

PROYECTO EÓLICO/DESCRIPCIÓN DE LOS CAMPO HIRLAM

ANEXO 6

DESCRIPCIÓN DE MODELO HIRLAM

DESCRIPCIÓN DE LOS CAMPOS METEOROLÓGICOS HIRLAM

Los datos meteorológicos empleados en este estudio corresponden a interpolaciones dinámicas de campos de reanálisis del Centro Europeo para el Pronóstico del Tiempo de Mediano Alcance (*European Center for Medium Range Weather Forecast*, ECMWF), usando la metodología descrita por Räisänen et al (2001). Estos campos fueron calculados por especialistas del Instituto de Hidrología y Meteorología de Suecia (SMHI) con el fin de proveer campos meteorológicos para el estudio de la dispersión regional de azufre oxidado y arsénico en Chile norte y central, en el contexto de proyectos desarrollados entre SMHI y la Comisión Nacional del Medio Ambiente CONAMA entre los años 1998 y 2000 (e.g., Gallardo et al, 2000; Gidhagen et al, 2000; Gallardo et al, 2002; Gidhagen et al, 2002; Olivares et al, 2002). Estos proyectos entregaron una serie de conjuntos de datos meteorológicos validados que cubren varias condiciones meteorológicas típicas de Chile central y norte, incluyendo condiciones extremas en años de El Niño y La Niña, con una resolución temporal de 3 horas y una resolución espacial en la horizontal de 11 km que puede ser usado en una variedad de aplicaciones.

En lo que sigue se describe la herramienta de interpolación dinámica, esto es, el modelo meteorológico de área limitada HIRLAM (*High Resolution Limited Area Model*, Undén et al, 2002). Luego se resumen los resultados de las evaluaciones que se han hecho de los datos contrastándolos con observaciones y se discute su representatividad para los fines de este estudio.

1 Herramienta de interpolación dinámica

El modelo que se utilizó como herramienta de interpolación dinámica para obtener campos tridimensionales con una representación más detallada de fenómenos meteorológicos es el modelo de grilla HIRLAM (www.knmi.nl/HIRLAM, Undén et al, 2002).

Este modelo es el HIRLAM es el resultado de la cooperación desde 1985 entre los institutos meteorológicos en Dinamarca, Finlandia, Islandia, Irlanda, Los Países Bajos, Noruega, España y Suecia. También hay colaboración con Météo-France. La mayoría de los participantes usan, total o parcialmente, a HIRLAM como el modelo numérico de pronóstico del tiempo. Una versión de referencia de HIRLAM se mantiene en Centro Europeo de pronóstico.

La versión básica de HIRLAM consiste en un modelo de grilla hidrostático pero las últimas versiones tienen formulaciones no hidrostáticas. Las resoluciones usadas en el pronóstico operacionales van desde 55 a 5 km de paso horizontal y 16 a 31 niveles en la dirección vertical. El sistema de coordenadas empleado es, en la horizontal, grillas de latitud-longitud rotadas. La coordenada vertical es una coordenada híbrida que combina coordenadas de razón de presión o sigma ($\sigma=p/p_s$) cerca de la superficie y de presión (p) en altura, llamada coordenada eta (η). La coordenada η es tal que:

$$p_i = \alpha(\eta) + \beta(\eta) * p_s$$

donde p_s es la presión en superficie. Los coeficientes α y β se eligen de modo que cerca de la superficie η sea σ y en altura p. Estas coordenadas tienen la ventaja de seguir la topografía cerca de la superficie y una representación de coordenadas de presión en altura.

El paso temporal es semi-implícito, euleriano o semi-lagrangiano. La mezcla turbulenta en la vertical se representa por un esquema de clausura de segundo orden

(Cuxart et al., 2000). Los procesos de nubes se representan en base al esquema de Sundqvist que tratan las variables de agua en todas sus fases como variables de pronóstico (Sass et al., 1999). Los procesos de superficie se tratan con un esquema de dos capas para los que se incluyen caracterizaciones de hielo, nieve y humedad del suelo. El modelo se inicializa con campos analizados. Las condiciones de borde laterales se obtienen del modelo global de pronóstico del ECMWF. Ver detalles en Undén et al (2002).

La interpolación dinámica consiste en calcular campos tetradimensionales (tiempo y espacio) de mayor resolución espacial y temporal usando condiciones de borde laterales provistas por un modelo de menor resolución como describen Räisänen et al (2001). De esta manera se capturan, en este caso, las características de gran escala (sinópticas) de los campos meteorológicos a través de imponer condiciones de borde y se mejora la representación de los campos a escala regional resolviendo las mismas ecuaciones en grillas espacio-temporales más pequeñas. Este proceso de interpolación dinámica se ilustra en la Figura 1.

Se realizaron un total de 10 simulaciones de un mes de duración y en cada uno de ellos el modelo fue alimentado cada 6 horas con condiciones de borde laterales y temperatura superficial del mar del ECMWF, con una resolución espectral equivalente a un paso de grilla horizontal de aproximadamente 50 km o 0.5°. La resolución vertical de estos campos era de 31 niveles en 1997 y 1998, 50 niveles en 1999 y 60 niveles desde entonces. Los campos de salida tienen una resolución espacial de aproximadamente 11 km en la horizontal. En la dirección vertical se resuelven 31 niveles. El dominio de los campos HIRLAM era de 126x152x31 grillas para los campos de 1997 y 1998 y de 126x250x31 grillas para los campos restantes. De modo que cubren Chile desde Antofagasta/Arica hasta Valdivia en los períodos respectivos. La base de datos está constituida por diez períodos de un mes cada uno con una resolución temporal de 3 horas (Tabla 1). La resolución espacial de los campos es 0.1° de latitud y longitud y 31 niveles en la dirección vertical desde la superficie hasta la estratósfera baja (ca. 26 km de altitud).

Tabla 1. Datos HIRLAM disponibles. Se indican los períodos simulados así como el dominio horizontal correspondiente.

Período		Dominio	
Fecha de Inicio	Fecha de Término	Latitud	Longitud
16 Mayo de 1997	16 Junio de 1997	24.9 - 40	63 - 75.5
01 Enero de 1998	28 Enero de 1998	24.9 - 40	63 - 75.5
01 Mayo de 1998	31 Mayo de 1998	24.9 - 40	63 - 75.5
15 Junio de 1999	15 Julio de 1999	15.1 - 40	62.95 - 75.45
01 Octubre de 1999	31 Octubre de 1999	15.1 - 40	62.95 - 75.45
21 Noviembre de 1999	20 Diciembre de 1999	15.1 - 40	62.95 - 75.45
16 Enero de 2000	15 Febrero de 2000	15.1 - 40	62.95 - 75.45
20 Julio 2000	21 Agosto de 2000	15.1 - 40	62.95 - 75.45
15 Septiembre de 2000	15 Octubre de 2000	15.1 - 40	62.95 - 75.45

2 Características y representatividad de los datos

El desempeño del modelo numérico de pronóstico del tiempo HIRLAM ha sido extensa y profusamente evaluado dados sus usos científicos y operacionales en Europa. Además, fue evaluado respecto de sus corridas para Chile en el contexto de los proyectos de “Dispersión regional de Azufre Oxidado en Chile Central usando el sistema HIRLAM-MATCH” (Gallardo et al., 2000) y de “Determinación de la línea base nacional de

contenido de arsénico en material particulado respirable” (Gidhagen et al, 2000). En estos estudios se hicieron evaluaciones de la capacidad de HIRLAM de reproducir las condiciones sinópticas observadas y las condiciones de transporte y estabilidad en la capa límite. El primer aspecto fue evaluado contra las observaciones sinópticas provistas por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) a lo largo de todo el país (Cf. Figura 2). El segundo aspecto fue evaluado in extenso para la cuenca de Santiago donde se contaba con una veintena de estaciones, incluyendo un perfilador vertical de viento y temperatura en la zona sur de la ciudad (Cf. Figura 3). Algunas comparaciones fueron realizadas con observaciones en superficie para la zona norte del país según se describe en Gidhagen et al (2000) y Gidhagen et al (2002). En aplicaciones ulteriores de estos datos se ha continuado con su evaluación (e.g., Huneus, 2003).

Las evaluaciones realizadas indican que, en la escala regional, HIRLAM captura las variaciones sinópticas como el paso de frentes, bajas costeras y transiciones entre altas y bajas presiones. Asimismo, en modo climatológico, HIRLAM logra describir la variabilidad estacional de los patrones de viento, nubosidad y precipitaciones. Cerca de la superficie, el modelo muestra en la rapidez del viento una tendencia a sobrestimar los valores en invierno y subestimarlos en verano y esto se asocia a una tendencia a subestimar la nubosidad baja durante el invierno (Cf. Figura 4).

HIRLAM tiende a subestimar la rapidez del viento en la zona norte de Chile (e.g., Arica, Iquique, Calama y Antofagasta) y sobrestimarlas en la zona sur (e.g., Concepción, Chillán y Temuco), particularmente en los meses estivales. Esto se atribuye a una representación inadecuada de las características de los suelos subyacentes (que se supusieron rurales en todo el dominio) y en el balance de energía en superficie. En el caso de la dirección del viento en superficie se encuentran diferencias mayores entre las simulaciones y las observaciones. Sin embargo, estas diferencias son de la misma magnitud que las diferencias observadas entre estaciones vecinas, al menos en la cuenca de Santiago. Esto indica que los resultados del modelo son tan buenos como pueden ser dada su resolución ($11 \times 11 \text{ km}^2$) y que efectos topográficos de pequeña escala gobiernan las diferencias en dirección observadas. Las comparaciones con los perfiles verticales en La Platina (33.51°S , 70.53°W , 620 m.s.n.m.) muestran que el acuerdo entre los valores observados y modelados de dirección e intensidad del viento son mucho mejores a partir de unos cien metros sobre la superficie (Cf. Figure 5). Se debe destacar que el modelo captura las frecuentes bajas costeras tan características de Chile central y norte (Cf. Figura 6). Y en general representa bien las características regionales de los campos meteorológicos (Cf. Figure 7).

Para los fines de la aplicación en estudio, dado que en general la rapidez del viento cerca de la superficie es bien simulada (Error cuadrático medio inferior a 2 m/s, típicamente del orden de 1 a 1.5 m/s para rapideces típicas de algunos m/s) estos campos debieran servir para poder caracterizar los potenciales eólicos de Chile norte y central. Para zonas específicas, tanto los campos de HIRLAM como los MM5 se pueden mejorar a través de un procedimiento de interpolación cinemática desde 11 a 2 o 3 km que fuerza al campo de vientos a seguir la topografía y asimila datos observados y que se implementó antes en CENMA (CENMA, 2001).

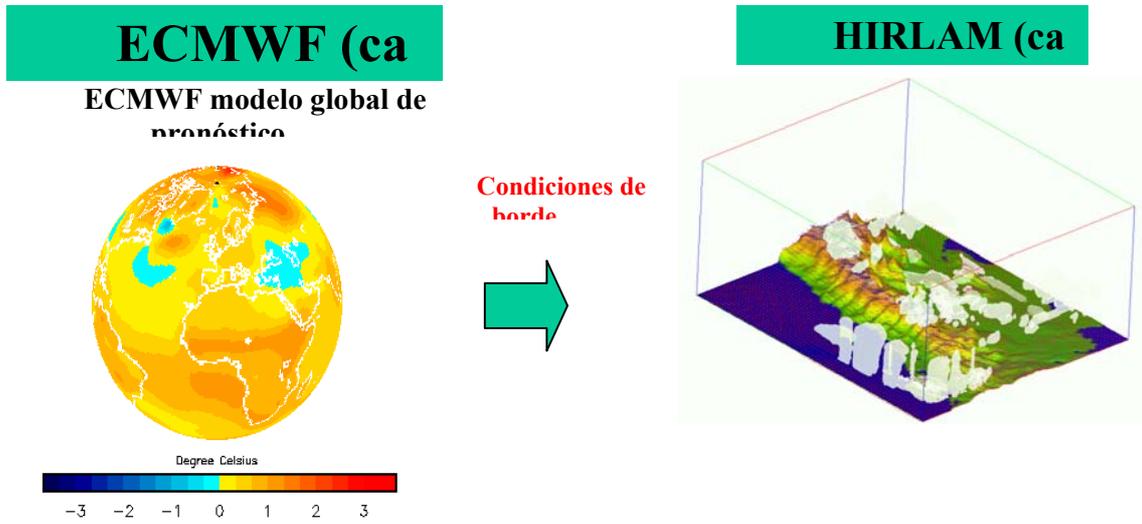


Figura 1. Esquema que ilustra el sistema de interpolación dinámica usado para generar los campos meteorológicos.

PROYECTO EÓLICO/DESCRIPCIÓN DE LOS CAMPO HIRLAM

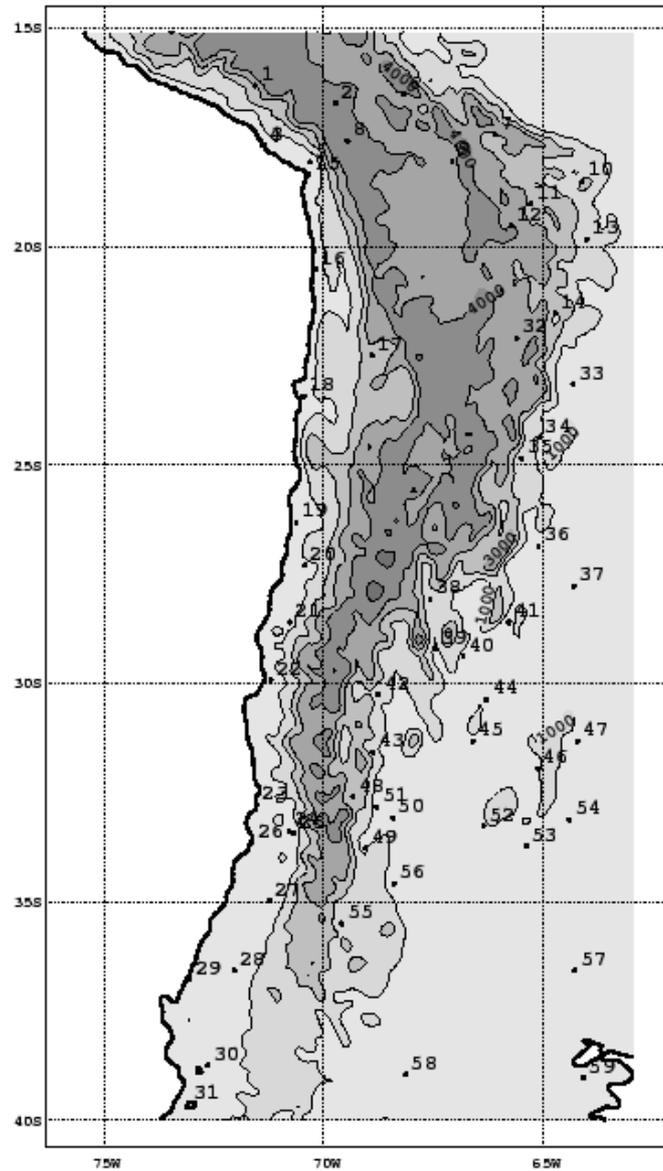


Figura 2. El dominio del modelo HIRLAM aplicado en Chile y las estaciones sinópticas que reportan a la Organización Mundial de Meteorología (OMM) y que se han usado para validar el modelo.

PROYECTO EÓLICO/DESCRIPCIÓN DE LOS CAMPO HIRLAM

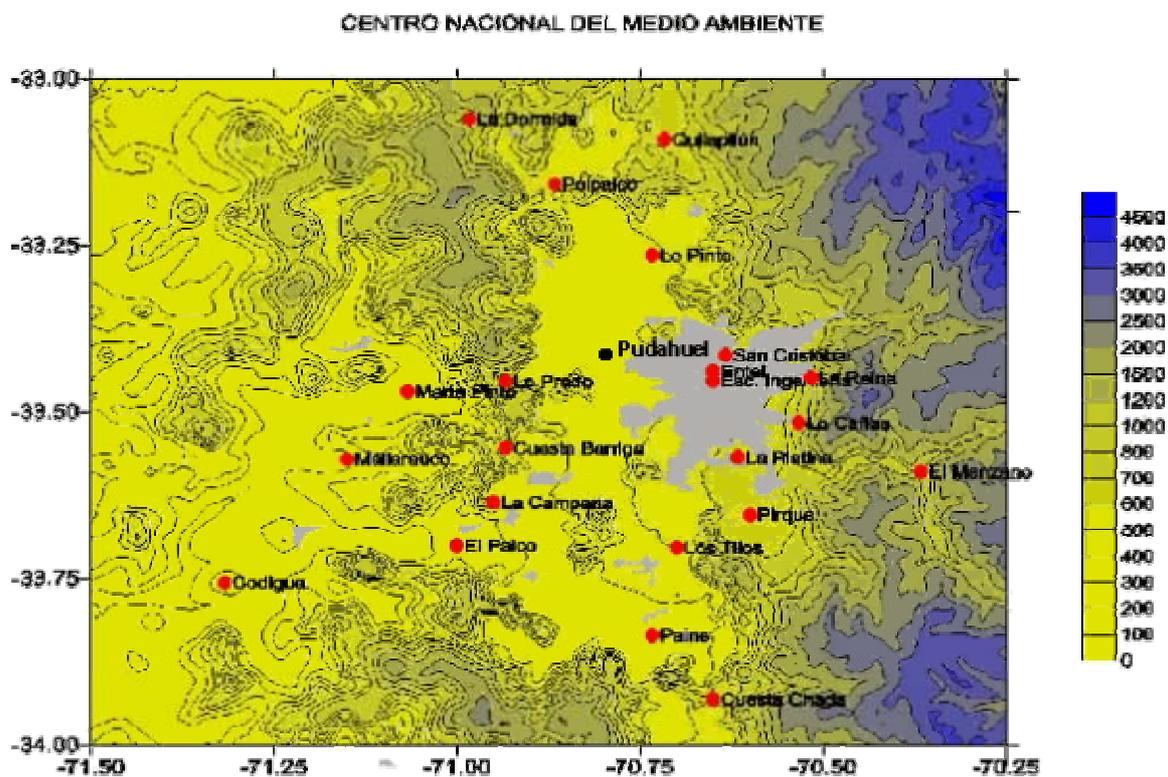


Figura 3. Mapa de las estaciones en la zona de Santiago usadas para la evaluación del modelo. Estas estaciones son manejadas por el Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA). También se muestra en el mapa la estación Pudahuel (Estación de la OMM número 24).

PROYECTO EÓLICO/DESCRIPCIÓN DE LOS CAMPO HIRLAM

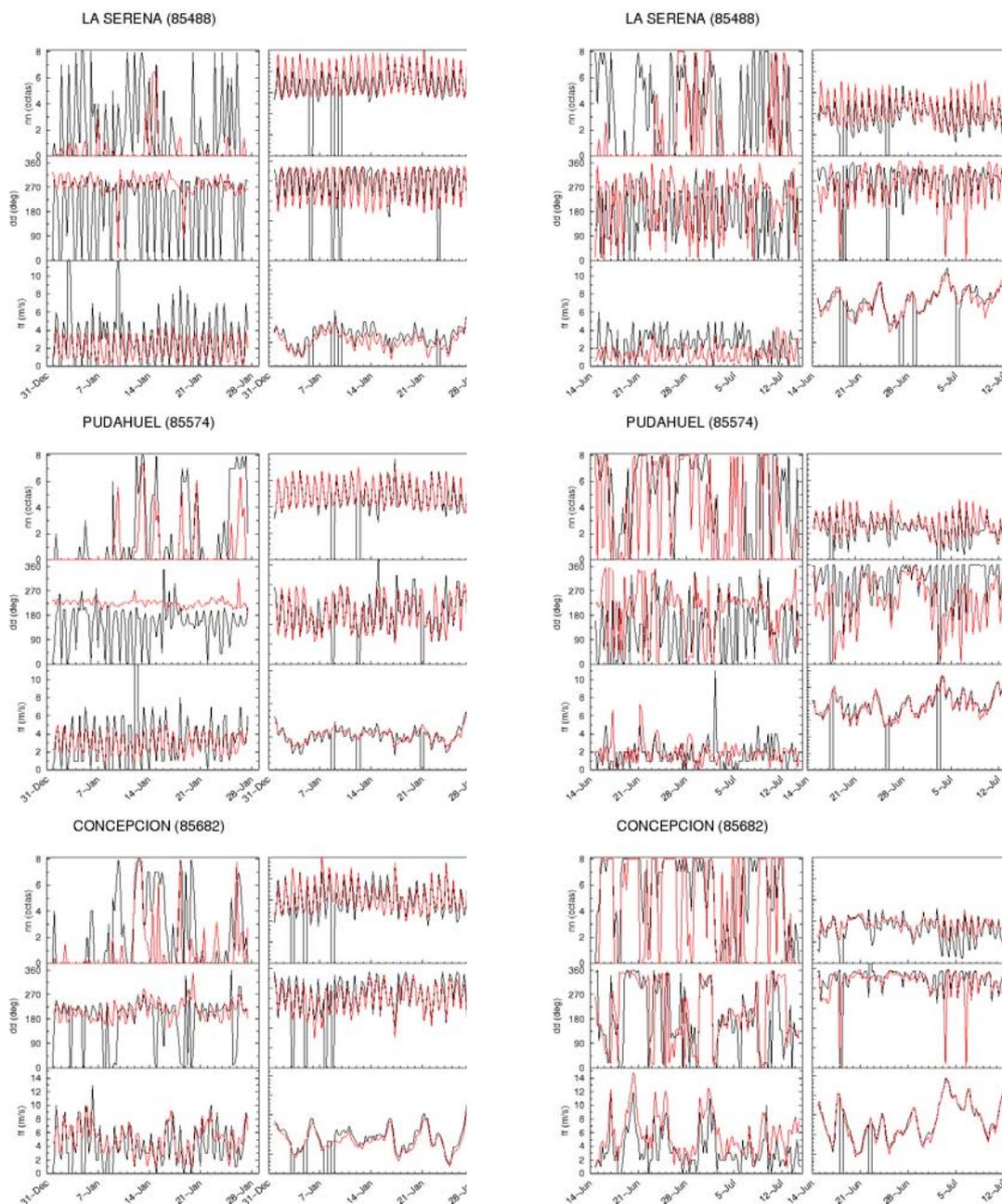


Figura 4. Simulaciones (rojo) y observaciones (negro) de cobertura nubosa (en octas), temperatura a 2 m, dirección del viento a 10 m (grados), humedad relativa a 2 m (%), rapidez del viento a 10 m y presión en superficie reducida al nivel del mar (hPa) para tres estaciones sinópticas en la parte central de Chile en Enero de 1998 y Junio-Julio de 1999.

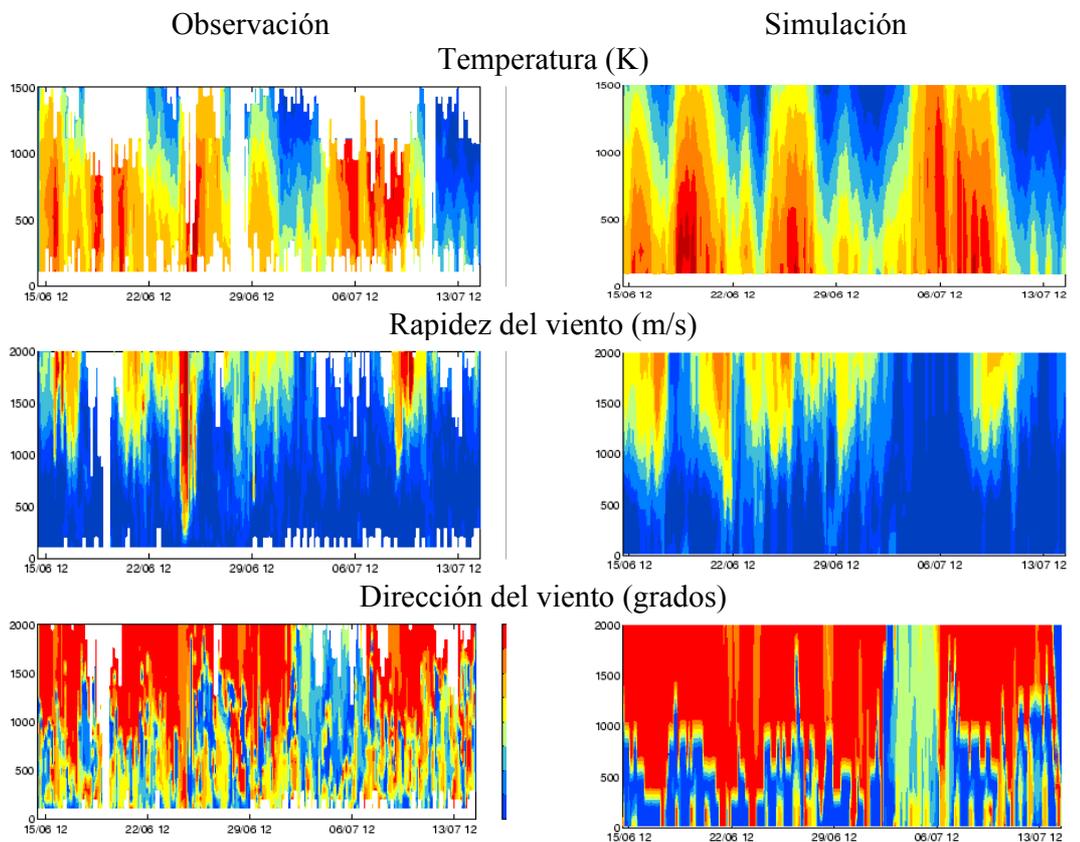


Figura 5. Perfiles verticales de temperatura (K), rapidez (m/s) y dirección (grados) del viento según las simulaciones (paneles izquierdos) y según las observaciones (paneles derechos) de la sonda acústica de La Platina al sur de Santiago en Junio-Julio de 1999.

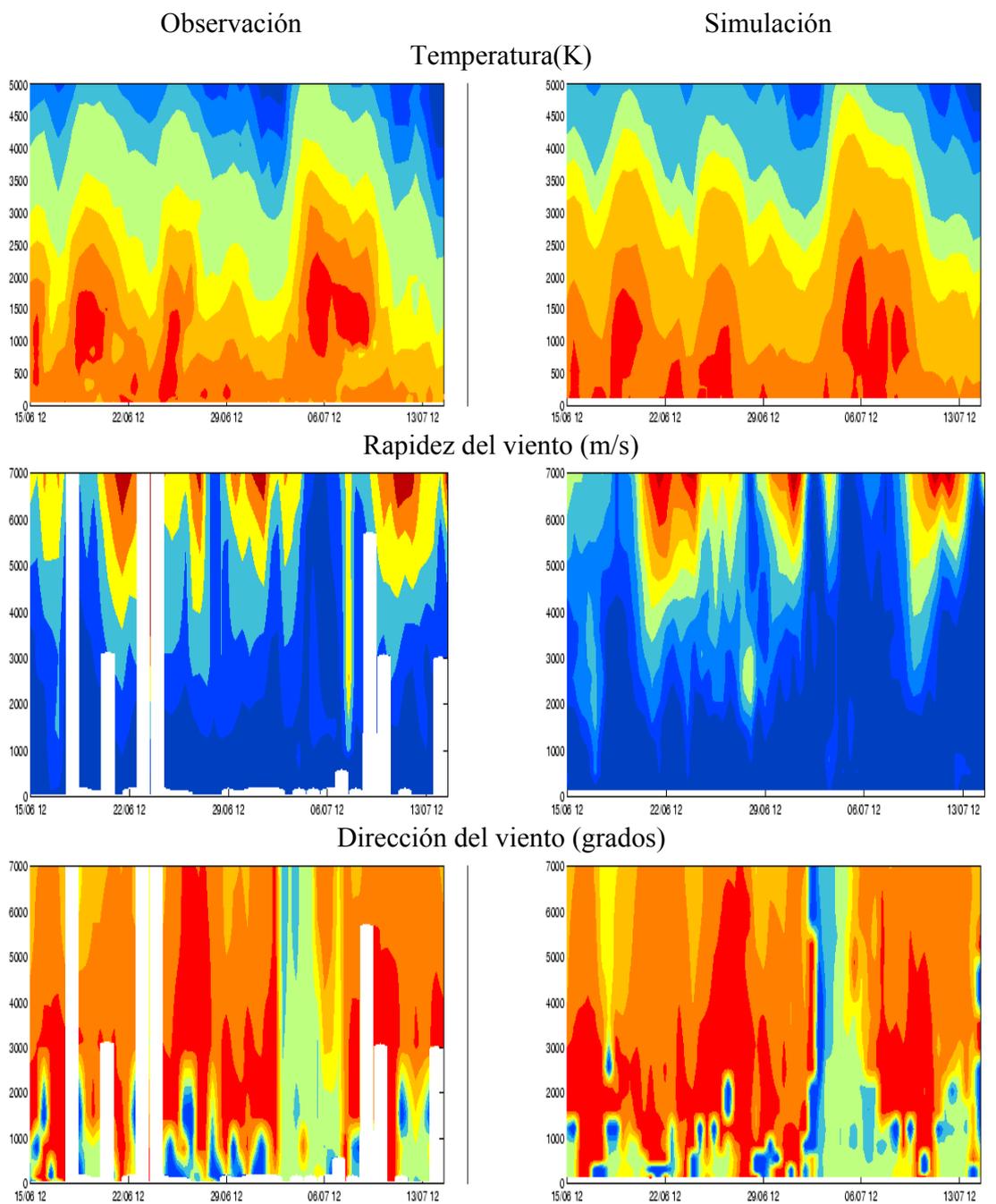


Figura 6. Perfiles verticales de temperatura (K), rapidez (m/s) y dirección (grados) del viento según las simulaciones (paneles izquierdos) y según las observaciones (paneles derechos) de la estación sondeadora de Santo Domingo (85543) en la costa de Chile central en Junio-Julio de 1999.

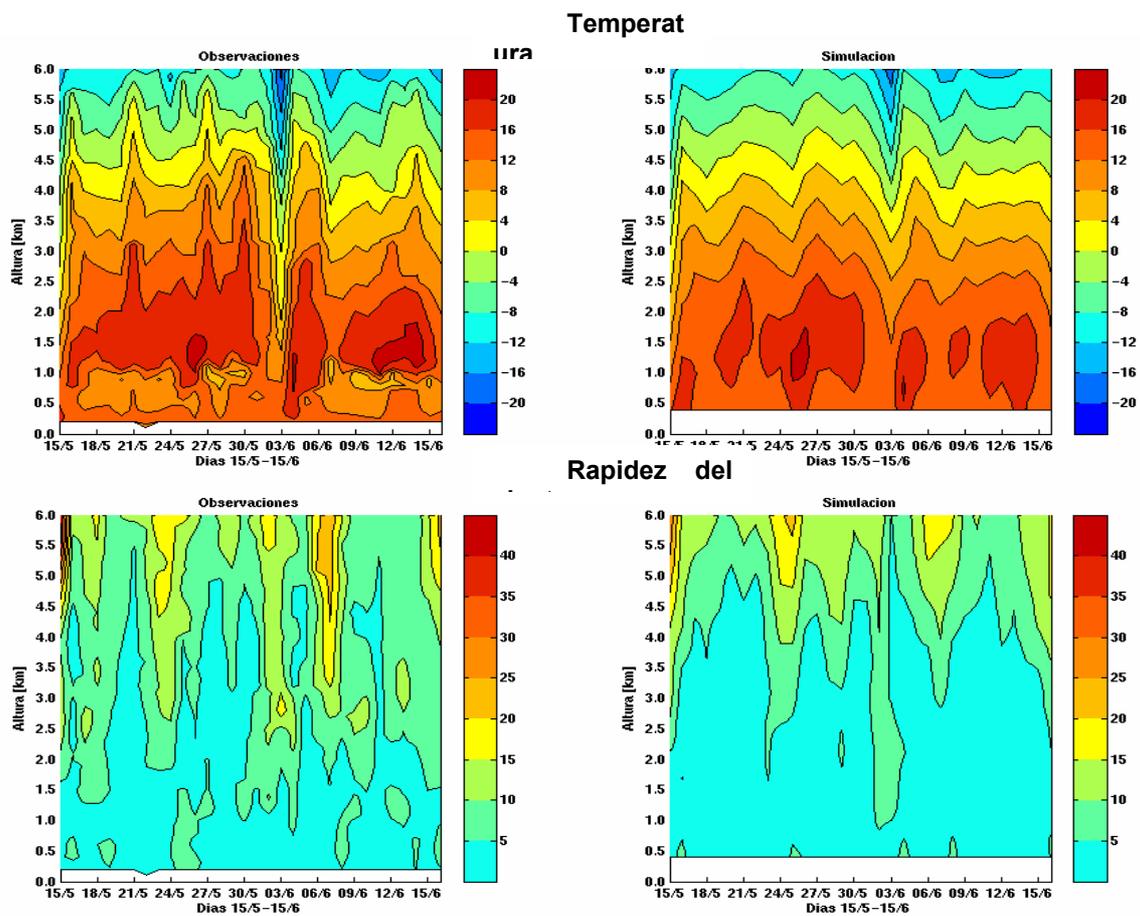


Figura 7. Perfiles verticales de temperatura [°C] (superior) y rapidez del viento [m/s] (inferior) según las simulaciones (columna derecha) y según las observaciones (columna izquierda) de los sondeos realizados en Antofagasta para el período entre el 15 de Mayo y 16 de Junio del 2000. El eje vertical muestra altura sobre el nivel del suelo hasta 6 km.

Referencias

- CENMA, 2001. Diagnóstico integral de la contaminación atmosférica en la macrozona central de Chile. Informe Final [CONAMA, Obispo Donoso 6, Providencia, Santiago, Chile]
- Cuxart, J., Bougealt, P., and Redelsperger, J. L. A turbulence scheme allowing for meso-scale and large-eddy simulations. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 126, 1-30, 2000.
- Gallardo, L., Olivares, G., Aguayo, A., Langner, J. and Aarhus, B., 2000, Dispersión Regional de azufre oxidado Chile Central usando el sistema HIRLAM – MATCH. Fortalecimiento del Sistema de Información de Calidad del Aire (Área de trabajo 2): Aplicación de un modelo de escala regional a Chile central, Apéndice Técnico. Disponible en la Comisión Nacional del Medio Ambiente, CONAMA.
- Gallardo, L., Olivares, G., Langner, J. and Aarhus, B., 2002: Coastal lows and sulfur air pollution in Central Chile, *Atmospheric Environment*, **36**, 3829-3841.
- Gidhagen L., Schimdt-Thomé P., Kahelin H., Langner J., 2000, Determinación de línea base nacional de contenido de arsénico en material particulado respirable, Informe Final, Comisión Nacional del Medio Ambiente, CONAMA
- Gidhagen, L. Kahelin, H., Schmidt-Thomé, P. and Johansson, C., 2002: Anthropogenic and natural levels of arsenic in PM10 in Central and Northern Chile. *Atmos. Env* 36, 3803-3817.
- Huneus, N., 2003. "*Dispersión de azufre oxidado en el norte de Chile*", Tesis para optar al grado académico de Magíster en Ciencias Atmosféricas y al título profesional e Ingeniero Civil Químico, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Olivares, G., Gallardo, L., Langner, J. and Aarhus, B., 2002: Regional dispersion of oxidized sulfur in Central Chile. *Atmos. Env.* 36/23, 3819-3828.
- Räisänen, J., Rummukainen, M., Ullerstig, A., 2001, Downscaling of greenhouse gas induced climate change in two GCMs with the Rossby Centre regional climate model for Northern Europe, *Tellus*, **53A**, 168-191.
- Sass, B. H., Nielsen, N. W., Jørgensen, J. U. and Amstrup, B. The operational HIRLAM system at DMI. Danish Meteorological Institute Technical Report 99-21, 1999. (Available from DMI (<http://www.dmi.dk/f+u/>))
- Undén, P., et al., 2002, HIRLAM-5: Scientific Documentation. December 2002. Disponible en www.knmi.nl/hirlam