

Luis A. Saravia
LUIS A. SARAVIA

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERIA
INSTITUTO SALVADOREÑO DE RECURSOS NATURALES
DIVISION DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA

EL VIENTO: UNA CARACTERIZACION A
TRAVES DE LA DISTRIBUCION DE WEIBULL

PUBLICACION TECNICA No. 27

SOYAPANGO, SAN SALVADOR

JULIO 1982

P R O L O G O

En vista de la creciente demanda de energía en zonas rurales y especialmente en el campo de las aplicaciones agrícolas, el - Proyecto Agrometeorología y Aprovechamiento de la Energía contempló la inclusión de una componente dedicada a la cuantificación del potencial energético de fuentes no convencionales como el sol y el viento. Dentro de este marco, se estudiaron los parámetros mencionados, de tal manera que sirvieran de base para una evaluación por parte de expertos en aprovechamiento de energía. El trabajo que en ésta oportunidad le presentamos, enfoca las características puntuales del viento en algunas regiones del país.

Con este tomo se continúa la serie de Publicaciones Técnicas - del Servicio Meteorológico, que a partir de este año junto con el Servicio Hidrológico, integran la División de Meteorología e Hidrología del Instituto Salvadoreño de Recursos Naturales.

Esperamos que el trabajo del Lic. José A. Hernández sea de utilidad y ayuda al desarrollo socioeconómico del país, a través del uso racional de todos los recursos energéticos.

Dr. Gelio Tomás Guzmán L.
Jefe de la División de
Meteorología e Hidrología.

RECONOCIMIENTO

Me place presentar mis agradecimientos a los compañeros calculistas de la Unidad Eólica, a los buenos amigos de la Sección de Dibujo y a los Técnicos y Programadores del Depto. de Informática de El Instituto Salvadoreño de Recursos Naturales, sin cuyo esfuerzo complementario, ésta publicación no hubiera sido posible. Reconocimiento especial para las Señoras Secretarias por su importante ayuda.- Gracias.-

I N T R O D U C C I O N

1.0 La energía contenida en el viento.

Grande ha sido la preocupación de la humanidad, a travez de toda su historia, por explicarse los procesos de la naturaleza y de las leyes de la Física, y no menos grande el interés por la utilización de tales conocimientos.-

El viento, y "la captura" de la energía contenida en él, ha sido motivo de investigación por parte del hombre desde hace miles de años.- De hecho existen evidencias que la energía del viento fué utilizada para mover las barcas sobre el rio Nilo, alrededor del año 5000 a.c. y que en el largo camino hacia nuestros días, se han desarrollado nuevas investigaciones y tecnologías para mejorar esa captura y convertirla en energía utilizable.-

Las modernas instalaciones Eólicas, con motores de plástico reforzado con fibras de vidrio y aspas rebatibles, no desvirtuan los viejos molinos de viento de aspecto venerable, hechos de madera y velas de lona; sinó que justifican la - sobrevivencia de una actividad siempre joven del hombre, - como lo es, la utilización de la energía contenida en el - viento.-

El presente trabajo tiene como principal propósito señalar algunas directrices en el análisis Estadístico de Datos, - para un estudio puntual de la velocidad del viento, el cual

pueda dar las bases para evaluar la utilización de la Energía contenida en el aire y su posible aprovechamiento.-

El método empleado ha sido sugerido por la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), y está totalmente sustentado en las bondades que la distribución teórica de probabilidad - de WEIBULL puede proveer como modelo de ajuste de Datos.-

Retomando de los objetivos del plan de Acción de la Organización Meteorológica Mundial en el campo de los problemas Energéticos; "la finalidad de ésta publicación es fomentar las - aplicaciones de los datos y de los conocimientos meteorológicos a la planificación y explotación de Sistemas Conversores de Energía Eólica".-

LA DISTRIBUCION DE WEIBULL

1.1 Como resultado del análisis estadístico de distribuciones empíricas de velocidad del viento y del estudio de modelos teóricos de ajuste para esa variable climatológica, se asigna la distribución de Weibull, la cual está considerada como uno de los mejores modelos teóricos capaz de explicar la distribución de la velocidad del viento en un determinado lugar.

La función de densidad de probabilidad de Weibull es una función de dos parámetros y viene dada por la siguiente expresión:

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

donde:

c = es llamado parámetro de escala y está dado en unidades de velocidad, y

k = es el parámetro de forma (adimensional).

El conocimiento de la distribución de velocidad del viento es importante en muchas aplicaciones de la energía en él contenida y para determinar las especificaciones precisas de un sistema conversor de energía eólica (SCEE). La probabilidad de que en un determinado lugar se den velocidades de viento mayores que cierto umbral fijo V_0 (Velocidad a la cual un aerogenerador comienza a generar electricidad) o la probabilidad de velocidades en un cierto intervalo

de interés (intervalo donde la potencia de un aereogenerador es máxima). Son interrogantes que pueden manejarse de manera bastante satisfactoria mediante la utilización del modelo teórico de Weibull.

La función de distribución de probabilidad acumulada de Weibull o simplemente función de distribución viene dada por:

$$P(V \leq V_x) = F(V_x) = \int_0^{V_x} f(v) dv = 1 - e^{-\left(\frac{V_x}{c}\right)^k} \quad (1-2)$$

de donde la probabilidad de obtener vientos mayores que un cierto umbral V_0 se obtiene de:

$$P(V > V_0) = 1 - P(V \leq V_0) = e^{-\left(\frac{V_0}{c}\right)^k} \quad (1-3)$$

de fácil cálculo si se conocen los parámetros de forma y escala k , c , respectivamente. De igual manera la probabilidad de obtener velocidades entre dos límites de interés V_1 y V_2 está dada por:

$$P(V_1 < v \leq V_2) = \int_{V_1}^{V_2} f(v) dv = e^{-\left(\frac{V_1}{c}\right)^k} - e^{-\left(\frac{V_2}{c}\right)^k} \quad (1-4)$$

La figura Nº 0 ilustra una familia de curvas típica de la distribución de Weibull.

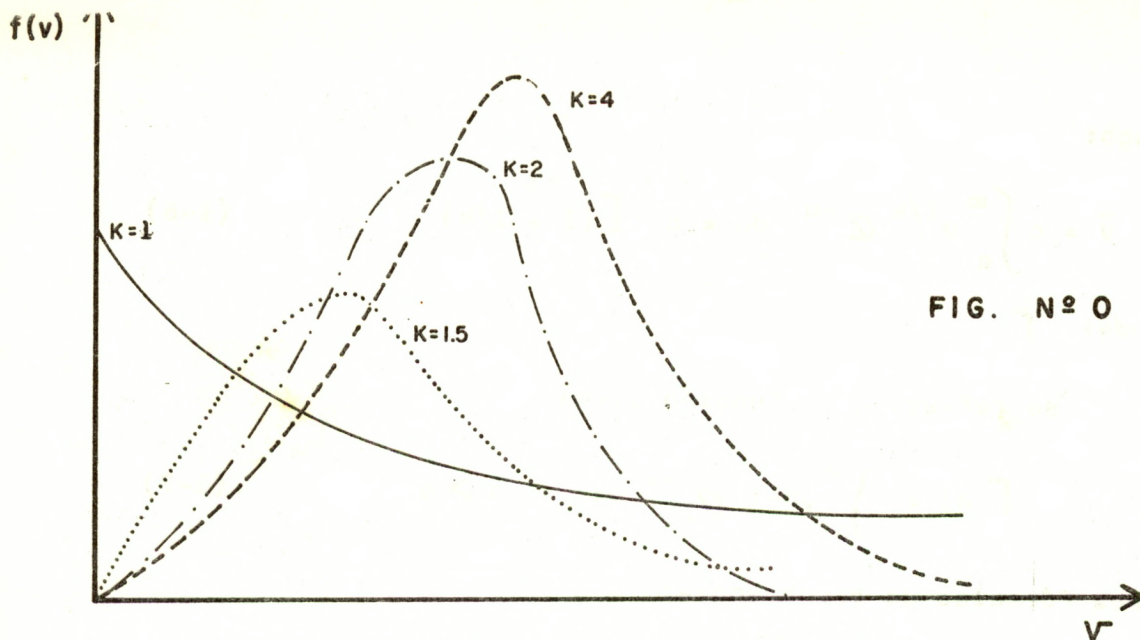


FIG. N° 0

1.2 Valores característicos de la distribución.

La mediana (v_m) de la distribución de Weibull se consigue dando solución a la ecuación (1-3) igualada a $1/2$, así:

$$\frac{1}{2} = 1 - \left(\frac{v_m}{c}\right)^k; \quad \ln 2 = - \left(\frac{v_m}{c}\right)^k$$

$$c(\ln 2)^{1/k} = v_m \quad (1-5)$$

La velocidad media del Viento ($\bar{v}$) se encuentra integrando la expresión:

$$\bar{v} = \int_0^{\infty} v f(v) dv$$

$$\bar{v} = \int_0^{\infty} v \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} - \left(\frac{v}{c}\right)^k dv$$

haciendo

$$\left(\frac{v}{c}\right)^k = u$$

se tiene

$$du = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} dv \quad y \quad v = cu^{1/k}$$

luego:

$$\bar{v} = c \int_0^{\infty} u^{1/k} e^{-u} du = c \Gamma(1 + 1/k) \quad (1-6)$$

donde: Γ

se refiere a la función Gamma

$$\Gamma(n) = \int_0^{\infty} x^{n-1} e^{-x} dx \quad n > 0 \quad (1-7)$$

y sus fórmulas de recurrencia:

$$\Gamma(n + 1) = n \Gamma(n)$$

$$\Gamma(n + 1) = n! \quad \text{si } n = 0, 1, 2, 3 \dots$$

La variancia (σ^2) de la distribución viene dada por:

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (v - \bar{v})^2 f(v) dv$$

utilizando

$$\sigma^2 = \overline{v^2} - (\bar{v})^2$$

integramos

$$\overline{v^2} = \int_0^{\infty} v^2 f(v) dv, \text{ el segundo momento respecto del}$$

origen:

$$\overline{v^2} = \int_0^{\infty} v^2 (k/c) (v/c)^{k-1} e^{-(v/c)^k} dv$$

haciendo igual sustitución que para el cálculo de $\bar{v}$ tenemos:

$$u = (v/c)^k \quad du = (k/c) (v/c)^{k-1} dv$$

$$v^2 = c^2 u^{2/k}$$

$$\overline{v^2} = c^2 \int_0^{\infty} u^{2/k} e^{-u} du = c^2 \Gamma(1 + 2/k)$$

luego:

$$\sigma^2 = c^2 \left[\Gamma(1 + 2/k) - \Gamma^2(1 + 1/k) \right] \quad (1-8)$$

En general el eméximo momento respecto del origen es:

$$M_m = \int v^m f(v) dv = c^m \Gamma(1 + \frac{m}{k}) \quad (1-9)$$

Las relaciones $\frac{\bar{v}}{c}$, $\frac{v_m}{v}$, el coeficiente de variación $\frac{\sigma}{\bar{v}}$

y el factor patrón de energía

$$\frac{\bar{v}^3}{\bar{v}} \quad (\bar{v}^3 = m_3)$$

dependen únicamente del parámetro de escala k

$$\frac{\sigma}{\bar{v}} = \left[\frac{\Gamma(1 + 2/k)}{\Gamma^2(1 + 1/k)} - 1 \right]^{1/2} \quad (1-10)$$

$$\frac{\bar{v}^3}{\bar{v}^3} = \frac{\Gamma(1 + 3/k)}{\Gamma^3(1 + 1/k)} \quad (1-11)$$

La solución de la ecuación

$$\frac{d(v^n f(v))}{dv} = 0$$

cuando

$$n = 0$$

nos proporciona el modo de la distribución, o sea la velocidad de máxima frecuencia (v_0)

$$\frac{df(v)}{dv} = \frac{k}{c} \left[\frac{k-1}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-2} e^{-(\frac{v}{c})^k} - \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-(\frac{v}{c})^k} \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \right]$$

$$\frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-2} e^{-(\frac{v}{c})^k} \left[\frac{k-1}{c} - \left(\frac{v}{c}\right)^k \frac{k}{c} \right] = 0$$

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

$$c \left(\frac{k-1}{k}\right)^{1/k} = v_0 \quad (1-12)$$

Como puede observarse, todos los valores que caracterizan a la distribución: (v_m) mediana; ($\bar{v}$) media aritmética; (σ^2) varianza; (v_0) modo, son función de los parámetros de forma y escala K y C . Eso facilita el estudio del mode lo si tales valores son calculados.

1.3 Método para determinar los parámetros K y C de la distribución de Weibull

Existen varios métodos para determinar los parámetros de la distribución de Weibull, Takle and Brown (1977) describe el método de máxima verosimilitud, el cual se considera que produce los mejores estimadores desde el punto de vista de sus propiedades estadísticas. Sin embargo, para el caso de la distribución de Weibull dicha técnica lleva a soluciones no lineales y procesos de iteración que compli- can un poco los cálculos.

Justus, et al, (1977), presenta el método que se describe a continuación y el cual hemos adoptado por su simplicidad de cálculo. (Una calculadora científica de bolsillo es su ficiente).

Partiendo de la ecuación (1-2) hacemos lo siguiente:

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

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

aplicando doble logaritmo natural se tiene:

$$\ln \ln \left[\frac{1}{1-F(v)} \right] = k \ln v - k \ln c \quad (1-13)$$

(1-13) se puede presentar como una forma lineal

$$Y = a + bx \quad (1-14)$$

haciendo

$$X_i = \ln v_i \quad (1-15)$$

$$Y_i = \ln \ln \left[\frac{1}{1-F(v_i)} \right] \quad (1-16)$$

$$a = -K \ln c \quad (1-17)$$

$$b = K$$

Conocida la masa de datos de velocidad del viento de un lugar para un determinado período, hacemos n intervalos de velocidad $0-v_1$, v_1-v_2 , v_2-v_3 , ..., $v_{n-1}-v_n$ con sus respectivas frecuencias relativas f_1 , f_2 , ..., f_{n-1} , f_n .

Las frecuencias relativas acumuladas $F(v_1) = f_1$, $F(v_2) = f_1 + f_2$; $F(v_n) = F(v_{n-1}) + f_n$, relacionadas con los valores v_i $i=1, 2, \dots, n$ de cada clase, producen la familia de pares (X_i, Y_i) con la cual se obtiene la recta mínimo cuadrática a que se refiere (1-14), (1-15), (1-16).

Los valores a y b se consiguen mediante las expresiones:

$$a = (\sum y_i \sum x_i^2 - \sum x_i \sum x_i y_i) / D$$

$$b = (n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i) / D \quad (1-18)$$

donde:

$$D = n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2$$

Los parámetros de la distribución de Weibull quedan totalmen
te determinados utilizando (1-17), así:

$$k = b$$

$$c = e^{-a/b} \quad (1-19)$$

1.3.1 Método para determinar los parámetros γ y β de la dis-
tribución Gamma(*)

Uno de los métodos es el de máxima verosimilitud, el
cual selecciona aquel estimador que hace máxima la pro-
babilidad de obtener la serie de datos realmente obser-
vados. Sus fórmulas de cálculo son las siguientes:

$$\hat{\gamma} = \frac{1 + \sqrt{1 + 4A/3}}{4A} ; \hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\gamma}} \quad (1-20)$$

donde:

$$A = \ln \bar{x} - 1/n \sum_{i=1}^n \ln x_i, \text{ } x_i \text{ son observaciones inde-}$$

pendientes de la serie.

(*) Ver fórmula 1-22

Otro método es el llamado de Matching Moments descrito en Hahn y Shapiro (pág.87); es menos preciso pero más simple de calcular. Utiliza únicamente la media aritmética y la desviación standard de la distribución empírica.

Referido a la fórmula 1-22 los parámetros se obtienen por:

$$\hat{\beta} = \frac{s^2}{\bar{x}}, \quad \hat{\gamma} = \left(\frac{\bar{x}}{S}\right)^2 \quad (1-21)$$

1.4 Manejo de datos

Los datos son manipulados mensualmente y corresponden a valores promedio horarios de velocidad del viento (en km/h) durante los últimos cinco años de registro de la estación de estudio. El análisis de un mes a lo largo de cinco años se caracteriza por 3720 datos como máximo, acarreado para los doce meses del año en aquella estación alrededor de 44,600 datos.

Se elaboran cuadros de distribución de frecuencia de velocidades e histogramas, calculando los valores característicos: máximos horarios, mínimos horarios, promedio, desviación standard, mediana, coeficiente de variación, etc. De igual manera se elaboran curvas de duración de velocidad (ojiva descendente) y resumen de distribución de velocidad durante el mes.

El ajuste teórico a través de la distribución de Weibull es analizado más tarde, comparando la distribución empírica y sus parámetros, con los que se obtienen mediante la función de densidad de probabilidad de Weibull. El modelo de la distribución Gamma ha sido agregado de igual manera para comparar la bondad, aunque solamente para un mes de una estación.

1.5 Análisis de un mes en una Estación

La Estación Apastepeque está situada en el departamento de San Vicente, a una altura de 570 m.s.n.del m. Se encuentra entre los $13^{\circ} 42.0'$ de latitud Norte y los $88^{\circ} 44.0'$ de longitud Oeste. Es un lugar que presenta algunas buenas posibilidades de utilización de la energía contenida en el viento y que puede ser objeto de una prospección y caracterización más detallada. El mes que se analiza como modelo es uno de los que registran los mayores promedios horarios de velocidad.

Comprende datos para cinco meses de Marzo, desde 1975 hasta 1979.

Marzo

CUADRO 1

1	2	3	4	5	6	f(Vi)7	f(Vi)8
Classes	f	f _u	f _i	f _{ri}	f _v	Weibull	Gamma
0- 2	308	308	0.083	0.083	3719	0.094	0.040
2- 4	409	717	0.110	0.193	3411	0.116	0.100
4- 6	549	1266	0.148	0.340	3002	0.106	0.120
6-8	536	1802	0.144	0.485	2453	0.101	0.110
8-10	333	2135	0.090	0.574	1917	0.092	0.100
10-12	217	2352	0.058	0.632	1584	0.080	0.090
12-14	183	2535	0.049	0.682	1367	0.070	0.070
14-16	155	2690	0.042	0.723	1184	0.059	0.060
16-18	125	2815	0.034	0.757	1029	0.049	0.050
18-20	120	2935	0.032	0.789	904	0.042	0.040
20-22	106	3041	0.029	0.818	784	0.036	.
22-24	101	3142	0.027	0.845	678	0.029	.
24-26	65	3207	0.017	0.862	577	0.024	.
26-28	77	3284	0.021	0.883	512	.	.
28-30	74	3358	0.020	0.903	435	.	.
30-32	88	3446	0.024	0.927	361	.	.
32-34	88	3534	0.024	0.950	273	.	.
34-36	83	3617	0.022	0.973	185	.	.
36-38	50	3667	0.013	0.986	102	.	.
38-40	34	3701	0.009	0.995	52	.	.
40-42	18	3719	0.005	1	18	.	.

Los parámetros k , c de la distribución de Weibull

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

son calculados mediante el método descrito en 1.3 y producen los siguientes valores:

$$k = b = 1.23; \quad a = -3.1614; \quad c = e^{-\frac{a}{b}} = 13.2$$

con ellos y la utilización de (1-4) se calculan los valores de la casilla (7) del cuadro 1. Vale hacer notar que en la utilización del modelo de Weibull se asume que la frecuencia correspondiente a la velocidad cero es cero. Los valores de la desviación standard y la media aritmética de la distribución empírica son:

$$s = 10.2; \quad \bar{x} = 12.6$$

Los estimadores de los parámetros de la distribución Gamma:

$$f(x, \gamma, \beta) = \frac{x^{\gamma-1} e^{-x/\beta}}{\beta^\gamma \Gamma(\gamma)}, \quad \text{para } x > 0; \gamma > 0; \beta > 0$$

(1-22)

Se calculan utilizando el método de "Matching Moments", señalado en 1.3.1 y son los siguientes:

$$\begin{aligned} &= \frac{s^2}{\bar{x}} = \frac{104.04}{12.6} = 8.26 \\ &= \left(\frac{\bar{x}}{s}\right)^2 = \left(\frac{12.6}{10.2}\right)^2 = 1.53 \end{aligned}$$

con ellos y la utilización de tablas gráficas de la distribución Gamma se calculan los valores de la casilla (8) del Cuadro 1.

La distribución empírica de la velocidad del viento está graficada en la fig. 1. Es claramente asimétrica a la derecha, con mayor número de horas en el intervalo de 2 a 10 Km/h.

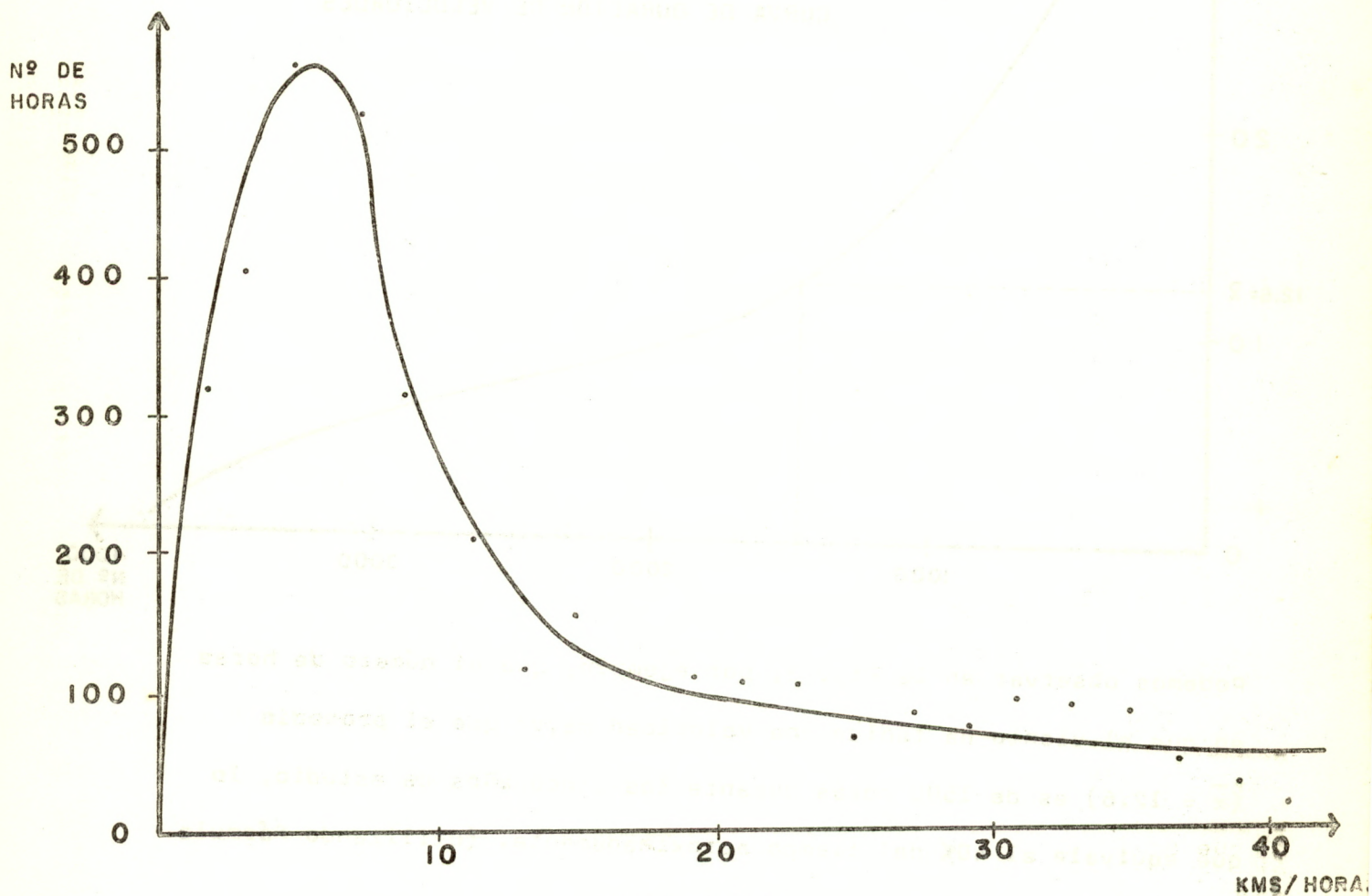
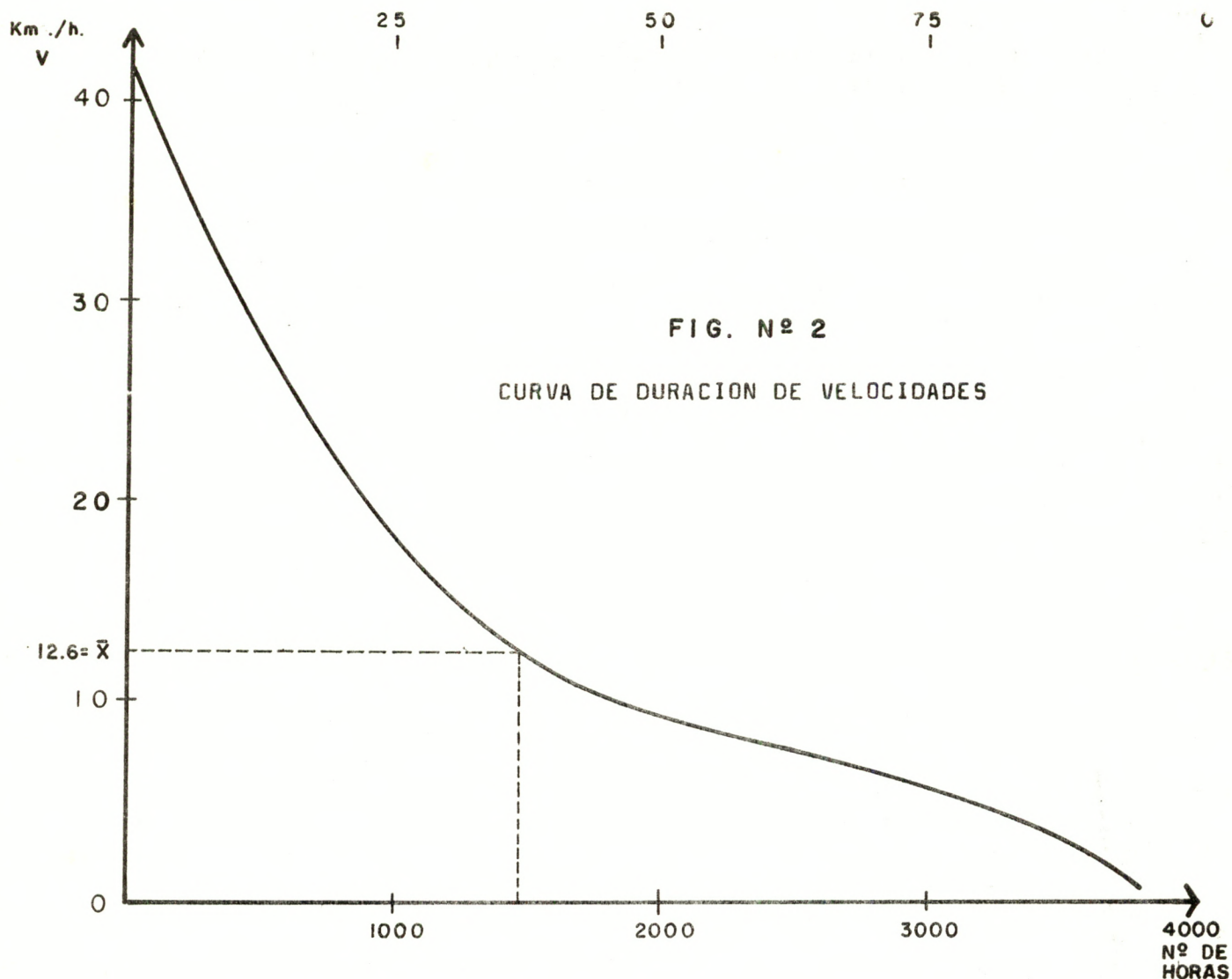


FIG. N° 1

La curva de duración de velocidades (ojiva descendente) se ilustra en la Fig. 2. Es un gráfico muy útil que indica el número de horas en que el viento tuvo una velocidad superior a los valores de cada ordenada.



Podemos observar en la Fig. 2, por ejemplo, que el número de horas en que el viento ha tenido una velocidad mayor que el promedio ($\bar{x} = 12.6$) es de 1500 horas durante los cinco años de estudio, lo que equivale al 40% del tiempo aproximadamente. (Utilizando fórmula 1.3 se obtiene 39%).

La Fig. 3 muestra la gráfica de velocidades horarias promedio para el mismo período. Notamos que entre las 12 y 21 horas, la velocidad del viento fue superior a los 10 Km/h y que alrededor de 7 horas superó los 13 Km/h.

La Fig. 4 representa el promedio de horas mensual en que el viento fue superior a los 10 Km/h en los últimos 5 años.

Los números en el eje de las X, a la par de cada mes, señalan las horas del día en que precisamente se mantuvo esa

marca.

Km/h. 30

distribución promedio horaria
de la velocidad del viento
durante el mes.

20

15

$\bar{x} = 12.6$

10

-5

01 02 03 04 05 06 07 08 09 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24

HORAS DEL DIA.

FIG. N° 3

Promedio de horas diarias en cada mes, con
vientos superiores a
los 10 Km/h.

FIG. N° 4

N° Horas

10

9

8

7

6

5

4

3

2

1

0

E F M A M J J A S O N D
10.21 10.21 12.21 12.20 14.19 15.19 15.19 15.19 14.19 14.19 15.19 15.20

La rosa porcentual de los vientos señala una marcada tendencia de vientos Norte-Sur, Sur-Norte, durante todo el mes. (Fig. 5)

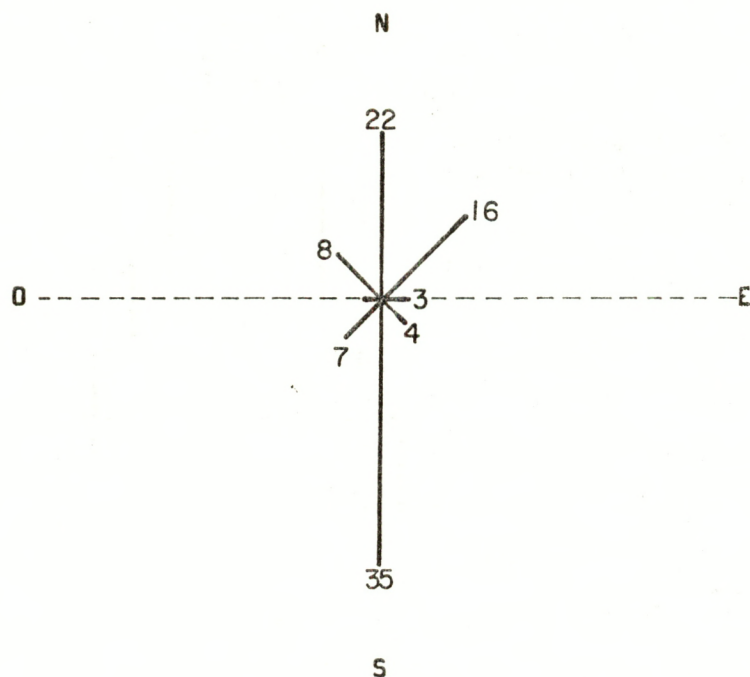


Fig. 5. ROSA PORCENTUAL DE VIENTOS

Los cuadros 4 y 5 resumen información sobre las velocidades medias horarias del viento para todos los meses y la predominancia del mismo en cada mes.

Tal como lo expresa la figura 4, los meses en que cabe esperar mayores velocidades del viento y más persistencia, son los primeros meses del año (Enero - Abril), durante todas las horas de la tarde.

1.6 El Ajuste Teórico de los datos

Encontrar una función teórica que se ajuste a la distribución de la variable en estudio es, por decir así, el logro más deseable en todo análisis estadístico. Su utilidad se hace sentir en la capacidad que se puede tener de simular su comportamiento y en la facilidad de conocer valores de probabilidad, de que la variable sobrepase, o esté por debajo, de umbrales prefijados.

La figura 6 compara las distribuciones Gamma y de Weibull con la distribución empírica del viento en el lugar. Se puede notar (para este caso) una tendencia del ajuste a mi nusvalorar el apuntamiento. Una de las causas que creemos puede influir en esta aparente no bondad es la utilización de promedios horarios de velocidad.

El Documento (OLADE N° 10), analiza datos de la estación EL GAVILLERO (México), para un mes, los cuales son cuarto-horarios. Este tipo de valores caracteriza mejor la distribución de un lugar y no permite la concentración ni estabilización del dato en la tendencia al promedio horario. Pues aún cuando el promedio general podría mantenerse, el valor mediano y el modal habrían de sufrir cambios, variando por consiguiente la distribución de la variable.

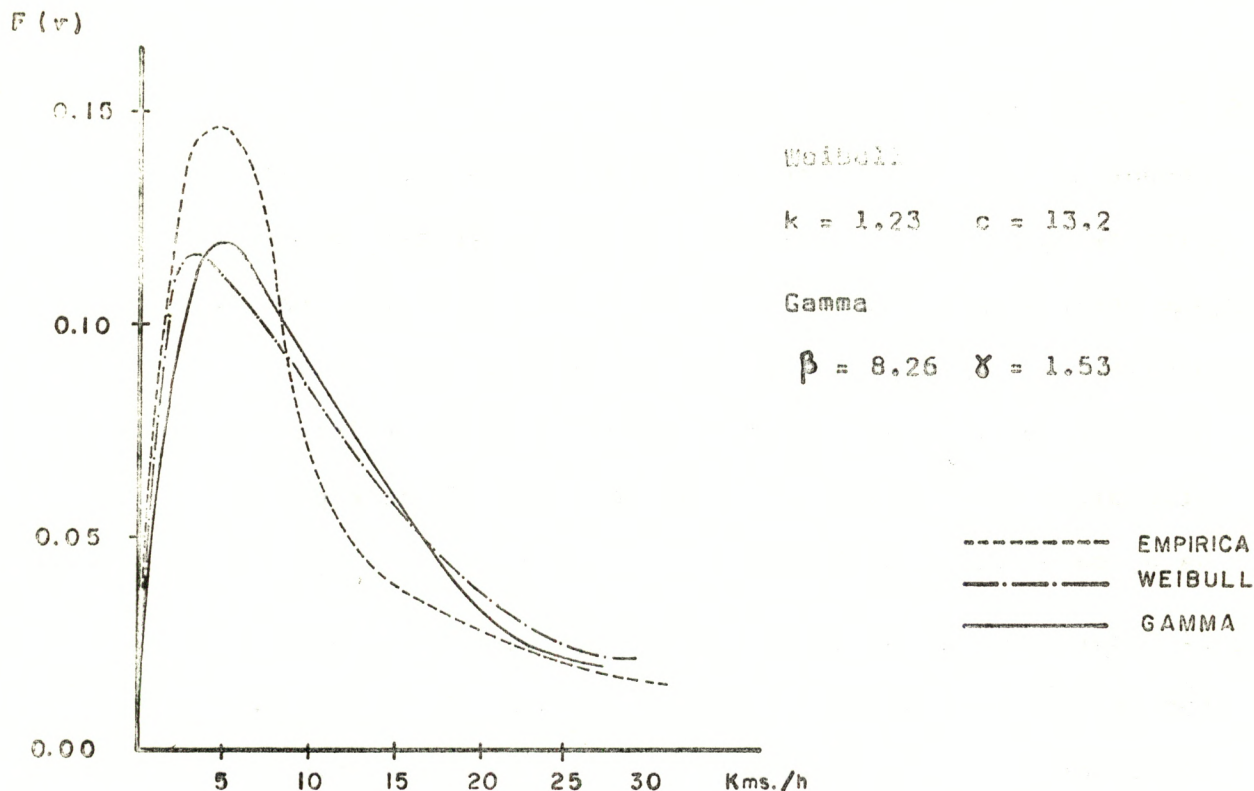


FIG. N° 6

Fig. 6. GRAFICO COMPARATIVO DE LAS DISTRIBUCIONES

Algunos autores (Coratis, 1977), han utilizado en sus estudios la distribución de Rayleigh, que no es más que un caso particular del modelo de Weibull cuando el parámetro de forma es fijo ($K = 2$). Sin embargo, es claro que si la distribución de Weibull es un modelo inadecuado, la distribución de Rayleigh tampoco habrá de mejorar el ajuste.

Con todo y las dificultades que la aplicación de un modelo puede acarrear, su utilidad es siempre estimable si recordamos que el estudio probabilístico del viento debe resumir su importancia en la caracterización de la energía y potencia en él contenida y su posible aprovechamiento.

1.7 Análisis Anual en la Estación LA UNION

La estación LA UNION está situada a 95 m.s.n.d.m. entre los $13^{\circ} 19.9'$ de latitud Norte y los $87^{\circ} 52.9'$ de longitud Oeste. Los Cuadros 6 y 7 resumen información sobre las velocidades medias horarias del viento y su rumbo predominante para todos los meses.

Del Cuadro N° 6 se puede extraer por ejemplo el número promedio de horas en que las velocidades medias horarias sobrepasaron los 10 Km/h. Eso se detalla en Cuadro N° 2.

MES	HORAS DEL DIA	Nº HORAS	MES	HORAS DEL DIA	Nº HORAS
ENE	08 - 22	14	JUL	12 - 20	8
FEB	08 - 22	14	AGO	14 - 20	6
MAR	08 - 21	13	SEP	14 - 19	5
ABR	08 - 21	13	OCT	14 - 18	4
MAY	12 - 20	8	NOV	10 - 19	9
JUN	13 - 20	7	DIC	9 - 20	11

CUADRO 2

Nótese por comparación con la figura 4, la cual se refiere a la estación APASTEPEQUE, que la estación La Unión presenta mayor número de horas sobrepasando la marca de 10 Km/h.

El Cuadro N° 3 compara los parámetros de la distribución de Weibull con los obtenidos en la serie de datos reales. Muchas relaciones (T. Anafusa, et al) son comprobables al

analizar dicho cuadro, por ejemplo el valor del parámetro de escala C es aproximadamente superior en un 12% a la media aritmética de la velocidad ($\bar{v}$ empírica), el parámetro de forma k varía durante todo el año en un intervalo bastante breve: $1.60 \leq k \leq 1.80$

CUADRO COMPARATIVO DE LOS PARAMETROS DE LA D. WEIBULL Y LA DISTRIBUCION DE DATOS REALES

	k	c	$\bar{v}$	s	$\bar{v}/s$	$\bar{v}$	σ	$\bar{v}/\sigma$	$\frac{\bar{v}}{c}$
ENE	1.75	14.13	12.24	7.83	0.64	12.60	7.40	0.59	0.866
FEB	1.79	14.50	12.90	8.03	0.62	12.90	7.43	0.58	0.890
MAR	1.80	13.11	12.10	7.50	0.62	11.65	6.72	0.58	0.923
ABR	1.71	11.62	10.96	7.24	0.66	10.36	6.30	0.61	0.943
MAY	1.75	9.99	8.90	6.05	0.68	8.90	5.26	0.59	0.891
JUN	1.77	8.21	7.07	4.63	0.66	7.30	4.28	0.59	0.861
JUL	1.73	9.22	8.15	5.44	0.67	8.22	4.88	0.59	0.884
AGO	1.70	8.53	7.31	4.91	0.67	7.51	4.60	0.60	0.857
SEP	1.62	7.61	6.66	4.72	0.71	6.82	4.32	0.63	0.875
OCT	1.69	7.73	6.40	4.24	0.66	6.90	4.21	0.61	0.828
NOV	1.60	9.59	7.73	5.53	0.72	8.59	5.49	0.64	0.806
DIC	1.71	11.31	9.21	6.00	0.65	10.08	6.08	0.56	0.814
			EMPIRICOS			TEORICOS			

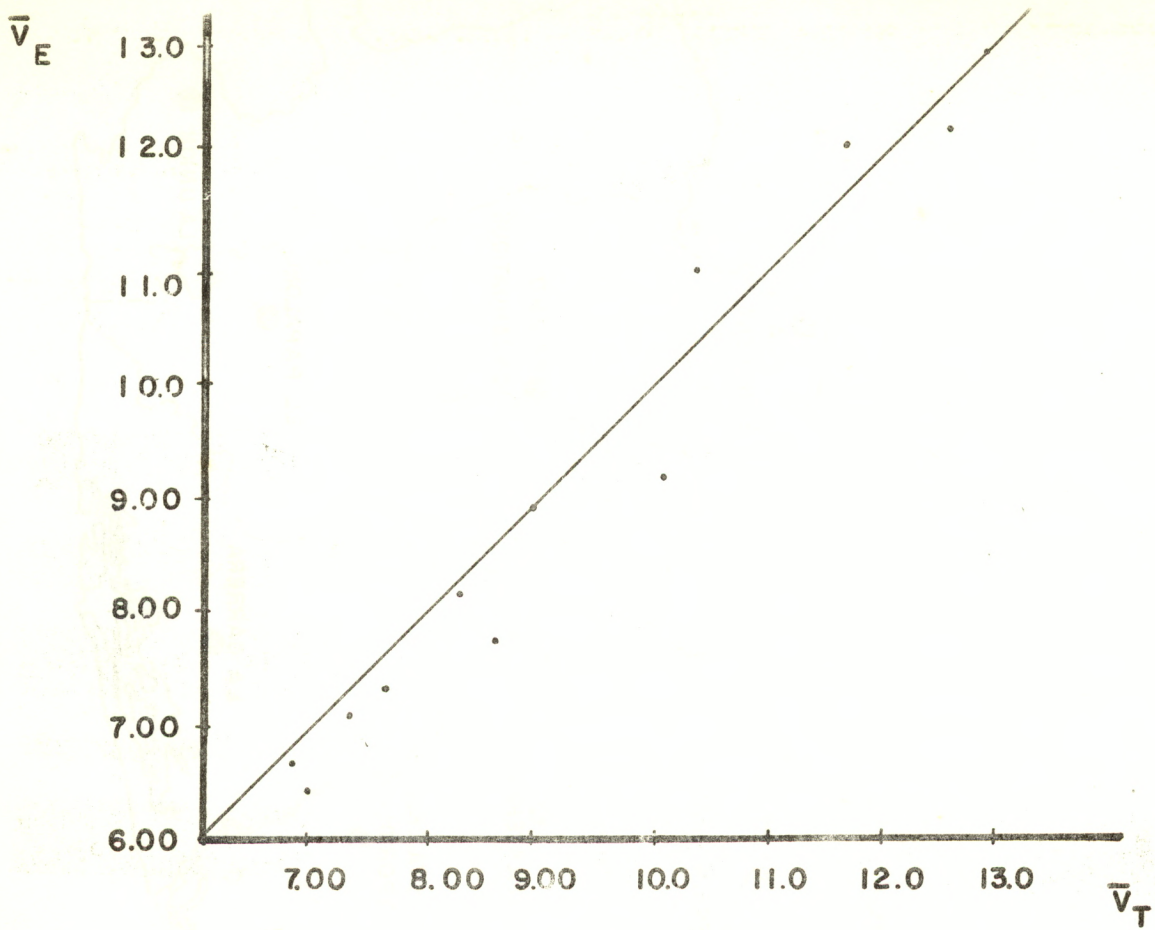


FIG. № 7

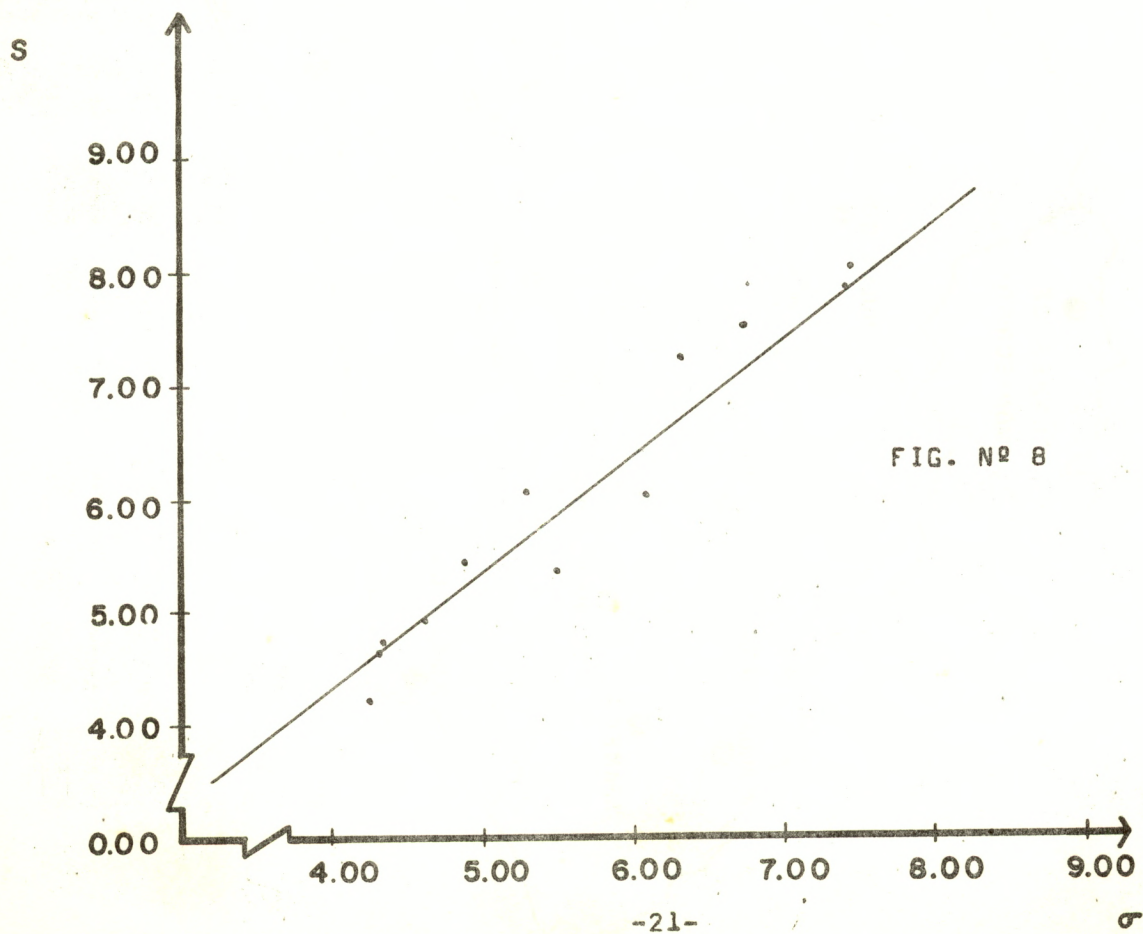


FIG. № 8

RED DE ESTACIONES METEOROLOGICAS EQUIPADAS CON ANEMOGRAFO EL SALVADOR-1981



La figura 7 compara las velocidades medias de los datos reales ($\bar{V}_E$) con los obtenidos teóricamente (V_T). Puede observarse que casi siempre el valor de $\bar{V}$ (teórico) es mayor que el $\bar{V}$ empírico (el valor medio de las diferencias absolutas es de : 0.38 Km/h); la figura 8 muestra que existe una marcada relación lineal entre la desviación standard teórica y la desviación standard de los datos reales.

Los cuadros 8 a 19 resumen información sobre velocidad y rumbo dominante del viento para 6 estaciones más de la red similar a la contenida en los cuadros 4 a 7 para las estaciones de Apastepeque y La Unión. Los meses que aparecen sin datos de velocidad significa que los promedios son inferiores a los 10 Km/h, o bien que la serie es muy discontinua o breve; tal el caso de la estación Cerro Verde.

El cuadro 20 es un resumen general para 12 estaciones del número de horas promedio diarias, durante las cuales la velocidad del viento fue superior a los 10 Km/hora. Es una información similar a la contenida en la figura 4 y cuadro 2, y tipifica cada mes durante los últimos 5 años. El cuadro 21 contiene los valores de las velocidades máximas horarias del viento, que se han observado en las mismas estaciones y en el mismo período.

1.8 Comentario

El presente trabajo ha pretendido describir: por un lado el método de utilización de la distribución de probabilidad de Weibull como modelo de ajuste a la distribución de la velocidad del viento, exponiendo el algoritmo de cálculo de sus parámetros de forma y escala y señalando las relaciones que se establecen entre los parámetros más importantes de las distribuciones teórica y real de los datos (Cuadro 3, fig. 7, fig. 8). Y por otro lado, presentar los resúmenes y gráficos necesarios para una mejor caracterización del comportamiento de la variable en el tiempo y en un determinado sitio de interés (figs. 1 a 5), con miras a su posible aprovechamiento como energía. Un proyecto de utilización de la energía y potencia disponible en el viento en un lugar específico deberá pasar antes por un análisis en este sentido. Las curvas de frecuencia de velocidad, de duración de velocidad y de duración de potencia son necesarias para el conocimiento de la distribución de la energía contnida en el viento.

Se sabe que la potencia disponible en el viento por una masa de aire a determinada velocidad atravesando una sección de área normal al flujo de aire viene dada por:

$$P = 1/2 \rho v^3 \quad (1-23)$$

donde:

ρ = es la densidad del aire (en unidades de masa sobre volumen), y

V = es la velocidad del viento (m/s, Km/h).

Esta expresión es suficiente para computar la potencia total del viento en un lugar; y es la tarea obligada a realizar en algún proyecto demostrativo o de utilización real de la energía del viento.

Muchas otras consideraciones hay que hacer por supuesto en este sentido, pero no representan escollos insalvables.

Es recomendable que las instituciones administradoras, esta tales o privadas, de la energía y los energéticos en el país comiencen a revisar las opciones de otras fuentes renovables de energía como lo son la luz solar directa y la energía eólica.

Proyectos, aún cuando sólo sean demostrativos, deberían planificarse en cooperación con agencias internacionales y proporcionarles un razonable apoyo para su consecución.

" ... La inconstancia de las opciones de energía proveniente del Sol en sus formas de: viento, caídas de agua, biomasa, luz solar directa; es regional y estacional, no es arbitraria ni política: por lo tanto su utilidad puede predecirse y planearse ..."

VELOCIDADES MEDIAS HORARIAS POR MES (Km/h)

Estación: APASTEPEQUE, Elevación 570 m.s.n.m.

(1975—1979)

mes Horas	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
00-01	8.5	7.9	6.9	6.4	5.7	6.3	6.4	6.4	5.6	5.6	7.4	7.7
01-02	8.3	8.1	6.3	6.1	5.4	5.5	7.0	6.4	5.6	5.9	7.4	7.8
02-03	8.5	7.7	6.4	6.0	5.1	5.3	5.6	6.4	5.8	6.1	7.5	7.6
03-04	8.3	9.7	6.6	5.7	5.2	5.7	6.8	6.4	5.6	6.4	7.8	8.0
04-05	8.3	8.4	6.3	5.5	4.6	6.0	6.9	6.6	5.8	6.4	7.8	7.7
05-06	8.1	8.3	6.1	5.7	4.7	6.3	6.7	6.6	5.5	6.6	7.9	8.0
06-07	8.4	8.2	5.7	5.5	4.8	6.0	6.6	6.3	5.6	6.3	8.0	8.1
07-08	8.4	8.5	5.9	6.1	5.0	5.7	6.3	5.8	5.2	6.2	7.7	7.8
08-09	8.8	9.6	7.2	7.1	5.4	5.4	6.4	5.5	5.3	5.1	7.8	8.1
09-10	10.3	10.4	8.4	7.9	6.0	5.4	6.4	5.5	5.3	6.5	8.3	9.1
10-11	11.2	10.6	9.1	8.9	7.2	4.3	6.2	5.3	5.3	6.6	8.4	9.4
11-12	11.1	10.9	10.5	10.8	8.9	6.0	5.4	5.1	5.6	6.6	8.1	9.2
12-13	11.5	11.4	13.0	14.3	12.5	7.7	5.8	5.7	7.8	7.8	8.2	9.1
13-14	12.0	13.5	18.7	21.5	18.0	9.7	7.1	7.7	10.6	9.6	8.7	9.0
14-15	14.2	17.2	25.3	29.6	23.4	12.2	9.0	10.3	13.5	12.6	11.1	11.0
15-16	16.7	21.8	29.0	30.9	26.7	14.4	8.4	12.8	15.4	14.7	14.3	13.7
16-17	18.9	23.9	30.0	30.0	25.2	15.1	10.9	7.0	15.2	14.7	14.6	16.2
17-18	18.4	22.6	26.9	25.7	21.9	13.9	10.1	12.6	12.7	13.0	12.8	15.6
18-19	16.1	23.3	22.0	20.2	17.8	11.8	9.3	10.3	10.8	10.7	11.0	13.5
19-20	13.7	15.3	17.3	15.0	15.9	9.5	7.8	8.5	9.0	8.6	9.1	11.2
20-21	11.4	12.8	12.6	10.8	10.1	8.1	6.7	7.3	7.2	7.1	8.2	9.3
21-22	10.0	10.5	9.3	8.6	7.8	7.0	6.2	8.2	6.5	7.2	7.5	8.4
22-23	8.9	9.7	7.7	7.6	6.6	6.3	6.4	6.2	5.7	6.4	7.2	9.0
23-24	8.9	8.2	7.5	7.1	6.0	6.2	6.6	6.0	6.0	6.1	7.4	7.8
	11.2	12.2	12.7	12.6	10.7	8.0	7.3	7.5	7.8	8.0	8.9	9.6

CUADRO 4

PORCENTAJES DE RUMBOS POR MES

Estación: APASTEPEQUE

(1973—1979)

MESES	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	CALMA
ENE	42	16	3	3	22	4	1	7	2
FEB	39	18	3	3	22	6	1	7	1
MAR	22	15	2	4	39	7	2	7	2
ABR	25	15	2	3	37	6	2	8	2
MAY	20	13	2	4	39	7	1	11	3
JUN	27	16	3	5	30	6	1	10	2
JUL	32	13	3	6	27	6	1	11	1
AGO	33	14	3	5	25	5	1	12	2
SEP	24	13	3	6	34	8	2	7	3
OCT	35	11	2	5	29	6	1	10	1
NOV	41	16	2	3	19	5	1	10	3
DIC	43	15	2	2	20	4	1	9	3
A N U A L	32	15	2	4	29	6	1	9	2

CUADRO 5

VELOCIDADES MEDIAS HORARIAS POR MES (Km/h)

Estación: LA UNION, Elevación 95 m.s.n.m.

(1975—1979)

mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Horas												
00-01	8.6	9.3	7.3	6.2	5.1	4.9	5.1	5.0	4.2	4.3	5.2	6.6
01-02	8.2	8.9	6.8	5.7	4.9	4.5	4.6	4.4	3.9	4.1	4.8	6.1
02-03	8.0	8.8	6.5	5.5	4.5	4.3	4.6	4.0	4.0	4.9	4.8	5.5
03-04	7.5	8.3	6.6	5.2	4.5	4.1	4.2	4.0	4.0	3.9	4.7	5.2
04-05	7.3	8.0	6.2	4.9	4.5	3.7	3.9	4.0	3.9	3.8	4.6	4.9
05-06	6.9	7.8	6.2	4.7	4.2	3.5	3.5	3.6	3.7	3.7	4.7	5.0
06-07	6.5	7.2	5.9	4.9	3.6	2.8	3.2	2.8	3.3	3.2	4.1	4.8
07-08	7.7	9.4	8.7	7.6	4.5	3.8	4.6	4.4	3.1	3.4	5.0	6.3
08-09	10.8	12.5	11.8	9.7	6.0	5.3	6.8	5.4	4.2	4.9	6.7	8.5
09-10	12.4	14.3	14.1	11.7	7.5	6.5	8.3	6.6	5.3	5.7	8.5	10.4
10-11	14.0	15.1	14.3	12.0	8.6	7.9	9.7	8.0	6.2	6.5	9.4	11.3
11-12	15.8	15.5	14.5	12.1	9.4	8.6	10.5	8.4	7.1	6.7	10.2	11.9
12-13	16.6	15.8	14.7	12.9	10.2	9.1	10.9	8.5	7.5	7.1	10.6	11.8
13-14	17.4	16.4	15.9	14.7	12.9	9.7	11.2	9.0	9.0	8.9	10.9	11.8
14-15	18.1	17.6	16.9	16.9	15.3	10.8	11.8	10.8	11.4	11.0	11.5	12.5
15-16	18.3	18.1	18.9	19.6	17.7	12.0	12.6	12.3	12.9	11.8	11.8	13.9
16-17	18.5	19.2	21.3	21.6	18.2	11.8	10.5	13.0	12.8	11.2	11.9	14.1
17-18	17.0	18.9	21.2	20.3	16.2	11.1	11.8	12.8	11.7	10.5	11.3	13.2
18-19	15.2	17.8	18.5	17.1	13.5	10.5	11.3	11.1	10.0	9.3	10.0	12.3
19-20	13.8	15.8	15.6	14.1	11.5	9.4	10.8	11.0	8.6	8.1	9.0	10.9
20-21	12.5	13.2	12.2	11.6	9.4	7.7	8.5	8.3	7.3	6.4	7.8	9.2
21-22	12.0	11.3	10.0	8.9	8.4	6.3	7.2	6.9	6.3	5.4	7.0	8.1
22-23	10.6	10.0	8.4	7.3	6.8	5.7	6.2	5.8	4.9	5.1	6.4	7.6
23-24	9.7	9.6	7.6	6.4	5.6	5.4	5.8	5.7	4.4	4.6	5.8	7.1
	12.2	12.9	12.1	10.9	8.9	7.0	7.8	7.3	6.6	6.4	7.8	9.1

CUADRO 6

PORCENTAJES DE RUMBOS POR MES

Estación: LA UNION

(1973 - 1979)

MESES	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	CALMA
ENE	8	27	36	6	9	10	2	1	1
FEB	8	29	26	7	14	12	2	1	1
MAR	4	16	23	7	24	20	3	2	1
ABR	5	17	19	6	24	23	3	2	1
MAY	3	17	11	8	28	25	4	3	1
JUN	4	20	15	9	20	22	3	5	2
JUL	4	24	26	9	14	16	2	3	2
AGO	4	18	20	12	18	21	3	3	1
SEP	4	14	12	9	26	24	5	4	2
OCT	7	16	13	12	22	22	3	3	2
NOV	6	23	20	10	18	18	2	2	1
DIC	8	28	28	7	13	12	1	2	1
A N U A L	5	21	21	9	19	19	3	2	1

CUADRO 7

VELOCIDADES MEDIAS HORARIAS POR MES (Km/h)

Estación: CERRO VERDE, Elevación 2030 m.s.n.m.

(1977—1979)

mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Horas												
00-01	24.4	20.2	17.6	11.4	12.5	18.5						
01-02	22.2	18.6	16.7	10.4	12.4	17.1						
02-03	22.6	18.9	16.5	10.5	12.5	17.4						
03-04	21.9	19.4	16.2	10.2	13.0	17.6						
04-05	22.2	19.1	11.7	10.3	13.1	17.6						
05-06	23.7	19.2	15.9	10.2	12.8	17.0						
06-07	23.4	19.5	15.5	8.3	12.2	16.6						
07-08	23.1	18.9	14.5	8.0	10.6	15.8						
08-09	22.0	17.5	13.8	8.0	9.9	15.2						
09-10	19.6	15.5	11.3	7.3	8.8	13.7						
10-11	16.6	13.6	10.5	7.0	8.1	12.7						
11-12	14.4	11.7	10.5	8.0	7.8	11.6						
12-13	14.0	11.7	10.9	8.4	8.2	10.8						
13-14	14.0	11.8	11.1	8.3	8.6	10.2						
14-15	15.5	12.3	11.3	9.1	8.9	10.2						
15-16	16.7	13.3	11.8	9.1	7.8	12.2						
16-17	18.9	13.7	13.5	10.0	8.4	11.4						
17-18	21.9	16.3	14.9	11.7	9.8	12.2						
18-19	24.6	19.4	16.5	12.7	11.5	13.8						
19-20	24.9	20.1	17.2	13.7	12.1	14.8						
20-21	26.0	21.2	17.8	13.9	14.0	15.5						
21-22	25.9	21.4	18.4	13.0	14.5	15.9						
22-23	25.7	20.6	18.2	12.7	14.8	17.4						
23-24	25.5	20.0	17.9	12.1	14.8	18.8						
	21.8	17.3	14.9	10.1	11.4	14.7						

CUADRO 8

PORCENTAJES DE RUMBOS POR MES

Estación: CERRO VERDE

(1977 - 1979)

MESES	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	CALMA
ENE	2	70	4	4	4	12	3	1	0
FEB	1	69	3	3	5	13	3	3	0
MAR	1	64	5	5	4	12	6	3	0
ABR	2	51	6	6	7	17	8	3	0
MAY	2	53	5	6	6	18	8	2	0
JUN	0	84	1	1	1	9	2	2	0
JUL	0	92	5	1	1	1	0	0	0
AGO	0	92	2	3	3	1	0	1	0
SEP	0	64	10	6	7	10	2	1	0
OCT	4	86	2	3	1	2	0	2	0
NOV	5	85	4	2	2	2	0	0	0
DIC	0	92	5	1	1	0	1	0	0
ANUAL	1	75	5	4	4	8	2	2	0

CUADRO 9

VELOCIDADES MEDIAS HORARIAS POR MES (Km/h)

Estación: SAN ANDRES, Elevación 460 m.s.n.m.

(1973—1979)

mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Horas												
00-01	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7							2.3
01-02	2.5	2.7	2.2	2.5	2.2							2.0
02-03	2.5	2.6	2.2	2.3	2.1							1.9
03-04	2.8	2.7	2.0	2.3	1.9							1.8
04-05	2.8	2.9	2.1	2.0	1.8							2.0
05-06	2.7	2.5	2.0	2.0	2.0							2.0
06-07	2.1	1.9	1.4	1.4	1.3							1.6
07-08	2.6	2.6	2.1	2.8	2.2							1.9
08-09	4.3	4.2	4.0	4.2	3.3							3.6
09-10	6.9	6.7	6.5	6.3	4.8							5.2
10-11	9.8	9.6	8.0	7.7	6.2							8.1
11-12	11.0	10.5	9.1	8.9	7.2							9.5
12-13	12.0	11.0	9.7	10.0	8.4							9.8
13-14	12.0	11.7	11.6	11.7	10.2							10.1
14-15	12.9	13.3	15.4	14.2	11.7							10.3
15-16	14.2	15.4	18.3	16.3	13.1							11.4
16-17	14.5	16.5	18.6	16.8	13.1							11.9
17-18	12.9	15.2	16.3	15.0	11.3							10.9
18-19	9.8	12.1	13.0	11.5	8.7							7.6
19-20	7.2	9.0	10.5	8.9	7.0							5.4
20-21	5.3	6.7	8.2	6.7	5.5							3.7
21-22	4.0	4.9	5.8	5.4	4.3							2.9
22-23	3.2	3.5	4.0	3.9	3.5							2.4
23-24	2.9	3.2	3.3	3.2	3.0							2.2
	6.8	7.2	7.4	7.0	5.7							5.4

CUADRO 10

PORCENTAJES DE RUMBOS POR MES

Estación: SAN ANDRES

(1973 - 1979)

MESES	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	CALMA
ENE	20	13	6	6	10	10	16	8	11
FEB	20	11	5	7	10	11	20	7	9
MAR	11	9	5	7	11	17	25	8	7
ABR	9	11	7	8	16	16	20	8	5
MAY	7	7	5	7	13	24	21	9	7
JUN	17	12	6	6	9	16	17	9	8
JUL	15	18	8	8	6	8	16	10	11
AGO	11	17	9	8	7	8	14	9	17
SEP	9	15	9	7	8	14	19	6	13
OCT	12	13	7	8	8	8	16	8	20
NOV	18	14	6	7	9	8	14	9	15
DIC	18	15	5	9	11	8	12	10	12
ANUAL	14	13	7	7	10	12	12	8	11

CUADRO 11

VELOCIDADES MEDIAS HORARIAS POR MES (Km/h)

Estación: LA GALERA , Elevación 1900 m.s.n.m.

(1974—1979)

mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Horas												
00-01	13.5	11.1	8.6	7.7			9.8	8.9		9.7	12.8	12.9
01-02	13.2	11.0	8.4	7.0			9.4	8.6		9.8	12.5	12.5
02-03	13.6	11.0	8.5	7.0			9.5	8.7		9.7	12.5	12.6
03-04	13.8	10.8	8.4	6.8			9.8	8.8		10.0	12.8	12.8
04-05	13.7	10.7	8.2	6.8			10.0	9.2		10.0	13.3	13.2
05-06	13.9	10.9	8.3	7.0			10.1	9.8		10.5	13.3	13.4
06-07	14.0	11.3	8.8	7.4			10.7	10.3		10.8	13.7	13.6
07-08	14.5	11.9	9.6	8.7			11.7	11.5		11.7	14.5	14.7
08-09	15.8	13.5	11.0	9.7			13.0	12.6		12.4	15.5	15.3
09-10	16.2	14.8	12.0	10.1			13.6	12.7		12.5	15.5	15.9
10-11	15.9	14.4	10.9	10.3			13.1	12.0		12.1	15.1	15.6
11-12	15.5	13.8	11.2	10.2			12.6	11.2		12.0	14.5	15.1
12-13	15.1	13.3	11.2	9.9			12.1	10.5		11.5	13.9	14.4
13-14	14.4	12.7	10.9	9.7			11.0	10.1		10.9	13.2	13.0
14-15	14.0	12.6	10.6	9.5			10.8	9.4		10.6	12.5	12.6
15-16	13.6	12.2	10.2	9.0			10.3	8.9		10.2	12.2	12.2
16-17	13.0	11.6	9.5	8.5			9.8	8.5		9.8	12.0	11.7
17-18	12.4	10.7	8.5	7.8			9.2	8.1		9.8	12.2	11.7
18-19	12.6	10.4	8.2	7.1			9.2	8.2		10.3	13.2	12.2
19-20	13.1	10.6	8.1	7.1			9.7	8.7		10.6	13.2	12.7
20-21	13.7	10.6	8.1	7.3			10.1	8.8		10.5	13.3	12.8
21-22	13.4	10.7	8.4	7.5			9.7	9.0		10.4	12.9	13.0
22-23	13.4	10.4	8.5	7.4			10.1	8.5		10.0	12.8	12.8
23-24	13.6	10.4	8.6	7.5			9.8	8.4		9.9	12.6	12.7
	14.0	11.7	9.4	8.2			10.6	9.7		10.6	13.3	13.3

CUADRO 12

PORCENTAJES DE RUMBOS POR MES

Estación: LA GALERA

(1974 - 1979)

MESES	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	CALMA
ENE	45	32	4	7	5	2	1	3	1
FEB	41	27	4	9	7	4	1	5	2
MAR	28	25	5	13	14	5	2	6	2
ABR	30	23	4	13	16	6	2	4	2
MAY	15	18	8	18	21	10	5	4	2
JUN	11	33	22	18	9	2	2	2	1
JUL	15	52	19	9	2	1	0	1	1
AGO	15	50	19	9	4	1	1	1	0
SEP	15	29	18	17	8	5	4	3	1
OCT	44	32	8	7	3	2	1	2	1
NOV	53	32	6	4	2	1	0	1	1
DIC	45	33	4	5	6	2	0	3	2
ANUAL	28	32	10	11	8	3	2	4	2

CUADRO 13

VELOCIDADES MEDIAS HORARIAS POR MES (Km/h)

Estación: PLANES DE MONTECRISTO, Elevación 1851 msnm. (1976—1979)

mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Horas												
00-01	12.9	12.6	9.4	8.3	6.4	8.1	13.2	12.0	7.1	9.8	13.4	14.1
01-02	12.5	11.9	9.0	7.7	6.3	7.8	12.7	11.5	6.7	10.0	12.9	14.2
02-03	12.7	11.6	9.3	7.6	5.7	7.7	12.0	11.2	6.8	10.1	12.8	14.5
03-04	13.0	11.7	9.1	7.8	5.7	6.1	11.4	10.8	6.8	9.7	12.8	14.1
04-05	12.6	12.5	9.4	7.4	5.9	7.3	11.4	10.6	6.7	9.8	13.1	14.0
05-06	12.6	13.1	9.9	7.6	5.8	7.2	11.3	10.3	7.2	9.7	13.4	13.9
06-07	13.1	13.0	10.0	7.6	6.0	7.6	11.6	10.8	8.1	10.0	13.6	13.4
07-08	13.3	13.6	10.3	6.8	5.8	7.2	11.5	11.1	8.2	9.9	13.0	12.8
08-09	13.6	14.1	11.1	7.7	6.6	8.2	14.2	13.5	8.5	11.6	14.5	16.7
09-10	14.8	15.5	12.2	9.7	8.3	9.0	14.7	10.4	9.1	12.9	15.9	17.9
10-11	15.9	16.3	13.0	11.1	8.9	9.6	14.1	14.0	9.6	13.7	16.6	17.5
11-12	16.4	16.1	13.2	11.3	9.2	9.6	13.6	13.1	9.5	12.2	16.2	17.4
12-13	17.2	16.4	12.9	11.3	9.0	9.2	8.6	11.7	9.1	12.7	16.1	17.1
13-14	16.7	15.5	12.2	11.3	8.9	8.6	12.4	10.6	9.0	12.5	19.2	16.5
14-15	16.9	15.5	12.5	11.3	8.9	8.2	11.7	9.8	8.0	11.1	14.6	15.8
15-16	15.3	14.9	12.7	11.5	8.8	7.8	11.7	9.5	7.6	10.1	13.9	14.6
16-17	14.6	14.6	12.2	10.9	8.5	7.7	11.7	9.7	7.5	9.8	13.7	14.0
17-18	14.5	14.0	11.5	10.1	7.9	7.2	11.7	10.6	7.1	9.9	13.4	14.1
18-19	13.9	13.3	12.2	10.1	7.6	7.3	12.1	10.9	6.7	10.2	13.3	13.8
19-20	14.0	12.9	10.9	9.9	7.6	8.3	13.1	11.4	7.2	10.8	13.9	14.2
20-21	14.0	12.8	10.4	9.3	7.4	9.4	14.8	12.1	7.7	11.0	14.2	15.0
21-22	14.1	12.8	9.8	9.2	7.1	8.9	14.4	12.7	7.9	11.5	14.5	14.7
22-23	13.6	12.8	9.3	8.7	7.6	8.9	14.4	12.3	8.0	11.5	13.9	15.0
23-24	13.9	12.3	9.4	9.4	6.7	8.4	13.6	11.9	7.4	11.0	13.4	14.3
	14.2	13.7	10.9	9.3	7.4	8.1	12.6	11.4	7.8	10.9	13.7	15.0

CUADRO 14

PORCENTAJES DE RUMBOS POR MES

Estación: PLANES DE MONTECRISTO

(1976 - 1979)

MESES	N	NE	E	SE	S	SW	N	NW	CALMA
ENE	6	31	12	6	8	6	3	27	1
FEB	6	7	20	8	1	5	19	33	1
MAR	8	16	10	15	8	4	8	30	1
ABR	5	5	13	23	5	3	8	36	2
MAY	6	15	12	14	13	13	5	20	2
JUN	8	21	14	9	18	11	1	17	1
JUL	4	17	22	13	12	14	3	15	0
AGO	3	20	18	10	24	10	2	12	1
SEP	12	16	12	8	8	19	3	20	2
OCT	11	28	11	12	10	9	2	15	2
NOV	4	30	14	26	10	8	1	7	0
DIC	2	15	9	8	21	9	9	26	1
ANUAL	6	18	14	13	12	9	5	22	1

CUADRO 15

VELOCIDADES MEDIAS HORARIAS POR MES (Km/h)

Estación: AHUACHAPAN Elevación 725 m.s.n.m.

(1975—1979)

mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Horas												
00-01	5.7	5.0	3.9	3.7							5.7	5.6
01-02	5.8	5.1	4.0	3.7							5.7	5.7
02-03	5.8	5.2	4.1	3.7							5.8	5.6
03-04	5.8	5.6	4.3	3.8							5.6	5.5
04-05	5.9	5.6	4.2	4.1							5.9	5.9
05-06	6.0	5.5	4.3	4.1							6.1	6.0
06-07	6.1	5.5	4.3	4.3							6.3	5.9
07-08	6.6	6.3	5.3	6.0							7.3	6.5
08-09	9.1	9.1	7.9	7.8							9.3	9.0
09-10	11.0	10.5	9.2	9.0							10.5	10.6
10-11	9.6	11.2	7.6	9.2							10.7	11.3
11-12	12.8	11.6	10.2	9.7							11.2	11.6
12-13	13.2	12.4	10.9	11.0							11.4	12.1
13-14	13.8	13.0	12.4	12.2							11.4	12.4
14-15	14.1	13.7	13.3	13.4							11.1	12.8
15-16	14.5	14.2	13.5	13.8							11.0	12.7
16-17	14.2	14.0	13.3	13.4							9.5	11.8
17-18	11.6	12.0	11.6	11.3							7.1	8.9
18-19	8.2	8.5	8.4	8.2							6.0	6.5
19-20	6.3	6.6	5.9	5.9							5.2	5.9
20-21	5.8	5.4	4.5	4.5							5.2	5.5
21-22	5.7	5.0	3.9	4.0							5.3	5.5
22-23	5.6	4.9	3.5	3.8							5.4	5.6
23-24	5.6	4.9	3.6	3.5							5.7	5.6
	8.8	8.4	7.3	7.2							7.6	8.1

CUADRO 16

PORCENTAJES DE RUMBOS POR MES

Estación: AHUACHAPAN

(1973 - 1979)

MESES	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	CALMA
ENE	5	37	27	1	4	6	15	2	3
FEB	4	37	21	1	5	8	18	3	3
MAR	3	23	13	2	6	14	31	5	3
ABR	4	27	15	1	4	13	28	4	4
MAY	4	18	13	2	5	14	34	6	4
JUN	4	31	22	3	3	7	21	6	3
JUL	4	36	31	4	2	3	14	4	2
AGO	4	34	29	5	3	3	16	4	2
SEP	4	25	23	3	2	10	23	5	5
OCT	4	36	23	2	2	4	21	4	4
NOV	5	44	25	1	3	3	14	3	2
DIC	4	43	26	2	3	4	14	2	2
ANUAL	4	33	22	2	4	7	21	4	3

CUADRO 17

VELOCIDADES MEDIAS HORARIAS POR MES (Km/h)

Estación: HACIENDA ASTORIA , Elevación 40 m.s.n.m. (1975—1979)

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Horas												
00-01	8.1	7.7	6.5	5.5	5.2	5.3	5.8	5.6	5.1	5.3	5.8	7.1
01-02	8.0	7.3	6.2	5.7	5.6	5.0	5.5	5.3	4.9	5.2	5.7	6.9
02-03	7.9	7.5	6.1	5.5	5.5	4.8	5.3	5.1	4.8	5.1	5.6	6.8
03-04	7.8	7.6	6.3	5.8	5.6	4.8	5.3	4.6	4.3	5.1	5.7	6.6
04-05	7.9	7.6	6.7	5.6	5.5	4.7	5.5	4.5	4.3	4.7	5.8	6.6
05-06	8.1	7.8	6.8	5.6	5.4	4.6	5.4	4.5	4.3	4.6	5.9	6.6
06-07	7.7	7.3	6.5	6.3	4.8	4.0	5.0	4.1	3.6	4.0	5.0	6.2
07-08	8.6	10.5	6.5	6.1	5.3	4.9	5.5	5.0	4.2	4.3	5.9	7.1
08-09	10.1	10.5	8.8	8.1	6.4	6.1	6.6	6.0	5.4	5.8	8.0	10.4
09-10	11.7	11.7	10.2	9.6	7.2	6.5	7.1	6.7	6.6	6.5	7.0	10.3
10-11	12.2	12.3	12.3	11.7	8.0	7.8	8.1	7.7	7.9	7.8	9.5	10.9
11-12	13.6	14.9	17.4	16.4	13.9	10.0	9.3	8.9	9.2	9.3	10.4	12.0
12-13	15.8	17.5	19.8	19.2	16.7	11.8	11.0	10.8	10.6	11.2	11.8	14.1
13-14	16.5	18.0	19.0	18.8	16.4	14.0	12.1	12.3	11.5	11.4	12.7	14.3
14-15	15.6	16.8	17.4	17.1	15.5	12.7	12.7	12.3	11.4	10.9	12.1	13.5
15-16	13.9	14.9	15.5	15.7	14.3	12.1	11.9	11.0	10.1	9.7	10.6	12.0
16-17	11.3	12.8	11.8	14.0	12.9	10.5	7.7	8.9	8.2	7.5	8.3	9.4
17-18	8.8	10.7	12.7	12.4	10.8	8.1	7.7	6.6	5.8	4.5	4.9	6.0
18-19	6.8	7.5	9.1	9.4	7.5	5.7	5.5	4.5	4.4	3.6	4.4	4.8
19-20	6.7	6.2	6.4	6.7	4.7	4.7	5.1	4.8	4.4	4.6	5.7	5.6
20-21	6.8	6.1	5.1	5.5	4.1	5.0	5.6	5.7	5.0	5.5	6.1	6.5
21-22	7.5	6.6	5.3	5.1	4.5	5.5	6.0	6.0	5.1	5.4	6.3	6.9
22-23	8.0	7.5	6.1	5.4	4.8	5.8	5.9	6.3	5.6	5.4	6.1	7.2
23-24	8.2	7.8	6.5	5.9	5.0	5.8	6.0	5.5	4.9	5.4	6.1	7.3
	9.9	10.2	9.8	9.5	8.2	7.1	7.2	6.8	6.3	6.4	7.3	8.5

CUADRO 18

PORCENTAJES DE RUMBOS POR MES

Estación: ASTORIA

(1975 - 1979)

MESES	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	CALMA
ENE	55	12	4	2	11	5	8	2	1
FEB	47	13	4	2	14	7	9	3	1
MAR	33	11	8	4	18	10	13	2	1
ABR	32	8	9	5	21	9	12	3	1
MAY	35	8	8	4	19	10	11	4	1
JUN	33	11	14	4	14	6	12	5	1
JUL	42	12	10	5	12	6	8	4	1
AGO	39	11	10	5	14	6	9	5	1
SEP	34	9	12	6	13	7	12	5	2
OCT	44	10	8	5	10	7	10	5	1
NOV	53	13	4	2	9	7	8	3	1
DIC	54	13	4	2	10	6	6	4	1
ANUAL	41	11	8	4	14	7	10	4	1

CUADRO 19

PROMEDIO DE HORAS DURANTE EL DIA Y PARA CADA MES
EN QUE EL VIENTO SUPERA LOS 10 Km/h

CERRO VERDE 1976-1979				LA GALERA 1973-1979		
	Desde hs	Hasta hs	Total horas	Desde hs	Hasta hs	Total horas
ENE	00	24	24	00	24	24
FEB	00	24	24	00	24	24
MAR	00	24	24	08	15	7
ABR	19	06	11	08	13	5
MAY	18	07	13			0
JUN	00	24	24			0
JUL	00	24	24	06	15	9
AGO	00	24	24	07	13	6
SEP	18	11	17			0
OCT	00	24	24	07	13	6
NOV	00	24	24	00	24	24
DIC	00	24	24	00	24	24

	LA UNION 1971-1979				APASTEPEQUE 1975-1979		
	Desde hs	Hasta hs	Total horas		Desde hs	Hasta hs	Total horas
ENE	08	22	14		10	21	11
FEB	08	22	14		10	21	11
MAR	08	21	13		12	21	9
ABR	08	21	13		12	20	8
MAY	12	20	8		12	20	8
JUN	13	20	7		14	19	5
JUL	12	20	8		15	19	4
AGO	14	20	6		15	19	4
SEP	14	19	5		14	19	5
OCT	14	18	4		14	19	5
NOV	10	19	9		15	19	4
DIC	9	20	11		15	20	5

CUADRO 20-a

PROMEDIO DE HORAS DURANTE EL DIA Y PARA CADA MES
EN QUE EL VIENTO SUPERA LOS 10 Km/h

ASTORIA				PAPALON		
	1970-1979			1977-1979		
	Desde	Hasta	Total	Desde	Hasta	Total
	hs	hs	horas	hs	hs	horas
ENE	09	17	8	12	19	7
FEB	09	18	9	11	19	8
MAR	10	18	8	11	19	8
ABR	10	18	8	12	19	7
MAY	11	17	6	12	18	6
JUN	12	17	5	14	18	4
JUL	12	16	4	12	17	5
AGO	13	16	3			0
SEP	12	15	3			0
OCT	12	15	3			0
NOV	12	15	3			0
DIC	10	16	6	13	17	4

AHUACHAPAN 1974-1979				LA CARRERA 1972-1979		
	Desde hs	hasta hs	Total horas	Desde hs	Hasta hs	Total horas
ENE	09	18	9	11	16	5
FEB	09	18	9	10	17	7
MAR	12	18	6	10	17	7
ABR	12	18	6	10	16	6
MAY	13	17	4	11	16	5
JUN			0	11	15	4
JUL			0	11	16	5
AGO			0	12	15	3
SEP			0			0
OCT			0			0
NOV	09	16	7	13	15	2
DIC	09	17	8	12	16	4

CUADRO 20-b

PROMEDIO DE HORAS DURANTE EL DIA Y PARA CADA MES
EN QUE EL VIENTO SUPERA LOS 10 Km/h

	SAN ANDRES 1971-1979			MONTECRISTO 1976-1979		
	Desde hs	Hasta hs	Total horas	Desde hs	Hasta hs	Total horas
ENE	11	18	7	00	24	24
FEB	11	18	7	00	24	24
MAR	13	20	7	00	24	24
ABR	12	19	7	00	24	24
MAY	13	18	5			0
JUN			0			0
JUL			0	00	24	24
AGO			0	00	24	24
SEP			0	00	24	24
OCT			0	00	24	24
NOV	13	18	5	00	24	24
DIC				00	24	24

	APANECA 1973-1979			NVA.CONCEPCION 1973-79		
	Desde hs	hasta hs	Total horas	Desde hs	Hasta hs	Total horas
ENE	11	16	5	11	19	8
FEB	09	16	7	11	19	8
MAR	09	16	7	12	19	7
ABR			0	15	19	4
MAY			0			0
JUN			0			0
JUL			0			0
AGO			0			0
SEP			0			0
OCT			0			0
NOV	08	13	5	11	17	6
DIC	09	15	6	11	18	7

VELOCIDADES MAXIMAS HORARIAS POR MES (Km/h)

(1975 - 1979)

Estación	mes											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
APASTEPEQUE	38	45	46	44	44	36	34	34	36	32	30	34
LA UNION	44	49	38	34	29	28	32	29	26	30	36	42
CERRO VERDE	(89)	68	(96)	84	41	50	54	52	49	64	88	41
SAN ANDRES	34	32	34	25	24	22	21	24	22	17	25	26
LA GALERA	42	39	41	36	24	25	30	27	26	31	41	45
PLANES DE MONTECRISTO	49	44	45	42	30	34	38	40	34	40	43	45
AHUACHAPAN	38	36	37	32	25	19	20	20	16	24	30	31
ASTORIA	28	34	33	32	30	26	24	23	31	20	22	26
PAPALON	33	31	41	35	26	29	26	23	24	21	24	23
LA CARRERA	34	42	30	30	30	22	27	22	23	26	39	22
APANECA	36	34	39	34	22	23	22	22	25	32	39	36
NUEVA CONCEPCION	40	46	38	35	22	21	17	23	20	24	40	32

CUADRO 21

B I B L I O G R A F I A

- T. HANAFUSA, T. FUJITANI and N. BANNO: Behavior of Winds in the Lowest 200 mt. in Central Tsukuba Science City. Papers in Meteorology and Geophysics. Vol. 31. Meteorological Research Institute. Tsukuba, Japón. Febrero 1981.
- O L A D E: Prospección, Evaluación y Caracterización de la Energía Eólica. Documento OLADE No. 10. Quito, Ecuador. 1980.
- HAHN y SHAPIRO: Statistical Models in Engineering. John Willey & Sons, Inc. New York. 1968.
- JOSEPH P. HENNESSEY, Jr.: A Comparison of the Weibull and Rayleigh Distribution for Estimating Wind Power Potential. Wind Engineering. Vol. 2 No. 3. Oregon. 1978.
- JUSTUS G. G. HARGRAVES and MIKHAIL: Reference Wind Speed Distributions and Height Profiles for Wind Turbine Design and Performance Evaluation Applications. GITA. Georgia. 1976.
- WILLIAM C. CLIFF: Generalized Wind Characteristics and Their Effect on Wind Turbine Output. Wind Technology Journal. Vol. 2. U.S.A. 1978.
- DENIS HAYES: La Perspectiva Solar. La Tercera Transición. Agencia de Comunicación Internacional. U.S.A. 1977