewis, T., 1994, Outliers in statistical data: Chichester, Wiley, 584 p.
- [2] Página electrónica de estadísticas mundiales de la Energía Eólica, 8-nov-2007, Holanda, <http://home.wxs.nl/~windsh/stats.html>.
- [3] D. Elliot, M. Schwartz, G. Scott, S. Haymes, R. George, Wind Energy Resource Atlas of Oaxaca, NREL/TP-500-34519, agosto 2003, <http://www.osti.gov/bridge>.
- [4] Steenburgh WJ, Schultz DM, Colle BA, The structure and evolution of gap outflow over the Gulf of Tehuantepec, Mexico, Monthly Weather review, 1998, 126: 2673-91.
- [5] Jaramillo O.A., Borja M.A., Wind Speed Analysis in La Ventosa México: a bimodal probability distribution case, Renewable Energy 29 (2004), 1613-1630.
- [6] Jaramillo O.A., Borja M.A., Wind potential in La Venta, México: an analysis of probability distribution functions, EWEC 2003, Proceedings of European Wind Energy Conference and Exhibition, Madrid (Spain): John Wiley & Sons Ltd; 2003.
- [7] Verma, S. P. (2005) Estadística Básica para el Manejo de Datos Experimentales: Aplicación en la Geoquímica (Geoquimiometría). Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., 186 p.
- [8] Janardan S. Rohatgi, Wind Characteristics, an analysis for the generation of wind power, Alternative Energy Institute, West Texas A&M University, 1994, 239 pp.

Unidades y Nomenclatura [8]

Media aritmética (m/s): \bar{x}

i-ésimo término de la muestra estadística ordenada: x_i

Número de datos de la muestra estadística: n

Varianza de la muestra ordenada (m/s): s^2

Coficiente de asimetría (adimensional): s_k

Coficiente de exceso (adimensional): k

Función de distribución normal y Weibull: f(u)

Desviación estándar de la población (m/s): σ

Velocidad del viento de las funciones normal y Weibull: u

Media de la velocidad del viento de las funciones normal y Weibull: \bar{u}

Parámetro de forma de la función de Weibull (m/s): k

Parámetro de escala de la función de Weibull (m/s): c.