



GOBIERNO DE CHILE
COMISION NACIONAL DE ENERGIA

Energías Renovables Energías Renovables Energías Renovables Energías Renovables Energías Renovables Energías Renovables
s Energías Renovables Energías Renovables Energías Renovables Energías Renovables Energías Renovables Energías Renovables

Modelación del recurso solar y eólico en el norte de Chile



MODELACIÓN DEL RECURSO SOLAR Y EÓLICO EN EL NORTE DE CHILE

La presente publicación es un resumen del estudio “Modelación de alta resolución para fines de prospección de energías renovables no convencionales en el norte de Chile”, desarrollado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, por encargo de la Comisión Nacional de Energía. Cualquier referencia, alusión a una empresa, producto, marca, fabricante y otro similar no constituye en ningún caso una recomendación por parte del Gobierno de Chile. Se autoriza la reproducción parcial o total, siempre y cuando se cite la fuente de referencia.

Publicado por:



Comisión Nacional de Energía (CNE)
Avenida Libertador Bernardo O'Higgins 1449
Edificio Santiago Downtown II, piso 13
Santiago, Chile
www.cne.cl

Santiago de Chile, Mayo 2009

Contenido

1. Introducción	3
2. Consideraciones sobre los resultados del estudio	5
3. Descripción de las Simulaciones.....	6
3.1 Modelo aplicado	6
3.2 Dominio computacional.....	6
3.3 Configuración del modelo	8
3.4 Evaluación del modelo	9
4. Resultados	11
4.1 Variables disponibles	11
4.1.1 Viento.....	12
4.1.2 Densidad del Aire.....	12
4.1.3 Temperatura.....	13
4.1.4 Radiación solar global horizontal.....	13
4.2 Mapas disponibles	13
4.3. Información adicional y software de consulta	14
5. Conclusiones.....	15
6. Anexo	18



1. Introducción

En los últimos años Chile ha avanzado en consensuar que los objetivos que deben guiar su política energética son evolucionar hacia mayores niveles de seguridad, eficiencia y equidad en el suministro de energía, y en la sustentabilidad ambiental de la matriz energética nacional.

Varias han sido las medidas emprendidas para el logro de los objetivos anteriores. Entre ellas destacan las tendientes a diversificar las fuentes y proveedores de nuestro suministro energético, en particular mediante la incorporación de energías renovables no convencionales (ERNC) para generación eléctrica, cautelando siempre los criterios de eficiencia que caracterizan al sector eléctrico nacional.

La estrategia adoptada para acelerar la incorporación de las ERNC en Chile, ha consistido en la identificación y eliminación de aquellas barreras de mercado que retardan el desarrollo de las inversiones en esas energías.

Sin lugar a dudas, una de las ERNC que mayor interés concita es la energía eólica, para la cual se están materializando los primeros proyectos de inversión en los sistemas eléctricos, además de una cartera creciente de proyectos en evaluación. Por su parte, si bien la energía solar aún no presenta grados de competitividad en Chile que le permita estar en similares condiciones que la energía eólica, es probable que en el mediano plazo decrezcan los costos

de las tecnologías para su conversión a energía eléctrica a niveles tales que viabilice su desarrollo en el país.

Este trabajo se orienta a mitigar la barrera de ausencia de información sistematizada sobre el potencial de los recursos renovables y su localización, la cual dificulta la identificación de sitios adecuados para el desarrollo de proyectos de ERNC y retrasa su implementación. Se resumen aquí los principales resultados obtenidos por el estudio "Modelación de alta resolución para fines de prospección de energías renovables no convencionales en el norte de Chile"¹, mediante el cual se obtiene información referencial del recurso eólico y solar a través de una modelación del comportamiento de la atmósfera en las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá y Antofagasta, es decir, en la zona cubierta por el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING).

Chile no cuenta con una red de estaciones meteorológicas lo suficientemente densa que permita la evaluación exhaustiva de los recursos señalados, más aún considerando la complejidad topográfica y la diversidad de condiciones climáticas que presenta su territorio. Por tal razón, una aproximación mediante herramientas de simulación numérica, como la utilizada, puede contribuir a orientar sobre el potencial de las energías solar y eólica.

¹ Desarrollado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile para la Comisión Nacional de Energía. Segundo Informe de Avance, de febrero de 2009.

Este trabajo es la primera etapa de un esfuerzo mayor en la evaluación del potencial de esas energías en el país. Por una parte, se ha iniciado una campaña de prospección eólica y solar con estaciones meteorológicas en la zona cubierta por el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING)², la cual permitirá verificar los resultados de las modelaciones realizadas, perfeccionar esos análisis, y entregar información confiable para el desarrollo de proyectos de inversión y de políticas públicas. Por otro lado, están en desarrollo modelaciones para la zona cubierta por el Sistema Interconectado Central.

² Campaña implementada en el marco de un proyecto de cooperación técnica entre los gobiernos de Chile y Alemania, implementado por la Comisión Nacional de Energía y la Agencia Alemana de Cooperación Técnica (GTZ).

Finalmente, es necesario señalar que toda la información generada por los trabajos antes señalados será de acceso público, lo que constituye un elemento diferenciador de servicios similares hoy disponibles a nivel internacional.



2. Consideraciones sobre los resultados del estudio

La modelación desarrollada, mediante el estudio aquí resumido, proporciona información obtenida por cálculos matemáticos a partir de información de mesoescala, de manera independiente de estaciones meteorológicas locales. Ello significa que sus resultados, en particular los relacionados con la magnitud de las variables modeladas, no deben ser considerados plenamente confiables sin ser corroborados previamente con mediciones en situ. Sin perjuicio de lo anterior, la correlación descrita más adelante de las variables modeladas con los registros de algunas estaciones localizadas en la zona, permiten afirmar que las modelaciones realizadas son capaces de definir las variaciones relativas (espaciales y temporales) de las magnitudes de los

parámetros meteorológicos analizados. Es decir, los resultados permitirían identificar aquellas zonas con mejores condiciones del recurso eólico, respecto de aquellas en la cual el potencial no se aprecia relevante, pero no están validados en lo que concierne a los valores absolutos que entregan.



3. Descripción de las Simulaciones

3.1 Modelo aplicado

El modelo numérico utilizado es el “Weather Research and Forecasting Model (WRF)”, el cual representa las variables de la atmósfera (viento, presión, temperatura, etc.) en una grilla tridimensional de alta resolución, cuyos niveles verticales siguen la topografía. El modelo tiene una gama amplia de opciones para las parametrizaciones físicas que representan procesos importantes como por ejemplo, interacciones suelo-atmósfera, radiación solar, física de las nubes, precipitación, y turbulencia. El WRF, mantenido por el NCAR³, es un modelo de escala regional, que usualmente es inicializado y forzado por las condiciones de borde definidas por datos meteorológicos de modelos globales de menor resolución. Además, es una de las herramientas de análisis del potencial ampliamente usada a nivel internacional.

³ National Center for Atmospheric Research, EEUU

3.2 Dominio computacional

El dominio para las simulaciones de resolución espacial de 1km, realizadas para las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá y Antofagasta, corresponde a un área rectangular de aproximadamente 1.000 km de largo (norte-sur) y 400 km de ancho (este-oeste). Dado que la modelación mediante el WRF con esta resolución y extensión constituía un desafío computacional muy significativo, se optó por separar el dominio completo en cuatro ‘sub-dominios’ de aproximadamente 60.000 km² cada uno.

La Figura N° 1 muestra los dominios espaciales cubiertos por la modelación.



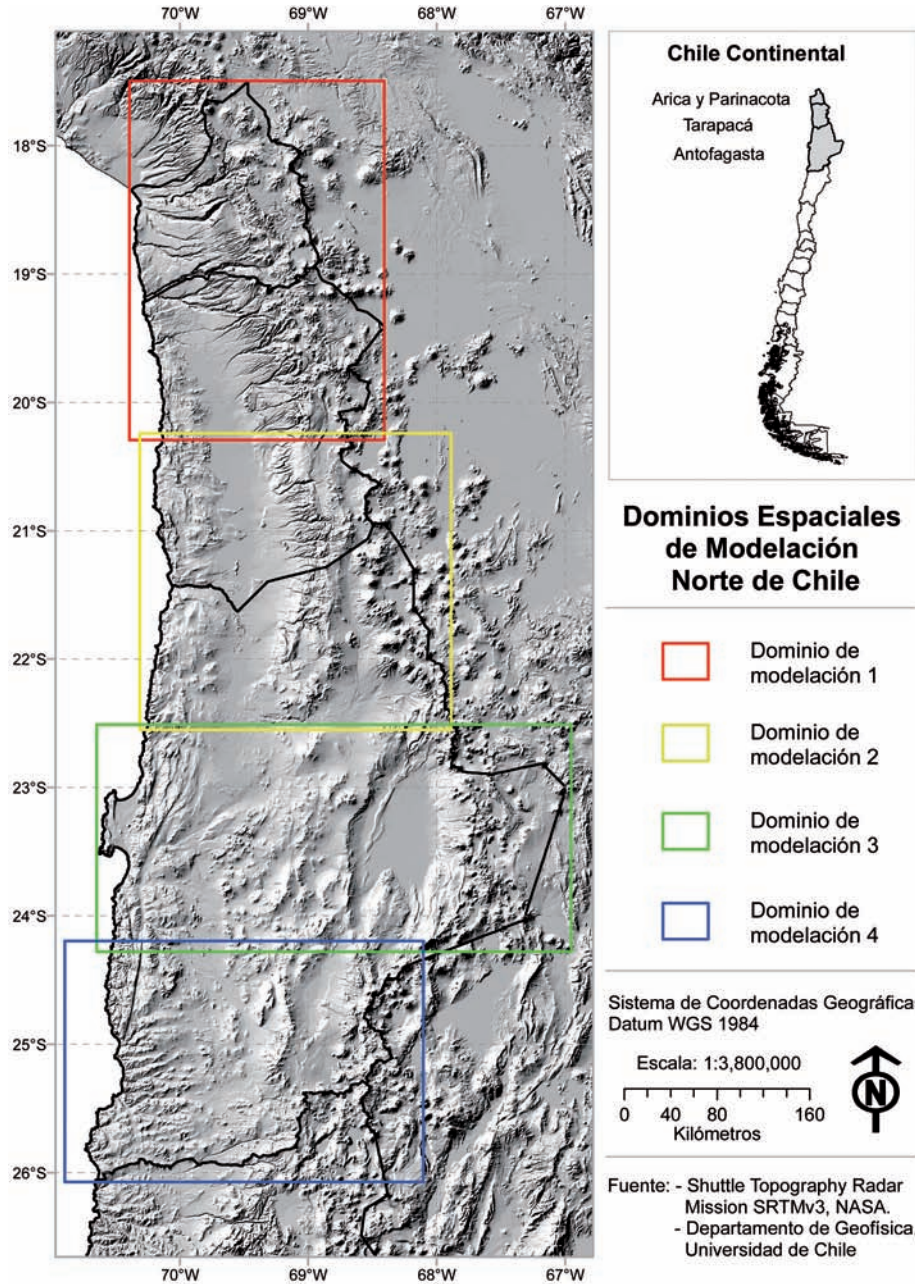


Figura N° 1.
Dominios computaciones para las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá y Antofagasta

3.3 Configuración del modelo

El modelo WRF permite varias opciones para las parametrizaciones físicas que representan los procesos atmosféricos que afectan de manera significativa el viento cerca de la superficie terrestre. Las más importantes de ellas son la representación del suelo, la física de la capa límite y el esquema de radiación. La tabla 1 detalla las características principales adoptadas por el modelo.

Los periodos de simulación considerados corresponden a los meses de marzo, junio, septiembre y diciembre del año

2006. Ello permitió compatibilizar los demandantes requerimientos computacionales asociados a la modelación, con la representación del comportamiento estacional de las variables simuladas.

Por su parte, se seleccionó el año 2006, pues para ese año se contaba con registros en la mayoría de las estaciones meteorológicas recopiladas en la zona, información que fue utilizada para evaluar el comportamiento del modelo.

Tabla 1. Características principales del modelo WRF para las simulaciones en el Norte Grande.

Dominio	
Resolución horizontal	1.000 m y 3.000 m
Niveles verticales	31
Altura del tope del dominio	15 km
Espaciamiento en superficie	25 m
Espaciamiento en el tope del dominio	2.000 m
Proyección del Mapa	Mercator
Física	
Esquema de radiación	Goddard (onda corta) y RRTM (onda larga)
Modelo del suelo	Noah 4 layer scheme
Tratamiento de capa superficial	Monin-Obukhov Similaridad
Parametrización de la Capa Limite	Esquema YSU
Esquema de convección	Kain-Fritsch
Microfísica de nubes y precipitación	WSM (3 especies microfísicas)
Parametrización de turbulencia	Smagorinsky (primer orden)
Integración Temporal	
Periodo de simulación	Diciembre, Marzo, Junio y Septiembre de 2006

3.4 Evaluación del modelo

Los resultados proporcionados por las simulaciones se correlacionaron con los registros obtenidos en 24 estaciones meteorológicas ubicadas en la zona analizada. Dicha información fue proporcionada por distintas instituciones públicas y privadas con el fin de evaluar las simulaciones.

Aunque todas las estaciones cuentan con registros de viento (magnitud y dirección), sólo 18 tienen registros de temperatura y 9 de humedad.

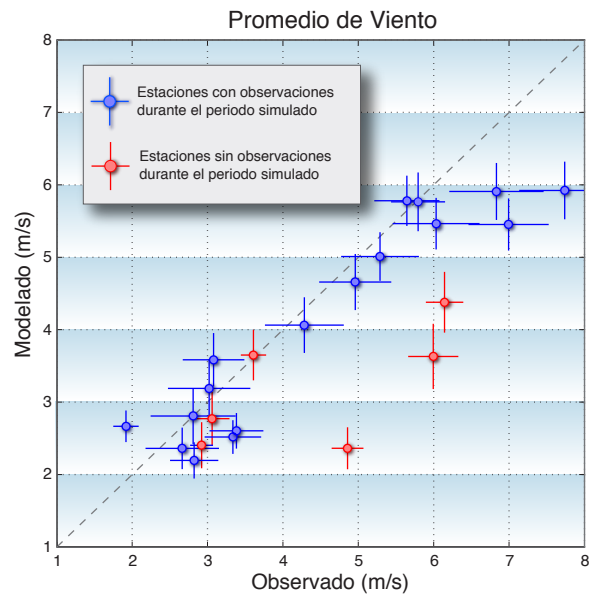
Los campos de viento, temperatura y humedad del modelo, están disponibles en intervalos de una hora y fueron interpolados a las ubicaciones de las 24 estaciones meteorológicas. La mayoría de las estaciones miden el viento a 10 metros sobre la superficie. En esos casos, el viento fue comparado directamente con el viento simulado y estimado por el modelo a esa altura. Por su parte, algunas estaciones tienen registros de viento a 20 o 30 metros sobre el nivel del suelo, en cuyo caso se compararon con los resultados obtenidos para el modelo a 25 metros sobre el nivel del suelo. Para la temperatura y humedad se utilizaron los valores en 2 m de altura.

La evaluación se realizó comparando valores promedios, máximos y mínimos de las variables modeladas con los registros de las estaciones meteorológicas. De esta manera se puede formar conclusiones sobre la confiabilidad de la información presentada. La evaluación considera el periodo entero, esto es, el conjunto de los cuatro meses simulados.

En la figura 2 se puede apreciar la buena correlación obtenida entre el viento observado en las estaciones meteorológicas y el simulado por el modelo.

Figura 2

Correlación entre promedios de velocidad de viento medidos y modelados.



Adicionalmente, de la evaluación realizada se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El viento modelado aumenta más o menos linealmente con el viento observado, indicando que el modelo tiene una buena capacidad de diferenciar entre las zonas de mayor y menor viento.
- Sin embargo, el modelo tiende a subestimar el viento, especialmente en las estaciones con viento promedio relativamente fuerte.
- En general, el promedio del mínimo diario está bien simulado por el modelo, con un sesgo entre -0.5 y $+0.7$ m/s, lo cual indica que el modelo captura bien el mínimo en el ciclo diario del viento.
- Sin embargo, el promedio del máximo diario es subestimado en todas las estaciones. Los errores más grandes indican que el modelo tiene dificultades en representar el aumento del viento de la tarde debido al desarrollo de flujos 'cuesta arriba' generados en respuesta al calentamiento de la tierra.
- La variabilidad inter-diaria del viento está levemente subestimada por el modelo, lo cual es consistente con su subestimación del viento en promedio.

Por su parte, para la evaluación de las simulaciones de radiación solar se contó con escasa información de registros de estaciones meteorológicas. Por tal razón, no se pudo realizar una comparación de la amplitud hecha para el caso del viento. Sin perjuicio de ello, como una aproximación, las mediciones de radiación solar obtenidas en la estación localizada en Pozo Almonte⁴ en la región de Tarapacá durante los meses de septiembre y diciembre de 2008, se puede comparar con los valores obtenidos en las modelaciones. Como se puede apreciar en la Tabla 2, para la radiación solar global horizontal, el modelo aparentemente estaría subestimando la magnitud de esta variable.

⁴ Esta estación se encuentra operativa desde fines de julio de 2008, y forma parte de un proyecto de cooperación técnica entre los gobiernos de Chile y Alemania, que implementan la Comisión Nacional de Energía y la Agencia de Cooperación Técnica Alemana (GTZ). Los registros de esta estación están disponibles en www.cne.cl.

Tabla 2. Comparación entre radiación solar global horizontal modelada y medida.

kWh/(m ² día)	Modelo	Medición
Septiembre	7,21	7,14
Diciembre	8,06	8,26
Marzo	7,2	7,16

4. Resultados

Los resultados que la modelación proporciona, abarcan diversas variables meteorológicas. Sin embargo, dado el volumen de la información computacional involucrada, se encuentran disponibles para acceso público aquellos resultados que entregan la información más relevante a la evaluación del recurso eólico y solar.

Dicha información se encuentra resumida para cada mes simulado y para el periodo entero analizado, en mapas de alta resolución y en archivos de entrada para el software de acceso libre Google Earth, lo que permite su despliegue en un sistema de información geográfico.

Adicionalmente, se ha desarrollado una plataforma WEB para consultar sobre los resultados de las modelaciones en los puntos geográficos de interés del usuario, mediante la generación de un reporte con un resumen estadístico

del comportamiento de cada variable meteorológica disponible. Asimismo, es posible descargar la serie de datos horaria de las variables modeladas en la localización de interés.

Tanto los mapas como el software señalado anteriormente están disponibles en la página WEB de la Comisión Nacional de Energía en el “banner” titulado “Explorador eólico-solar del norte de Chile”.

4.1 Variables disponibles

La Tabla 3 resume las variables disponibles para los usuarios interesados. Las estadísticas se calculan en base a datos horarios, para los cuatro periodos mensuales (marzo, junio, septiembre, diciembre) y para el periodo

Tabla 3
Variables disponibles de las modelaciones realizadas

Variable	Código	Niveles	Estadísticas	Unidades	Resolución
Velocidad del viento	vel	10m, 75m, 150m	Promedio Máxima Máxima diaria Mínima Mínima diaria Variabilidad inter-diaria	m/s	1km
Densidad del aire	dens	75m	Promedio	kgm-3	3km
Temperatura	tmp	2m	Promedio Máxima diaria Mínima diaria	°Celsius	3km
Radiación Global Horizontal	rad	Superficie	Promedio Máxima diaria Mínima diaria	kWh m-2 día	3km

entero (es decir, usando los cuatro meses simulados en conjunto).

La figura 3 muestra gráficamente el significado de cada estadística obtenida sobre los datos simulados. El gráfico muestra una serie de un mes de datos del modelo WRF extraído para un punto de grilla cercano a Calama, donde el viento tiene un fuerte ciclo diario, usualmente con una máxima en la tarde y una mínima en la noche. La línea delgada azul representa la serie completa de valores con intervalo de una hora. El promedio, es simplemente el valor promedio de la serie, lo cual se indica arriba con una línea horizontal azul.

4.1.1 Viento

Están disponibles los resultados modelados para la magnitud del viento a 10 m, 75 m y 150 m sobre el nivel del suelo con una resolución espacial de

1km. Este parámetro es calculado por el modelo WRF en cada paso de integración aplicando la teoría de la similitud.

Dado que las características del suelo en el norte grande son bastante homogéneas, se utilizó un valor constante para representar la rugosidad de 10 m, equivalente al valor recomendado por la USGS⁵ para terrenos desérticos.

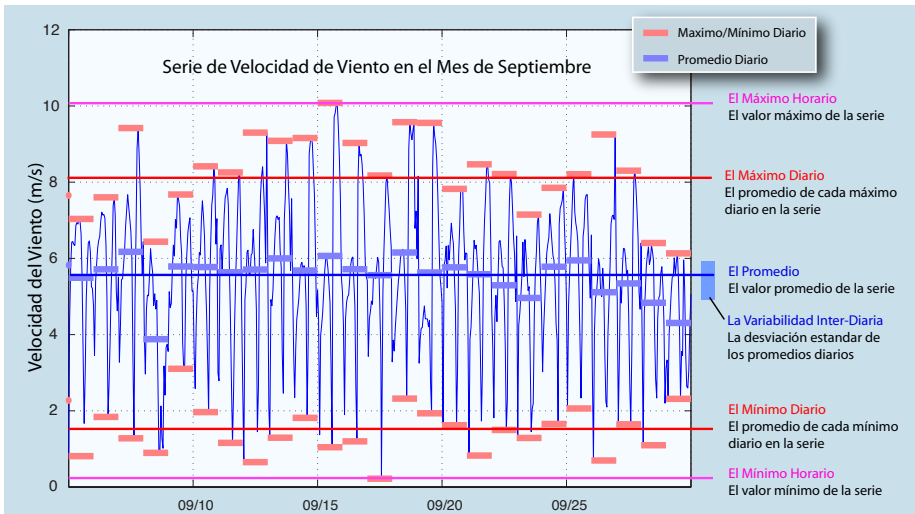
En el anexo se incluye el mapa de velocidad de viento para 75m sobre el nivel del suelo.

4.1.2 Densidad del Aire

La densidad del aire se calculó en base a la simulación del modelo de presión y temperatura, usando la ley de los

Figura 3
Ejemplo de estadísticas relativas a la serie de datos modelada.

⁵ United States Geological Survey



gases ideales dado que es una buena aproximación para la troposfera:

$$\rho = \frac{P}{R T}$$

Donde P es la presión (Pa) y T es la temperatura (K) y la constante universal de los gases ideales R, cuyo valor es de 286.9 (Nm/kgK). Dado que el norte de Chile es un lugar subtropical, caracterizado por presiones y temperaturas muy estables, en la mayoría de los lugares la densidad del aire exhibe poca variabilidad temporal –usualmente menos de 5%– respecto de su valor promedio. El valor promedio depende principalmente de la altura, variando entre 1.225 kg./m³ en la costa y ~0.6 kg./m³ a 5000m de altura en la cordillera.

En el anexo, se puede apreciar un mapa con el valor promedio simulado de la densidad del aire presente en el norte grande en una resolución espacial de 3 km.

4.1.3 Temperatura.

La temperatura está disponible a 2 m sobre la superficie. Esta variable es calculada por el modelo WRF en base a la interacción entre la superficie de la tierra (o mar) y la atmósfera. La temperatura de la superficie depende principalmente del calentamiento (durante el día) y enfriamiento (durante la noche), por lo que está muy influenciada por las propiedades térmicas (capacidad calorífica, albedo, etc.) que se asumen para la tierra.

En el anexo, se puede apreciar un mapa con el valor promedio simulado de la temperatura presente en el norte grande en una resolución espacial de 3 km.

4.1.4 Radiación solar global horizontal.

La radiación global horizontal se define como la energía total de la radiación solar directa y difusa que incide sobre el plano horizontal modelado, es decir, la superficie terrestre.

La radiación se calcula usando la parametrización de Dudhia⁶ que toma en cuenta las interacciones de la radiación con el aire (absorción y dispersión), vapor de agua (absorción) y nubes (absorción y reflexión). También ocupa perfiles climatológicos de ozono y aerosoles para tomar en cuenta su efecto en la transferencia de radiación. En el anexo, se puede apreciar un mapa con el valor promedio simulado de la radiación solar presente en el norte grande en una resolución espacial de 3 km.

4.2 Mapas disponibles

Los principales resultados disponibles corresponden a mapas de alta resolución (1km y 3km) que resumen los resultados obtenidos en la modelación del recurso eólico y solar del Norte Grande en los cuatro sub-dominios considerados. Asimismo, se entregan mapas de densidad del aire y de temperatura.

⁶ Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model, *J. Atmos. Sci.*, 46, 3077–3107.

Como se señaló, en el anexo se pueden apreciar algunos mapas de las variables simuladas. La escala de colores representa el valor de la variable graficada (por ejemplo, la magnitud del viento en m/s). Las líneas negras en los mapas representan la línea de costa, las fronteras internacionales y regionales. Los contornos grises representan las curvas de nivel con intervalo de 250 m. El panel a la derecha identifica la variable graficada y define el mes correspondiente. El término 'Periodo Entero' se entiende como los cuatro meses de simulación (marzo, junio, septiembre y diciembre) en conjunto.

Los mapas para la totalidad de las variables señaladas en la tabla 3, están disponibles en la página WEB de la Comisión Nacional de Energía, en formatos PDF (alta resolución) y en archivo KMZ, que permite su despliegue de forma georreferenciada respecto a la información geográfica del norte grande proporcionada por el software de acceso libre Google Earth.

4.3. Información adicional y software de consulta

Como parte del trabajo aquí descrito, se ha desarrollado una plataforma WEB para consultar sobre los resultados de las modelaciones disponibles, ubicada en la página WEB de la Comisión Nacional de Energía. En dicha plataforma, en la actualidad, es posible desplegar los mapas de valores promedio de magnitud de viento a 75 m sobre el nivel del suelo y de radiación solar global horizontal.

Asimismo, para cada punto perteneciente al dominio de modelación, se pueden consultar los resultados de las distintas variables meteorológicas obtenidas en las modelaciones. La respuesta a cada consulta se efectúa mediante un reporte en PDF, el que detalla el comportamiento de las variables requeridas mediante algunas estadísticas tales como valores promedios, máximos y mínimos entre otros. Si se requiere mayor información, el usuario puede obtener, en dicha consulta, la serie de datos completa de las variables requeridas. Esto corresponde a un archivo de texto con valores horarios de las variables en el periodo de tiempo considerado por el modelo: los cuatro meses simulados del año 2006.



Foto: GTZ

5. Conclusiones

El estudio “Modelación de alta resolución para fines de prospección de energías renovables no convencionales en el norte de Chile”, aquí resumido, es el primer esfuerzo de simulación del comportamiento del recurso eólico y solar en el Norte Grande de Chile cuyos resultados son de acceso público. Corresponde a la primera etapa de un trabajo, impulsado por el Comisión Nacional de Energía, que pretende simular el comportamiento de dichas fuentes de energía en las zonas cubiertas por los dos principales sistemas eléctricos nacionales (SIC y SING), y que está siendo complementado por una campaña de prospección eólica y solar en el Norte Grande.

Si bien los resultados de cualquier modelación del comportamiento de la atmósfera no deben ser considerados como exactos sin ser corroborados previamente con mediciones in situ, al menos la comparación de los resultados de la modelación del viento, obtenida de este trabajo, con las mediciones disponibles, sugieren una buena correlación.

El modelo aún cuando entrega valores referenciales, logra delimitar zonas que potencialmente podrían ser aptas para el desarrollo de proyectos eólico, ello sin considerar las posibles restricciones técnicas, ambientales y de usos productivos que podrían existir en dichas zonas.

Varias de esas zonas son de gran extensión y sus condiciones topográficas permitirían el desarrollo de parques eólicos que en conjunto tendrían una capacidad instalada de varios miles de megawatts.

En general, las áreas de mayor tamaño que son señaladas por las modelaciones como potencialmente interesantes, se encuentran mayoritariamente en la Región de Antofagasta. Entre ellas destacan las cercanas a Calama (figura 4) y la zona próxima al límite con la región de Atacama (figura 5).

Por su parte, los resultados de las modelaciones confirman que el recurso solar disponible en el Norte Grande presenta excelentes condiciones, sólo disminuidas en la zona costera, por efecto de la mayor nubosidad presente, y en el área influenciada por el invierno altioplánico.

De confirmarse los resultados de este trabajo con la campaña de prospección eólica y solar antes señalada, el potencial para generación eléctrica con estas energías en el SING sería muy significativo. Sin embargo, su desarrollo estará condicionado por límites técnicos asociados a la capacidad del SING de



Figura 4
Mapa de magnitud de viento a 150 m sobre el nivel del suelo, en el entorno de Calama

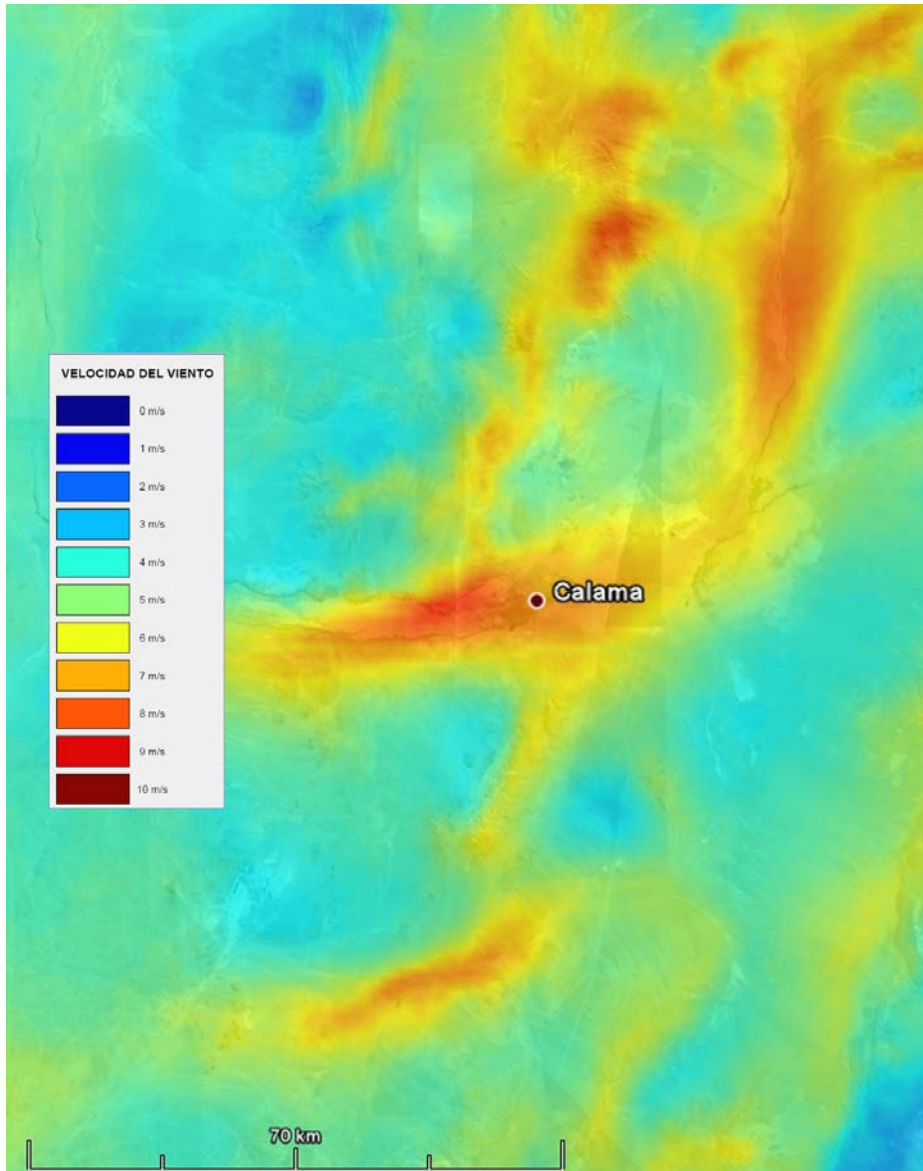
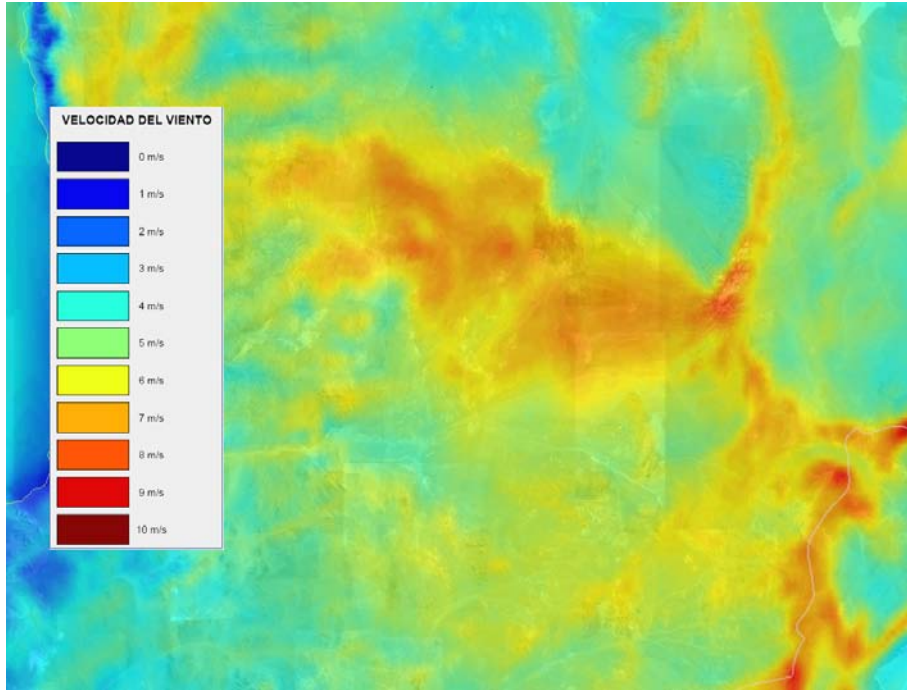


Figura 5

Mapa de magnitud de viento a 150 m sobre el nivel del suelo, en la zona sur de la región de Antofagasta



incorporar energía intermitente sin afectar la calidad y seguridad del suministro eléctrico.

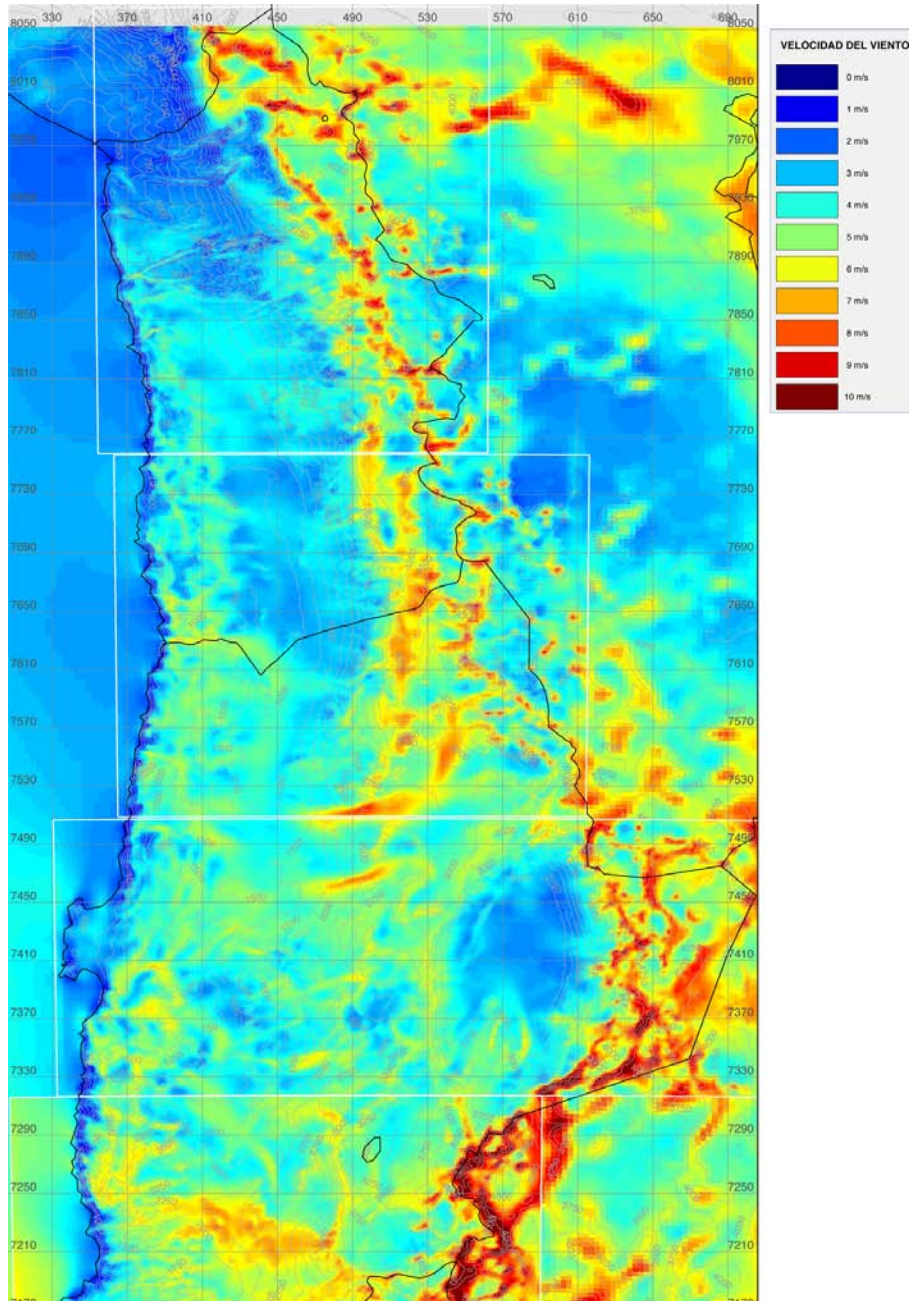
costos que las haga competitivas en el país, situación que puede cambiar en un futuro cercano.

También se requiere que la oferta tecnológica se adecue a las necesidades detectadas. Por una parte, no existe un amplio mercado de proveedores de aerogeneradores con tecnologías probadas operacionalmente en altitudes sobre los 2.000 metros, como a las que están la mayoría de las zonas más prometedoras señaladas por el estudio. Por otra parte, las tecnologías para la conversión de la energía solar a energía eléctrica aún no alcanzan un nivel de



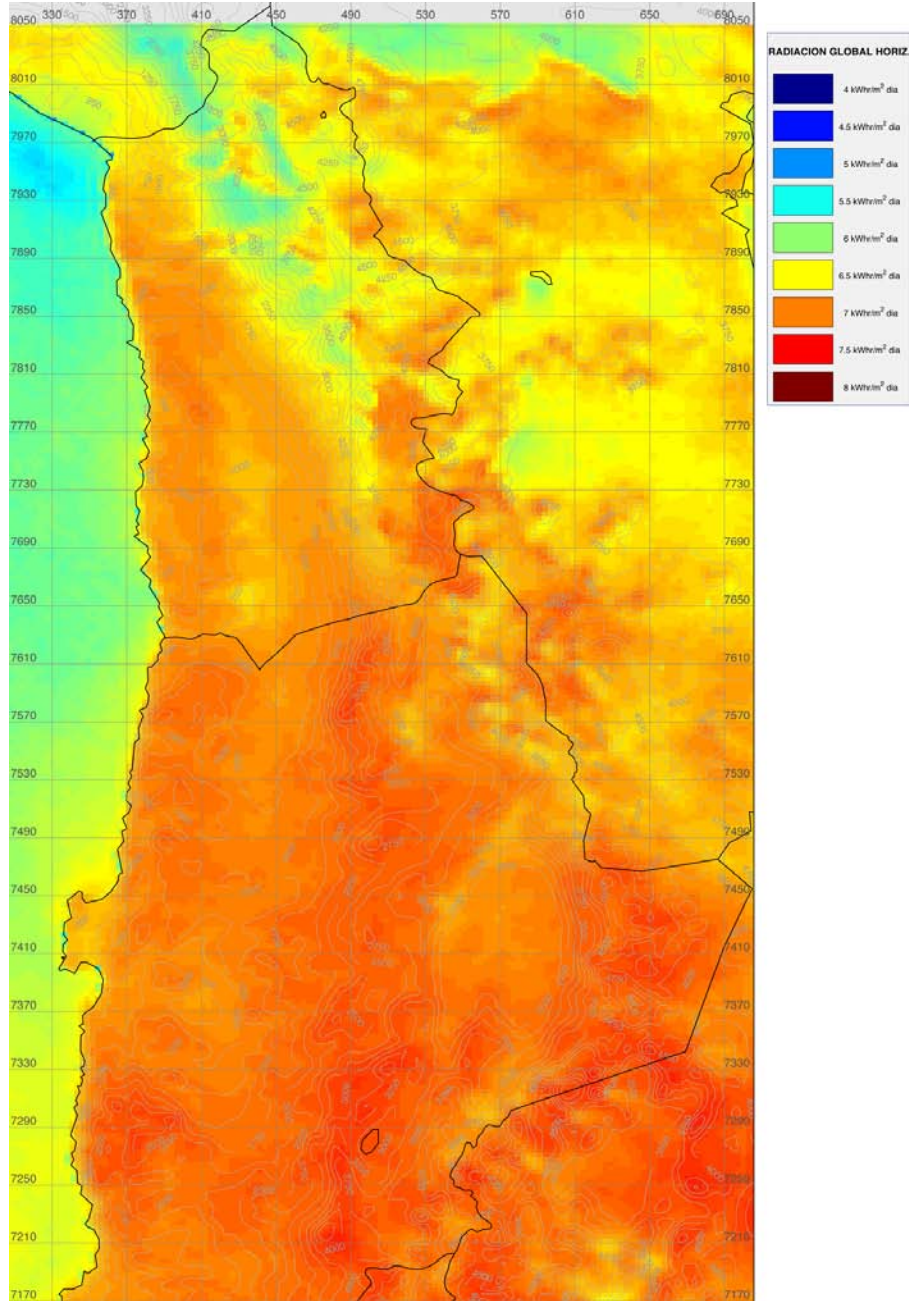
6. ANEXO: Mapas con promedio de las principales variables modeladas.

Velocidad de viento promedio.
Norte Grande. Promedio diario a 75m de altura, periodo entero de 2006



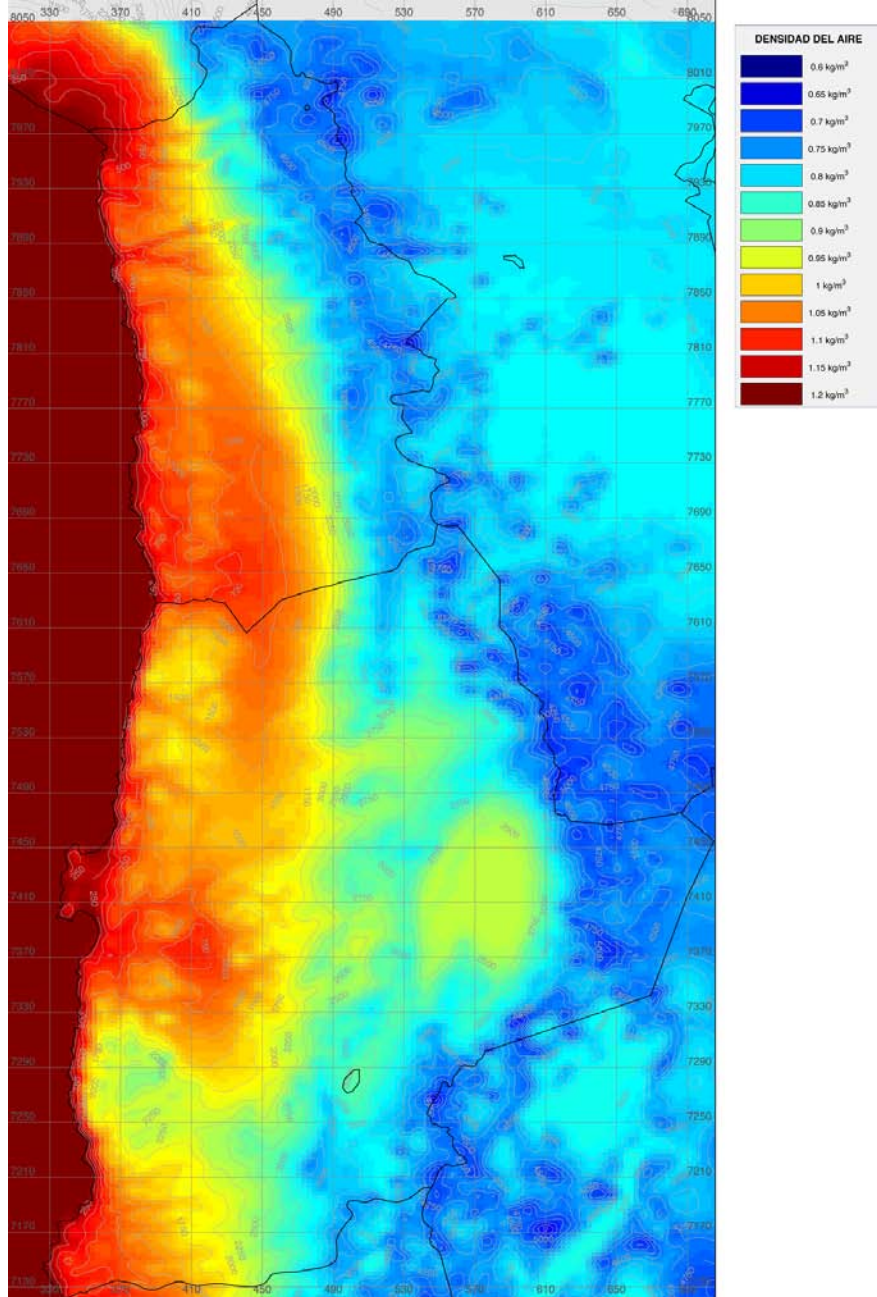
Radiación global horizontal.

Norte Grande. Promedio diario a nivel de suelo, periodo entero de 2006



Densidad del aire promedio.

Norte Grande. Promedio diario a 75m de altura, periodo entero de 2006



Temperatura.

Norte Grande. Promedio diario a 2m de altura, periodo entero de 2006

