



## RECURSO EOLICO DE LA PROVINCIA DEL NEUQUEN

Graciela Pedro<sup>1</sup>, Héctor Mattio<sup>2</sup>, Claudia Palese<sup>3</sup>, Néstor Warchomicka<sup>3</sup> y Jorge Lassig<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ente Provincial de Energía del Neuquén -EPEN-, Buenos Aires 283, Neuquén, Neuquén, Argentina, gpedro@epen.gov.ar

<sup>2</sup>Centro Regional de Energía Eólica -CREE-, Laprida 15, Rawson, Chubut, Argentina, mattio@eeolica.com.ar

<sup>3</sup>Universidad Nacional del Comahue -Fac Ing-, Buenos Aires 1400, Neuquén, Neuquén, Argentina, palese@uncoma.edu.ar

**RESUMEN:** Se realizó el mapa de la distribución de vientos y de la potencia eólica disponible de la provincia del Neuquén para evaluar la energía eólica posible de extraer. El objetivo fue detectar los sitios más propicios para la ubicación de futuros parques eólicos. La provincia se caracteriza por tener varias líneas de transmisión de alta tensión facilitando una conexión al Sistema Interconectado Nacional/Provincial en caso de instalarse parques eólicos. En este trabajo se utilizó un sistema de información geográfica que tiene incluido un modelo atmosférico numérico, llamado ArgentinaMap. Se determinaron las características geofísicas (topografía y rugosidad superficial del suelo) de la provincia a través de sensores remotos (datos SRTM y MMRS). Se utilizaron datos de dirección e intensidad del viento en superficie y de altura de varios lugares. Con estos materiales se logró la evaluación del recurso eólico obteniendo los mapas del campo de viento y de densidad de potencia eólica a 50 m y 70 m de altura, que muestran que la provincia tiene un recurso eólico muy significativo

**Palabras clave:** energía eólica, recursos renovables, viento, Neuquén.

### INTRODUCCIÓN

El Ente Provincial de Energía del Neuquén (EPEN) conformó un grupo de trabajo integrado por personal del Sector de Energías Alternativas, el Centro Regional de Energía Eólica (CREE -Chubut-) y la Universidad Nacional del Comahue (Facultad de Ingeniería) cuyo objetivo fue llevar adelante el proyecto de elaboración de mapas detallados del recurso eólico para todas las regiones de la provincia del Neuquén.

Este tipo de cartografía proporciona una base para una estratégica toma de decisiones relacionadas a la distribución del recurso eólico y su eficaz aprovechamiento.

La cuantificación del recurso posibilita avanzar en los estudios de factibilidad de proyectos para aplicaciones que incluyen la generación de electricidad a escala comercial, sistemas conectados a la red y de menor escala fuera de la red.

Por esta razón la Provincia del Neuquén está muy interesada en la elaboración del mapa eólico provincial el cual permitirá:

- contar con una herramienta básica para la elaboración de planes de desarrollo del recurso eólico,
- facilitar el análisis técnico económico de las distintas alternativas de abastecimiento energético, constituyéndose en un soporte para la toma de decisiones,
- identificar áreas potencialmente aptas para el desarrollo de proyectos y el diseño de estudios o programas de evaluación del recurso en sitios específicos (micrositing).

Los vientos y la potencia eólica del centro y sur de la Patagonia fueron estudiados por Barros (1983) y por Labraga (1994). En la provincia del Neuquén se realizaron estudios en algunos sectores, como en los alrededores de la ciudad de Neuquén (Lassig et al., 1999), en el lago Mari Menuco (Palese y Lassig 1997), y en el sector Neuquén-Cutral C6 con datos de tres estaciones meteorológicas (Palese, 1999, y Palese et al, 2000). Además es una región en donde hay varias estaciones meteorológicas funcionando desde hace varios años, y otras nuevas, por lo que la obtención de datos para el trabajo fue rápida y suficiente.

### METODOLOGÍA

La metodología seguida concuerda en gran medida con lo realizado en Warchomicka y otros (2005) en el Departamento Confluencia (Neuquén), y en Potts y otros (2001) en el centro y oeste de Massachussets (USA).

La distribución de la energía eólica en la provincia se obtuvo utilizando una avanzada metodología de cartografía eólica del CREE (ArgentinaMap) que integra al conjunto de datos de vientos de superficie y de altura, un sistema de información geográfica que incorpora un modelo numérico de simulación atmosférica.

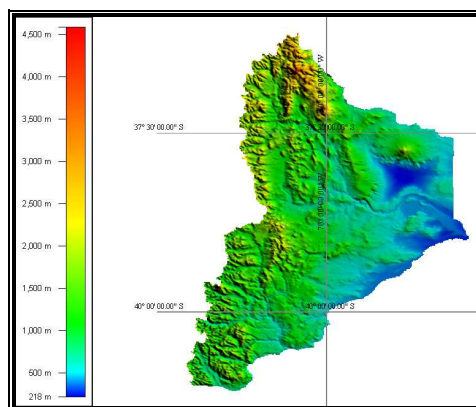
El software ArgentinMap (CREE) es un modelo que satisface la ecuación de conservación de la masa. El ajuste necesario para lograr cero divergencia se determina mediante la resolución iterativa de un conjunto de ecuaciones en diferenciales

parciales. Para ello se establece una malla de elementos finitos a lo largo de la región de interés, ArgentinaMap permite incluir una malla de 700 elementos en cada dirección horizontal y una discretización vertical de 15 elementos.

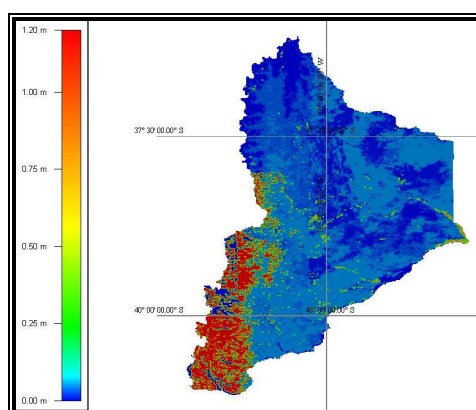
Para el cálculo del potencial eólico se necesita del conocimiento geofísico del área en estudio ya que el campo de velocidad del viento depende fuertemente de ellos. La provincia del Neuquén está comprendida aproximadamente entre 36,0°S al norte, 41,25°S al sur, 72,0°W al oeste y 68,0°W al este. Los datos orográficos fueron obtenidos de sitio Web del US Geological Survey (USGS) y son producto de mediciones efectuadas con dos radares instalados a bordo del Space Shuttle de la NASA. Esta información disponible en forma gratuita tiene errores que fueron corregidos (Figura 1).

La longitud de rugosidad aerodinámica ( $z_0$ ) representa las variaciones de las características de la superficie a lo largo de la provincia, para cada punto de la malla en el dominio de la simulación. Neuquén tiene paisajes muy distintos entre los que se encuentra la meseta árida caracterizada por la estepa arbustiva y la estepa gramínea, los valles de los ríos y arroyos con matorrales, los lagos naturales y los embalses de los aprovechamientos hidroeléctricos, el bosque andino patagónico, los valles irrigados con cultivos de frutales especialmente, los pueblos y ciudades y la zona de la alta montaña.

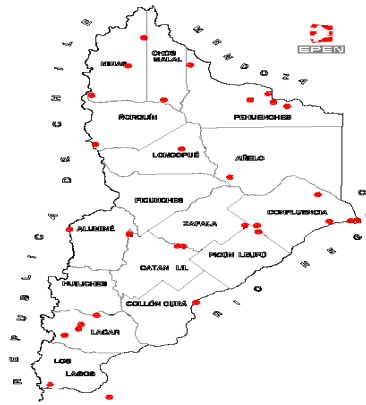
En este trabajo se estimó la rugosidad aerodinámica en forma indirecta a través del conocimiento del tipo de cobertura del suelo y de la altura media de los obstáculos. Para ello se utilizó una escena del sensor MMRS/SAC-C (Multispectral Medium Resolution Scanner) del 20/Dic/2002 (Colomb y otros, 2004). Aplicando la metodología expuesta en Palese (2005) se delimitaron 9 tipos de rugosidad, identificados mediante una clasificación de la escena satelital MMRS basada en la habilidad que tiene dicho sensor en detectar las firmas espectrales de los distintos tipos de cobertura y usos del suelo y demarcando manualmente las ciudades y pueblos (Figura 2).



*Figura 1: Mapa topográfico.*



*Figura 2: Longitud de rugosidad aerodinámica*



**Figura 3:** Red de estaciones de medición.

Los datos medidos en superficie de dirección e intensidad del viento se utilizan para inicializar el modelo, su preparación fue una etapa muy importante en la elaboración del mapa eólico. Se buscó información de lugares e instituciones que estuvieran o estén tomando datos meteorológicos en la provincia. La información meteorológica utilizada provino de varias fuentes. Gracias a la colaboración de organismos públicos y empresas privadas se recopiló datos de viento de 30 estaciones con períodos de medición que van desde 1 año a 10 años. En particular la Autoridad Interjurisdiccional de Cuencas (AIC), la Dirección Provincial de Recursos Hídricos, la Universidad Nacional del Comahue y las empresas Repsol YPF, Capex, Copelco y Petrobrás aportaron datos para llevar adelante este proyecto. A estos se agregan los provenientes de las estaciones meteorológicas que funcionan en los aeropuertos de Neuquén, Bariloche y Chapelco del Servicio Meteorológico Nacional y los registrados por el EPEN en la localidad de Villa Puente Picún Leufú. Con la finalidad de cubrir zonas con baja densidad en la red de información, el EPEN instaló 5 estaciones anemométricas (NRG con sensores calibrados) que cuentan a la fecha con más de un año de datos (Figura 3).

Se realizó el relevamiento de casi todas las estaciones meteorológicas para comprobar y obtener una descripción in situ de la instalación de los anemómetros, distancia de los mismos a los obstáculos más cercanos y altura de dichos obstáculos. Los datos obtenidos corresponden a distintos períodos de medición casi todos correspondientes a la última década. Los intervalos de medición también son diferentes, oscilan desde diez minutos a cuatro observaciones diarias. Tanto los datos de intensidad como los de dirección del viento fueron consistidos en forma gráfica o comparados con los datos de salidas de modelos atmosféricos. El análisis estadístico de las muestras exhibió un comportamiento similar al patrón de vientos esperado.

Los vientos de altura (viento geostrófico) se utilizan para extrapolar el campo inicial a lo largo del dominio del modelo. Se utilizaron datos del sitio Web de la Administración Nacional para la Atmósfera y los Océanos de Estados Unidos (NOAA) que provienen del modelo AVN-191 km. Se seleccionaron tres niveles que no están afectados por la capa límite atmosférica (Tabla 1). Se recopiló los últimos 5 años de información provenientes de 4 datos por día (de las 3, 9, 15 y 21 hora oficial argentina).

Se trabajó dividiendo los mapas de topografía y de rugosidad aerodinámica provinciales en cuatro grandes sectores, que llamamos mosaicos, cada uno de ellos se superpone aproximadamente en un 40 % con los restantes. También se ingresaron los datos de viento de superficie y de altura por separado (Tabla 1). Así se logran cuatro mallas cada una de 168 elementos en  $x$  por 287 elementos en  $y$ , que fijan una resolución horizontal de 1200 m. Estos mosaicos se trabajaron separadamente para luego unirlos una vez obtenidos los campos de viento y de densidad de potencia a 50m y 70m de altura sobre el suelo.

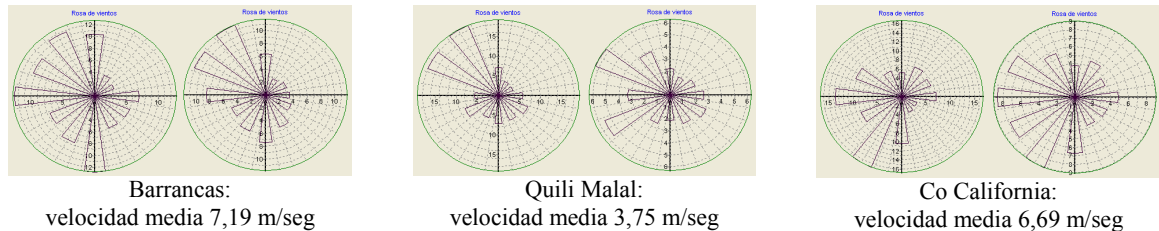
**Tabla 1:** Descripción del conjunto de opciones ingresados en cada uno de los mosaicos.

	<b>MOSAICO 1</b>	<b>MOSAICO 2</b>	<b>MOSAICO 3</b>	<b>MOSAICO 4</b>
<b>Estación Referencia</b>	Barrancas	Quili Malal	Co. California	Co. California
<b>Cantidad Est. Superficie.</b>	9	11	9	11
<b>Niveles Superiores</b>	700-500-400 hPa	850-700-500 hPa	850-700-500 hPa	850-700-500 hPa
<b>Tope Capa Transición</b>	560	600	590	600
<b>Tope Capa Superficie</b>	140	150	140	150

Como ya se expuso en párrafos anteriores el campo de velocidad del viento final se calcula con un campo de viento inicial que se basa en los datos observados. Estos datos son ponderados con una función inversa del cuadrado de la distancia cuyo radio se fijó en 500 m. No todos los datos de superficie se usaron para la inicialización del modelo. Para el procedimiento iterativo se mantuvo un residuo máximo de  $10^{-5}$ . Las condiciones atmosféricas utilizadas fueron de un perfil vertical de temperatura estándar con la densidad del aire ajustada por elevación.

ArgentinaMap necesita estimar los perfiles verticales en la capa límite atmosférica. La altura de la capa límite de superficie y de la capa de transición se determinaron para cada uno de los 4 mosaicos (Tabla 1). La proporción de estabilidad se la igualó a 1, es decir, una longitud de Monin-Obukhov de 0 que implica una capa límite neutral. Este dato se estimó mediante la metodología propuesta por Golder (1972) aplicada en una zona de la provincia en Palese (2006).

Las series temporales se ingresaron ordenando sus rosas de frecuencias y de intensidades por dirección en orden de mayor a menor frecuencia, en concordancia con la rosa del viento de la estación de referencia (Figura 4). Estas estaciones de referencia de cada mosaico se seleccionaron teniendo en cuenta la calidad de los datos, la correcta instalación de sus sensores, buscando que correspondan a zonas bien expuestas.



**Figura 4:** Rosa de los vientos de frecuencias porcentuales a la izquierda y de intensidades en m/seg a la derecha de las tres estaciones seleccionadas como de referencia.

## RESULTADOS Y ANALISIS

De las 30 estaciones de medición con las que se contó en este proyecto, solamente se utilizaron para ingresar al modelo 24. Las 6 muestras no empleadas corresponden a 4 estaciones ubicadas en la zona de la alta montaña en cotas superiores a 1200m, en algunos casos rodeadas por bosque, y en las otras 2 los anemómetros están instalados muy cercanos a obstáculos por lo que el modelo sobrestimaba las velocidad media, ocasionando errores muy altos.

Los resultados obtenidos confirman que la provincia del Neuquén tiene un recurso eólico muy significativo (Figura 5). En el norte, en la zona comprendida entre los volcanes Domuyo y Tromen, en la Cordillera del Vientos, y en la Sierra de Chorriaca. En el centro de la provincia en las sierras de Catán Lil. Por último al sur en la región cercana a la Cordillera de los Andes. Si bien muchos de estos lugares mencionados cuentan con excelente recurso eólico con velocidades medias que superan 15 m/seg, algunos pueden presentar dificultades de desarrollo debido a su accidentado terreno y difícil acceso.

La velocidad del viento media anual predicha por el modelo en las zonas antes mencionadas supera los 7,5 m/seg., que sería suficiente para sostener proyectos económicos de energía eólica. Los valles y zonas bajas son menos ventosas, con velocidades inferiores a los 5 m/seg en algunos lugares.

Las velocidades del viento medidas en las estaciones meteorológicas se utilizan para inicializar el campo de viento en la grilla. Antes de comenzar el proceso iterativo para lograr el mapa de vientos final, a cada punto sobre la grilla se le asigna un valor de velocidad inicial del viento, que surge de un promedio ponderado de los datos de superficie.

Por otra parte el modelo ArgentinaMap trabaja con los datos de una estación de referencia, que hay que especificar, que define las frecuencias de ocurrencia para cada sector de dirección y por lo tanto las medidas usadas para promediar el campo final de viento. Entonces las rosas de los vientos medidas, de cada estación que no son de referencia, son modificadas en función de la rosa de la estación de referencia, definiéndose así la velocidad utilizada por el modelo como velocidad efectiva.

En el presente trabajo, como en otros en los que se han utilizado distintos modelos en diferentes aplicaciones (Potts, 2001; Venalainen, 2003), se compara el resultado del modelo con las velocidades verdaderamente medidas en las estaciones meteorológicas puesto que es la primera instancia en la evaluación de la bondad de la predicción.

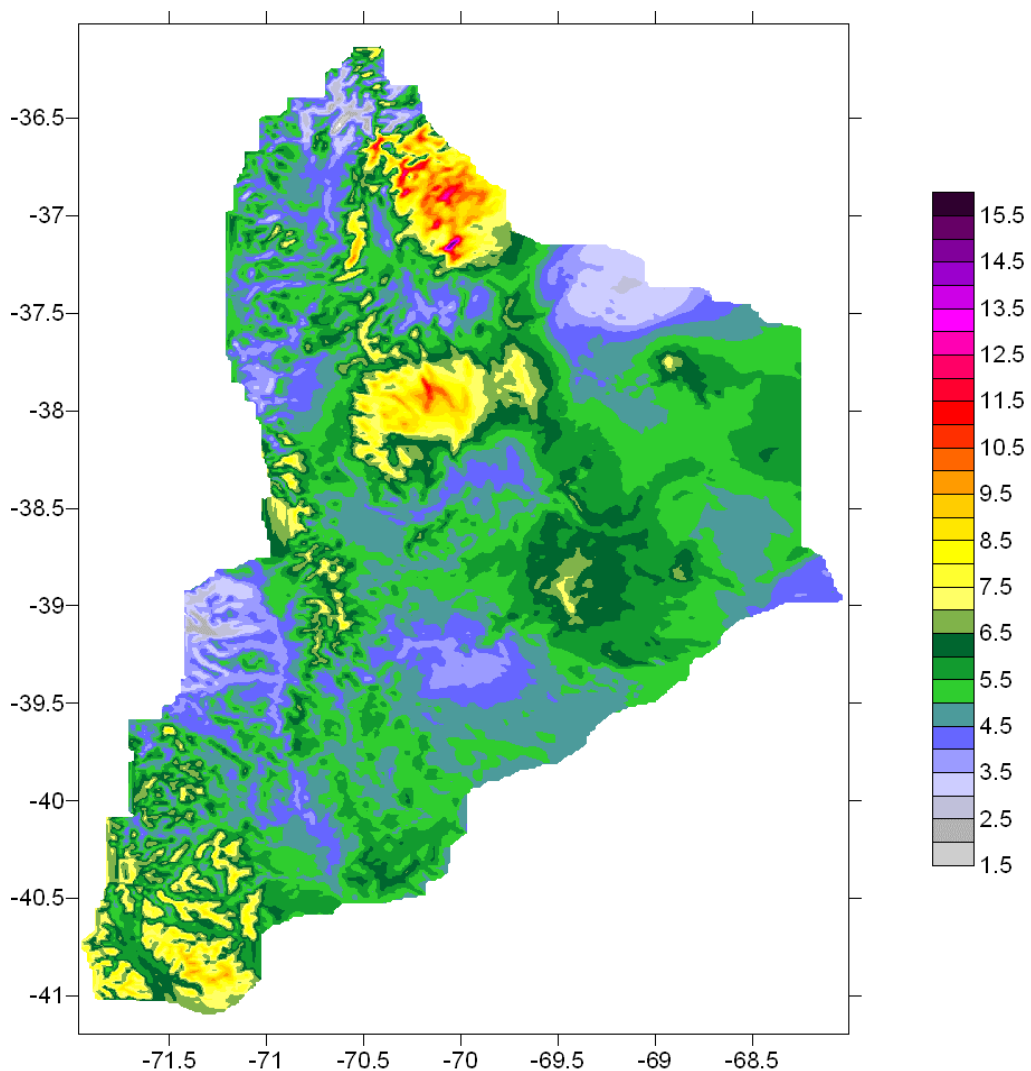
En esta primera evaluación los resultados del modelo se ajustan bien a los datos medidos en las estaciones meteorológicas. El error raíz cuadrada media obtenido fue de 0,75 m/seg, es decir, un error porcentual de 13,5 %, que puede deberse a la incertidumbre en los datos (Tabla 2). El coeficiente de correlación  $R^2$  entre los valores de velocidad media predicha por el modelo y el verdaderamente medido en cada una de las estaciones es de 85%.

**Tabla 2:** Error raíz cuadrada media (m/seg) y error relativo porcentual (%) de cada uno de los mosaicos y el promedio general.

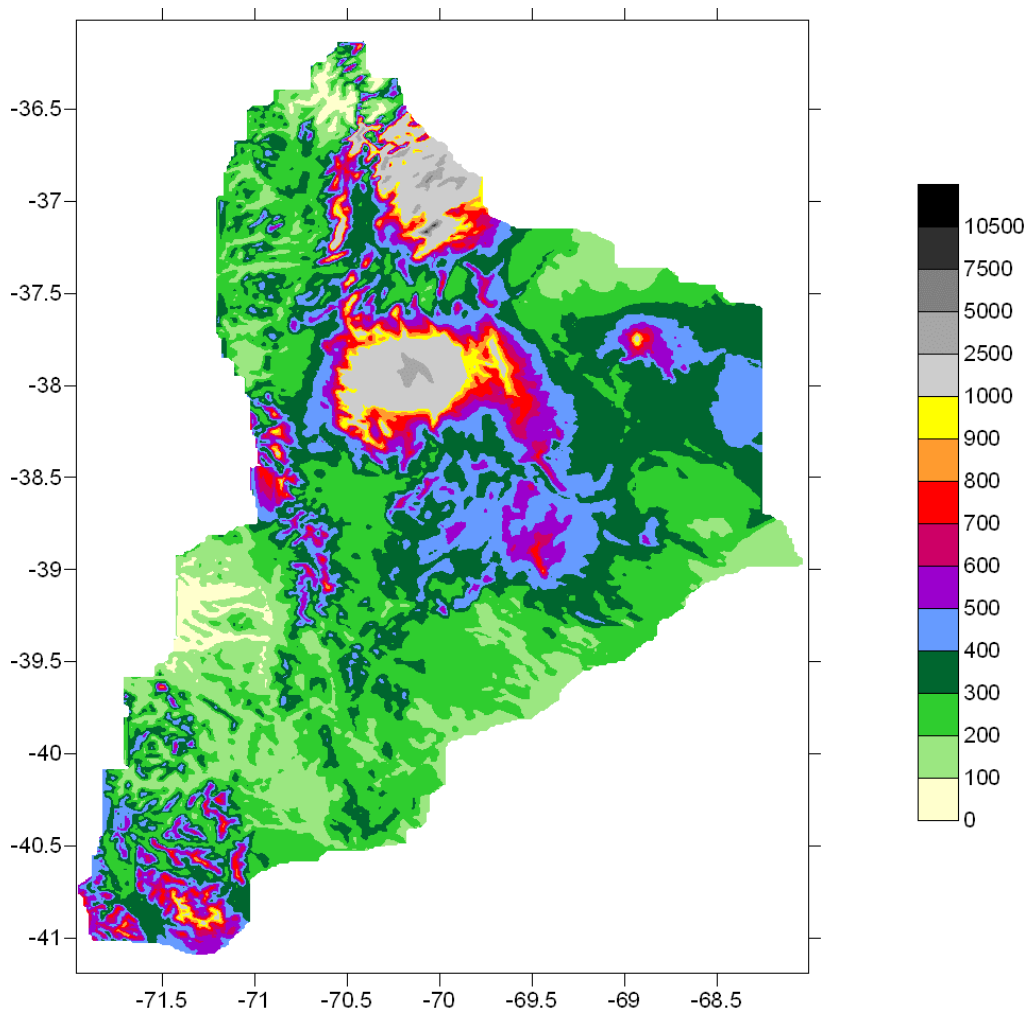
	Mosaico 1	Mosaico 2	Mosaico 3	Mosaico 4	Promedio
Error Relativo (%)	18,88	13,61	12,42	9,09	13,5
RMSE (m/seg)	1,04	0,88	0,70	0,37	0,75

Los resultados son guardados en bases de datos digitales que contienen la información de cada punto de malla y para cada una de las dos alturas sobre el suelo estudiadas, de la velocidad media del viento, distribución de frecuencias de la dirección del viento, la densidad de potencia, y los parámetros c y k de la distribución de Weibull.

Las zonas de vientos más favorables tienen asociadas clase 4 de vientos y mayores, es decir, superiores a 400 W/m<sup>2</sup> a 50 m de altura (Figura 6 y Tabla 3).



**Figura 5:** Distribución de la velocidad del viento en m/seg a 50 m de altura sobre el suelo.



**Figura 6:** Densidad de potencia  $W/m^2$  50 m de altura.

Se estima que existen aproximadamente 29000 km<sup>2</sup> de terreno con un recurso eólico potencial de bueno a excelente (clases de 4 a 7) en la provincia del Neuquén (Tabla 3). Esta superficie representa el 30 % de la superficie total provincial. Los vientos que superan la clase 7 y que se encuentran en el 0,8% de la superficie provincial corresponden a las altas cumbres.

**Tabla 3:** Estimación de la cantidad de superficie y su porcentaje respecto a la superficie total provincial que tienen cada una de las clases de viento.

Clase	Velocidad (m/seg)	Potencia ( $W/m^2$ )	Superficie (km <sup>2</sup> )	Porc. de la sup. total (%)
1	0 – 5,6	0-200	15602	16,3
2	5,6 – 6,4	200-300	28078	29,3
3	6,4-7,0	300-400	22961	24,0
4	7,0-7,5	400-500	12498	13,0
5	7,5-8,0	500-600	5451	5,7
6	8,0-8,8	600-800	4866	5,1
7	8,8-11,9	800-2000	5634	5,9
		> 2000	777	0,8

## CONCLUSIONES

Se logró la evaluación del recurso eólico de la Provincia de Neuquén a través de un modelo de flujo de aire asociado a un sistema de información geográfica.

En una primera evaluación los resultados del modelo se ajustan bien a los datos medidos en las estaciones meteorológicas. Se logró un buen ajuste entre la velocidad media predicha por el modelo y la verdaderamente medida en cada una de las estaciones ( $R^2 = 0,85$ ).

Los resultados obtenidos confirman que la provincia del Neuquén tiene un recurso eólico muy significativo.

Un gran porcentaje del área provincial puede desarrollar emprendimientos eólicos a escala comercial. Algunos organismos internacionales de financiación de inversiones, condicionan el otorgamiento de créditos, a la presencia de vientos medios superiores a 6,0 m/s, de hecho en el presente mapa el área ocupada por vientos superiores a este valor es mayor al 50 % de la superficie total.

*Agradecimientos.* Agradecemos a los organismos públicos y empresas privadas por los datos provistos. Agradecemos al EPEN su autorización para la presentación de este trabajo.

## REFERENCIAS

- Barros, V. (1983), Evaluación del potencial eólico en la Patagonia, *Meteorologica*, XIV, 1 y 2, 473-484.
- Colomb, F.R., Alonso, C., Hofmann, C. y Nollmann, I. (2004), SAC-C mission, an example of international cooperation. *Advances in Space Research*, 34, 10, 2194-2199.
- Golder, D. (1972), Relations among stability parameters in the Surface layer. *Boundary Layer Meteorology* 3, 47-58.
- Labraga, J.C. (1994) Extreme winds in the Pampa del Castillo plateau, Patagonia, Argentina, with referente to wind farm settlement, *Journal of Applied Meteorology*, 33, 1, 85-95.
- Lässig, J.L., Cogliati, M.G., Bastanski, M.A. y Palese, C. (1999), Wind characteristics in Neuquén, North Patagonia, Argentina, *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 79, 183-199.
- Palese, C. y Lässig, J.L. (1997), Lago Mari Menuco. Parte I: caracterización del recurso eólico, *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 1 N°2, 168-171.
- Palese, C. (1999), Vientos intensos en la región norpatagónica, *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 3 N° 2, 177-18 .
- Palese, C., Lässig, J.L., Cogliati M.G. y Bastanski, M.A. (2000), Wind regime and wind power in North Patagonia, Argentina. *Wind Engineering*, 24, 5, 361-377.
- Palese, C. (2005), Longitud de rugosidad aerodinámica estimada de datos MMRS/SAC-C del Departamento Confluencia (Provincia Del Neuquén). Primera aproximación, *Anales IX Congreso Argentino de Meteorología*, CCC-16, Bs.As. OCT/2 5
- Palese, C. (2006), Estimación de las condiciones de estabilidad atmosférica en el Departamento de Zapala de la Provincia del Neuquén, *Actas XI Reunión Argentina de Agrometeorología*, en evaluación.
- Potts, J.R., Pierson, S.W., Maticen, P.P., Harnel, J.R. y Babau, V.C. (2001), Wind energy resource assessment of western and central Massachusetts. *Actas American Institute of Aeronautics and Astronautics*, AIAA-2001-0060, 11pp.
- Venalainen, A., Sahlgren, V., Podsechin, V., y Huttula, T. (2003), Small-scale variability of the wind field over a typical Scandinavian lake. *Boreal Environment Research*, 8, 71-81
- Warchomicka, N., Palese, C., Pedro, G., Mattio, H. y Lässig, J. (2005), Evaluación del recurso eólico del Departamento Confluencia de la Provincia del Neuquén, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 9, 6: 39-44.

**ABSTRACT.** The maps of the wind field and wind power of the Neuquén province was carried out to evaluate the possible wind power of extract. The objective was to detect the most favorable places for the location of future wind farms. The province has several high-voltage transmission lines facilitating a connection with the National/Provincial System Interconnected in case of being installed wind farms. In this work a geographical information system was utilized that it has included a numerical atmospheric model (ArgentinaMap). The province geophysical characteristics (topography and aerodynamic roughness) were determined through remote sensors (SRTM and MMRS data). Surface wind and upper air data, of various places, were utilized. With these tools the evaluation of the wind power resource was achieved obtaining the maps of the wind field and wind power at 50 m and 70 m above ground level, that show that the province has a very good win power resource.

**Keywords:** wind power, renewable resources, wind, Neuquén.