

## **LA INFLUENCIA DEL RELIEVE EN LA DISPONIBILIDAD DE ENERGÍA EOLICA EN EL VALLE CENTRAL DE CATAMARCA - ARGENTINA**

*Sequi, Juan R.<sup>(1)</sup>; Herrera, Rafael<sup>(2)</sup>; Gómez, Ulises<sup>(2)</sup>; Foresi, Pedro<sup>(2)</sup>*

<sup>(1)</sup> Cátedra de Maquinaria Agrícola; Fac. de Ciencias Agrarias - UNCa; Av. Belgrano y Mtro. Quiroga - CP 4700 – Catamarca; Tel-Fax: (03833) 430504; Email: sequijr@yahoo.com.ar

<sup>(2)</sup> Subsecretaría de Ciencia y Tecnología – Ministerio de Educación, Cultura, Ciencia y Tecnología; Gobierno de la Pcia. de Catamarca; República 838 – CP 4700 - Catamarca; Te: (03833) 437585.

## **THE INFLUENCE OF MOUNTAINOUS TOPOGRAPHY ON THE AVAILABILITY OF WIND POWER IN THE CENTRAL VALLEY OF CATAMARCA - ARGENTINA**

### **SUMMARY**

Not all regions have winds in sufficient quantity and quality to be used in a profitable and competitive with traditional energy sources. The movement of air masses depends crucially on the difference between the points of maximum and minimum atmospheric pressure, which in turn are influenced by air temperature. For this reason, coastal areas usually have good winds, by the temperature and pressure difference between sea and land. The wind also varies significantly with height above sea level. At higher altitudes the wind speed. Mountain regions, as Catamarca, usually related to good availability, but requires both a more detailed study, precisely because of the many channels of circulation are established following the windings of the field. The paper shows the different availability of wind energy product of wind speed variations according to the topography of the land. It also shows the variability in wind direction as the degree of roughness and obstacles presented by the surface of the region concerned. We conclude that in the mountainous regions, as Catamarca, the real availability of wind and the position of the turbines (depending on the prevailing direction), must arise from particularized studies. It is very difficult trying to extrapolate the values due to the significant variations that occur over short distances.

**KEY WORD:** Energy, Eolic, Catamarca, Argentina

### **RESUMEN**

No todas las regiones presentan vientos en cantidad y calidad suficiente como para ser utilizado en forma rentable y competitiva respecto de las energías tradicionales. El movimiento de las masas de aire depende fundamentalmente de la diferencia entre los puntos de máxima y mínima presión atmosféricas, las cuales a su vez están influenciadas por la temperatura del aire. Por esta razón, las zonas costeras casi siempre presentan buenos vientos, por la diferencia de temperatura y presión entre el mar y la tierra. El viento también varía notablemente con la altura sobre el nivel del mar. A mayor altitud mayor velocidad del viento. Las regiones montañosas, como es el caso de nuestra

provincia, por lo general se relacionan con buenas disponibilidades, pero exige simultáneamente un estudio mas pormenorizado, precisamente por los numerosos canales de circulación que se establecen siguiendo las sinuosidades del terreno. En el trabajo destacan las diferentes disponibilidades de energía eólica producto de las variaciones de velocidad que sufre el viento según la característica dominante del relieve en los sitios donde se instalan las estaciones de registro. Se destaca también la variabilidad en la dirección del viento según la mayor o menor rugosidad y obstáculos que presente la superficie de la región considerada. Se concluye que en las regiones montañosas, como es el caso de la Provincia de Catamarca, la definición de la verdadera disponibilidad de viento y la posición de los aerogeneradores (según la dirección predominante), debe surgir de estudios particularizados. Es muy difícil pretender extrapolar los valores en razón de las importantes variaciones que se manifiestan en cortas distancias.

**PALABRAS CLAVES:** Energía, Eólica, Catamarca, Argentina

## **INTRODUCCIÓN**

Se conoce con el nombre de “energía eólica” a la energía cinética contenida en las masas de aire en movimiento. Esta puede ser aprovechada en forma directa como energía mecánica para, por ejemplo, el bombeo de agua (molino americano) o puede transformarse en energía eléctrica para satisfacer los diferentes consumos en forma individual o alimentando las redes eléctricas tradicionales del sistema interconectado. Todo depende de la potencia que pueda generarse, cuando se intercepta estas masas de aire con las denominadas turbinas, máquinas o generadores eólicos.

En los últimos 15 años, se registró un notable aumento en el interés esta fuente de energía renovable para su aprovechamiento a pequeña, mediana y gran escala. Países como Alemania, Holanda y España en Europa y los Estados Unidos, no solo han multiplicado significativamente su potencia instalada sino que además, han mostrado un avance sustantivo en el desarrollo tecnológico de las máquinas y equipos generadores de energía.

Sin embargo, no todas las regiones presentan vientos en cantidad y calidad suficiente como para ser utilizado en forma rentable y competitiva respecto de las energías tradicionales. El movimiento de las masas de aire depende fundamentalmente de la diferencia de potencial existente entre los puntos de máxima y mínima presión atmosféricas, las cuales también están influenciadas por la temperatura del aire. Por esta razón, las zonas costeras casi siempre presentan buenos vientos, por la diferencia de temperatura y presión entre el mar y la tierra. En nuestro país, estas condiciones atmosféricas presentan un gran contraste en el sur patagónico. De allí el gran potencial energético que ya está siendo aprovechado con la instalación de granjas o parques eólicos.

El viento también varía notablemente con la altura sobre el nivel del mar. A mayor altitud mayor velocidad del viento. Las regiones montañosas, como es el caso de nuestra provincia, por lo general se relacionan con buenas disponibilidades, pero exige simultáneamente un estudio mas pormenorizado, precisamente por los numerosos canales de circulación que se establecen siguiendo las

sinuosidades del terreno. Con este objetivo, a partir del año 2001 se comenzó a medir y cuantificar la disponibilidad de energía eólica en la región central de la provincia de Catamarca, motivada por la presencia de dos importantes cordones montañosos que delimitan el valle central y que corren en dirección norte-sur, formando un relieve intrincado que puede favorecer o no la circulación del viento.

Los resultados obtenidos confirman una notable variación cuando se analiza la velocidad media del viento en el Valle Central de Catamarca, ya sea en extremo norte del Valle (región conocida como subcuenca del río Los Puestos), mas precisamente en las localidades de Los Varela y Colpes (Sequi, J.; Gómez, U.; Herrera, R.; 2004); en los cordones montañosos del Ambato (Sequi, J. R. et al 2006) y del El Alto (Sequi, J.; Gómez, U.; Herrera, R.; 2008) o en el valle propiamente dicho situado mas hacia el extremo sur (Sequi, J. R. et al 2008).

En todos los casos el relieve juega un rol muy importante en la disponibilidad energética, ya sea debido a estrechamientos, a corredores particulares como ocurre con el denominado “Cañón de Paclín” (Sequi, J. R. et al 2009) o por la altitud sobre el nivel del mar.

En el trabajo destacan las diferentes disponibilidades de energía eólica producto de las variaciones de velocidad que sufre el viento según la característica dominante del relieve en los sitios donde se instalan las estaciones de registro.

Se destaca también la variabilidad en la dirección del viento según la mayor o menor rugosidad y obstáculos que presente la superficie de la región considerada.

Se concluye que en las regiones montañosas, como es el caso de la Provincia de Catamarca, la definición de la verdadera disponibilidad de viento y la posición de los aerogeneradores, (según la dirección predominante), debe surgir de estudios particularizados. Es muy difícil pretender extrapolar los valores en razón de las importantes variaciones que se manifiestan en cortas distancias.

## **MATERIALES Y METODO**

Los registros de viento considerados en este trabajo fueron obtenidos de estaciones ubicadas en el área correspondiente a la subcuenca del Río Los Puestos, Departamento Ambato, que se extiende entre los paralelos 27°54' y 28°03' de Latitud Sur y los meridianos 65°45' y 65°55' de Longitud Oeste, en la cima de las Sierras de Ancasti, Departamento Ancasti y en La Colonia del Valle, sobre la ruta 38, a 25 Km de la capital provincial y en el extremo sur de la provincia.

En cordón montañoso del Ambato conforma un valle intermontano longitudinal, con orientación norte-sur, delimitado por las cumbres de la Sierra de Humaya al Oeste; las de Balcozna-Lampazo al Este y la divisoria que se constituye en los Altos de Singuil por el Norte. La cartografía planialtimétrica de la región, define una altura sobre el nivel del mar que varía entre 1.040 m hacia su límite Sur y los 2.278 m al Noroeste sobre la Sierra de Humaya. La temperatura media anual es de 17 °C, según datos inéditos proporcionados por la cátedra de Climatología y Fenología Agrícola de la Facultad de Ciencias Agrarias (UNCa), registrados en la Estación de El Bolsón, localidad ubicada dentro del área considerada.

Las estaciones de registro se instalaron, tanto en el valle, como sobre las sierras de Humaya. En el primer caso se localizaron en la localidad de Colpes, en las coordenadas: 28°03'48" Latitud Sur y

65°49'00" Longitud Oeste – 990 msnm y en Los Varela, situada en las coordenadas: 27°56'54" Latitud Sur y 65°52'06" Longitud Oeste y 1.105 msnm, localidad ubicada a solo 15 Km. al norte de Colpes.

Las Sierras de Humaya forman parte de un grupo de sierras localizadas al norte del paralelo de 28° de latitud Sur, orientadas en dirección norte-sur y situadas entre los dos cordones principales que limitan el Valle Central: las sierras de Alto-Ancasti y Ambato-Manchao. La estación se instaló en la cumbre, sobre los 27° 56' 11" Latitud sur y 65° 56' 46" de Longitud Oeste, y a 1970 msnm.



**Figura N° 1:** Vista satelital del gran valle central y la localización de las estaciones anemométricas: Colonia del Valle (Dpto. Capayán); Los Varela; Colpes y Humaya (Dpto. Ambato) y La Bebida (Dpto. Ancasti) – Catamarca - Argentina

El cordón montañoso de El Alto – Ancasti es, junto con el Ambato-Manchao, uno de los dos cordones principales que limitan el Valle Central de la provincia. Tiene dirección predominante norte-sur, con una pendiente abrupta en su ladera occidental, enfrentada a la Región Centro y una pendiente suave en su orientación este. La sierra de Ancasti propiamente dicha se extiende con rumbo submeridional en el sureste de la provincia de Catamarca, entre los paralelos de 28° y 29° 45' de latitud sur y es atravesada por el meridiano de 65° 30' de longitud oeste (Navarro 1994). El estudio del viento se realizó a partir de datos de velocidad registrados en el paraje “La Bebida”, ubicada sobre la cima de las Sierras de Ancasti, a una altura de 1487 metros sobre el nivel del mar y localizada geográficamente a 28° 32' 27” de Latitud Sur y 65° 36' 42” de Longitud Oeste.

La última estación se ubicó en el Campo Experimental de la Facultad de Ciencias Agrarias, situado en la Colonia del Valle, en las coordenadas: 28°39'11" Latitud Sur y 65°51'26" Longitud Oeste, a una altitud de 450 m/snm.

Como se observa en la Figura N° 1, las estaciones de Los Varela, Colpes y Humaya, se encuentran a corta distancia unas de otra. Tampoco se encuentra muy alejada La Bebida, pero sobre otro cordón

montañoso. La diferencia fundamental en cuanto a disponibilidad de viento está en las condiciones particulares del relieve en cada uno de estos asentamientos.

Las estaciones anemométricas instaladas son marca BAPT, modelo EVD-1B, con sensor de velocidad modelo SV-1, de tres copelas troncocónicas, de 50 mm de diámetro, con vértice semiesférico y  $\pm 0.2$  m/s o 2 % de exactitud y sensor de dirección de viento modelo SD-1, que registra según las 16 direcciones establecidas en la rosa de los vientos.

Los datos de velocidad media horaria fueron procesados estadísticamente agrupando los valores en rangos de 1 m/s de amplitud, determinándose para cada mes completo de medición, sin datos faltantes la frecuencia de ocurrencia de cada rango de velocidad. Posteriormente los histogramas fueron ajustados matemáticamente con la función de distribución teórica de Weibull II (Mattio y Ponce, 1998), cuya expresión es:

$$f(V) = \frac{K}{C} \left[ \frac{V}{C} \right]^{K-1} \text{Exp} \left[ - \left( \frac{V}{C} \right)^K \right] \quad \text{siendo} \quad K = \left[ \frac{\sigma}{\mu} \right]^{-1,086} \quad C = \frac{\mu}{\Gamma \left[ 1 + \frac{1}{K} \right]}$$

**K** = parámetro de forma

**$\sigma$**  = Desv. Estándar

**$\Gamma$**  = Función Gamma.

**C** = parámetro de escala

**$\mu$**  = Velocidad media del período considerado

La energía teórica máxima o potencia meteorológica por unidad de tiempo y de área, (Área = 1m<sup>2</sup>) del aire en movimiento se calculó a partir de los datos reales aplicando la expresión:

$$P_m = \frac{1}{2} \delta V^3$$

**P<sub>m</sub>** = Potencia meteorológica (W/m<sup>2</sup>)

**$\delta$**  = Densidad del aire (Kg/m<sup>3</sup>)

**V** = Velocidad del flujo de aire (m/s)

También podemos calcular la distribución de energía eólica mensual a partir de la función de densidad de probabilidad (f(v)), cuya expresión es:

$$Pm = \frac{1}{2} \delta A \int_0^{\infty} V^3 f(v) dv$$

Los sensores se ubicaron a 10 metros de altura desde el nivel de piso, siguiendo las normas de la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

A los fines del estudio, el año se dividió en las cuatro estaciones tomando como otoño a los meses de abril, mayo y junio; invierno a los meses de julio, agosto y septiembre; la primavera concentra los meses de octubre, noviembre y diciembre y el verano se integra con los meses de enero, febrero y marzo.

## RESULTADOS Y DISCUSION

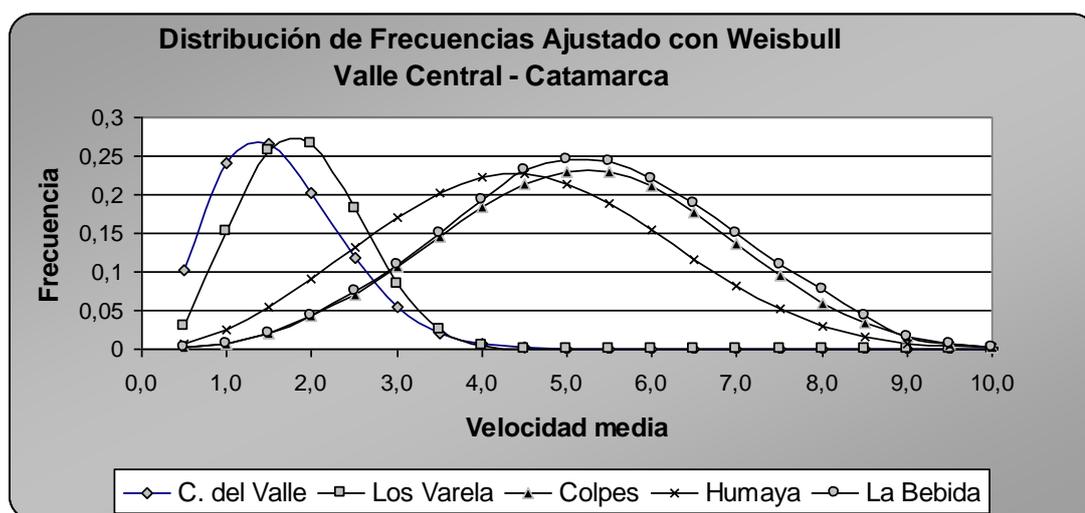
El cuadro N° 1 muestra los valores de velocidad media de viento mensual, estacional y anual, para las cinco (5) localizaciones consideradas.- Los Varela y la Colonia del Valle registran velocidades medias normales para el valle central, en el orden de los 3 ms<sup>-1</sup>, aún cuando hay una notable diferencia de altura sobre el nivel del mar (1105 m vs. 450 m). En el caso de Los Varela se trata de un valle muy controlado por los cordones que lo rodean, lo cual evita que el viento tome velocidad. La Colonia se ubica en la parte más ancha del Valle Central y los cordones no ejercen tanta influencia.

La distancia que separa a Colpes de Los Varela es solo de 15 km, dentro del mismo valle y la diferencia de altura sobre el nivel del mar no es significativa (990 m vs. 1105 m), por lo cual deberían registrar velocidades similares. Sin embargo en Colpes, debido a un estrechamiento del valle que corre entre los cordones de las sierras de Humaya y las de Balcozna-Lampazo, se produce un efecto Venturi, que aumenta la velocidad media anual en un 57 % con respecto a Los Varela (3,18 ms<sup>-1</sup> vs. 5,18 ms<sup>-1</sup>)

Meses Estación	Velocidad media (ms <sup>-1</sup> ) Medido a 10 m				
	Colpes	Los Varela	Humaya	La Bebida	Colonia del Valle
<b>Enero</b>	5,24	3,12	4,63	5,68	3,03
<b>Febrero</b>	4,89	3,05	4,2	6,09	3,42
<b>Marzo</b>	5,36	3,06	3,74	6,29	2,40
<b>Verano</b>	<b>5,16</b>	<b>3,08</b>	<b>4,19</b>	<b>6,02</b>	<b>2,95</b>
<b>Abril</b>	5,37	3,58	4,14	5,85	2,58
<b>Mayo</b>	5,53	3,63	4,47	5,41	2,19
<b>Junio</b>	5,25	3,22	4,57	5,24	2,10
<b>Otoño</b>	<b>5,39</b>	<b>3,29</b>	<b>4,41</b>	<b>5,5</b>	<b>2,29</b>
<b>Julio</b>	5,35	3,23	4,32	5,1	2,30
<b>Agosto</b>	5,2	3,18	4,84	4,98	2,42
<b>Septiembre</b>	5,12	3,44	4,9	5,7	2,86
<b>Invierno</b>	<b>5,23</b>	<b>3,48</b>	<b>4,67</b>	<b>5,25</b>	<b>2,53</b>
<b>Octubre</b>	4,84	3,5	4,86	6,18	3,22
<b>Noviembre</b>	5,35	3,3	4,9	6,56	3,73
<b>Diciembre</b>	4,67	3,3	5,68	6,82	2,89
<b>Verano</b>	<b>4,94</b>	<b>3,37</b>	<b>5,11</b>	<b>6,52</b>	<b>3,28</b>
<b>Total Período</b>	<b>5,18</b>	<b>3,3</b>	<b>4,59</b>	<b>5,82</b>	<b>2,79</b>

Tabla N° 1: Velocidad media mensual, estacional y anual, registrada a 10 m sobre el nivel de piso para Colpes, Los Varela y Humaya (Dpto. Ambato); La Bebida (Dpto. Ancasti) y Colonia del Valle (Dpto. Capayán).

Si consideramos igualmente la localización geográfica de Los Varela y Humaya, vemos que prácticamente están situadas sobre la misma coordenada de latitud sur (27°56'54" vs. 27°56'11"), sin embargo la diferencia significativa de altura sobre el nivel del mar (1970 msnm vs. 1.105 msnm) y el menor grado de rugosidad de la cima serrana, aumenta la velocidad media anual en un 44 % (3,18 ms<sup>-1</sup> vs. 4,59 ms<sup>-1</sup>).



**Figura N° 2:** Distribución de la frecuencia relativa de velocidad de viento, aplicando el modelo probabilístico de Weibull II, a los datos registrados en la Colonia del Valle, Los Varela, Colpes, Humaya y La Bebida – Valle Central de Catamarca – Catamarca.

La Bebida es la que presenta una velocidad media anual mayor (5,82 ms<sup>-1</sup>), similar a Colpes (5,18 ms<sup>-1</sup>) que se encuentra a menor altura sobre el nivel del mar.- Incluso tiene mayor velocidad que Humaya (4,59 vs. 5,18 ms<sup>-1</sup>) aún cuando ésta última se sitúa a mayor altura. Esto se debe a la mayor interferencia que tiene el viento en su recorrido por el sinuoso relieve de las sierras de Humaya, en cambio La Bebida se corresponde con una meseta de altura. Esto se puede observar más claramente en la Figura N° 2, donde la distribución de las frecuencias de velocidad de viento ajustó con la función de distribución teórica de Weibull II.

<i>Energía Meteorológica [Kwh/m<sup>2</sup>]</i>					
Meses	Los Varela	Colpes	Humaya	La Bebida	Colonia del Valle
<b>Enero</b>	41,89	61,62	51,40	114,12	21,07
<b>Febrero</b>	36,44	80,14	35,23	120,30	23,12
<b>Marzo</b>	40,10	61,47	31,38	148,31	10,83
<b>Abril</b>	40,63	73,42	39,19	117,45	14,05
<b>Mayo</b>	44,86	62,42	91,88	98,63	22,80
<b>Junio</b>	46,17	86,47	88,70	97,77	5,39
<b>Julio</b>	45,84	83,92	64,88	81,19	8,85

<b>Agosto</b>	52,09	83,89	70,13	70,18	9,43
<b>Septiembre</b>	45,53	71,25	65,31	114,91	17,38
<b>Octubre</b>	44,26	87,13	67,48	139,70	22,74
<b>Noviembre</b>	49,77	74,99	59,64	180,05	31,49
<b>Diciembre</b>	39,62	72,94	96,90	197,77	23,79
<b>Total Anual</b>	<b>527,20</b>	<b>1.169,55</b>	<b>990,63</b>	<b>1.832,83</b>	<b>246,77</b>

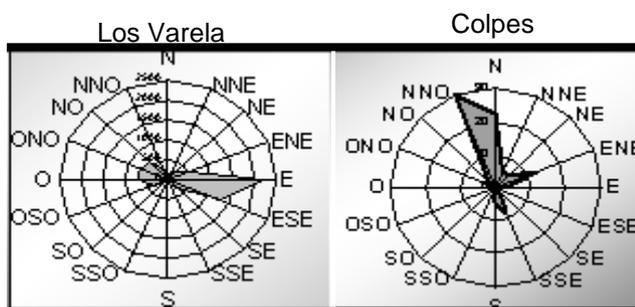
La tabla N° 2 muestra los valores de energía meteorológica mensuales y anual para las distintas localizaciones. Si tenemos presente que la energía del viento está en relación directa con el cuadrado de la velocidad, es claro que en Colpes se dispone de una cantidad similar de energía que en La Bebida, a pesar de las diferencias sustanciales de altura sobre el nivel del mar.

También se puede analizar la dirección del viento según las 16 direcciones típicas de la rosa de los vientos. Se tomaron las direcciones anuales predominantes para cada una de las localizaciones estudiadas. Es notable cómo el viento tiene direcciones caracterizadas según la localización, debido claramente a la fuerte interferencia del relieve. Humaya y La Bebida, por estar a una altura considerable, mantienen la dirección típica de la región (NE), al igual que la Colonia del Valle (Figura N° 3).



**Figura N° 3:** Distribución de la frecuencia (ocurrencia) de dirección de viento según la rosa de los vientos, para cada una de las localizaciones: Humaya, La Bebida y la Colonia del Valle. Catamarca - Argentina

En cambio Los Varela y Colpes tienen la dirección impuesta por los cordones montañosos que rodean al valle (Figura N° 4).



**Figura N° 4:** Distribución de la frecuencia (ocurrencia) de dirección de viento según la rosa de los vientos, para Los Varela y Colpes. Catamarca - Argentina

## **CONCLUSIONES**

El relieve es un factor importante que influye tanto en la velocidad como en la dirección del viento. En las regiones montañosas el viento se “encajona” entre las laderas de las serranías originándose corredores de viento particularizados, que definen la real potencialidad energética, limitada específicamente a ese espacio geográfico.- El ensanchamiento o estrechez del valle, modifica tales valores haciendo difícil transpolar los datos, aún en cortos espacios. Catamarca, por tener un 75 % de su superficie montañosa, requiere un trabajo minucioso de mediciones, a fin de no cometer errores de apreciación en cuanto a la potencialidad del viento. Como lo demuestran los registros de Humaya y La Bebida, las cumbres serranas disponen de vientos continuos, con velocidades interesantes para su aprovechamiento en la generación de energía. Los avances tecnológicos en materia de aerogeneradores aumentan las perspectivas futuras para hacer uso de este tipo de energía limpia y renovable.

Por el contrario, en los valles intermontanos, las posibilidades de aprovechamiento están mas limitadas, salvo como ocurre en Colpes, donde la conformación del relieve produce una estrechez que, por efecto Venturi, aumenta notablemente la velocidad.-

En general, se puede destacar la disponibilidad permanente de viento, lo cual garantiza un aprovechamiento interesante para pequeñas potencias.- En cambio las medianas y altas potencias tienen limitaciones que dependen del corredor considerado y de la altura sobre el nivel del mar.

## **BIBLIOGRAFIA**

NAVARRO, Herminio Elio.(1994) Catamarca, hacia un estudio integral de su geografía III Edición. Ediciones Color. Catamarca Argentina.

MATTIO H. F.; PONCE G.; 1998 – “Nociones Generales de Energía Eólica”. Módulo de Energía Eólica. Bibliografía elaborada para la Maestría en Energías Renovables; pp. 102-107. Salta – Argentina.

SEQUI, J. R.; HERRERA, R.; GÓMEZ, U.; FORESI, P; 2006; Característica de la energía eólica en las Sierras de Humaya: Departamentos Ambato – Catamarca – Argentina. Revista del Centro de Investigación de Zonas Áridas y Semiáridas (CIZAS) - ISSN N° 1515-0453; Vol. 7, Núm. 1 y 2, pp. 07 – 22.

SEQUI, J.; GÓMEZ, U.; HERRERA, R.; 2008; “Potencial eólico en las Sierras De “El Alto –Ancasti”: 2° Etapa: La Bebida - Dpto. Ancasti – Catamarca. Revista del Centro de Investigación de Zonas Áridas y Semiáridas (CIZAS) - ISSN N° 1515-0453; En prensa.

SEQUI, J. R.; HERRERA, R.; GÓMEZ, U.; FORESI, P.; 2009. “Potencialidad energética del viento en el cañón de Paclín - Dpto. Paclín – Catamarca”. Revista del Centro de Investigación de Zonas Áridas y Semiáridas (CIZAS) - ISSN N° 1515-0453; En prensa.