

Informe Final

Estudio: “**Mejoría del conocimiento del recurso eólico en el norte y centro del país**”

Preparado para: Comisión Nacional de Energía

Preparado por: Fundación para la Transferencia Tecnológica

Equipo Profesional:

Ricardo Muñoz M., Departamento de Geofísica, Universidad de Chile

René Garreaud S., Departamento de Geofísica, Universidad de Chile

Laura Gallardo K., Centro de Modelamiento Matemático, Universidad de Chile

Andrés Cabello B., Centro Nacional del Medio Ambiente

Benjamín Rosenbluth, Departamento de Geofísica, Universidad de Chile

16/Diciembre/2003

ACLARACIÓN

Este informe fue preparado por encargo de la Comisión Nacional de Energía. Sin perjuicio de ello, las conclusiones, opiniones y recomendaciones de los autores no necesariamente reflejan la posición del Gobierno de Chile. De igual forma, cualquier referencia a una empresa, producto, marca, fabricante u otro similar no constituye en ningún caso una recomendación por parte del Gobierno de Chile.

<u>Índice</u>	Página
Indice	iii
Lista de Tablas	v
Lista de Figuras	vi
Abreviaturas	x
Agradecimientos	xi
1. Introducción	1
2. Estimación del recurso eólico observado en Regiones III-V	3
2.1 Estaciones con datos de viento	3
2.2 Metodología de análisis	13
2.2.1 Procedimientos preliminares	13
2.2.2 Cálculo de estadística básica	14
2.2.3 Cálculo de máquinas eólicas	19
2.2.4 Diferencias con otros procesamientos	21
2.3 Resultados	22
2.3.1 Descripción de anexos con resultados	22
2.3.2 Resumen de resultados	26
2.3.3 Análisis de resultados	32
2.4 Vientos superficiales sobre el mar	48
2.5 Descripción general del recurso eólico observado entre III y V Regiones	54
3. Modelación del recurso eólico en Regiones I-IX	56
3.1 Descripción de modelos	57
3.1.1 Modelo HIRLAM	57
3.1.2 Modelo MM5	68
3.1.3 Otros modelos meteorológicos	72

3.2 Comparación de velocidades medidas y modeladas	73
3.3 Resultados de modelos	74
3.3.1 Modelo HIRLAM	74
3.3.2 Modelo MM5	87
3.3.3 Apreciación general de resultados de modelos	88
4. Programa priorizado de exploración del recurso eólico	110
4.1 Zonas de alta disponibilidad eólica	110
4.2 Zonas de baja disponibilidad eólica	111
4.3 Actividades de medición del recurso eólico	111
4.3.1 Mediciones de exploración y confirmación	112
4.3.2 Mediciones de evaluación	112
4.3.3 Campañas intensivas de medición	113
4.4 Actividades de modelación del recurso eólico	113
4.5 Actividades de investigación	115
5. Conclusiones	116
Referencias	119
Anexo 1. Resultados de estaciones procesadas en proyecto	
Anexo 2. Resultados de estaciones DMC	
Anexo 3. Resultados de mediciones CIMM	
Anexo 4. Resultados extraídos de Proyecto EOLO93	
Anexo 5. Comparación de velocidades medidas y modeladas	
Anexo en CD: Base de datos recopilada por el proyecto	

Lista de Tablas

	Página
Tabla 2.1 Instituciones contactadas y resultado de la solicitud de datos	4
Tabla 2.2 Estaciones con información de viento en zona de estudio	5
Tabla 2.3 Tipos de estaciones presentadas en Tabla 2.2	8
Tabla 2.4 Distribución de estaciones por Región y tipo	8
Tabla 2.5 Distribución de estaciones por longitud de serie	8
Tabla 2.6 Parámetros de cálculo de estaciones de Tabla 2.2	16
Tabla 2.7 Estaciones con datos de temperaturas medias	18
Tabla 2.8 Características de máquinas eólicas genéricas	19
Tabla 2.9 Resumen de velocidad y densidad de potencia media para cada estación	28
Tabla 2.10 Estaciones ordenadas por velocidad media	29
Tabla 2.11 Estaciones ordenadas por densidad de potencia media	30
Tabla 2.12 Factores de utilización para estaciones analizadas en proyecto	31
Tabla 2.13 Ejemplo de sensibilidad de resultados a rugosidad superficial	46
Tabla 2.14 Sensibilidad de resultados a periodo de promedios temporales	47
Tabla 3.1 Datos HIRLAM disponibles. Se indican los períodos simulados así como el dominio horizontal correspondiente	60

Lista de Figuras

	Página
Figura 2.1 Ubicación de todas las estaciones de Tabla 2.2	9
Figura 2.2 Identificación de estaciones en III Región	10
Figura 2.3 Identificación de estaciones en IV Región	11
Figura 2.4 Identificación de estaciones en V Región	12
Figura 2.5 Curvas de generación de tres máquinas eólicas	20
Figura 2.6 Velocidad media en estaciones de III Región	37
Figura 2.7 Velocidad media en estaciones de IV Región	38
Figura 2.8 Velocidad media en estaciones de V Región	39
Figura 2.9 Densidad de potencia eólica media en estaciones de III Región	40
Figura 2.10 Densidad de potencia eólica media en estaciones de IV Región	41
Figura 2.11 Densidad de potencia eólica media en estaciones de V Región	42
Figura 2.12 Relación entre velocidad media y coordenadas	44
Figura 2.13 Relación entre velocidad media y densidad de potencia media	45
Figura 2.14 Isolíneas de velocidad media sobre el mar para el periodo 2000-2003	49
Figura 2.15 Isolíneas de desviación estándar de velocidad sobre el mar	50
Figura 2.16 Isolíneas de diferencia de velocidad de campos PM menos campos de velocidad AM	51
Figura 2.17 Isolíneas de amplitud de ciclo anual de velocidad PM	52
Figura 2.18 Mes del máximo promedio mensual de velocidad PM	53
Figura 3.1 Esquema del sistema de interpolación dinámica usado para generar los campos meteorológicos	59
Figura 3.2 El dominio del modelo HIRLAM aplicado en Chile y las estaciones sinópticas que reportan a la Organización Mundial de Meteorología (OMM)	61

Figura 3.3	Mapa de las estaciones en la zona de Santiago usadas para la evaluación del modelo HIRLAM	62
Figura 3.4	Simulaciones de modelo HIRLAM y observaciones	63
Figura 3.5	Perfiles verticales de temperatura, rapidez y dirección del viento según las simulaciones y según las observaciones de la sonda acústica de La Platina al sur de Santiago en Junio-Julio de 1999	65
Figura 3.6	Perfiles verticales de temperatura, rapidez y dirección del viento según las simulaciones y según las observaciones de la estación sondeadora de Santo Domingo en la costa de Chile central en Junio-Julio de 1999	66
Figura 3.7	Perfiles verticales de temperatura y rapidez del viento según las simulaciones y según las observaciones de los sondeos realizados en Antofagasta para el período entre el 15 de Mayo y 16 de Junio del 2000	67
Figura 3.8	Dominios de modelo MM5 en implementación en DGF	70
Figura 3.9	Esquema de construcción de serie temporal de resultados de modelo MM5	71
Figura 3.10	Magnitud del viento a 10 m sobre el suelo para periodo completo (Modelo HIRLAM)	75
Figura 3.11	Magnitud del viento a 10 m sobre el suelo para periodo Invierno (Modelo HIRLAM)	76
Figura 3.12	Magnitud del viento a 10 m sobre el suelo para periodo Primavera (Modelo HIRLAM)	77
Figura 3.13	Magnitud del viento a 10 m sobre el suelo para periodo Verano (Modelo HIRLAM)	78
Figura 3.14	DPE a 10 m sobre el suelo para periodo completo (Modelo HIRLAM)	79
Figura 3.15	DPE a 10 m sobre el suelo para periodo Invierno (Modelo HIRLAM)	80
Figura 3.16	DPE a 10 m sobre el suelo para periodo Primavera (Modelo HIRLAM)	81

Figura 3.17	DPE a 10 m sobre el suelo para periodo Verano (Modelo HIRLAM)	82
Figura 3.18	Amplitud del ciclo diario de viento a 10 m sobre el suelo para periodo completo (Modelo HIRLAM)	83
Figura 3.19	Amplitud del ciclo diario de viento a 10 m sobre el suelo para periodo Invierno (Modelo HIRLAM)	84
Figura 3.20	Amplitud del ciclo diario de viento a 10 m sobre el suelo para periodo Primavera (Modelo HIRLAM)	85
Figura 3.21	Amplitud del ciclo diario de viento a 10 m sobre el suelo para periodo Verano (Modelo HIRLAM)	86
Figura 3.22	Magnitud de viento a 10 m sobre el suelo para periodo completo de simulación (Modelo MM5, Dominio 3)	90
Figura 3.23	Magnitud de viento a 10 m sobre el suelo para periodo INVIERNO de simulación (Modelo MM5, Dominio 3)	91
Figura 3.24	Magnitud de viento a 10 m sobre el suelo para periodo PRIMAVERA de simulación (Modelo MM5, Dominio 3)	92
Figura 3.25	DPE a 10 m sobre el suelo para periodo completo de simulación (Modelo MM5, Dominio 3)	93
Figura 3.26	DPE a 10 m sobre el suelo para periodo Invierno de simulación (Modelo MM5, Dominio 3)	94
Figura 3.27	DPE a 10 m sobre el suelo para periodo Primavera de simulación (Modelo MM5, Dominio 3)	95
Figura 3.28	Amplitud del ciclo diario de viento a 10 m sobre el suelo para periodo completo de simulación (Modelo MM5, Dominio 3)	96
Figura 3.29	Amplitud del ciclo diario de viento a 10 m sobre el suelo para periodo INVIERNO de simulación (Modelo MM5, Dominio 3)	97
Figura 3.30	Amplitud del ciclo diario de viento a 10 m sobre el suelo para periodo PRIMAVERA de simulación (Modelo MM5, Dominio 3)	98
Figura 3.31	Magnitud del viento a 10 m sobre el suelo para periodo completo de simulación (Modelo MM5, Dominio 2)	99

Figura 3.32	Magnitud del viento a 10 m sobre el suelo para periodo INVIERNO de simulación (Modelo MM5, Dominio 2)	100
Figura 3.33	Magnitud del viento a 10 m sobre el suelo para periodo PRIMAVERA de simulación (Modelo MM5, Dominio 2)	101
Figura 3.34	DPE a 10 m sobre el suelo para periodo completo de simulación (Modelo MM5, Dominio 2)	102
Figura 3.35	DPE a 10 m sobre el suelo para periodo INVIERNO de simulación (Modelo MM5, Dominio 2)	103
Figura 3.36	DPE a 10 m sobre el suelo para periodo PRIMAVERA de simulación (Modelo MM5, Dominio 2)	104
Figura 3.37	Amplitud del ciclo diario de viento a 10 m sobre el suelo para periodo completo de simulación (Modelo MM5, Dominio 2)	105
Figura 3.38	Amplitud del ciclo diario de viento a 10 m sobre el suelo para periodo INVIERNO de simulación (Modelo MM5, Dominio 2)	106
Figura 3.39	Amplitud del ciclo diario de viento a 10 m sobre el suelo para periodo PRIMAVERA de simulación (Modelo MM5, Dominio 2)	107
Figura 3.40	Parámetros de distribución de Weibull ajustados sobre resultados de modelo MM5 (Periodo Septiembre-Octubre 2002)	108
Figura 3.41	Parámetros de distribución de Weibull ajustados sobre resultados de modelo MM5 (Periodo Mayo-Julio 2002)	109

Abreviaturas

AVN:	Aviation model
CEAZA:	Centro de estudios avanzados en zonas áridas de la U. de La Serena
CENMA:	Centro Nacional del Medio Ambiente
CIMM:	Centro de investigaciones minero metalúrgicas
CMM:	Centro de Modelamiento Matemático de la Universidad de Chile
CNE:	Comisión Nacional de Energía
CONAMA:	Comisión Nacional del Medio Ambiente
DGF:	Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile
DMC:	Dirección Meteorológica de Chile
EOL093:	Proyecto “Evaluación del potencial eólico nacional”
ECMWF:	European center for medium range weather forecast
HIRLAM:	High resolution limited area model
KAMM:	Karlsruhe atmospheric mesoscale model
MM5:	Mesoscale model of the 5 th generation
NCAR:	National center for atmospheric research
SMHI:	Instituto de hidrología y meteorología de Suecia
SS:	Servicio de Salud
UTC:	Coordinated universal time
WRF:	Weather and research forecast model

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Dirección Meteorológica de Chile y a su Director Sr. Hugo Oliva H. por el apoyo brindado a la realización de este estudio. En particular, se agradece la participación del Sr. Jorge Carreño C., Jefe del Departamento de Meteorología Aplicada.

Se agradece a las siguientes empresas e instituciones que aportaron directa o indirectamente datos de viento analizados en este estudio: Dirección Meteorológica de Chile, Compañía Minera del Pacífico, Compañía Minera El Indio, Compañía Minera Candelaria, Empresa Nacional de Minería (Fundición Hernán Videla Lira), Codelco (Potrerillos), Compañía Eléctrica Guacolda, Centro Nacional de Medio Ambiente, Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas de la Universidad de La Serena, Comisiones Regionales de Medio Ambiente de las Regiones III, IV, V, Servicio de Salud de la III Región, Centro de Modelamiento Matemático de la Universidad de Chile, y el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile

Se desea agradecer en forma explícita a las siguientes personas que facilitaron su ayuda para la realización del estudio: Dra. Melitta Fiebig-Wittmaack (U. de La Serena), Sr. José Salim (Conama V Región), Sr. Erik Jopia S. (Servicio de Salud de III Región), Dr. José Rutllant C. (U. de Chile), Sr. Víctor Castelletto T. (Cía. Minera del Pacífico), Sr. Héctor Concha (Cía. Minera El Indio).

Los datos de las estaciones Pelicana, Puclaro, Arrayán y San Carlos en la IV Región fueron gentilmente aportados por la Dra. Melitta Fiebig-Wittmaack de la Universidad de La Serena y son el resultado de un proyecto conjunto entre el Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas y el Institut of Meteorology and Climatology, Research Center Karlsruhe, con financiamiento del German Internationales Büro of the BMBF según contrato CHL 007/98.

1. Introducción

El presente documento corresponde al Informe Final del estudio: “**Mejoría del conocimiento del recurso eólico en el norte y centro del país**” realizado por la Fundación para la Transferencia Tecnológica para la Comisión Nacional de Energía (CNE).

En concordancia con sus funciones, la Comisión Nacional de Energía (CNE) se encuentra analizando el desarrollo probable de las energías renovables no convencionales y su potencial contribución a los objetivos de seguridad de suministro y sustentabilidad ambiental de la política energética nacional.

El presente estudio se enmarca en esa línea de trabajo, mediante la mejoría del diagnóstico del potencial eólico del país. Internacionalmente, en especial en Europa, la energía eólica ha mantenido un fuerte crecimiento en los últimos años, lo que se ha traducido en una disminución sostenida de sus costos de inversión. De mantenerse esta tendencia, es probable que en el mediano plazo pueda convertirse en una fuente de generación eléctrica de gran escala competitiva con las fuentes tradicionalmente usadas en el país.

Dado ello, CNE pretende avanzar en la clarificación del recurso eólico útil para generación eléctrica en zonas determinadas del país. Por las complejidades y la gran cantidad de información de base que se requiere para este tipo de análisis, no se ha pretendido que el estudio dé una respuesta definitiva sobre la materia. Más bien, se espera que este estudio entregue una visión comparativa de distintas zonas que permita priorizar áreas geográficas en las cuales sea conveniente realizar, a futuro, estudios más detallados.

Adicionalmente, se espera avanzar en una caracterización de mayor detalle en una zona específica del país, mediante la recopilación y procesamiento de la información del recurso eólico generada por diversas instituciones. Dicha zona es la comprendida entre la III Región y la V Región, la cual ha sido seleccionada por CNE bajo los siguientes criterios:

- Localizada en el área cubierta por el Sistema Interconectado Central, sistema que requiere en forma permanente de la incorporación de nueva oferta eléctrica..
- Recurso eólico con intensidad y características de variabilidad factibles de usar para generación eólica. De acuerdo a una evaluación preliminar realizada por CNE, en la zona seleccionada existirían áreas en las cuales los factores de utilización de las máquinas eólicas podrían ser iguales o superiores a 30%, valor que se considera razonablemente bueno a nivel internacional para la explotación de este tipo de energía. Además, el área presentaría patrones diurnos y estacionales de viento bien determinados y, probablemente, una baja variabilidad interanual lo cual mejoraría la confiabilidad de la evaluación del recurso eólico.

- Características geográficas, ambientales y de uso de suelo. Al existir amplias zonas sin un aprovechamiento intensivo de los suelos y sin una sensibilidad ambiental extrema, se facilitaría la instalación de parques eólicos y la componente de costos relacionada con el uso de los suelos sería menor.

De acuerdo al convenio, el objetivo general del Estudio ha sido mejorar el conocimiento del potencial del recurso eólico entre la I y IX región del país, y avanzar en su precisión para el centro-norte del país.

El cumplimiento del objetivo general se ha cumplido a través de los objetivos específicos siguientes:

- a) Recopilación y estimación del recurso eólico observado en la zona comprendida entre las Regiones III y V.
- b) Realización de una evaluación, preliminar y comparativa, del recurso eólico entre la I y IX Región del país, con una estimación de la confiabilidad de los resultados obtenidos.
- c) Proposición de un programa priorizado de exploración del recurso eólico en aquellas zonas dentro del SIC con mayores probabilidades de contar con un recurso explotable para generación eléctrica.

El antecedente más directo del presente estudio es el Proyecto “Evaluación del potencial eólico nacional” realizado en 1993 por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile para la Corporación de Fomento de la Producción (proyecto referido en adelante como proyecto EOLO93). El objetivo de ese proyecto fue la realización de un atlas de disponibilidad de energía eólica a nivel nacional. Para ello se recopiló y procesó datos de viento de un gran número de estaciones ubicadas a lo largo del país, y operadas por una variada gama de instituciones y personas. A la vez se realizó mediciones de viento en seis lugares, y se investigó el uso de un modelo matemático de campo viento para el estudio del efecto de la topografía sobre el viento local. Una de las conclusiones del proyecto fue la identificación de zonas con potenciales eólicos interesantes, entre las cuales estuvo el sector costero de la IV Región y las puntas costeras de la zona norte y centro del país. También se concluyó que la cobertura espacial de la información de viento disponible en ese entonces era muy baja, lo que dejaba vastos sectores del país sin información. Entre las recomendaciones del proyecto estuvo el fomentar las actividades de prospección del recurso eólico, mantener actualizada y ampliar la base de datos de vientos, y estimular el desarrollo y aplicación de modelos matemáticos de simulación y extrapolación de campos de viento. En varios aspectos, por tanto, el presente Estudio es una puesta al día del proyecto de 1993.

2. Estimación del recurso eólico observado en Regiones III-V

Uno de los objetivos básicos del estudio fue recopilar la información de vientos existente en las Regiones III a V. El punto de partida de esta recopilación fue el proyecto EOLO93, del cual se extrajo la información de todas las estaciones reportadas en él y que estuvieran localizadas en la zona de interés. En segundo lugar, se identificó y contactó diversas instituciones y personas que pudiesen tener datos de viento en la zona. El detalle de los contactos que aportaron información se muestra en la Tabla 2.1. Los datos recibidos de estas fuentes fueron procesados y analizados estadísticamente. Finalmente, se procesó también una base de datos de viento superficial sobre el mar derivado de observaciones satelitales. Esta última base de datos entrega información útil acerca de la disponibilidad del recurso eólico en zonas costeras.

2.1 Estaciones con datos de viento

La Tabla 2.2 describe todas las estaciones con datos de viento en la región de interés que fueron identificadas en el proyecto. El total de estaciones es 129 y han sido ordenadas en la tabla de acuerdo a su latitud. Se debe tener presente que algunas de las estaciones en la tabla corresponden a los mismos puntos de medición, pues cada estudio individual de una misma estación fue considerado en forma separada. Por ejemplo, la estación Lengua de Vaca fue analizada en el proyecto EOLO93 y también ha sido analizada en el presente proyecto. Estos dos estudios aparecen en la tabla como las estaciones E93LV y DGLVA, respectivamente (números 67 y 68 en la Tabla 2.2).

Cada estación ha sido identificada con un código de 5 letras, el cual es utilizado en los gráficos y tablas de resultados, así como en los archivos de la base de datos originada en el proyecto. La Tabla 2.2 indica también las coordenadas (latitud y longitud) y altitud (sobre el nivel del mar) de las estaciones. Cuando no se ha contado con información precisa de estas variables, ellas han sido estimadas desde mapas en forma aproximada. La columna “Dirección” describe la ubicación de la estación, cuando esta información estaba disponible. La columna “Tipo” separa las estaciones en seis categorías descritas más adelante. Las columnas “Periodo” y “Meses” describen el tiempo que abarcan los datos analizados.

Tabla 2.1. Instituciones contactadas y resultado de la solicitud de datos

Institución	Contactos	Resultado de solicitud
DMC	Director Hugo Oliva H. Sr. Jorge Carreño C.	Entrega resultados de procesamientos para 9 estaciones.
Conama V	Director Gerardo Guzmán Sr. José Salim	Entrega datos 26 estaciones
Conama IV	Directora Liliana Pastén Sr. Rodrigo Jorge	Entrega nombres de contactos de empresas
Conama III	Director Daniel Alvarez P. Sr. René Ramírez	Entrega nombres de contactos de empresas
SS III	Directora Sonia Ibaceta L. Sr. Erik Jopia S.	Entrega información de Candelaria
U. La Serena	Prof. Melitta Fiebig	Entrega 4 estaciones, año 2000.
U.Chile-DGF	Prof. José Rutllant C. Prof. René Garreaud S.	Entrega datos 10 estaciones
U.Chile-CMM	Prof. Laura Gallardo K.	Entrega datos 1 estación
Cenma	Sr. Andrés Cabello B.	Entrega datos 2 estaciones
C.E. Guacolda	Gerente Gral. Sergio del Campo F. Sr. Jorge Moyano	Entrega datos 3 estaciones
C.M. El Indio	Gerente Gral. Alejandro Labbé S. Sr. Héctor Concha	Entrega datos 1 estación
C.M. del Pacífico	Gerente Gral. Sergio Verdugo A. Gerente Ambiental Erick Weber Sr. Víctor Casteleto	Entrega datos 2 estaciones
Codelco-Potrerrillos	Gerente Gral. Julio Cifuentes V. Sra. María Parra Z.	Entrega datos 1 estación
Enami-Paipote	Gerente José Sanhueza R.	Entrega datos 5 estaciones
C.M. Candelaria	Sra. Ana Venegas P.	Entrega datos 3 estaciones

*Mejoría del conocimiento del recurso eólico en el Norte y Centro del país
Comisión Nacional de Energía – Departamento de Geofísica, Universidad de Chile - 2003*

Tabla 2.2. Estaciones con información de viento en zona de estudio

N°	Código	Nombre	Lat	Lon	Altitud	Región	Dirección	Tipo	Periodo	Meses
1	DMCTA	DMC-TALTAL	25.40	70.48	115	II	Retén Alemania	HDMC	1/01-7/03	28
2	DMCSA	DMC-EL SALVADOR	26.23	69.62	2250	III	Aeródromo de Lan Chile	HDMC	1/01-7/03	31
3	CIMSA	CIMM-EL SALVADOR	26.25	69.62	2400	III	Cine	P	6/98-5/99	
4	CIMCH	CIMM-CHAÑARAL	26.33	70.62	30	III	Calle Caleta Palitos 1075	P	5/98-5/99	
5	E93CH	EOL093-CHAÑARAL - BASE MENSUAL	26.35	70.68	13	III		M	3 años	
6	POTRE	POTRERILLOS	26.44	69.48	2800	III	Ex-escuela D-43	H03	1/02-7/03	19
7	E93PO	EOL093-POTRERILLOS - BASE MENSUAL	26.50	69.45	2850	III		M	12 años	
8	EPP01	ESTUDIOS PRE-EOL093 - POTRERILLOS 1	26.50	69.45	2901	III		O		
9	EPP02	ESTUDIOS PRE-EOL093 - POTRERILLOS 2	26.50	69.45	2901	III		O	67-70	
10	EPP03	ESTUDIOS PRE-EOL093 - POTRERILLOS 3	26.50	69.45	2901	III		O	12 años	
11	EPCH1	ESTUDIOS PRE-EOL093 - CHAÑARAL 1	26.50	70.62	9	III		O		
12	EPCH2	ESTUDIOS PRE-EOL093 - CHAÑARAL 2	26.50	70.62	9	III		O	67-70	
13	E93LO	EOL093-LA OLA	26.57	69.05	3800	III		H93	8/84-2/85	
14	E93CA	EOL093-CALDERA - BASE MENSUAL	27.05	70.85	14	III		M	7 años	
15	CANCA	CANDELARIA-CALDERA	27.07	70.83	11	III		H03	1/02-12/02	12
16	CIMCA	CIMM-CALDERA	27.07	70.83	65	III	Av. Batallón Atacama 307 (Carabineros)	P	6/98-5/99	
17	DGCAL	DGF-CALDERA	27.07	70.83	11	III		H03	9/93-12/94	16
18	DGPCA	DGF-PUNTA CALDERETA	27.08	70.87	11	III		H03	1/97-12/98	18
19	CIMBI	CIMM-BAHIA INGLESA	27.10	70.80		III	Camping Enami	P	5/98-9/98	
20	CIMCO	CIMM-COPIAPO	27.20	70.32	340	III	Chacabuco 794 (Gerencia Minería Enami)	P	6/98-6/99	
21	CIMSP	CIMM-SAN PEDRO (COPIAPO)	27.30	70.40		III	Parcela 41-42, San Pedro	P	10/98-2/99	
22	DMCCO	DMC-COPIAPO	27.30	70.42	291	III	Aeródromo Chamonate	HDMC	1/01-7/03	31
23	E93CO	EOL093-COPIAPO - BASE MENSUAL	27.35	70.33	370	III		M	24 años	
24	EPCO1	ESTUDIOS PRE-EOL093 - COPIAPO 1	27.35	70.33	370	III		O	67-70	
25	EPCO2	ESTUDIOS PRE-EOL093 - COPIAPO 2	27.35	70.33	370	III		O	11 años	
26	COPIA	HVL-COPIAPO	27.36	70.33	371	III	Chacabuco 780 (Club Copiapó)	H03	10/00-7/03	34
27	SFERN	HVL-SAN FERNANDO	27.39	70.30	422	III	Calles Pedro León Gallo (Col. San Lorenzo)	H03	10/00-7/03	34
28	PAIPO	HVL-PAIPOTE	27.41	70.27	450	III	Retén	H03	10/00-7/03	34
29	PRINC	HVL-PRINCIPAL	27.41	70.26	499	III	Cerro estanques de agua	H03	10/00-7/03	34
30	CANTA	CANDELARIA-TIERRA AMARILLA	27.47	70.26	499	III		H03	1/02-12/02	12
31	TAMAR	HVL-TIERRA AMARILLA	27.47	70.26	499	III	Calle Miguel Lemur con Antonio Provost	H03	10/00-7/03	34
32	CANMI	CANDELARIA-MINA	27.51	70.27	520	III		H03	1/02-12/02	12
33	CIMVA	CIMM-VALLENAR	28.40	70.75	425	III	Ramírez 1198 (Bomberos)	P	6/98-6/99	
34	HUASCO	CMP-HUASCO	28.46	71.18	25	III	Parcela Los Olivos de Bellavista, Huasco Bajo	H03	7/98-12/02	54
35	GUACO	GUACOLDA ME	28.46	71.26	30	III	6o Piso Unidad I Central	H03	1/01-12/02	24
36	CIMHU	CIMM-HUASCO	28.47	71.22	30	III	Prat con Latorre (Bomberos)	P	6/98-6/99	
37	DMCHU	DMC-HUASCO	28.47	71.22	25	III	Retén de Huasco	HDMC	1/01-7/03	31
38	DGHUA	DGF-HUASCO	28.47	71.25	30	III		H03	11/93-11/94	13
39	GUSM4	GUACOLDA SM4	28.48	71.17	50	III	Estacion SM4 Red Guacolda	H03	1/01-12/02	24
40	GUSM8	GUACOLDA SM8	28.50	71.08	60	III	Estacion SM8 Red Guacolda	H03	1/01-12/02	24
41	E93VA	EOL093-VALLENAR - BASE MENSUAL	28.58	70.77	469	III		M	16 años	
42	EPVAL	ESTUDIOS PRE-EOL093 - VALLENAR	28.58	70.77	533	III		O	67-70	
43	DMCVA	DMC-VALLENAR	28.60	70.77	526	III	Aeródromo	HDMC	1/01-7/03	31
44	CIMDO	CIMM-DOMEYKO	28.90	70.90		III	Carabineros	P	2/99-6/99	
45	E93SI	EOL093-LA SILLA	29.27	70.70	2400	IV		H93	2/85-5/92	
46	E93CR	EOL093-CARMELITAS	29.42	71.27	1000	IV		H93	10/90-5/91	
47	DGTOF	DGF-EL TOFO	29.45	71.25	780	IV		H03	11/93-11/94	13
48	E93TF	EOL093-EL TOFO	29.45	71.25	780	IV		H93	1/89-11/91	
49	DGCCR	DGF-CRUZ GRANDE	29.45	71.32	30	IV		H03	11/93-11/94	13
50	E93CG	EOL093-CRUZ GRANDE	29.45	71.32	10	IV		H93	7/90-11/91	
51	INDIO	EL INDIO	29.76	69.97	3871	IV	Sector Gerencia	H03	1/98-12/02	39
52	DMCSE	DMC-LA SERENA	29.90	71.20	142	IV	Aeródromo La Florida	HDMC	1/97-12/02	72
53	E93SE	EOL093-LA SERENA	29.90	71.20	142	IV		H93	85-91	
54	E93SM	EOL093-LA SERENA - BASE MENSUAL	29.90	71.20	142	IV		M	14 años	
55	EPLF1	ESTUDIOS PRE-EOL093 - LA FLORIDA 1	29.90	71.25	152	IV		O	66-75	
56	EPLF2	ESTUDIOS PRE-EOL093 - LA FLORIDA 2	29.90	71.25	152	IV		O	67-70	
57	E93PT	EOL093-PUNTA TORTUGA - BASE MENSUAL	29.93	71.37	25	IV		M	19 años	
58	EPPTO	ESTUDIOS PRE-EOL093 - PUNTA TORTUGA	29.95	71.37	25	IV		O	67-70	
59	GUAYA	CMP-GUAYACAN	29.97	71.35	2	IV	Puerto Guayacan	H03	1/96-8/03	92
60	PELIC	ULS-PELICANA	29.99	71.01	280	IV		H03	1/00-12/00	12
61	PUCLA	ULS-PUCLARO	30.00	70.87	445	IV		H03	1/00-12/00	12
62	EPCOQ	ESTUDIOS PRE-EOL093 - COQUIMBO	30.00	71.25		IV		O	59-63	
63	ARRAY	ULS-ARRAYAN	30.04	70.99	340	IV		H03	1/00-12/00	12
64	SCARL	ULS-SAN CARLOS	30.05	70.82	630	IV		H03	1/00-12/00	12
65	E93TO	EOL093-TOLOLO	30.17	70.80	2150	IV		H93	84-88	
66	TOLOLO	TOLOLO	30.17	70.80	2028	IV		H03	2/96-6/00	53

*Mejoría del conocimiento del recurso eólico en el Norte y Centro del país
Comisión Nacional de Energía – Departamento de Geofísica, Universidad de Chile - 2003*

Tabla 2.2 Estaciones con información de viento en zona de estudio (continuación)

N°	Código	Nombre	Lat	Lon	Altitud	Región	Dirección	Tipo	Periodo	Meses
67	DGLVA	DGF-LENGUA DE VACA	30.24	71.63	10	IV		H03	9/90-4/03	152
68	E93LV	EOL093-PUNTA LENGUA DE VACA	30.24	71.63	10	IV		H93	8/90-5/92	
69	DMCOV	DMC-OVALLÉ	30.57	71.18	335	IV	Aeródromo El Tuqui	HDMC	1/01-7/03	31
70	E93OM	EOL093-OVALLÉ - BASE MENSUAL	30.57	71.18	370	IV		M	13 años	
71	E93OV	EOL093-OVALLÉ	30.57	71.18	300	IV		H93	65-69	
72	E93TR	EOL093-PUNTA DE TORO	30.73	71.70	9	IV		H93	4/92-11/92	
73	DGPAL	DGF-LAS PALMAS	31.20	71.60	230	IV		H03	6/94-11/94	9
74	E93CE	EOL093-PUNTA CERRO DE ARENA	31.25	71.63	60	IV		H93	4/92-11/92	
75	E93LV	EOL093-LOS VILOS	31.85	71.51	60	IV		H93	4/92-11/92	
76	DGCUN	DGF-CUNCUMEN	31.90	70.62	1120	IV		H03	8/00-12/01	17
77	DMCLV	DMC-LOS VILOS	31.90	71.48	60	IV	Estación INIA	HDMC	9/00-7/03	18
78	PICHI	CENMA-PICHIDANGUI	32.12	71.52	35	IV	Calle Atun 100 (Coop. Agua)	H03	4/97-7/03	69
79	DGLMO	DGF-LOS MOLLES	32.25	71.51	37	V		H03	11/93-12/94	13
80	EPHOR	ESTUDIOS PRE-EOL093 - LA HORMIGA	32.70	70.70		V		O	81	
81	PUCHU	PUCHUNCAVI	32.72	71.41	42	V		H03	4/00-6/03	39
82	RURA2	RURAL2	32.74	71.19	209	V		H03	4/03-6/03	3
83	CAMPI	CAMPICHE	32.74	71.46	10	V	Bodega combustibles	H03	5/00-5/03	37
84	GREDA	LA GREDA	32.75	71.47	13	V		H03	4/00-6/03	39
85	PVEN2	VENTANAS Nº2	32.75	71.48	10	V	Bodega concentrados	H03	6/01-6/03	25
86	MEVEN	VENTANAS-METEOROLOGICA	32.76	71.48	33	V		H03	4/00-6/03	39
87	MAITE	LOS MAITENES	32.76	71.46	41	V		H03	4/00-6/03	39
88	RURA1	RURAL1	32.77	71.18	223	V		H03	4/02-6/03	15
89	HJUJE	HJUJELAS	32.78	71.18	220	V		H03	6/99-3/02	34
90	E93QM	EOL093-QUINTERO - BASE MENSUAL	32.78	71.52	2	V		M	17 años	
91	E93QU	EOL093-QUINTERO	32.78	71.52	8	V		H93	86-91	
92	EPQU1	ESTUDIOS PRE-EOL093 - QUINTERO 1	32.78	71.53	3	V		O	67-70	
93	EPQU2	ESTUDIOS PRE-EOL093 - QUINTERO 2	32.78	71.53	3	V		O	803 datos	
94	CALER	LA CALERA	32.79	71.19	209	V		H03	6/99-6/03	49
95	MEMEL	METEOROLOGICA MELON	32.79	71.20	210	V		H03	6/99-6/03	49
96	CHAGR	CHAGRES	32.80	70.96	400	V		H03	8/00-9/02	16
97	VESUR	VENTANAS-SUR	32.80	71.48	63	V		H03	4/00-6/03	39
98	VALEG	VALLE ALEGRE	32.81	71.44	21	V		H03	4/00-6/03	39
99	E93RI	EOL093-RITOQUE	32.82	71.53	10	V		H93	5/81-6/81	
100	EPECR	ESTUDIOS PRE-EOL093 - EL CRISTO	32.83	70.08	3829	V		O		
101	E93RE	EOL093-CRISTO REDENTOR - BASE MENSUAL	32.83	70.12	3830	V		M	4 años	
102	E93AN	EOL093-LOS ANDES - BASE MENSUAL	32.83	70.62	816	V		M	2 años	
103	E93JU	EOL093-EL JUNCAL	32.85	70.17	2217	V		H93	87-89	
104	INPOU	INP QUILLOTA	32.87	71.24	125	V		H03	11/98-1/99	3
105	UCEVE	UCV	32.87	71.22	125	V		H03	2/99-2/03	34
106	BOMBE	BOMBEROS	32.89	71.25	120	V		H03	2/99-2/03	49
107	COLMO	COLMO	32.91	71.44	30	V		H03	5/02-6/03	14
108	GAVIO	LAS GAVIOTAS	32.91	71.48	80	V		H03	5/02-6/03	14
109	NEHUE	NEHUENCO	32.94	71.33	70	V		H03	11/98-2/03	52
110	SPEDR	SAN PEDRO	32.94	71.27	90	V		H03	11/98-2/03	52
111	ICSPE	INTERIOR CAJON SAN PEDRO	32.96	71.23	160	V		H03	11/98-1/99	3
112	CONCF	CONCON-FIJA	32.96	71.55	25	V		H03	1/99-6/03	54
113	CONCS	CONCON-SUR	32.96	71.55	25	V		H03	5/02-6/03	14
114	LIMAC	LIMACHE	32.98	71.27	100	V		H03	8/99-10/00	15
115	E93PA	EOL093-PUNTA ANGELES - BASE MENSUAL	33.02	71.63	41	V		M	28 años	
116	EPPA1	ESTUDIOS PRE-EOL093 - PUNTA ANGELES 1	33.02	71.65	41	V		O	60-63	
117	EPPA2	ESTUDIOS PRE-EOL093 - PUNTA ANGELES 2	33.02	71.65	41	V		O	67-70	
118	ARMAT	ARMAT	33.04	71.43	100	V		H03	1/02-2/03	13
119	E93BE	EOL093-EL BELLOTO - BASE MENSUAL	33.05	71.40	121	V		M	9 años	
120	E93PC	EOL093-PUNTA CURAUMILLA	33.08	71.75	20	V		H93	7/83-12/85	
121	EPPCU	ESTUDIOS PRE-EOL093 - PUNTA CURAUMILLA	33.08	71.75		V		O	83	
122	E93OR	EOL093-LO OROZCO	33.25	71.43	350	V		H93	1/81-5/81	
123	EPORO	ESTUDIOS PRE-EOL093 - LO OROZCO	33.25	71.43		V		O	2396 datos	
124	E93CB	EOL093-CASABLANCA	33.32	71.42	260	V		H93	7/80-10/80	
125	EPCAS	ESTUDIOS PRE-EOL093 - CASABLANCA	33.32	71.42		V		O	2536 datos	
126	CBLAN	CENMA-CASABLANCA	33.35	71.38	270	V		H03	10/01-4/03	19
127	DGCRU	DGF-LAS CRUCES	33.50	71.62	26	V		H03	11/93-11/94	12
128	E93SD	EOL093-SANTO DOMINGO - BASE MENSUAL	33.63	71.63	70	V		M	4 años	
129	DMCSD	DMC-SANTO DOMINGO	33.65	71.62	25	V	Aeródromo	HDMC	1/01-7/03	31

En la Tabla 2.2 se ha distinguido seis tipos de estaciones, de acuerdo al origen de la información disponible. La descripción de cada tipo se resume en la Tabla 2.3. Las estaciones tipo H03 y HDMC fueron analizadas en el marco de este proyecto. Las primeras fueron recopiladas y analizadas por el consultor y forman la base de datos anexa a este informe. Las segundas fueron analizadas y procesadas por profesionales de la DMC y se adjunta a este informe sólo los resultados de este procesamiento estadístico. Las estaciones tipo P fueron recopiladas en este proyecto pero sólo a nivel de promedios mensuales. Las estaciones tipo H93, M y O fueron tomadas del proyecto EOLO93. Las primeras fueron procesadas en ese estudio a partir de datos horarios, las segundas lo fueron a partir de promedios mensuales, y las últimas provienen de otros estudios previos descritos en aquel proyecto.

La Tabla 2.4 indica la distribución del número de estaciones según el tipo y Región donde están ubicadas. La Tabla 2.5 muestra la distribución de estaciones según la longitud de la serie de datos considerada en el análisis. Se incluyen en esta última tabla sólo las estaciones con información de resolución horaria (H03, HDMC y H93). Las figuras 2.1 a 2.4 muestran mapas con la ubicación de las estaciones. La figura 2.1 incluye la totalidad de las estaciones de la Tabla 2.2. Las figuras 2.2, 2.3 y 2.4 individualizan las estaciones existentes en las Regiones III, IV y V, respectivamente.

Se puede apreciar de las tablas y figuras anteriores que a pesar del gran número de puntos con información de viento, su distribución geográfica es altamente inhomogénea. Un gran número de estaciones se concentra en el valle del Aconcagua en la V Región, en el valle del Elqui en la IV Región, en Huasco y el valle del Copiapó en la III Región. Grandes áreas de la región de estudio, sin embargo, carecen de información de viento recopilada en este estudio. A nivel de zonas costeras los datos recopilados se ubican a distancias promedios entre 50-80 km a lo largo de la costa de las Regiones IV y V. En la III Región la cobertura costera es mucho menor, con información sólo en Huasco, Caldera y Chañaral.

También debe tenerse presente que existe una gran variedad en las estaciones identificadas en la Tabla 2.2. Los tipos de estaciones, sus sensores, procedimientos de mantención y chequeo de calidad de datos son altamente variables. Adicionalmente, la mayor parte de estas estaciones no ha sido instalada con fines de prospección del recurso eólico. Su emplazamiento, por tanto, no ha buscado detectar los puntos de mayor disponibilidad de viento en una determinada área, sino que ha respondido a objetivos distintos y a veces contrapuestos. Por ejemplo, una gran parte de las estaciones pertenece a redes de vigilancia de contaminación atmosférica, las que justamente están ubicadas en zonas de escasa circulación de aire y frecuentes estancamientos. Por lo tanto, los datos recopilados en este estudio deben ser considerados sólo a nivel referencial, y un pre-diseño de un sistema de explotación del recurso en una zona específica debería incluir la realización de mediciones específicamente orientadas a la prospección eólica.

Tabla 2.3 Tipos de estaciones presentadas en Tabla 2.2.

Tipo	Descripción
H03	Estaciones con datos a nivel horario que fueron recopiladas y analizadas en este proyecto
HDMC	Estaciones con datos a nivel horario que fueron analizadas por la DMC en el marco de este proyecto
P	Estaciones en que se cuenta con información sólo parcial
H93	Estaciones con datos a nivel horario que fueron recopiladas y analizadas en el proyecto EOLO93
M	Estaciones con datos a nivel mensual que fueron recopiladas y analizadas en el proyecto EOLO93
O	Estaciones analizadas en otros estudios y que fueron descritas en el proyecto EOLO93

Tabla 2.4 Distribución de estaciones por Región y tipo.

Región	H03	HDMC	P	H93	M	O	Total
III⁽¹⁾	16	5 ⁽¹⁾	9	1	5	8	44
IV	13	3	-	11	3	4	34
V	29	1	-	6	6	9	51
Total	58	9	9	18	14	21	129

(1): incluye estación DMCTA en II Región

Tabla 2.5 Distribución por longitud de serie de estaciones con series de datos horarios.

Longitud de serie (meses)	Estaciones (H03, HDMC, H93)
<6	6
6-11	6
12-23	27
24-35	20
36-47	9
48-59	8
>=60	9

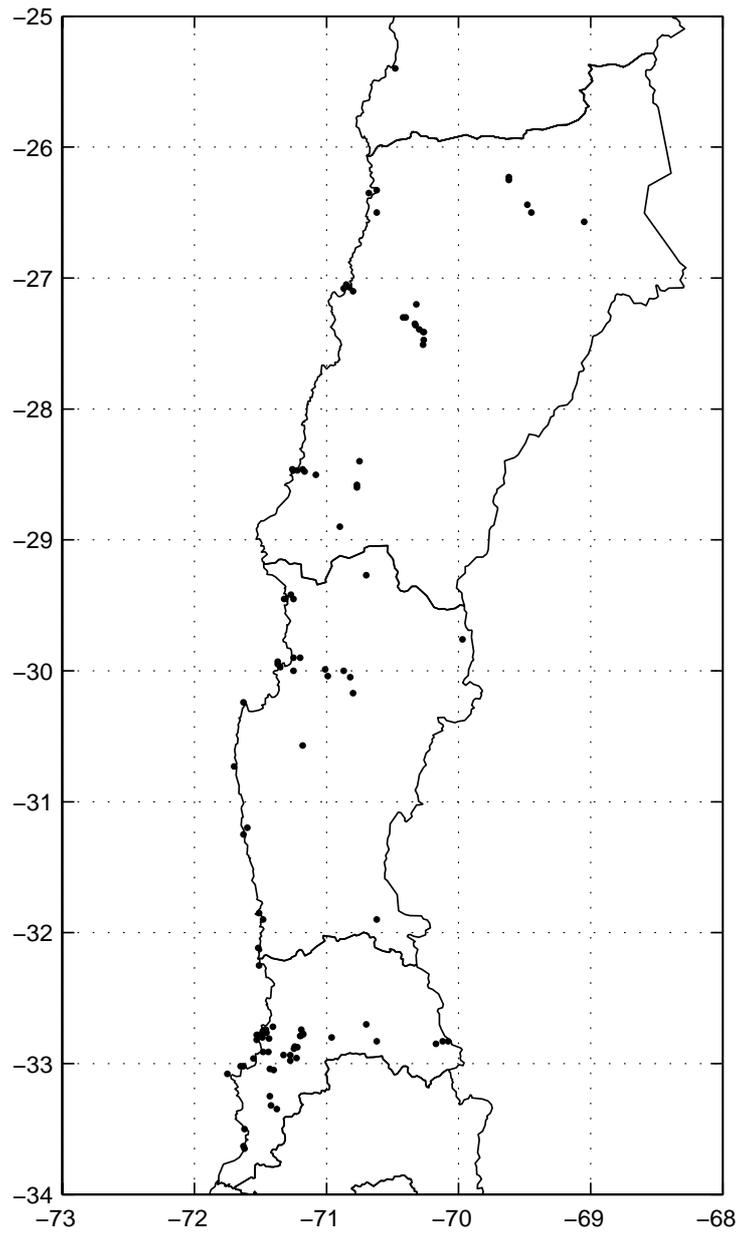


Figura 2.1 Ubicación de todas las estaciones de Tabla 2.2

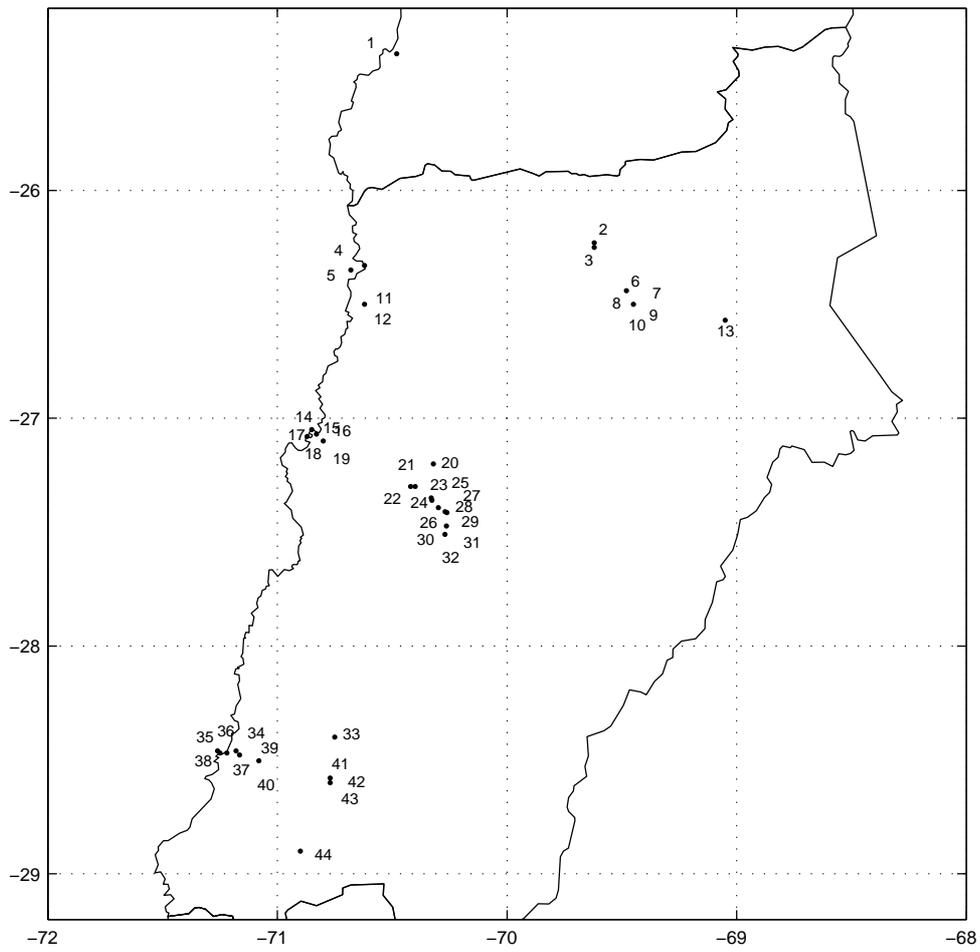


Figura 2.2 Identificación de estaciones en III Región

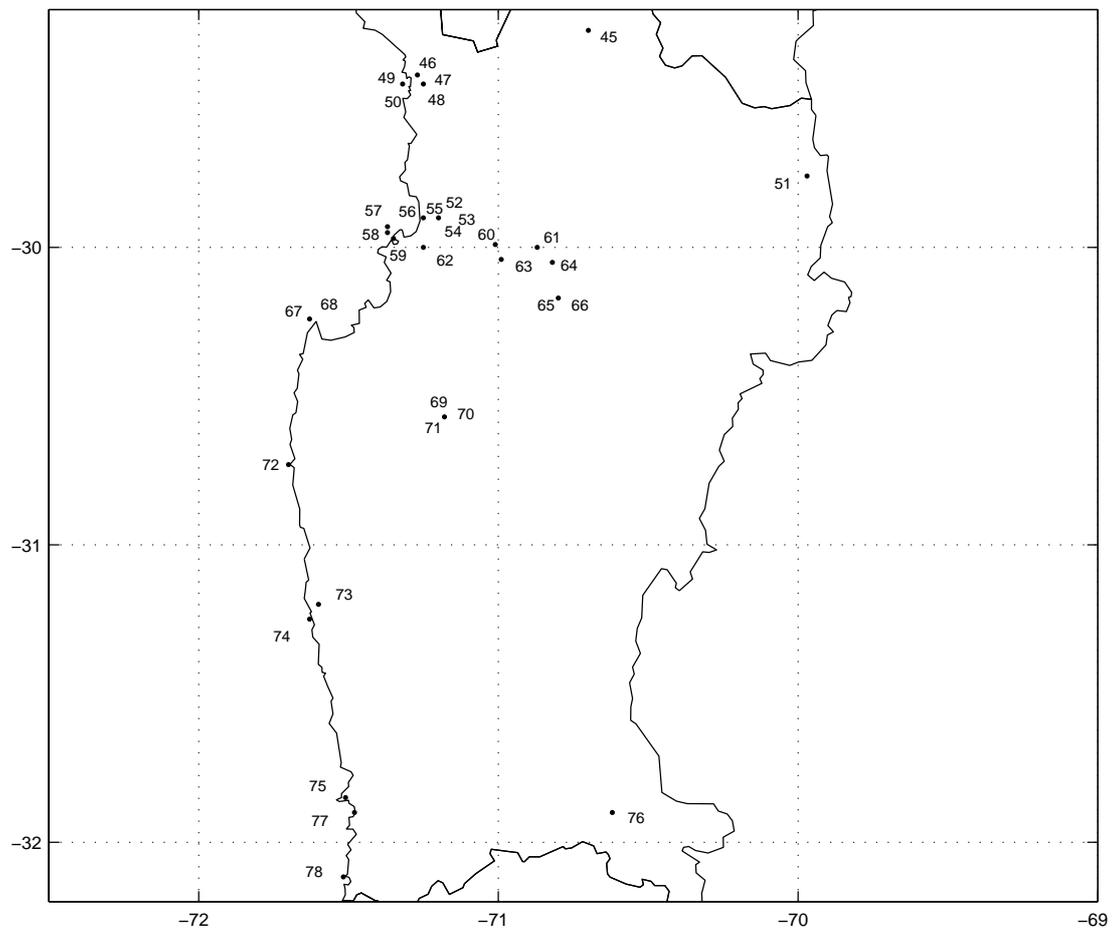


Figura 2.3 Identificación de estaciones en IV Región

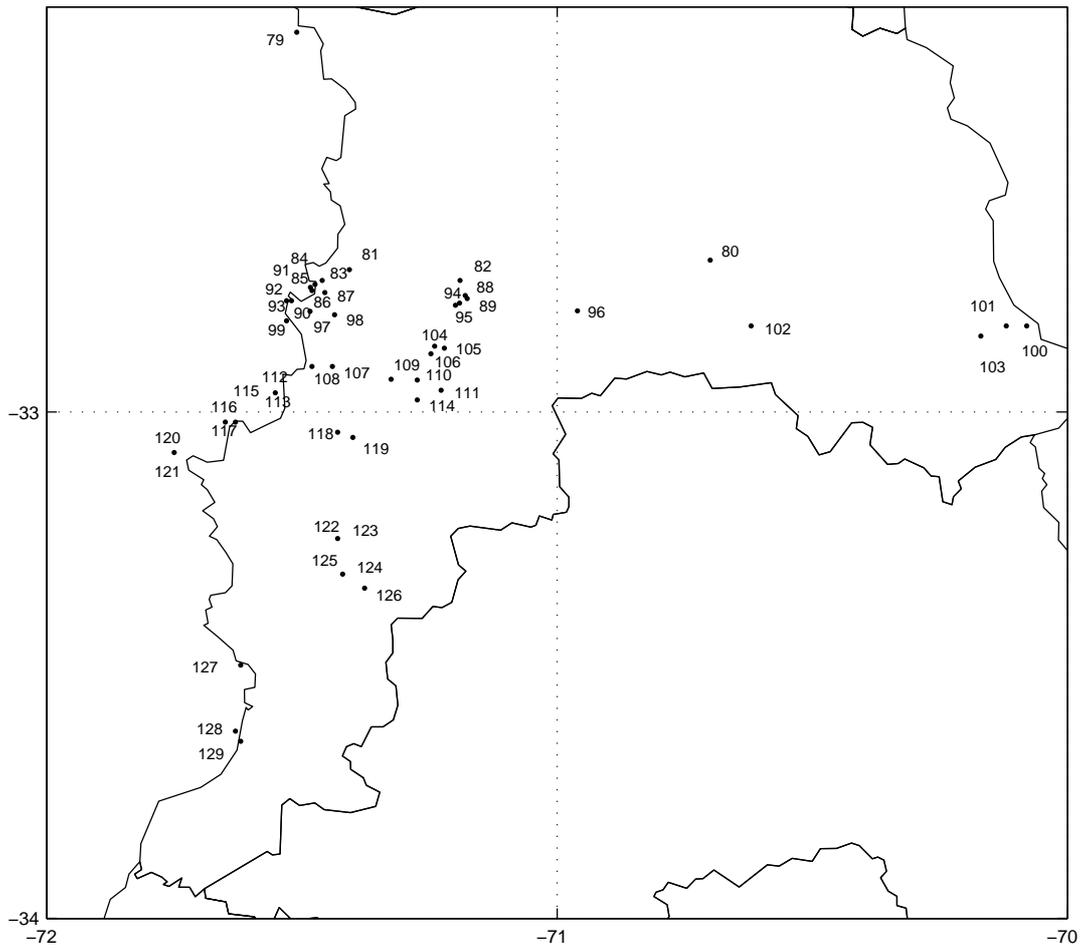


Figura 2.4 Identificación de estaciones en V Región.

2.2 Metodología de análisis

Se describe en esta sección la metodología de análisis de los datos de viento de las 58 estaciones recopiladas a nivel horario en este proyecto (estaciones tipo E03 en Tabla 2.2).

2.2.1 Procedimientos preliminares

Todos los datos de viento fueron recibidos en archivos computacionales. Sin embargo, los tipos de archivos y sus formatos fueron distintos para cada fuente de información. El primer procedimiento consistió en formar para cada estación recopilada un único archivo en formato Excel. Cada archivo tiene una hoja con los datos de velocidad y otra hoja con los datos de dirección de viento a nivel horario. Las unidades de velocidad corresponden a (m/s). Las unidades de la dirección del viento dependen de cómo han sido reportadas originalmente: grados sexagesimales o rumbos de la Rosa de Viento (N, NNE, NE, ENE,...). Las direcciones del viento se reportan según la dirección desde la cual sopla el viento, medida desde el Norte en el sentido horario.

Como referencia horaria de los archivos Excel se utilizó la Hora Oficial (UTC-4). Dado que la mayor parte de las fuentes de datos no informa si los promedios reportados han sido asignados al inicio, medio o fin del periodo de promediación, existe una incertidumbre de +/- 1 hora en los tiempos asignados a los datos de viento. En los casos que los datos básicos correspondían a promedios sub-horarios se calculó un promedio horario vectorial del viento.

Las planillas Excel formadas de esta manera fueron utilizadas para verificar la calidad de los datos básicos. Esta verificación se realizó mediante visualización de las series completas de datos. Se detectó y corrigió problemas en la compilación de los archivos Excel, se detectó y anotó datos con comportamiento sospechoso y se eliminó datos que parecían erróneos. Los archivos Excel validados de esta forma son entregados como Anexo computacional de este informe, y son los que fueron utilizados directamente en el análisis de datos reportado en la sección 2.3.

2.2.2 Cálculo de estadística básica

En primer lugar debe subrayarse que todos los resultados estadísticos presentados en tablas y figuras de este informe corresponden a valores llevados a una altura nominal de 10 m sobre el suelo. Las únicas excepciones a esto son las siguientes:

- Los datos básicos de las planillas Excel en el anexo computacional de este informe son los valores medidos a la altura del instrumento (ver Tabla 2.2).
- Los resultados de potencias generables y factores de utilización, cuyas alturas de referencia dependen de la máquina eólica considerada (ver Tabla 2.8)
- Las tablas y figuras del Anexo 4 que presentan resultados del proyecto EOLO93, algunos de los cuales están referidos a la altura del sensor (ver sección 2.2.4).

El análisis comienza leyendo los datos básicos de viento desde la planilla Excel correspondiente a una estación particular. Sobre estos datos se impone una velocidad mínima de 0.10 m/s, de tal forma que cualquier dato con velocidad menor a 0.10 m/s es reemplazado por este valor. Luego, las velocidades de viento son llevadas a una altura de 10 m sobre el suelo. Para ello se utiliza la fórmula

$$V_i = V_{m,i} \frac{\ln(10 / Z_o)}{\ln(Z_m / Z_o)}$$

en que $V_{m,i}$ es la velocidad medida, Z_m es la altura del sensor sobre el suelo y Z_o es la rugosidad superficial (alturas en metros). Los valores de estos dos últimos parámetros se indican en la Tabla 2.6. Para las estaciones en que no se conoce la altura del sensor de viento se ha asumido que ésta es 10 m. En cuanto a la rugosidad superficial se ha asumido en la mayoría de los casos un valor de 0.010 m. Sólo en casos en que se conoce los alrededores de la estación se ha asumido una rugosidad distinta del valor indicado. En la sección 2.3 se discute la sensibilidad de los resultados a la rugosidad superficial.

El periodo de tiempo sobre el cual se realiza el análisis estadístico depende de la longitud de la serie básica de datos. En el caso de estaciones que tienen información para un periodo menor a dos años, el análisis se realiza para cada mes particular y para el periodo completo de datos. Para las estaciones que tienen 24 o más meses de datos, se realiza un análisis mensual, anual y global. En estas estaciones el análisis mensual se realiza sobre todos los datos que hayan sido tomados en el mes particular, independiente del año al cual correspondan. Los resultados de Enero, por ejemplo, provienen del análisis estadístico conjunto de los datos tomados en todos los meses de Enero incluidos en la serie básica de datos. El análisis anual incluye todos los datos medidos de cada año, mientras que el análisis global comprende la serie completa de datos.

Los parámetros estadísticos básicos calculados son la velocidad media (V), la densidad de potencia eólica media (DP) y el número de datos considerado en el análisis (N). Las fórmulas de cálculo de V y DP son las siguientes

$$V = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i$$

$$DP = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \rho \frac{1}{2} V_i^3$$

en que V_i representa un dato individual de velocidad y ρ es la densidad del aire determinada como se explica más adelante.

La distribución estadística de los valores de velocidad se caracteriza mediante ajustes de distribuciones teóricas. En particular, se utiliza las distribuciones de Weibull de 2 parámetros (α y β) y la distribución Log-normal de parámetros μ y σ . Las funciones de densidad de probabilidad de estas dos distribuciones están dadas por las fórmulas siguientes:

Distribución de Weibull:
$$p(V) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{V}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{\alpha}\right)^\beta\right),$$

Distribución Log-normal:
$$p(V) = \frac{1}{V\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(\frac{-(\ln(V) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right).$$

El ajuste de parámetros de estas distribuciones teóricas se realizó mediante el método de máxima verosimilitud. Con los parámetros estimados se calculó los promedios de velocidad y densidad de potencia teóricos, obtenidos de integrar las distribuciones estadísticas en la forma siguiente:

$$VT = \int_0^{\infty} V p(V) dV,$$

$$DPT = \int_0^{\infty} \rho \frac{1}{2} V^3 p(V) dV.$$

Tabla 2.6 Parámetros de cálculo de estaciones de Tabla 2.2.

N	CODIGO	Hsensor (m)	Rugos. (m)	Ref.Temp	N	CODIGO	Hsensor (m)	Rugos. (m)	Ref.Temp
1	DMCTA	10.00			67	DGLVA	3.75	0.03	DGLVA
2	DMCSA	10.00			68	E93LV	3.75		
3	CIMSA				69	DMCOV	10.00	0.01	
4	CIMCH				70	E93OM			
5	E93CH				71	E93OV			
6	POTRE	10.00	0.01	WPOTR	72	E93TR	10.00		
7	E93PO				73	DGPAL	3.75	0.10	DGLVA
8	EPPO1				74	E93CE	10.00		
9	EPPO2				75	E93LV	10.00		
10	EPPO3				76	DGCUN	3.75	0.10	DGCUN
11	EPCH1				77	DMCLV	10.00	0.01	
12	EPCH2				78	PICHI	45.00	0.01	PICHI
13	E93LO	6.00			79	DGLMO	3.75	0.10	DGLMO
14	E93CA				80	EPHOR			
15	CANCA	10.00	0.01	WCALD	81	PUCHU	10.00	0.01	MEVEN
16	CIMCA				82	RURA2	9.00	0.01	MEMEL
17	DGCAL	3.75	0.10	WCALD	83	CAMPI	10.00	0.01	CAMPI
18	DGPCA	3.75	0.10	DGPCA	84	GREDA	10.00	0.01	MEVEN
19	CIMBI				85	PVEN2	10.00	0.01	CAMPI
20	CIMCO				86	MEVEN	10.00	0.01	MEVEN
21	CIMSP				87	MAITE	10.00	0.01	MEVEN
22	DMCCO	10.00			88	RURA1	12.00	0.01	MEMEL
23	E93CO				89	HIJUE	10.00	0.01	MEMEL
24	EPCO1				90	E93QM			
25	EPCO2				91	E93QU	15.00		
26	COPIA	10.00	0.01	DMCCO	92	EPQU1			
27	SFERN	10.00	0.01	DMCCO	93	EPQU2			
28	PAIPO	10.00	0.01	DMCCO	94	CALER	12.00	0.01	MEMEL
29	PRINC	10.00	0.01	DMCCO	95	MEMEL	10.00	0.01	MEMEL
30	CANTA	10.00	0.01	DMCCO	96	CHAGR	10.00	0.01	NEHUE
31	TAMAR	10.00	0.01	DMCCO	97	VESUR	10.00	0.01	MEVEN
32	CANMI	10.00	0.01	DMCCO	98	VALEG	10.00	0.01	MEVEN
33	CIMVA				99	E93RI	8.00		
34	HUASC	13.00	0.01	DGHUA	100	EPECR			
35	GUACO	25.00	0.01	DGHUA	101	E93RE			
36	CIMHU				102	E93AN			
37	DMCHU	10.00			103	E93JU	6.00		
38	DGHUA	3.75	0.10	DGHUA	104	INPQU	10.00	0.01	NEHUE
39	GUSM4	10.00	0.01	DGHUA	105	UCEVE	10.00	0.01	NEHUE
40	GUSM8	10.00	0.01	DGHUA	106	BOMBE	10.00	0.01	NEHUE
41	E93VA				107	COLMO	10.00	0.01	MEVEN
42	EPVAL				108	GAVIO	10.00	0.01	MEVEN
43	DMCVA	10.00			109	NEHUE	10.00	0.01	NEHUE
44	CIMDO				110	SPEDR	10.00	0.01	NEHUE
45	E93SI	10.00			111	ICSPE	10.00	0.01	NEHUE
46	E93CR	3.75			112	CONCF	10.00	0.01	MEVEN
47	DGTOF	3.75	0.03	DGTOF	113	CONCS	10.00	0.01	MEVEN
48	E93TF	3.75			114	LIMAC	10.00	0.01	NEHUE
49	DGCGR	3.75	0.03	DGCGR	115	E93PA			
50	E93CG	3.75			116	EPPA1			
51	INDIO	10.00	0.01	INDIO	117	EPPA2			
52	DMCSE	10.00	0.01		118	ARMAT	10.00	0.01	NEHUE
53	E93SE	10.00			119	E93BE			
54	E93SM	10.00			120	E93PC	8.00		
55	EPLF1	14.00			121	EPPCU			
56	EPLF2	14.00			122	E93OR	8.00		
57	E93PT				123	EPORO			
58	EPPTO				124	E93CB	8.00		
59	GUAYA	13.00	0.01	DGLVA	125	EPCAS			
60	PELIC	10.00	0.01	DGLVA	126	CBLAN	10.00	0.01	CBLAN
61	PUCLA	2.50	0.01	DGLVA	127	DGCRU	3.75	0.10	DMCSD
62	EPCOQ				128	E93SD			
63	ARRAY	2.50	0.01	DGLVA	129	DMCSD	10.00		
64	SCARL	10.00	0.01	DGLVA					
65	E93TO	20.00							
66	TOLOL	3.50	0.01	TOLOL					

En el caso de la densidad de potencia teórica calculada con la distribución Log-normal, el límite superior de la integración se reemplaza por una velocidad máxima finita. El valor de esta velocidad máxima se obtuvo de la mayor velocidad medida en la estación para el periodo completo de datos (llevada a 10 m sobre la superficie), y su magnitud se indica en las tablas de resultados.

Los valores teóricos VT y DPT no son entregados explícitamente en las tablas de resultados, sino sólo los errores porcentuales de ellos con respecto a los valores observados. Las fórmulas de cálculo de estos errores son las siguientes:

$$EV_d = 100 \frac{(VT_d - V_o)}{V_o},$$
$$EDP_d = 100 \frac{(DPT_d - DP_o)}{DP_o},$$

donde el subíndice *d* indica la distribución teórica considerada y el subíndice *o* indica los valores calculados a partir de los datos observados.

El cálculo de la densidad de potencia eólica requiere el valor de la densidad del aire, ρ . Esta se calcula mediante la ecuación de estado de gases ideales en la forma

$$\rho = \frac{P}{RT},$$

donde P es la presión atmosférica, T es la temperatura (en grados Kelvin) y R es una constante para aire seco ($R=287 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$). La presión atmosférica media en cada estación fue estimada a partir de su altitud sobre el nivel del mar mediante la expresión

$$P = P_o \left[1 - a \frac{Z_T}{T_o} \right]^{\frac{g}{aR}},$$

donde Z_T es la altitud de la estación sobre el nivel del mar (m), y las constantes tienen los valores: $P_o=101325 \text{ Pa}$, $T_o=288 \text{ K}$, $a=0.0065 \text{ K/m}$, $g=9.8 \text{ m/s}^2$.

La temperatura T utilizada en el cálculo de la densidad corresponde al valor promedio para el periodo de análisis. Para las estaciones que contaban con datos de temperatura se estimó a partir de ellos los promedios mensuales y globales de temperatura. Para las estaciones en que no se disponía de esa información, se recurrió a promedios de temperatura de estaciones cercanas, las que fueron corregidas por la diferencia de altitudes entre ambas estaciones mediante la fórmula

$$T = T_{ref} - a(Z_T - Z_{ref}),$$

donde T_{ref} y Z_{ref} son, respectivamente, la temperatura y la altitud de la estación utilizada como referencia. La Tabla 2.6 indica en la columna “Ref.Temp.” el código de la estación utilizada como referencia para cada estación. La Tabla 2.7 describe las estaciones usadas como referencia y las temperaturas medias mensuales y globales de cada una. Dos de las estaciones han sido tomadas desde la base de datos on-line ubicada en <http://www.weatherbase.com>, mientras que otras dos provienen de promedios mensuales de temperatura solicitados especialmente a la DMC. Los valores de densidad y temperatura media usados en cada caso se indican de manera explícita en las tablas de resultados de cada estación.

Tabla 2.7 Estaciones con datos de temperaturas medias

ESTACION	LAT	LON	ALT	Temperaturas medias mensuales (C)											
				ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
WPOTR ⁽¹⁾	26.43	69.48	2804	13.0	13.0	13.0	12.0	11.0	9.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	12.0
WCALD ⁽¹⁾	27.02	71.00	14	20.0	20.0	18.0	16.0	15.0	13.0	13.0	13.0	14.0	15.0	16.0	18.0
DGPCA	27.08	70.87	11	19.8	19.3	18.6	17.3	15.4	14.4	13.6	13.2	13.3	15.0	16.1	18.1
DMCCO ⁽²⁾	27.30	70.42	291	19.4	19.4	18.3	15.2	13.5	11.4	11.5	12.6	13.6	15.3	16.2	18.0
DGHUA	28.47	71.25	30	18.3	17.8	18.3	16.7	15.5	14.6	13.6	13.8	14.9	15.2	15.6	16.9
DGCGR	29.45	71.32	30	18.9	18.2	18.7	13.9	13.3	12.7	12.6	12.8	13.5	14.2	14.8	17.1
DGTOF	29.45	71.25	780	22.1	22.1	13.1	15.0	14.2	13.7	12.5	11.8	13.1	11.9	12.9	16.2
INDIO	29.76	69.97	3871	7.8	8.2	6.2	2.5	-0.8	-3.0	-3.3	-2.0	-2.8	3.1	3.0	6.1
TOLOL	30.17	70.80	2028	16.7	16.8	16.0	14.2	12.4	8.7	10.5	10.5	10.6	11.9	14.8	15.8
DGLVA	30.25	71.63	10	17.2	16.9	17.3	16.0	14.9	13.9	12.7	12.9	13.7	14.2	14.9	16.3
DGCUN	31.90	70.62	1120	20.9	21.5	19.2	16.0	13.1	13.3	11.7	12.6	12.8	16.6	17.4	20.6
PICHI	32.12	71.52	35	17.5	17.9	16.9	15.8	14.5	13.9	12.9	13.8	14.4	15.3	16.3	16.9
DGLMO	32.25	71.51	37	17.0	16.0	16.8	14.7	13.3	13.1	10.7	11.2	13.0	13.9	14.5	15.6
CAMPI	32.74	71.46	10	17.1	16.7	17.1	14.7	12.0	10.6	10.3	11.4	11.9	13.5	14.4	16.2
MEVEN	32.76	71.48	33	16.6	15.7	16.9	14.2	13.1	11.8	10.9	12.2	12.1	13.4	14.3	16.1
MEMEL	32.79	71.20	210	19.6	19.0	18.7	16.1	13.6	12.3	11.9	12.8	13.4	14.7	16.6	18.6
NEHUE	32.94	71.33	70	18.3	18.0	17.0	14.4	12.5	10.7	10.3	11.8	12.9	14.6	16.0	17.7
CBLAN	33.35	71.38	270	17.3	16.1	15.4	12.6	10.7	7.3	7.7	10.3	10.9	12.1	13.1	16.0
DMCSD ⁽²⁾	33.68	71.63	25	15.7	15.2	14.7	11.9	10.7	11.0	7.6	8.5	11.8	13.5	13.9	14.4

(1): Temperaturas medias obtenidas de base de datos on-line <http://www.weatherbase.com>

(2): Temperaturas medias solicitadas especialmente a DMC

2.2.3 Cálculo de máquinas eólicas

Se definió tres tipos de máquinas eólicas genéricas, a las cuales se les calculó su potencia generable en base tanto a los datos de velocidad de viento observados, como a las distribuciones estadísticas teóricas derivadas de los datos. Las tres máquinas tienen las características indicadas en la Tabla 2.8, y sus curvas de generación se muestran en la Figura 2.5.

Tabla 2.8 Características de máquinas eólicas genéricas.

Máquina eólica	Potencia nominal (kW)	Altura eje (m)
1	660	45
2	1500	62
3	2000	78

La potencia generable calculada a partir de los datos observados es

$$P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P(V_{H,i}),$$

donde $P(V_{H,i})$ es la potencia generable interpolada para la velocidad $V_{H,i}$ desde la curva de generación de la máquina correspondiente. El valor de $V_{H,i}$ es la velocidad observada extrapolada a la altura del eje de la máquina (H) mediante una expresión logarítmica similar a la usada antes para llevar los datos observados a 10 m sobre la superficie:

$$V_{H,i} = V_i \cdot f_H,$$

donde $f_H = \frac{\ln(H/Z_o)}{\ln(10/Z_o)}$.

La interpolación desde las curvas de generación se realiza después de corregir las velocidades de estas últimas debido al efecto de la densidad del aire. Los valores de velocidad en las curvas de generación se consideran definidos para una densidad del aire $\rho_o=1.225 \text{ kg/m}^3$. Estos valores son llevados a la densidad media de cada estación siguiendo la misma metodología usada en el proyecto EOLO93, esto es:

$$V_\rho = V_{\rho_o} \left(\frac{\rho_o}{\rho} \right)^{1/3}.$$

El factor de utilización de cada máquina se calcula simplemente como

$$F = 100 \frac{P}{PN},$$

donde PN es la potencia nominal de la máquina correspondiente (ver Tabla 2.8).

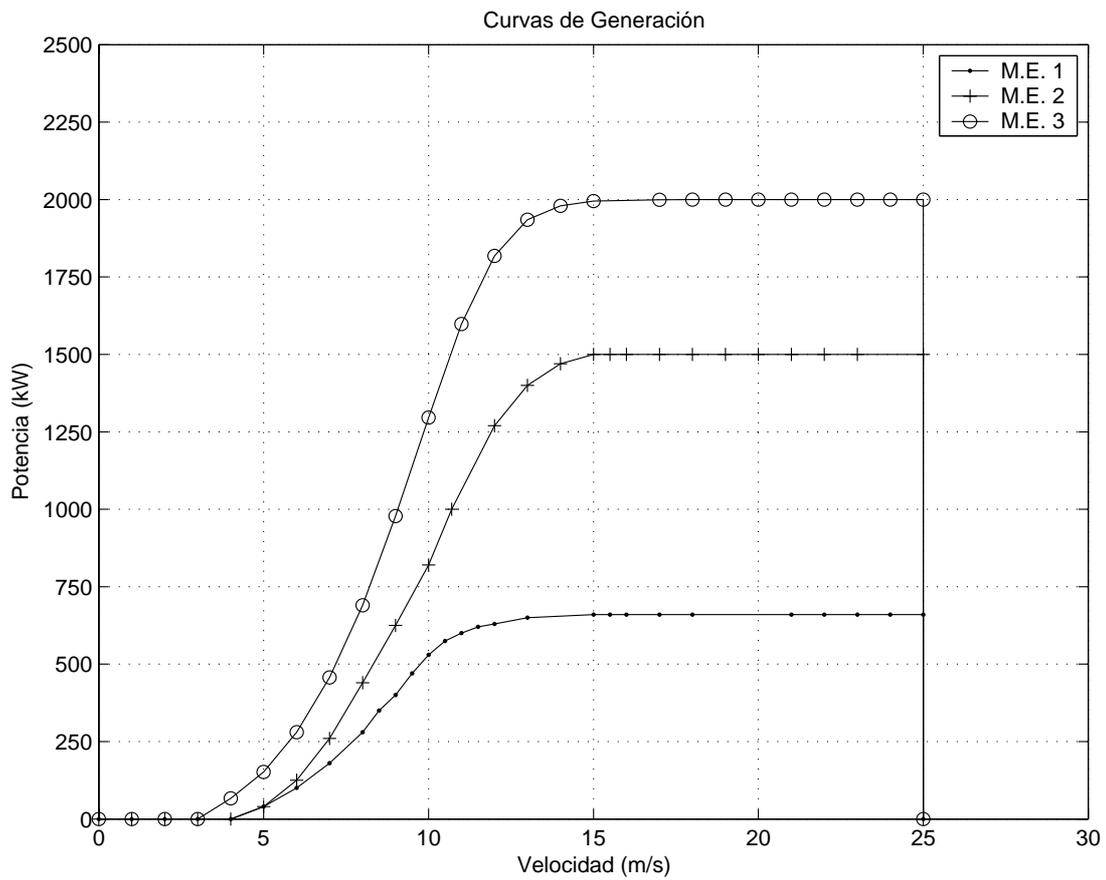


Figura 2.5 Curvas de generación de tres máquinas eólicas utilizadas en cálculo de potencias generables.

El cálculo de la potencia generable utilizando las distribuciones teóricas de la velocidad del viento hace uso de los parámetros obtenidos previamente con la serie de velocidades a 10 m sobre el suelo. Los parámetros son llevados primero a la altura del eje de las máquinas eólicas (H) utilizando las expresiones:

$$\alpha_H = \alpha \cdot f_H, \quad \beta_H = \beta$$
$$\mu_H = \mu + \ln(f_H), \quad \sigma_H = \sigma.$$

Las potencias generable teóricas son calculadas luego con la expresión

$$PT = \int_0^{\infty} P(V)p(V)dV$$

donde p(V) es la distribución teórica de Weibull o Log-Normal, según corresponda. El límite superior de la integral en el último caso se reemplaza por el parámetro de velocidad máxima observada en la estación (llevado a la altura del eje de la máquina eólica correspondiente).

La potencia generable teórica no se entrega explícitamente en las tablas de resultados, sino sólo el error porcentual asociado a ellas, definido como

$$EP = 100 \frac{(PT - P)}{P}.$$

2.2.4 Diferencias con otros procesamientos

La metodología descrita anteriormente es muy similar a la que fue utilizada en el proyecto EOLO93. La principal diferencia radica en el cálculo de potencias generables y factores de utilización, puesto que en ambos estudios se utilizó como referencia máquinas generadoras muy distintas. En el Proyecto EOLO93 se utilizó tres máquinas de 33, 100 y 300 kW de potencia nominal, con ejes a 25 m sobre el suelo. Las máquinas utilizadas en el presente proyecto son mucho mayores, según se ha descrito anteriormente. Una segunda diferencia es que las velocidades medias y densidades de potencia reportadas en las tablas de resultados para cada estación en el proyecto EOLO93 correspondían a los datos medidos a la altura particular del sensor. Las tablas de resultados del presente proyecto, en cambio, indican velocidades y potencias llevadas a una altura normalizada de 10 m sobre el suelo.

Como se indicó previamente, el procesamiento de las nueve estaciones de la DMC fue realizado por profesionales de esa entidad, quienes entregaron como resultados las velocidades medias y los parámetros ajustados de las distribuciones de Weibull y log-normales para periodos mensuales. Las horas de calma fueron consideradas en el cálculo de las velocidades medias, pero no así en el ajuste de las distribuciones estadísticas. El porcentaje de calmas sólo tiene importancia en la estación de La Serena (DMCSE), que presenta un alto porcentaje de éstas.

A partir de los parámetros estadísticos ajustados por DMC, el consultor calculó la densidad de potencia eólica (DP) a nivel mensual para cada estación y las potencias generables y factores de utilización para las mismas tres máquinas eólicas descritas en 2.2.3. En estos cálculos se asumió una temperatura media de 10 °C y una velocidad máxima de 10 m/s (para los casos de distribuciones log-normales). Asimismo, se ponderó en los promedios finales la fracción de tiempo con medición de calmas para cada estación.

Por último, y dado que la estación DMC de Taltal (DMCTA) mostrara niveles altos de viento, se solicitó a DMC en forma especial la serie de datos horaria de viento para esta estación, con el objeto de someter a estos datos a un procesamiento estadístico exactamente igual al de las restantes estaciones analizadas por el consultor. Por tanto, los resultados de esta estación se presentan en exactamente el mismo formato que las demás estaciones analizadas por el consultor.

2.3 Resultados

2.3.1 Descripción de anexos con resultados

Los resultados de los procesamientos estadísticos se presentan en los Anexos 1, 2 y 3 de este informe. El Anexo 1 contiene los resultados para las 58 estaciones recopiladas a nivel horario en este proyecto (estaciones tipo H03). El Anexo 2 presenta los resultados de las estaciones DMC, mientras que el Anexo 3 contiene los resultados de procesamientos extraídos del proyecto EOLO93.

En el Anexo 1 se presenta para cada estación una página con los resultados en forma tabular y dos páginas con figuras. La primera página se encabeza con la identificación de la estación mediante su código de cinco letras, su ubicación, la altura del sensor y rugosidad utilizada en los cálculos, las fechas de inicio y fin de los datos, la magnitud de la velocidad máxima (utilizada en cálculos de potencias con distribución log-normal) y el código de la estación utilizada como referencia para la determinación de la temperatura media.

A continuación se presentan los resultados estadísticos a nivel mensual. Como se explicó previamente, las estaciones que contaban con menos de 2 años de datos se analizaron a nivel de meses individuales, mientras que las con series más extensas fueron analizadas a nivel de meses genéricos. Para estas últimas, se presentan también resultados a nivel de años completos. Para todas las estaciones se presenta finalmente una columna con el resultado del procesamiento de la serie completa de datos (columna denominada TOTAL).

Los resultados presentados en las tablas son los siguientes:

V (m/s):	velocidad media llevada a 10 m sobre la superficie
DP (W/m ²):	densidad de potencia eólica a 10 m sobre la superficie
N:	número de datos considerados
RHO (kg/m ³):	densidad del aire
T (C):	temperatura media del aire
ALFA (m/s):	parámetro α de distribución de Weibull
BETA:	parámetro β de distribución de Weibull
MU:	parámetro μ de distribución Log-normal (ajustada sobre valores en m/s)
SIGMA:	parámetro σ de distribución Log-normal (ajustada sobre valores en m/s)
EVW:	error porcentual de ajuste a velocidad media mediante dist. de Weibull
EVL:	error porcentual de ajuste a velocidad media mediante dist. log-normal
EDPW:	error porcentual de ajuste de densidad de potencia media mediante dist. de Weibull
EDPL:	error porcentual de ajuste de densidad de potencia mediante dist. log-normal
P1 (kW):	potencia generable para máquina eólica 1
P2 (kW):	potencia generable para máquina eólica 2
P3 (kW):	potencia generable para máquina eólica 3
F1 (%):	factor de utilización para máquina eólica 1
F2 (%):	factor de utilización para máquina eólica 2
F3 (%):	factor de utilización para máquina eólica 3
EPW1:	error porcentual de ajuste a potencia generable de máquina eólica 1 mediante dist. Weibull.
EPW2:	error porcentual de ajuste a potencia generable de máquina eólica 2 mediante dist. Weibull.
EPW3:	error porcentual de ajuste a potencia generable de máquina eólica 3 mediante dist. Weibull.
EPL1:	error porcentual de ajuste a potencia generable de máquina eólica 1 mediante dist. log-normal.
EPL2:	error porcentual de ajuste a potencia generable de máquina eólica 2 mediante dist. log-normal.
EPL3:	error porcentual de ajuste a potencia generable de máquina eólica 3 mediante dist. log-normal.

A continuación se presentan dos páginas con figuras, cuyo formato depende de si las estaciones tienen menos o más de 2 años de datos. Para las estaciones con registro corto

se presentan primeramente 2 paneles en que se grafica la variación mensual y horaria de la velocidad y densidad de potencia eólica media. Estos paneles contienen isolíneas de valores medios calculados para el periodo completo con datos. La tercera figura muestra la variación mensual de la dirección de viento, expresada como isolíneas de frecuencias mensuales de la dirección de viento.

La segunda página de figuras para estaciones de registro corto comienza con dos figuras que ilustran la variación horaria de velocidades y direcciones de viento. Estas se expresan como isolíneas de frecuencias calculadas para cada hora utilizando el registro completo de los datos. La tercera figura muestra la evolución mensual de los deciles de velocidad. Por último, la figura restante muestra la distribución estadística de magnitudes de viento en rangos de 1 m/s.

Las figuras de estaciones con registro largo comienzan con dos paneles que grafican la variabilidad de la velocidad media. El primero es un gráfico del ciclo anual y diario de la velocidad media de viento. El segundo gráfico muestra la variación anual de los promedios mensuales de velocidad de viento, para todos los años con datos. Esta última figura ilustra la variabilidad interanual de los datos.

A continuación se presentan dos figuras similares a las anteriores, pero obtenidas para las densidades de potencia eólica observadas. Finalmente, una última figura en esta página muestra la variabilidad mensual de las direcciones de viento, mediante isolíneas de frecuencias de direcciones a nivel mensual.

La segunda página de figuras para estaciones de registro largo comienza con dos figuras que muestran la distribución horaria de las velocidades y direcciones de viento, mediante isolíneas de frecuencia de ocurrencia determinadas para cada hora, sobre el registro completo de los datos. La tercera figura muestra la evolución mensual de los deciles de velocidad, y la última figura muestra la distribución estadística de velocidades en intervalos de 1 m/s.

El Anexo 2 contiene los resultados para las 9 estaciones de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC). La estación DMCTA fue procesada a nivel horario con la misma metodología empleada en las estaciones del Anexo 1, y sus resultados se presentan en la misma forma que los de aquellas estaciones. Las 8 estaciones restantes fueron procesadas principalmente por profesionales de la DMC y se presentan aquí los resultados de este análisis.

Para cada estación DMC se presenta una página con los resultados en forma tabular y una página con figuras. La primera página se encabeza con la identificación de la estación mediante su código de cinco letras, su ubicación y la altura del sensor. Se indica también el porcentaje global de calmas reportado, y las fechas de inicio y fin de los datos procesados.

A continuación se presentan los resultados estadísticos a nivel mensual y para el total de la serie de datos (columna denominada TOTAL). Los resultados presentados en las tablas son los siguientes:

V (m/s):	velocidad media llevada a 10 m sobre la superficie
DP (W/m ²):	densidad de potencia eólica a 10 m sobre la superficie
ALFA (m/s):	parámetro α de distribución de Weibull
BETA:	parámetro β de distribución de Weibull
MU:	parámetro μ de distribución Log-normal (ajustada sobre valores en m/s)
SIGMA:	parámetro σ de distribución Log-normal (ajustada sobre valores en m/s)
EVW:	error porcentual de ajuste a velocidad media mediante dist. de Weibull
EVL:	error porcentual de ajuste a velocidad media mediante dist. log-normal
P1 (kW):	potencia generable para máquina eólica 1
P2 (kW):	potencia generable para máquina eólica 2
P3 (kW):	potencia generable para máquina eólica 3
F1 (%):	factor de utilización para máquina eólica 1
F2 (%):	factor de utilización para máquina eólica 2
F3 (%):	factor de utilización para máquina eólica 3

Debe notarse que las horas de calma fueron consideradas en el cálculo de las velocidades medias (V), pero no así en el ajuste de los parámetros de las distribuciones estadísticas. El porcentaje de calmas sólo tiene importancia en la estación de La Serena (DMCSE), que presenta un alto porcentaje de éstas.

A partir de los parámetros estadísticos ajustados por DMC, el consultor calculó la densidad de potencia eólica (DP) a nivel mensual para cada estación y las potencias generables y factores de utilización para las mismas tres máquinas eólicas utilizadas en el procesamiento de las estaciones del Anexo 1. Se ponderó en los promedios finales la fracción de tiempo con medición de calmas para cada estación.

A continuación de la página con la tabla de resultados se presenta para cada estación una página con figuras. En ésta el panel superior izquierdo muestra el ciclo anual y diario de la velocidad media de viento. El panel superior derecho muestra la distribución estadística de velocidades en intervalos de 1 m/s. Los paneles inferiores muestran la distribución horaria de las velocidades (panel izquierdo) y direcciones (panel derecho) de viento, mediante isolíneas de frecuencia de ocurrencia determinadas para cada hora, sobre el registro completo de los datos.

El Anexo 3 contiene información de viento de 9 estaciones en la III Región operadas por CIMM entre 1998 y 1999 en el marco del proyecto “Diagnóstico de la calidad del aire III Región”. De su informe final se extrajo promedios mensuales y ciclos diarios de viento. La única tabla de este anexo muestra los promedios mensuales de velocidad de viento (V en m/s) y desviación estándar de la velocidad del viento (σ_V en m/s). Las figuras del anexo muestran ciclos diarios de velocidad del viento para el periodo

completo de mediciones (estaciones CIMBI, CIMSP, CIMDO) o para las cuatro estaciones del año (estaciones CIMSA, CIMCH, CIMCA, CIMCO, CIMHU, CIMVA).

El Anexo 4 presenta los resultados del Proyecto EOLO93 relevantes para el presente estudio. Se ha extraído del Informe Final de aquel proyecto las tablas y figuras de resultados que contienen información para estaciones ubicadas entre la III y V Regiones. La reproducción de estos resultados en este anexo se realiza con el propósito de concentrar en un solo volumen el máximo de información acerca de vientos observados en la zona de interés. Los detalles de los procesamientos y la descripción detallada de los resultados presentados en este anexo deben ser buscados en el informe EOLO93 y en sus referencias.

La sección 2 de este anexo reproduce la Tabla 8.1 del informe EOLO93. En ella se resumió la información más confiable de velocidad y densidad de potencia recopilada en aquel estudio. Se incluyen tanto los análisis basados en información horaria, como el basado en promedios mensuales.

La sección 3 de este anexo reproduce la información del Anexo V del informe EOLO93. En ellas se presenta las tablas y figuras con el resumen estadístico de los procesamientos a nivel horario realizados en aquel proyecto. La sección 4 reproduce la Tabla III.2 del informe EOLO93. En ella se resume los resultados de los promedios anuales de velocidad calculados a partir de información de los anuarios de la DMC. En la sección 5 se reproduce la Tabla 3.3 del informe EOLO93. En ella se encuentra el resumen de resultados de estudios previos a aquel proyecto. Finalmente, en la sección 6 se reproduce la Tabla 3.4 del informe EOLO93. En ella se da más detalle de los resultados de algunos de los estudios previos revisados en el proyecto EOLO93.

2.3.2 Resumen de resultados

La Tabla 2.9 resume los resultados más básicos derivados para las 129 estaciones en la región de estudio. Las estaciones son descritas por su número y código, su latitud, longitud y altitud, y para cada una de ellas se indica su velocidad media (V) y densidad de potencia eólica media (DP), todos referidos a 10 m sobre el suelo. La Tabla 2.10 repite la misma información, pero en ella las estaciones han sido ordenadas en forma decreciente de acuerdo a su velocidad media (V). La columna denominada Rango muestra en esta tabla el lugar de cada estación, según su velocidad media. Sólo se muestran las estaciones con velocidades mayores o iguales a 3 m/s. Por último, la Tabla 2.11 muestra las estaciones ordenadas por densidad de potencia eólica a 10 m sobre el suelo. En este caso se muestra sólo las estaciones con DP mayor o igual a 40 W/m^2 .

Puede apreciarse de la Tabla 2.10 que las estaciones con mayores velocidades medias (V mayor o igual a 5 m/s) se separan en dos grupos muy distintos. Por un lado están las estaciones costeras (E93PC, E93CE, DMCTA, E93LV, E93TR) y por otro lado están las estaciones en altura, ya sea sobre cerros del valle central o en la Cordillera de Los Andes (E93RE, E93SI, E93TO). Las estaciones con velocidades algo más bajas ($5 \text{ m/s} > V > 3 \text{ m/s}$) se ubican en puntos costeros menos favorecidos al régimen de viento oceánico, sectores altor más protegidos, o en lugares de valles de condiciones eólicas favorables.

Por último, las estaciones con velocidades débiles se encuentran en valles centrales de poca ventilación.

Al comparar las Tablas 2.10 y 2.11 debe observarse que el orden de las estaciones según velocidad media no es igual al ordenamiento por densidad de potencia. En este sentido destacan las estaciones DGCRU, EPHOR, DGLVA y CHAGR, las que saltan, respectivamente, 30, 11, 8 y 8 lugares entre el ordenamiento por velocidad y el ordenamiento por densidad de potencia. La forma de la distribución estadística es probablemente la causante de estas diferencias, pues las distribuciones con mayor cola a la derecha presentarán una densidad de potencia eólica proporcionalmente mayor que las distribuciones con cola derecha restringida. Otro factor a considerar es que la disminución de la densidad del aire con la altura hace que en términos de la densidad de potencia eólica algunas de las estaciones de mayor altitud retrocedan en el orden relativo.

La Tabla 2.12 muestra, para las 67 estaciones procesadas en este estudio (9 estaciones DMC más 58 estaciones recopiladas por el consultor), los factores de utilización para las tres máquinas eólicas descritas en la sección 2.2.3. Las estaciones han sido ordenadas de manera decreciente de acuerdo al factor de utilización de la máquina eólica más pequeña (F1). Debe enfatizarse que las estaciones en esta tabla forman sólo un subconjunto de las 129 estaciones consideradas en el proyecto.

*Mejoría del conocimiento del recurso eólico en el Norte y Centro del país
Comisión Nacional de Energía – Departamento de Geofísica, Universidad de Chile - 2003*

Tabla 2.9 Resumen de velocidad y densidad de potencia media para cada estación (valores a altura nominal de 10 m sobre la superficie)

N	CODIGO	Lat	Lon	Altitud	V (m/s)	DP (W/m ²)	Obs.	N	CODIGO	Lat	Lon	Altitud	V (m/s)	DP (W/m ²)	Obs.
1	DMCTA	25.40	70.48	115	5.6	165		67	DGLVA	30.24	71.63	10	4.8	190	
2	DMCSA	26.23	69.62	2250	3.6	40		68	E93LV	30.24	71.63	10	5.1	202	
3	CIMSA	26.25	69.62	2400	2.8			69	DMCOV	30.57	71.18	335	2.2	19	
4	CIMCH	26.33	70.62	30	2.7			70	E93OM	30.57	71.18	370	2.7	20	
5	E93CH	26.35	70.68	13	3.7	50		71	E93OV	30.57	71.18	300	2.3	22	
6	POTRE	26.44	69.48	2800	2.7	21		72	E93TR	30.73	71.70	9	5.1	169	
7	E93PO	26.50	69.45	2850	2.9	20		73	DGPAL	31.20	71.60	230	2.1	19	
8	EPPO1	26.50	69.45	2901	4.0	80	1	74	E93CE	31.25	71.63	60	5.6	255	
9	EPPO2	26.50	69.45	2901	7.8	304	1	75	E93LV	31.85	71.51	60	3.7	98	
10	EPPO3	26.50	69.45	2901	5.6	137	1	76	DGCUN	31.90	70.62	1120	1.0	3	
11	EPCH1	26.50	70.62	9	4.0	80	1	77	DMCLV	31.90	71.48	60	3.3	45	
12	EPCH2	26.50	70.62	9	3.7		1	78	PICHI	32.12	71.52	35	3.3	53	
13	E93LO	26.57	69.05	3800	4.4	88		79	DGLMO	32.25	71.51	37	2.4	30	
14	E93CA	27.05	70.85	14	2.4	10		80	EPHOR	32.70	70.70		3.7	96	
15	CANCA	27.07	70.83	11	3.8	67		81	PUCHU	32.72	71.41	42	1.5	6	
16	CIMCA	27.07	70.83	65	2.3			82	RURAU	32.74	71.19	209	1.5	4	2
17	DGCAL	27.07	70.83	11	3.4	51		83	CAMPI	32.74	71.46	10	1.3	5	
18	DGPCA	27.08	70.87	11	3.5	57		84	GREDA	32.75	71.47	13	1.9	12	
19	CIMBI	27.10	70.80		2.3			85	PVEN2	32.75	71.48	10	2.3	12	
20	CIMCO	27.20	70.32	340	2.2			86	MEVEN	32.76	71.48	33	2.5	22	
21	CIMSP	27.30	70.40		3.4			87	MAITE	32.76	71.46	41	1.8	10	
22	DMCCO	27.30	70.42	291	2.5	27		88	RURAU	32.77	71.18	223	1.8	7	
23	E93CO	27.35	70.33	370	3.7	50		89	HIJUE	32.78	71.18	220	2.1	20	
24	EPCO1	27.35	70.33	370	5.9		1	90	E93QM	32.78	71.52	2	3.1	50	
25	EPCO2	27.35	70.33	370	4.8	83	1	91	E93QU	32.78	71.52	8	2.2	39	
26	COPIA	27.36	70.33	371	2.6	20		92	EPQU1	32.78	71.53	3	5.4		1
27	SFERN	27.39	70.30	422	2.1	13		93	EPQU2	32.78	71.53	3	3.2	48	
28	PAIPO	27.41	70.27	450	2.1	16		94	CALER	32.79	71.19	209	2.0	8	
29	PRINC	27.41	70.26	499	3.1	64		95	MEMEL	32.79	71.20	210	3.2	43	
30	CANTA	27.47	70.26	499	2.2	12		96	CHAGR	32.80	70.96	400	3.5	76	
31	TAMAR	27.47	70.26	499	2.4	14		97	VESUR	32.80	71.48	63	2.4	24	
32	CANMI	27.51	70.27	520	2.2	14		98	VALEG	32.81	71.44	21	1.2	4	
33	CIMVA	28.40	70.75	425	1.5			99	E93RI	32.82	71.53	10	2.0	12	2
34	HUASC	28.46	71.18	25	2.1	12		100	EPECR	32.83	70.08	3829	7.2	366	1
35	GUACO	28.46	71.26	30	2.3	15		101	E93RE	32.83	70.12	3830	6.9	220	
36	CIMHU	28.47	71.22	30	2.8			102	E93AN	32.83	70.62	816	1.9	10	
37	DMCHU	28.47	71.22	25	2.5	27		103	E93JU	32.85	70.17	2217	2.6	25	
38	DGHUA	28.47	71.25	30	3.5	65		104	INPQU	32.87	71.24	125	2.2	21	2
39	GUSM4	28.48	71.17	50	3.0	35		105	UCEVE	32.87	71.22	125	2.0	20	
40	GUSM8	28.50	71.08	60	2.6	32		106	BOMBE	32.89	71.25	120	1.8	10	
41	E93VA	28.58	70.77	469	1.9	10		107	COLMO	32.91	71.44	30	1.9	19	
42	EPVAL	28.58	70.77	533	2.7	32	1	108	GAVIO	32.91	71.48	80	2.0	10	
43	DMCVA	28.60	70.77	526	2.0	16		109	NEHUE	32.94	71.33	70	2.6	40	
44	CIMDO	28.90	70.90		2.3			110	SPEDR	32.94	71.27	90	1.5	7	
45	E93SI	29.27	70.70	2400	5.8	257		111	ICSPE	32.96	71.23	160	2.7	27	2
46	E93CR	29.42	71.27	1000	3.5	45		112	CONCF	32.96	71.55	25	2.1	14	
47	DGTFOF	29.45	71.25	780	3.1	49		113	CONCS	32.96	71.55	25	1.3	4	
48	E93TF	29.45	71.25	780	3.1	39		114	LIMAC	32.98	71.27	100	1.6	11	
49	DGCGR	29.45	71.32	30	3.0	57		115	E93PA	33.02	71.63	41	3.1	20	
50	E93CG	29.45	71.32	10	3.7	78		116	EPPA1	33.02	71.65	41	2.0	31	1
51	INDIO	29.76	69.97	3871	4.9	93		117	EPPA2	33.02	71.65	41	5.1		1
52	DMCSE	29.90	71.20	142	2.9	32		118	ARMAT	33.04	71.43	100	2.8	19	
53	E93SE	29.90	71.20	142	3.1	41		119	E93BE	33.05	71.40	121	2.5	10	
54	E93SM	29.90	71.20	142	2.1	10		120	E93PC	33.08	71.75	20	9.1	1009	
55	EPLF1	29.90	71.25	152	2.1	30	1	121	EPPCU	33.08	71.75		9.0	828	
56	EPLF2	29.90	71.25	152	3.7	59	1	122	E93OR	33.25	71.43	350	2.7	27	2
57	E93PT	29.93	71.37	25	2.1	10		123	EPORO	33.25	71.43		2.7	29	
58	EPPTO	29.95	71.37	25	2.0	17	1	124	E93CB	33.32	71.42	260	2.6	33	2
59	GUAYA	29.97	71.35	2	2.2	19		125	EPCAS	33.32	71.42		2.7	36	
60	PELIC	29.99	71.01	280	2.9	69		126	CLBAN	33.35	71.38	270	2.5	34	
61	PUCLA	30.00	70.87	445	4.1	95		127	DGCRU	33.50	71.62	26	3.0	90	
62	EPCOQ	30.00	71.25		1.8	26	1	128	E93SD	33.63	71.63	70	2.7	10	
63	ARRAY	30.04	70.99	340	2.7	36		129	DMCSD	33.65	71.62	25	2.0	16	
64	SCARL	30.05	70.82	630	2.3	28									
65	E93TO	30.17	70.80	2150	5.0	182									
66	TOLOL	30.17	70.80	2028	4.1	91									

Obs: 1: resultado no considerado confiable en EOLO93 2: resultado con menos de 6 meses de datos

Tabla 2.10 Estaciones ordenadas por velocidad media (para $V \geq 3$ m/s) (valores referidos a altura nominal de 10 m sobre el suelo).

Rango	N	CODIGO	LAT	LON	ALT	V (m/s)	DP (W/m ²)
1	120	E93PC	33.08	71.75	20	9.1	1009
2	121	EPPCU	33.08	71.75		9.0	828
3	9	EPPO2	26.50	69.45	2901	7.8	304
4	100	EPECR	32.83	70.08	3829	7.2	366
5	101	E93RE	32.83	70.12	3830	6.9	220
6	24	EPPO1	27.35	70.33	370	5.9	
7	45	E93SI	29.27	70.70	2400	5.8	257
8	74	E93CE	31.25	71.63	60	5.6	255
9	1	DMCTA	25.40	70.48	115	5.6	165
10	10	EPPO3	26.50	69.45	2901	5.6	137
11	92	EPQU1	32.78	71.53	3	5.4	
12	68	E93LV	30.24	71.63	10	5.1	202
13	72	E93TR	30.73	71.70	9	5.1	169
14	117	EPPA2	33.02	71.65	41	5.1	
15	65	E93TO	30.17	70.80	2150	5.0	182
16	51	INDIO	29.76	69.97	3871	4.9	93
17	67	DGLVA	30.24	71.63	10	4.8	190
18	25	EPPO2	27.35	70.33	370	4.8	83
19	13	E93LO	26.57	69.05	3800	4.4	88
20	61	PUCLA	30.00	70.87	445	4.1	95
21	66	TOLOL	30.17	70.80	2028	4.1	91
22	8	EPPO1	26.50	69.45	2901	4.0	80
23	11	EPCH1	26.50	70.62	9	4.0	80
24	15	CANCA	27.07	70.83	11	3.8	67
25	75	E93LV	31.85	71.51	60	3.7	98
26	80	EPHOR	32.70	70.70		3.7	96
27	50	E93CG	29.45	71.32	10	3.7	78
28	56	EPLF2	29.90	71.25	152	3.7	59
29	5	E93CH	26.35	70.68	13	3.7	50
30	23	E93CO	27.35	70.33	370	3.7	50
31	12	EPCH2	26.50	70.62	9	3.7	
32	2	DMCSA	26.23	69.62	2250	3.6	40
33	96	CHAGR	32.80	70.96	400	3.5	76
34	38	DGHUA	28.47	71.25	30	3.5	65
35	18	DGPCA	27.08	70.87	11	3.5	57
36	46	E93CR	29.42	71.27	1000	3.5	45
37	17	DGCAL	27.07	70.83	11	3.4	51
38	21	CIMSP	27.30	70.40		3.4	
39	78	PICHI	32.12	71.52	35	3.3	53
40	77	DMCLV	31.90	71.48	60	3.3	45
41	93	EPQU2	32.78	71.53	3	3.2	48
42	95	MEMEL	32.79	71.20	210	3.2	43
43	29	PRINC	27.41	70.26	499	3.1	64
44	90	E93QM	32.78	71.52	2	3.1	50
45	47	DGTOF	29.45	71.25	780	3.1	49
46	53	E93SE	29.90	71.20	142	3.1	41
47	48	E93TF	29.45	71.25	780	3.1	39
48	115	E93PA	33.02	71.63	41	3.1	20
49	127	DGCRU	33.50	71.62	26	3.0	90
50	49	DGCGR	29.45	71.32	30	3.0	57
51	39	GUSM4	28.48	71.17	50	3.0	35

Tabla 2.11 Estaciones ordenadas por densidad de potencia media (para $DP \geq 40 \text{ W/m}^2$) (valores referidos a altura nominal de 10 m sobre el suelo).

Rango	N	CODIGO	LAT	LON	ALT	V (m/s)	DP (W/m^2)
1	120	E93PC	33.08	71.75	20	9.1	1009
2	121	EPPCU	33.08	71.75		9.0	828
3	100	EPECR	32.83	70.08	3829	7.2	366
4	9	EPPO2	26.50	69.45	2901	7.8	304
5	45	E93SI	29.27	70.70	2400	5.8	257
6	74	E93CE	31.25	71.63	60	5.6	255
7	101	E93RE	32.83	70.12	3830	6.9	220
8	68	E93LV	30.24	71.63	10	5.1	202
9	67	DGLVA	30.24	71.63	10	4.8	190
10	65	E93TO	30.17	70.80	2150	5.0	182
11	72	E93TR	30.73	71.70	9	5.1	169
12	1	DMCTA	25.40	70.48	115	5.6	165
13	10	EPPO3	26.50	69.45	2901	5.6	137
14	75	E93LV	31.85	71.51	60	3.7	98
15	80	EPHOR	32.70	70.70		3.7	96
16	61	PUCLA	30.00	70.87	445	4.1	95
17	51	INDIO	29.76	69.97	3871	4.9	93
18	66	TOLOL	30.17	70.80	2028	4.1	91
19	127	DGCRU	33.50	71.62	26	3.0	90
20	13	E93LO	26.57	69.05	3800	4.4	88
21	25	EPPO2	27.35	70.33	370	4.8	83
22	8	EPPO1	26.50	69.45	2901	4.0	80
23	11	EPCH1	26.50	70.62	9	4.0	80
24	50	E93CG	29.45	71.32	10	3.7	78
25	96	CHAGR	32.80	70.96	400	3.5	76
26	60	PELIC	29.99	71.01	280	2.9	69
27	15	CANCA	27.07	70.83	11	3.8	67
28	38	DGHUA	28.47	71.25	30	3.5	65
29	29	PRINC	27.41	70.26	499	3.1	64
30	56	EPLF2	29.90	71.25	152	3.7	59
31	18	DGPCA	27.08	70.87	11	3.5	57
32	49	DGCGR	29.45	71.32	30	3.0	57
33	78	PICHI	32.12	71.52	35	3.3	53
34	17	DGCAL	27.07	70.83	11	3.4	51
35	5	E93CH	26.35	70.68	13	3.7	50
36	23	E93CO	27.35	70.33	370	3.7	50
37	90	E93QM	32.78	71.52	2	3.1	50
38	47	DGTOF	29.45	71.25	780	3.1	49
39	93	EPQU2	32.78	71.53	3	3.2	48
40	46	E93CR	29.42	71.27	1000	3.5	45
41	77	DMCLV	31.90	71.48	60	3.3	45
42	95	MEMEL	32.79	71.20	210	3.2	43
43	53	E93SE	29.90	71.20	142	3.1	41
44	2	DMCSA	26.23	69.62	2250	3.6	40
45	109	NEHUE	32.94	71.33	70	2.6	40

Tabla 2.12 Factores de utilización para estaciones analizadas en proyecto.

N	CODIGO	Lat	Lon	Altitud	F1	F2	F3
1	DMCTA	25.40	70.48	115	35	27	34
67	DGLVA	30.24	71.63	10	29	25	30
61	PUCLA	30.00	70.87	445	21	16	21
51	INDIO	29.76	69.97	3871	19	14	19
38	DGHUA	28.47	71.25	30	17	13	18
127	DGCRU	33.50	71.62	26	15	13	16
18	DGPCA	27.08	70.87	11	15	12	17
66	TOLOL	30.17	70.80	2028	15	12	16
96	CHAGR	32.80	70.96	400	15	12	16
60	PELIC	29.99	71.01	280	14	11	14
17	DGCAL	27.07	70.83	11	13	11	15
15	CANCA	27.07	70.83	11	13	10	14
29	PRINC	27.41	70.26	499	13	10	13
49	DGCGR	29.45	71.32	30	12	9	12
47	DGTOF	29.45	71.25	780	11	8	12
78	PICHI	32.12	71.52	35	11	8	12
95	MEMEL	32.79	71.20	210	9	6	10
109	NEHUE	32.94	71.33	70	9	6	9
77	DMCLV	31.90	71.48	60	8	6	9
63	ARRAY	30.04	70.99	340	8	6	8
79	DGLMO	32.25	71.51	37	7	6	8
2	DMCSA	26.23	69.62	2250	7	5	9
126	CBLAN	33.35	71.38	270	7	5	8
40	GUSM8	28.50	71.08	60	7	5	7
39	GUSM4	28.48	71.17	50	6	5	8
52	DMCSE	29.90	71.20	142	6	4	7
64	SCARL	30.05	70.82	630	6	4	6
111	ICSPE	32.96	71.23	160	5	3	6
37	DMCHU	28.47	71.22	25	5	3	5
22	DMCCO	27.30	70.42	291	4	3	5
73	DGPAL	31.20	71.60	230	4	3	5
97	VESUR	32.80	71.48	63	4	3	5
104	INPQU	32.87	71.24	125	4	3	5
89	HIJUE	32.78	71.18	220	4	3	4
105	UCEVE	32.87	71.22	125	4	3	4
6	POTRE	26.44	69.48	2800	3	2	5
26	COPIA	27.36	70.33	371	3	2	4
59	GUAYA	29.97	71.35	2	3	2	4
69	DMCOV	30.57	71.18	335	3	2	4
86	MEVEN	32.76	71.48	33	3	2	4
107	COLMO	32.91	71.44	30	3	2	4
28	PAIPO	27.41	70.27	450	3	2	3
129	DMCSD	33.65	71.62	25	3	2	3
43	DMCVA	28.60	70.77	526	2	2	3
118	ARMAT	33.04	71.43	100	2	1	4
32	CANMI	27.51	70.27	520	2	1	3
35	GUACO	28.46	71.26	30	2	1	3
112	CONCF	32.96	71.55	25	2	1	3
84	GREDA	32.75	71.47	13	2	1	2
114	LIMAC	32.98	71.27	100	2	1	2
27	SFERN	27.39	70.30	422	1	1	3
31	TAMAR	27.47	70.26	499	1	1	3
30	CANTA	27.47	70.26	499	1	1	2
34	HUASC	28.46	71.18	25	1	1	2
85	PVEN2	32.75	71.48	10	1	1	2
87	MAITE	32.76	71.46	41	1	1	2
106	BOMBE	32.89	71.25	120	1	1	2
108	GAVIO	32.91	71.48	80	1	1	2
110	SPEDR	32.94	71.27	90	1	0	1
81	PUCHU	32.72	71.41	42	0	0	1
82	RURA2	32.74	71.19	209	0	0	1
83	CAMPI	32.74	71.46	10	0	0	1
88	RURA1	32.77	71.18	223	0	0	1
94	CALER	32.79	71.19	209	0	0	1
98	VALEG	32.81	71.44	21	0	0	1
113	CONCS	32.96	71.55	25	0	0	1
76	DGCUN	31.90	70.62	1120	0	0	0

2.3.3 Análisis de Resultados

a) Descripción de resultados por zonas

Las figuras 2.6 a 2.11 muestran los valores de velocidades medias y densidades de potencia medias (a 10 m sobre el suelo) para todas las estaciones con información en el área de estudio. En los párrafos siguientes se describe estos resultados, agrupando la información en distintas zonas geográficas.

Taltal

La única estación (DMCTA) es la perteneciente a la DMC. Se trata de una estación muy cerca de la costa pero ubicada a 115 m sobre el nivel del mar. Su velocidad media anual es de 5.6 m/s y densidad de potencia de 165 W/m². Destaca entre las estaciones de mayor potencial eólico medido. Los datos muestran un ciclo diario muy marcado. La fase diurna consiste de vientos del Oeste con máximas velocidades a las horas 13-17. La fase nocturna tiene vientos del Este con mayores magnitudes entre las horas 00 a 07. La fase diurna incrementa su magnitud en los meses cálidos, mientras que la fase nocturna aumenta su intensidad en los meses fríos, con el resultado que el ciclo anual en esta estación es prácticamente nulo. Los tres años con datos muestran que la variabilidad interanual del viento en esta estación es también muy pequeña.

Chañaral

Ninguna de las 4 estaciones en esta zona fue analizada a nivel horario por este proyecto ni por el proyecto EOLO93. Dos puntos corresponden a estudios previos a EOLO93, uno es el resultado de procesamiento a nivel de promedios mensuales en EOLO93 y el último corresponde a promedios mensuales derivados del proyecto CIMM. Los tres primeros puntos arrojan velocidades muy semejantes entre sí con valores medios entre 3.7 y 4 m/s, mientras que las mediciones de CIMM determinan un promedio menor de sólo 2.7 m/s. Los datos no permiten caracterizar los ciclos diarios ni anuales en esta zona.

Salvador-Potreros-La Ola

Los dos puntos en Salvador muestran velocidades muy distintas entre sí: la estación DMC mide 3.6 m/s mientras que las mediciones de CIMM indicaron sólo 2.8 m/s. Es posible que la distinta exposición local de estas estaciones pueda explicar estas diferencias, ya que mientras las mediciones DMC se realizan en el aeródromo local, las de CIMM fueron realizadas en la zona urbana (cine). Las mediciones en DMCSA muestran un ciclo diario muy marcado, en que la fase nocturna tiene componente Este, es muy intensa en invierno y muy débil en verano. La fase diurna tiene peaks en las horas 16-18 y se intensifica en los meses cálidos de noviembre a febrero.

Los datos de Potreros forman dos grupos muy distintos. Los estudios previos al proyecto EOLO93 señalaban velocidades altas, mientras que el análisis a nivel mensual de EOLO93 y el análisis con datos horarios de este proyecto sugieren velocidades más

bien bajas, menores a 3 m/s. La variación horaria-mensual derivada de los datos de POTRE es parecida a la de Salvador, con la diferencia que la fase nocturna de los flujos es mucho más débil. Los promedios de las velocidades nocturnas de los meses más fríos llegan en POTRE sólo a 3 m/s, mientras que en DMCSA se llega a 6 m/s. La fase diurna, en cambio, es semejante en ambas estaciones.

La estación La Ola (E93LO) está 1000 m más arriba de Potrerillos lo que puede explicar su velocidad media superior. Los restringidos datos analizados en EOLO93 sugieren un ciclo diario muy marcado, con velocidades medias de hasta 9 m/s en las horas 16-17 de los meses de septiembre-octubre.

Caldera-Bahía Inglesa

Las estaciones CIMM y el análisis de datos mensuales de EOLO93 en esta zona mostraron promedios de velocidad bajos (<2.5 m/s), mientras que el análisis de datos horarios de las estaciones DGCAL, DGPCA y CANCA entrega valores significativamente más altos (≥ 3.4 m/s). En las tres estaciones con datos horarios la variabilidad horaria y mensual es consistente entre ellas. La disponibilidad eólica más significativa se concentra en la fase diurna del régimen de vientos. En las horas 12-18 y los meses septiembre a marzo se registran velocidades medias de 5 m/s o más. Los flujos a estas horas son del W y SW. La fase nocturna tiene vientos muy débiles y densidades de potencias pequeñas. La dirección predominante en estas horas es del S-SW.

Copiapó-Tierra Amarilla

De las varias estaciones en esta zona, sólo la de estudios previos a EOLO93 y el análisis de datos mensuales de EOLO93 muestra velocidades medias altas. Las estaciones analizadas a nivel horario en este proyecto muestran la predominancia de un ciclo de brisas de valle muy marcado. Sólo la fase diurna del ciclo tiene velocidades altas, por lo que la disponibilidad de potencia eólica se concentra en las horas 12-24 y en los meses septiembre a abril. Las velocidades medias en estas estaciones son más bien modestas, no superando en general los 3 m/s. La variación interanual en esta zona es muy pequeña.

Huasco

Las velocidades medias en esta zona son menores a 3 m/s, excepto la estación DGHUA que registró 3.5 m/s. En todas ellas el ciclo diario de velocidades es grande, con predominancia de la fase diurna. Esta registra velocidades medias mayores a 4-5 m/s entre las horas 12-18 y en los meses cálidos (septiembre a marzo). Los flujos diurnos son del NW-SW, mientras que los nocturnos son del Este. La variación interanual es pequeña.

Vallenar-Domeyko

Las velocidades medias en estas estaciones son bajas, todas inferiores a 3 m/s, aunque sólo la estación DMCVA presenta información a nivel horario. Esta estación muestra un ciclo diario marcado, pero débil, con velocidades medias que no superan los 5 m/s en las horas de la tarde de los meses más cálidos.

Carmelitas - El Tofo – Cruz Grande

Todas las estaciones en esta zona han registrado velocidades medias superiores a 3 m/s. El flujo diurno en los meses más cálidos es el que domina la disponibilidad eólica, tanto en la estación el Tofo a 780 m.s.n.m., como en Cruz Grande, ubicada a nivel del mar. La dirección del flujo diurno es distinta en ambas estaciones. Mientras que en altura el flujo en la tarde es del W, en la estación más baja predomina la componente S (DGCGR) y SW (E93CG). Tanto en EOLO93 como en el análisis actual, las máximas velocidades de El Tofo ocurren en las horas de la tarde de diciembre-enero y sobrepasan los 7 m/s.

La Silla – El Indio

En estas estaciones altas de la IV Región (2400 y 3871 m.s.n.m., respectivamente) las velocidades medias son altas (5.8 y 4.9 m/s), así como las densidades de potencia (257 y 93 W/m²). El viento en La Silla se caracteriza por un gran ciclo anual, en que las velocidades más altas se registran durante la noche y en los meses de invierno, con predominancia de direcciones N-NE. El flujo diurno tiene componente S. En El Indio se registra un ciclo diario más marcado, con mayores velocidades en la tarde. La dirección predominante es la del NW, aunque en las horas de la tarde aumenta la frecuencia del SE. El ciclo anual en esta estación también muestra los mayores valores de velocidad en los meses fríos del año. La variación interanual en esta estación es mayor que en las estaciones de más al norte descritas anteriormente.

Valle del Elqui – La Serena – Tololo

Las velocidades medias en este valle son en general menor a 3 m/s, con la excepción de Puclaro (4.1 m/s) y las mediciones en Tololo (4.1 y 5.0 m/s). Los vientos en Puclaro muestran un ciclo anual apreciable, con mayores magnitudes en los meses cálidos. Las velocidades en la tarde son altas, con promedios entre 5 y 10 m/s y dirección del W. Los flujos en la noche son débiles del ENE, con alto porcentaje de calmas. La estación TOLOL presenta un ciclo diurno de pequeña amplitud. Los vientos en la tarde son del SW con magnitudes medias de hasta 6 m/s en enero. Los vientos nocturnos son también significativos con dirección NE y magnitudes medias de 6 m/s en Junio. El ciclo anual resulta con mayores velocidades medias en invierno, con variabilidad interanual significativa. La estación E93TO presentó un régimen anual/diurno similar, aunque los promedios nocturnos llegaban a los 9 m/s.

Ovalle

Las tres estaciones en la zona muestran valores medios de velocidad menores a 3 m/s. La estación DMCOV muestra un ciclo diario dominado por la fase diurna con velocidades medias de hasta 5 m/s en enero y dirección del SW. Los flujos nocturnos son más débiles y del NE. Su régimen es similar a la estación E93OV.

Costa de la IV Región desde Lengua de Vaca a Los Molles

En esta franja costera se registran altos valores de disponibilidad eólica. La estación Lengua de Vaca tiene promedios de alrededor de 5 m/s. Su ciclo diario presenta máximas velocidades más bien tarde, entre las horas 18-21 con promedios de hasta 9 m/s entre octubre y diciembre. La dirección predominante en estas horas es del SW. Las magnitudes en la noche se reducen en promedio a 3 m/s. El ciclo anual muestra una tendencia a mayores velocidades en primavera. Los dos procesamientos de datos de esta estación (E93LV y DGLVA) arrojan resultados semejantes. Unos 50 km más al sur la estación Punta de Toro registró velocidades medias similares a las de Lengua de Vaca. Aunque su registro fue corto, su ciclo anual también parece tener máximos entre octubre y noviembre. Las velocidades nocturnas fueron mayores que en Lengua de Vaca, con magnitudes entre 4-5 m/s. 50 km más al sur, las estaciones en Las Palmas (DGPAL) y Cerro de Arena (E93CE) estuvieron en puntos muy cercanos entre sí, pero a distintas alturas sobre el mar. La estación E93CE a 60 m.s.n.m. registró velocidades medias de 5.6 m/s, mientras que DGPAL, ubicada a 230 m.s.n.m., registró sólo 2.1 m/s de velocidad media. La estación E93CE presentó altos vientos en las tardes son direcciones SE-S. Los vientos nocturnos también fueron altos, del orden de 4 m/s. DGPAL, en cambio, tiene una velocidad media mucho más débil, con velocidad del SW en la tarde y del NE en la noche. Más al sur, las estaciones siguientes (Los Vilos, Pichidangui y Los Molles) muestran un descenso sistemático de las velocidades hacia el sur, desde 3.7 m/s en E93LV hasta 2.4 m/s en DGLMO. En esta zona los flujos en la tarde son los más fuertes, pero se caracterizan por tener poca variación a lo largo del año. Las magnitudes medias en Pichidangui llegan a 4-5 m/s en horas de la tarde y su dirección es del SW. La variación interanual en esta estación es más pequeña que la observada en Lengua de Vaca. En DGLMO las velocidades máximas en la tarde llegan hasta 4 m/s, con escasa variación mensual.

Cuncumén

El régimen de vientos en esta zona es extremadamente débil, con casi 70% de vientos en el rango de 0-1 m/s, vientos muy débiles en la noche y velocidades típicas menores a 4 m/s en las tardes.

Costa de V Región entre Ventanas y Santo Domingo

Las velocidades medias observadas en esta franja costera son muy variables, con promedios entre 2 m/s hasta los máximos vientos medios de toda la base de datos, registrados en la estación Punta Curaumilla (9 m/s). En esta estación los vientos más altos ocurren en verano y tienen dirección del Sur. La ubicación de esta estación en una

punta con amplia exposición al régimen oceánico de vientos parece explicar su alta disponibilidad eólica.

Valles interiores de V Región

Los vientos de estas estaciones son en general bajos, con registros en general menores a 3 m/s en valores medios y muchas estaciones con promedios menores a 2 m/s. Sólo en Llay-llay (Chagres) y en el Cerro La Hormiga se han medido promedios superiores a 3 m/s.

Estaciones cordilleranas de V Región

Las dos estaciones del Cristo Redentor a 3800 m.s.n.m presentan velocidades medias del orden de 7 m/s, mientras que Juncal situado a 2200 m.s.n.m muestra velocidades medias más bajas, en el rango de 2 a 3 m/s.

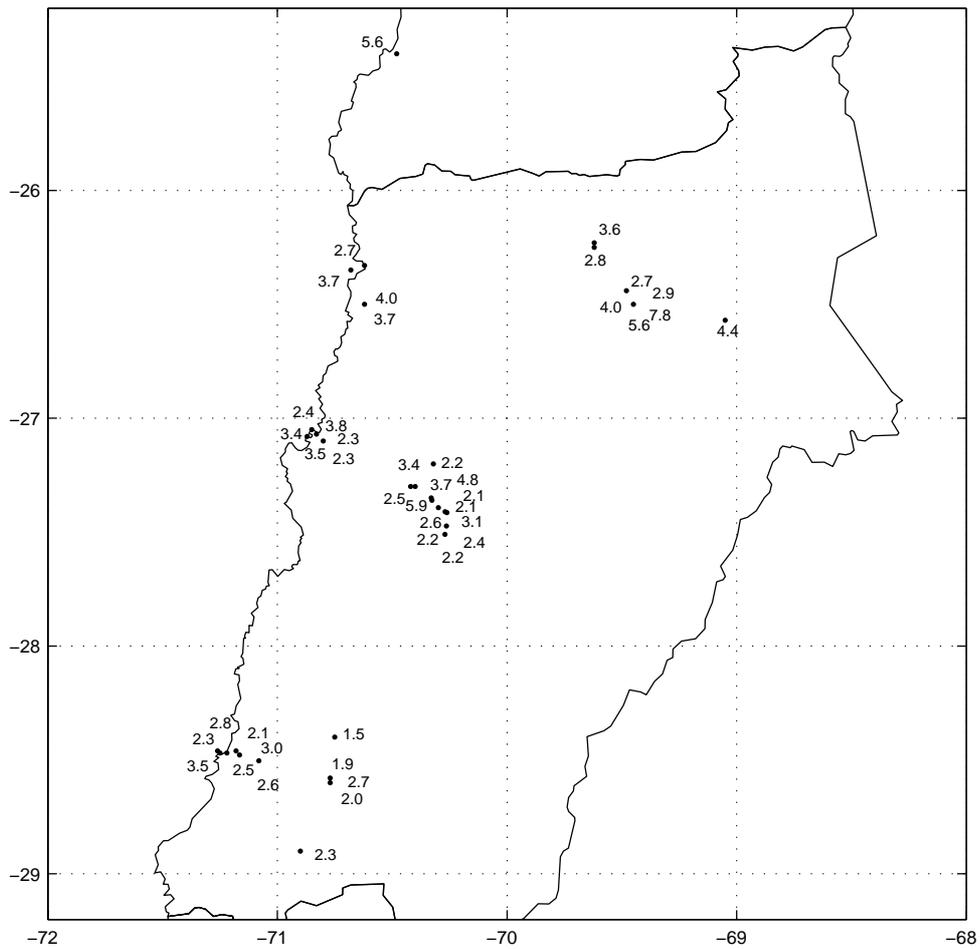


Figura 2.6 Velocidad media (m/s) a 10 m en estaciones de III Región.

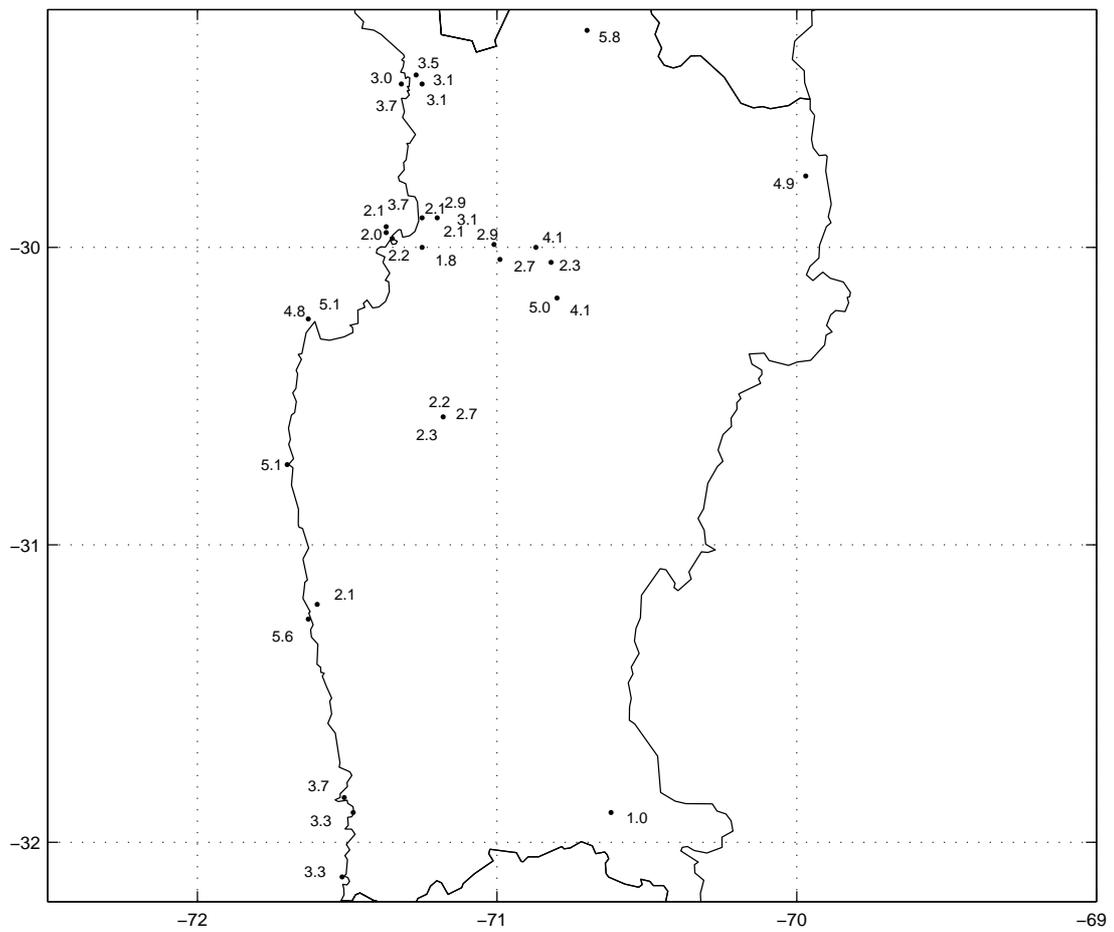


Figura 2.7 Velocidad media (m/s) a 10 m en estaciones de IV Región.

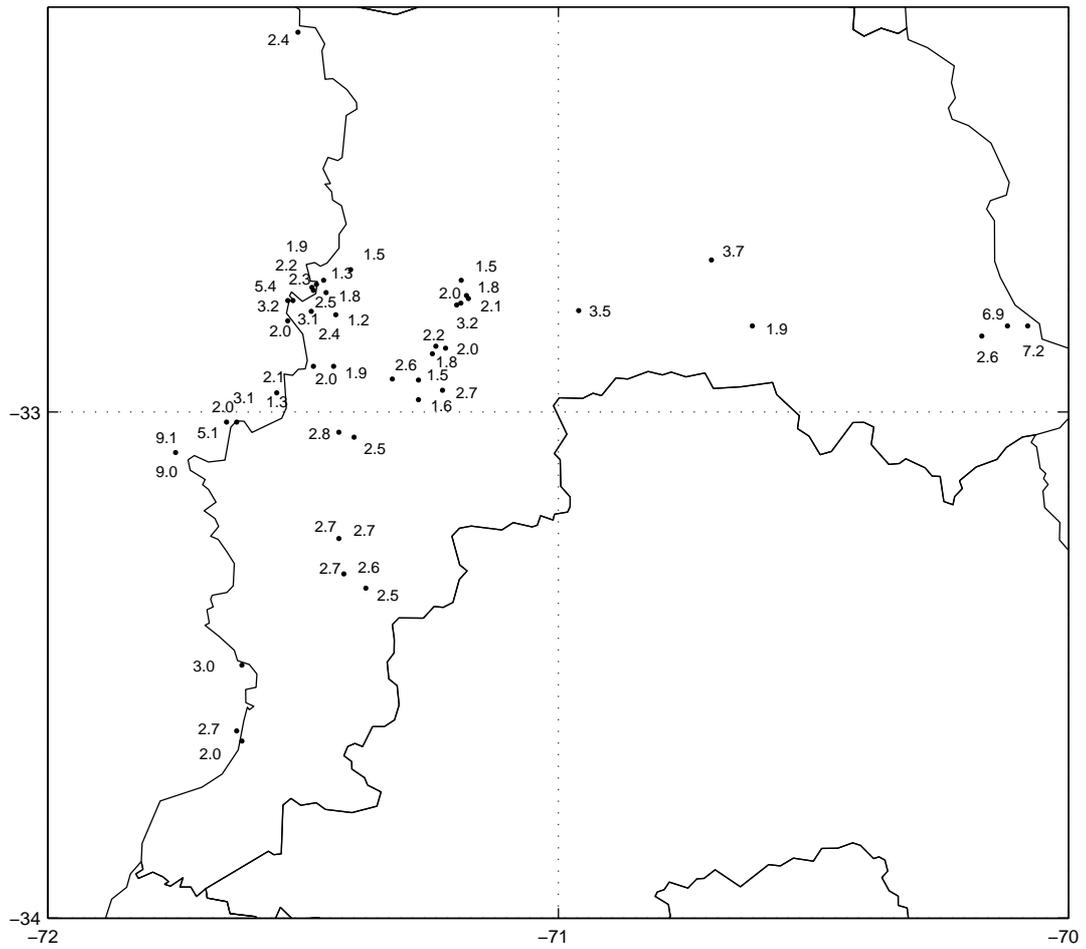


Figura 2.8 Velocidad media (m/s) a 10 m en estaciones de V Región.

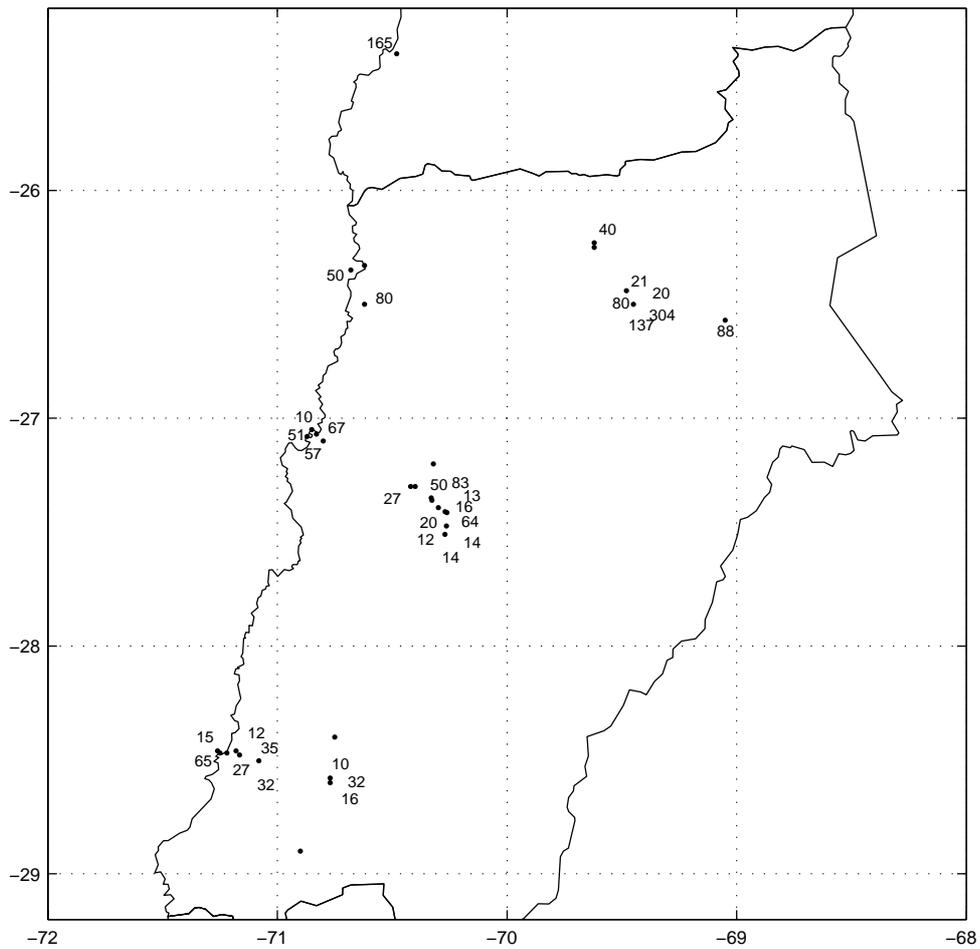


Figura 2.9 Densidad de potencia eólica media (W/m^2) a 10 m en estaciones de III Región.

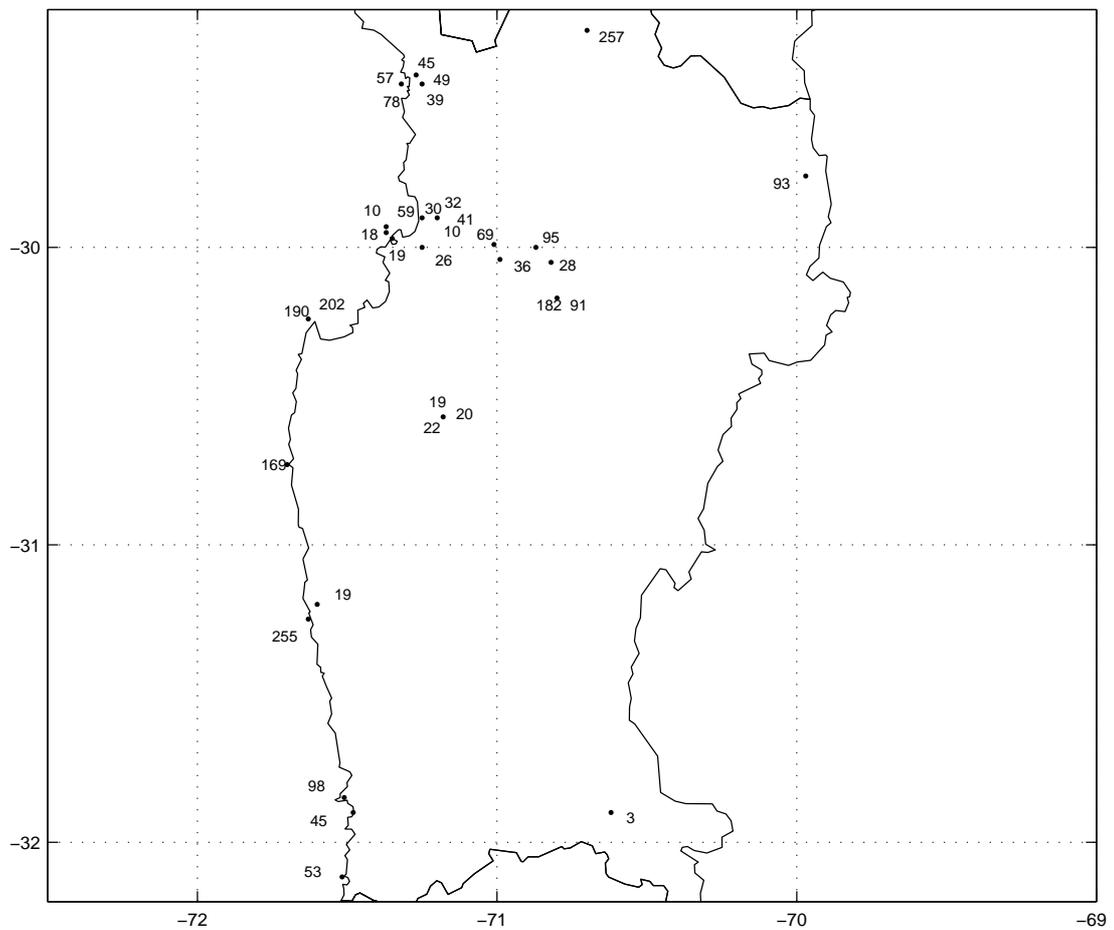


Figura 2.10 Densidad de potencia eólica media (W/m^2) a 10 m en estaciones de IV Región.

b) Relaciones de velocidad media

La figura 2.12 muestra diagramas de dispersión entre la velocidad media de cada estación y sus variables de ubicación. El panel superior muestra la relación entre velocidad y altitud sobre el nivel del mar. Se observa que sólo estaciones bajo 500 m o sobre 2000 m superan los 4 m/s de velocidad media, aunque sólo existe una estación con altitud entre 1000 y 2000 m sobre el mar. El panel central muestra la distribución de velocidades medias en función de la latitud. Se ha marcado con cruces las estaciones de altitud mayor a 2000 m. No se aprecia una clara relación entre latitud y velocidad media, pues para cada franja latitudinal existen estaciones con un rango amplio de velocidades medias. El panel inferior de la figura 2.12 muestra la relación entre longitud y velocidad media. Las estaciones costeras ubicadas en el extremo oeste y las estaciones cordilleranas, ubicadas al este son las que alcanzan mayores velocidades medias. En este diagrama la franja entre 71.5° W a 71° W parece presentar un mínimos de velocidades medias.

Los tres paneles de la figura 2.12 muestran que no hay una relación estrecha entre ubicación de estaciones y sus condiciones eólicas. Para cada rango de latitud, longitud o altitud existe una amplia distribución de velocidades medias. Esto sugiere que son condiciones de menor escala las que controlan los promedios de velocidad. No obstante lo anterior, las figuras sugieren un aumento de las velocidades medias con la altura, así como un aumento de velocidades medias en las estaciones cerca de la costa y a nivel del mar. Por otro lado, existe una aparente disminución de potenciales eólicos en estaciones en valles interiores a mediana altura.

La Figura 2.13 muestra un diagrama log-log con la relación entre velocidad media y densidad de potencia eólica media para el total de estaciones. Se muestra en ella la relación derivada en EOLO93 para las mismas variables. Se aprecia que la relación se ajusta medianamente bien al total de estaciones incluida en este estudio. Sin embargo, se debe tener presente que para estaciones con alto potencial eólico esta relación puede tener errores de más de 100 W/m².

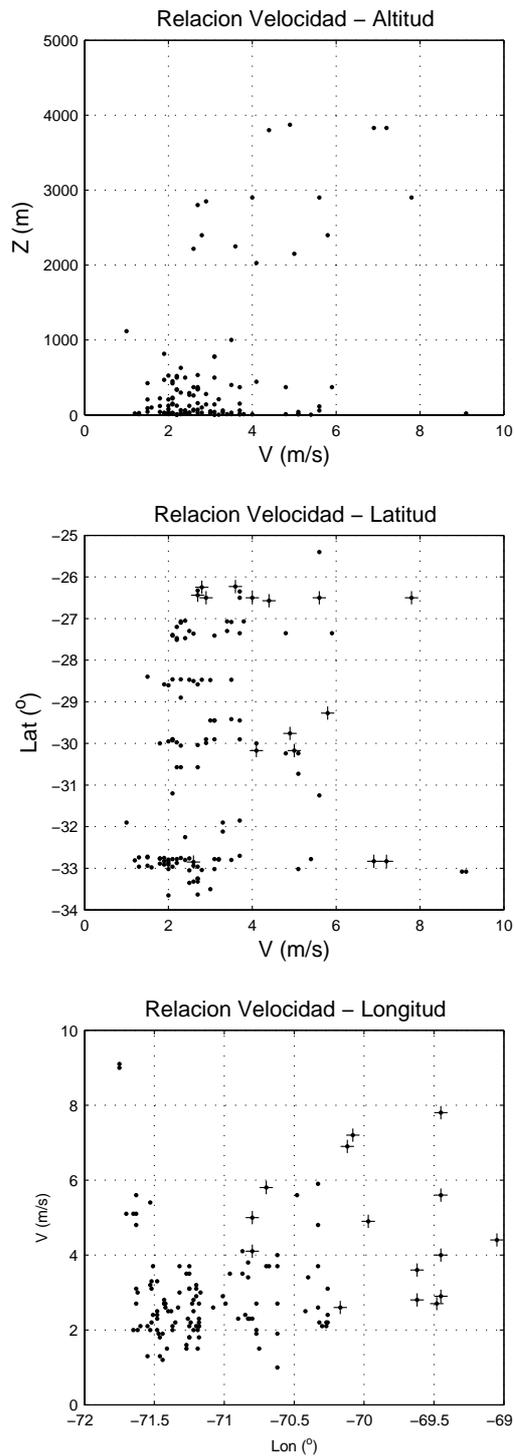


Figura 2.12 Relación entre velocidad media y coordenadas. Panel superior: relación con altitud, panel medio: relación con latitud, panel inferior: relación con longitud. En los dos paneles inferiores las cruces denotan estaciones de altitud superior a 1500 m.s.n.m.

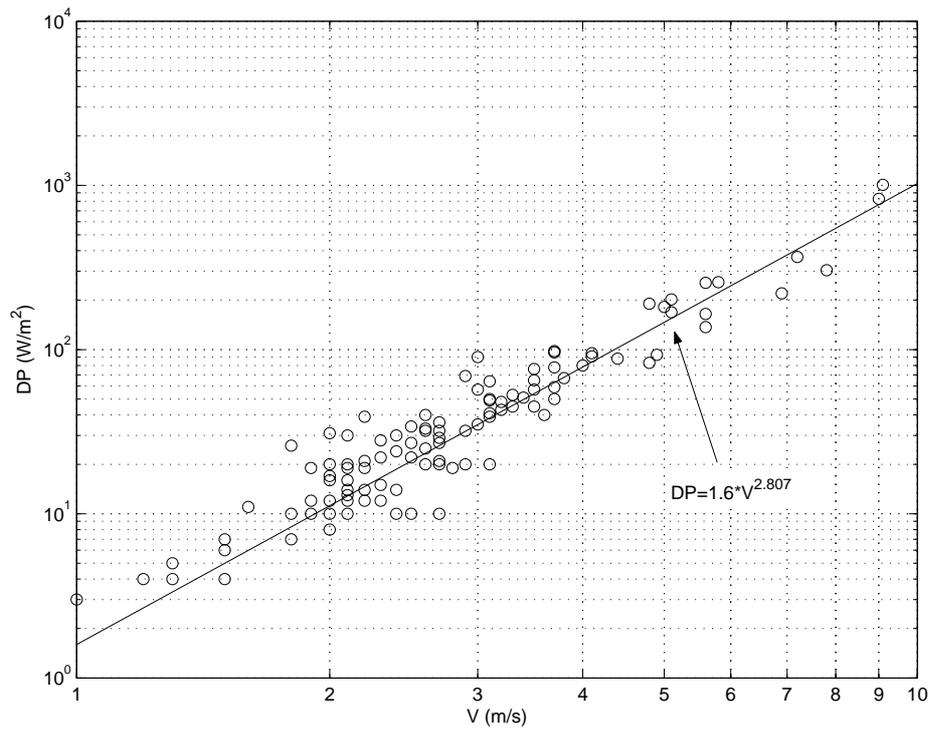


Figura 2.13 Relación entre velocidad media y densidad de potencia media (valores a 10 m sobre el suelo).

c) Sensibilidad de resultados a rugosidad superficial

En los resultados presentados en este capítulo la variación de la velocidad del viento con la altura sobre la superficie ha sido calculada utilizando una función logarítmica, cuyo parámetro principal es la altura de la rugosidad superficial, z_0 . Este parámetro ha sido pre-definido en un valor de 0.01 m en la mayor parte de los casos, o bien ha sido estimado a partir del conocimiento del terreno circundante en algunos casos. Una determinación más precisa de la rugosidad superficial requiere, sin embargo, de mediciones de viento a más de un nivel sobre el suelo, acompañadas de mediciones del perfil vertical de temperatura. A falta de información más precisa al respecto, en esta sección se presenta la sensibilidad de los resultados al parámetro de rugosidad superficial.

Se muestra en la Tabla 2.13 resultados obtenidos para la estación DGLVA utilizando tres valores de rugosidad superficial: 0.030 m (utilizada en cálculos definitivos), 0.010 m y 0.100 m. Se muestra en la tabla los resultados obtenidos para la velocidad media (V), densidad de potencia eólica media (DP) y las potencias generables y factores de utilización para las tres máquinas eólicas consideradas en el estudio. El sensor de viento en esta estación se ubica a una altura nominal de 3.75 m sobre el suelo. Las velocidades medias a 10 m sobre el suelo varían entre 4.7 y 5.1 m/s para el rango de rugosidades considerado (+ 7% de variación respecto a valor obtenido con $z_0=0.030$ m). A mayor rugosidad superficial la velocidad extrapolada a 10 m sobre el suelo aumenta. Este resultado se explica de la siguiente manera. Para poder medir una velocidad dada a 3.75 m, la velocidad a 10 m debe ser mayor cuanto más alta sea la rugosidad superficial. La diferencia porcentual de la velocidad extrapolada a 10 m es bastante modesta, para el rango de rugosidades considerada. Para la densidad de potencia eólica a 10 m (DP) la diferencia es mayor (18 %). Los valores extrapolados a las alturas de los ejes de las máquinas eólicas cambian en proporciones semejantes ($\sim \pm 20\%$), aunque en valores absolutos las diferencias de potencias generables llegan hasta $\sim \pm 100$ kW. Estos resultados ilustran el hecho de que la variación de la velocidad con la altura puede ser muy importante en la determinación de la disponibilidad eólica real de un sitio particular.

Tabla 2.13 Ejemplo de sensibilidad de resultados a rugosidad superficial

Parámetro	Rugosidad superficial (m)		
	0.010	0.030	0.100
V	4.7	4.8	5.1
DP	173	190	224
P1	173	191	223
P2	333	378	453
P3	533	597	702
F1	26	29	34
F2	22	25	30
F3	27	30	35

d) Sensibilidad de resultados a periodo de promediación

Según se explicó en la metodología, en los casos que se disponía de datos básicos correspondientes a promedios de periodos menores a 1 hora, se realizó un promedio horario vectorial de la velocidad del viento. Este procedimiento introduce en principio una subestimación de las potencias eólicas. Con el objeto de estimar la sensibilidad de los resultados al periodo de promediación, se procesó los datos de la estación Lengua de Vaca (DGLVA) a partir de su información básica correspondiente a promedios de media hora. La Tabla 2.14 muestra los resultados obtenidos a partir de los promedios de media hora y de una hora. Se observa que utilizando los promedios de menor periodo efectivamente se determina mayores valores de potencias generables, pero la diferencia con respecto a los promedios horarios es muy pequeña. Es posible, sin embargo, que utilizando promedios de tiempos aún menores (5 minutos, por ejemplo) se obtengan mayores valores de potencia.

Tabla 2.14 Sensibilidad de resultados de estación DGLVA a periodo (T) de promedios temporales

Parámetro	Periodos de promediación	
	T=0.5 h	T=1.0 h
V	4.9	4.8
DP	191	190
N	179208	88747
ALFA	5.34	5.34
BETA	1.43	1.44
MU	1.26	1.27
SIGMA	0.92	0.89
P1	192	191
P2	380	378
P3	600	597
F1	29	29
F2	25	25
F3	30	30

2.4 Vientos superficiales sobre el mar

Como complemento al análisis de datos de viento observados en la región de estudio, se ha hecho un procesamiento estadístico básico de campos de viento superficiales sobre el océano frente a las costas de Chile, derivados de observaciones satelitales (datos Quikscat). Estos datos se encuentran disponibles para el periodo 2000-2003, con dos campos por día (8 AM y 8 PM) y con resolución de 0.25° en longitud y latitud.

La Figura 2.14 muestra isolíneas de velocidad media para el periodo completo con información y para la región entre latitudes 19° y 37° Sur. Se observa una zona de máximas velocidades medias centrada entre las latitudes 30°-36° Sur y 74° W. Cerca de las costas de Chile se aprecia un aumento general de las velocidades desde el norte hacia el sur. Velocidades mayores a 5 m/s se observan desde la península de Mejillones hacia el Sur. Magnitudes mayores a 6 m/s se observan desde Punta Cachos en la III Región al sur. Velocidades medias mayores a 7 m/s se observan al sur de la III Región entre Punta Lobos e Isla Damas, entre Coquimbo y Punta Amolanas en la IV Región y desde Punta Curaumilla al sur en la V Región. Máximos locales de velocidad cerca de la costa se encuentran al sur de la II Región (zona de Taltal), al sur de la III Región, en la zona de Lengua de Vaca en la IV Región y al sur de la V y VI Regiones.

La Figura 2.15 ilustra la variabilidad de estos campos de velocidad mediante isolíneas de su desviación estándar. La variabilidad es una fracción importante de la magnitud media y crece desde el norte hacia el sur. La Figura 2.16 ilustra el ciclo diario de los vientos sobre el mar, mediante isolíneas de la diferencia de velocidades entre el campo PM menos el campo de velocidades AM. Las magnitudes del ciclo diario crecen hacia el norte y hacia la costa, alcanzando los máximos valores frente a las costas de la II Región. Hacia el sur y océano abierto el ciclo diario promedio disminuye a cero, indicando que aquí el control de la variabilidad es principalmente de tipo sinóptico.

La figura 2.17 muestra la magnitud del ciclo anual de las velocidades del viento, expresada mediante isolíneas de la diferencia entre el mayor y el menor promedio mensual de viento. La magnitud del ciclo anual varía entre 1 y 2.5 m/s con tendencia a crecer hacia el sur. Estos valores son entre un 20% y un 40% de las velocidades medias. Finalmente la figura 2.18 muestra el mes con los promedios más altos de velocidad del viento. En la zona en estudio los vientos oceánicos tienden a ser mayores en los meses de primavera y verano.

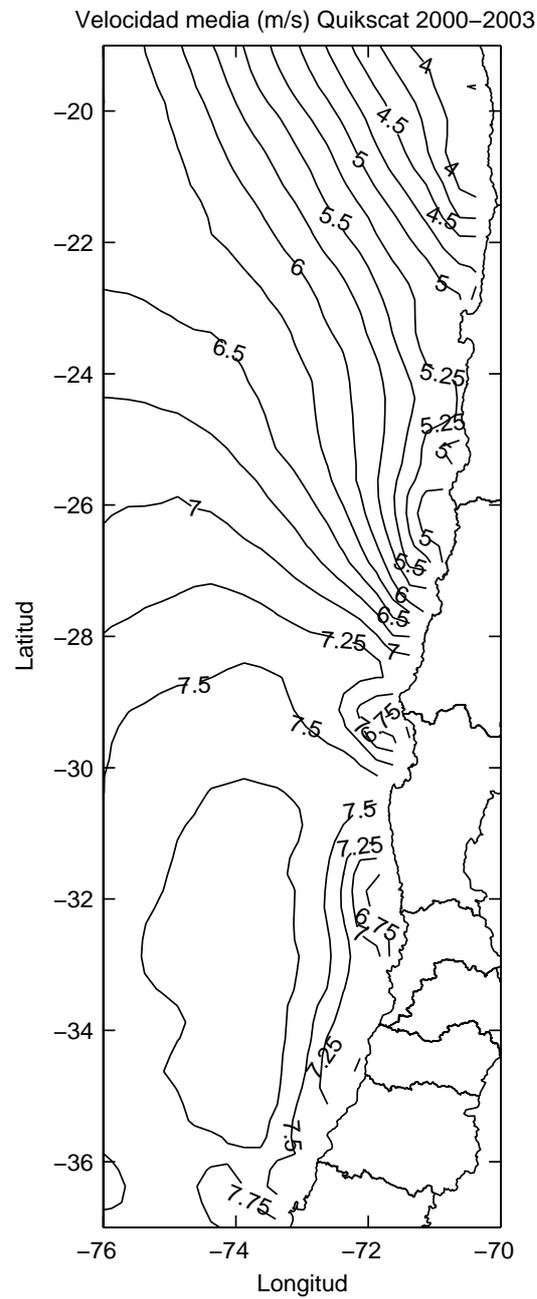


Figura 2.14 Isolíneas de velocidad media (m/s) sobre el mar derivadas de datos Quikscat para el periodo 2000-2003.

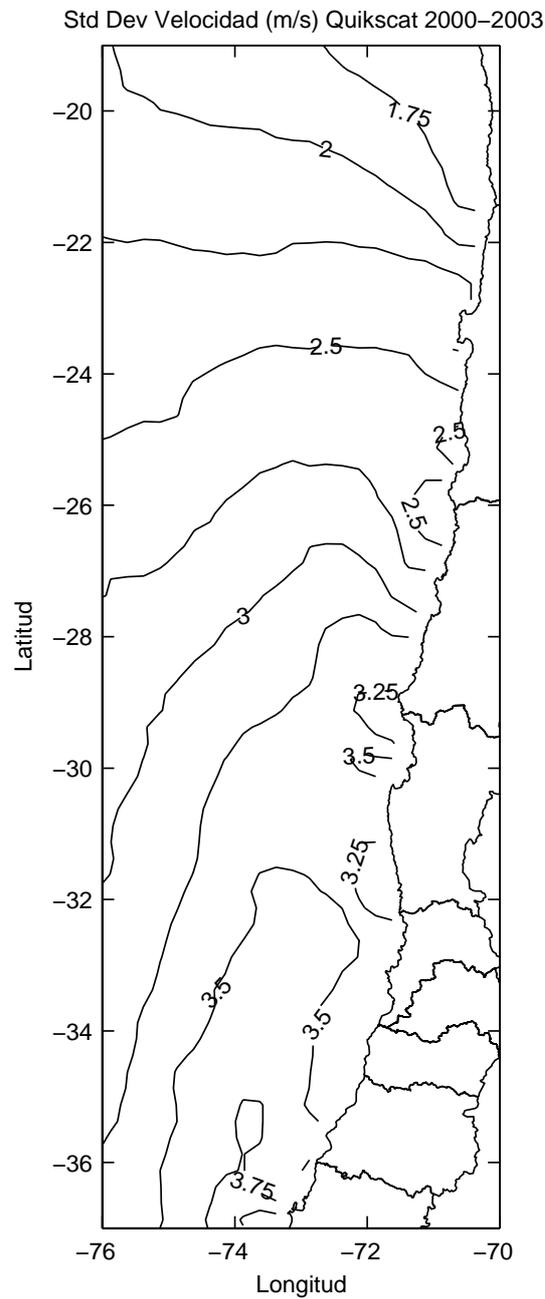


Figura 2.15 Isolíneas de desviación estándar de velocidad (m/s) sobre el mar derivadas de datos Quikscat para el periodo 2000-2003.

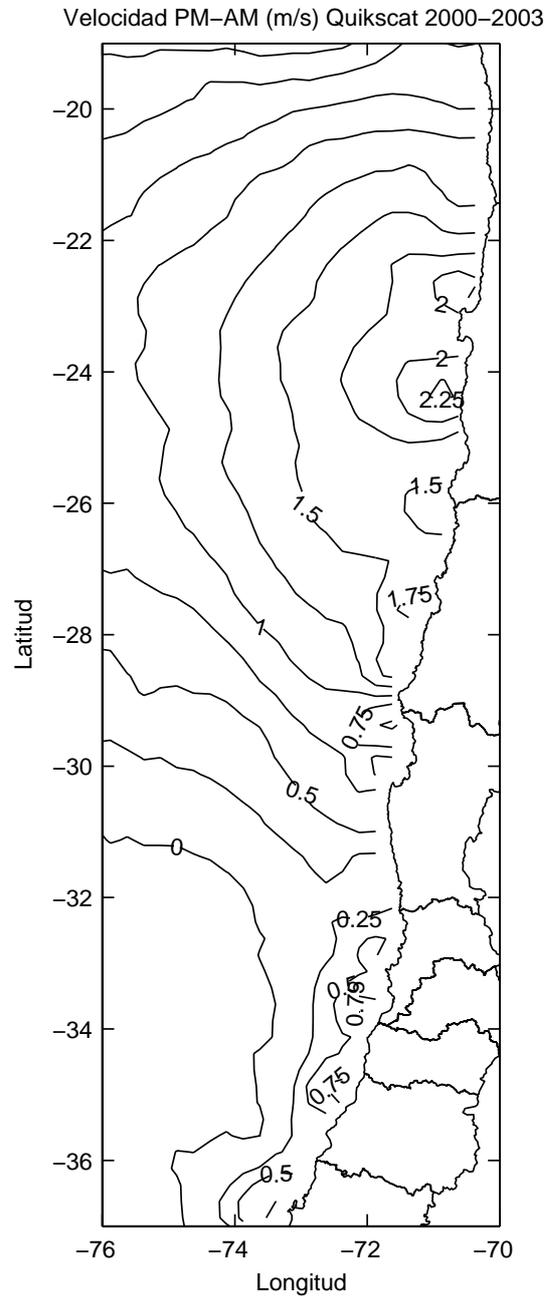


Figura 2.16 Isolíneas de diferencia de velocidad de campos PM menos campos de velocidad AM (m/s) derivadas de datos Quikscat para el periodo 2000-2003.

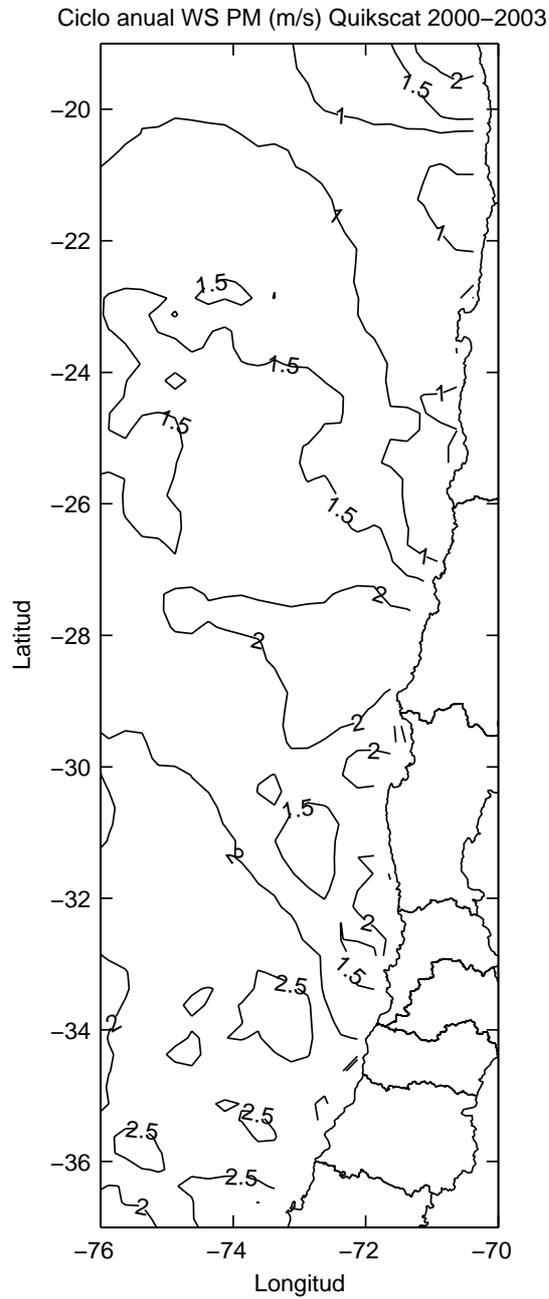


Figura 2.17 Isolíneas de amplitud de ciclo anual de velocidad PM (m/s) derivada de datos Quikscat para el periodo 2000-2003.

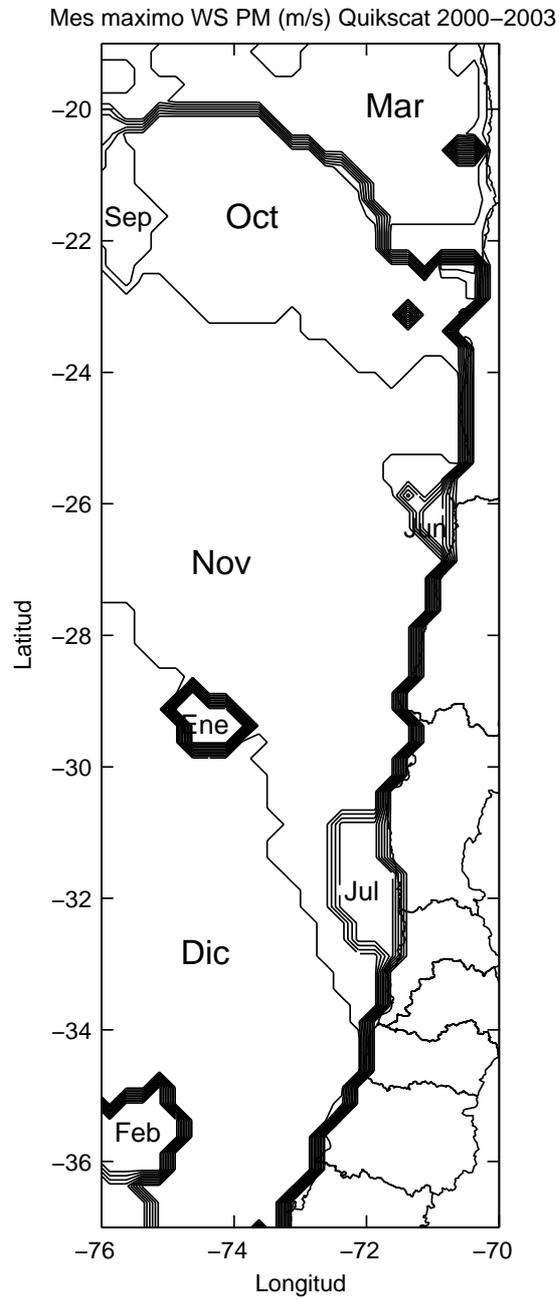


Figura 2.18 Mes del máximo promedio mensual de velocidad PM derivado de datos Quikscat para el periodo 2000-2003.

2.5 Descripción general del recurso eólico observado entre III y V Regiones.

Tanto las mediciones de viento en los 129 puntos con datos, como los campos de viento sobre el mar derivados de información satelital, permiten caracterizar la disponibilidad del recurso eólico en la zona de estudio de la forma siguiente.

2.5.1 Zona costera

La franja de terreno costero presenta una gran variabilidad del recurso eólico. En ella se ha medido las velocidades medias de viento más altas de la base de datos (Punta Curaumilla, V Región), pero también se miden velocidades bajas al interior de bahías y ensenadas. Las condiciones particulares del viento en un sitio dado parecen depender de la intensidad del flujo de viento en el océano adyacente, la exposición de la costa al flujo oceánico, las condiciones topográficas del entorno, la rugosidad del terreno en los alrededores y la exposición local de la estación.

Los datos disponibles permiten definir las siguientes categorías de disponibilidad eólica:

a) Zonas costeras de alta disponibilidad eólica

Se incluye aquí las zonas en que hay estaciones con velocidades medias de 5 m/s o más, y las zonas en que los datos satelitales muestran máximos relativos del viento cercano a la costa.

Costa de V Región en torno a Punta Curaumilla
Costa de IV Región entre Punta Lengua de Vaca y Punta Amolanas
Costa de II Región entre Taltal y Punta Ballena
Costa de III Región entre Huasco e Isla Damas

b) Zonas costeras de disponibilidad eólica media

Se incluye aquí las zonas con estaciones con velocidades medias mayores a 3 y menores a 5 m/s.

Costa de III Región hasta Huasco
Costa de IV Región desde Punta Amolanas al Sur
Costa sur de V Región

b) Zonas costeras de baja disponibilidad eólica

Se incluye aquí zonas en que la mayor parte de las estaciones tuvo velocidades medias menores a 3 m/s.

Interior de bahía de Coquimbo
Interior de bahía de Valparaíso

Debe notarse que la base observacional de estas regiones es muy distinta. Así pues, en el caso de Taltal, sólo la estación DMCTA ha sido incluida en el análisis, mientras que la zona de alta disponibilidad en la III Región se basa principalmente en las observaciones satelitales de viento costero. Por lo tanto, estas definiciones deben ser tomadas con cautela y estudios futuros deberán intentar verificar la disponibilidad del recurso eólico en estas áreas. Asimismo, es posible que dentro de las regiones de media y baja disponibilidad exista zonas con alto recurso eólico, debido a condiciones topográficas locales. Del mismo modo, las zonas costeras clasificadas como de alta disponibilidad probablemente cuenten con zonas resguardadas en que el recurso eólico sea más bajo.

2.5.2 Valles centrales y cordones transversales

En esta región los vientos en los valles transversales es, en general, reducido. Sólo estaciones muy particulares presentan mayores velocidades medias, como Puclaro en el Valle del Elqui (IV Región) y Chagres en el valle del Aconcagua (V Región). En las cimas de cerros de cordones transversales se registra vientos más altos, como por ejemplo en La Silla y Tololo en la IV Región

2.5.3 Zonas cordilleranas

Estas zonas presentan, en general, alta disponibilidad eólica, aunque con variabilidad que puede depender de la exposición local de las estaciones. Debe indicarse también que aunque la velocidad media de estaciones de altura puede ser alta, el efecto de disminución de la densidad del aire con la altura puede hacer que sus densidades de potencia eólica sean comparativamente algo más bajas.

3. Modelación del recurso eólico en Regiones I-IX.

Los modelos meteorológicos numéricos son programas computacionales complejos que entregan como resultado la distribución espacial y temporal de variables meteorológicas como velocidad y dirección del viento, temperatura, humedad, presión atmosférica, etc. Existe una amplia gama de modelos que varían en cuanto a complejidad, procesos físicos considerados, ecuaciones utilizadas, resolución espacial y temporal de los resultados, costos de implementación y ejecución, etc. Dado que los modelos generalmente calculan la distribución de viento sobre una región extensa, su aplicación puede ser útil en la estimación de cómo se distribuye el recurso en zonas con pocas mediciones de viento. Sin embargo, los modelos no sustituyen a las mediciones in-situ, por cuanto las aproximaciones y simplificaciones de ellos introducen siempre un error en sus resultados. Se hace necesario, por tanto, comparar los resultados de los modelos con observaciones disponibles, con el objeto de conocer el carácter de los errores de los modelos y estimar la confiabilidad de sus resultados.

La mayor parte de los modelos meteorológicos numéricos resuelve un conjunto de ecuaciones matemáticas que describen el movimiento del fluido atmosférico. Estas ecuaciones son principalmente las leyes de conservación de la masa, de la energía y del momentum. Aunque estas ecuaciones describen el movimiento en forma exacta, su solución exacta requeriría incluir todas las escalas del movimiento atmosférico, desde la escala sinóptica (escalas espaciales del orden de 1000 km) hasta la escala de los torbellinos turbulentos más pequeños (escalas del orden de < 1 mm). Incluir todas estas escalas espaciales en la solución supera la capacidad de los computadores actuales más poderosos, lo que obliga a obtener soluciones aproximadas. En éstas los efectos de movimientos de escalas menores o iguales a la resolución del modelo no se consideran en forma exacta, sino sólo a través de aproximaciones denominadas parametrizaciones. Así por ejemplo, un modelo numérico con resolución de 15 km puede determinar estructuras del flujo con escalas mayores a 30 km y toda la variabilidad de escala menor es considerada sólo en forma aproximada. Las mediciones in-situ de viento en un punto, en cambio, incluyen los efectos de todas las escalas de variabilidad atmosférica. Las aproximaciones asociadas a la resolución del modelo introducen parte del error final de sus resultados. Otras fuentes de error adicionales provienen de un conocimiento sólo parcial de las condiciones de borde y condiciones iniciales utilizadas por el modelo.

En este capítulo se describe algunos modelos meteorológicos que han sido aplicados en el país y se analiza sus resultados desde el punto de vista de la caracterización del potencial eólico en la zona comprendida entre las regiones I a IX. El objetivo es generar una primera estimación de la variación espacial del recurso eólico en una zona más extensa y completa que la estudiada en el capítulo anterior mediante análisis de mediciones in-situ. Al analizar los resultados de los modelos, sin embargo, debe tenerse siempre presente sus limitaciones de resolución y sus errores asociados. Parte de estos son caracterizados aquí mediante la comparación de los resultados de los modelos y las observaciones disponibles en un limitado número de casos.

3.1 Descripción de modelos

3.1.1 Modelo HIRLAM

Los datos meteorológicos calculados con el modelo HIRLAM (*High Resolution Limited Area Model*, Undén et al, 2002) corresponden a interpolaciones dinámicas de campos meteorológicos 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 variables meteorológicas 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 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 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. 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.

Descripción del modelo

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 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 aunque las últimas versiones tienen formulaciones no hidrostáticas. Las resoluciones usadas en pronósticos 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 trata 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 3.1.

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 es 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 3.1). 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).

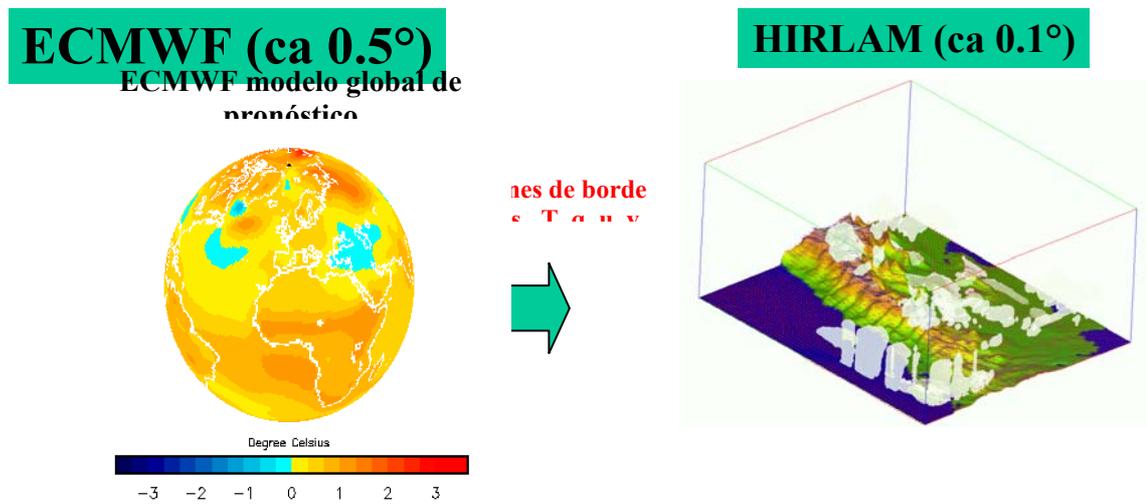


Figura 3.1 Esquema que ilustra el sistema de interpolación dinámica usado para generar los campos meteorológicos.

Tabla 3.1. Datos HIRLAM disponibles. Se indican los períodos simulados así como el dominio horizontal correspondiente.

Período		Dominio	
Fecha de Inicio	Fecha de Término	Latitud (S)	Longitud (W)
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

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 3.2). 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 3.3). 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 precipitación. 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 3.4).

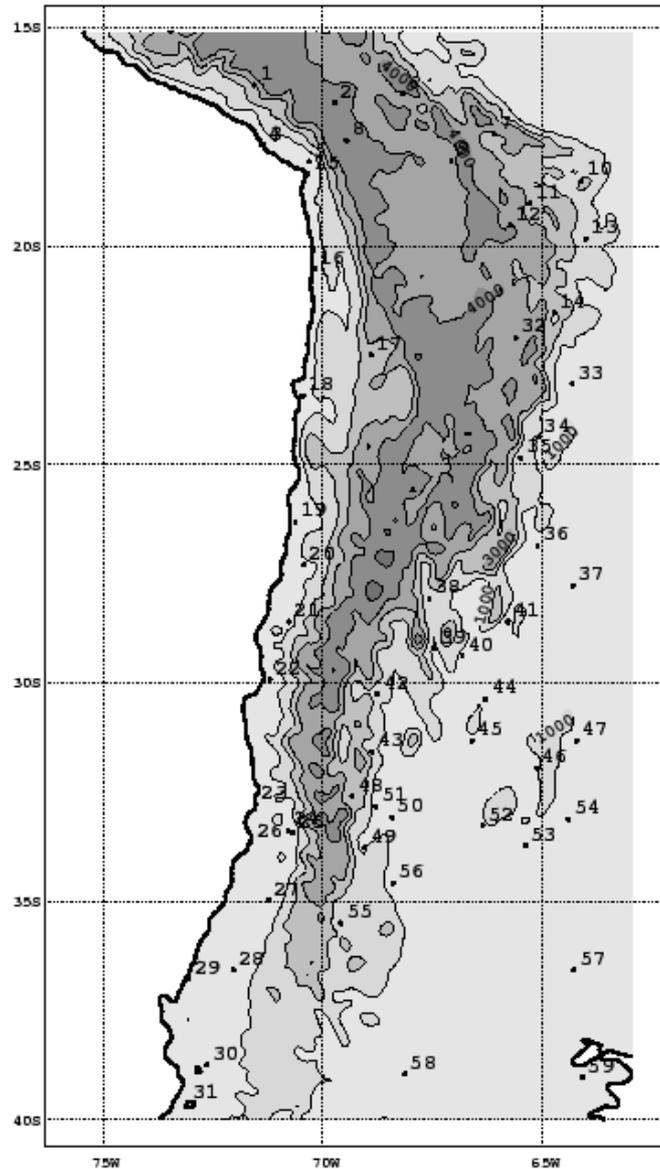


Figura 3.2 El dominio del modelo HIRLAM aplicado en Chile y las estaciones sinópticas que reportan a la Organización Mundial de Meteorología (OMM) y que se han usado para validar el modelo.

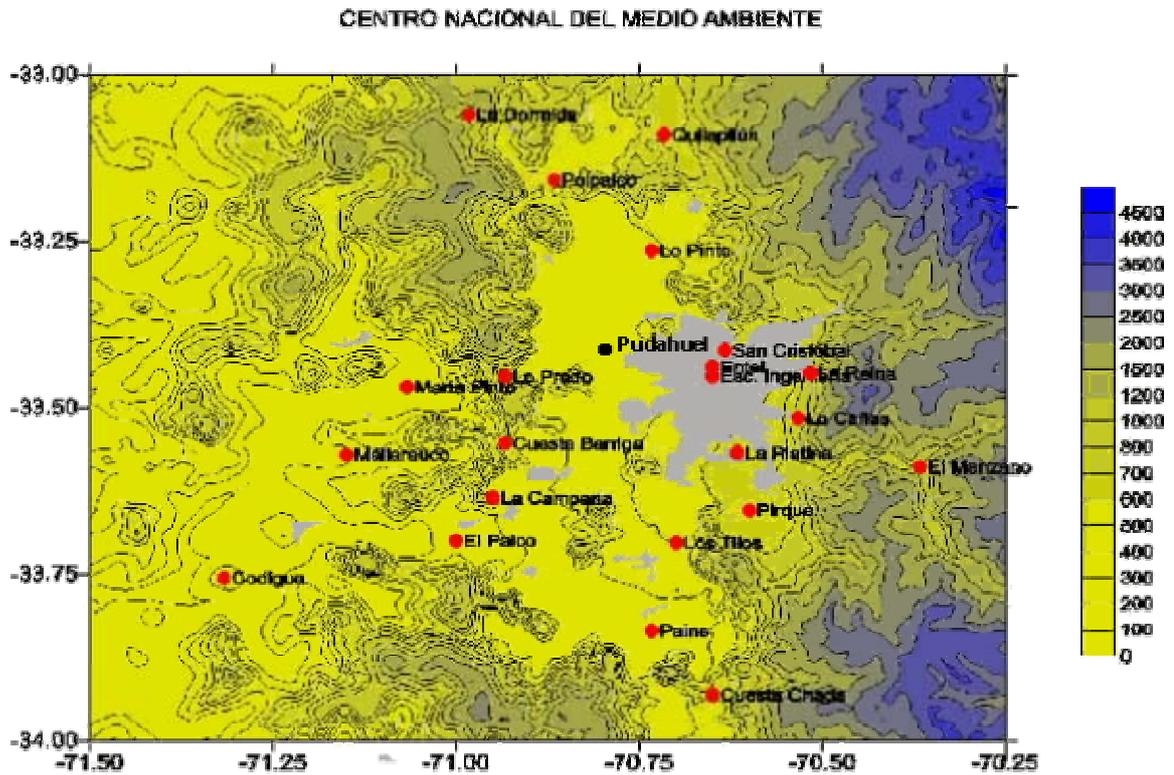


Figura 3.3 Mapa de las estaciones en la zona de Santiago usadas para la evaluación del modelo HIRLAM. Estas estaciones son manejadas por el Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA). También se muestra en el mapa la estación Pudahuel (Estación de la OMM número 24).

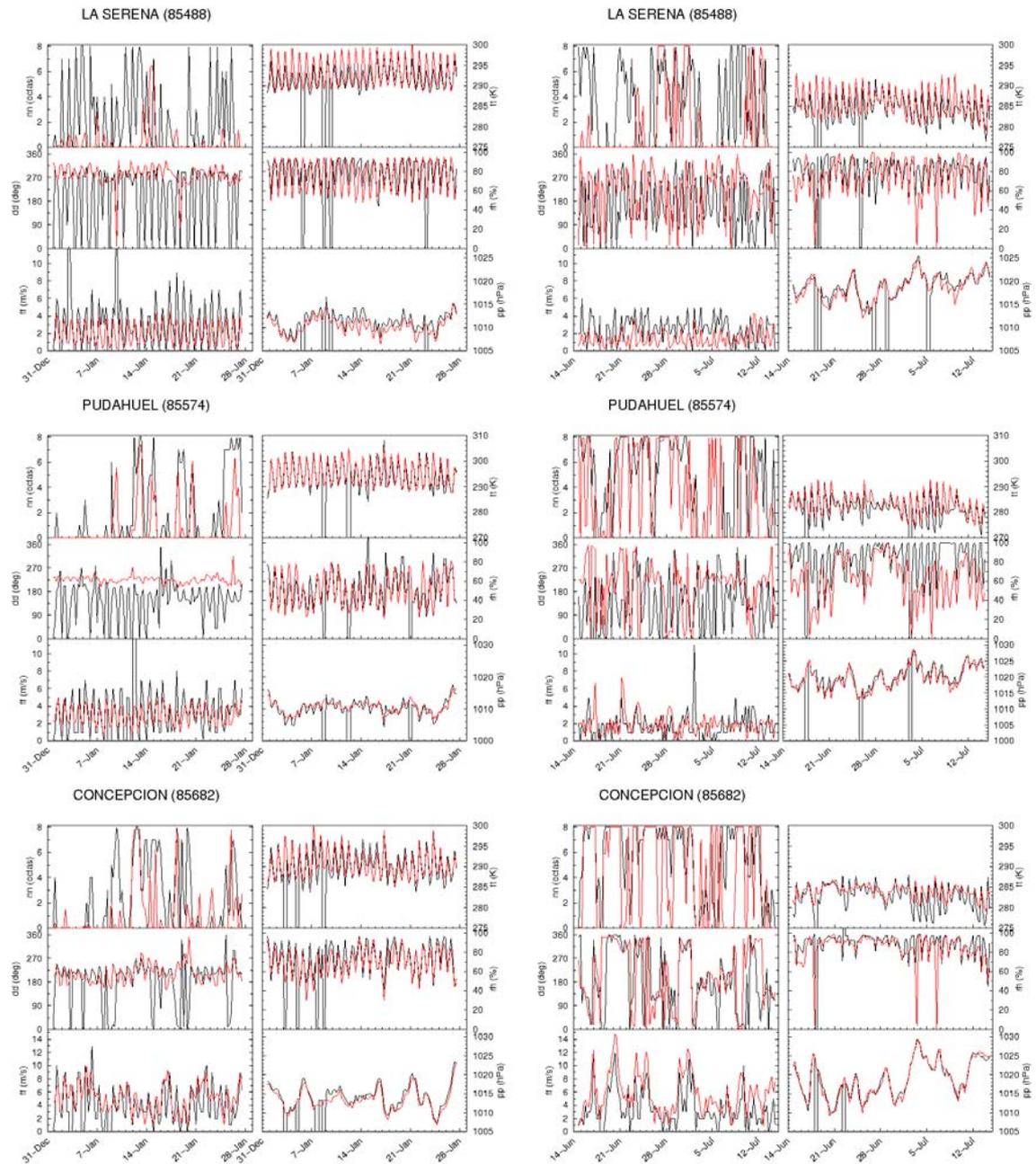


Figura 3.4 Simulaciones de modelo HIRLAM (rojo) y observaciones (negro) de cobertura nubosa (en octas), temperatura a 2 m, dirección del viento a 10 m (grados), rapidez del viento a 10 m y presión en superficie reducida al nivel del mar (hPa) para tres estaciones sinópticas en la parte central de Chile en Enero de 1998 y Junio-Julio de 1999.

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 3.5). Se debe destacar que el modelo captura las frecuentes bajas costeras tan características de Chile central y norte (Cf. Figura 3.6). En general el modelo representa bien las características regionales de los campos meteorológicos (Cf. Figure 3.7).

Aplicación de los resultados del modelo en el presente estudio

Para los fines de la aplicación en el presente 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 rapidez típicas de algunos m/s) estos campos debieran servir para poder caracterizar los potenciales eólicos de Chile norte y central.

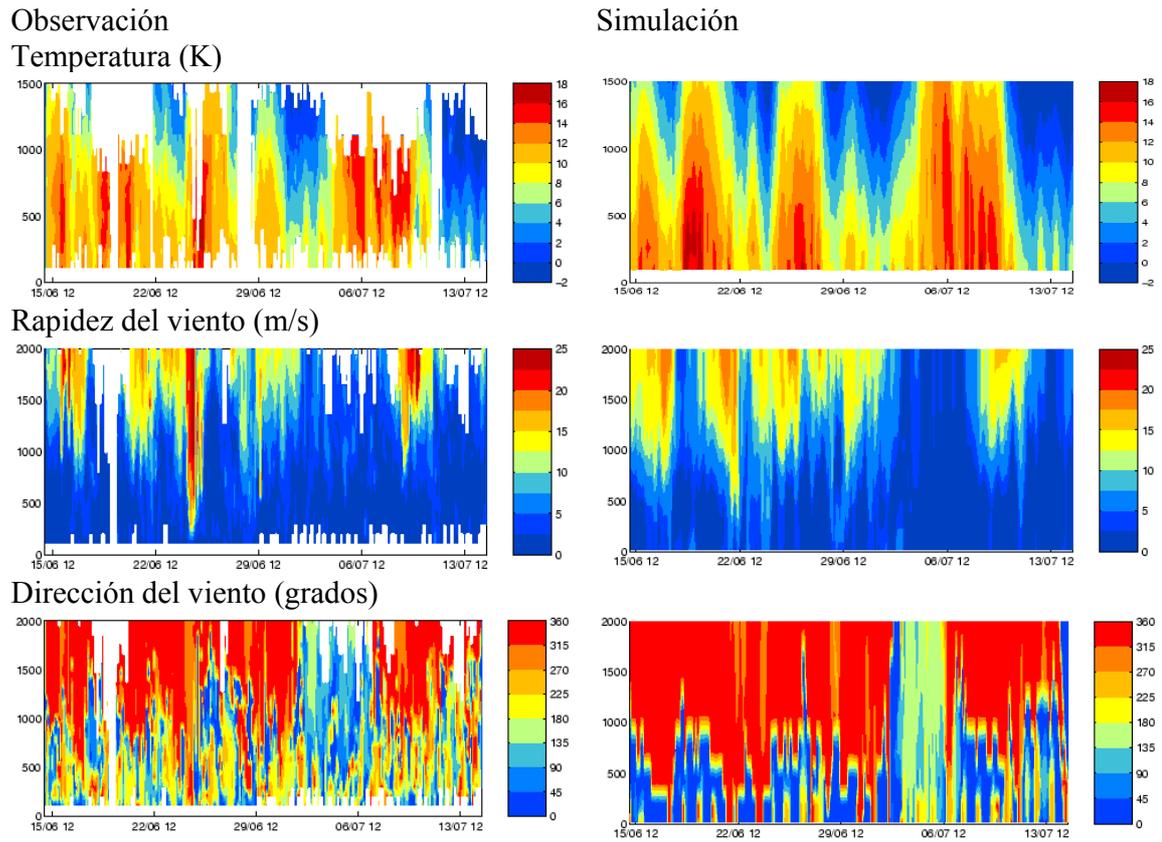
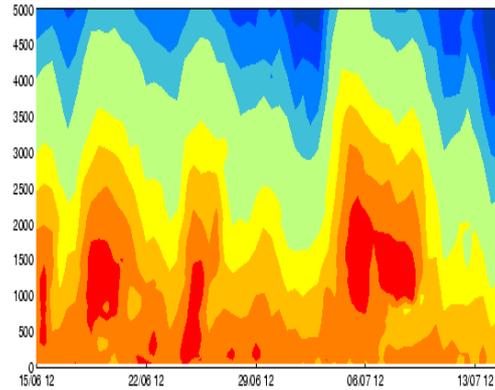
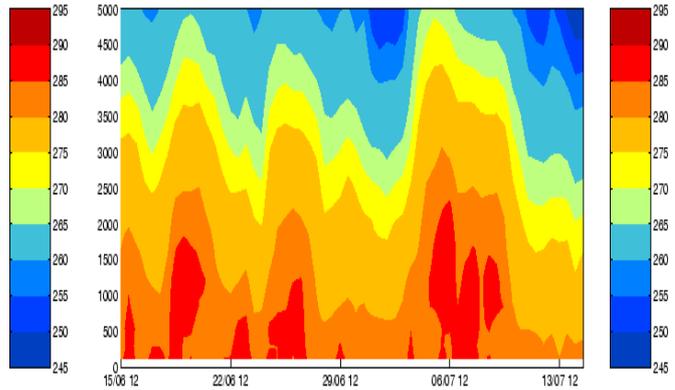


Figura 3.5 Perfiles verticales de temperatura (K), rapidez (m/s) y dirección (grados) del viento según las simulaciones (paneles izquierdos) y según las observaciones (paneles derechos) de la sonda acústica de La Platina al sur de Santiago en Junio-Julio de 1999.

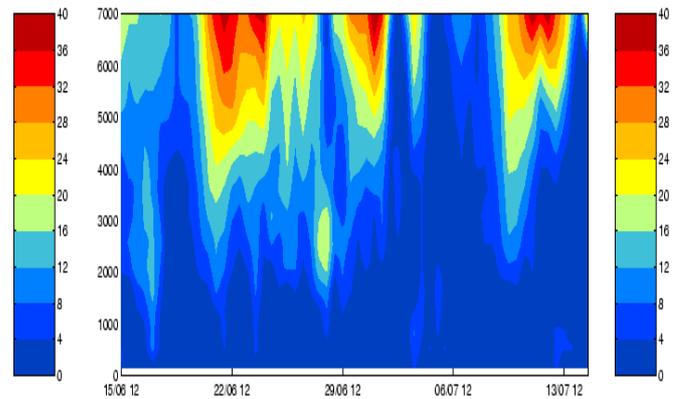
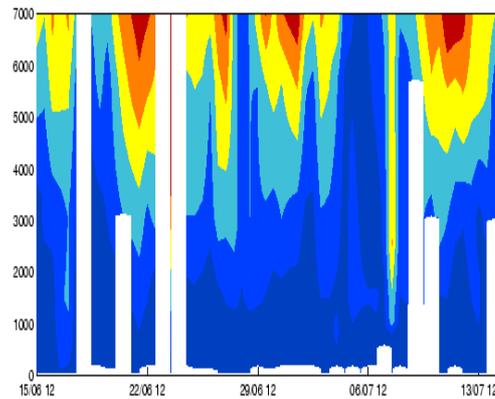
Observación
Temperatura(K)



Simulación



Rapidez del viento (m/s)



Dirección del viento (grados)

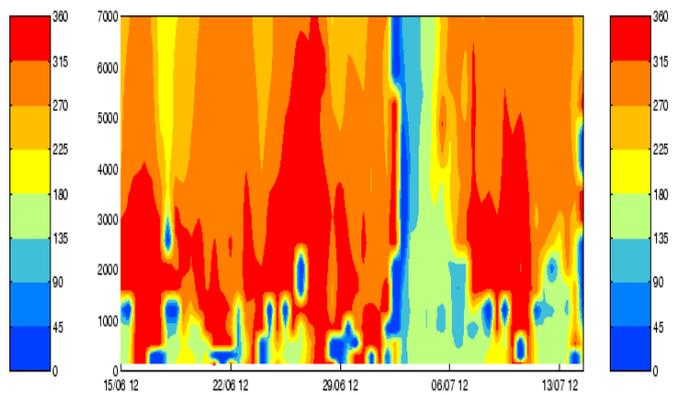
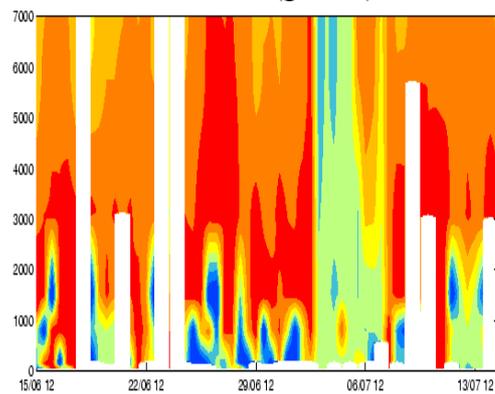


Figura 3.6 Perfiles verticales de temperatura (K), rapidez (m/s) y dirección (grados) del viento según las simulaciones (paneles izquierdos) y según las observaciones (paneles derechos) de la estación sondeadora de Santo Domingo (85543) en la costa de Chile central en Junio-Julio de 1999.

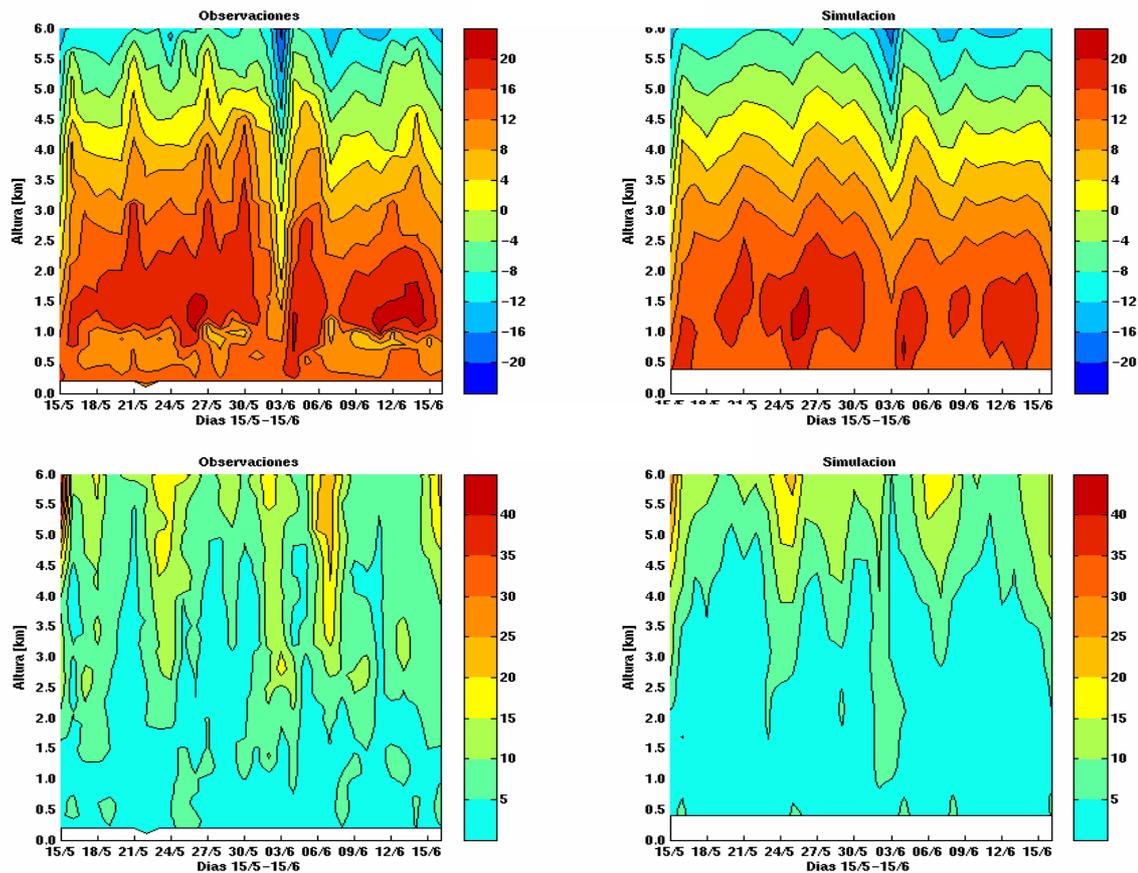


Figura3. 7 Perfiles verticales de temperatura [°C] (superior) y rapidez del viento [m/s] (inferior) según las simulaciones (columna derecha) y según las observaciones (columna izquierda) de los sondeos realizados en Antofagasta para el período entre el 15 de Mayo y 16 de Junio del 2000. El eje vertical muestra altura sobre el nivel del suelo hasta 6 km.

3.1.2 Modelo MM5

El modelo MM5 (Mesoscale model of the 5th Generation) es un modelo regional de pronóstico del tiempo MM5 empleado en forma operacional en el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile (DGF). El MM5 es una versión no-hidrostática, completamente compresible de un modelo regional (área limitada) desarrollado a partir de los años 80 por la Pennsylvania State University y el National Center for Atmospheric Research (NCAR) de los Estados Unidos. Una detallada descripción y documentación del modelo se encuentran en el sitio Internet: <http://www.mmm.ucar.edu/mm5/mm5-home.html>. Una ventaja importante de este modelo es que es de libre uso, y además es de amplia utilización en investigaciones y aplicaciones meteorológicas. NCAR mantiene soporte del modelo a la vez que incentiva su desarrollo y aplicación. En particular, se prevé que en el futuro de mediano plazo el modelo MM5 sea reemplazado por el modelo WRF (Weather and Research Forecast Model).

En esencia el MM5 resuelve en una grilla regular las ecuaciones de pronóstico para las variables meteorológicas principales: velocidad del viento (tres componentes), temperatura, presión, humedad específica y sustancias microfísicas. En la vertical el modelo emplea una coordenada que sigue al terreno: $\sigma = (P - P_{top}) / (P_{sfc} - P_{top})$, donde P_{top} y P_{sfc} son las presiones del tope y superficie asociadas a cada punto de grilla. El modelo dispone de varias opciones para la parametrización de los procesos de sub-grilla. En la versión MM5-DGF se emplean:

Microfísica = Esquema simple de Dudhia (Opción 4)
Convección Profunda = Esquema de Kain-Fritsch (Opción 6)
Capa Límite = Esquema de Blackadar (Opción 2)
Temperatura del Suelo = Esquema de suelo de múltiples capas (Opción 1)
Radiación = Esquema de Dudhia.

El DGF emplea el MM5 en forma operacional desde Abril del 2002 como un apoyo al pronóstico del tiempo en la región central del país. El modelo se inicializa a las 0000 UTC (20:00 HL) de cada día y se integra hasta completar una previsión de 72 horas. Tal integración tarda aproximadamente 6 horas de tiempo real. Las condiciones iniciales y de borde (pronosticadas) se obtienen del modelo global AVN, disponibles a través de Internet desde el NCEP (USA). En su forma actual, el AVN entrega campos meteorológicos cada 6 horas en una grilla regular de 1.25° de espaciamiento horizontal (lat y lon) y con 20 niveles de presión en la vertical entre la superficie y los 10 hPa.

La versión operacional del MM5-DGF incluye tres dominios anidados con las siguientes características:

Dominio 1: 34 x 40 x 30 puntos (paso horizontal 135 km)
Dominio 2: 55 x 55 x 30 puntos (paso horizontal 45 km)
Dominio 3: 73 x 73 x 30 puntos (paso horizontal 15 km)

En todos los dominios se emplean 30 niveles sigma, con máxima resolución en los primeros 1000 metros. En particular, los niveles 1 y 2 se encuentran a aprox. 35 m y 108 m sobre el suelo, respectivamente, para un punto a nivel del mar.

La geometría de los dominios se presenta en la figura 3.8. La mayor resolución del modelo (15 km) se alcanza sobre Chile central (Regiones IV a la VIII), mientras que la resolución media cubre desde la Región III a la X. El dominio 1 tiene la función de una transición suave entre las condiciones de borde y el interior del modelo, limitando además parcialmente la propagación de errores contenidos en los pronósticos del modelo AVN.

Aunque no existe aún una validación sistemática del MM5 en Chile central, sus resultados se comparan favorablemente con las observaciones para algunos casos de estudio (Garreaud y Rutllant 2003).

Aplicación de los resultados del modelo en el presente estudio

Sobre la base de las salidas del MM5-DGF, se construyeron para este estudio series de tiempo continuas de diversas variables meteorológicas para cada punto de grilla. La resolución temporal es horaria. La estrategia consiste en “concatenar” las previsiones entre las 12 y 36 horas de la simulación de cada día (Figura 3.9). Así, las series de tiempo son formalmente continuas entre el 14-04-2002 y el 27-11-2002, pero cada 24 horas existe un salto asociado a un nuevo ciclo del modelo. La elección de tomar los periodos entre 12 y 36 horas del modelo se sustenta en que es un periodo en el cual el modelo ya se ha ajustado a las condiciones iniciales y no es tan tardío como para ser demasiado afectado por los errores asociados a las condiciones de borde.

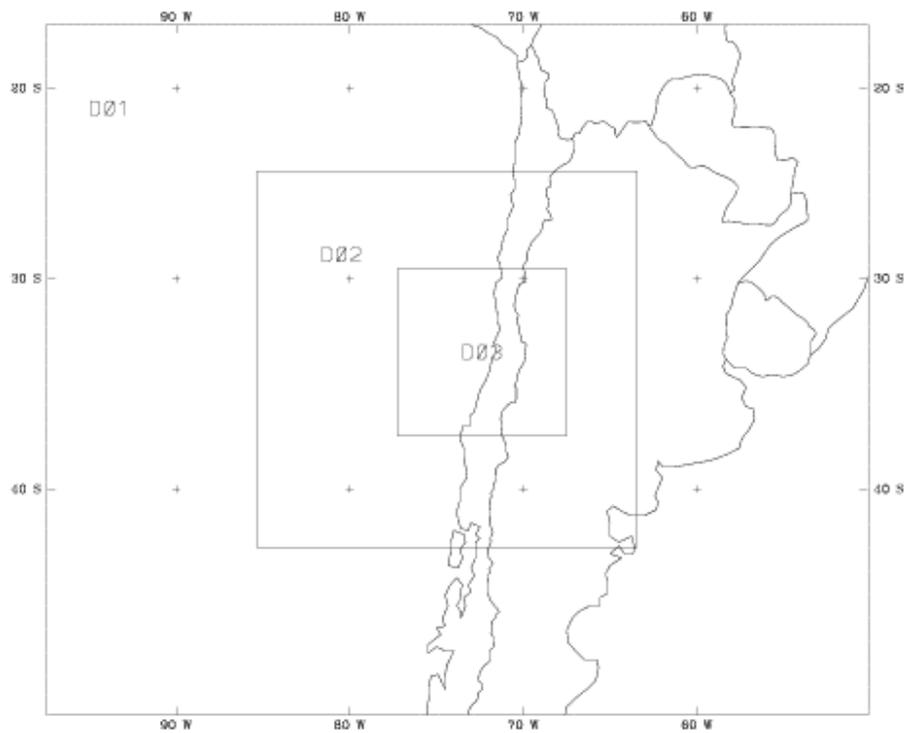


Figura 3.8 Dominios de modelo MM5 en implementación en DGF.

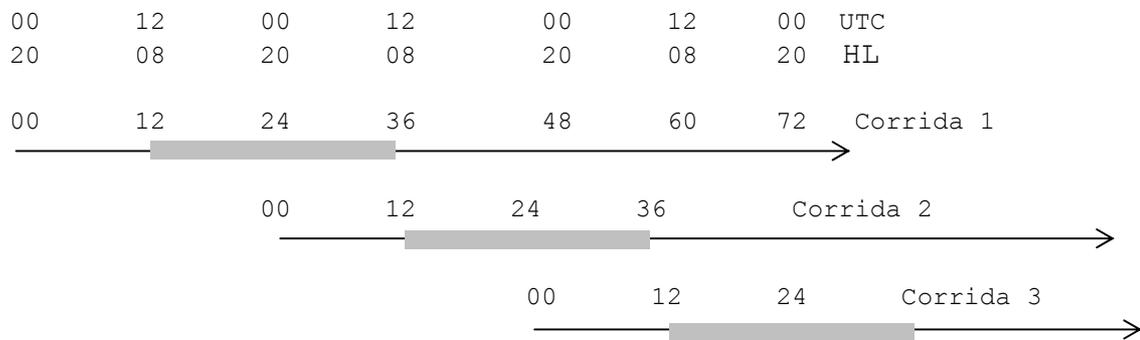


Figura 3.9 Esquema de construcción de serie temporal de resultados de modelo MM5. La concatenación de las barras sombreadas constituye la serie de tiempo “continua” empleadas en este trabajo.

3.1.3 Otros modelos meteorológicos

Aparte de los modelos anteriores, otros grupos de investigación en el país tienen experiencia en el uso y aplicación de modelos meteorológicos de mesoescala. Tanto el Centro de Investigación Atmosférica de la Universidad de La Serena (Prof. Melitta Fiebig) como investigadores de la Universidad de La Frontera (Prof. Sonia Montesinos) tienen acceso al modelo alemán de mesoescala KAMM (Karlsruhe Atmospheric Mesoscale Model) (Referencia: Adrian y Fiedler, 1991). Este modelo ha sido aplicado en la evaluación de potencial eólico en otras regiones (por ejemplo, en Irlanda según se describe en Frank y Landberg, 1997). Su aplicación en la caracterización del régimen de vientos en la zona centro-norte de Chile se ha descrito en Kalthoff et al., 2002.

El modelo MM5 es corrido también en forma operacional por el Sr. Ricardo Alcañuz de la Dirección Meteorológica de Chile.

Finalmente, se debe mencionar al Investigador José Vergara que tiene amplia experiencia en modelación meteorológica de mesoescala y que participa en proyecto FONDEF de evaluación del potencial eólico junto con la Universidad de Magallanes (Proyecto FONDEF “Caracterización y aprovechamiento integral de la energía del viento en Chile”).

3.2 Comparación de velocidades medidas y modeladas

Se ha procedido a comparar la distribución de magnitudes del viento determinada por los modelos con las observaciones de viento recopiladas en el proyecto. El Anexo 5 muestra el resultado de esta comparación para cada una de las estaciones recopiladas. Adicionalmente se ha incluido 3 estaciones de la DMC (DMCSE, DMCOV, DMCLV), cuyos datos horarios fueron solicitados especialmente para estos efectos.

Las dos figuras en el tope de las páginas del Anexo 5 muestran los diagramas de dispersión entre las velocidades medias diarias obtenidas con los modelos y las calculadas a partir de los datos observados (se llevaron al nivel de 10 m asumiendo las rugosidades y alturas de sensores indicada en la Tabla 2.7). Estos gráficos de dispersión se presentan sólo para los días en que existen observaciones y resultados de los modelos simultáneamente.

Las dos figuras siguientes muestran las distribuciones de frecuencia para las velocidades horarias calculadas con los modelos y con los datos observados. En el caso que el periodo de los datos no coincida con el periodo de modelación, se presentan resultados de los datos para periodos mensuales semejantes a los de los modelos.

La siguiente figura muestra los ciclos diarios de velocidad observados y modelados. Se presenta dos curvas con ciclos diarios observados: uno para periodos semejantes a los del modelo HIRLAM y otro para periodos correspondientes al modelo MM5.

Finalmente, la última figura muestra los ciclos anuales de observaciones y los obtenidos con los dos modelos.

Los resultados del Anexo 5 muestran que los dos modelos tienen una tendencia a presentar una mayor variabilidad interdiaria que la observada. Esto es especialmente notorio en las estaciones ubicadas en valles, como por ejemplo la mayor parte de las estaciones de la V Región. Las distribuciones de las magnitudes modeladas tienen una cola a la derecha sustancialmente mayor que las observaciones. Esto tiene importancia, al momento de estimar parámetros de generación eólica que dependen grandemente de la cola derecha de las distribuciones. Asimismo, los ciclos diarios observados son más pronunciados que los ciclos diarios modelados.

En los puntos de la III Región (estaciones HVL) la variabilidad interdiaria de modelos es semejante a la de las observaciones (y menor que en la V Región). Los ciclos diarios del modelo HIRLAM parecen más realistas que los obtenidos con el modelo MM5.

Curiosamente, el modelo MM5 presenta mejores ajustes en las estaciones costeras de la III y IV Región instaladas por el Departamento de Geofísica (ver estaciones DGCAL, DGPCA, DGHUA, DGLVA). En las estaciones de Lengua de Vaca y Pichidangui la longitud de las observaciones permite contrastar los dos modelos versus los datos. Se aprecia una tendencia del modelo HIRLAM a tener un sesgo positivo respecto de las observaciones, mientras que el MM5 tiene una buena correlación con los datos.

En la estación de altura (Indio) los dos modelos se ajustan bien a los datos, con una cierta tendencia del MM5 a sobreestimar las magnitudes.

No mediante un error de procesamiento, las diferencias entre modelos y observaciones podrían explicarse en:

- fallas de exposición o representatividad de las estaciones,
- limitaciones en la resolución espacial de los modelos
- limitaciones en la definición de parámetros de los modelos (rugosidad, etc.).

El hecho de que los resultados de modelos presenten en general una mayor variabilidad interdiaria que la de las estaciones, especialmente en estaciones en valle, podría entenderse como que los modelos, debido a su pequeña resolución espacial, no son capaces de capturar la exposición local de la estación. Los resultados de los modelos debieran interpretarse en estos casos, como los vientos de escala sinóptica que afectan los valles. En su interior, sin embargo, las estaciones monitoras miden flujos más débiles y con menor variabilidad, debido al efecto de la topografía de menor escala, no incluida en los modelos. Las estaciones instaladas en puntos bien expuestos a los flujos sinópticos, por otro lado, muestran una variabilidad comparable con la de los modelos.

3.3 Resultados de modelos

3.3.1 Modelo HIRLAM

Se presenta a continuación figuras con los resultados del modelo HIRLAM. Se presentan resultados de velocidades medias de viento llevadas a 10 m sobre la superficie (figuras 3.10 a 3.13), promedios de densidad de potencia eólica (DPE) a 10 m (figuras 3.14 a 3.17) y amplitud del ciclo diario del viento (figuras 3.18 a 3.21). Se calculó un promedio representativo del periodo anual, así como para sub-periodos: Invierno, Primavera y Verano.

El rasgo más sobresaliente de los campos de velocidades medias es la zona de máximo viento en el área costera de la IV Región. Este máximo de viento se hace más pronunciado en los periodos de primavera y verano. Aparte de esta zona, los vientos presentan una distribución espacial semejante a la obtenida con el modelo MM5 (descritos en sección siguiente), y con fuerte dependencia del relieve topográfico del modelo.

Las distribuciones de densidad de potencia eólica en el modelo HIRLAM resultan bastante uniformes. Mayores valores se observan en las zonas costeras y en los cordones montañosos transversales. Las amplitudes del ciclo diario de velocidades son mayores en los valles y crecen hacia el norte del país. El ciclo diario se hace más amplio en el periodo de verano.

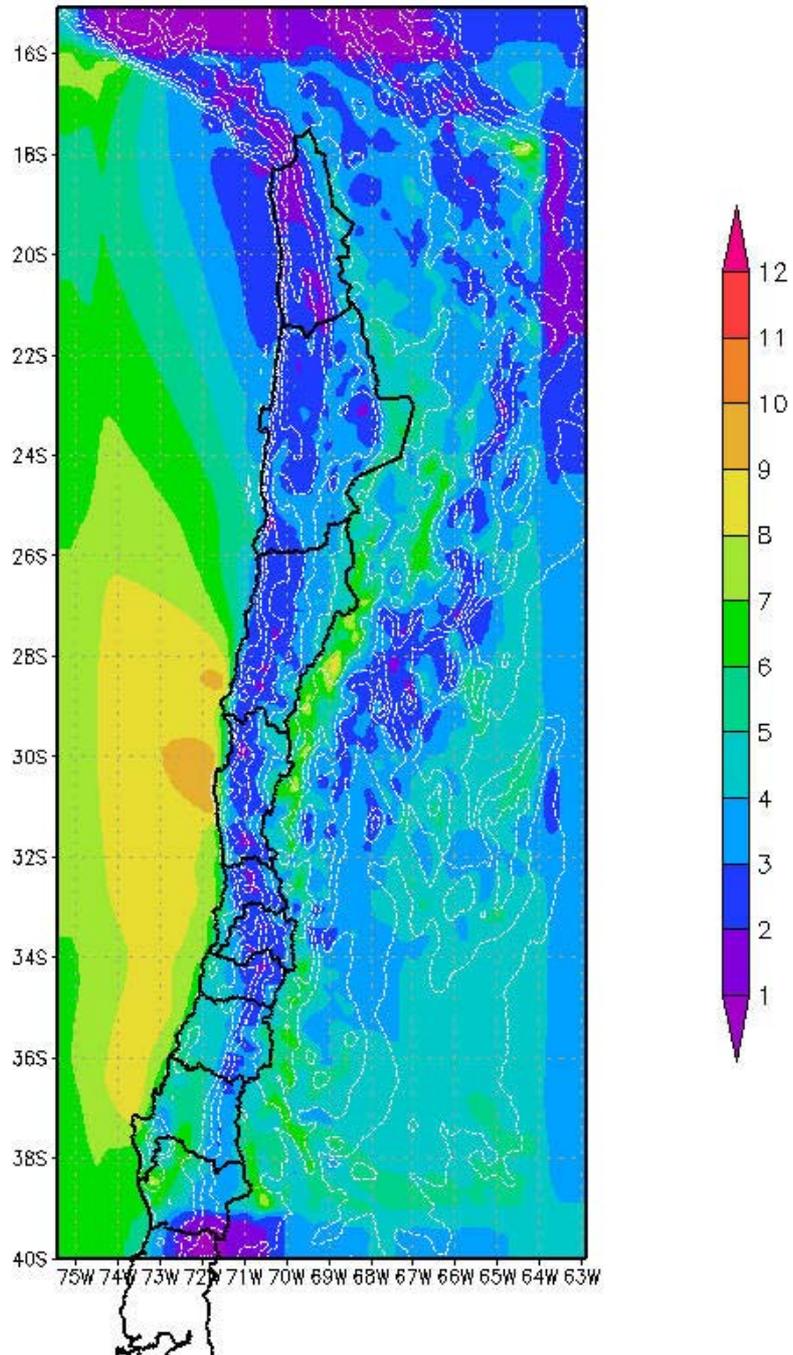


Figura 3.10 Magnitud del viento a 10 m sobre el suelo para periodo completo (Modelo HIRLAM). Líneas indican contornos de terreno. Colores indican magnitud del viento en (m/s) (escala a la derecha).

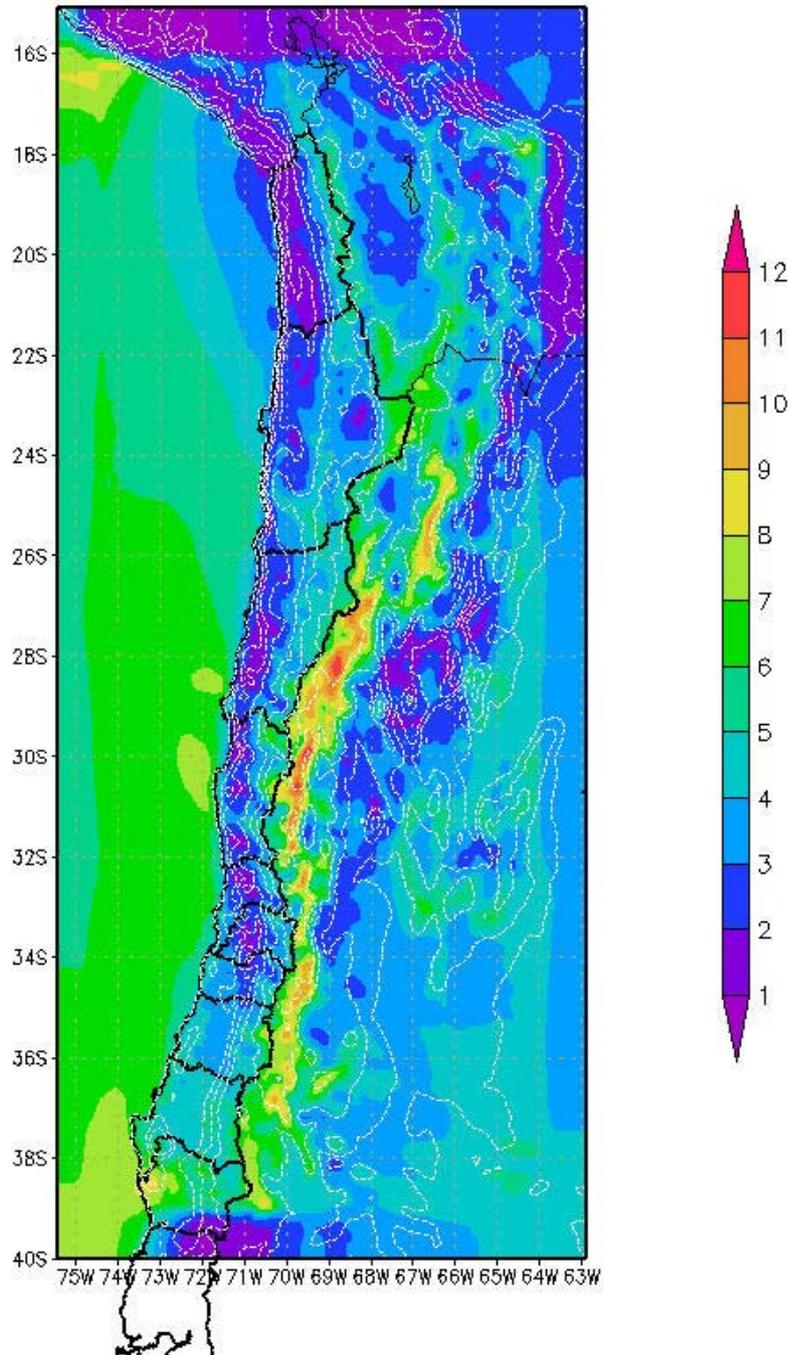


Figura 3.11 Magnitud del viento a 10 m sobre el suelo para periodo Invierno (Modelo HIRLAM). Líneas indican contornos de terreno. Colores indican magnitud del viento en (m/s) (escala a la derecha).

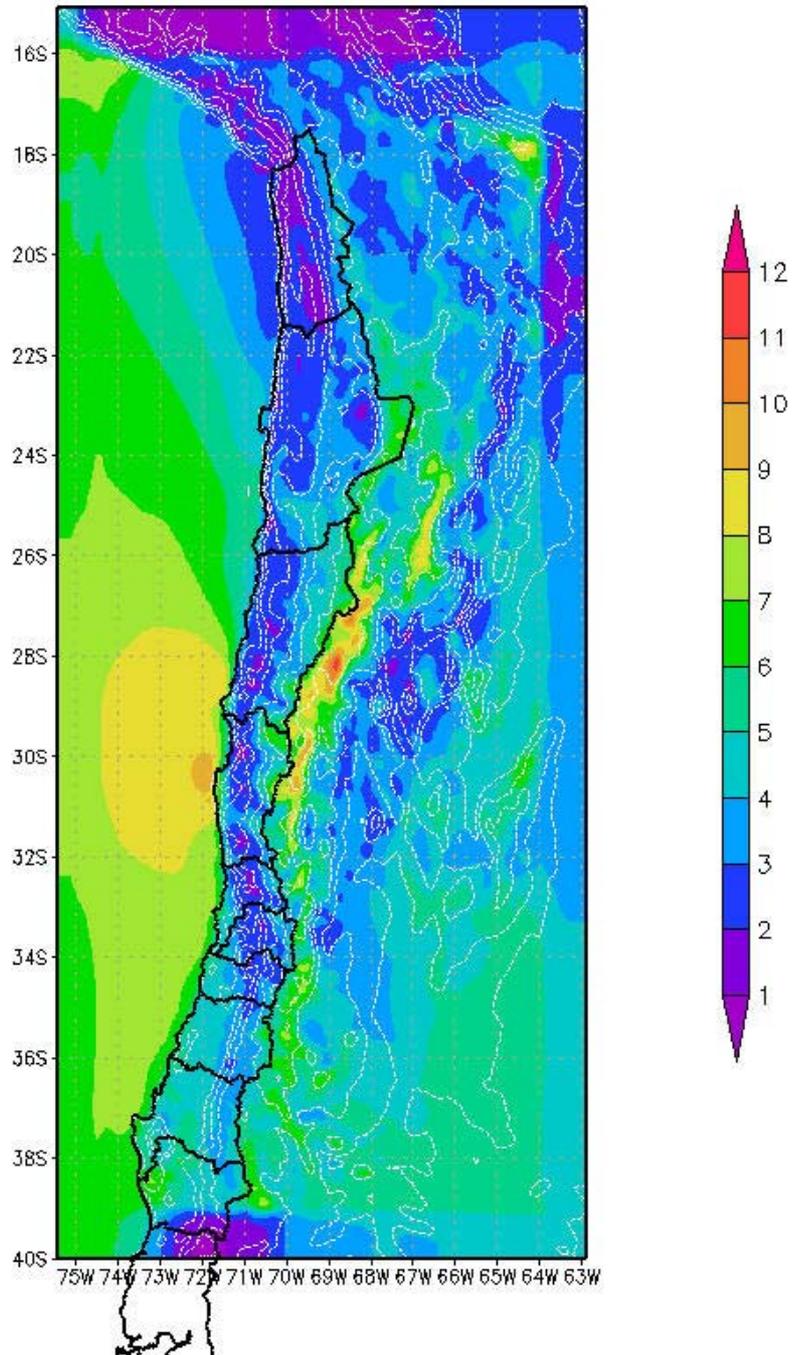


Figura 3.12 Magnitud del viento a 10 m sobre el suelo para periodo Primavera (Modelo HIRLAM). Líneas indican contornos de terreno. Colores indican magnitud del viento en (m/s) (escala a la derecha).

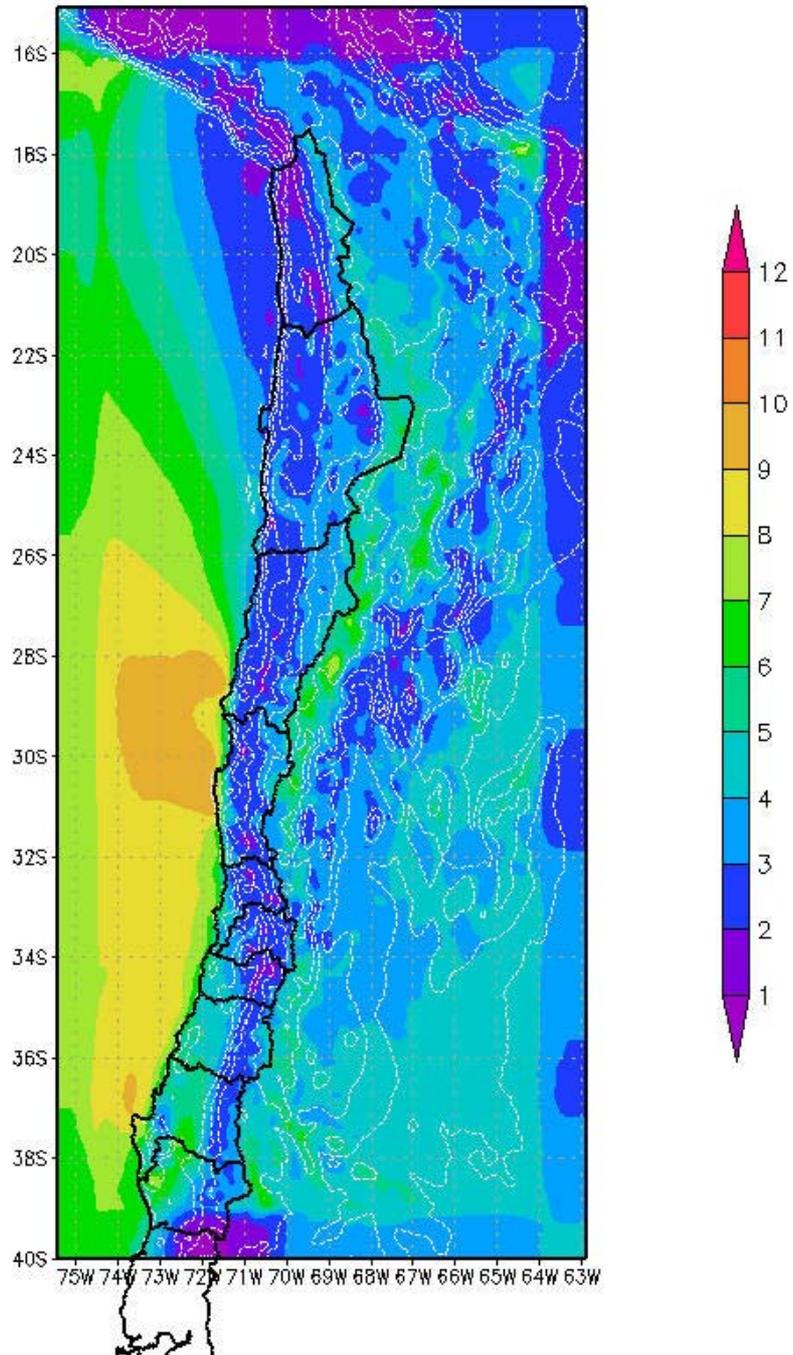


Figura 3.13 Magnitud del viento a 10 m sobre el suelo para periodo Verano (Modelo HIRLAM). Líneas indican contornos de terreno. Colores indican magnitud del viento en (m/s) (escala a la derecha).

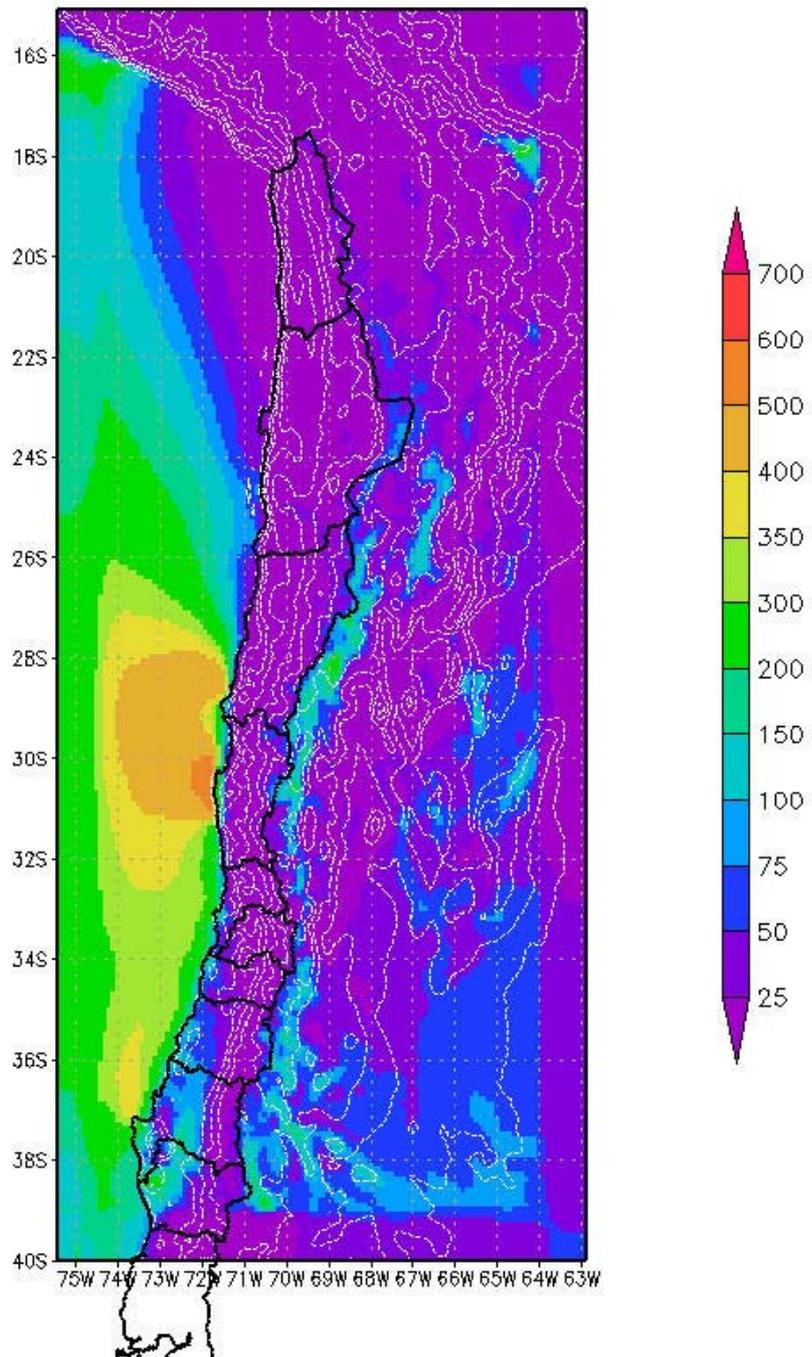


Figura 3.14 DPE a 10 m sobre el suelo para periodo completo (Modelo HIRLAM). Líneas indican contornos de terreno. Colores indican DPE en (W/m^2) (escala a la derecha).

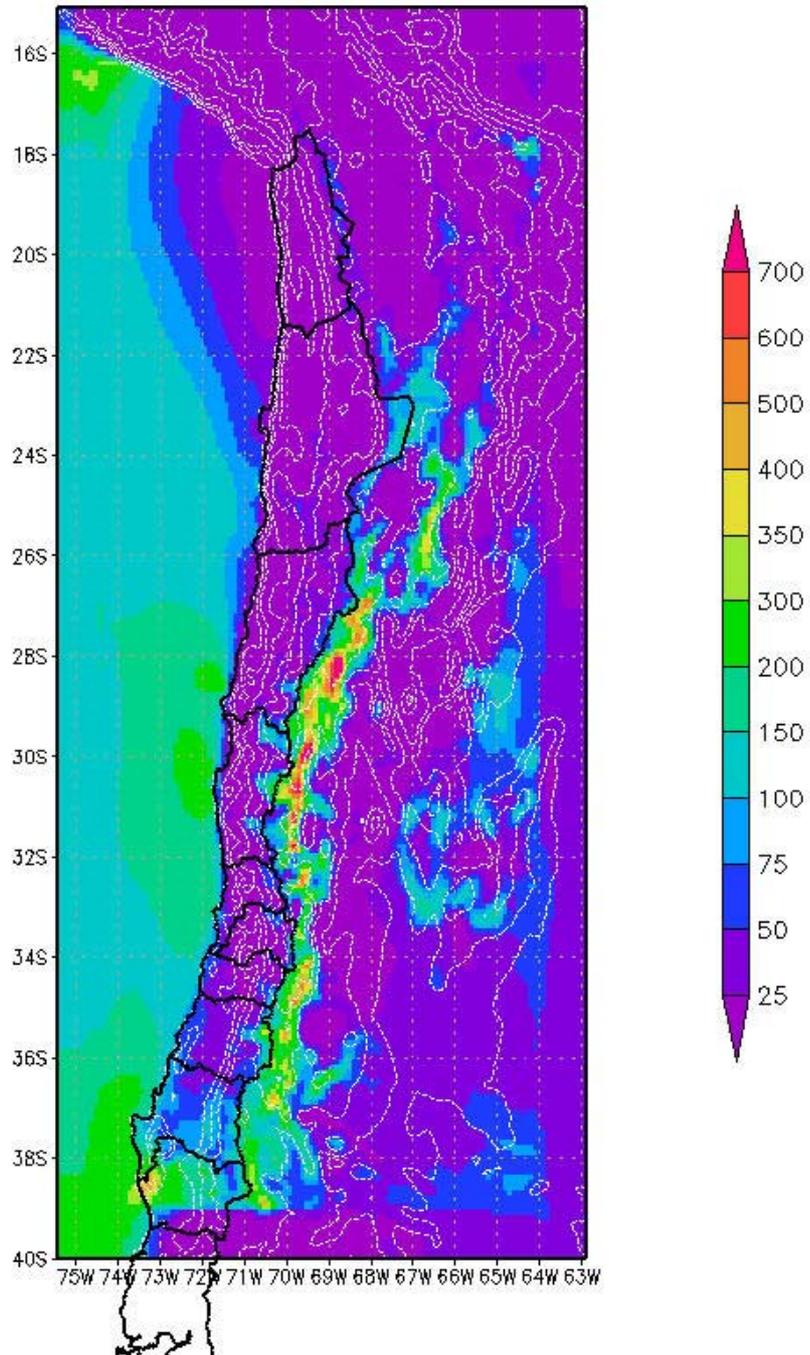


Figura 3.15 DPE a 10 m sobre el suelo para periodo Invierno (Modelo HIRLAM). Líneas indican contornos de terreno. Colores indican DPE en (W/m²) (escala a la derecha).

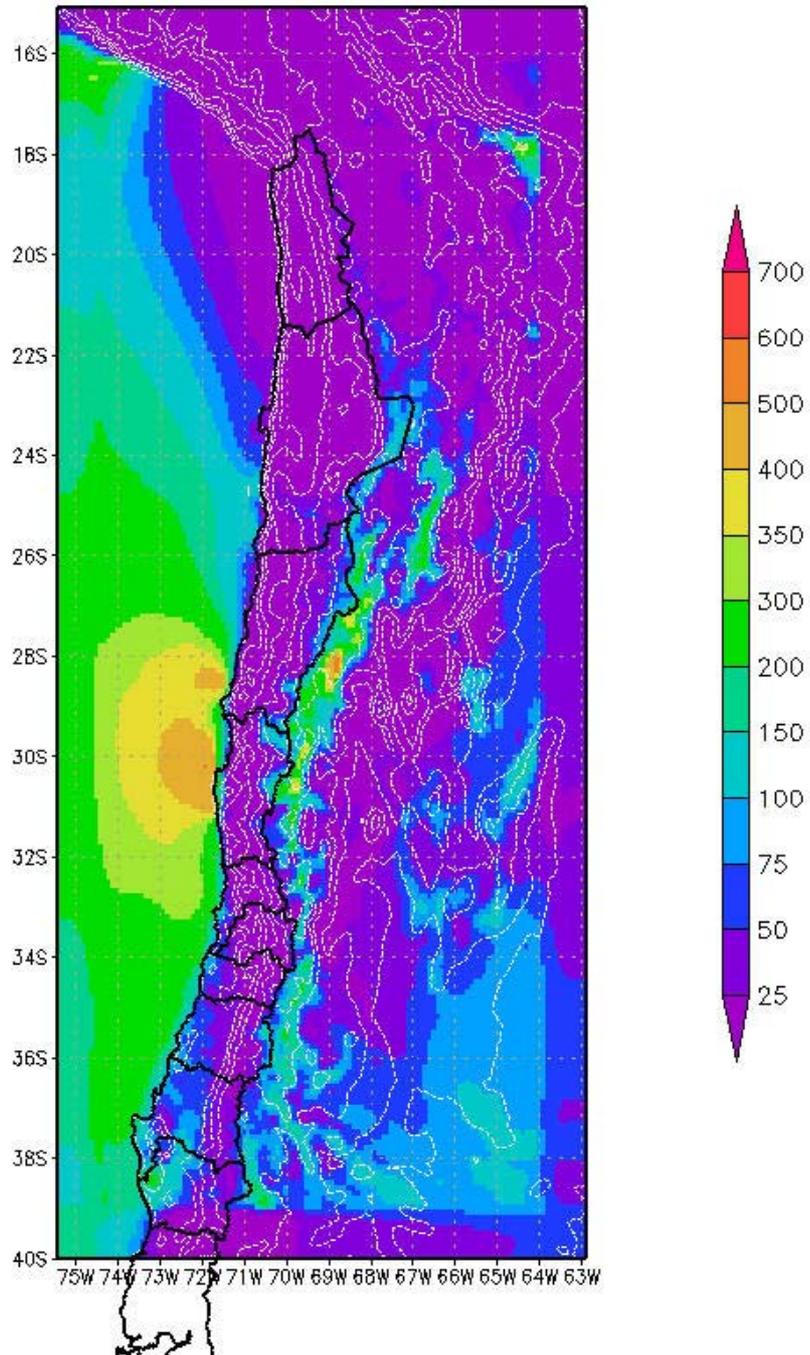


Figura 3.16 DPE a 10 m sobre el suelo para periodo Primavera (Modelo HIRLAM). Líneas indican contornos de terreno. Colores indican DPE en (W/m²) (escala a la derecha).

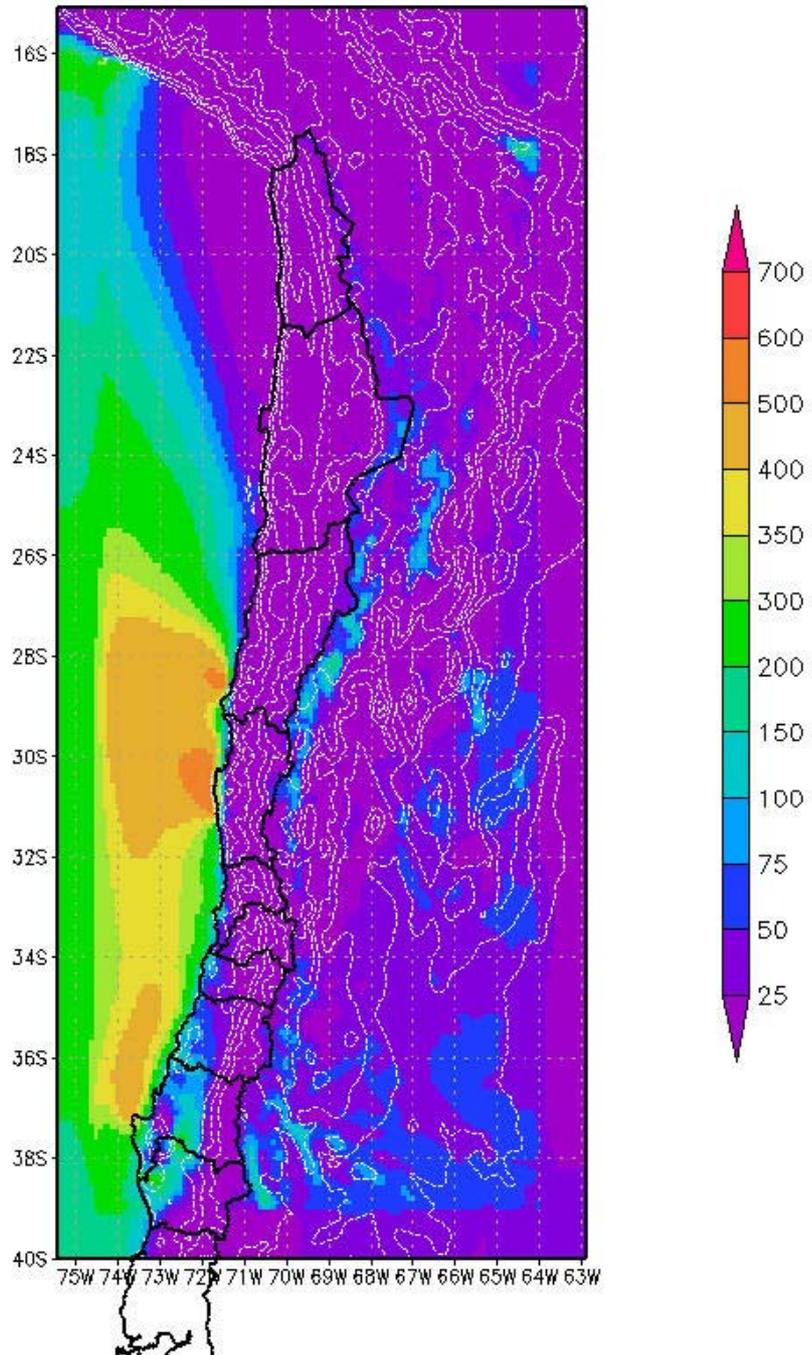


Figura 3.17 DPE a 10 m sobre el suelo para periodo Verano (Modelo HIRLAM). Líneas indican contornos de terreno. Colores indican DPE en (W/m²) (escala a la derecha).

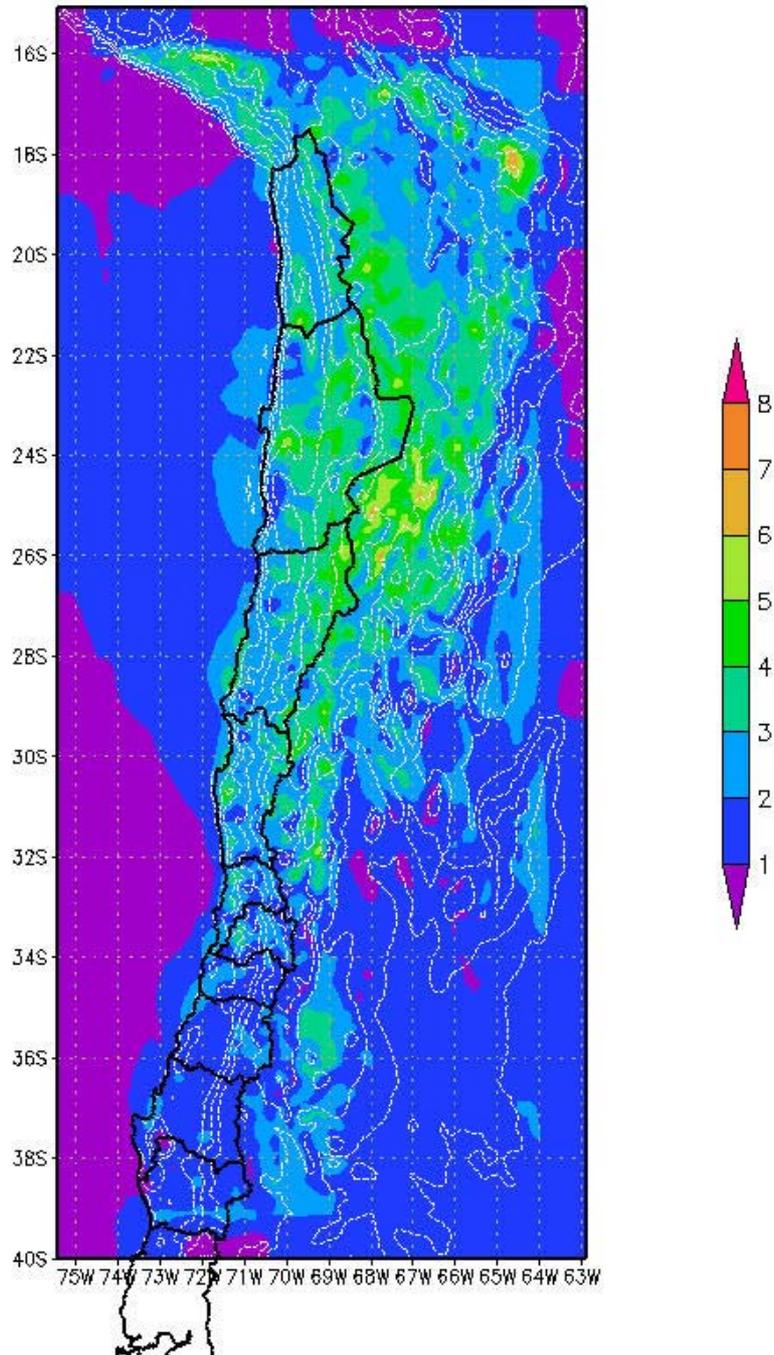


Figura 3.18 Amplitud del ciclo diario de viento a 10 m sobre el suelo para periodo completo (Modelo HIRLAM). Líneas indican contornos de terreno. Colores amplitud en (m/s) (escala a la derecha).

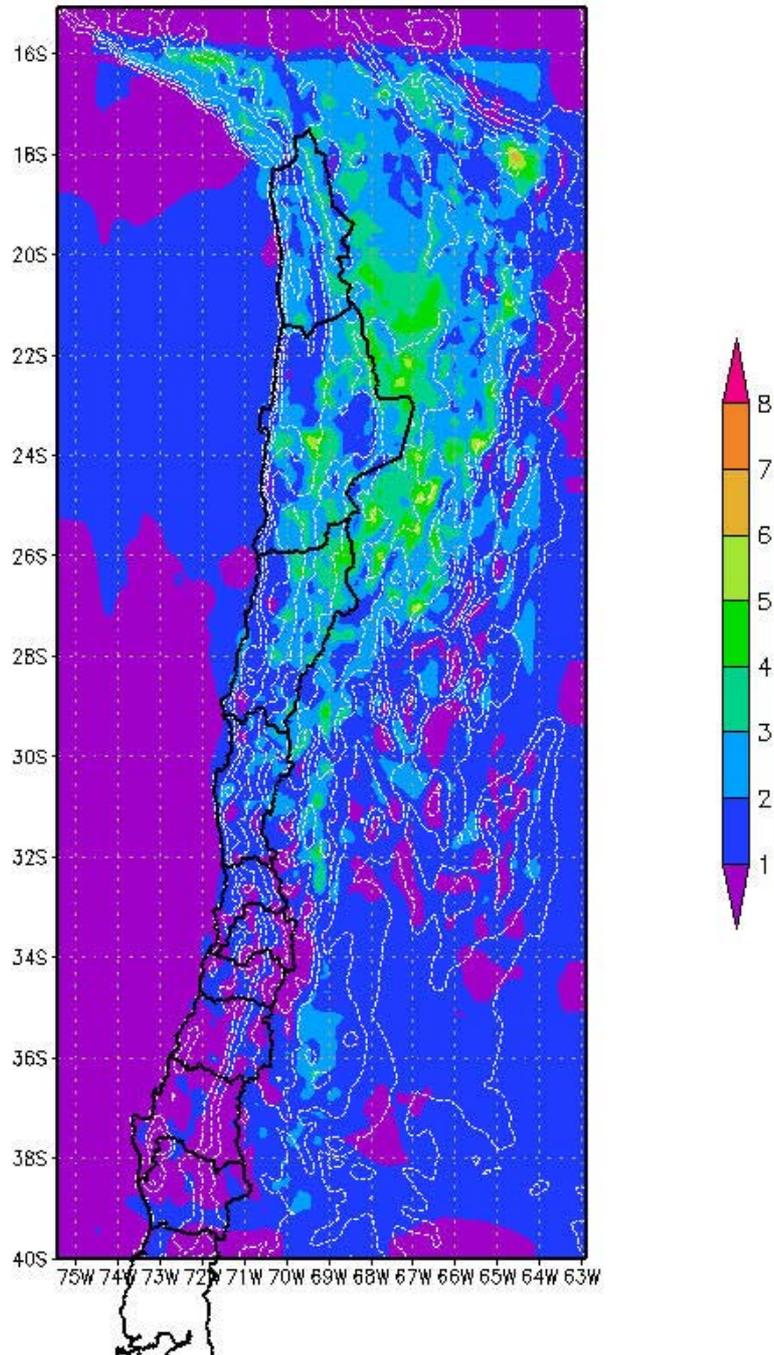


Figura 3.19 Amplitud del ciclo diario de viento a 10 m sobre el suelo para periodo Invierno (Modelo HIRLAM). Líneas indican contornos de terreno. Colores amplitud en (m/s) (escala a la derecha).

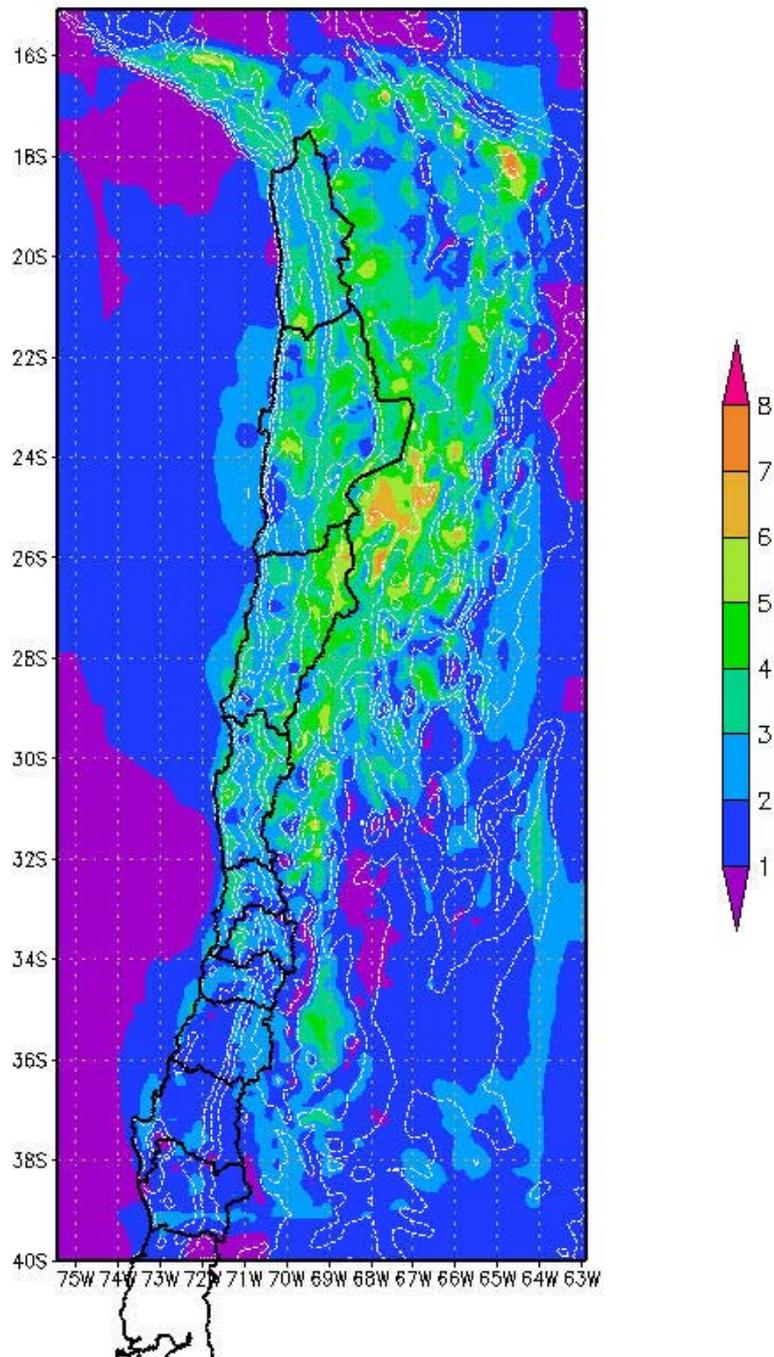


Figura 3.20 Amplitud del ciclo diario de viento a 10 m sobre el suelo para periodo Primavera (Modelo HIRLAM). Líneas indican contornos de terreno. Colores amplitud en (m/s) (escala a la derecha).

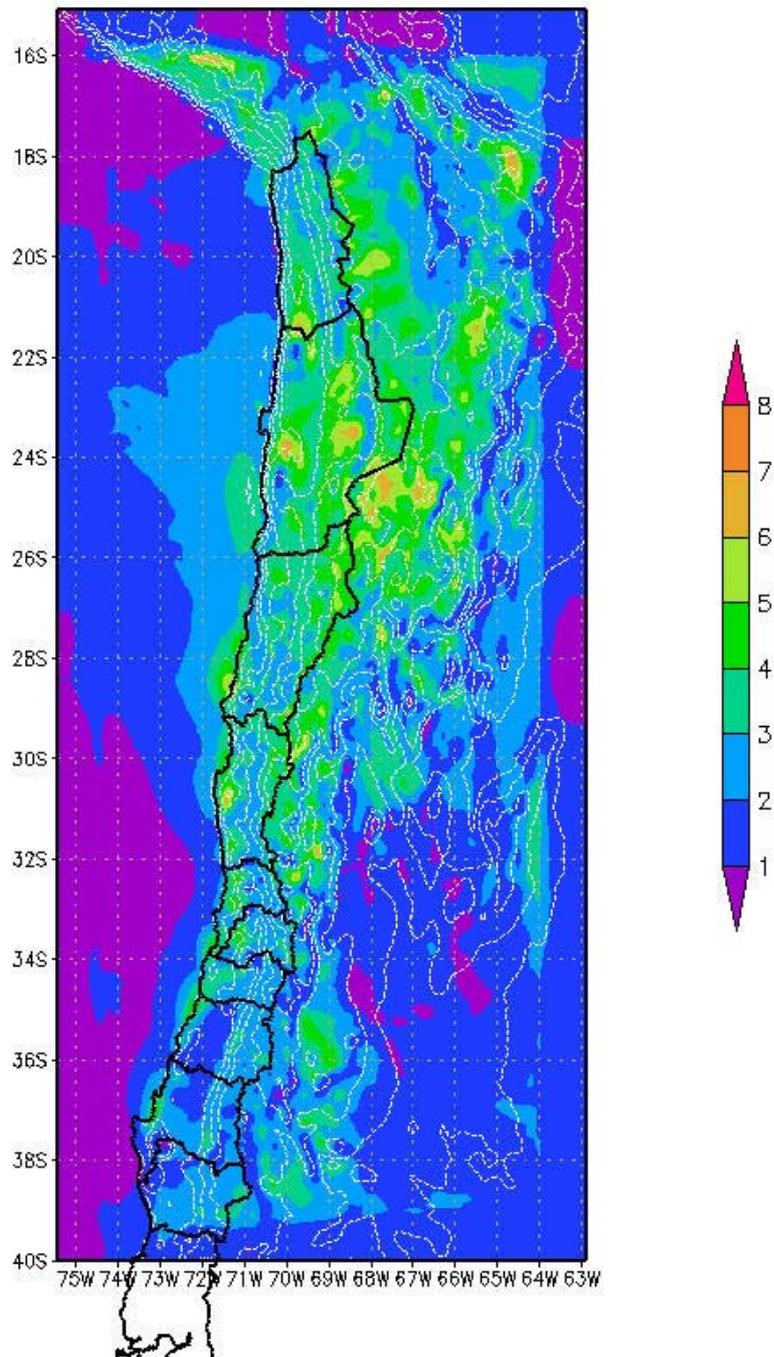


Figura 3.21 Amplitud del ciclo diario de viento a 10 m sobre el suelo para periodo Verano (Modelo HIRLAM). Líneas indican contornos de terreno. Colores amplitud en (m/s) (escala a la derecha).

3.3.2 Modelo MM5

Las figuras 3.22 a 3.41 muestran los resultados del modelo MM5 para los dominios 2 y 3 de simulación. Se presentan resultados para el periodo global de simulación (Abril a Noviembre del 2002) así como para dos sub-periodos denominados Invierno (Mayo, Junio, Julio) y Primavera (Septiembre, Octubre).

Los resultados presentados aquí corresponden a promedios de magnitud del viento, densidad de potencia eólica, y amplitud del ciclo diario de velocidad del viento. Todas estas variables han sido interpoladas a una altura de 10 m sobre el suelo utilizando la rugosidad superficial del modelo y asumiendo condiciones neutras (perfil logarítmico de viento cerca de la superficie). Se muestra también en las figuras las isolíneas de la topografía considerada en el modelo.

Los resultados del modelo MM5 en el dominio más amplio (Figuras 3.31 a 3.39) muestran una variabilidad espacial del recurso eólico que depende de tres factores principales: distancia de la costa, relieve topográfico y latitud. Estos factores en su conjunto imponen una variabilidad significativa en la densidad de potencia eólica calculada, obteniéndose diferencias de hasta un factor ~10 o más en la zona de estudio.

Desde el sur de la III Región hacia el Sur las zonas costeras presentan una mayor disponibilidad del recurso eólico que los valles interiores. En particular, el viento sobre el mar costero es mayor que sobre el continente adyacente, con un máximo relativo mar afuera de la bahía de Coquimbo, frente a las costas de la IV Región y Sur de la III Región.

El relieve topográfico impone, en general, un mínimo del recurso eólico en el seno de los valles transversales. Este mínimo es especialmente evidente en los valles de los ríos Copiapó en la III Región, y Limarí en la IV Región. Los cordones de cerros transversales (estribaciones de la Cordillera de Los Andes), en cambio, presentan máximos relativos de viento, como por ejemplo en la zona entre las Regiones III y IV. Por último, la topografía impone también un aumento importante del recurso hacia el límite Este del país, asociado al relieve de la Cordillera de Los Andes. Se debe enfatizar que la resolución del modelo y la suavización de la topografía no permiten documentar las características locales de la circulación.

Latitudinalmente, los resultados del modelo muestran un incremento del viento en los valles centrales hacia el Sur del dominio de modelación. Este efecto es menos marcado en la costa, y tiene signo opuesto en las altas cumbres, debido a la menor altura que la Cordillera presenta hacia el Sur.

Los gráficos de amplitud del ciclo diario de viento en el dominio amplio de modelación (Figuras 3.37 a 3.39) muestran claramente la importancia del ciclo diurno en los vientos calculados en la zona centro-norte del país. La amplitud del ciclo diurno es mayor a partir de la IV Región hacia el Norte y presenta máximos relativos en la franja central de los valles transversales. El ciclo diario de la magnitud del viento en las zonas costeras resulta en el modelo menos marcado que en el interior de los valles.

Los resultados del modelo MM5 con mayor resolución (Figuras 3.22 a 3.30) permiten visualizar un mayor detalle de las zonas que podrían presentar un mayor potencial eólico, para el área comprendida entre las Regiones IV a VII. En la zona costera se destacan las siguientes zonas: litoral de la IV Región entre Punta Lengua de Vaca y Río Choapa, zona entre Los Vilos y Pichidangui, entorno de Punta Curaumilla, litoral de la VI Región en la zona de Pichilemu. Entre los cordones transversales que el modelo sugiere con buena disponibilidad relativa de viento, se destaca la zona entre 31 y 31.5 S, al norte de Illapel (la localidad de Punta del Viento y el cerro homónimo sugieren también vientos altos en la zona).

Finalmente, se ha ajustado distribuciones de Weibull a los resultados del modelo MM5. Las figuras 3.40 y 3.41 muestran la distribución espacial de los parámetros de escala y de forma de las distribuciones de Weibull ajustadas a los resultados del modelo para los periodos Septiembre-Octubre y Mayo-Julio del 2002. Como se describió en la Sección 3.2, sin embargo, estas distribuciones estadísticas pueden ser muy distintas a las derivadas en estaciones específicas, por la mayor variabilidad que los modelos presentaron, con respecto a las mediciones. Los mapas de las figuras 3.40 y 3.41 pueden, por tanto, considerarse sólo como una aproximación a las distribuciones de estaciones bien expuestas a los flujos de viento de escala sinóptica.

3.3.3 Apreciación general de resultados de modelos

De los resultados de la sección 3.2 se desprende que en varios casos la comparación directa de las observaciones disponibles y los resultados de los modelos para los mismos puntos es insatisfactoria. Especialmente en estaciones ubicadas al interior de valles, tanto la variabilidad interdiaria como los ciclos diarios promedios de los modelos y las observaciones podían diferir en forma significativa. Parte de estas discrepancias se debe probablemente a limitaciones de la resolución espacial de los modelos y a la exposición local de las estaciones. En estaciones bien expuestas al régimen sinóptico de vientos, como las de la costa de la IV Región, o las estaciones de mayor altura, la comparación entre modelos y observaciones es mucho más favorable.

En cuanto a patrones espaciales de los campos de viento, los dos modelos producen un régimen de viento oceánico similar, y que se compara favorablemente con el patrón de vientos sobre el mar derivado de observaciones satelitales. Asimismo, el efecto general del relieve (aceleración sobre cordones transversales y velocidades más bajas en el seno de valles) es similar en ambos modelos. Aunque se dispone de menos observaciones in-situ para confirmar estos efectos, los resultados de los modelos parecen físicamente plausibles. Sin embargo, incluso al interior de valles puede existir zonas de mayor potencia eólico (Estación Puclaro, por ejemplo), que estos modelos no pueden detectar principalmente por problemas de resolución.

Dado lo anterior parece poco apropiado utilizar estos resultados de modelos para tener una evaluación cuantitativa del recurso eólico en la zona en estudio, pero sí parece correcto utilizar sus resultados a modo referencial para identificar algunas zonas que podrían presentar un potencial eólico mayor, el cual debe confirmarse siempre con mediciones in-situ. Por otro lado, es posible que zonas que en estos resultados parecen

poco favorables a la explotación del recurso eólico, podrían incluir áreas en que él es significativamente más alto.

Por último debe notarse que la calidad de los resultados de modelos no es un parámetro absoluto ni constante. Esta depende del uso que se quiera dar a los resultados. Más aún, un mismo modelo puede entregar resultados mejores, si se mejora la calidad y cantidad de sus datos de entrada, si se aumenta la resolución horizontal y vertical en sus cálculos, si se mejora la definición de parámetros requeridos por el modelo (rugosidad superficial, tipos de suelo, etc), etc. Esto hace que la modelación meteorológica esté compuesta por un ciclo continuo de aplicación del modelo, verificación de resultados, mejora del modelo y datos de entrada, y nuevas aplicaciones del modelo. En este sentido los resultados presentados aquí son sólo el primer ciclo de la aplicación de estos modelos, el cual idealmente debiera continuar en el futuro con la introducción de mejoras que tendiesen a corregir los aspectos deficientes de los resultados.

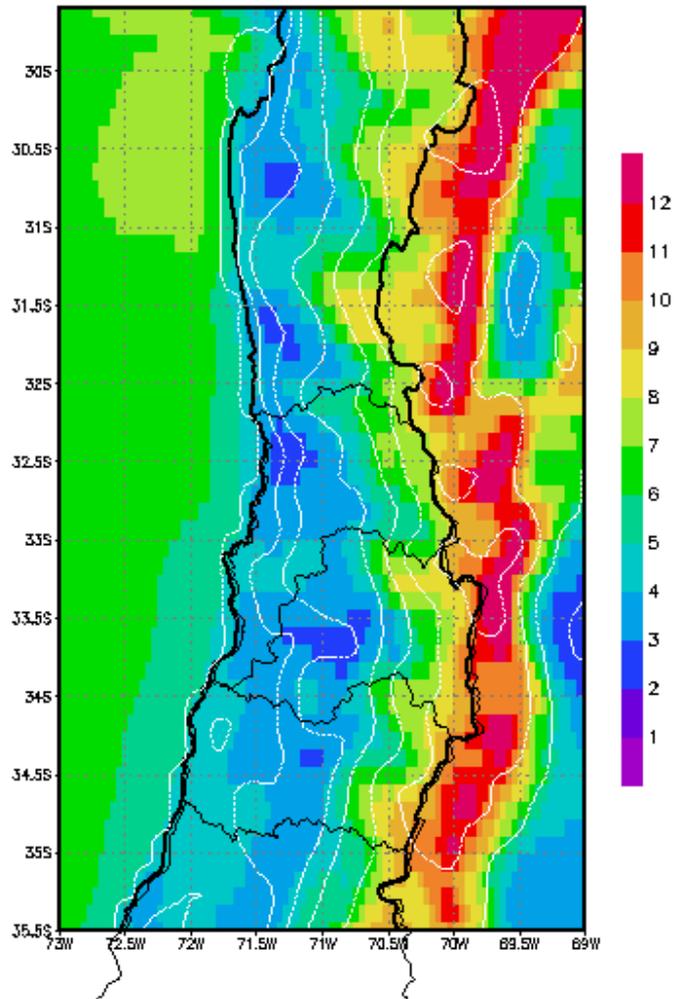


Figura 3.22 Magnitud de viento a 10 m sobre el suelo para periodo completo de simulación(Modelo MM5, Dominio 3). Líneas indican contornos de terreno. Colores indican magnitud de viento en (m/s) (escala a la derecha).

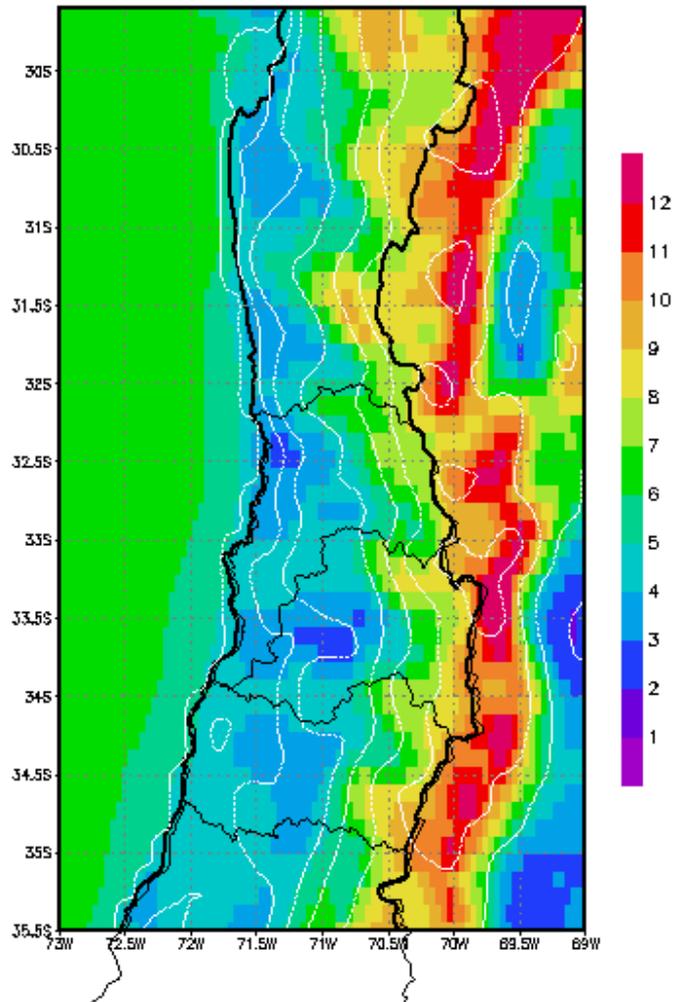


Figura 3.23 Magnitud de viento a 10 m sobre el suelo para periodo INVIERNO de simulación (Modelo MM5, Dominio 3). Líneas indican contornos de terreno. Colores indican magnitud de viento en (m/s) (escala a la derecha).

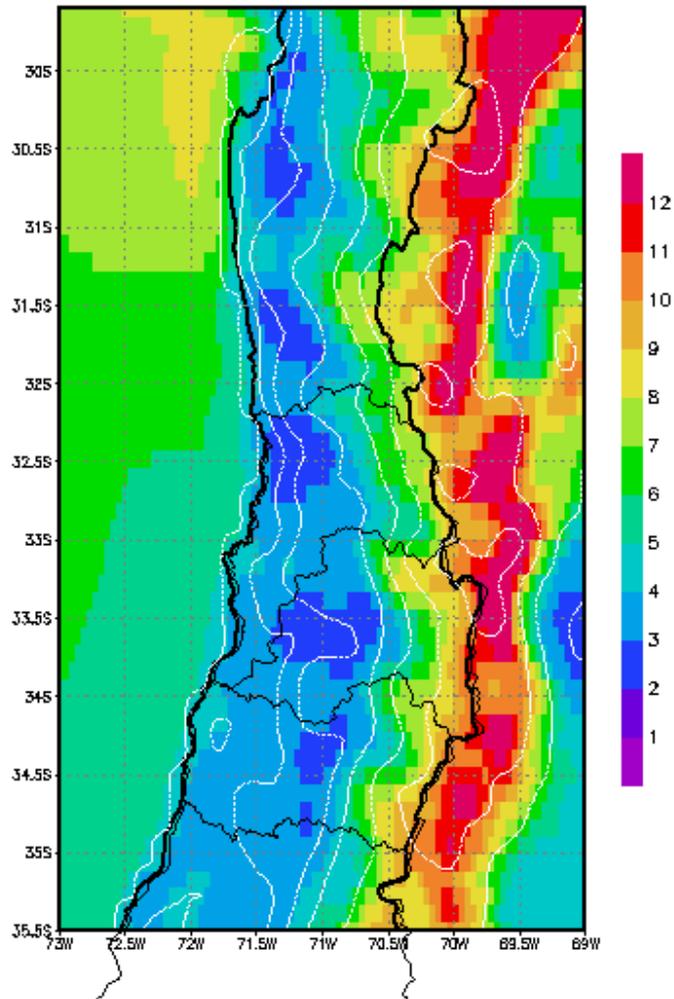


Figura 3.24 Magnitud de viento a 10 m sobre el suelo para periodo PRIMAVERA de simulación (Modelo MM5, Dominio 3). Líneas indican contornos de terreno. Colores indican magnitud de viento en (m/s) (escala a la derecha).

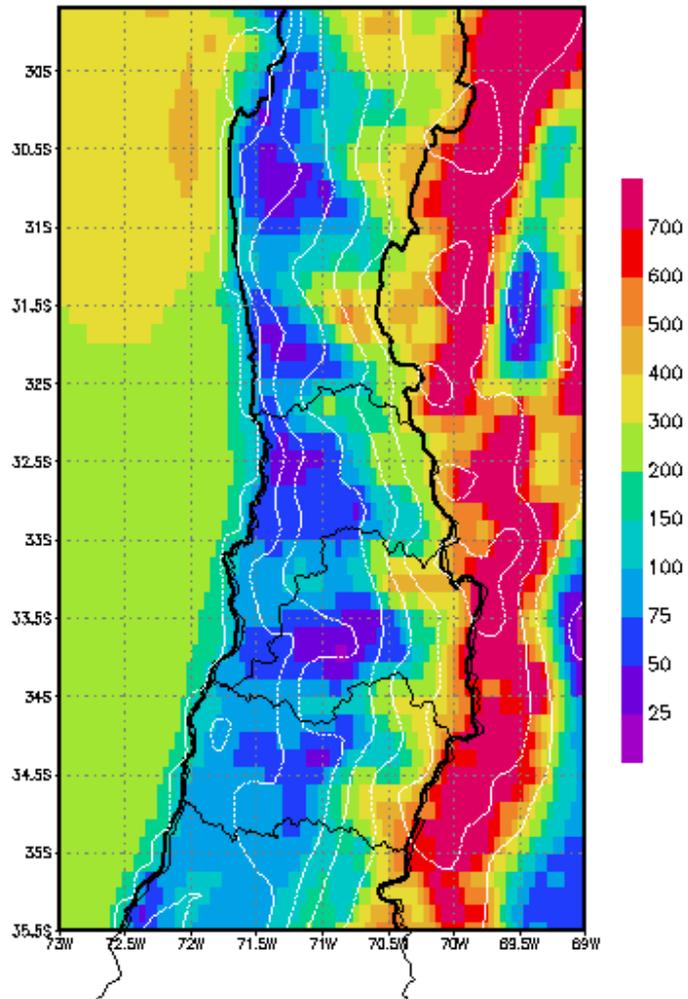


Figura 3.25 DPE a 10 m sobre el suelo para periodo completo de simulación (Modelo MM5, Dominio 3). Líneas indican contornos de terreno. Colores indican DPE en (W/m²) (escala a la derecha).

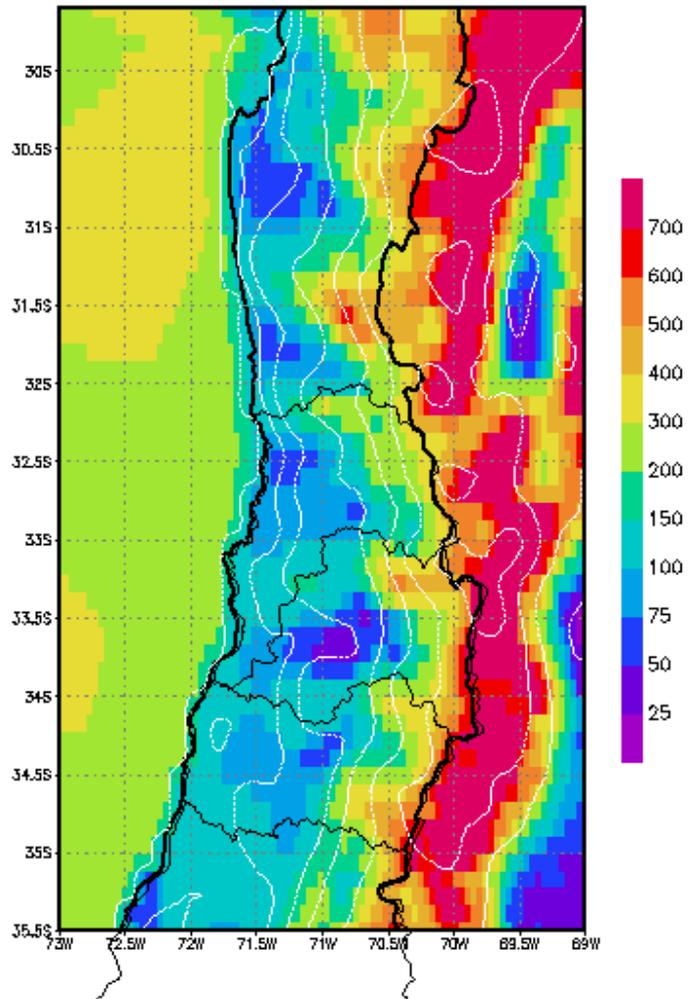


Figura 3.26 DPE a 10 m sobre el suelo para periodo Invierno de simulación (Modelo MM5, Dominio 3). Líneas indican contornos de terreno. Colores indican DPE en (W/m2) (escala a la derecha).

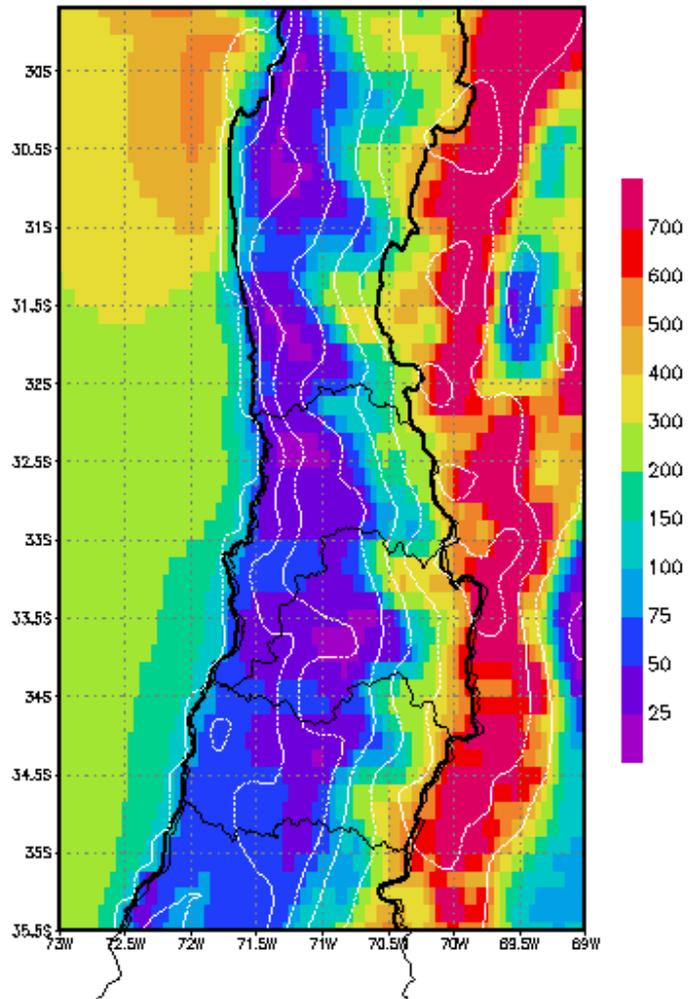


Figura 3.27 DPE a 10 m sobre el suelo para periodo Primavera de simulación (Modelo MM5, Dominio 3). Líneas indican contornos de terreno. Colores indican DPE en (W/m²) (escala a la derecha).

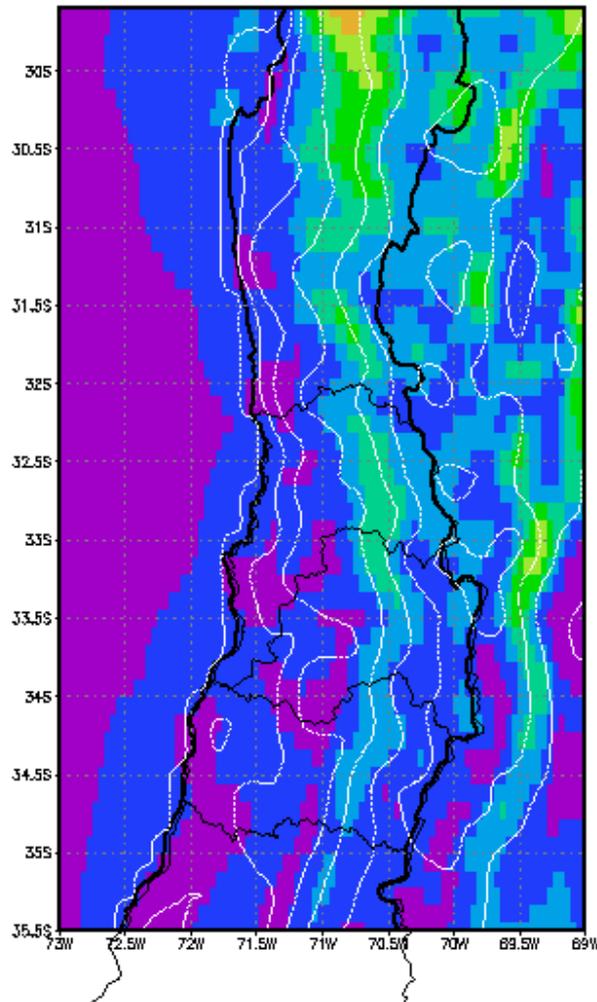


Figura 3.28 Amplitud del ciclo diario de viento a 10 m sobre el suelo para periodo completo de simulación (Modelo MM5, Dominio 3). Líneas indican contornos de terreno. Colores indican amplitud en (m/s) (escala a la derecha).

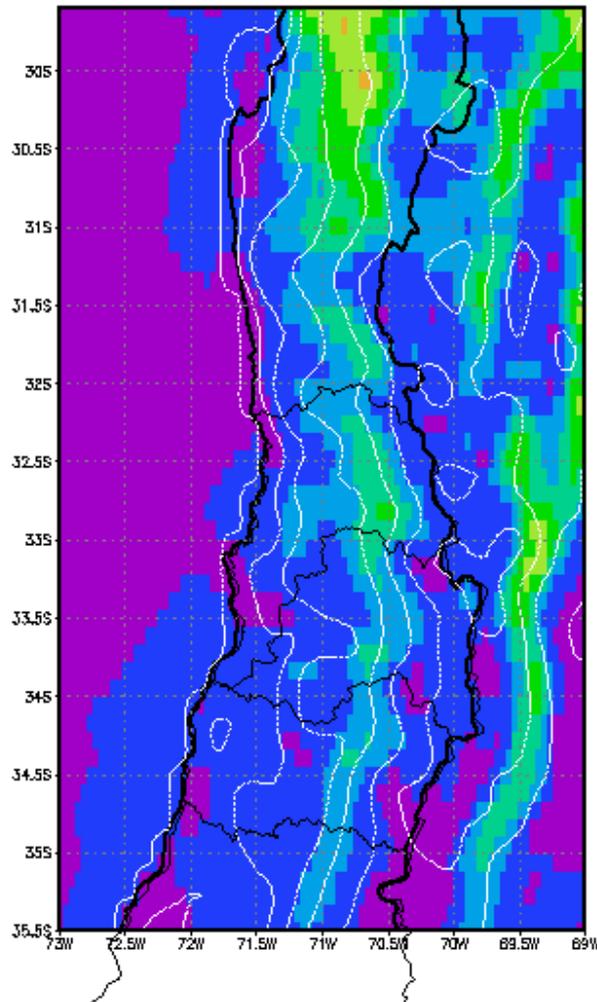


Figura 3.29 Amplitud del ciclo diario de viento a 10 m sobre el suelo para periodo INVIERNO de simulación (Modelo MM5, Dominio 3). Líneas indican contornos de terreno. Colores indican amplitud en (m/s) (escala a la derecha).

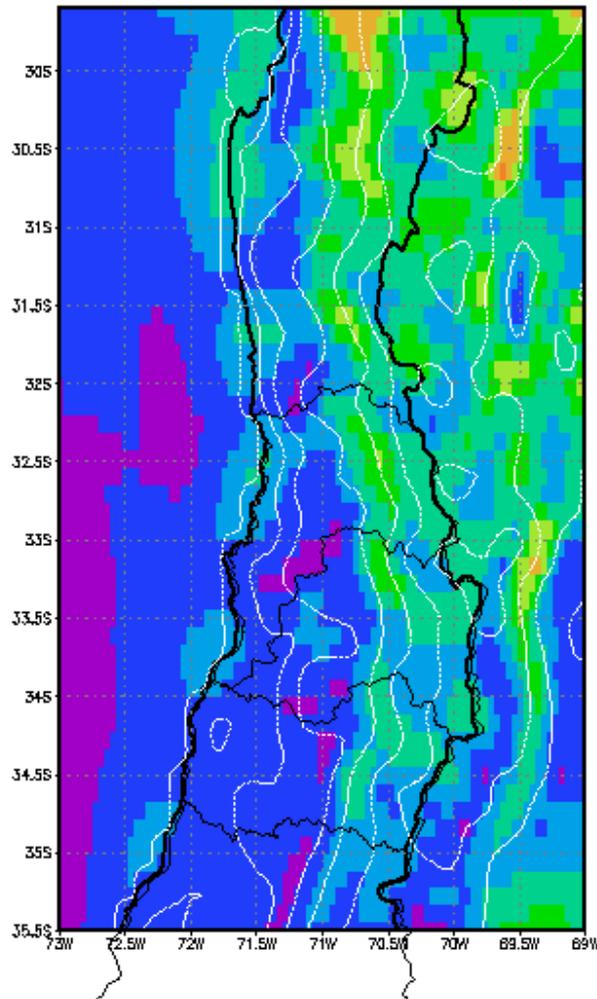


Figura 3.30 Amplitud del ciclo diario de viento a 10 m sobre el suelo para periodo PRIMAVERA de simulación (Modelo MM5, Dominio 3). Líneas indican contornos de terreno. Colores indican amplitud en (m/s) (escala a la derecha).

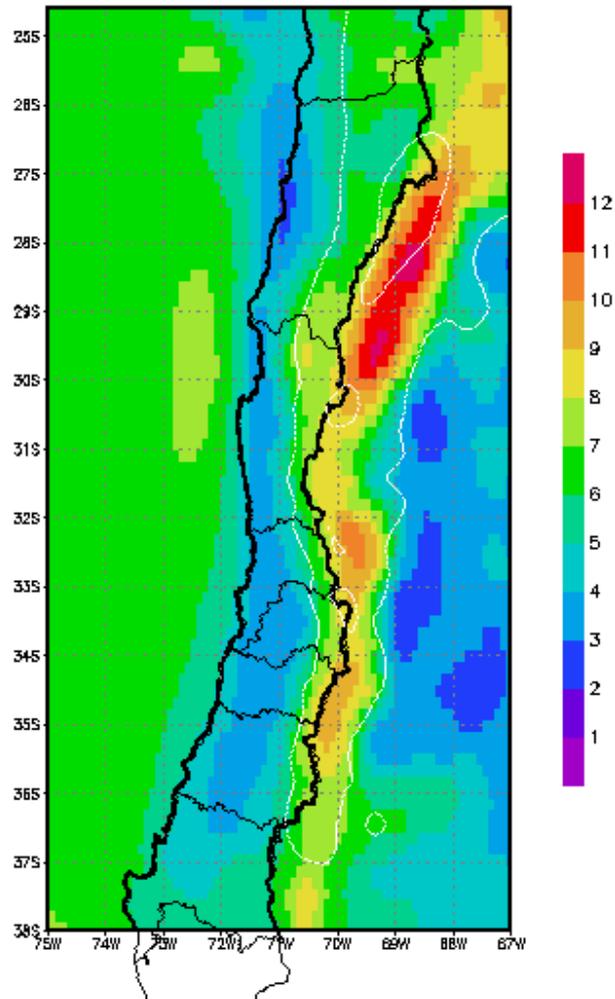


Figura 3.31 Magnitud del viento a 10 m sobre el suelo para periodo completo de simulación (Modelo MM5, Dominio 2). Líneas indican contornos de terreno. Colores indican magnitud en (m/s) (escala a la derecha).

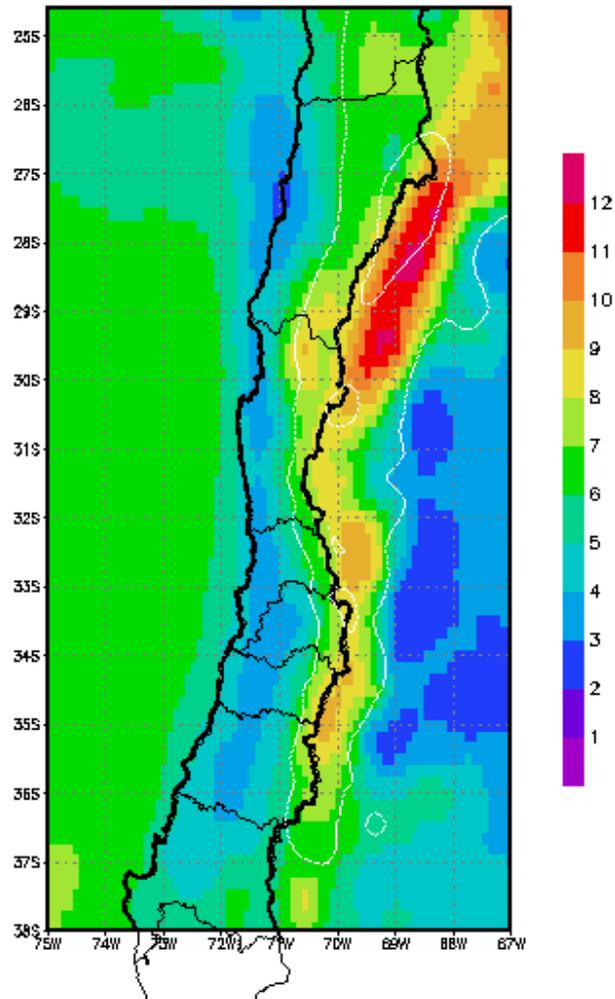


Figura 3.32 Magnitud del viento a 10 m sobre el suelo para periodo INVIERNO de simulación (Modelo MM5, Dominio 2). Líneas indican contornos de terreno. Colores indican magnitud en (m/s) (escala a la derecha).

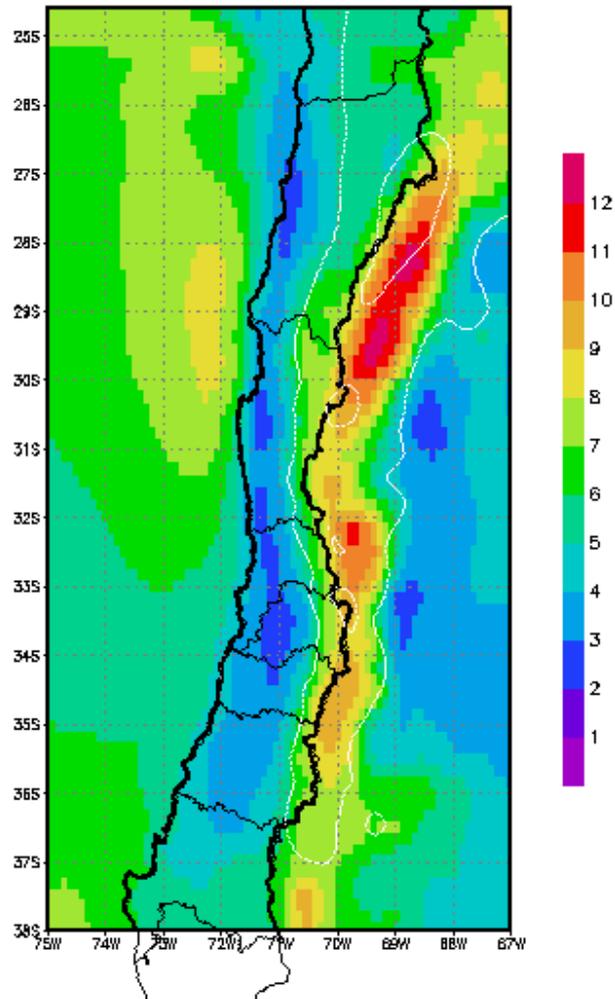


Figura 3.33 Magnitud del viento a 10 m sobre el suelo para periodo PRIMAVERA de simulación (Modelo MM5, Dominio 2). Líneas indican contornos de terreno. Colores indican magnitud en (m/s) (escala a la derecha).

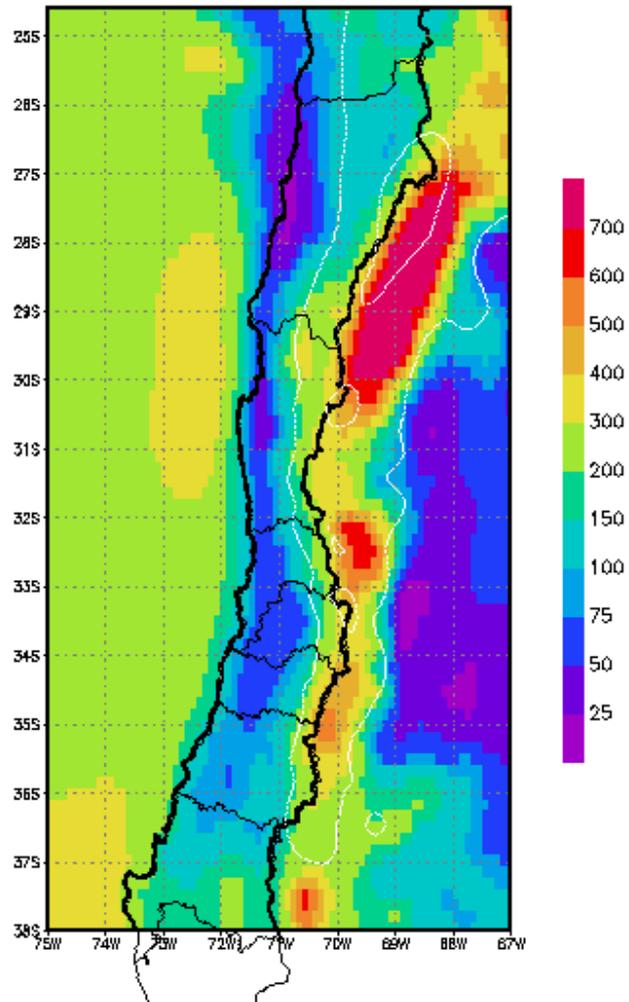


Figura 3.34 DPE a 10 m sobre el suelo para periodo completo de simulación (Modelo MM5, Dominio 2). Líneas indican contornos de terreno. Colores indican DPE en (W/m²) (escala a la derecha).

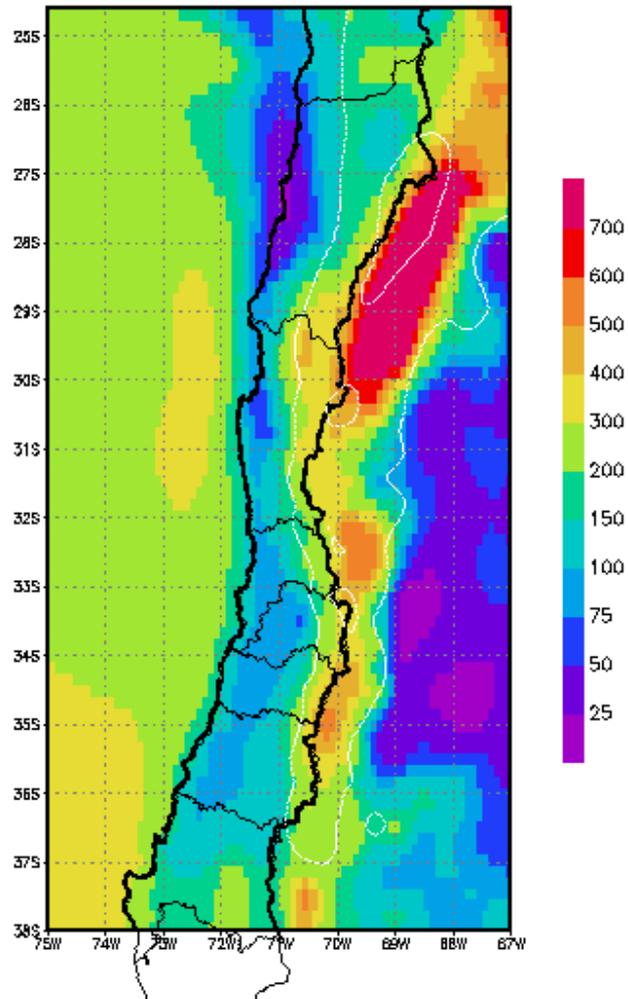


Figura 3.35 DPE a 10 m sobre el suelo para periodo INVIERNO de simulación (Modelo MM5, Dominio 2). Líneas indican contornos de terreno. Colores indican DPE en (W/m²) (escala a la derecha).

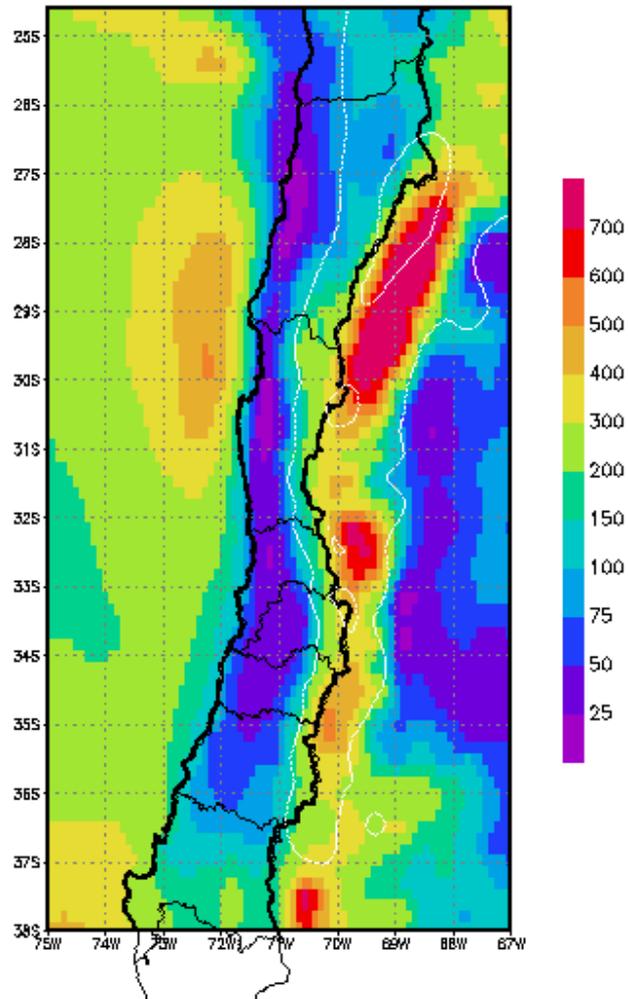


Figura 3.36 DPE a 10 m sobre el suelo para periodo PRIMAVERA de simulación (Modelo MM5, Dominio 2). Líneas indican contornos de terreno. Colores indican DPE en (W/m²) (escala a la derecha).

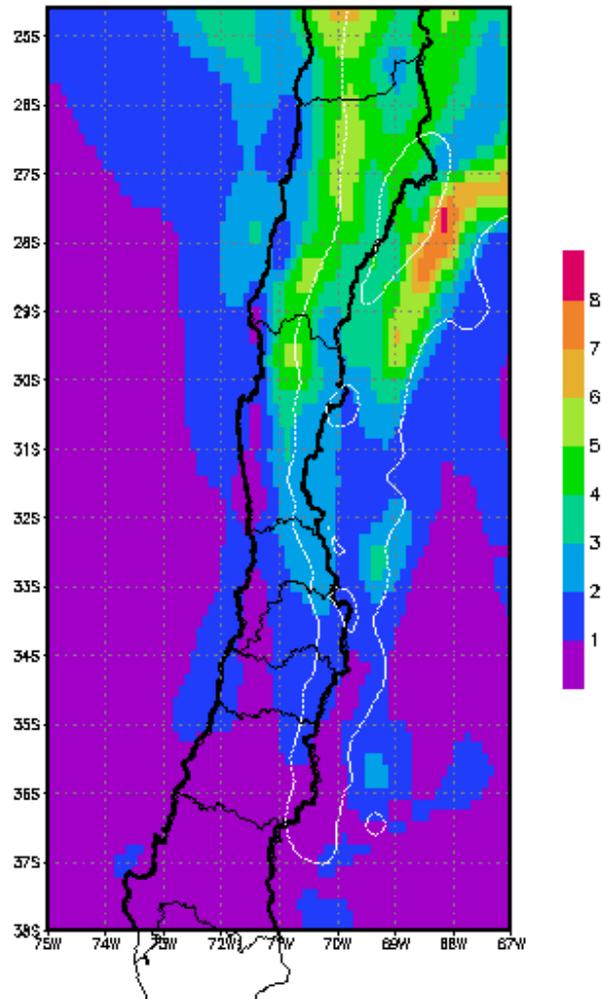


Figura 3.37 Amplitud del ciclo diario de viento a 10 m sobre el suelo para periodo completo de simulación (Modelo MM5, Dominio 2). Líneas indican contornos de terreno. Colores indican amplitud en (m/s) (escala a la derecha).

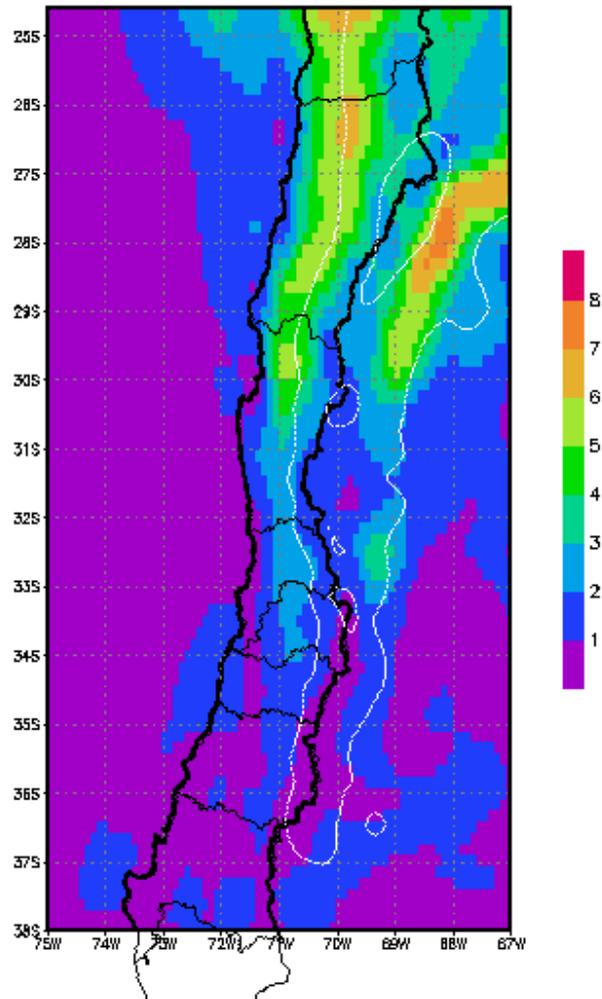


Figura 3.38 Amplitud del ciclo diario de viento a 10 m sobre el suelo para periodo INVIERNO de simulación (Modelo MM5, Dominio 2). Líneas indican contornos de terreno. Colores indican amplitud en (m/s) (escala a la derecha).

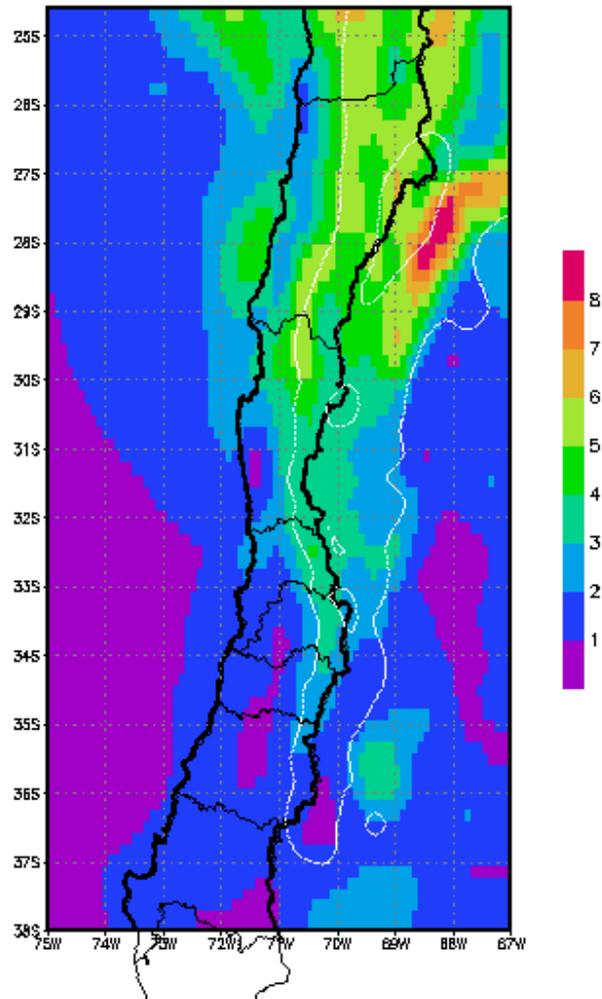


Figura 3.39 Amplitud del ciclo diario de viento a 10 m sobre el suelo para periodo PRIMAVERA de simulación (Modelo MM5, Dominio 2). Líneas indican contornos de terreno. Colores indican amplitud en (m/s) (escala a la derecha).

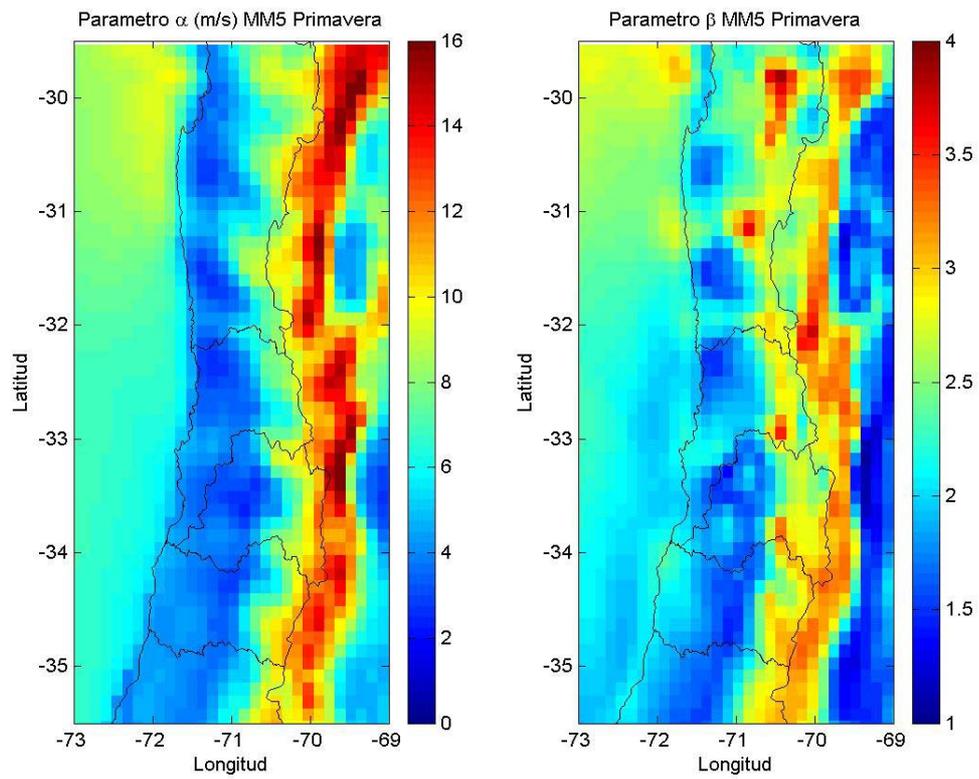


Figura 3.40. Parámetros de distribución de Weibull ajustados sobre resultados de modelo MM5 (Periodo Septiembre-Octubre 2002).

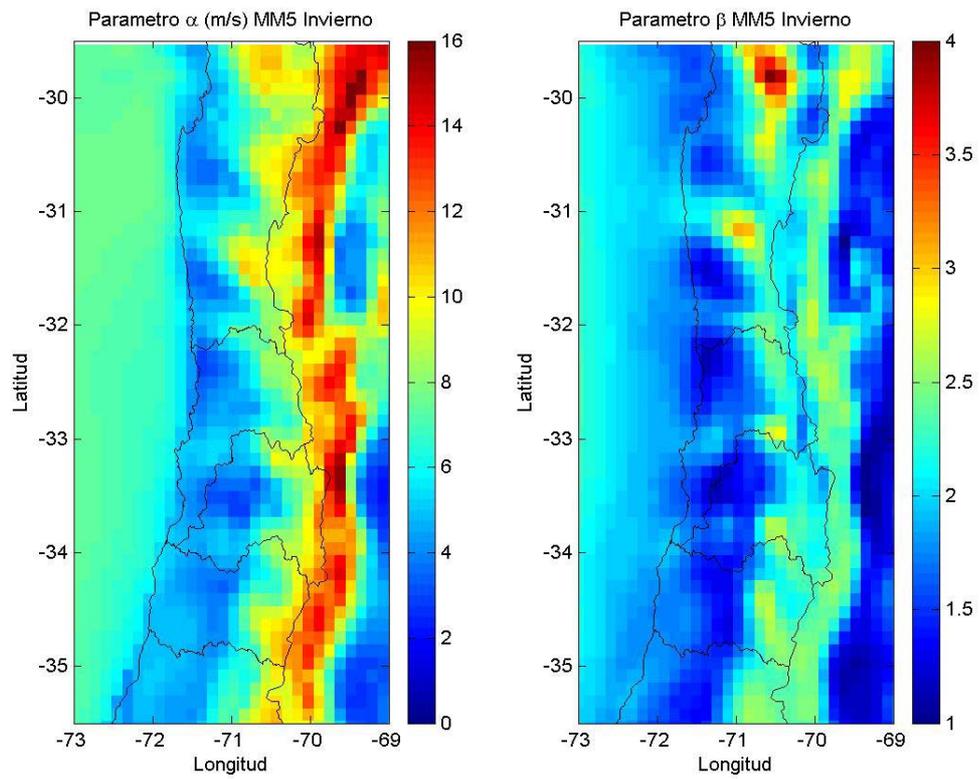


Figura 3.41. Parámetros de distribución de Weibull ajustados sobre resultados de modelo MM5 (Periodo Mayo-Julio 2002).

4. Programa priorizado de exploración del recurso eólico

Corresponde en este capítulo utilizar la información de modelos, datos medidos y observaciones satelitales descritas en los capítulos previos, para sugerir un programa de actividades de exploración del recurso eólico en el Centro y Norte del país. La parte principal de este programa es la identificación de zonas que, de acuerdo a los datos disponibles y resultados de modelos, parecen tener alta disponibilidad del recurso. Adicionalmente el programa enumera las actividades de medición, modelación e investigación que deberían abordarse para tener un conocimiento más completo del recurso eólico en Chile.

4.1 Zonas de alta disponibilidad eólica

Los resultados del estudio sugieren distinguir los siguientes tipos de zonas con alta disponibilidad eólica:

a) Zonas costeras con buena exposición al régimen oceánico de vientos

Entre las zonas costeras de alta disponibilidad eólica, el presente estudio confirma los resultados de EOLO93, en el sentido que la costa de la V Región en torno a Punta Curaumilla, y la costa de la IV Región entre Punta Lengua de Vaca y Punta Amolanas, parecen presentar muy favorables condiciones de viento.

Los datos de DMC en Taltal y los vientos costeros derivados de información satelital sugieren también que la costa del sur de la II Región y del sur de la III Región podrían también ser de alto recurso eólico.

b) Cordones transversales de cerros y estribaciones de la Cordillera de los Andes

Estaciones como La Silla, Tololo son ejemplos de este tipo de zonas de mayor disponibilidad eólica. También los modelos sugieren la zona de Punta del Viento al norte de Illapel y el cordón de cerros entre las regiones III y IV como posibles áreas de alto potencial eólico.

c) Estaciones altas en la Cordillera de Los Andes ubicadas en lugares de buena exposición al régimen de viento de altura

Estaciones como las de Cristo Redentor en la V Región, o Indio en la IV Región son ejemplos de este tipo de zonas. Los modelos indican a mayor altura en la cordillera es dable esperar mayores niveles del recurso eólico.

d) Estaciones en lugares específicos de valles centrales, en que los vientos se aceleran por efectos locales

Si bien es cierto que en los valles centrales los vientos medidos son más bien bajos, algunas estaciones presentan velocidades más altas, como Puclaro en el valle del Elqui o Chagres en el valle del Aconcagua (aunque siempre menores que las observadas en las

estaciones de las categorías previas). Es posible, entonces, que en zonas particulares de valles centrales se alcancen potenciales eólicos mayores.

Se debe tener presente que la individualización de zonas hecha aquí está necesariamente limitada principalmente por la falta de datos en una buena fracción de la región de estudio, por el tipo de estaciones analizadas (que no fueron instaladas para evaluar el recurso eólico) y por los errores de los modelos meteorológicos empleados (especialmente en cuanto a la resolución espacial de ellos). De este modo, es muy posible que zonas específicas de alta disponibilidad del recurso han sido ignoradas.

4.2 Zonas de baja disponibilidad eólica

Los valles transversales aparecen, de acuerdo a los datos disponibles, como lugares de bajas velocidades de viento (mediciones en los valles del Copiapó, Elqui, Aconcagua). También los interiores de bahías y ensenadas parecen ser lugares desfavorables para el aprovechamiento eólico (estaciones en la zona de Quintero-Ventanas y en La Serena).

Por supuesto, las mismas limitaciones indicadas para las zonas de alta disponibilidad eólica son aplicables aquí. Es posible entonces que condiciones locales dentro de estas áreas de viento débil hagan que existan puntos de mayor disponibilidad eólica inmersos en ellas.

4.3 Actividades de medición del recurso eólico

Parece conveniente aquí distinguir tres tipos de mediciones que debieran realizarse con el objeto de mejorar la información acerca de la distribución del recurso eólico en la zona en estudio. Las primeras se orientan a la confirmación y exploración del recurso eólico en zonas que parecen atractivas, pero que cuentan con nula o muy escasa información de vientos medidos in-situ. Las segundas se orientan a precisar mejor la disponibilidad del recurso en zonas que se sabe con mayor certeza que el recurso eólico es alto. Las últimas son campañas intensivas de medición destinadas a uso en el desarrollo, validación o verificación de modelos, o bien enfocadas a la investigación de algún aspecto particular del recurso eólico que no se conoce.

Se debe tener presente que las recomendaciones de mediciones aquí realizadas han sido definida con el criterio de identificar y/o confirmar zonas de elevado potencial del recurso eólico. Sin embargo, para fines de generación de energía eléctrica conectada a red los criterios anteriores deben ser complementados con otros que den cuenta de la viabilidad técnico-económica de ese tipo de proyectos, tales como, existencia de infraestructura de caminos y cercanía a líneas transporte de energía y subestaciones eléctricas. Un análisis de ese tipo, el cual está fuera de los alcances del presente estudio, podría llevar a una priorización de campañas de medición distinta a la aquí recomendada.

4.3.1 Mediciones de exploración y confirmación

Las zonas del sur de la II Región, sur de la III Región (costa y cerros interiores) y la zona de Punta del viento al norte de Illapel en la IV Región parecen como las más apropiadas para realizar mediciones de tipo exploratorio. En estas zonas los datos de viento que se pudo recopilar en este estudio fueron nulos o escasos, por lo que las mediciones deben orientarse a expandir la base de datos en ellas. También debería realizarse este tipo de mediciones en otros lugares que no cuentan con mediciones in-situ, y que podrían tener un interés especial desde el punto de vista de la explotación del recurso. Las observaciones y mediciones sugeridas son las siguientes

a) Verificación de niveles de viento (por ejemplo en Taltal)

Visita a terreno para confirmar que datos son representativos de condiciones de viento regional, o bien, estimar su representatividad. Visita corta con anemómetro de mano.

b) Mediciones de exploración

Programa de mediciones de viento con estaciones automáticas en mástiles ligeros de 10 m de alto. Se recomienda instalar un mínimo de 3 estaciones en cada zona, en lugares definidos principalmente con el objetivo de prospección eólica. Uno de los lugares debe proyectarse para al menos 1 año continuo de datos, mientras que los dos o más restantes pueden realizar mediciones de periodos menores (4 a 6 meses), y pueden cambiarse de ubicación, según sea necesario.

4.3.2 Mediciones de evaluación

Estas mediciones se orientan a mejorar el conocimiento de las condiciones particulares en una zona que ya se sabe cuenta con un potencial eólico atractivo. Por ejemplo, las zonas de Punta Curaumilla o de Punta Lengua de Vaca podrían caer en esta categoría.

En este caso la ubicación de la zona particular estará influenciada por factores adicionales a la disponibilidad del recurso eólico, los que deben ser considerados al momento de definir la zona a evaluar. Entre estos factores se puede mencionar la cercanía a la red del sistema interconectado de energía, el costo y uso del suelo, factores ambientales, etc.

Una vez definida la zona particular a investigar, se debe visitar para seleccionar los puntos de medición que sean representativos de las condiciones de viento que se explotarían finalmente, de llevarse a cabo el proyecto de aprovechamiento. En estos lugares se recomienda el levantamiento de al menos una torre de gran altura (30 m sobre el suelo o más), con instalación de sensores de viento a tres niveles o más. Idealmente uno o más de estos sensores debe ser de tipo ultrasónico tridimensional de alta frecuencia, de tal forma de caracterizar apropiadamente los niveles de turbulencia atmosférica. Se debe también incluir mediciones de temperatura a dos niveles o más, con el objeto de evaluar la dependencia del perfil vertical de viento con respecto a las condiciones de estabilidad térmica. Otras mediciones meteorológicas recomendadas son

radiación solar, humedad relativa, temperatura del suelo, flujos superficiales de calor sensible y calor latente. La altura de la torre principal debe estar en concordancia con la altura de las máquinas eólicas que se proyecta instalar finalmente.

Las mediciones antes descritas deben incluir además mediciones complementarias de viento en mástiles de 10 m en al menos 5 puntos dentro de la zona en estudio, de tal forma de conocer el campo de vientos del área de influencia del lugar estudiado.

Estas mediciones deben ser sometidas a un alto grado de control de calidad, pues sus datos son los que finalmente decidirán las condiciones de diseño del eventual proyecto de aprovechamiento. Se recomienda contratar en forma separada un equipo que realice las mediciones y otro equipo independiente que verifique continuamente la calidad de las mediciones y la validez de los resultados.

4.3.3 Campañas intensivas de medición

El desarrollo de un proyecto de aprovechamiento de energía eólica debe incluir necesariamente la aplicación de modelos meteorológicos apropiados. Incluso en el evento que el desarrollo de estos modelos no sea parte del proyecto (es decir, se recurra a modelos meteorológicos ya desarrollados), la validación de los modelos, sus condiciones de entrada y la verificación de sus resultados requerirá disponer de una base de datos más completa que la lograda con las actividades de medición descritas en 4.3.2. Se hace necesario entonces planificar y llevar a cabo campañas intensivas de mediciones meteorológicas de duración del orden de 10 días, en a lo menos 3 ocasiones distintas. Estas campañas incluirán la medición continua o semi-continua de perfiles verticales de viento, temperatura y humedad mediante alguna técnica apropiada como perfiladores acústicos, globos cautivos, radiosondas, etc. Además se reforzará en ellas las mediciones meteorológicas cerca del suelo (mástiles de 10 m) y se evaluará los balances energéticos e hídricos superficiales en al menos 1 punto. Para este caracterizará adecuadamente las características físicas relevantes del suelo y la vegetación en la zona de interés.

Otro tipo de campaña meteorológica necesaria es la que se oriente a conocer aspectos particulares del viento en ciertas zonas, que son de interés desde el punto de vista de la exploración y explotación del recurso. Por ejemplo, una interrogante que queda de este estudio es la representatividad que pueden tener estaciones ubicadas en la costa y a nivel del mar, con respecto a zonas cercanas pero ubicadas del orden de 1 a 10 km tierra adentro, o emplazadas sobre cerros o mesetas costeras. La variación del viento con la altura sobre el suelo en zonas particulares también puede ser estudiada con mediciones acotadas en el tiempo (antes de la instalación de la torre de gran envergadura propuesta en 4.3.2). Este tipo de interrogantes pueden ser resueltas mediante campañas meteorológicas específicas bien planificadas

4.4 Actividades de modelación del recurso eólico

Como se describió en el capítulo 3, existen en el país varios grupos que desarrollan y/o aplican modelos meteorológicos que podrían ser utilizados en la prospección eólica o en

el desarrollo y operación de proyectos de explotación eólica. Dentro de las actividades relacionadas con modelación meteorológica se recomienda incentivar las siguientes:

a) Validación de modelos

Es necesario comparar los resultados de los modelos con observaciones disponibles o con mediciones realizadas expresamente para este fin. Hay dos razones principales para esto. La primera es conocer los errores sistemáticos de los modelos. La segunda es mejorar los modelos en cuanto a los procesos físicos que ellos consideran o a las variables de entrada con que se alimentan.

b) Modelación de alta resolución

Los resultados de este estudio sugieren que la resolución espacial de 11 a 15 km es insuficiente para modelar los flujos en las condiciones de topografía compleja que caracterizan al país. Es necesario entonces aplicar y validar modelos a una resolución del orden de 1 km, ya sea en la forma de modelos de pronóstico o de diagnóstico. 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).

c) Modelación de pronóstico en tiempo real

La operación de un eventual proyecto de explotación del recurso eólico hará necesario contar con un modelo de pronóstico de corto plazo. Se hace necesario entonces incentivar desde ahora el desarrollo, aplicación y validación de modelos meteorológicos con capacidad de uso en tiempo real y de pronóstico de corto plazo de las condiciones de viento locales.

d) Modelación inversa

Usar las herramientas de modelación en modo inverso de modo de optimizar la localización de los sensores de monitoreo, en particular aquellos más costosos (sophisticados) y aquellos que se decida mantener en el tiempo ante una evaluación positiva de explotación eólica del lugar.

Hay que señalar que hoy se cuenta en Chile con herramientas de modelación como las descritas y con competencia científica y técnica para poder llevar a cabo estudios como los sugeridos. Entre los grupos activos en estos temas se cuenta:

- La Dirección Meteorológica de Chile usa en modo operacional para Chile central y el norte chico un modelo de pronóstico numérico (MM5), el que puede proveer una base de datos necesaria para evaluar de modo preliminar el potencial eólico en muchas regiones y entregar condiciones de borde para un modelo de circulación local. El mismo modelo o equivalentes pueden ser implementados en modo de interpolación dinámica como el ilustrado en este

estudio de manera de entregar campos de alta resolución (1 o 2 km de paso horizontal) para zonas específicas tanto por la Dirección Meteorológica como por instituciones académicas. Se debe hacer notar no obstante que la interpolación dinámica de campos regionales tiene un límite en una resolución de aproximadamente un par de kilómetros pues las parametrizaciones físicas de tales modelos no están diseñadas para escalas inferiores llevando a representaciones no físicas de fenómenos.

- En el Centro de Estudios de Zonas Áridas (CEAZA, Universidad de la Serena) así como en la Universidad de La Frontera se encuentra implementado un modelo de circulación local (KAMM) que podría usarse, como se indicó, de modo acoplado a modelos regionales. Dicho modelo ha sido usado antes para evaluar el potencial eólico en zonas de topografía compleja en Europa por el mismo grupo de investigadores con el que coopera CEAZA en su estudio del ciclo hidrológico de la IV región.
- En el Departamento de Geofísica se cuenta con especialistas en procesos de capa límite, modelación meteorológica de mesoescala y con una vasta experiencia de mediciones de campo.
- En el Centro de Modelamiento Matemático (CMM) de la Universidad de Chile se tiene experiencia en modelación inversa y en uso de modelos meteorológicos de gran escala.
- En el Centro Nacional de Medio Ambiente (CENMA) hay gran experiencia en la operación de redes meteorológicas complejas

4.5 Actividades de investigación

Tanto los resultados de modelos utilizados en este estudio, como los vientos sobre el mar derivados de observaciones satelitales indican la existencia de un chorro costero frente a las costas del centro del país. Evidentemente este chorro costero está relacionado con las zonas costeras identificadas como de gran disponibilidad eólica. Se requiere, por tanto, promover estudios científicos que investiguen los factores que controlan la intensidad y ubicación de este chorro, así como su variabilidad de corto, mediano y largo plazo. Si bien las máximas velocidades parecen darse algunos kilómetros costa afuera, es necesario también relacionar cuantitativamente éstas con las medidas a lo largo de la costa.

Otros estudios han mostrado la existencia de un chorro de viento Norte en altura, y que se percibe en ocasiones en estaciones altas ubicadas en cerros o en los faldeos de la cordillera de los Andes. Por tanto, también interesaría incentivar la investigación de este chorro y su influencia en el campo de vientos superficiales. Por último, un estudio de las condicionantes topográficas y térmicas que dan origen a los vientos en los valles centrales puede ayudar a identificar y caracterizar mejor aquellas zonas de valles que pueden presentar una mayor disponibilidad del recurso viento.

5. Conclusiones

En este estudio, para realizar una evaluación preliminar del potencial eólico de Chile central y norte, se consideró, por una parte, los resultados o la aplicación de modelos numéricos de la circulación y, por otra parte, observaciones registradas en más de un centenar de estaciones y datos de viento sobre el mar derivados de observaciones satelitales.

En cuanto a análisis de datos medidos en estaciones anemométricas, el presente estudio partió sobre la base de los resultados del estudio EOLO93 que tenían relación con estaciones ubicadas entre la III y V Regiones (tanto para estaciones analizadas en aquel proyecto, como para resultados de estudios previos a él). Adicionalmente, este estudio recopiló y analizó un total de 58 estaciones con datos a nivel horario, más 9 estaciones de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) que fueron analizados por profesionales de esa institución. De este modo, el presente informe ha reunido información eólica para un total de 129 estaciones en la región de interés. A pesar del alto número de estaciones, su distribución espacial es muy inhomogénea, de tal modo que amplias zonas quedan sin ninguna información de vientos medidos in-situ. Por otro lado, otras zonas específicas, como algunos de los valles transversales, reúnen un alto número de estaciones muy cercanas entre sí. Sin embargo, muchas de estas estaciones han sido instaladas con propósitos distintos de la evaluación de potencial eólico, de modo que sus resultados no son necesariamente óptimos desde este punto de vista. Por ejemplo, un gran número de estaciones en la III y V Regiones corresponde a estaciones de redes de monitoreo de calidad del aire, ubicadas en zonas con problemas de contaminación atmosférica. Por tanto, estas estaciones han sido ubicadas precisamente en lugares con poco viento. Es por esto que en este estudio se ha pretendido utilizar los datos recopilados para identificar zonas de mayor potencial eólico, pero existe la posibilidad de que en zonas en que estos datos no son auspiciosos existan, sin embargo, lugares con potencial eólico alto.

Las estaciones recopiladas muestran que existen lugares que poseen niveles de viento que podrían ser aprovechables desde el punto de vista eólico. En cuanto a velocidades medias de viento a 10 m sobre la superficie, los mayores valores observados corresponden a las estaciones de Punta Curaumilla, Cristo Redentor, La Silla, Punta Cerro de Arena, Taltal, Punta Lengua de Vaca, Punta de Toro y Cerro Tololo. Todas las anteriores presentan velocidades medias mayores o iguales a 5 m/s (se omiten algunas estaciones analizadas en estudios previos al proyecto EOLO93, las que pueden verse en Tabla 2.11). En cuanto a densidad de potencia eólica media a 10 m las estaciones con más de 150 W/m² son las de Punta Curaumilla, Cristo Redentor, La Silla, Punta Cerro de Arena, Punta Lengua de Vaca, Cerro Tololo, Punta de Toro y Taltal (se omiten algunas estaciones analizadas en estudios previos al proyecto EOLO93, las que pueden verse en Tabla 2.12). Estos lugares pueden clasificarse en tres tipos: zonas costeras de buena exposición a flujos oceánicos, cerros y zonas de altura en la Cordillera de Los Andes.

El proyecto calculó también factores de utilización para máquinas eólicas de 660, 1500 y 2000 kW de potencia nominal, y alturas de ejes entre 45 y 78 m sobre el suelo. Estos cálculos fueron hechos para las 58 estaciones recopiladas a nivel horario y las 9 estaciones de la DMC. Factores de utilización alrededor de 20% o más fueron encontrados para las estaciones de Taltal, Lengua de Vaca, Puclaro y El Indio. Se debe notar que estaciones procesadas en el proyecto EOLO93 como las de Punta Curaumilla, Cristo Redentor, Punta Cerro de Arena, Punta de Toro, La Silla también probablemente tendrían factores de utilización altos, pero éstos no fueron calculados para estas máquinas eólicas específicas.

Los datos de viento sobre el mar derivados de observaciones satelitales permitieron tener una idea acerca de las magnitudes y la variabilidad de los vientos costeros. Los resultados muestran máximos locales de velocidad en el sur de la II Región, en el sur de la III Región, en la zona de Punta Lengua de Vaca en la IV Región y al sur de la V y VI Regiones. En todas estas zonas hay al menos una estación que efectivamente muestra altos niveles de viento, excepto la zona sur de la III Región, sobre la cual no fue posible recopilar ninguna información de viento medido in-situ.

El análisis de los resultados de los dos modelos meteorológicos considerados en el estudio entregó una visión más global del recurso eólico en la zona de estudio. Las velocidades medias de viento modeladas parecen controladas por la topografía, la distancia desde la costa y la latitud. Los dos modelos muestran una zona de máximos vientos frente a las costas de Chile central, los que se traducen en altas velocidades a lo largo de la costa en las regiones IV al sur. En particular se distinguen las zonas costeras de la IV Región entre Lengua de Vaca y Río Choapa, la zona entre Los Vilos y Pichidangui, el entorno de Punta Curaumilla en la V Región, y el litoral de la VI Región en la zona de Pichilemu. Los modelos también muestran mayores velocidades en las estribaciones transversales de la Cordillera de Los Andes, como por ejemplo en la zona entre las Regiones III y IV, o la zona de Punta del Viento al norte de Illapel en la IV Región. Por último, los modelos calculan también mayores velocidades en las zonas altas de la Cordillera de Los Andes. Debe enfatizarse que la baja resolución horizontal de los modelos considerados (entre 11 km y 45 km) limita su capacidad de predicción en zonas de topografía compleja como la considerada en este estudio. Por ejemplo, la comparación efectuada entre observaciones y resultados de modelos sugiere que efectos como la reducción del viento al interior de valles no son capturados por estos modelos. De esta forma, se ha concluido que no parece apropiado utilizar estos resultados de modelo en la evaluación cuantitativa del recurso eólico. No obstante lo anterior, los modelos producen ciertos patrones espaciales del campo de viento que se comparan favorablemente con observaciones disponibles, como por ejemplo la existencia de un jet costero frente a las costas de Chile central. Asimismo, parecen razonables las aceleraciones del campo de viento que ambos modelos determinan sobre los cordones de cerros transversales. Por lo tanto, sí parece apropiado utilizar estos resultados de modelos con el objeto de sugerir zonas con posible potencial eólico alto, las que deben ser verificadas con mediciones in-situ.

Entre las limitaciones de los datos utilizados en este estudio ya se ha mencionado la distribución y representatividad de las estaciones de medición de vientos. Se debe agregar aquí la falta de información acerca de la variación de los vientos con la altura sobre la superficie. La validez de los perfiles logarítmicos utilizados aquí para la extrapolación vertical del viento es muy incierta, especialmente considerando las condiciones de topografía compleja de muchas zonas. Más aún, se ha mostrado mediante un análisis de sensibilidad que las potencias generables pueden cambiar entre $\pm 20\%$ si la rugosidad superficial varía en un orden de magnitud. Dado que la estimación de la rugosidad superficial es un procedimiento casi subjetivo (en la medida que no se disponga datos de viento y temperatura a varias alturas), esta sensibilidad de los resultados es muy importante.

Finalmente, el estudio ha concluido con la definición esquemática de actividades recomendadas para continuar y mejorar la exploración del recurso eólico en la región en estudio. Se ha identificado zonas de alta disponibilidad, basadas en los datos de viento medidos, los datos de observaciones satelitales y los resultados de los modelos analizados. Se ha descrito los tipos de mediciones meteorológicas que se recomienda realizar en las distintas zonas, y se ha indicado actividades de modelación e investigación que se recomienda impulsar para un mejor conocimiento del recurso eólico.

Referencias

- CENMA, 2001. Diagnóstico integral de la contaminación atmosférica en la macrozona central de Chile. Informe Final [CONAMA, Obispo Donoso 6, Providencia, Santiago, Chile]
- CIMM, 1999. Diagnóstico de la calidad del aire III Región. Informe Final preparado para el Ministerio de Minería.
- 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.
- Fiedler, G., F. Fiedler, 1991: Simulation of unstationary wind and temperature fields over complex terrain and comparison with observations. *Contrib. Phys. Atmos.*, 64, 27-48.
- Frank, H. P., y L. Landberg, 1997: Modelling the wind climate of Ireland. *Boundary-Layer Meteorology*, 85, 359-378.
- 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, Apendice 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.
- Garreaud, R. y J. Rutllant, 2003: Coastal lows along the subtropical west coast of South America: Numerical simulation of a typical case. *Monthly Weather Review*, 131, 891-908.
- 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 de Ingeniero Civil Químico, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

Kalthoff, N., I. Bischoff-Gauss, M. Fiebig-Wittmaack, F. Fiedler, J. Thurauf, E. Novoa, C. Pizarro, R. Castillo, L. Gallardo, R. Rondanelli, M. Kohler, 2002: Mesoscale wind regimes in Chile at 30 S. *Journal of Applied Meteorology*, 41, 953-970.

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