

## **POTENCIAL EOLICO DE LAS PROVINCIAS DE CORRIENTES, CHACO Y FORMOSA.**

Marcelo Aires<sup>1</sup>, Mario E. De Bortoli<sup>2</sup>, Pedro Marcelo Obregón<sup>3</sup>, Jorge O. Marighetti<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Doctorando Universidad Nacional de Salta

<sup>2</sup> Universidad Nacional del Nordeste. Facultad de Ingeniería.

<sup>2</sup> Universidad Tecnológica Nacional - FRRe

Tel. 0261-4288797 – Fax 0261-4287370 e-mail: maaires@hotmail.com

*Recibido 17/08/14, aceptado 28/09/14*

**RESUMEN:** Se realizó una estimación general del recurso eólico de las provincias de Corrientes, Chaco y Formosa utilizando mediciones de viento obtenidos con anemómetros meteorológicos y modelos numéricos. Con este procedimiento permite valorar extensas regiones de manera esquemática y con bajo costo, detectando sectores donde el potencial eólico obtenido justifica un estudio más preciso mediante relevamiento de información in situ. En este trabajo se presenta el análisis de la variabilidad de los vientos medios resultantes conducente a verificar si son aptos para proyectos conectados a red o sistemas de generación independientes con dispositivos de almacenamiento de energía. En este sentido se elaboraron modelos georeferenciados de relieve de terreno y longitud de rugosidad a los efectos de determinar en forma numérica la existencia de sitios importantes en recurso eólico.

**Palabras clave:** Mapa Eólico NEA, Potencial Eólico en Humedales, Mapa Eólico de las provincias de Corrientes, Chaco y Formosa.

### **INTRODUCCIÓN**

A los efectos de determinar las velocidades medias anuales de un área, es necesario disponer inicialmente de registros de velocidades y direcciones a una altura donde las mediciones no sean alteradas por la longitud de rugosidad circundante, de por lo menos un año. Es importante la precisión de estos registros ya que la energía a extraer del viento es directamente proporcional al cubo de la velocidad. Para este propósito, se procesaron datos de mediciones de viento de anemómetros pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional en el área de estudio. Además es necesario disponer la topografía del terreno en estudio y la longitud de rugosidad cinemática a los efectos de obtener los perfiles transversales de velocidades de viento.

Las provincias de Corrientes, Chaco y Formosa poseen un relieve muy similar donde no existen grandes accidentes topográficos. La principal fuente de variación de la longitud de Rugosidad es principalmente del tipo de vegetación.

Para estimar el potencial eólico existente en la región, se elaboraron modelos georeferenciados de relieve de terreno y longitud de rugosidad vientos de superficie en un modelo matemático computarizado tridimensional de elementos finitos WindMap (y/o Argentina Map) que aplican las leyes de conservación de masa generando flujos de vientos no divergentes.

### **CARACTERISTICAS DE RELIEVE Y VEGETACIÓN**

La provincias de Corrientes, Chaco y Formosa se encuentran entre los paralelos correspondientes a latitudes 30° 45' a 22° 28' SUR y entre las longitudes 63° 25' 38'' OESTE al oeste y al este 55° 37' 02'' OESTE. En la provincia de Corrientes predomina la vegetación de baja altura desde el centro al sur, mientras que en el norte existen en forma aisladas forestaciones altas de pinares, mezcladas con sabanas, malezas y pajonales. En la parte centro y hacia el norte se localizan los esteros de Iberá (Figura 1) conformando un extenso recurso de agua dulce con concentraciones de árboles muy aislados. Debido a que la mayor parte de la superficie es agua, con terreno superficial plano, vegetaciones de poca altura, la longitud de rugosidad cinemática de esta región es pequeña.

La provincia del Chaco se destaca por ser topográficamente una llanura de aparente uniformidad, sin embargo dispone de una marcada diversificación climática. Ella incide en la disponibilidad de agua que alimenta la red hídrica, diversificación de los suelos y vegetación, con baja proporción de bosques cerrados, paisaje abierto de parques y sabanas y un horizonte de esteros y bañados enmarcados por selvas en galería (UMSEF 2002) (Figura 2).



Figura 1: Humedales de Esteros del Iberá.



Figura 2: Bioma representativo de la provincia del Chaco.

Las provincias de Chaco y Formosa forman parte de una unidad geográfica con flora muy similar. Sin embargo, la presencia de los ríos Bermejo y Pilcomayo, con sus extensas zonas de inundación, determinan ciertas peculiaridades para la provincia Formosa. En primer lugar, excepto el sector noroeste que es seco, la provincia es lo suficientemente húmeda como para tener una vegetación exuberante. En Formosa predominan las selvas en galería sobre los grandes ríos y al este, los esteros y bañados (Figura 3), con vegetación acuática, que vinculan las dos grandes selvas de nuestro país: hacia el oeste, las selvas montañas de las Yungas de Salta, Jujuy y Tucumán, y hacia el este, las selvas misioneras. En general, el relieve de las tres provincias es muy similar, destacándose la llanura mesopotámica como unidad geomorfológica más representativa.

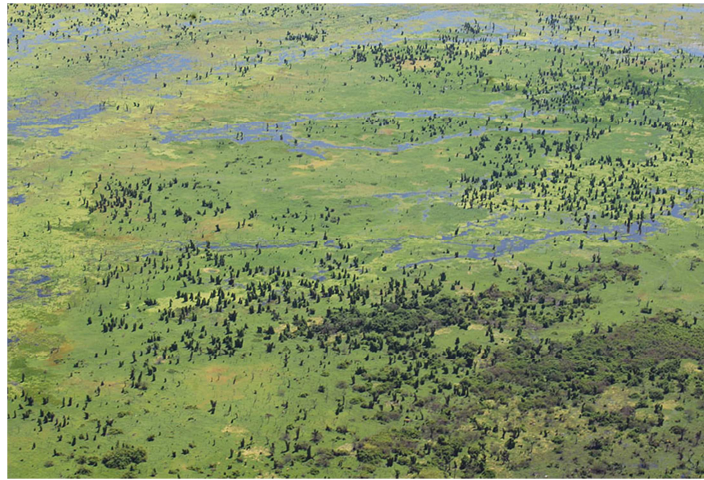


Figura 3: Bañado la Estrella constituye un bioma único en la provincia de Formosa.

## METODOLOGIA

Para el cálculo del campo de velocidad de flujo, se utilizó el modelo numérico WindMap-ArgentinaMap de base NOABL, (Numerical Objective Analysis Boundary Layer), basada en la ley de conservación de masa para flujo no divergente, que resuelve ecuaciones de equilibrio en forma iterativa, mediante elementos finitos. Para la hipótesis del modelo matemático del WindMap, el flujo del aire es en régimen laminar y el fluido es incompresible. Esta premisa de cálculo simplifica la cantidad de ecuaciones de equilibrio. El WindMap itera las ecuaciones de equilibrio de vectores asociados a baricentros de poliedros de dimensiones en horizontal constante y vertical variable según el modelo, simulando además efectos de estabilidad térmicos de la atmósfera. Con ello se trazan isocletas en alta resolución que son representadas en colores y en capas (Layers) (Brower & Company -1998).

El modelo de rugosidad digital se procesó con software Idrisi, con fotografías de imágenes satelitales (mosaicos) correspondientes al sensor TM del satélite Landsat 5, con periodo de revisita de 16 días y resolución 30 m x 30 m, en bandas 3, 4 y 5 disponible en la web en INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Aeronáuticas) para una cubierta de nubes de 0% de años 2011 y 2012, georeferenciadas, corregidas y escaladas a UTM -21S. Se introdujo la longitud de rugosidad para las diferentes cubiertas vegetales que compone la provincia de Corrientes, Chaco y Formosa en correspondencia a la tabla con la convención WasP (Mapa Eólico Europeo) con la excepción de grandes cuerpos de agua donde la longitud de rugosidad corresponde a 0,0001 y no a 0 (adaptación de la convención WasP por WindMap). En las concentraciones urbanas como la ciudad de Resistencia, Formosa y Corrientes, el valor de longitud de rugosidad aerodinámica de 1,10 m; para pueblos o zonas suburbanas 0,75 m; Selva Chaqueña 0,80 m; forestaciones como pinares desde 0,80 a 1,00 m y espejos de agua como el lago embalse Yacyreta y los Esteros del Iberá con 0,0001 m y 0,001 m respectivamente.

Para validar la longitud rugosa supuesta correspondientes a los relieves topográficos más uniformes como son los correspondientes a las Provincias de Chaco, Formosa y Corrientes, se compararon los resultados obtenidos, con los mapas de rugosidades validados con mediciones físicas correspondientes al Atlas Eólico, Río Grande Do Sul (SEMC-2002) en la zona fronteriza. El color verde más oscuro corresponde a la selva Chaqueña, selva Formoseña, y Pinares altos (Figura 4). La tres provincias no poseen grandes accidentes topográficos y las variaciones de rugosidad son muy definidas, salvo en zonas de pinares altos en la provincia de Corrientes que están situados en llanuras, por ello se optó una resolución de 1400 x 1400 m en escala horizontal. Es importante recordar que el objetivo de determinar utilizando herramientas numéricas para obtener valores del potencial eólico es a los fines orientativos para determinar de manera general posibles sitios localizados donde podría esperarse obtener potenciales eólicos de cierta magnitud. Es importante mencionar que el área no analizada no tiene accidentes topográficos que caracterizan a los terrenos complejos, con la excepción de la modificación en la rugosidad superficial en los pinares del este Corrientes y en proximidades de la Selva Impenetrable de la Provincia del Chaco. En estas transiciones no existen mesetas elevadas donde se esperaría un potencial eólico importante, al contrario están situadas en llanuras donde se representan adecuadamente en la escala elegida.

El modelo digital de relieve se obtuvo Online de ASTER Global Digital Elevation Model (ASTER GDEM), un proyecto The Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan (METI) y el National Aeronautics and Space Administration (NASA) correspondiente al sensor "ASTER" que cubre toda la corteza terrestre (Figura 5).

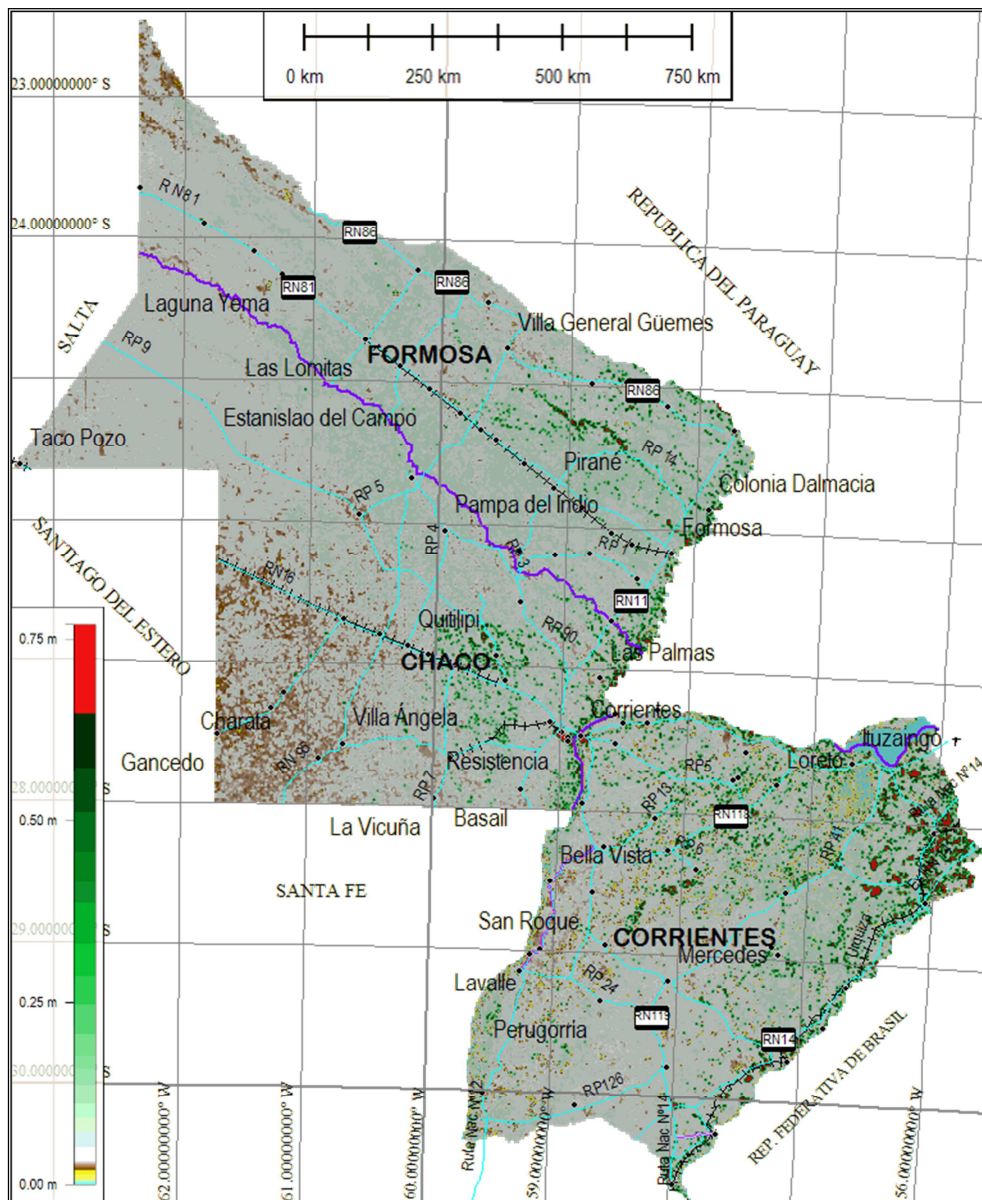


Figura 4: Longitud de Rugosidad Cinemática. UTM - 21S resolución final 200 m x 200 m procesado del Sensor TM de Landsat 5

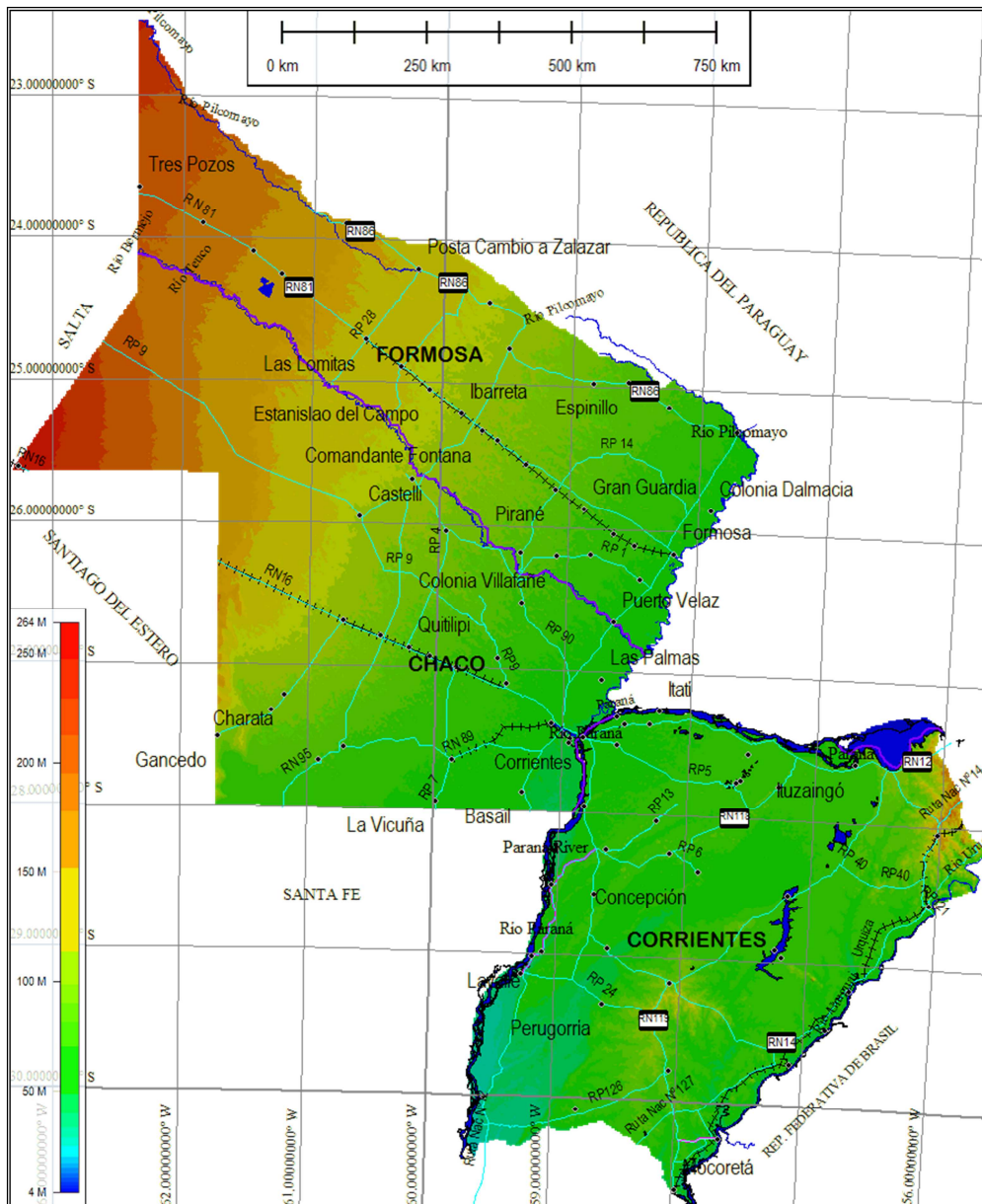


Figura 5: Modelo digital de elevación de terreno [m].  
Proyección UTM -21 S. Sensor ASTER

Respecto al ingreso de datos de registros de velocidades, el programa WindMap soporta varias tipologías de datos de ingreso, para estaciones de superficie y altura, en lo que a velocidades medias anuales se refiere. Así se puede introducir los datos de la Rosa de velocidades de los Vientos con dieciséis, doce u ocho direcciones ó solamente la velocidad media de la estación con una dirección correspondiente a la Dirección Dominante.

Las similares topografías entre las provincias analizadas influyen en la metodología utilizada para el proceso adoptado de incorporar las velocidades de viento. Para las provincias de Corrientes, Chaco y Formosa se utilizaron los registros provenientes del SMN correspondientes a los Aeropuertos de la Provincia de Chaco de las localidades de Resistencia y Presidencia Roque Sáenz Peña, de la provincia de Corrientes, Corriente Capital, Paso de los Libres, Ituzaingó y Monte Caseros y de la provincia de Formosa los Aeropuertos de Formosa y Las Lomas (Figura 6). Además, se introdujeron en el modelo los registros de las estaciones de SMN de los aeropuertos de Posadas y Reconquista de la Provincia de Misiones y Santa Fe respectivamente. Como la topografía en la zona de estudio es aproximadamente plana, con variaciones en un intervalo de 25 a 250 m en 600 km, no se estimó necesario introducir datos de mediciones en altura por arriba de la capa límite, debido a que no se debería generar aceleraciones en el escurrimiento del flujo a gran altura debido que no se dispone de cambios de pendientes en el terreno superficial.

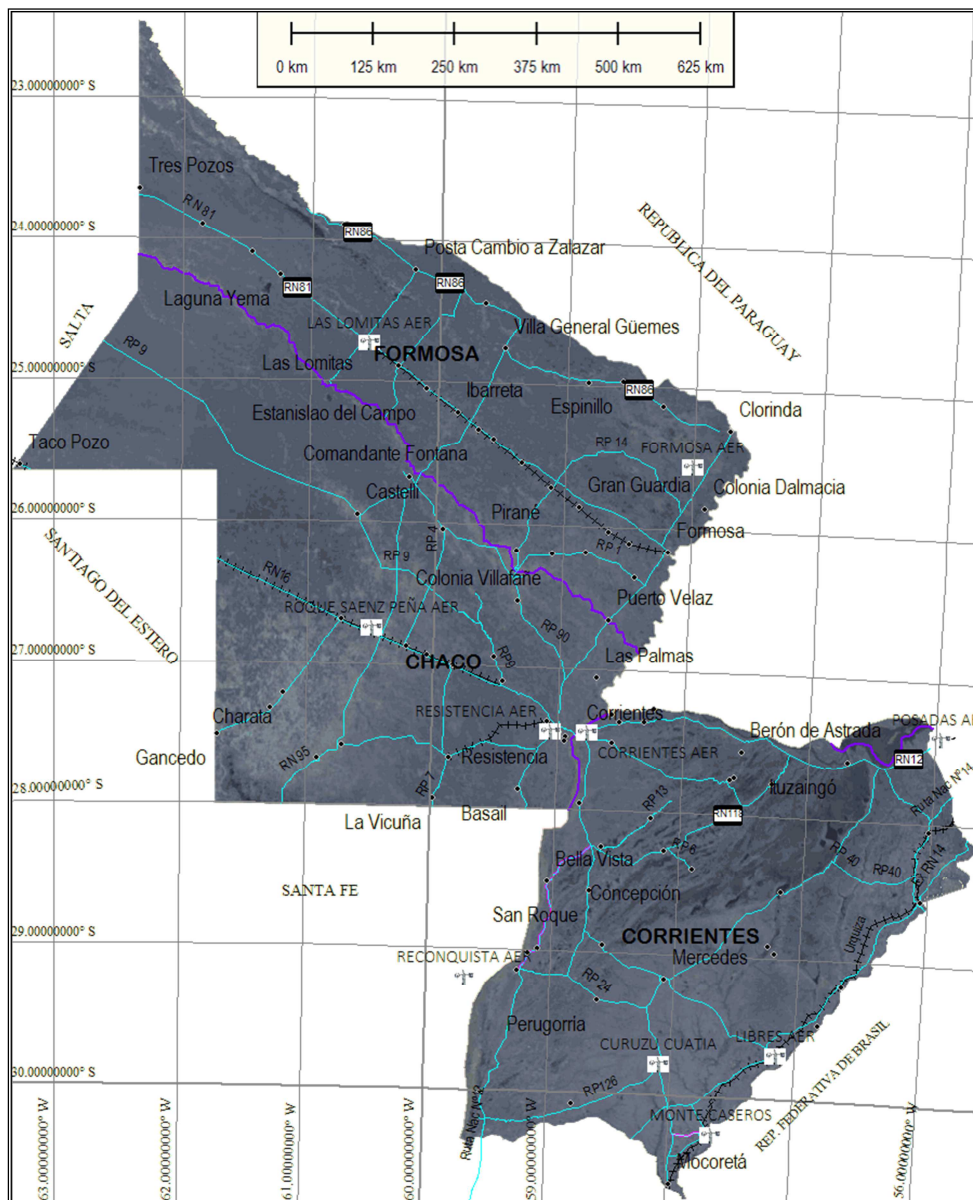


Figura 6: Estaciones de medición de Vientos de superficie sobre mapa Satelital Land Sat 7.

#### REGIMENES DE VIENTOS DE LA REGION

Las provincias de Corrientes, Chaco y Formosa la dirección del viento no es modificada, debido al terreno aproximadamente plano, sin grandes obstáculos naturales ni artificiales que provocaran modificaciones en la dirección del escurrimiento. En general se observó que la dirección del viento predominante en toda la región es de dirección NE. En Figuras 7 a 12 se muestran las direcciones más frecuentes en las estaciones meteorológicas utilizadas.

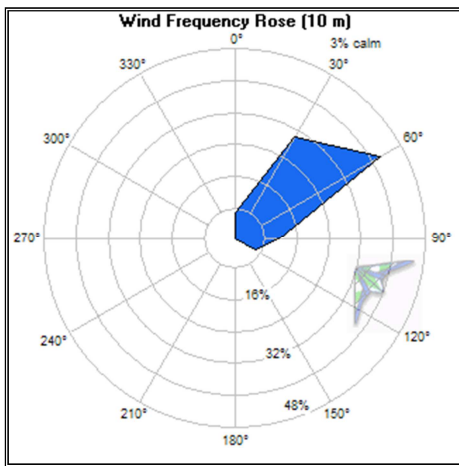


Figura 7: Rosa de Vientos Estación SMN Formosa.

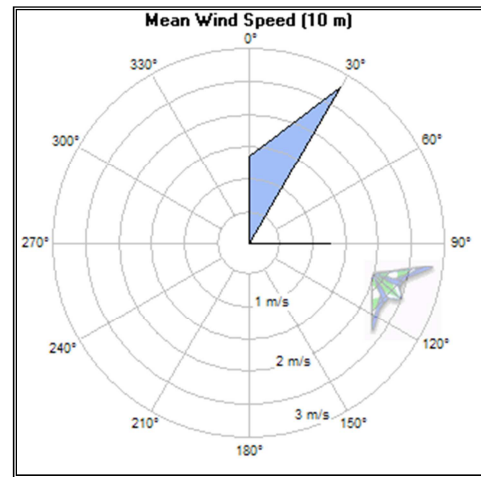


Figura 8: Rosa de Vientos Estación SMN Las Lomitas (Formosa).

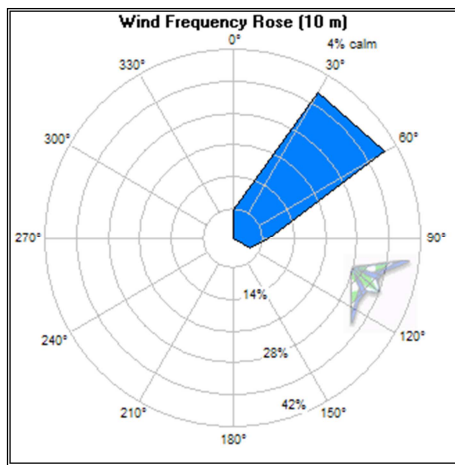


Figura 9: Rosa de Vientos Estación SMN Resistencia (Chaco).

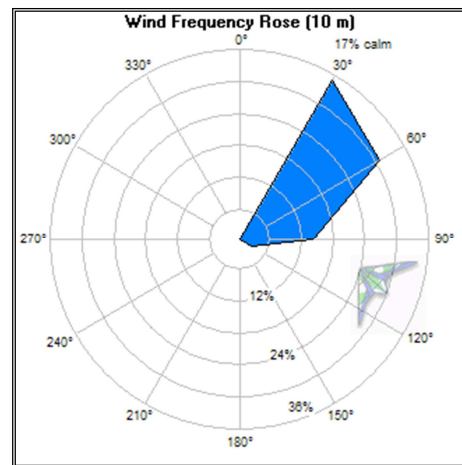


Figura 10: Rosa de Vientos Estación SMN Presidente Roque Sáenz Peña (Chaco).

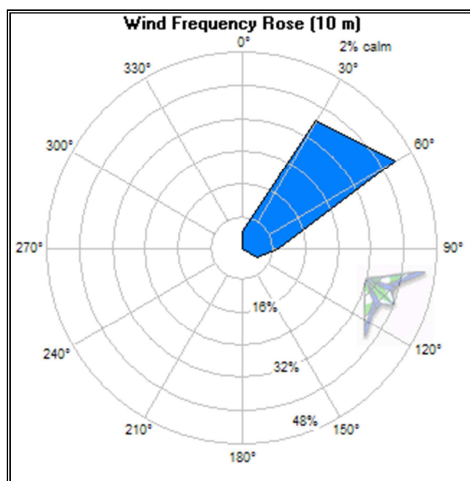


Figura 11: Rosa de Vientos Estación SMN Corrientes (Corrientes).

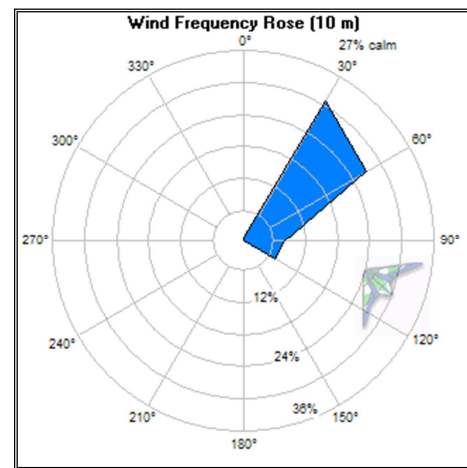


Figura 12: Rosa de Vientos Estación SMN Pasos de los Libres (Corrientes).

#### PROCESAMIENTO, RESULTADOS Y ANALISIS

Con los datos de topografía, rugosidad y registros de velocidad de los vientos a una altura determinada correspondientes al período 2002 – 2011, el Software WindMap calculo los mapas de velocidad anual de vientos para las alturas de 30, 50 y 100 metros. Sería de esperar que estas velocidades resultaran sin grandes distorsiones debido que la topografía plana característica de estas provincias no provoca aceleraciones localizadas. En Figuras 13, 14 y 15 se muestran las variaciones de velocidades en la región analizada para las alturas de 30, 50 y 100 metros respectivamente.

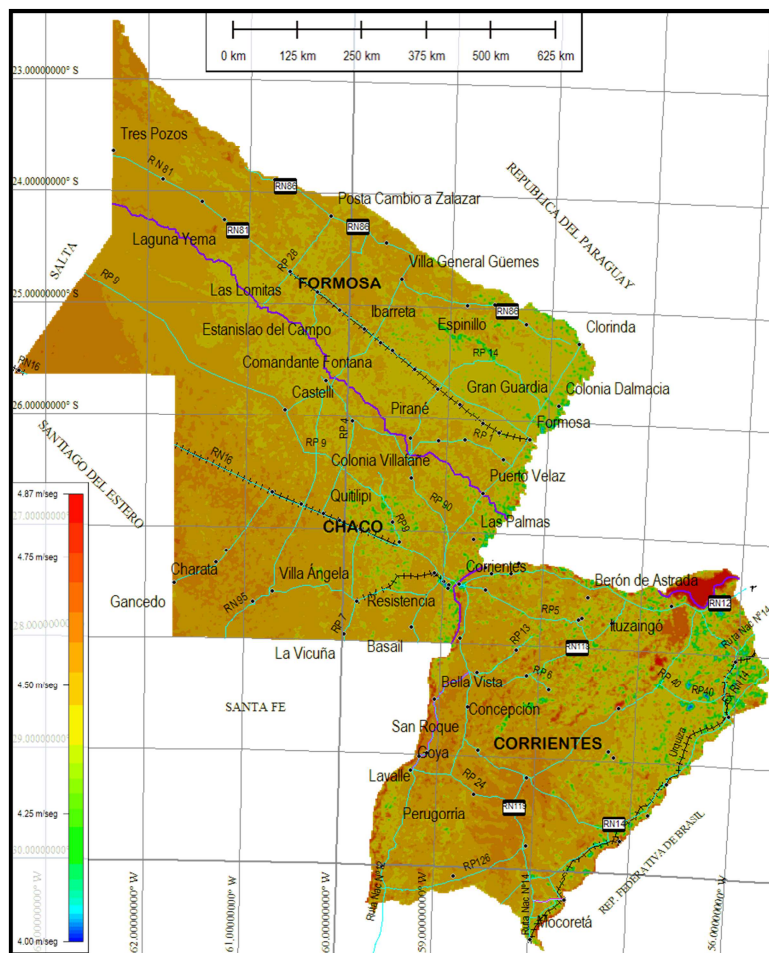


Figura 13: Velocidad media Anual a 30 mts. de altura.

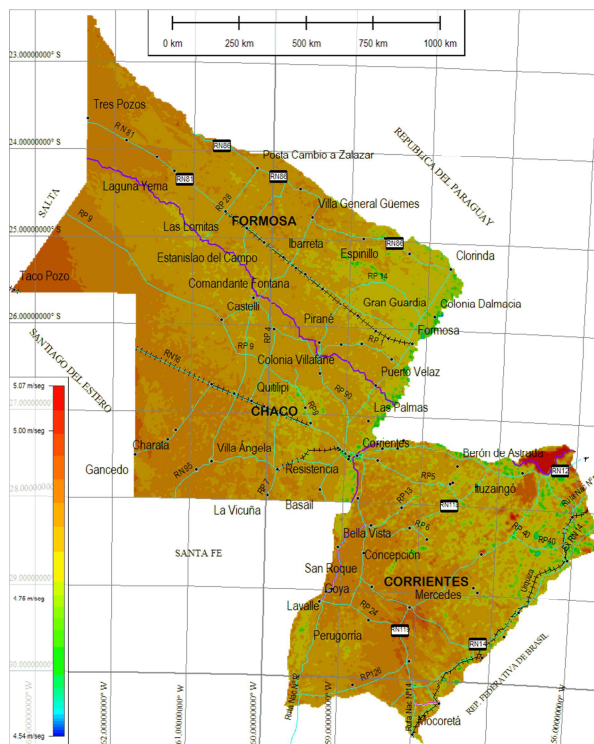


Figura 14: Velocidad Media Anual a 50 mts. de altura



Figura 15: Velocidad Media Anual a 100 mts. de altura

LÍMITES DEL MODELO DE CÁLCULO DE CAMPOS DE VIENTO.

El modelo ArgentinaMap–WindMap, no tiene en cuenta efectos térmicos complejos, brisas de mar (o brisas generadas por grandes masas de agua, p. ej. lago Yacyreta) y/o vientos de montaña. Además la hipótesis de cálculo para el cálculo de las Isocletas es que el régimen de escurrimiento es laminar y el fluido es incompresible. Depende en mayor medida de la forma de inicialización de los campos de viento y del radio de estabilidad térmica a los efectos de “graduar” los afectos y la aceleración de vientos entre obstáculos.

ANÁLISIS DE VELOCIDADES DE VIENTOS EN HORAS DEL DÍA Y ESTACIONARIOS

La velocidad del viento así como la producción de energía difiere según la hora del día y la estación del año. Para las provincias de Corrientes, Chaco y Formosa en Figuras 16, 17 y 18 se muestran las velocidades del viento media a una altura de 10 metros durante todo un año.

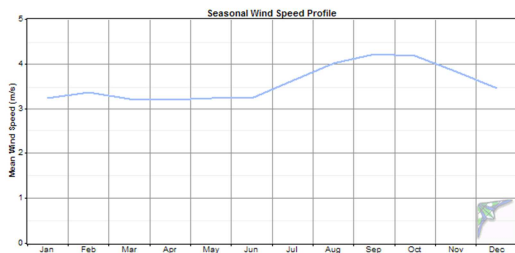


Figura 16: Distribución anual del viento en cercanías del aeropuerto de Corrientes a 10 m de altura.

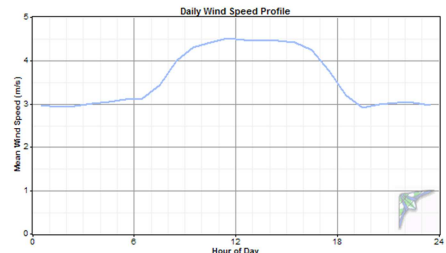


Figura 17: Distribución diaria del viento en cercanías del aeropuerto de Corrientes a 10 m de altura.



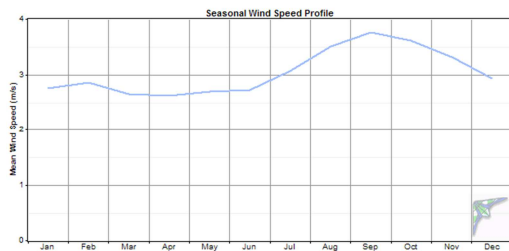


Figura 18: Distribución anual del viento en cercanías del aeropuerto de Resistencia (Chaco) a 10 m de altura

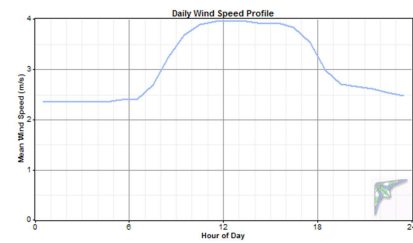


Figura 19: Distribución diaria del viento en cercanías del aeropuerto de Resistencia (Chaco) a 10 m de altura

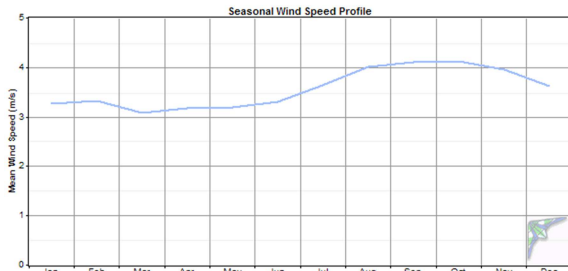


Figura 20: Distribución anual del viento en cercanías del aeropuerto de Formosa a 10 m de altura

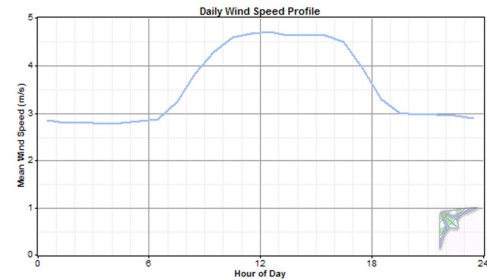


Figura 21: Distribución diaria del viento en cercanías del aeropuerto de Formosa a 10 m de altura

Se puede apreciar en el gráfico que en las tres provincias los mayores vientos se registran en los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre. De instalarse parques eólicos estos meses serán los de mayor producción de energía. El  $k$  de Weibull para las velocidades de vientos en las direcciones de los vientos dominantes en las áreas cercanas de la provincia de Corrientes es de 1.84, para el aeropuerto de Resistencia 1.73 y para las áreas cercanas del aeropuerto de Formosa es de 1.74 también. Esto demuestra una variabilidad alta del viento ( $K$  de Weibull  $< 2.20$ ).

## CONCLUSIONES

Como resultado del procesamiento, la provincia de Corrientes posee tres zonas de potencial eólico importante como para un estudio más profundo del recurso. En la cercanías de Mercedes, hacia el sur, existe una meseta sobre elevada con muy baja rugosidad donde el modelo predice velocidades de viento en el orden de 6 m/seg a los 100 m de altura. En el lago de Yacireta y hacia el Noreste de la provincia también se aprecian velocidades importantes del viento atmosférico. En la provincia de Chaco se observa hacia el Oeste, en cercanías del pueblo Taco Pozo, en una sobre elevación del terreno y baja rugosidad, un importante recurso con velocidades media anuales similares a las reportadas en Mercedes en la provincia de Corrientes. En la provincia de Formosa se observa en el Noroeste, en la confluencia del río Pilcomayo y límite con la provincia de Salta una zona donde también debería realizarse un relevamiento in situ para profundizar el estudio. Se puede aseverar a priori que esas zonas son aptas para el aprovechamiento del recurso para la instalación de aerogeneradores de media potencia (10 KW a 100 KW – NREL) y baja potencia (0.10 KW a 10 KW- NREL). Los aerogeneradores deberían arrancar en los 2.50 m/seg a los efectos de aprovechar el rango vientos existentes como aerogenerador de eje vertical Nohana 3000 KW de 10 KW, que comienza a generar con una velocidad de viento de 2.5 m/seg. En el resto de las áreas analizadas, los resultados sugieren utilizar dispositivos de almacenamientos de energía como ser banco de baterías.

## REFERENCIAS

- Aires Marcelo; De Bortoli, Mario E.; Frigerio, Erico; Roko, Sergio R. "Estimación de potencial eólico de la Provincia de Misiones", Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, AVERMA, Revista de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente, ISSN 0329-5184, pp. 06.09- 06.16, 2012.
- Odilon A. Camargo do Amarante, Fabiano J. Lima da Silva (2002), Secretaria de Medio Ambiente del Estado de Rio Grande do Sul (2002), <http://www.seinfra.rs.gov.br/index.php?menu=atlaseolico> (CDU: 62-67(816.5), SMARGS.
- Tony Bourton, David Sharpe, Nik Jenkis, Ervin Bosayi, (2001), Wind Energy Handbook, ISBN 0 471 48997 2
- Erich Hau (2005), Wind Turbines' 2do edition, ISBN 13978 -3 - 540 - 24240 - 6
- Graciela Pedro, Héctor Mattio, Claudia Palese, Néstor Warchomicka y Jorge Lassig (2006) - Recurso Eólico de la Provincia del Neuquén - ISSN 0329-5184
- Shiu-Yeung Hui1 and Anthony Crookford (2007), M.Sc. Thesis Project at Technical University of Denmark, Wind Profiles and Forests Validation of Wind Resource Assessment Methodologies Including the Effects of Forests EEA Technical report, No 6/(2009). Europe's onshore and offshore wind energy potential
- National Renewable Energy Laboratory 1617 Cole Boulevard Golden, (1997) CO 80401, Wind Resource e Assessment Handbook.
- Dario Jackson Shulzt, Sergio Moreira Da Anunciacao, y otros (2007), ATLAS DO POTENCIAL EÓLICO DO ESTADO DO PARANA.

Odilon Camargo do Amarante, Fabiano J. Lima da Silva, Camargo Shubert (2002), RIO GRANDE DO SUL - ATLAS EÓLICO – ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL – SECRETARIA DE ENERGIA, MINAS E COMUNICACIONES.

Héctor Fernando Mattio, Fernando Tilca (2009). Recomendaciones para mediciones de velocidad y dirección de viento con fines de generación eléctrica, y medición de potencia eléctrica generada por aerogeneradores. CREE-INENCO-CONICET-UNSA.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2012), – [www.inpe.br](http://www.inpe.br)

Brower & Company (1998), The WindMap program help, 154 Main Street - Andover, MA 01810

Joroen van Dam, (2010) NREL – National Renewables Energy Laboratory, Don Baker and David Jager -Wind Turbine Generator System Duration Test Report for the ARE 442 Wind Turbine, <http://www.nrel.gov/docs/fy10osti/47203.pdf>

Primer Inventario nacional de Bosques Nativos (2002) – Proyectos Bosques Nativos y Areas Protegidas – Préstamo Birf 40-85 AR, Unidad de Manejo del Sistema de Evaluación Forestal (UMSEF) – Dirección de Bosques

Superficie con uso Agrícola (2008) – (Provincia del Chaco y Formosa) - Estimaciones Agrícolas 06-07 – SAGPyA  
Aptitud y uso de las Tierras en la Argentina (Provincia de Corrientes) – 1986- SAGPyA.

**ABSTRACT.** A general estimate of the wind resource in the Corrientes, Chaco and Formosa province, using wind measurements with anemometer meteorological and numerical models was performed. This procedure allows us to assess large areas schematically and low cost, detecting place where the wind potential obtained justifies a more detailed study using information obtained in situ. This paper presents the analysis of the variability of the average winds to verify if they are eligible for projects connected to network or independent generation systems with energy storage devices. In this sense georeferenced relief models of terrain and roughness length for purposes of determining numerically the existence of significant wind resource sites were developed.

Keyword: NEA Wind resources, Wetlands wind resources, Wind resources of Provinces of Chaco, Formosa and Corrientes.