



UNIVERSIDAD Y TECNOLOGÍA
FUNDACIÓN PARA LA TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA

Implementación de un Modelo Fotoquímico de alta resolución para la Macrozona Central del País

Código BIP – 30066582
Contrato N° 10-21-026/07

Informe Final

Preparado para

CONAMA Nacional

Por

Rainer Schmitz
Mark Falvey
Martín Jacques Coper

DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA
Universidad de Chile

Mayo de 2008

Resumen Ejecutivo

La *contaminación fotoquímica* se genera a partir de la existencia en la atmósfera de contaminantes químicamente muy reactivos, los cuales, en presencia de radiación solar, dan lugar a otros contaminantes, conocidos como contaminantes secundarios. Considerando su impacto en salud, el contaminante secundario más importante es el ozono troposférico. Dadas las características de su formación en la atmósfera, las máximas concentraciones de ozono troposférico se aprecian a decenas de kilómetros de las fuentes emisoras principales.

En el caso de Chile, la región con el mejor diagnóstico del problema de ozono es la Región Metropolitana (RM), en la cual se supera la norma nacional en forma regular durante los meses de verano. Tal diagnóstico se debe al monitoreo continuo de este gas y, además, a las actividades en el área de la modelación fotoquímica en esta zona. No obstante, existen antecedentes de la interacción de las masas de aire y del transporte de contaminantes entre las regiones vecinas (V, VI y RM), a las que en su conjunto se referirá, en lo que sigue, como "Macrozona". Considerando, además, que existen fuentes emisoras importantes en las tres regiones, el diagnóstico del problema de ozono troposférico en todas ellas debe ser integral y abordado de manera coordinada. De relevancia central para tal diagnóstico resultan i) las mediciones, ii) la elaboración de inventarios de emisiones y iii) la modelación fotoquímica.

Este estudio significa un esfuerzo sin precedentes en términos de modelación atmosférica en la Macrozona. Se ha implementado un modelo fotoquímico (WRF/Chem) para la Macrozona. Este modelo está configurado dentro de un sistema que permite la generación automática de simulaciones de largo tiempo y, en consecuencia, de información con una significancia estadística. Con este modelo se efectuaron simulaciones meteorológicas de un total de 12 meses, lo que resultó en una caracterización detallada y exhaustiva de los patrones de viento en la Macrozona del país. Las simulaciones fueron validadas a través de su comparación con observaciones de más de 60 estaciones meteorológicas. Utilizando estas simulaciones se pudo mostrar el mayor intercambio inter-regional existe entre la Región V y RM, con masas del aire, que provienen de centros de alta actividad humana como por ejemplo San Antonio y Gran Valparaíso, entrando a la cuenca de Santiago.

En términos de un diagnóstico de los niveles de ozono en base de las observaciones, se analizaron todos los datos de las regiones V y VI. Se identificaron posibles puntos con superación de la norma. Sin embargo, el análisis también mostró que la cobertura espacial de información es insuficiente para llegar a resultados concluyentes.

En términos de las simulaciones fotoquímicas el proyecto se enfrentó con un problema mayor. A contrario de que se suponía cuando se licitó el proyecto, no estaban disponibles los inventarios de emisiones para cualquier modelo fotoquímico. Dadas las características muy específicas del formato de los inventarios se tuvo que re-programar la parte química del modelo WRF/Chem. En lo relativo a los inventarios propiamente tal, se hizo un análisis de su utilidad dentro de los modelos fotoquímicos, lo que dio luz a varios problemas relacionados al respecto. Se modificaron los inventarios de manera tal que se podían ocupar en la modelación, lo que resultó en simulaciones fotoquímicas en toda la Macrozona, las que significan un resultado sin precedente.

Índice

1	Introducción	1
2	Objetivos	2
	2.1 Objetivo general	
	2.2 Objetivos específicos	
3	Modelo	3
4	Implementación del modelo	4
	4.1 Dominio del modelo	
	4.2 Formulación física y numérica	
	4.3 Integración temporal	
5	Recopilación de datos	9
	5.1 Datos de entrada para la modelación	
	5.2 Observaciones	
6	Diagnóstico de niveles de ozono en las regiones V y VI	14
	6.1 Tratamiento de datos y resultados	
7	Evaluación meteorológica	19
8	Intercambio de masas del aire en la Macrozona	31
	8.1 Campo medio del viento	
	8.2 Análisis de trayectorias	
	8.3 Dispersión de un trazador	
9	Análisis de inventario de emisiones	48
	9.1 Inventarios de emisiones originales	
	9.2 Resumen del análisis de los inventarios de emisiones	
	9.3 Inventarios de emisiones modificados	
	9.4 Conclusiones	
10	Simulaciones fotoquímicas	66
	10.1 Inventarios originales	
	10.2 Inventarios modificados	
11	Capacitación y material gráfico para SINCA	70
12	Conclusiones y sugerencias	71
13	Referencias	72

1 Introducción

La *contaminación fotoquímica* se genera a partir de la existencia en la atmósfera de contaminantes químicamente muy reactivos, los cuales, en presencia de radiación solar, dan lugar a otros contaminantes, conocidos como contaminantes secundarios. Considerando su impacto en salud, el contaminante secundario más importante es el ozono troposférico. Dadas las características de su formación en la atmósfera, las máximas concentraciones de ozono troposférico se aprecian a decenas de kilómetros de las fuentes emisoras principales.

En el caso de Chile, la región con el mejor diagnóstico del problema de ozono es la Región Metropolitana (RM), en la cual se supera la norma nacional en forma regular durante los meses de verano. Tal diagnóstico se debe al monitoreo continuo de este gas y, además, a las actividades en el área de la modelación fotoquímica en esta zona. La información en las regiones V y VI a la vez es más limitada. En ambas regiones las estaciones de monitoreo no tienen una mayor cobertura espacial, sino reflejan principalmente la ubicación de algunas industrias. Mientras la Región cuenta con el desarrollo de un primer inventario de emisiones que cumple con un estándar mínimo para su uso en la modelación fotoquímica, la Región V también esta información es muy limitada. No obstante, existen antecedentes de la interacción de las masas de aire y del transporte de contaminantes entre las regiones vecinas (V, VI y RM), a las que en su conjunto se referirá, en lo que sigue, como "Macrozona". Considerando, además, que existen fuentes emisoras importantes en las tres regiones, el diagnóstico del problema de ozono troposférico en todas ellas debe ser integral y abordado de manera coordinada. De relevancia central para tal diagnóstico resultan i) las mediciones, ii) la elaboración de inventario de emisiones y iii) la modelación fotoquímica.

Este proyecto apuntó precisamente a establecer un sistema de modelación fotoquímica que permita llegar a un primer diagnóstico de la magnitud del problema en la Macrozona y de la interacción en términos de transporte de masas del aire intra- e inter-regional. Se implementó un modelo numérico de alta resolución. Esta implementación significa un avance mayor al nivel nacional, tanto en un sentido científico como tecnológico, en relación al diagnóstico de la calidad del aire. El proyecto, además, apuntó, a través de la modelación atmosférica, a caracterizar, a nivel inter-regional, el intercambio de las masas de aire en la Macrozona. Con respecto al ozono, se pretendió lograr una delimitación preliminar de las zonas afectadas significativamente por este contaminante, lo que incluyó una evaluación de los inventarios de emisiones existentes. Además, la implementación de dicho sistema permite generar información y productos de carácter amigable para el Sistema Nacional de Información de Calidad de Aire (SINCA). Finalmente, dada la complejidad de un sistema de las características contempladas en esta propuesta, se efectuó una capacitación de funcionarios de la CONAMA sobre contaminación fotoquímica y su modelación numérica con fines de permitir un mejor uso e interpretación de los productos de tal sistema en dicha institución.

Este informe entrega constancia de los resultados dentro de este proyecto. Después de una introducción y una presentación de los objetivos, las secciones 3 y 4 entregan información sobre el modelo y su implementación. La sección 5 detalla los datos recopilados, los que se usaron en el diagnóstico de los niveles de ozono en la Macrozona en base a las observaciones (sección 6) y en la validación de la parte meteorológica del modelo (sección 7). La caracterización del intercambio de masas del aire a nivel inter-regional se hace en la sección 8. Las secciones 9 y 10 presentan los resultados de la evaluación de los inventarios de emisiones y su aplicación en la modelación fotoquímica, respectivamente. Finalmente, el informe concluye y da recomendaciones para trabajo futuro en la sección 11.

2 Objetivos

Los objetivos del Estudio son los indicados en los Términos de Referencia, a saber:

2.1 Objetivo general

Implementar un modelo de dispersión de contaminantes fotoquímicos para la Macrozona central del país, que permita a la autoridad mejorar su gestión a escala nacional y regional en materias de evaluación y control de la contaminación por contaminantes secundarios.

2.2 Objetivos específicos

1. Implementar un modelo fotoquímico de alta resolución (≤ 4 km) para la Macrozona central de Chile de probado desempeño internacional, con la información de emisiones disponible para las tres regiones.
2. Caracterizar los flujos atmosféricos entre y dentro de las cuencas de la Macrozona para un periodo mínimo de un mes primaveral o estival, según se determine de mayor interés para los fines del proyecto.
3. Evaluar el transporte de contaminantes entre y dentro de las cuencas.
4. Realizar una evaluación crítica del o de los inventarios usados en las modelaciones realizadas, así como de la información meteorológica y de calidad de aire utilizada.
5. Realizar una delimitación preliminar de las zonas afectadas significativamente por Ozono.
6. Realizar una delimitación preliminar de las zonas que podrían ser materia de planes de prevención o descontaminación por Ozono.
7. Realizar animaciones que permitan mostrar los resultados de las modelaciones de diversos escenarios.
8. Capacitar a 15 profesionales de CONAMA sobre las complejidades de la contaminación fotoquímica, el modelo empleado, los precursores, su equilibrio y su control, y sobre la significación de los resultados encontrados a través de un curso específico de 1 día de duración, y de jornadas de discusión de resultados.
9. Divulgar en Seminarios, Congresos y Revistas de carácter técnico-científico los resultados obtenidos como producto de las modelaciones realizadas.
10. Mejorar la información disponible a la comunidad sobre contaminación atmosférica, su origen, y su evolución, a través de la preparación de material escrito que explique en forma didáctica aspectos esenciales de la contaminación fotoquímica, y de la disposición de algunas de las animaciones de las simulaciones realizadas, para su publicación en el sistema SINCA.

3 Modelo

El pronóstico de la calidad del aire comenzó en su evolución recién en los años 1970 aplicando métodos estadísticos objetivos. Desde entonces, los métodos de pronóstico han avanzado significativamente, con los avances más recientes conducentes a modelos que acoplan la meteorología y los procesos químicos de la atmósfera. Al contrario de los modelos estadísticos, éstos no solamente se pueden usar con fines de pronóstico, sino que también de diagnóstico. En términos generales, se distinguen entre modelos que calculan la parte meteorológica y la parte química por separado ('offline', por ejemplo [5]) o un tratamiento integrado ('online', por ejemplo [3]). En lo siguiente, se describe un sistema de simulación basado en un modelo 'online'.

El modelo aplicado en este proyecto es el 'Weather Research and Forecasting Model with Chemistry (WRF-CHEM)' ¹, un modelo *online* mantenido por el 'National Center for Atmospheric Research (NCAR)', EE.UU. En el desarrollo de WRF participa un gran número de científicos de diversos centros de investigación y universidades. Es un modelo *state-of-the-art* en términos de tecnología de pronóstico tanto físico como químico. WRF es usado al nivel global, con una base de usuarios en más de 100 universidades, centros científicos y agencias gubernamentales. Además, el código está completamente paralelizado, lo que permite pronósticos de alta resolución de una manera eficiente en computadores de procesadores múltiples y memoria distribuida ('cluster').

La componente meteorológica de WRF se basa en un núcleo dinámico (la parte del modelo que representa las ecuaciones básicas de la dinámica de la atmósfera) computacionalmente eficiente, apropiado para la simulación de fenómenos característicos desde unos metros hasta miles de kilómetros. El modelo provee una gama de opciones para las parametrizaciones físicas que representan procesos importantes como son, por ejemplo, las interacciones suelo-atmósfera, radiación solar, física de nubes y precipitación. En una configuración operacional, el modelo numérico es inicializado y forzado por los bordes, a partir de datos meteorológicos de modelos globales de pronóstico (Global Forecast Models, GFM) de baja resolución, y las emisiones químicas se implementan a través de la condición de borde en superficie.

La componente química del modelo trata explícitamente el transporte y las reacciones de unas 40 especies químicas, más los aerosoles. La química es 'online' y su tratamiento numérico es consistente con las variables meteorológicas: ambas usan el mismo esquema de transporte (el cual conserva masa y escalares), la misma grilla (tanto en la horizontal como en la vertical) y los mismos esquemas físicos para el transporte sub-grilla. El paquete químico consiste en un método "resistencia-flujo" para la deposición seca ([10]), emisiones biogénicas ([8] y [4]), el mecanismo químico RADM2 ([9]), un esquema complejo de fotólisis ([6]) y un módulo *state-of-the-art* para los aerosoles ([1] y [7]).

¹ www.wrf-model.org y <http://ruc.fsl.noaa.gov/wrf/WG11/>

4 Implementación del Modelo Numérico

La mayor parte de este proyecto consistiría en la caracterización de dispersión y la evaluación de zonas afectadas por contaminantes secundarios en la Macrozona central del país, utilizando como herramienta la modelación numérica atmosférica y foto-química. Con este fin se aplicó el modelo numérico descrito en la sección anterior.

Se contemplaron dos experimentos numéricos utilizando el modelo WRF.

1. *Simulaciones meteorológicas* para tres años, cada uno por un periodo de mínimo de cuatro meses durante las estaciones primaverales y estivales. Estas simulaciones no consideran el cálculo de las reacciones fotoquímicas. Sin embargo, incluyen el transporte de un trazador inerte para ayudar el diagnóstico de los patrones de dispersión en la Macrozona. La intención de estas simulaciones fue realizar una validación exhaustiva de la meteorología del modelo y caracterizar el comportamiento de la circulación y dispersión en la Macrozona, incluyendo el transporte de masas del aire intra- e inter-regional.
2. *Simulaciones meteorológicas y fotoquímicas*, utilizando la mejor información disponible para las emisiones, durante un periodo estival de cuatro meses. El periodo de simulación en este caso es más corto, debido a la gran cantidad de computación que requiere el componente químico del modelo.

Ambos experimentos son computacionalmente intensivos, e involucran varias semanas de cálculo en un sistema de computación especializado. En consecuencia, es imprescindible que el modelo esté correctamente configurado, con un dominio espacial y una formulación física que permita conseguir los objetivos del estudio. Con tal propósito, el modelo WRF, en la primera etapa del proyecto, ha sido cuidadosamente configurado para la Macrozona e implementado en un computador dedicado tipo multiprocesador. Se ejecutó el WRF para las simulaciones meteorológicas (comenzando con el verano del año 2002, año en el que hay una buena cantidad de datos de validación) en forma automática.

La implementación del modelo involucró cuatro tareas principales, las cuales están descritas en las siguientes secciones. Ellas son: la definición del dominio computacional (sección 4.1.), la configuración de los esquemas físicos y numéricos del modelo (sección 4.2.) y el desarrollo de software para coordinar la integración temporal del modelo sobre periodos relativamente largos (i.e., desde meses hasta años) (sección 4.3).

4.1 Dominio del Modelo

Para lograr una representación adecuada de la circulación atmosférica en la Macrozona, es necesario utilizar un dominio computacional cuya resolución espacial (ΔX : espaciamiento entre nodos (puntos) de la grilla) sea suficiente para representar los rasgos topográficos que controlan las circulaciones locales. Se escogió entonces $\Delta X = 4000$ m, en un dominio de 126 puntos de extensión norte-sur (504 km) y 114 puntos este-oeste (465 km), de manera de cubrir por completo las regiones IV,V,VI y RM (es decir, toda la Macrozona). La alta resolución del modelo permite distinguir los rasgos geográficos más importantes que controlan la circulación

regional en Macrozona, incluyendo la costa del Pacífico, el Valle Central y las Cordilleras de la Costa y de los Andes.

Sin embargo, no es posible realizar directamente una simulación con $\Delta X = 4000$ m, pues las condiciones de borde laterales y las condiciones iniciales son obtenidas, para este tipo de simulación, de modelos globales que tienen una resolución de 250 km aproximadamente. Es necesario, por lo tanto, considerar varios dominios, partiendo de uno de gran extensión y baja resolución, sobre el cual se van "anidando" dominios más pequeños -pero de mayor resolución-, hasta llegar al dominio interno centrado en la zona de interés. La tasa de aumento de la resolución entre dos dominios anidados sucesivos es 3, de manera tal que en este caso se tuvieron que emplear 3 dominios anidados, cuyas principales características se resumen en la tabla 4.1. La figura 4.1 muestra la cobertura espacial y posición relativa de los dominios empleados en esta simulación.

En relación a la dimensión vertical, el modelo emplea un sistema de coordenadas 'sigma' cuyo borde inferior sigue la topografía y que se extiende hasta el tope del modelo establecido en 100 hPa (cerca de 15 km de altura). Todos los dominios emplean 36 niveles verticales. Dado que la mayoría de los procesos de interés, incluyendo la emisión y dispersión de contaminantes, ocurren cerca de la superficie, la resolución vertical es mejor en los niveles más bajos (ver figura 4.2). En la capa límite (<1000 m), por ejemplo, el espaciamiento promedio entre niveles es aproximadamente 70 m, y la capa superficial del modelo es solamente 25 m de espesor. La figura 4.2 muestra en forma 3-D las grillas horizontal y vertical del WRF.

4.2 Formulación Física y Numérica

Las opciones físicas y numéricas del modelo WRF han sido seleccionadas cuidadosamente, en base a las recomendaciones disponibles en la documentación del modelo, la literatura científica y la experiencia de los investigadores principales (ver Tabla 4.1).

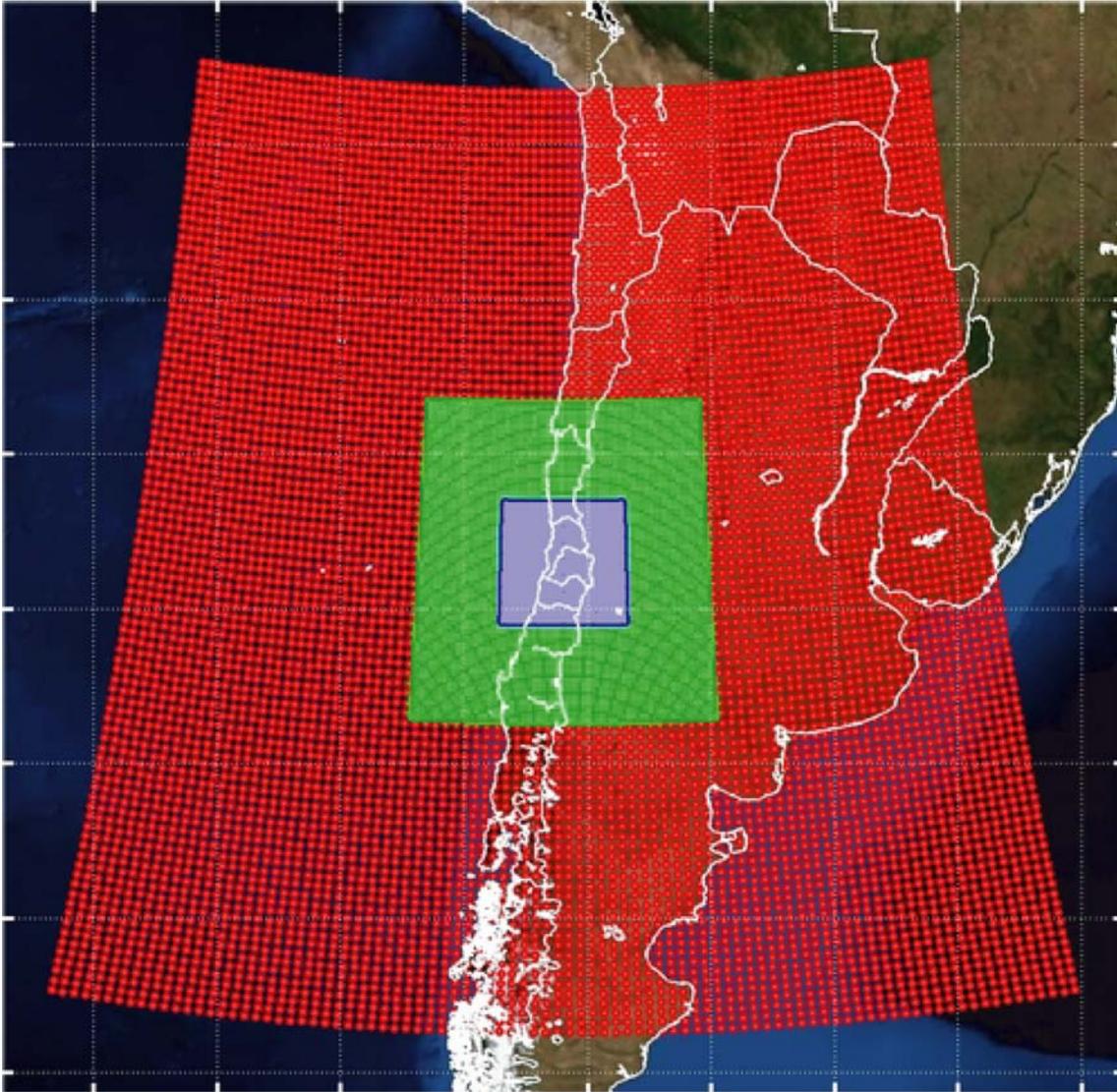


Figura 4.1: Configuración anidada del dominio del modelo WRF. Consiste de tres dominios anidados de resoluciones de 36 km (rojo), 12 km (verde) y 4 km (azul). El dominio exterior captura la meteorología sinóptica mientras los dominios interiores resuelven fenómenos de la mesoescala.

La componente meteorológica del modelo tiene parametrizaciones físicas para efectivamente todos los procesos de escala de 'sub-grilla', que pueden tener una influencia importante sobre la circulación en la Macrozona. Éstas incluyen la radiación solar, el balance térmico/hidrológico del suelo (usando un sub-modelo de cuatro capas), el desarrollo de la capa límite, la microfísica de nubes y precipitación, y la turbulencia atmosférica. Los esquemas numéricos usados se cuentan entre los más avanzados disponibles en el sistema WRF: una formulación no-hidroestática (la cual permite una representación correcta de la convección y las ondas de gravedad), advección definida positiva y el esquema Runge-Kutta de tercer orden para la integración temporal.

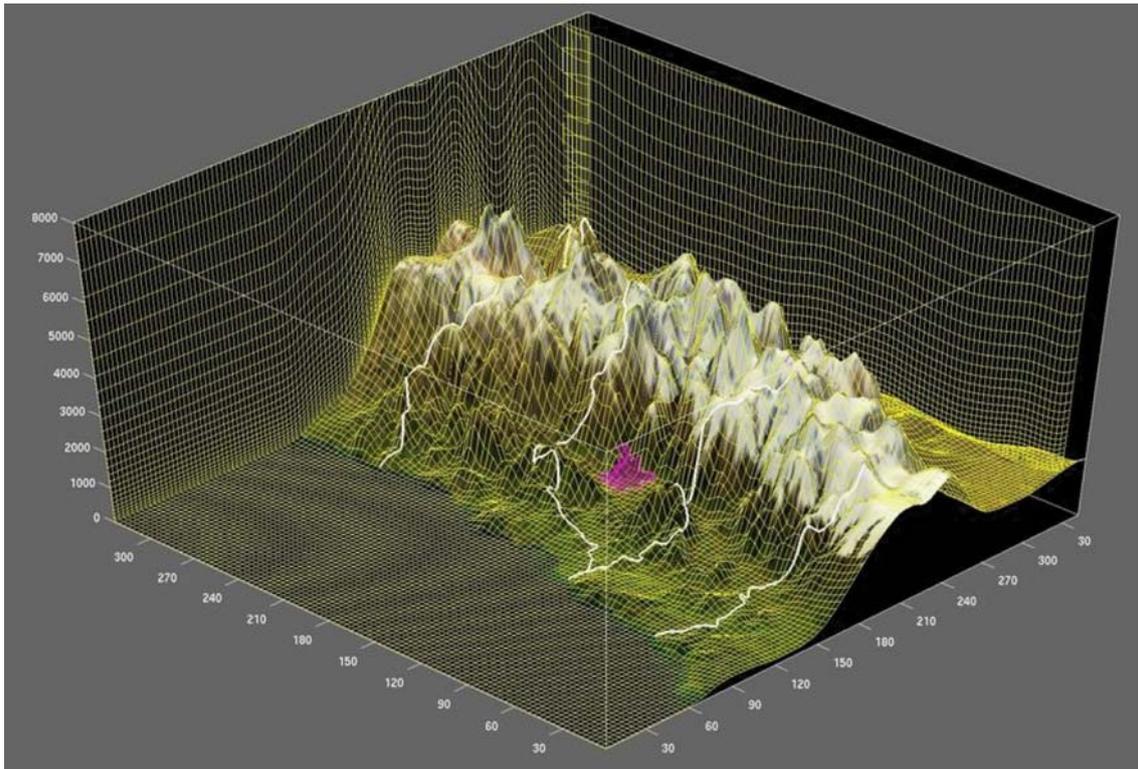


Figura 4.2: Representación 3D del dominio del modelo de resolución de 4km. Se resuelve bien la topografía compleja de la Macrozona (regiones V,VI y RM). La ciudad de Santiago –la mayor fuente de contaminación en la zona- se ubica en el centro del dominio (marcada en púrpura). Las líneas amarillas representan la grilla numérica del modelo, incluyendo la coordenada vertical que sigue la topografía.

4.3 Integración Temporal

La integración temporal de un modelo durante periodos que se extienden por más de unas semanas no es una tarea trivial. Con el dominio descrito en la sección 4.1. y las opciones físicas utilizadas, simular un día requiere aproximadamente de tres horas de tiempo de cálculo. Es decir, para cumplir con un año de simulación (que se contempla para el experimento meteorológico), se requiere más de seis semanas continuas de computación. Con los procesos químicos activados, el modelo demora aún más: aproximadamente nueve horas de cálculo para un día de simulación. De esta manera, el experimento fotoquímico se demorará otras seis semanas.

Dominio	
Resolución horizontal	4000 m
Niveles verticales	36
Puntos de grilla	115 x 127 x 36
Altura del tope del dominio	15 Km.
Espesor vertical en superficie	25 m
Espesor vertical en el tope del dominio	2000 m
Proyección del Mapa	Lambert
Física	
Esquema de radiación	Goddard (onda corta) y RRTM (onda larga)
Modelo del suelo	NOAA 4 layer scheme
Tratamiento de capa superficial	Monin-Obukhov Similaridad
Parametrización de la Capa Limite	Mellor-Yamada-Janjic
Esquema de convección	Kain-Fritsch
Microfísica de nubes y precipitación	WSM (3 especies microfísicas: graupel, nieve, agua)
Parametrización de turbulencia	Smagorinsky (primer orden)
Dinámica	
Núcleo Dinámico	EM (Advanced Mass), No-Hidrostática
Advección	Definida Positiva
Esquema de integración temporal	Runge-Kutta (3° orden)
Integración Temporal	
Paso del tiempo	15 s
Periodo de simulación	Diciembre a Marzo, 2000 – 2004 (3 veranos)
Bordes laterales	NCEP-NCAR 2.5° Re-análisis
Temperatura superficial del mar	ERSST 2.5° Análisis
Temperatura y humedad de suelo	Libre
Frecuencia de salida	Cada hora

Tabla 4.1: Configuración del modelo WRF.

5 Recopilación de información

La modelación atmosférica en general requiere información tanto para la entrada de los modelos, como para fines de evaluación o validación de éstos. Dado la característica geográfica y temporal de la información, cada aplicación de un modelo requiere datos específicos; en consecuencia, como base también se requieren los datos adecuados para cumplir con los objetivos de este proyecto. En la primera fase del mismo se han recopilado los datos de varias fuentes. En lo sucesivo se detallan tales datos.

5.1 Datos de entrada para la modelación

Datos meteorológicos

Los datos meteorológicos necesarios para la aplicación de un modelo regional provienen de modelos atmosféricos globales. El DGF cuenta con una base de datos de dos fuentes, i) el 'Global Forecast System (GFS)' (Sistema de Pronóstico Global) de la Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), y ii) datos de Reanálisis de National Center for Environmental Prediction (NCEP) (datos que incluyen tanto información de modelos como de observaciones), ambas instituciones de EE.UU. Los datos de GFS están disponibles en el DGF desde el año 2005 hasta la fecha; los correspondientes a Reanálisis, desde 1948 hasta la fecha.

Datos químicos

Al contrario de los datos meteorológicos globales, los datos químicos globales disponibles son muy escasos. El DGF cuenta con una base de datos del modelo MATCH-MPIC del Instituto Max-Planck de Alemania. Esta base de datos contiene información desde enero hasta marzo y de noviembre/diciembre del año 2007. En base a esta información se construirá una 'climatología' para los meses cálidos, la cual se usará para las simulaciones históricas.

Inventario de emisiones

Una entrada fundamental para un modelo fotoquímico son las emisiones. Ellas representan la condición de borde (en superficie) y el mayor forzante de la química atmosférica. La información de las emisiones se obtiene a través de sus inventarios. Para que estos inventarios sean útiles con fines de modelación, su información tiene que ser distribuida en el espacio y en el tiempo; además, es necesaria una especiación química detallada. En la licitación de este proyecto, se asumía que los inventarios de emisiones para la Macrozona estaban disponibles con estas características. Sin embargo, en el transcurso del proyecto y después de varias reuniones con la institución a cargo del desarrollo de los inventarios de emisiones para las regiones que conforman la Macrozona, DICTUC S.A, se estableció que éste no fue el caso. El problema principal que se dio fue que solamente para la Región Metropolitana existía información en formato RADM2, el cual es empleado por WRF/Chem. En lo que sigue, se describen las opciones de las que se disponía para confeccionar los inventarios de manera tal que se pudiera trabajar con WRF/Chem y cumplir con los objetivos de este proyecto.

Opción 1

La institución a cargo del desarrollo de los inventarios de emisiones para las regiones que conforman la Macrozona ha sido DICTUC S.A. Dentro de este estudio se efectuaron varias reuniones con DICTUC S.A., con fines de obtener los inventarios de emisiones con las características mencionadas. En estas reuniones se estableció que no todas las regiones contaban con inventarios de emisiones útiles para la modelación fotoquímica y/o necesitarían procesamiento adicional para crearlos y/o adaptarlos. La lista siguiente establece las actividades necesarias señaladas por DICTUC S.A., las cuales habrían significado un costo total asociado de 9.750.000 pesos chilenos.

Región Metropolitana

- Incorporación de distribución espacial y temporal inventarios de VOC.
- Actualización de base de datos con últimas correcciones.
- Programa para generar archivos de fuentes fijas en formato RADM2.
- Generación de archivos para modelación en formato RADM2.
- Iteración inventario-modelo fotoquímico
- Iteración inventario fuentes fijas-modelo fotoquímico

V Región

- Elaboración de un inventario preliminar de fuentes fijas y generación de archivos para modelación.

VI Región

- Generación de archivos para modelación en formato RADM2.

Dentro este estudio, no fue factible cubrir estos costos. Además, CONAMA Nacional cuenta actualmente con un proyecto (“Adquisición, Instalación e Implementación de software de inventarios de emisiones atmosféricas, y poblamiento de bases de datos”), que tiene como objetivo, entre otros, proveer de un inventario de emisiones a nivel país con características que también permitirán su uso en la modelación fotoquímica. De esta manera, por parte de CONAMA no tuvo sentido asumir los costos mencionados efectivamente dos veces.

Opción 2

Dentro del desarrollo de los inventarios para todas las regiones, DICTUC S.A. los ha confeccionado siempre también en formato CBM4 [13]. Para que WRF/chem pudiese emplear este formato (o sea, este mecanismo químico), se requería una reprogramación de gran parte del modelo. En vista que no se contaba con los fondos para financiar la primera opción, se optó por la presente.

La reprogramación mencionada, implicaba la modificación o re-escritura de los módulos de los siguientes procesos:

- Fotoquímica
- Fotólisis
- Deposición seca
- Emisiones

Esta actividad significó alrededor de unas 6000 líneas de código en Fortran90. Ya que no se había contemplado con esta actividad en el comienzo, eso significó un atraso en el proyecto de alrededor de dos meses.

Los inventarios que DICTUC S.A. entregó al DGF contenían información para cada región, con las siguientes características generales:

- V Región
 - Año 2005
 - Fuentes móviles para Gran Valparaíso (ESTRAUSS/MODEM), 1000 metros
 - Fuentes areales para Gran Valparaíso, 1000 metros

- VI Región
 - Año 2006
 - Fuentes móviles para Rancagua (ESTRAUSS/MODEM), 500 metros
 - Fuentes móviles para San Fernando (ESTRAUSS/MODEM), 500 metros
 - Fuentes móviles para carreteras (Metodología DICTUC), 2000 metros
 - Fuentes areales para toda la región, 2000 metros
 - Fuentes puntuales, 372 fuentes

- Región Metropolitana
 - Año 2005
 - Fuentes móviles para toda la región (ESTRAUSS/MODEM), 2000 metros
 - Fuentes areales para toda la región, 2000 metros
 - Fuentes puntuales, 1318 fuentes

Las sustancias incluían aparte de los precursores relevantes para la formación de ozono NO_x, y COVs información sobre PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, NH₃, entre otras.

5.2 Observaciones

Diagnóstico de ozono en la Macrozona

En esta sección se presenta la información correspondiente a la concentración de ozono en diversos puntos de la Macrozona, en lo relativo al origen de los datos.

Fuentes de información y Calidad de los Datos

Además de los inventarios mencionados en secciones anteriores, CONAMA proporcionó datos adicionales para la elaboración del presente estudio. Éstos se dividen espacialmente en las tres regiones comprendidas en la Macrozona y provienen de las siguientes fuentes (se indican también las variables medidas y relevantes para este estudio):

Región Metropolitana

- Red MACAM2 (Viento, O₃, NO_x)
- Base de datos Comisión Nacional de Energía (CNE),([2]), (Viento)

V Región

- Minera Las Cenizas, S.A (Viento)
- Melón (Viento, O₃, NO_x)
- ENAP (Viento, O₃, NO_x)
- Enami (Viento)
- Puerto Ventanas (O₃, NO_x)
- Servicio de Salud Viña del Mar Quillota, SAG V Región, CONAMA V Región (Viento, O₃, NO_x)
- ARMAT S.A. (Viento)
- Base de datos Comisión Nacional de Energía (CNE),([11]), (Viento)

VI Región

- COLBÚN S.A. (Viento, O₃, NO_x)
- Red de Monitoreo Ambiental CODELCO, División El Teniente (Viento)
- Ministerio de Salud (Viento, O₃)
- Base de datos Comisión Nacional de Energía (CNE),([2]) , (Viento)

En muchos casos, una fuente puede contar con más de una estación de monitoreo. En particular, la base de datos de la CNE cuenta con una total de aproximadamente setenta estaciones en la Macrozona, y las dos empresas en la VI Región cuentan con seis estaciones cada una.

Como se explicita, las estaciones disponibles en la Macrozona miden diversas variables, meteorológicas y químicas. Este proceso no cuenta con un patrón definido, lo que causa una falta de uniformidad en la información que de tales datos se puede derivar. Por otro lado, el formato en que los valores son registrados carece también de estandarización (por ejemplo: unidades empleadas para las variables, almacenamiento de la información, etc.).

Además, cabe destacar que la disponibilidad temporal de información no es idéntica para todas las estaciones ni para cada una de las variables medidas por ellas.

Datos de Ozono

Dado que existe un diagnóstico bastante exhaustivo sobre la situación relativa del ozono para la Región Metropolitana (ver [12]), este proyecto se concentró en las regiones V y VI en lo concierne al diagnóstico en base de observaciones. Las fuentes de información de concentración de ozono (valores promedios horarios) usadas en este diagnóstico, del total estaciones totales disponibles, se muestran en la Tabla 5.1.

En particular, se aprecia que las estaciones que proporcionan datos de ozono se encuentran distribuidas en sectores localizados de la V Región (costa y parte occidental del Valle del Aconcagua) y de la VI Región (zonas industriales al interior, alejadas de la costa). Los registros de datos se encuentran comprendidos dentro del periodo 2004-2007. Para el análisis posterior se han descartado aquéllos que cuentan con una extensión insuficiente.

Código	Nombre	Latitud (° S)	Longitud (° W)	Altitud [msnm]	Región	Inicio registro	Fin registro
CAMPI	CAMPICHE	32.74	71.46	10	V	01.01.2004	31.12.2006
RURA1	RURAL1	32.77	71.18	223	V	01.01.2004	31.12.2006
CALER	LA CALERA	32.79	71.19	209	V	01.10.2005	31.12.2006
UCEVE	UCV	32.87	71.22	125	V	01.01.2004	21.12.2004
BOMBE	BOMBEROS	32.89	71.25	120	V	01.01.2004	31.12.2006
SPEDR	SAN PEDRO	32.94	71.27	90	V		
COLMO	COLMO	32.91	71.44	30	V	01.01.2004	31.12.2006
CONCF	CONCON-FIJA	32.96	71.55	25	V	07.01.2004	31.12.2006
<i>LCRUZ</i>	LA CRUZ	32.81	71.22		V	01.01.2004	31.12.2006
06MOS05	MOSTAZAL	33.98	70.70	500	VI	23.01.2004	31.12.2007
06PEU05	CASAS DE PEUCO	33.95	70.64	607	VI	01.01.2004	31.12.2007
06COD05	CODEGUA	34.03	70.66	550	VI	01.01.2004	31.12.2007
06RAN05	RANCAGUA	34.17	70.72	521	VI	01.04.2004	31.10.2007
<i>SANFDO</i>	SAN FERNANDO	34.58	70.99		VI	14.03.2007	16.11.2007
<i>RENGO</i>	RENGO	34.39	70.85		VI	29.03.2007	20.11.2007

Tabla 5.1: Información de los datos disponibles de ozono en la Macrozona. Se mantienen los códigos usados para las estaciones en los estudios para la CNE ([2] y [11]), salvo en los casos en que éstos aparecen en fuente cursiva (estaciones no comprendidas en dichos estudios).

6 Diagnóstico de niveles de ozono en las regiones V y VI

En esta sección se presenta la información correspondiente a la concentración de ozono en diversos puntos de las regiones V y VI. (Tal como se mencionó anteriormente, en lo relativo a la Región RM, ver informe CONAMA RM,[12]).

6.1 Tratamiento de datos y resultados

En primer lugar, se ha reestructurado la información disponible en un formato estándar, de manera que las series de tiempo -con resolución horaria- de todas las variables existentes (meteorológicas y químicas) sean fácilmente accesibles (formato .csv, 'separado por comas').

En el caso del ozono, se han seleccionado los valores de máxima concentración promedio horaria para cada día de los meses de diciembre, enero y febrero (DEF), correspondientes al verano. Todos estos datos se han promediado para calcular un valor representativo para la serie temporal de cada estación ('promedio máximos DEF'). Luego, se ha establecido el número de veces en que dicho valor es sobrepasado en cada registro. Además, se ha determinado también en cuántas ocasiones se han superado el valor de $160 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$. El mismo procedimiento se ha aplicado a las series de promedios móviles de 8 horas de concentración de ozono, considerando para tal caso el valor de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$. Finalmente, se ha calculado el valor establecido en la Norma de Calidad Primaria de Aire para Ozono ('promedio norma') para el periodo 2004-2006 (cuando se dispone de los datos correspondientes), para ser comparado con el nivel de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ (norma establecida)¹. Los resultados obtenidos mediante este procedimiento, se presentan en las Tablas 6.1 y 6.2.

Código	Nombre	prom. máx. DEF [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$]	> prom. máx. DEF	> $160 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$
CAMPI	CAMPICHE	38,92	507	0
RURA1	RURAL1	57,22	363	0
CALER	LA CALERA	49,18	178	0
UCEVE	UCV	61,07	125	0
BOMBE	BOMBEROS	62,3	335	0
SPEDR	SAN PEDRO	60	498	0
COLMO	COLMO	38,77	832	0
CONCF	CONCON-FIJA	36,24	589	0
LCRUZ	LA CRUZ	71,25	283	2
06MOS05	MOSTAZAL	82,18	418	3
06PEU05	CASAS DE PEUCO	69,11	726	2
06COD05	CODEGUA	101,59	227	1
06RAN05	RANCAGUA	47,62*	168	0
SANFDO	SAN FERNANDO	registro muy corto	-	1
RENGO	RENGO	registro muy corto	-	0

* valor en ppb

Tabla 6.1: Resultados obtenidos de las series de concentración promedio horaria de ozono disponibles en la Macrozona.

¹ Según el D.S. N° 112/02 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República, se considera sobrepasada la norma primaria de calidad de aire para ozono como concentración de 8 horas, cuando el promedio aritmético de tres años sucesivos, del percentil 99 de los máximos diarios de concentración de 8 horas registrados durante un año calendario, en cualquier estación monitorea EMRPG, fuere mayor o igual al nivel indicado en el inciso precedente.

Código	Nombre	prom. máx. DEF [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$]	> prom. máx. DEF	> 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	promedio norma (percentil 99)
CAMPI	CAMPICHE	34,61	463	0	64,89
RURA1	RURAL1	43,28	373	0	78,43
CALER	LA CALERA	37,88	180	0	69,23 (sólo 2006)
UCEVE	UCV	50,32	134	0	78 (sólo 2004)
BOMBE	BOMBEROS	52,36	304	0	85,67
SPEDR	SAN PEDRO	46,88	588	1	93,67
COLMO	COLMO	31,19	573	0	65,73
CONCF	CONCON-FIJA	36,24	589	0	50,94
LCRUZ	LA CRUZ	59,63	225	1	92,80
06MOS05	MOSTAZAL	71,65	355	5	104,75
06PEU05	CASAS DE PEUCO	60,48	706	6	115,41
06COD05	CODEGUA	89,54	215	9	117,99
06RAN05	RANCAGUA	42,46*	145	1	53,44*
SANFDO	SAN FERNANDO	registro muy corto	-	0	-
RENGO	RENGO	registro muy corto	-	0	-

* valor en ppb

Tabla 6.2: Resultados obtenidos de las series de promedios móviles de 8 horas de ozono disponibles en la Macrozona.

Para una mejor visualización de estos resultados, la información es desplegada gráficamente en las Figuras 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4.

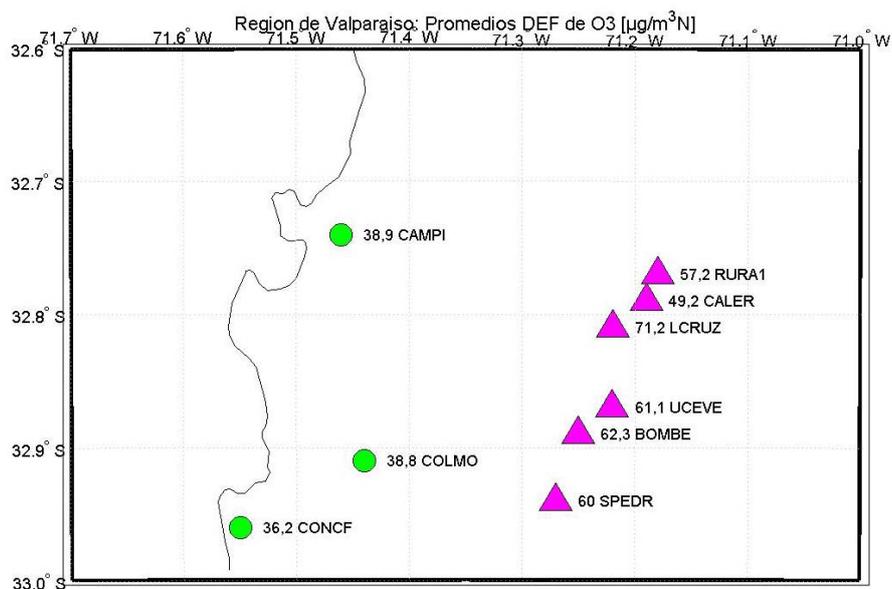


Figura 6.1: Promedios de los máximos diarios de concentración horaria, periodo DEF, V Región. Símbolos indican magnitud (círculos: <40; triángulos: >40 y <80; estrellas: >80)

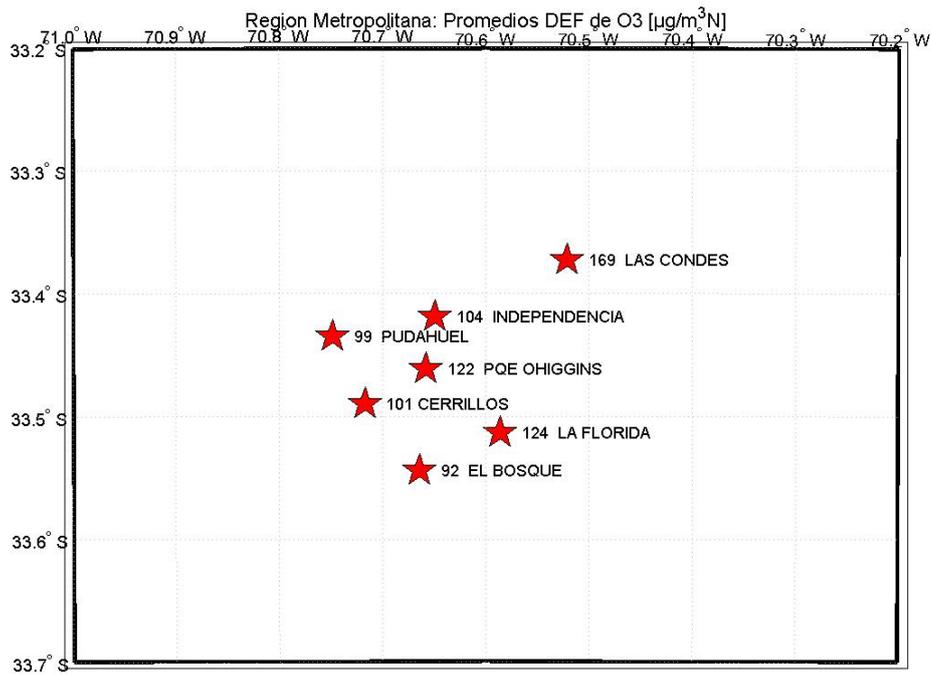


Figura 6.2: Promedios de los máximos diarios de concentración horaria, periodo DEF, RM. Símbolos indican magnitud (círculos: <40; triángulos: >40 y <80; estrellas: >80)

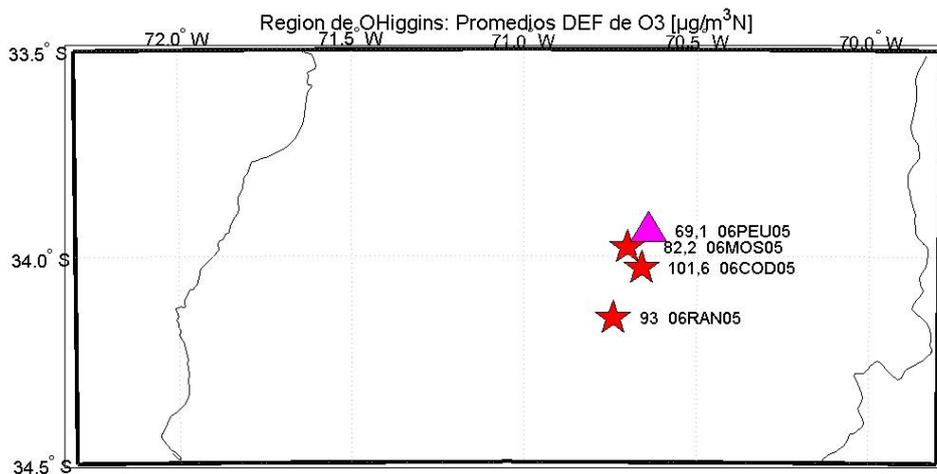


Figura 6.3: Promedios de los máximos diarios de concentración horaria, periodo DEF, VI Región. Símbolos indican magnitud (círculos: <40; triángulos: >40 y <80; estrellas: >80)

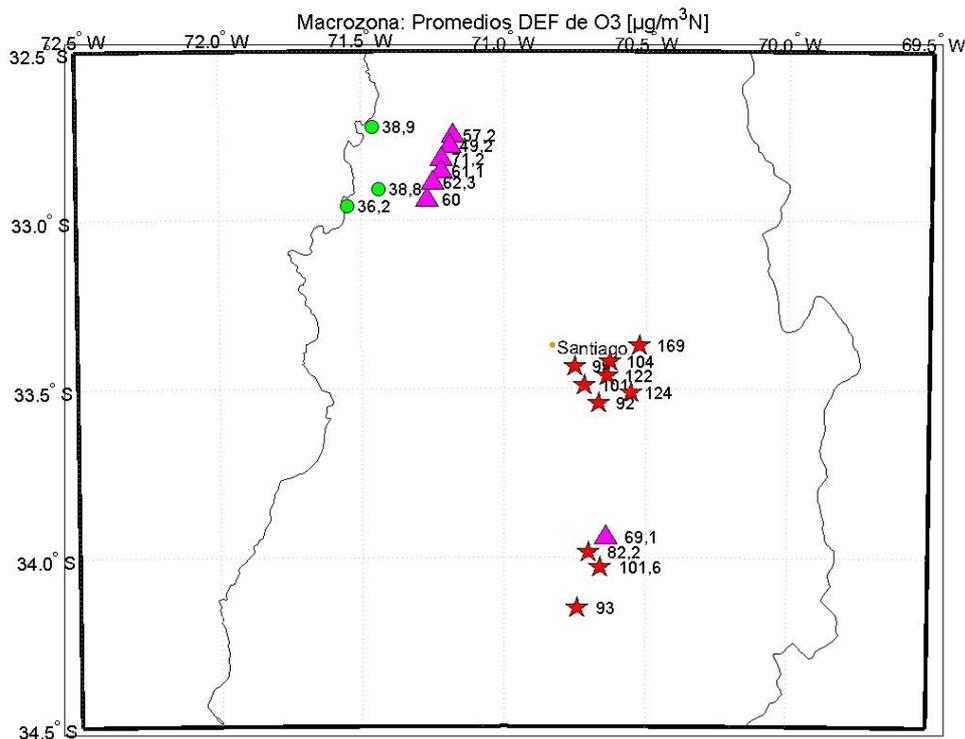


Figura 6.4: Promedios de los máximos diarios de concentración horaria, periodo DEF, Macrozona. Símbolos indican magnitud (círculos: <40; triángulos: >40 y <80; estrellas: >80)

V Región

Se distinguen dos conjuntos de registros para ozono: uno más cercano a la costa (tres estaciones) y otro hacia el interior de la Región (seis estaciones). Los valores obtenidos señalan que la concentración de ozono en la Región presenta un claro gradiente longitudinal; ésta es menor en las estaciones del primer grupo y aumenta en las del segundo. Todas las estaciones cercanas a la costa tienen un valor representativo de promedio de máximos diarios DEF menor a $40 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$.

VI Región

La información disponible en esta Región se aglutina en el interior, y proviene de cuatro estaciones espacialmente muy cercanas, lo que impide una clara representación de la variabilidad espacial de la concentración de ozono en esta zona. Los valores determinados para estos registros superan con creces los correspondientes a la V Región, y su máximo sobrepasa los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$. Ninguna de las estaciones muestra una superación de norma (norma vigente); sin embargo en todas las estaciones los valores llegan justo abajo del valor de la norma.

Como se aprecia, el número de estaciones con registros de concentración de ozono en la Macrozona es bajo, y éstos tienen una extensión temporal bastante acotada. Los promedios

calculados anteriormente son sensibles a la longitud de las series de tiempo, y esto implica que la comparación efectuada entre las estaciones tiene validez solamente dentro del periodo cubierto por los datos. Además, la cobertura espacial es bastante restringida. En parte, esto se debe al origen de los datos (industrias cercanas geográficamente en la VI Región, por ejemplo). Lo anterior limita la capacidad de distinguir claramente la distribución espacial de la concentración de ozono en el área de estudio y sólo se puede llegar a una caracterización local.

Debido a lo expuesto, no es posible realizar un diagnóstico más concluyente de la situación real de la concentración de ozono en la Macrozona. Para esto, se necesitaría contar con una red de estaciones estratégicamente dispuestas, de manera tal que se tuviera una cobertura global del área que fuera representativa, a la vez, de sus diversas localidades. Además, para tal objetivo, es preciso también que los registros de datos tengan una extensión mínima tal que den cuenta de su verdadera variabilidad temporal.

7. Evaluación Meteorológica

La calidad de la simulación meteorológica es un factor fundamental para determinar el éxito de cualquier modelo fotoquímico. Aquí presentamos una revisión crítica del pronóstico de viento superficial del modelo WRF, enfatizando el análisis del ciclo diario de los vientos superficiales. Hasta la fecha, el contenido de esta sección representa la evaluación de viento de un modelo regional más completa y exhaustiva que se ha realizado para la zona central de Chile.

La validación del modelo WRF aprovecha una extensa base de datos de observaciones de viento superficial a nivel horario (ver Tabla 7.1). El mapa en la Figura 7.1 muestra las ubicaciones de las estaciones meteorológicas incluidas en la base de datos. Las observaciones provienen principalmente de dos estudios sobre el potencial de energía eólica realizados para la Comisión Nacional de Energía (*E2003* [11] y *E2005* [2]). En estos estudios, las observaciones de viento de varios proveedores (instituciones públicas, empresas privadas) fueron recopiladas y sujetas a un control de calidad cuidadoso. Hay 70 estaciones en total, con observaciones de nivel horario entre los años 1997 y 2004. En general, las series de tiempo no están completas durante este periodo, y la cantidad de meses con observaciones está incluida en la Tabla 7.1. En la mayoría de las estaciones, los sensores están ubicados aproximadamente 10m sobre la superficie, y hay 7 estaciones con instrumentos más altos (>20m). Estas últimas están identificadas en el mapa con un punto negro.

Para efectuar la validación del modelo, se utilizaron todos los resultados de las simulaciones de los veranos de 2001, 2002 y 2003: un año de simulación en total (se tomaron estos años por razones de mayor disponibilidad de datos meteorológicos). Los campos de viento 3D de WRF, disponibles en intervalos de una hora, fueron interpolados a las ubicaciones de las 70 estaciones meteorológicas. El nivel más bajo del modelo tiene una altura de aproximadamente 25 m, significativamente mayor que la altura de 10m de casi todos los instrumentos. Para obtener los vientos en 10m, el modelo WRF extrapola el viento aplicando la ‘teoría de similitud de Monin-Obukhov’, que provee el marco teórico que une la superficie con el primer nivel del dominio computacional.

Se inicia el análisis con la Figura 7.2, la cual muestra el ciclo diario promedio de la magnitud de viento observado y simulado por WRF, utilizando datos de todas las estaciones con más de 1 mes de datos durante el verano (~63). El ciclo diario es muy marcado, caracterizado por vientos muy débiles (~1.2 m/s) durante la noche y un aumento significativo en magnitud durante el día. En general, la magnitud del viento se maximiza a las 16:00 horas con un valor promedio de aproximadamente 4 m/s. WRF logra una representación del ciclo diario bastante similar a la observada. Durante la noche, la magnitud del viento es levemente más fuerte que el viento observado (1.5 m/s). En el día, se aprecia que los vientos aumentan rápidamente, pero el máximo diario de 6 m/s es mayor que el máximo presentado por las observaciones y ocurre una hora antes, a las 15:00.

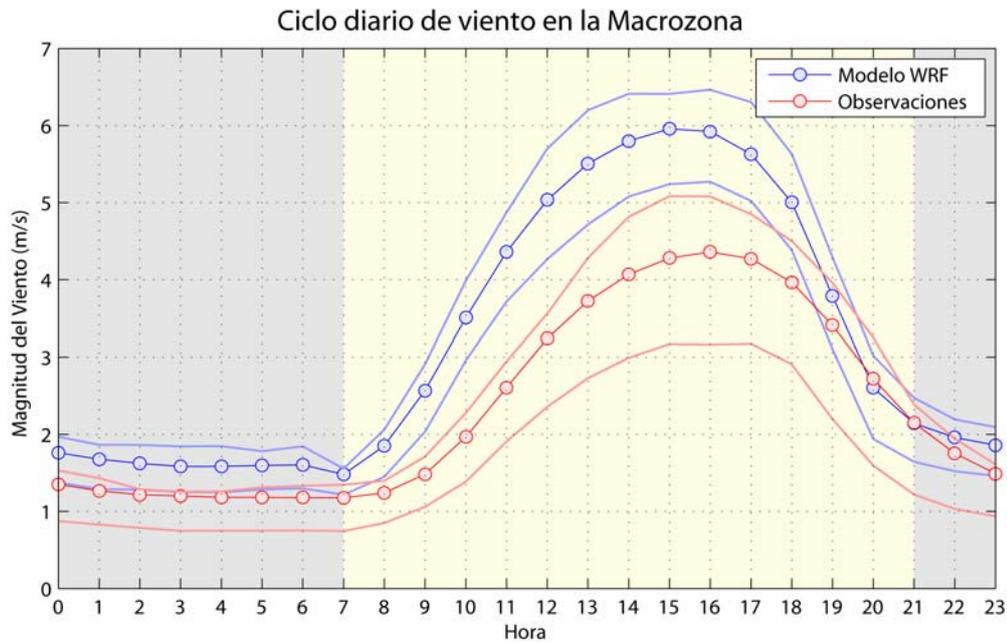


Figura 7.2: El ciclo diario de magnitud de viento en la Macro zona observado (rojo) y simulado por el modelo WRF (azul). El punto representa el valor promedio de todas las estaciones y las líneas indican el rango inter-cuartile (25% a 75% de la distribución)

uencas de Santiago y Rancagua. Sin embargo, su campo espacial parece más uniforme que lo observado y el modelo no reproduce bien el viento en las estaciones donde el promedio es relativamente débil. Durante la noche (Figura 7.4), el aspecto más llamativo del campo de viento es la muy baja velocidad presentada en la gran mayoría de las estaciones. Nuevamente los vientos más débiles parecen ubicarse en el Valle Central. El modelo funciona relativamente bien en la cuenca de Santiago, Rancagua y Aconcagua baja (i.e., Gran Valparaíso), donde los vientos simulados son similares o un poco más fuertes que los vientos observados. Hay algunas discrepancias más notables, que incluyen una clara sobreestimación del viento en las estaciones ubicadas en la frontera de las regiones RM y VI, y una subestimación de viento en la Cordillera de la Costa. Dada la baja velocidad del viento nocturno, estos errores no deben tener mucha importancia para la modelación de dispersión (por lo menos, en la escala de la Macrozona).

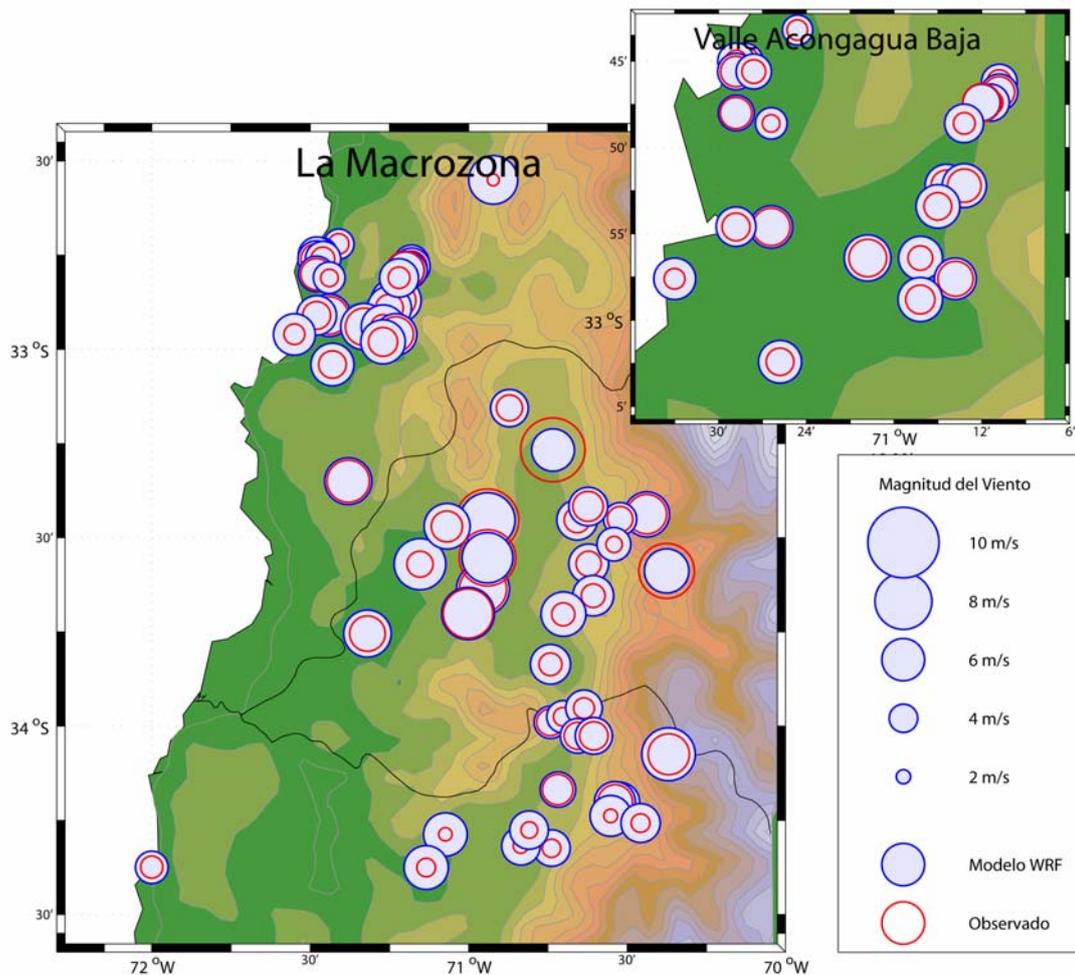


Figura 7.3: Validación espacial de la magnitud de viento en la tarde simulada por el modelo WRF. El radio de los círculos representa el promedio de la magnitud del viento entre 14:00 y 18:00 observado (rojo abierto) y modelado (azul cerrado) en cada estación con más de un mes de datos disponible.

La figura 7.5 provee un ‘scatter-plot’ mostrando directamente la relación entre la magnitud de viento observado y simulado (WRF) para las horas de la tarde (izquierda) y la noche (derecha). La correspondencia espacial, medida con el coeficiente de correlación espacial (r), es significativo en ambos periodos, con valores de 0.55 y 0.37, respectivamente. Entonces, se logra comprobar que el modelo es capaz de generar una representación realista del campo de magnitud del viento. En la tarde, el sesgo positivo (i.e., la sobreestimación de la magnitud del viento) por parte del modelo es apreciable y ocurre principalmente en las estaciones con baja velocidad del viento. En la noche, el problema principal del modelo es la subestimación de la magnitud del viento en estaciones donde el viento nocturno es mayor a 2 m/s.

El contraste entre la tarde y la noche observable en la figura 7.5 implica que las características de la validación de WRF varían en función de la hora del día. La figura 7.6 muestra la variación diaria del coeficiente de correlación espacial. Durante la tarde y la noche, de 11:00 a 06:00, la correlación espacial es significativa, con un máximo de ~0.6 a las 15:00 horas, momento en que el viento de WRF también se maximiza. Entre las horas 07:00 y 10:00, las cuales marcan la transición de noche a día, la correlación baja notablemente. De hecho, entre las 08:00 y las

09:00 horas, inmediatamente después de la salida de sol, la correlación espacial es insignificante. Este resultado indica que el modelo WRF tiene dificultad para capturar el comportamiento del viento durante el periodo de aceleración rápida que ocurre debido al

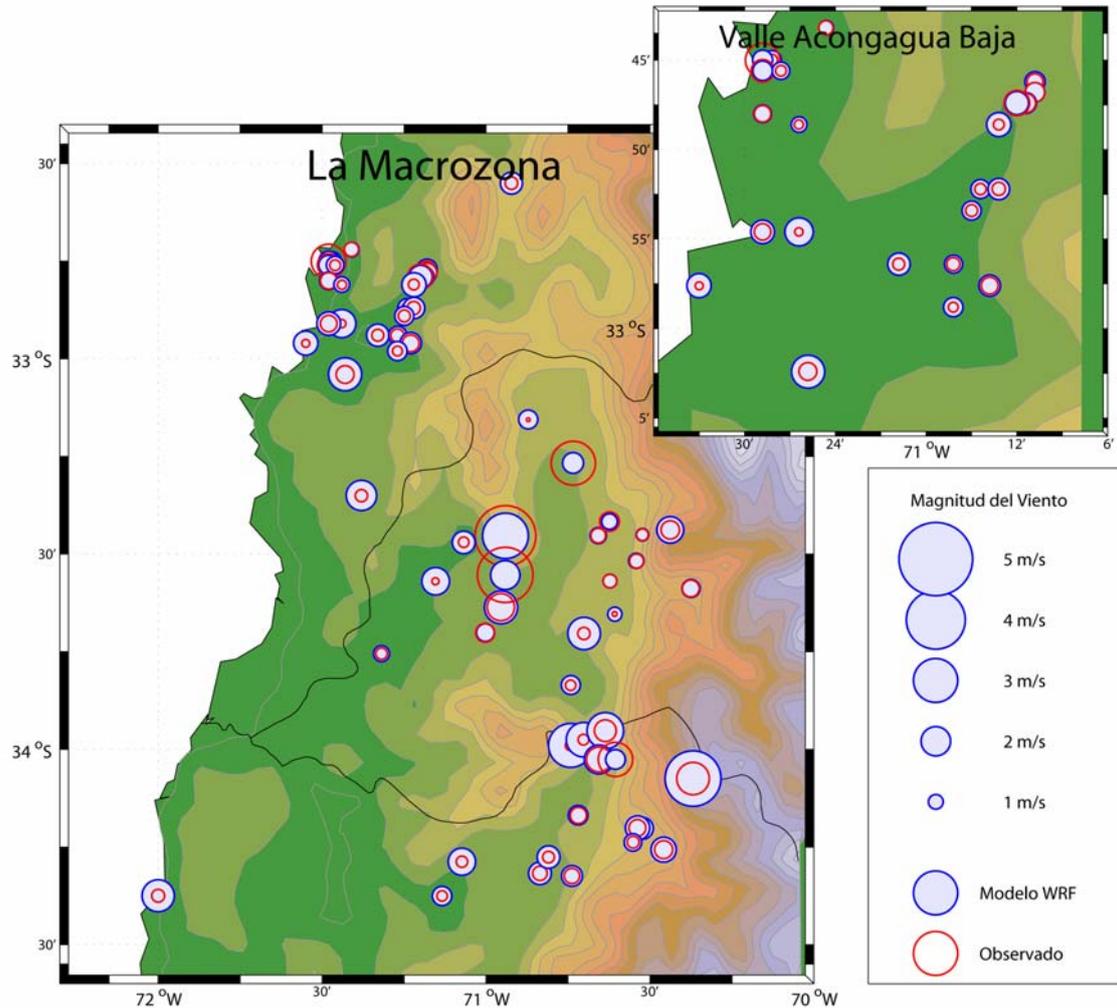


Figura 7.4: Como figura 6.3 pero para la noche, entre las horas 02:00 y 06:00.

calentamiento de la superficie terrestre durante la mañana. Dado que las circulaciones en dicho horario son bastante turbulentas, no es particularmente realista esperar mejores resultados.

La característica de WRF de sobre-pronosticar el viento sugiere que el modelo tiene un error sistemático en la representación del viento cerca de la superficie. Esto puede ocurrir por varias razones, incluyendo la subestimación de la rugosidad de la tierra, la sobreestimación de transferencia de momentum entre la capa límite y la atmósfera libre, o un sesgo en el calentamiento de la superficie terrestre (lo cual depende de las propiedades térmicas de la representación del suelo en el modelo), entre otras. Es importante notar que el viento a 10 m de altura producido por el modelo es efectivamente una *extrapolación* de su primer nivel computacional, el cual tiene una altura aproximada de 25 m. Adicionalmente, existe la posibilidad de la presencia de vegetación, edificios u otras estructuras en el entorno del instrumento que pueden originar una reducción local del viento. Los sesgos en la modelación o instrumentación generalmente son más pronunciados cerca de la superficie. En la figura 7.7 se

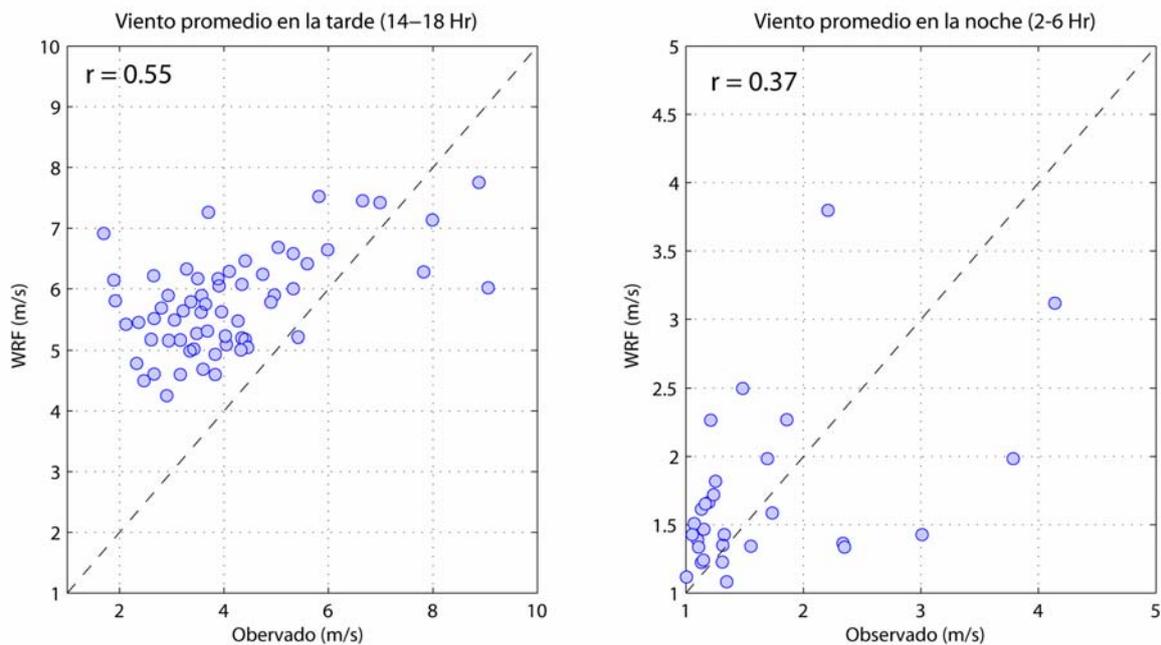


Figura 7.5: Correlación espacial entre la magnitud de viento observado y simulado (WRF) para la tarde (izquierda) y la noche (derecha). Cada punto azul representa el viento promedio de una de las 70 estaciones. El número r es la coeficiente de correlación. La línea segmentada representa un correlación perfecta ($r = 1$).

presentan ‘box-plots’ (diagramas de caja) del sesgo en la magnitud del viento (es decir, el viento de WRF menos el viento observado), con las estaciones divididas en dos grupos: aquellas con instrumentos a menos de 20 m y aquellas con instrumentos a más de 20 m sobre la superficie (7 estaciones, ver figura 7.1). Se aprecia que mientras el WRF tiene un claro sesgo con los instrumentos ubicados en baja altura, el sesgo para los instrumentos de mayor altura es insignificante. Esto indica que la sobreestimación de viento en el modelo WRF es principalmente un problema presente en una capa muy cerca de la superficie. Dado que la dispersión durante el día es principalmente controlada por el viento en la mitad de la capa límite, i.e., unos 200-400m en la Macrozona, es probable que el sesgo a 10m de altura no tenga un gran impacto en el cálculo de la dispersión y el intercambio de aire que es presentado en la próxima sección.

Hasta ahora el análisis se ha concentrado principalmente en la validación de la magnitud del viento. Otro factor de igual importancia en el contexto de la dispersión de precursores fotoquímicos es la orientación del viento. Al igual que la magnitud del viento, la orientación también tiene un ciclo diario muy marcado en la Macrozona. En la Figura 7.8 se presentan como flechas las orientaciones del viento promedio (observado y de WRF) en la tarde (14:00 – 18:00). Las orientaciones se calcularon como el promedio simple de los componentes U (Este-Oeste) y V (Sur-Norte). En este horario, la gran mayoría de las observaciones muestran una orientación hacia la Cordillera, la cual es bien reproducida por el modelo. Se observa que los vientos observados frecuentemente tienen una componente hacia el norte, la cual es menos evidente en los vientos del WRF. Durante la noche, cuando los vientos son muy débiles, hay poca coherencia en el campo de viento observado y el de WRF (no mostrado).

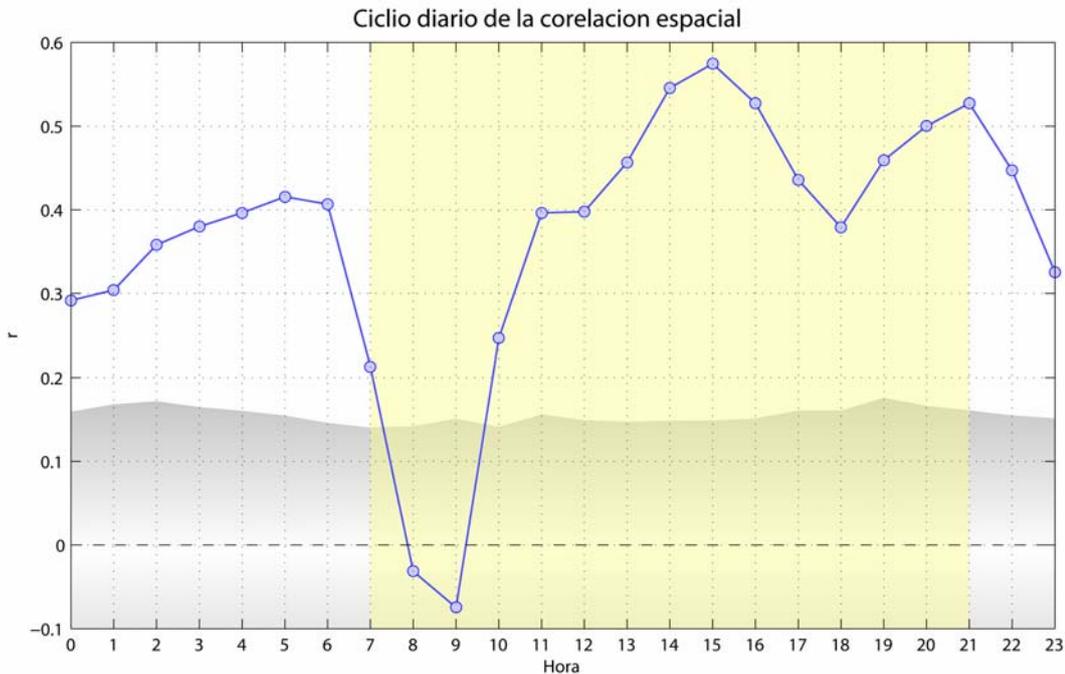


Figura 7.6: Ciclo diario de la correlación espacial entre el viento promedio observado y el viento promedio simulado por el modelo WRF. Correlaciones mayores que el nivel coloreado en gris son significativos a un nivel de 95% de confianza.

La figura 7.9 provee un resumen compacto del ciclo diario de la orientación del viento en base a todas las observaciones y el WRF. Para construir el gráfico, se calculó el promedio *normalizado* del ciclo diario de los componentes U y V , las cuales se obtuvieron a través del cociente entre cada componente y el valor medio de la magnitud de viento. En la figura se dibuja el promedio de los componentes normalizados usando todas las estaciones con más de un mes de datos. Cada punto rojo (observado) o azul (WRF) representa la orientación y magnitud del viento (relativo a su valor medio) a la hora indicada mediante números. El gráfico muestra que típicamente los vientos observados se dirigen hacia el noreste durante el día y en la noche presentan una pequeña componente hacia el oeste, lo cual podría indicar la presencia de un flujo catabático en algunas estaciones. El modelo WRF exhibe un ciclo diario similar, pero el flujo en la tarde es más zonal (es decir, apunta más hacia el este) y el modelo casi no produce el flujo nocturno hacia el oeste. Es posible que los problemas con la orientación del viento estén asociados a la representación de la topografía en el modelo. Aunque el espaciamiento de la grilla, de 4000 m, resuelve bien los rasgos topográficos más importantes, la altura de la Cordillera de la Costa y las fuertes pendientes topográficas que existen en muchas partes de la Macrozona son subestimadas. Estas características podrían limitar la representación de la canalización del aire que ocurre dentro de los valles principales de la zona, especialmente el Valle Central, donde los errores de orientación son más significativos. La realización de experimentos con configuraciones de WRF con resoluciones superiores podría conformar esta hipótesis. Al igual que en el caso de la magnitud del viento, la comparación con las estaciones que cuentan con instrumentos sobre los 20 m muestra que el sesgo en la orientación es muy reducido, lo cual sugiere que el problema principalmente ocurre cerca de la superficie y probablemente no tendrá un gran impacto en la modelación de la dispersión.

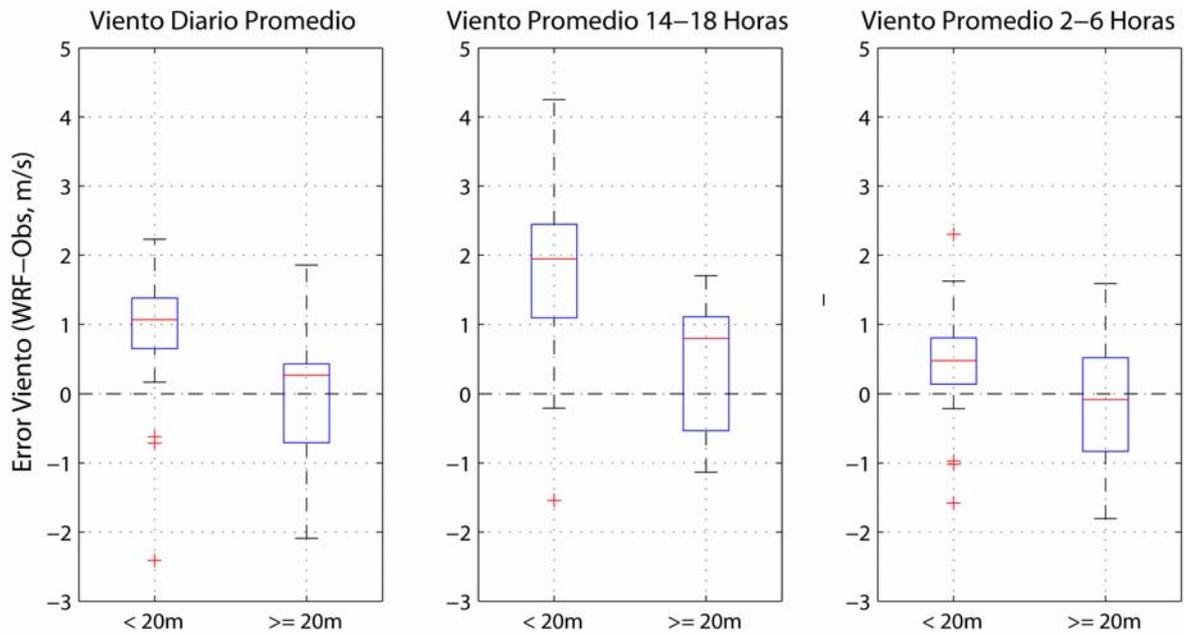


Figura 7.7: ‘Box-plots’ del sesgo de magnitud del viento (es decir, la diferencia entre la magnitud el viento modelado por WRF y la del viento observado), con las estaciones divididas en dos grupos: aquéllas con instrumentos a menos de 20 m y aquéllas con instrumentos a más de 20 m sobre la superficie. El cuadro azul contiene los sesgos del 50% de las estaciones (el rango “inter-cuartile”) y las líneas negras contienen el 90% de las estaciones. Los puntos rojos indican ‘outliers’, es decir, muestras que presentan un sesgo inusualmente grande.

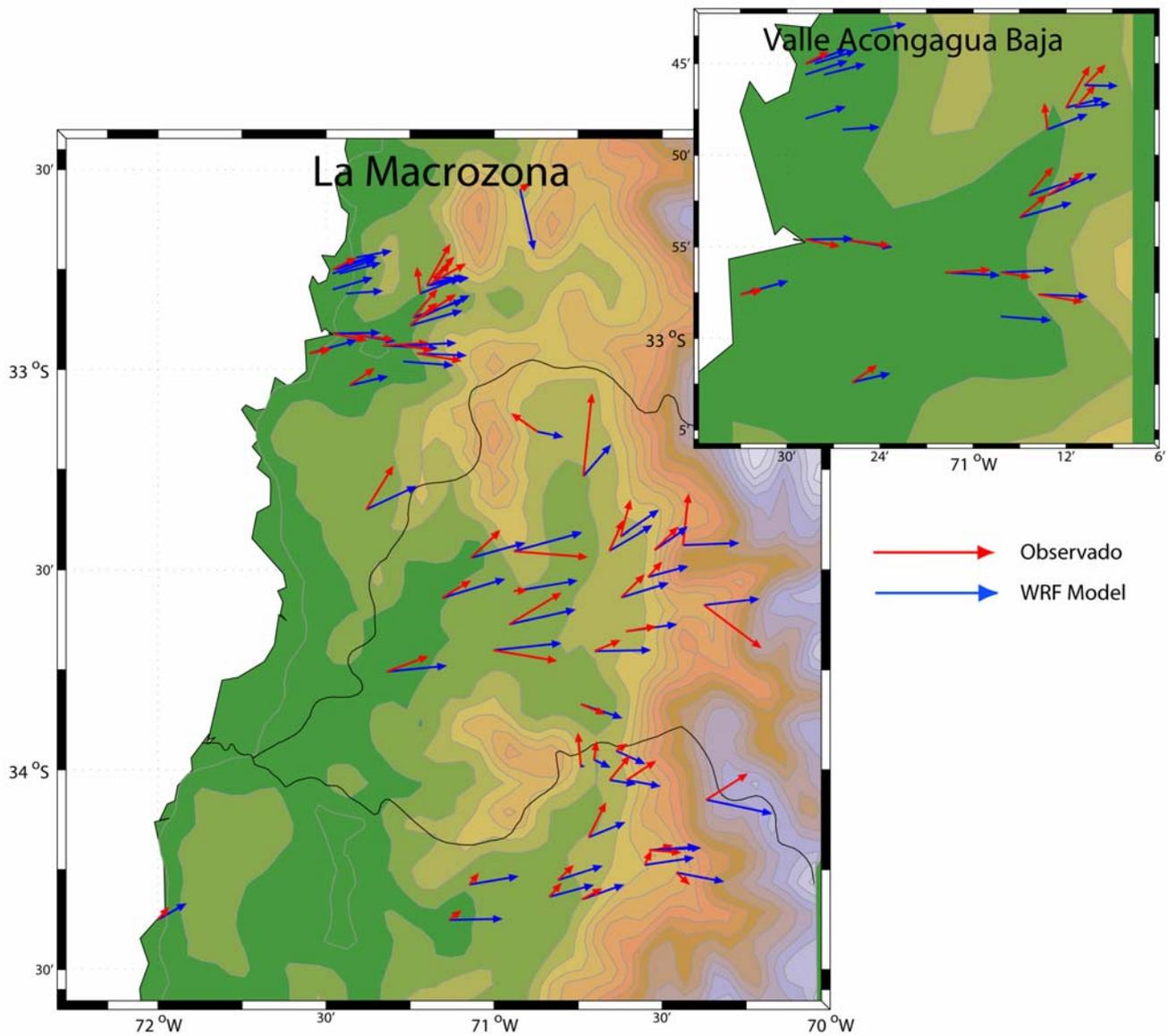


Figura 7.8: Las orientaciones del viento promedio en la tarde (14:00 – 18:00) observadas (rojo) y simuladas (azul) por WRF.

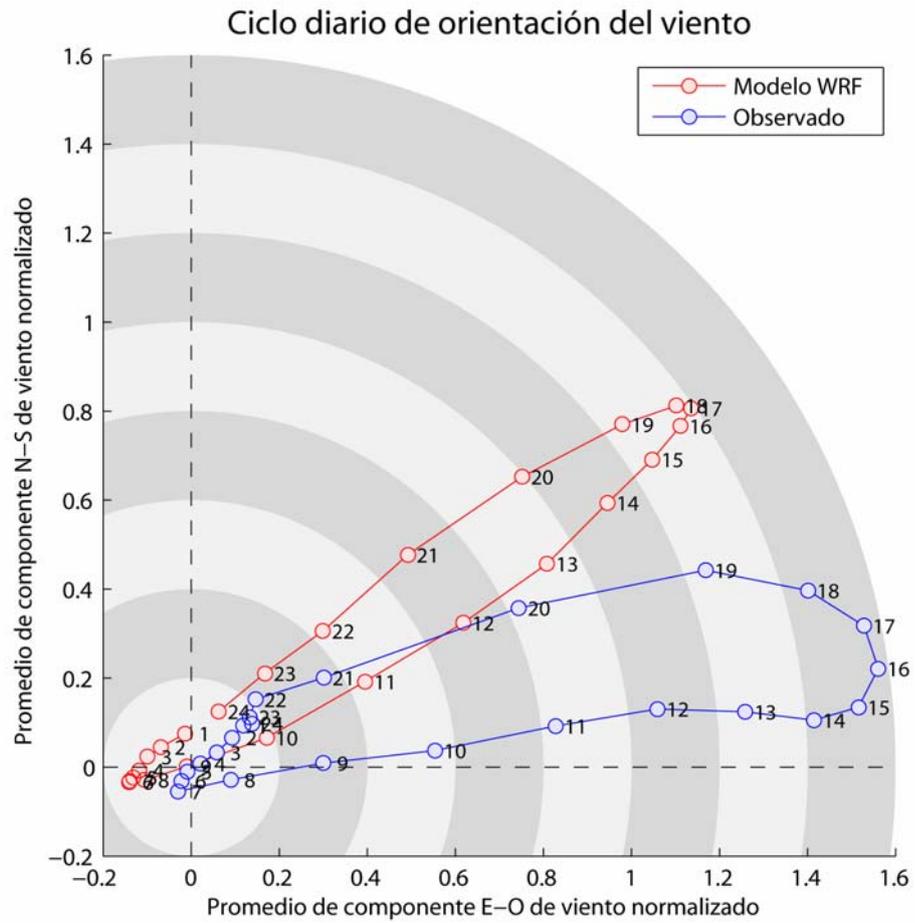


Figura 7.9: Ciclo diario del promedio de los componentes de viento *normalizados* U (E-O) y V (N-S) observados (rojo) y modelados por WRF (azul). El número indica la hora del día. Por ejemplo, el punto rojo marcado con el número 16 indica que a las 16:00 horas el viento observado es (en promedio) de magnitud 1.4 veces mayor que su valor medio y apunta hacia el noreste.

Tabla 7.1: Observaciones de de viento.

Estación	Latitud (°S)	Longitud (°O)	Altura (m)	Inst. Alt (m)	Reg	Periodo	# Meses	Informe
CAMPICHE	32.74	71.46	10	10	V	5/00-5/03	37	CNE 2003
LA GREDA	32.75	71.47	13	10	V	4/00-6/03	39	CNE 2003
VENTANAS Nº2	32.75	71.48	10	10	V	6/01-6/03	25	CNE 2003
VENTANAS-MET	32.76	71.48	33	10	V	4/00-6/03	39	CNE 2003
LOS MAITENES	32.76	71.46	41	10	V	4/00-6/03	39	CNE 2003
RURAL1	32.77	71.18	223	12	V	4/02-6/03	15	CNE 2003
HIJUELAS	32.78	71.18	220	10	V	6/99-3/02	34	CNE 2003
LA CALERA	32.79	71.19	209	12	V	6/99-6/03	49	CNE 2003
MET MELON	32.79	71.2	210	10	V	6/99-6/03	49	CNE 2003
CHAGRES	32.8	70.96	400	10	V	8/00-9/02	16	CNE 2003
VENTANAS-SUR	32.8	71.48	63	10	V	4/00-6/03	39	CNE 2003
VALLE ALEGRE	32.81	71.44	21	10	V	4/00-6/03	39	CNE 2003
INP QUILLOTA	32.87	71.24	125	10	V	11/98-1/99	3	CNE 2003
UCV	32.87	71.22	125	10	V	2/99-2/03	34	CNE 2003
BOMBEROS	32.89	71.25	120	10	V	2/99-2/03	49	CNE 2003
COLMO	32.91	71.44	30	10	V	5/02-6/03	14	CNE 2003
LAS GAVIOTAS	32.91	71.48	80	10	V	5/02-6/03	14	CNE 2003
NEHUENCO	32.94	71.33	70	10	V	11/98-2/03	52	CNE 2003
SAN PEDRO	32.94	71.27	90	10	V	11/98-2/03	52	CNE 2003
CAJON SAN PEDRO	32.96	71.23	160	10	V	11/98-1/99	3	CNE 2003
CONCON-FIJA	32.96	71.55	25	10	V	1/99-6/03	54	CNE 2003
CONCON-SUR	32.96	71.55	25	10	V	5/02-6/03	14	CNE 2003
LIMACHE	32.98	71.27	100	10	V	8/99-10/00	15	CNE 2003
ARMAT	33.04	71.43	100	10	V	1/02-2/03	13	CNE 2003
CENMA -CASABLANCA	33.35	71.38	270	10	V	10/01-4/03	19	CNE 2003
DGF-LAS CRUCES	33.5	71.62	26	3.75	V	11/93-11/94	12	CNE 2003
LA CRUZ	32.81	71.22	?	?	V			
JUNTA DE VECINOS	?	?	?	?	V			
LA DORMIDA	37°14'41"	67°13'58"	1413	40	RM	01/01-12/04	47	CNE 2005
POLPAICO	33°09'33"	70°52'27"	520	10	RM	01/02-02/02	2	CNE 2005
ENTEL	33°26'27"	70°26'27"	554	127	RM	01/01-12/04	47	CNE 2005
LO PRADO	33°27'20"	70°56'47"	1065	33	RM	01/01-12/04	47	CNE 2005
LA REINA	33°27'02"	70°31'36"	680	10	RM	01/01-12/04	47	CNE 2005
MALLARAUCO	33°34'19"	71°09'24"	156	10	RM	01/01-05/03	29	CNE 2005
LA CAMPANA	33°38'15"	70°57'29"	483	22	RM	01/01-07/01	7	CNE 2005

LA PLATINA	33°34'13"	70°37'32"	652	10	RM	01/01-12/04	47	CNE 2005
EL MANZANO	33°35'28"	70°22'53"	874	10	RM	01/01-12/04	47	CNE 2005
PIRQUE	33°39'22"	70°36'44"	676	?	RM	01/02-02/02	2	CNE 2005
LOS TILOS	33°42'19"	70°42'06"	486	10	RM	01/02-02/02	2	CNE 2005
EL PAICO	33°42'06"	71°00'13"	255	22	RM	01/01-12/04	47	CNE 2005
CODIGUA	33°45'27"	71°19'16"	131	10	RM	01/01-12/04	47	CNE 2005
LO CAÑAS	33°31'05"	70°32'50"	643	10	RM	01/96-03/00	54	CNE 2005
INGENIERÍA U. CHILE	33°27'15"	70°39'44"	543	10	RM	01/95-09/98	45	CNE 2005
LO PINTO	36°16'00"	70°44'06'	554	10	RM	01/95-11/00	70	CNE 2005
SAN CRISTÓBAL	33°25'01"	70°37'41"	875	70	RM	07/96-03/98	21	CNE 2005
MARÍA PINTO	33°28'18"	71°04'10"	180	10	RM	01/96-10/00	57	CNE 2005
PAINE	33°50'14"	70°44'51"	373	10	RM	04/96-07/99	40	CNE 2005
CUESTA BARRIGA	33°33'20"	70°56'47"	554	20	RM	04/97-12/99	33	CNE 2005
QUILAPILUN	33°59'39"	70°44'54"	615	10	RM	04/97-10/00	42	CNE 2005
CUESTA CHADA	33°55'56"	70°39'15"	696	10	VI	01/01-12/04	47	CNE 2005
MOSTAZAL	33°58'50"	70°42'15"	500	10	VI	01/04-12/04	11	CNE 2005
CASAS DE PEUCO	33°57'15"	70°38'20"	607	10	VI	12/04	8	CNE 2005
CODEGUA	34°01'54"	70°39'37"	550	10	VI	01/01-12/04	44	CNE 2005
CANDELARIA	34°01'54"	70°36'31"	663	10	VI	02/01-12/01	10	CNE 2005
SEWEL	34°04'48"	70°22'12"	2186	20	VI	01/00-12/04	59	CNE 2005
RANCAGUA	34°10'12"	70°43'12"	521	6	VI	03/04-02/05	8	CNE 2005
COYA POBLACIÓN	34°12'11"	70°31'46"	820	10	VI	01/00-12/04	60	CNE 2005
COYA CLUB	34°12'05"	70°32'30"	936	10	VI	01/00-12/04	60	CNE 2005
CAUQUENES	34°14'28"	70°33'10"	720	10	VI	09/00-12/04	52	CNE 2005
CIPRESES	34°15'43"	70°27'47"	890	10	VI	09/00-12/04	52	CNE 2005
TOTIHUE	34°19'44"	70°44'29"	330	10	VI	08/97-08/98	13	CNE 2005
REQUINOA	34°16'51"	70°48'52"	420	10	VI	06/01-08/01	3	CNE 2005
SITIO DEL PROYECTO	34°19'05"	70°50'12"	355	10	VI	12/97-08/98	8	CNE 2005
BOMB. REQUINOA	34°16'55"	70°48'56"	325	10	VI	01/98-08/98	8	CNE 2005
COLTAUCO	34°17'23"	71°04'40"	250	10	VI	03/04-12/04	10	CNE 2005
QUINTA DE TILCOCO	32°33'01"	70°55'34"	250	10	VI	03/04-12/04	10	CNE 2005
MONTE LORENZO	34°22'53"	71°08'02"	140	15	VI	03/04-12/04	8	CNE 2005
PICHILEMU	34°22'48"	72°00'00"	90	6	VI	01/04-	12	CNE 2005

8. Intercambio de Masa del Aire en la Macrozona

En esta sección, los resultados de las simulaciones meteorológicas de WRF se examinan en lo relativo al intercambio de masa de aire entre las regiones de la Macrozona. Se ocupan varias metodologías para caracterizar el viento y determinar su capacidad de efectuar transporte intra-regional. La sección se divide en tres partes: se comienza en la sección 8.1 con una caracterización del campo de viento promedio en la Macrozona. Luego (sección 8.2) se investiga directamente la posibilidad de intercambio aire a través de un análisis de trayectorias. Se termina en sección 8.3 con una breve discusión de la dispersión regional utilizando los trazadores inertes que fueron incluidos en las simulaciones meteorológicas de WRF.

8.1 Campo medio del viento

El modelo WRF permite examinar los vientos en un nivel más representativo donde ocurre el transporte en la capa límite. En las figuras 8.1 a 8.8, se presenta una caracterización exhaustiva del viento promedio a 70 m de altura a lo largo de la Macrozona,. Los campos se presentan en intervalos de 3 horas, para las siguientes horas del día: 07:00, 10:00; 13:00; 16:00; 19:00; 22:00; 01:00; 04:00. El promedio se calcula en base de todos los días de simulación disponible, es decir, cada gráfico representa el promedio de 363 días estivales de viento. Los colores representan la magnitud media, con una escala de color que varía de 0 (azul) a 12 m/s (rojo). Las flechas representan, además de la magnitud, la orientación 'típica' del viento, calculado como el promedio de los componentes zonal y meridional de viento. Se dibuja una flecha en cada punto de grilla del modelo lo que permite también apreciar la resolución del dominio computacional. Los contornos indican la topografía del modelo WRF, con un intervalo de 250m. Las figuras muestran una compleja condición de viento para la Macrozona, con un gran detalle espacial y un ciclo diario muy marcado. Algunos de los rasgos que más llaman la atención son los siguientes

- La rápida aceleración de viento durante la mañana y el desarrollo del flujo hacia la Cordillera
- Concentración de vientos fuertes en los valles de Maipo y Aconcagua
- 'Pozos' de viento débil en algunas cuencas
- Convergencia en los valles de la Cordillera (debido del efecto térmico en las montañas)
- Vientos catabáticos (*downslope*) en la Cordillera durante la noche.
- Regiones de vientos muy fuertes en el lado sotavento de la cordillera (principalmente en Argentina)
- Regiones de alternancia entre intensificación y disminución de viento a lo largo de la costa.

Estas características implican que el transporte de masas de aire en la Macrozona es complejo, y se requieren técnicas sofisticadas para abordar el tema, como por ejemplo el análisis de trayectorias que se aplica en la siguiente sección.

01:00 Hora Local

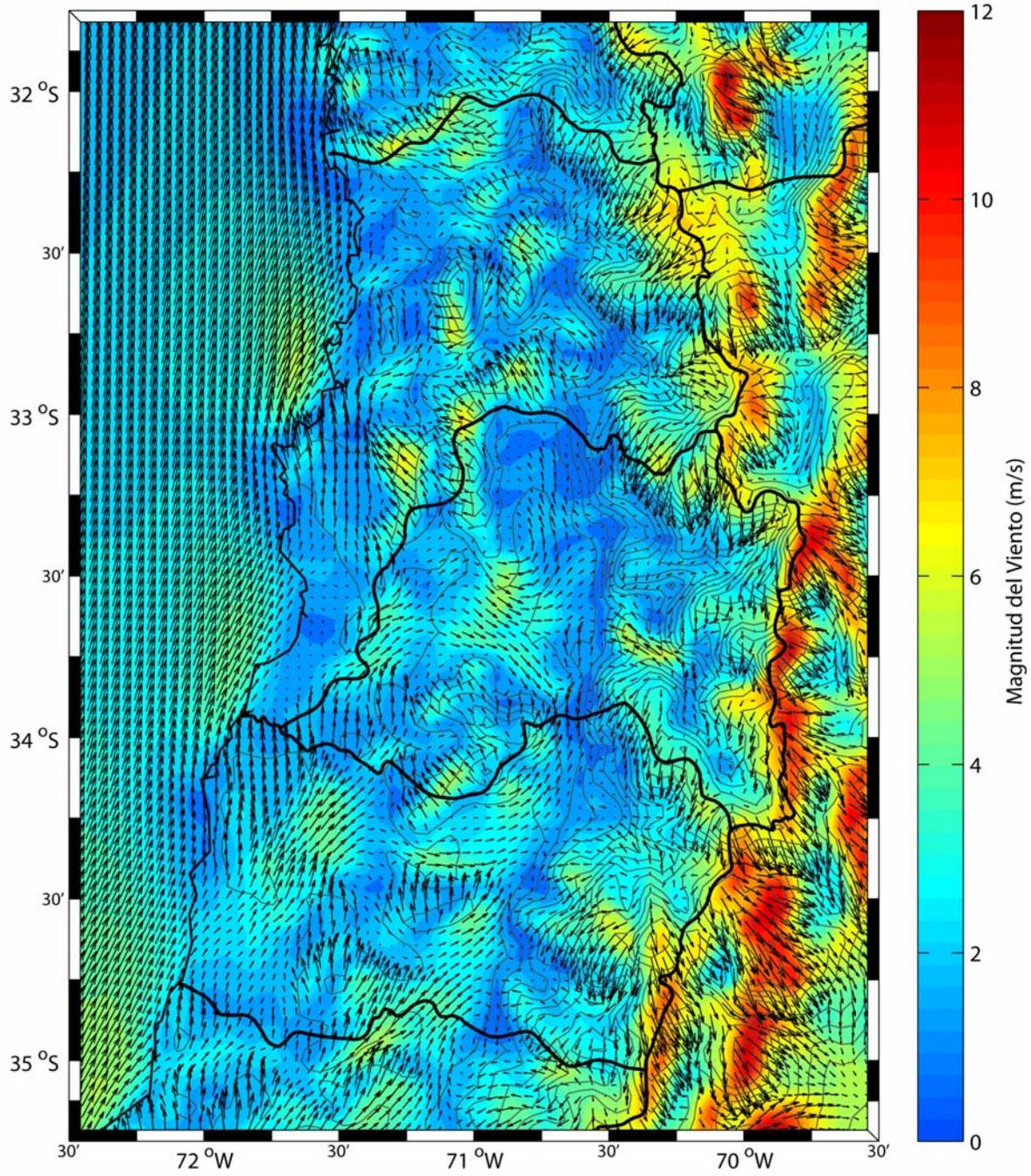


Figura 8.1: Campo de viento promedio estival en las 01:00 horas.

04:00 Hora Local

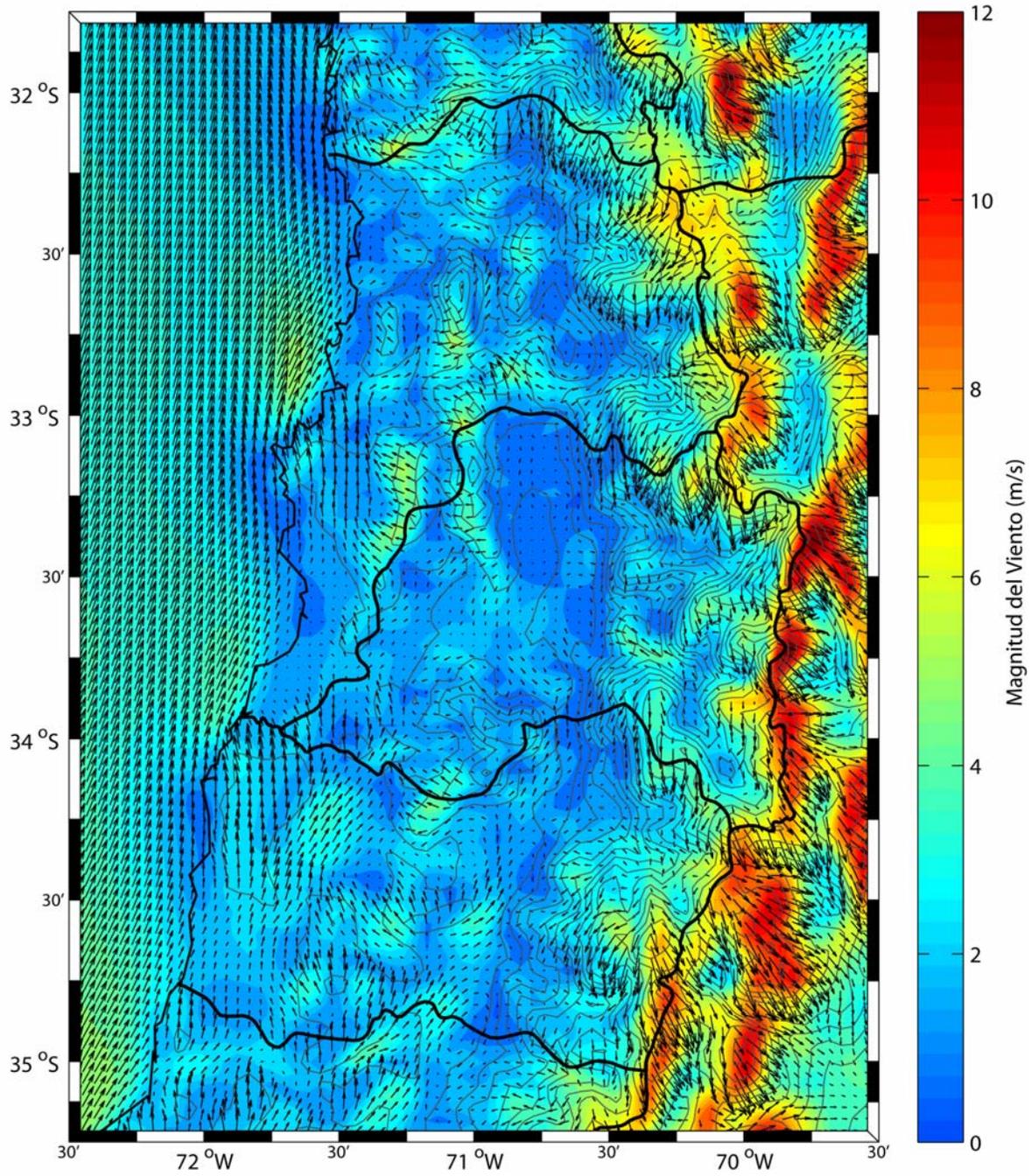


Figura 8.2: Campo de viento promedio estival en las 04:00 horas.

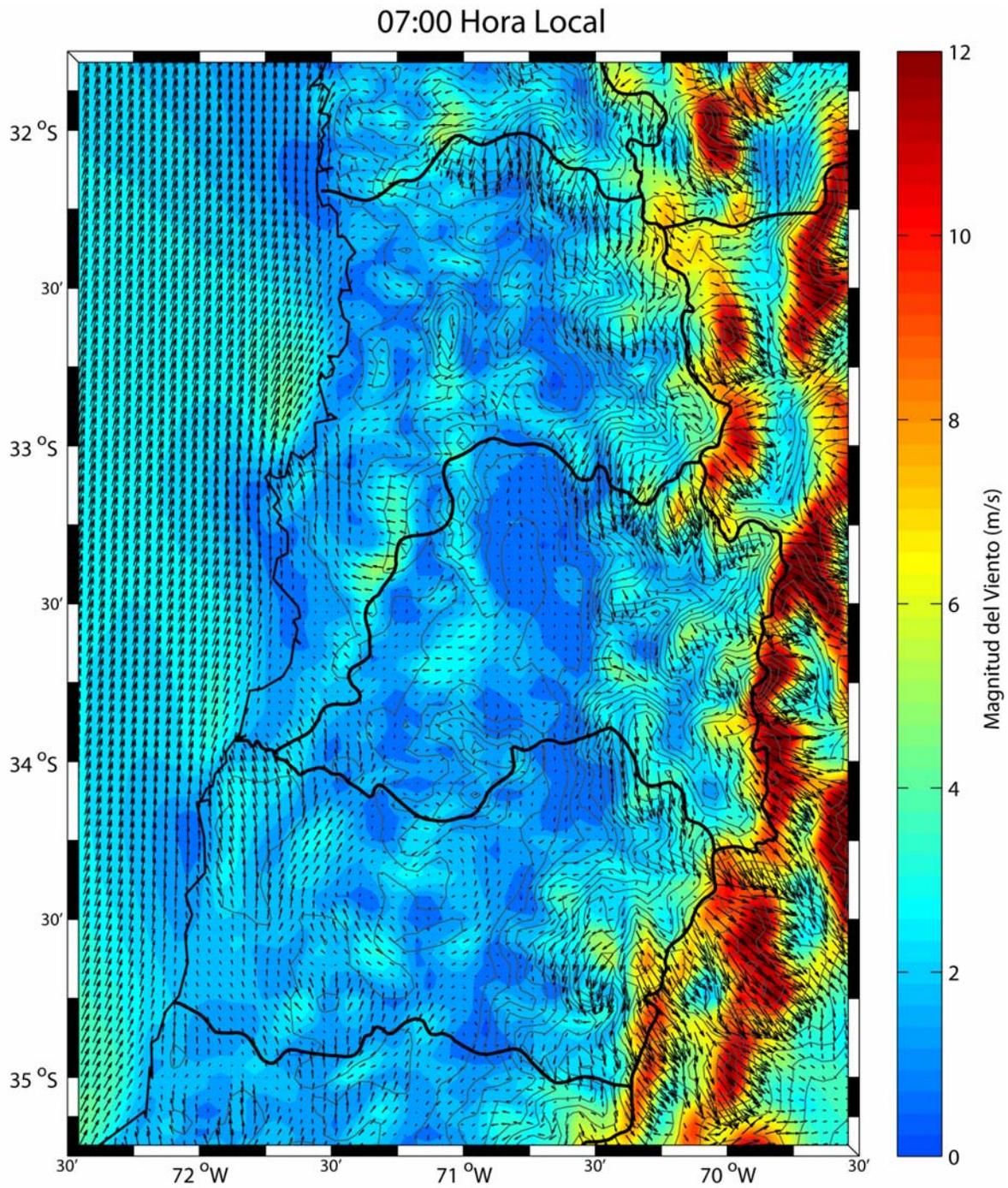


Figura 8.1

3: Campo de viento promedio estival en las 07:00 horas.

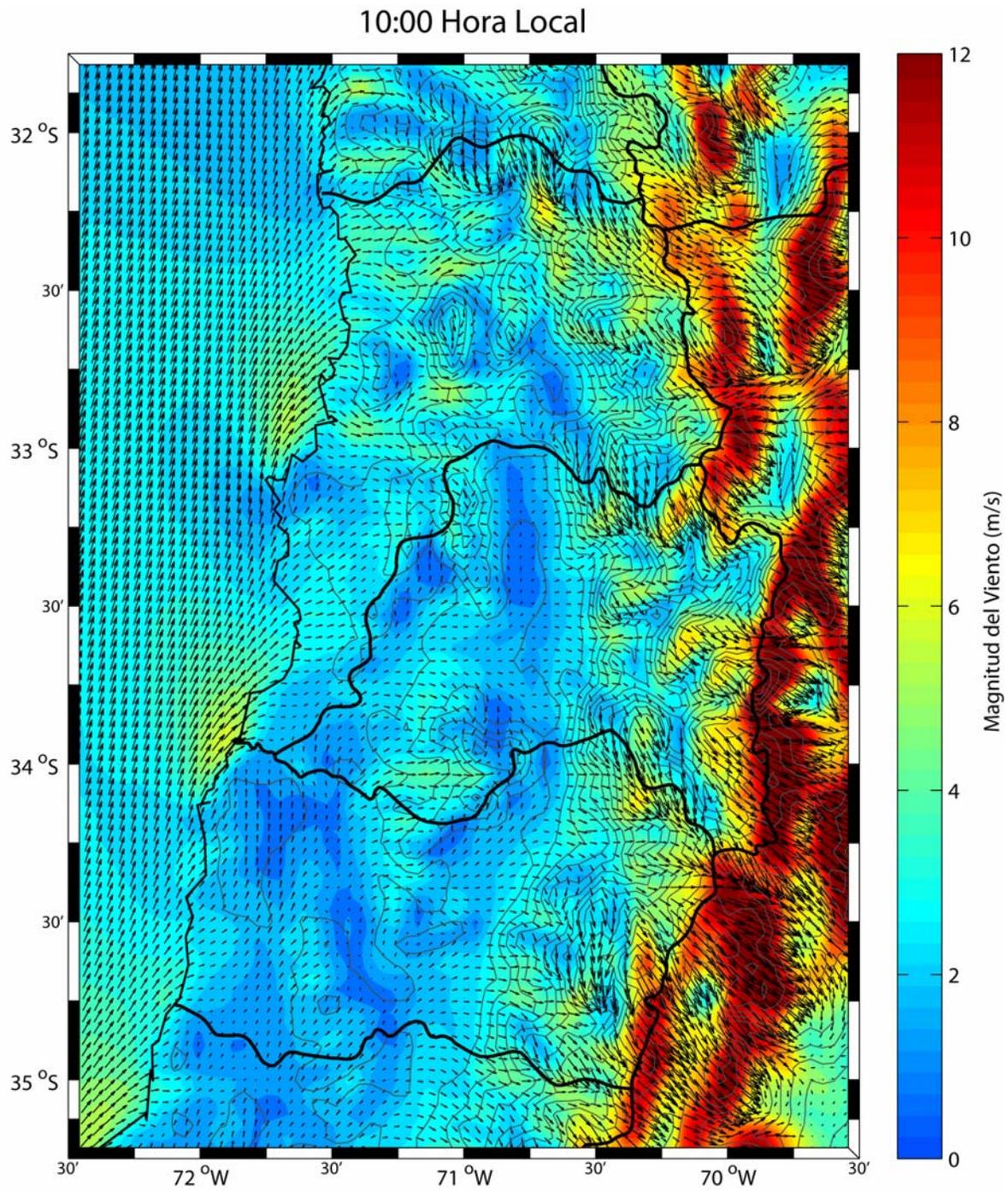


Figura 8.4: Campo de viento promedio estival en las 10:00 horas.

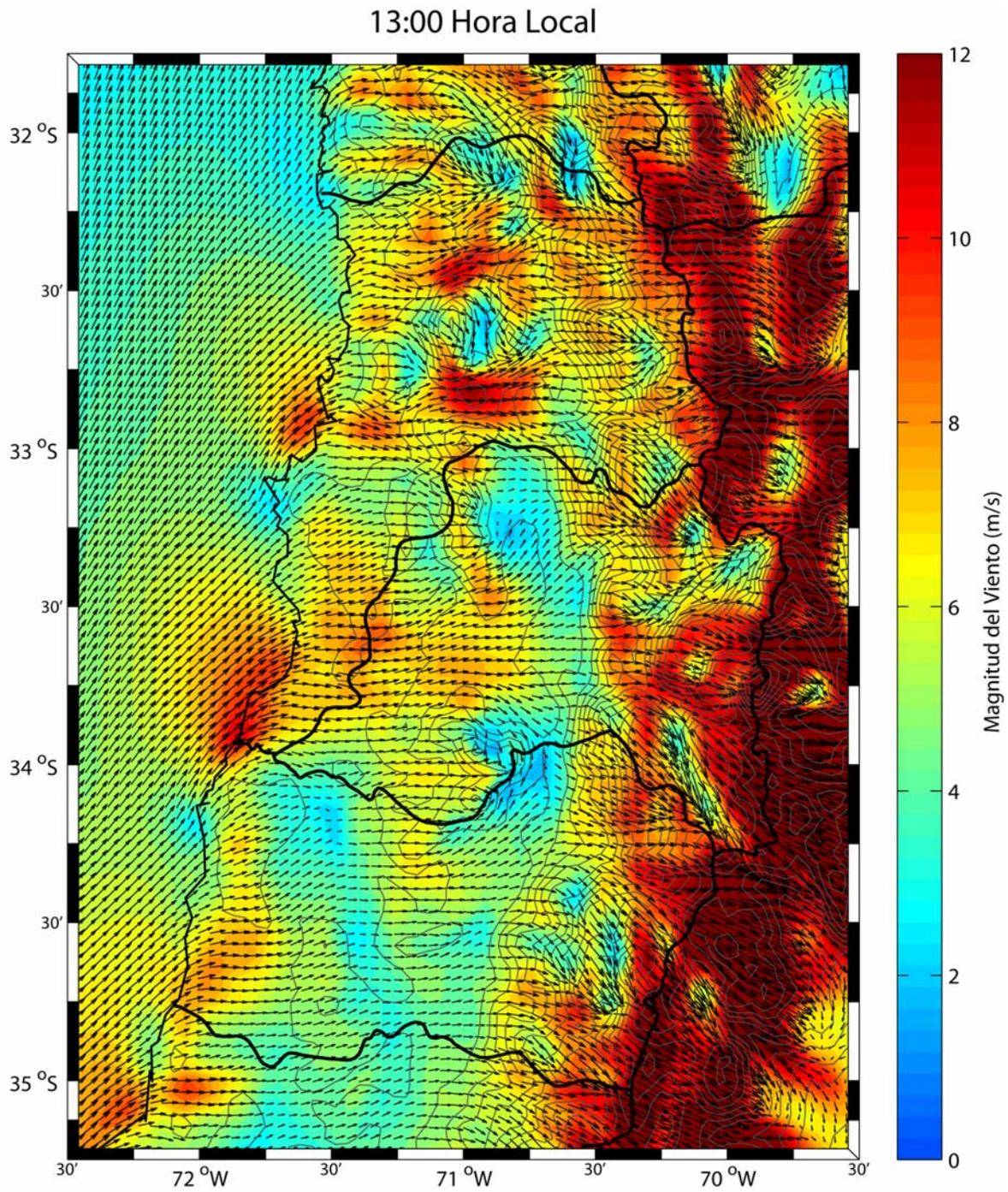


Figura 8.5: Campo de viento promedio estival en las 13:00 horas.

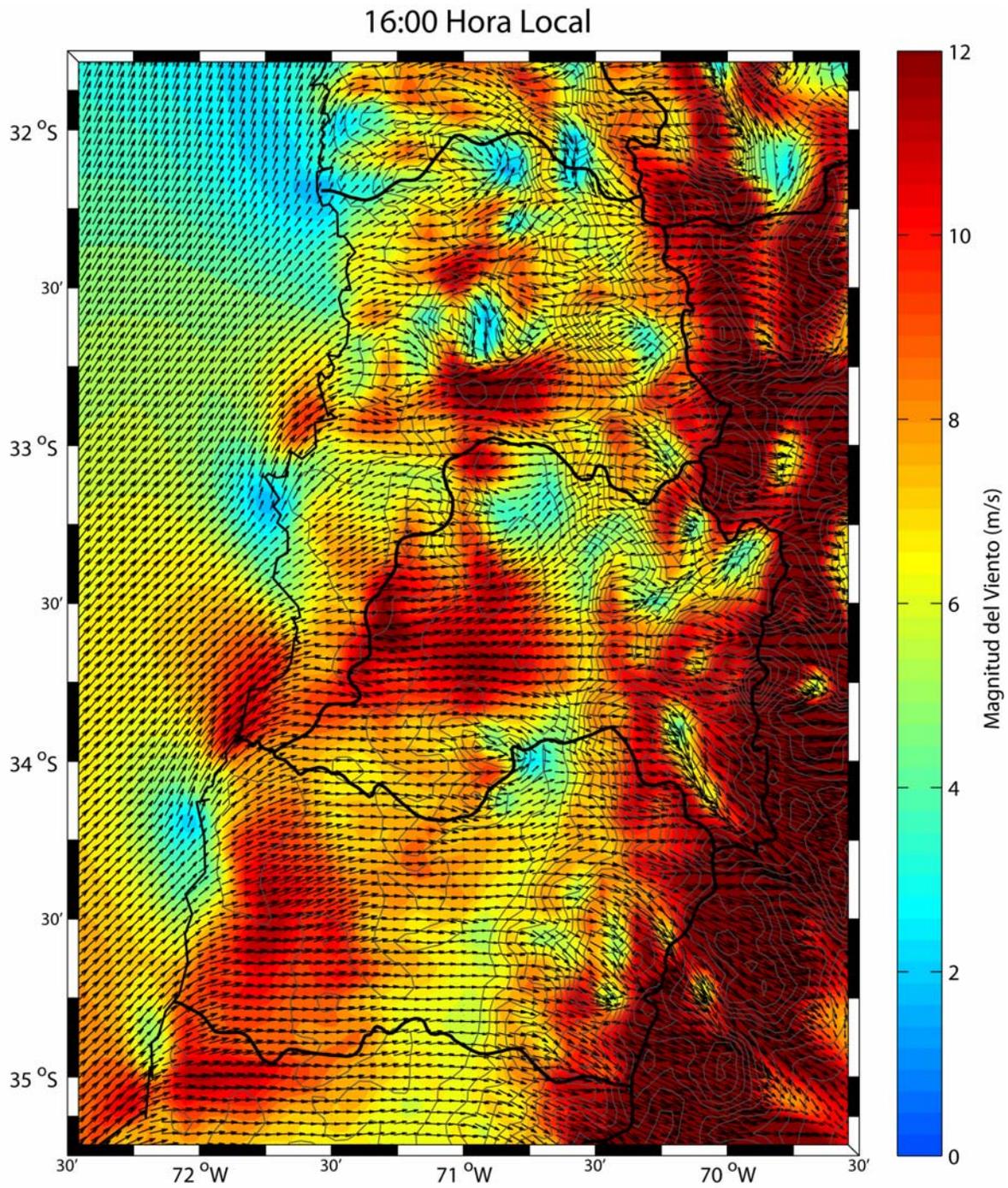


Figura 8.6: Campo de viento promedio estival en las 16:00 horas.

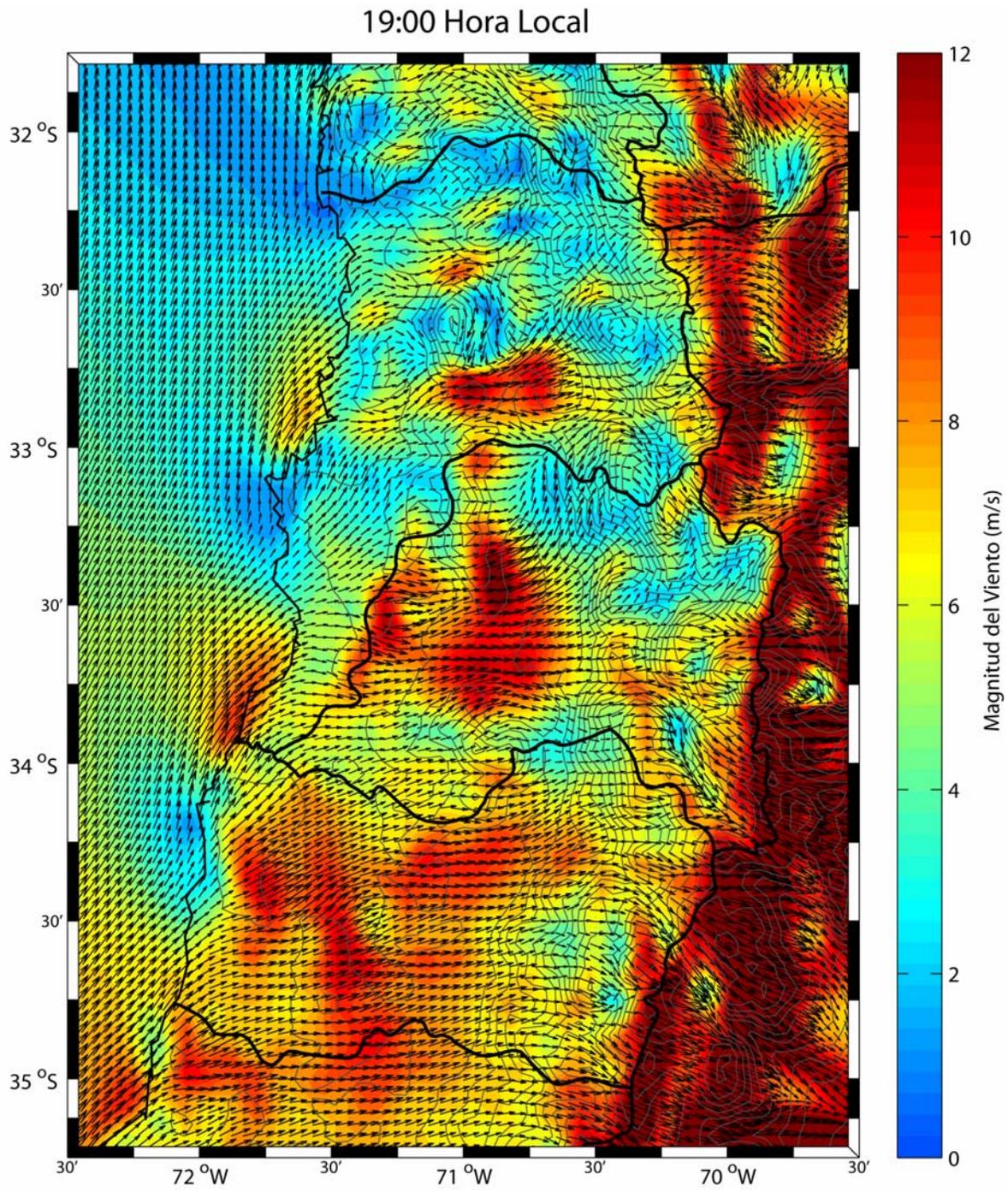


Figura 8.7: Campo de viento promedio estival en las 19:00 horas

22:00 Hora Local

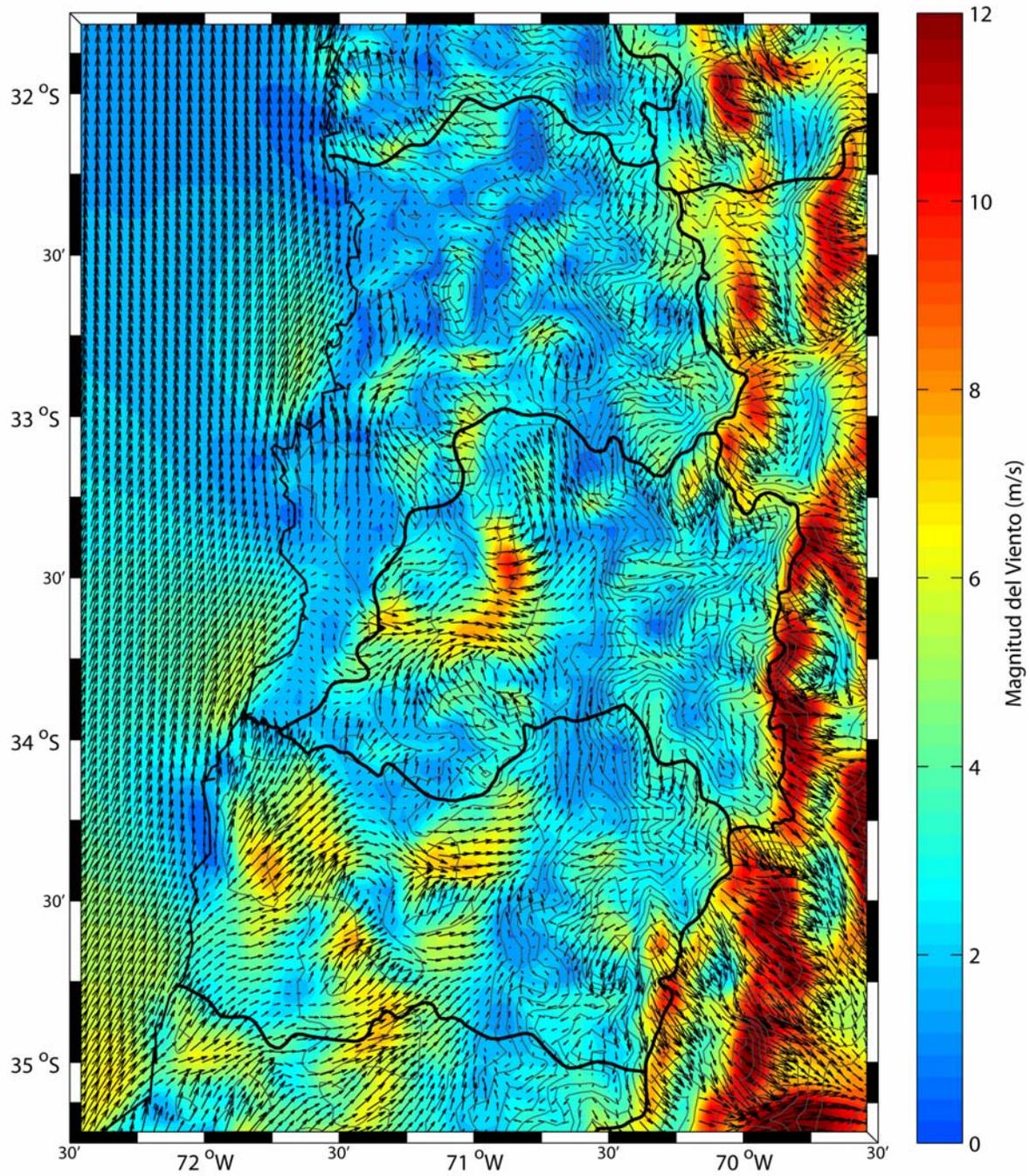


Figura 8.8: Campo de viento promedio estival en las 22:00 horas.

8.2 Análisis de Trayectorias

El transporte de las masas de aire desde un cierto punto se puede analizar rigurosamente a través de un análisis de trayectorias. Una trayectoria describe el conjunto de todas las posiciones por las que pasa una partícula, desde que parte desde su origen, debido a la advección atmosférica (transporte por el viento). Un modelo numérico (como el modelo WRF) genera campos de viento tri-dimensionales, los que permiten realizar cálculos de trayectorias muy precisos. De esta manera, con los datos meteorológicos generados en este proyecto es posible responder en forma cuantitativa preguntas como por ejemplo ¿a dónde va el aire que parte del Gran Valparaíso? (en este caso se refiere a trayectorias hacia adelante) o ¿de dónde viene el aire que llega a la cuenca de Santiago? (en este caso se refiere a trayectorias hacia atrás). En esta sección, se considera el comportamiento de trayectorias hacia adelante, emitidas de cinco áreas de interés general en la Macrozona: Santiago, Valparaíso, San Antonio, Los Andes y Rancagua. (La base de datos de WRF permitiría el cálculo de trayectorias en cualquier parte del dominio computacional del modelo.)

El análisis se restringe a horas durante el día. Como se ha visto en las secciones anteriores los vientos en la macrozona son significativamente más fuertes durante el día y, por lo tanto la gran parte del transporte del aire ocurre entre la mañana y la tarde (07:00 - 21:00). Los flujos nocturnos son también interesantes, pero más bien para escalas espaciales más pequeñas. Además, considerando que este proyecto apunta al problema del ozono, que en su formación es un contaminante asociado a la radiación solar.

A modo de ejemplo, la figura 8.19 presenta trayectorias que comienzan en las ciudades anteriormente mencionadas. En cada ciudad se considera una 'nube' de 50 partículas, cada cual comienza su trayectoria entre las horas 06:00 a 08:00 de la mañana entre 30 y 100 metros de altura. Estas partículas se mueven con el viento durante un periodo de 12 horas (hasta las 19:00 en la tarde, aproximadamente). Aunque no se muestra en la figura, las trayectorias se calculan considerando la velocidad tri-dimensional y por lo tanto, algunas de ellas terminan varios miles de metros sobre la superficie. Incluso con este ejemplo de un solo día, se puede apreciar que existe la posibilidad de inter-cambio de aire entre regiones. Por ejemplo varias de las trayectorias partiendo desde Valparaíso y San Antonio pasan por sobre la cuenca de Santiago. Las diferencias en las características de las trayectorias de los distintos puntos también son notables. En Santiago por ejemplo, las trayectorias son muy uniformes, y mueven en conjunto hacia el norte-este por la valle del Mapocho y luego hacia el sur-este con el viento en la troposfera libre. En otros casos la distribución es más compleja; por ejemplo desde Rancagua o San Antonio se puede apreciar una bifurcación de las trayectorias. Esta bifurcación se manifiesta de manera tal que, después de un cierto tiempo en el cual todas las partículas se mueven en la misma dirección, parece que existen dos direcciones bastante definidas en las cuales las partículas se pueden mover. Finalmente, en el caso de Valparaíso hay una gran dispersión de las trayectorias, que significa que las partículas con origen en esta ciudad pueden llegar desde el sur de Santiago hasta la frontera norte de la Región IV.

Debido a la gran variabilidad de las trayectorias, una caracterización completa de los flujos de masa de aire en un área del tamaño como la Macrozona requiere el cálculo de un gran número de trayectorias. (Esta variabilidad depende de la variabilidad meteorológica, la topografía y distintas alturas de origen.) En este análisis se calcularon trayectorias para cada día de las simulaciones

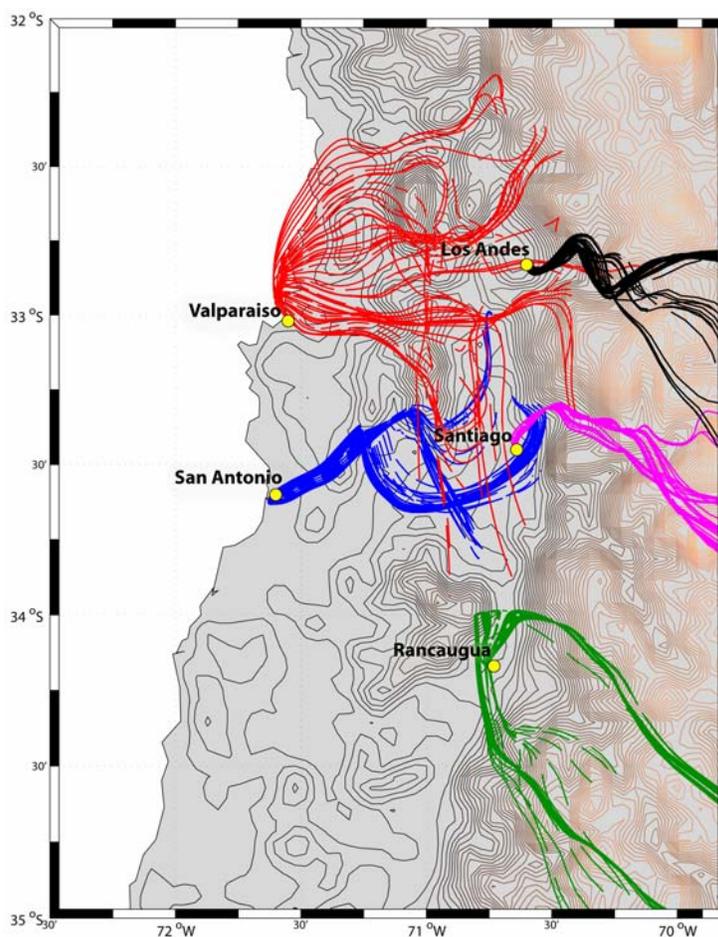


Figura 8.9: Ejemplo de trayectorias calculadas para el día 2 de Enero 2002, emitidas de cinco ciudades en la Macrozona (Santiago (violeta), Valparaíso (rojo), Rancagua (verde), San Antonio (azul) y Los Andes (negro))

meteorológicas de WRF partiendo en la mañana a las 05:00, 08:00 y 11:00 horas y en tres alturas distintas: 25m, 70m y 200m, lo que resultó en un total de más de 3 millones de trayectorias.

Las figuras 8.10 – 8.14 visualizan estas trayectorias en términos de la evolución temporal de una nube de ‘partículas’ (puntos azules) que parten de varios puntos dentro de un área limitada (puntos rojos). Las partículas se emitieron a las horas 05:00, 08:00 y 11:00. Los paneles superiores de las figuras muestran la evolución horizontal de las partículas en el tiempo en intervalos de tres horas. A modo de ejemplo, el primer diagrama una hora después del comienzo; es decir, dado que las partículas se emitieron a las 05:00, 08:00 y 11:00, el diagrama muestra donde se encuentran una hora después a las 06:00, 09:00 y 12:00; el segundo diagrama muestra su ubicación tres horas después del primer diagrama (09:00, 12:00 y 15:00), etc. Los paneles inferiores a la vez muestran la evolución en un plano bi-dimensional (vertical-horizontal) , indicando la posición horizontal y la *altura* de las partículas; también en este caso se consideran intervalos de tres horas.

La figura 8.10 muestra las trayectorias que parten dentro de un área representativa del Gran Valparaíso y la parte baja del valle de Aconcagua. El primer diagrama (arriba-izquierda) muestra todas las partículas una hora después de su comienzo. Como se podía esperar, debido a los vientos débiles en las horas de la mañana, las trayectorias en ese momento quedan bastante cerca de su punto de origen. Sin embargo, sólo tres horas después (9-15 horas) una dispersión significativa ya ha ocurrido. Efectivamente todas partículas se mueven hacia el oeste; sin embargo, también hay una componente de dispersión considerable hacia el norte y hacia el sur. Una cantidad significativa de partículas se encuentran en la parte al norte del valle de Aconcagua, también en la cuenca de Santiago y a lo largo de la costa norte de Valparaíso. En la tarde, entre (12:00 – 18 horas), las partículas se han dispersado dentro de una gran parte de la Macrozona, con concentraciones más altas en la pre-Cordillera de la Región V y la Región Metropolitana. Es decir, las trayectorias demuestran un transporte de aire importante desde la costa hacia el interior. Los diagramas en la fila de abajo de la figura 8.10 representan la dispersión en un plano bi-dimensional (vertical-horizontal). (El perfil topográfico también está incluido.) Aunque todas las partículas provienen de niveles por debajo de 200 m, se aprecia que la nube de partículas se expande verticalmente en su movimiento hacia el este. Después de siete horas las partículas se encuentran en la atmósfera arriba de las cuencas de Santiago y Los Andes, desde la superficie hasta 2000m de altura aproximadamente.

En el caso de Santiago (figura 8.11), la situación a una hora del comienzo de las trayectorias es similar a la de Gran Valparaíso; el grado de dispersión es despreciable. Sin embargo, en el transcurso del día, la situación cambia significativamente. La situación para Santiago (Figura 8.11) es distinta. Las partículas mueven rápidamente hacia el este y fuera del dominio. Solamente algunas pocas se mueven hacia las Regiones V y VI.

Las figuras 8.12, 8.13 y 8.14 muestran las trayectorias para Rancagua, Los Andes y San Antonio, respectivamente. La evolución de las trayectorias en Rancagua es similar a la situación en Santiago. Las partículas se mueven rápidamente hacia el este, la gran mayoría pasando por sobre la Cordillera y entrando a terrenos argentinos. Algunas partículas se mueven hacia el norte y entran a la cuenca de Santiago, pero su cantidad es relativamente pequeña comparado con las que entran a la cuenca de Santiago desde la costa. Desde Los Andes, la mayoría de las trayectorias pasan por la Cordillera, concentrándose en el Valle de Aconcagua. Algunas partículas se dirigen hacia el sur llegando a la cuenca de Santiago pero, como en el caso de Rancagua, la cantidad de ellas es mínima. En San Antonio se ve un resultado similar al resultado para Valparaíso: Una dispersión de partículas orientadas principalmente hacia la Cordillera, en la cual unas horas son suficientes para transportar el aire costero hasta la cuenca de Santiago.

En resumen, el análisis de trayectorias muestra que existe intercambio de masa de aire a nivel inter-regional dentro de la Macrozona. Sin duda, el transporte más importante se observa desde la costa en la Región V hasta la Región Metropolitana. Además, esas masas de aire llegan durante un periodo del día importante para tener un impacto en la formación de ozono (en la tarde del día). Por otra parte, las trayectorias desde las Regiones VI y RM muestran un potencial bajo en términos de transporte de contaminantes a otras regiones; más bien el transporte es hacia terrenos argentinos.

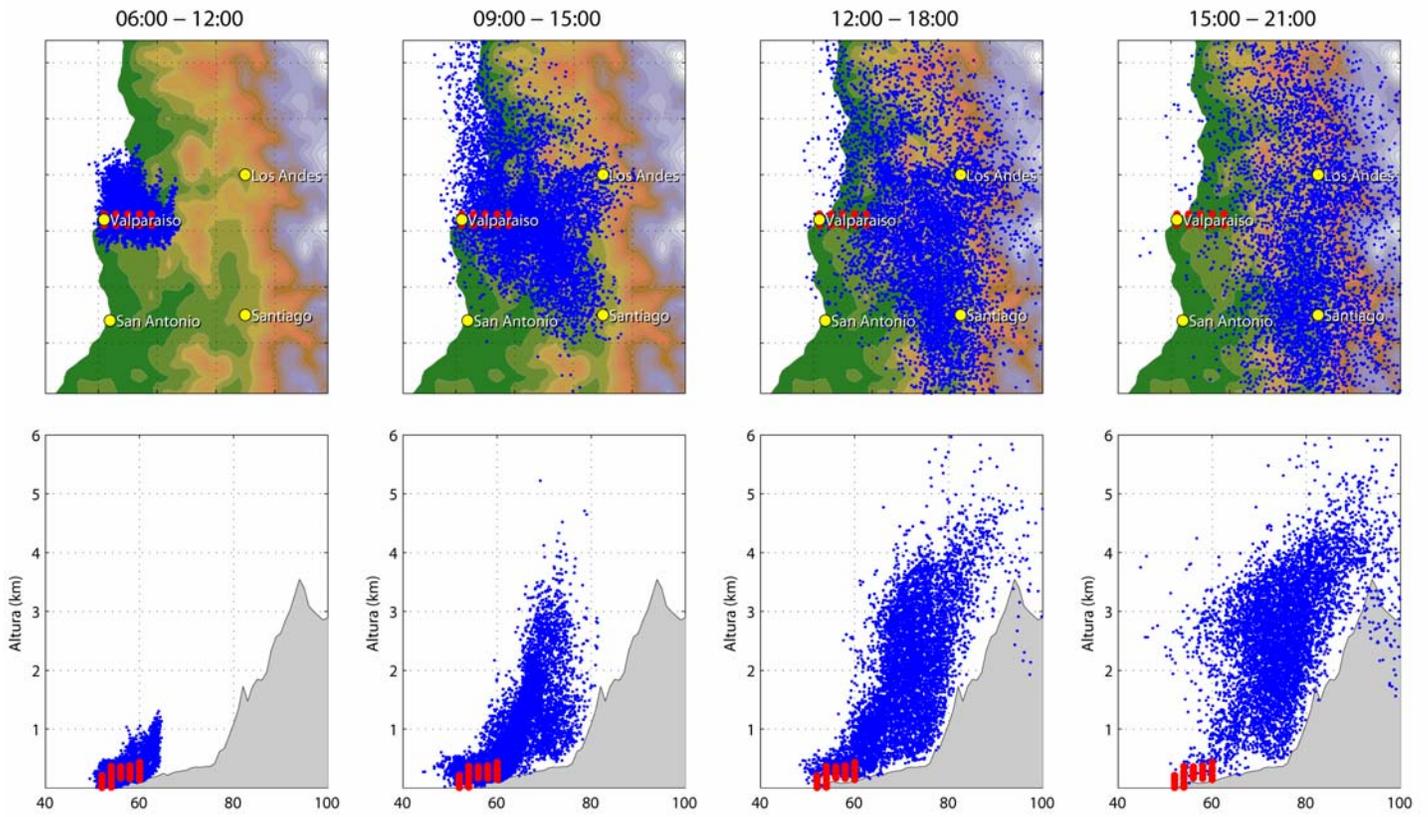


Figura 8.10: Evolución temporal de trayectorias partiendo desde el área del Gran Valparaíso y la parte baja del valle Aconcagua.

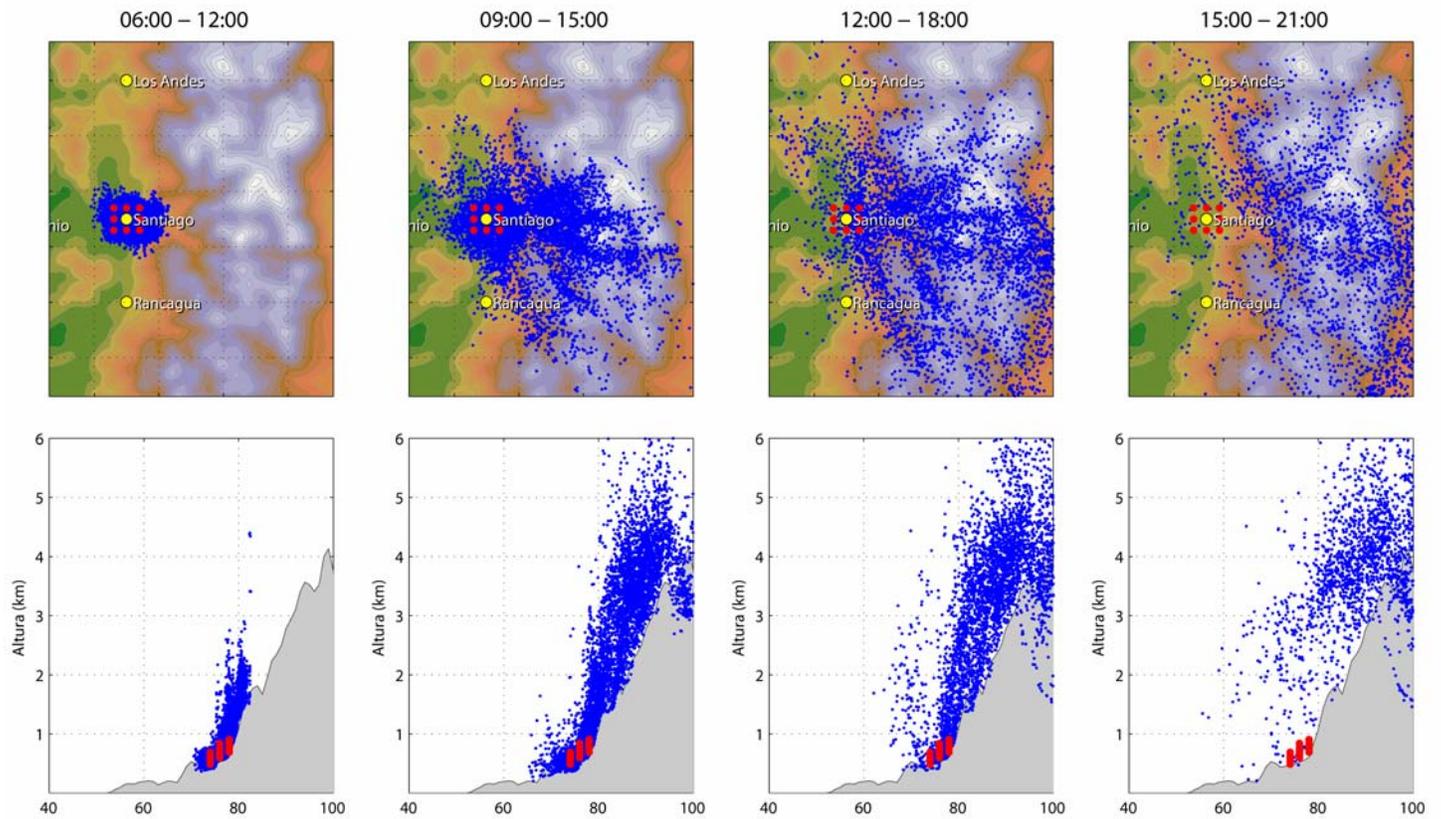


Figura 8.11: Evolución temporal de trayectorias partiendo desde Santiago.

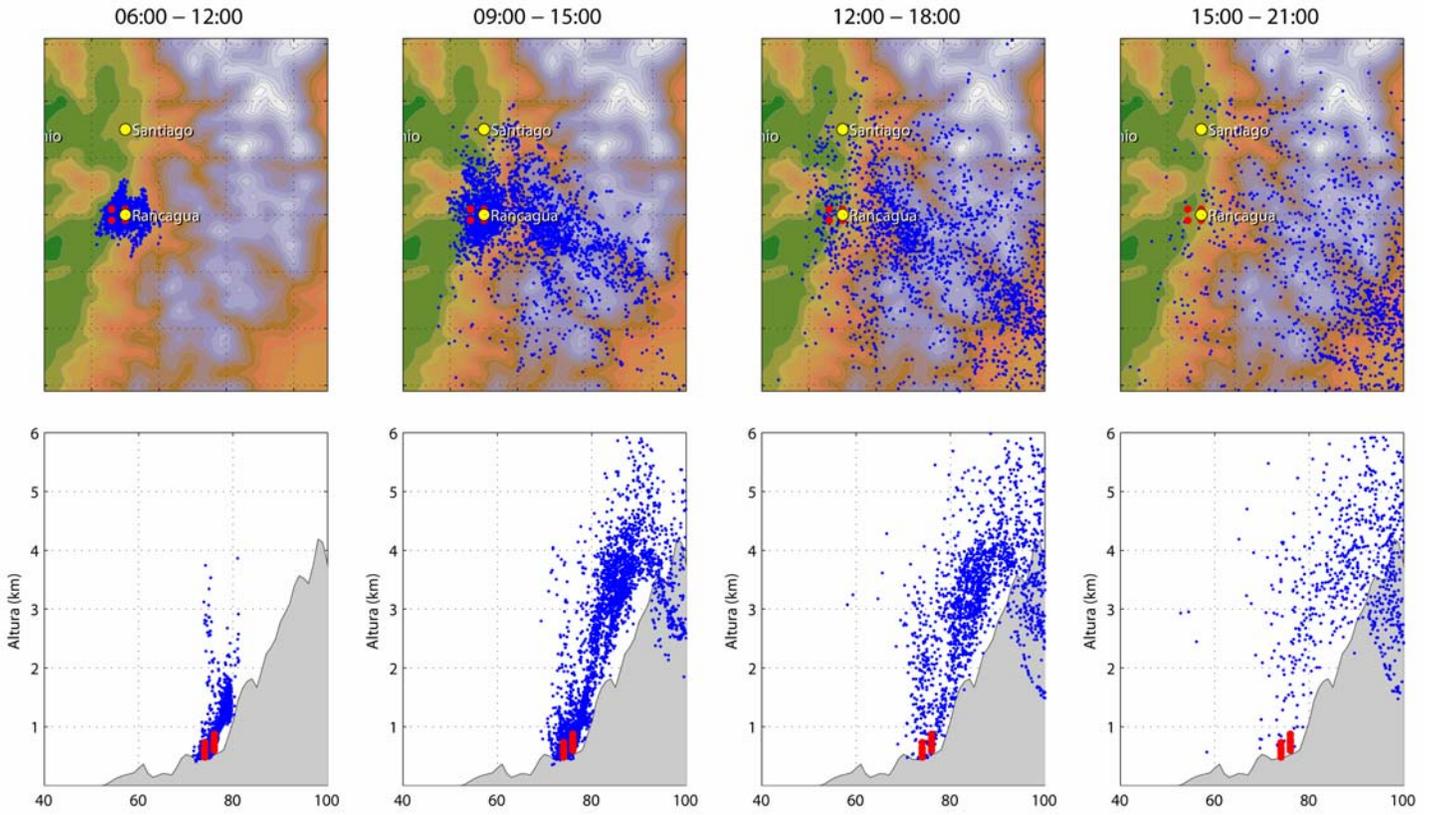


Figura 8.12: Evolución temporal de trayectorias partiendo desde Rancaagua

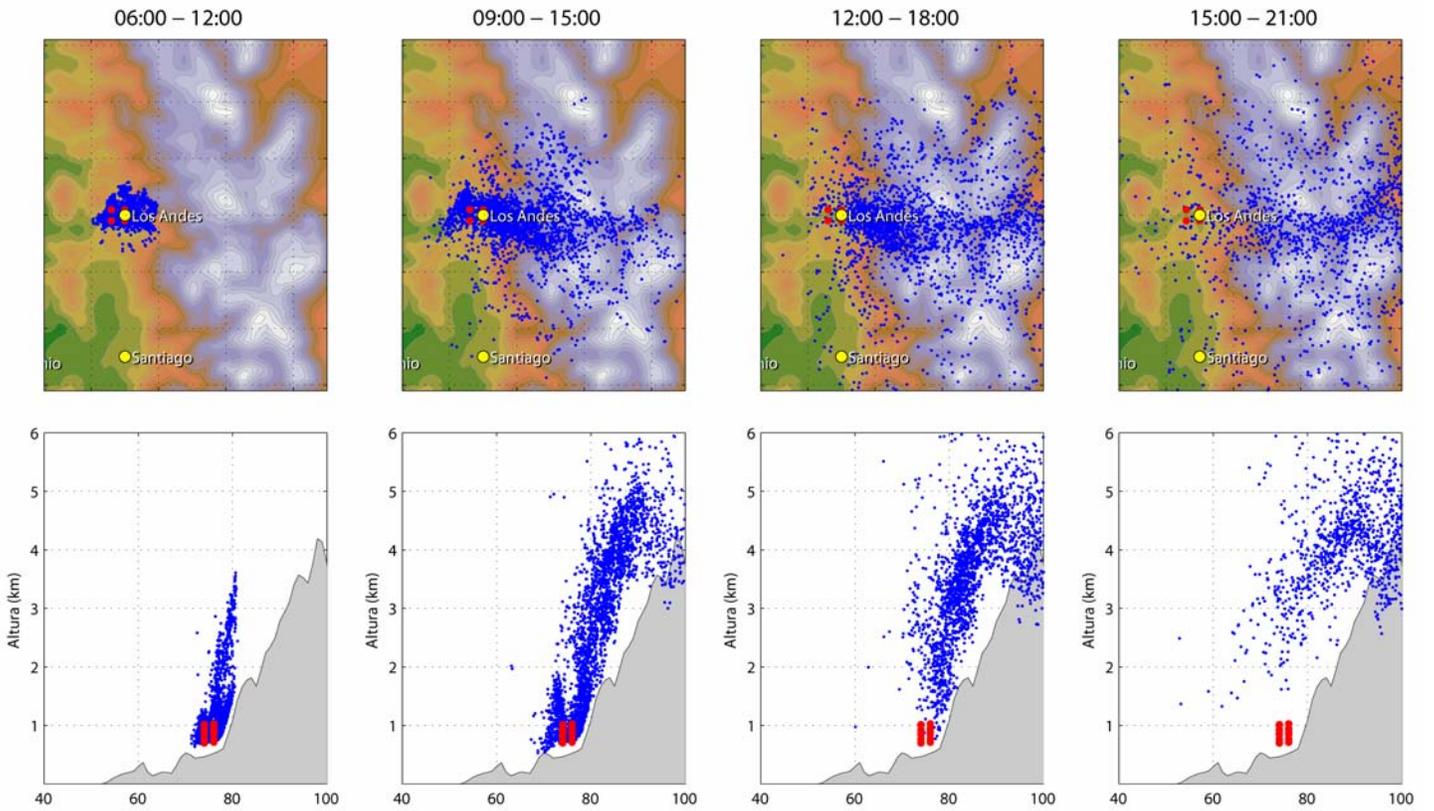


Figura 8.13: Evolución temporal de trayectorias partiendo desde Los Andes

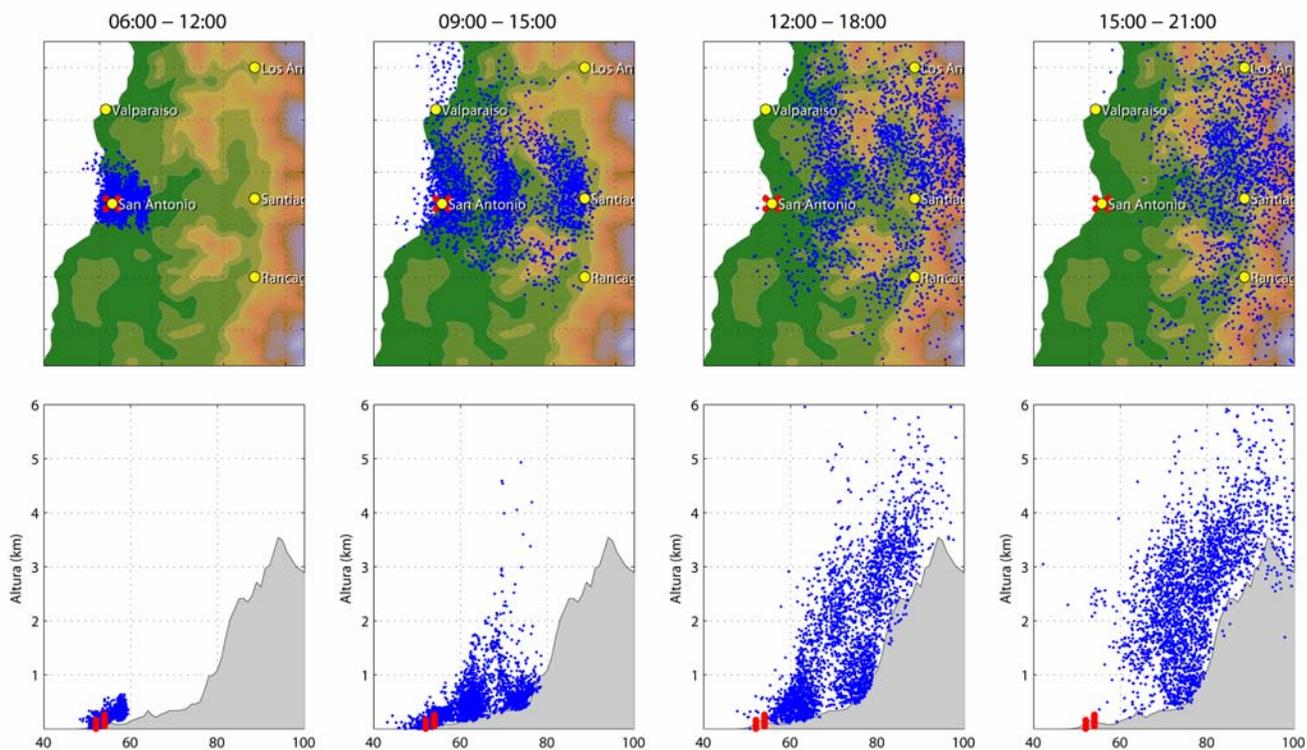


Figura 8.14: Evolución temporal de trayectorias partiendo desde San Antonio

8.3 Dispersión de un Trazador

Las simulaciones meteorológicas no consideraban la fotoquímica; sin embargo, para ayudar el análisis de dispersión en la Macrozona estaba incluido un trazador inerte (nominalmente CO). Este trazador se emitía en las zonas más pobladas dentro la Macrozona. La Figura 8.15 indica la ubicación de los puntos “emisores”. En el modelo contemplaba para cada región un trazador distinto (cada uno de la característica de CO) que se emitía continuamente y a una tasa constante. De esta manera, era posible, identificar la presencia del trazador de la Región VI en las Regiones V y RM, de la Región V en las VI y RM y de la Región RM en las V y VI.

En la figura 8.16 se muestra la dispersión de los trazadores emitidos (en superficie) de las tres regiones. Como se esperaba, las concentraciones son significativamente más altas en los entornos cercanos de las puntos emisores. Sin embargo, hay claras señales de procesos de transporte desde la costa hacia el valle interior. En las ciudades costeras (Valparaíso y San Antonio) por ejemplo, el patrón de dispersión en la tarde está notablemente alargado hacia la dirección oeste-este. Este resultado confirma lo observado en el análisis de trayectoria, que el mayor potencial de intercambio de masas del aire a nivel inter-regional existe desde la Región V hacia la RM.

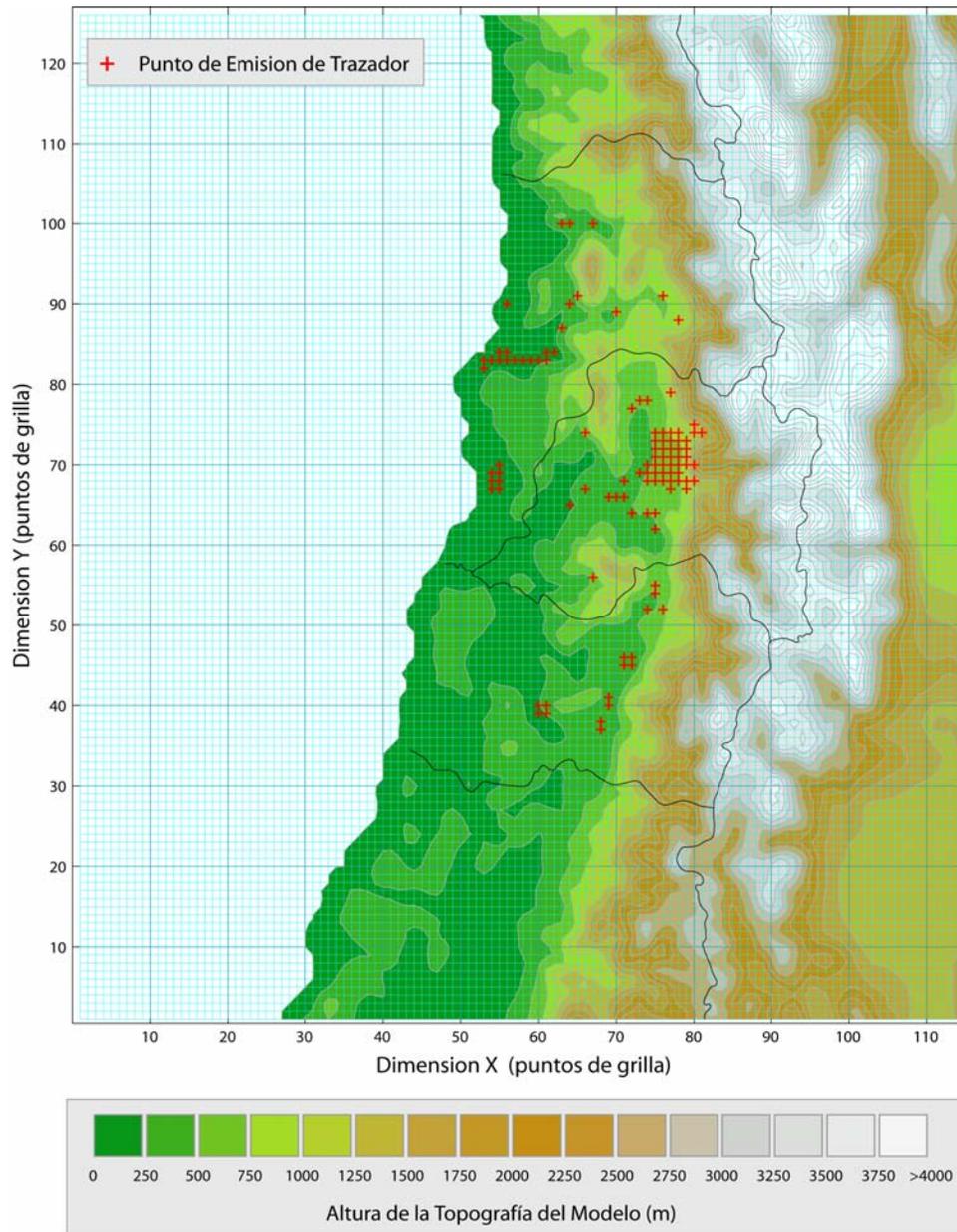


Figura 8.15: Ubicación de los puntos “emisores” (cruces rojas) de los trazadores. Estos puntos corresponden a las zonas más pobladas de la Macrozona.

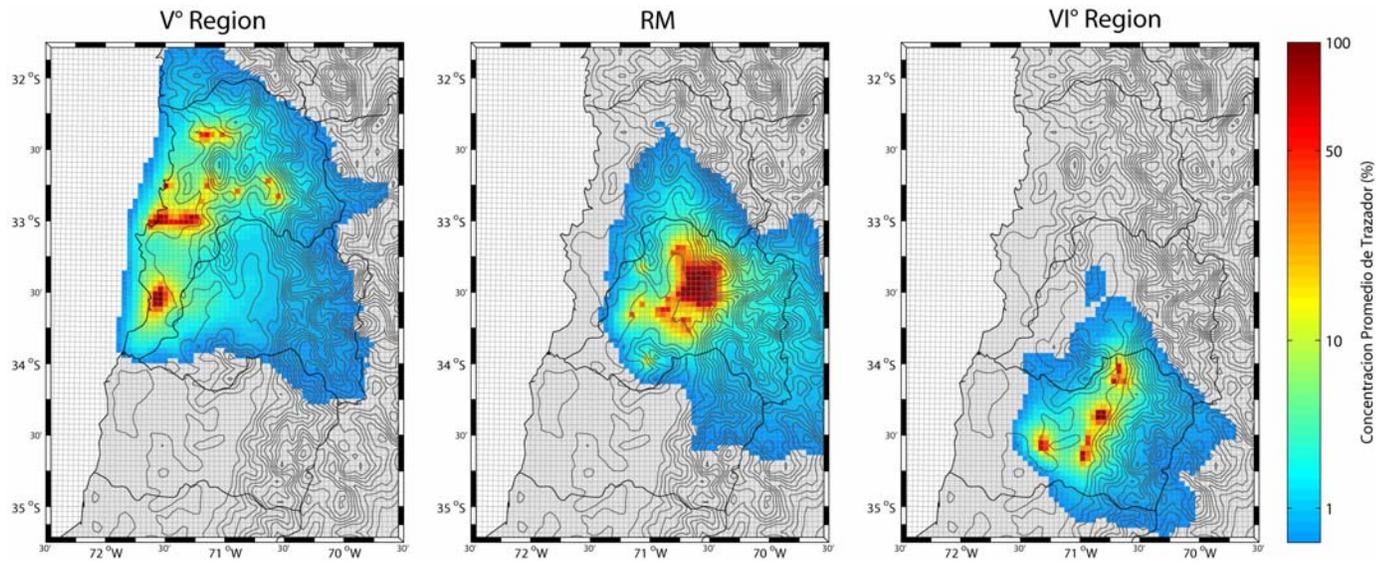


Figura 8.15: Campo promedio en 25m de los trazadores emitidos de las regiones de la macrozona. La cantidad de trazador se expresa relativa a la concentración encima de las fuentes de emisiones.

9 Análisis de inventarios de emisiones

Una manera de analizar y evaluar los inventarios de emisiones, es su aplicación dentro de un modelo numérico fotoquímico (como por ejemplo WRF/Chem). Idealmente, la evaluación se desarrolla en un proceso iterativo. Este proceso consistiría en i) la aplicación de los inventarios en el modelo y ii) en la comparación de los resultados del modelo con las observaciones. La comparación entre el modelo y las observaciones indicaría posibles errores en los inventarios (suponiendo un modelo perfecto); la corrección de estos errores, a la vez, iniciaría una nueva iteración mediante la aplicación de los inventarios corregidos. Este proceso apuntaría a una minimización del error entre el modelo y las observaciones.

Dentro de este proyecto, no fue posible hacer muchas iteraciones por dos razones principales: 1) las observaciones con las que se compararían los resultados del modelo deberían tener una buena cobertura espacial y algunos de ellos una buena especiación de los COV. Los datos disponibles no cuentan con ninguno de esos requisitos; y 2) las simulaciones del modelo deberían cubrir un cierto plazo temporal, para asegurar su significancia estadística; para el caso del ozono se podría estimar este plazo, en una primera aproximación, en un mes. Considerando alrededor de 10 como un número total de iteraciones razonable, lo anterior significaría diez meses de simulaciones, lo que estaba fuera de las posibilidades de este proyecto.

Dadas estas restricciones, se limitó la evaluación dentro de este proyecto a una de carácter más bien cualitativo con algunas pocas pruebas de simulación (de un largo temporal de unos días). En lo que sigue, se describen primero los inventarios originales en términos de las características de NO_x y COVs para fuentes móviles y areales. (No se incluyen en este análisis las fuentes fijas, dado que los problemas principales se detectaron en los dos otros tipos de fuentes). La descripción de los inventarios se hace a través de mapas bidimensionales, que muestran campos promedios de 24 hrs de las emisiones. Las grillas tienen una resolución de 4x4 km, y las emisiones se presentan en unidades de mol/hr/km²¹. Cabe señalar, además, que el análisis cualitativo es más bien de carácter subjetivo al no contarse ni con el detalle de la información ni con el tiempo para una revisión más exhaustiva y de mayor carácter cuantitativo.

Finalmente, para una mejor visualización de los campos, se optó por mantener una escala óptima para cada gráfico, a expensas de una comparabilidad óptima entre un gráfico y otro.

¹ Se podría trabajar con gr/mol/hr en vez mol/hr/km². Sin embargo, los inventarios de emisiones trabajan en términos de moles. Además, transformar las unidades a masa significa que el resultado depende de la mezcla de las emisiones. Por ejemplo, emisiones de un mol de butano tienen dos veces más masa que un mol de etano. Considerando que existe una variabilidad espacial en la composición de las emisiones, no sería fácil de interpretar esos campos bi-dimensionales si se presentaran en términos de masa.

9.1 Inventarios originales

NOx totales originales

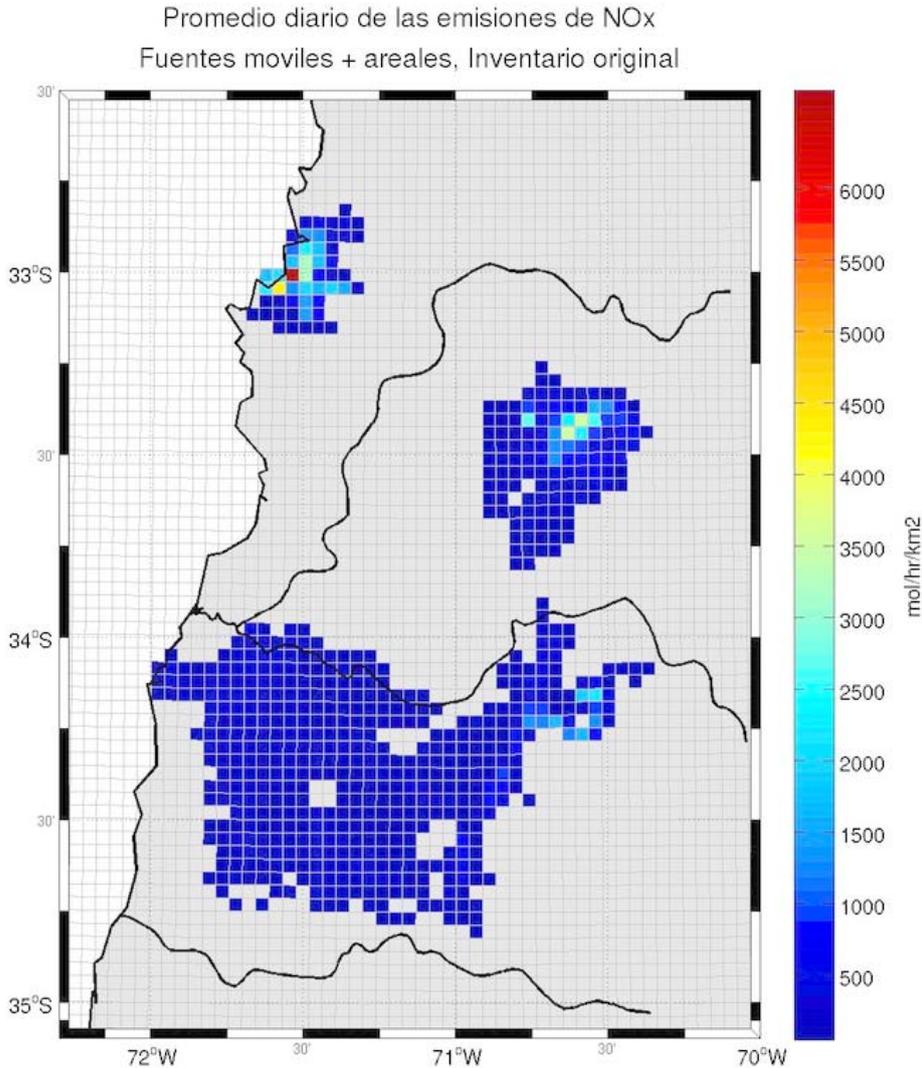


Figura 9.1: Promedio diario de las emisiones totales de NOx (fuentes móviles y areales).

La figura 9.1 muestra el promedio de 24 hrs de las emisiones de los NOx totales (móviles + areales) según los inventarios originales. Dado que para la V Región solamente se contaba con emisiones del Gran Valparaíso, las emisiones se limitan a esta área. Sin embargo, a pesar de que para las otras dos regiones, VI y RM, se contaba con inventarios que las cubren completamente, se nota claramente la diferencia entre ellas. En la Región RM, las emisiones de NOx se limitan a la zona urbana, mientras que en la VI Región se extienden desde la Cordillera de los Andes hasta partes de la costa. En términos de magnitud, se notan los valores máximos dentro de los centros urbanos (Gran Valparaíso, Santiago y, hasta un cierto punto, Rancagua). El máximo se observa en Gran Valparaíso, con un valor alrededor dos veces más alto que el máximo en Santiago. Lo que sorprende de la figura 9.1, son principalmente los valores muy altos en Valparaíso y la diferencia en distribución entre las regiones VI y RM. Para comprender mejor estas diferencias y sus orígenes, se debería examinar con mayor detalle los dos tipos de fuente que contribuyen a estos campos en forma separada: las fuentes móviles y las areales.

NOX móviles

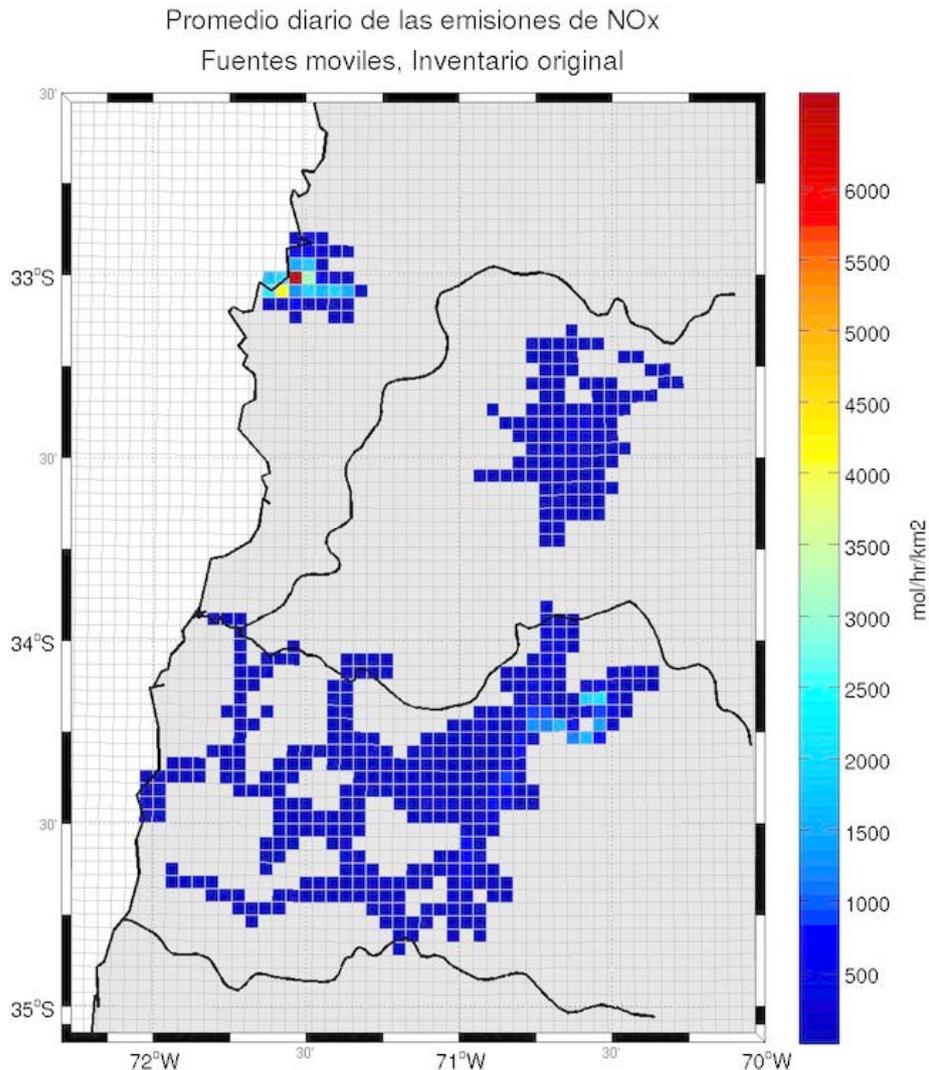


Figura 9.2: Promedio diario de las emisiones de NOx de fuentes móviles.

La figura 9.2 muestra las emisiones de NOx por parte de las fuentes móviles. Nuevamente, saltan a la vista dos fenómenos: i) emisiones relativamente bajas en Santiago (en relación a las otras dos regiones) y ii) emisiones que se extienden por toda la VI Región, mientras en la Región RM se limitan a la zona urbana de Santiago (de nuevo, la Región V, solamente cuenta con emisiones para el Gran Valparaíso). Principalmente cuesta entender el punto i) dado que, aparte de las emisiones de las carreteras en la VI Región, todas las otras emisiones se basan en la misma metodología (o sea, en los modelos ESTRAUSS/MODEM), de manera tal que se podría esperar emisiones similares (por punto de grilla) en los centros urbanos. El punto ii) se puede explicar por el hecho de que, en la VI Región, las carreteras se trataron de una manera explícita con una metodología particular (metodología DICTUC), lo que no se hizo para las regiones RM y V.

NOx areales

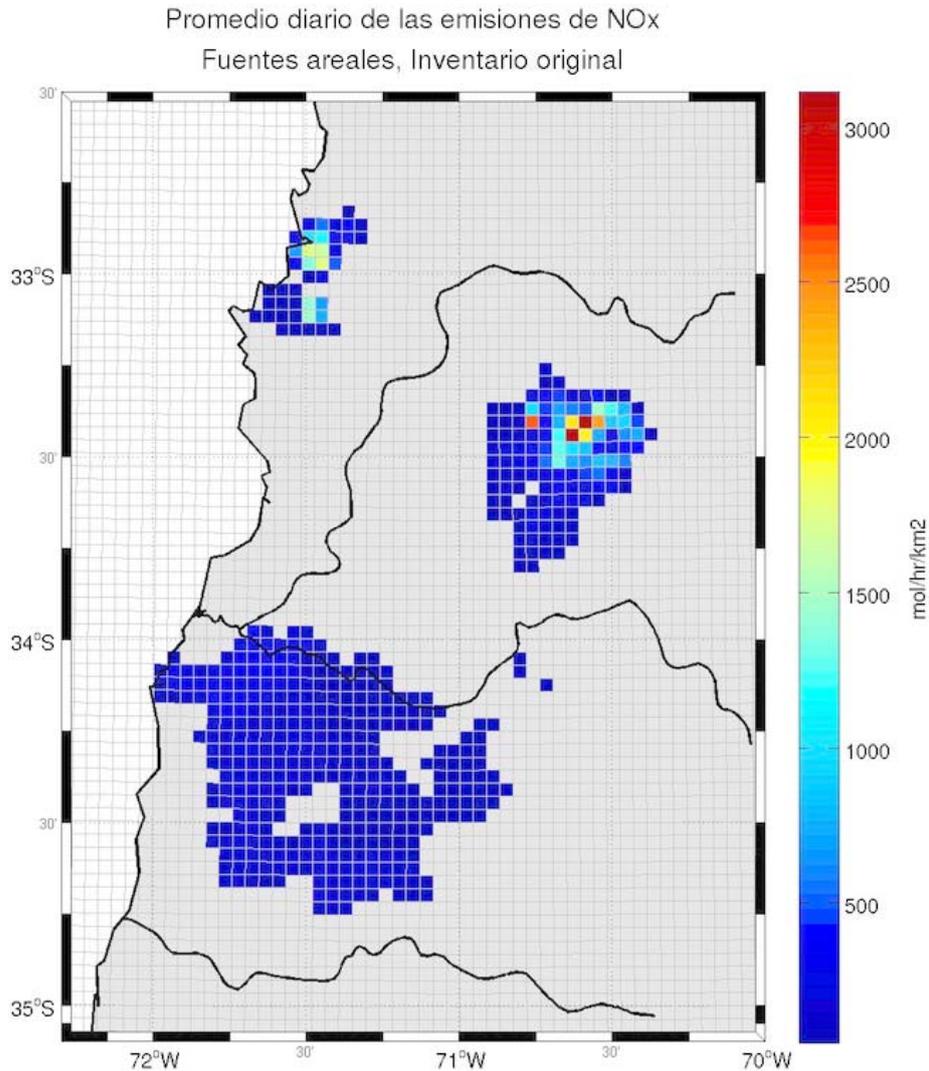


Figura 9.3: Promedio diario de las emisiones de NOx de fuentes areales.

La figura 9.3 muestra las emisiones de NOx por emisiones areales. Para este tipo de fuente, Santiago muestra los mayores valores, que superan los de Gran Valparaíso en aproximadamente 50%. De nuevo, en este caso, las emisiones dentro de la Región RM se limitan al área urbana de Santiago. En la VI Región, por su parte, no se observan emisiones de NOx en las zonas urbanas de Rancagua y San Fernando. En este caso todas las emisiones se encuentran más bien distribuidas desde la Ruta 5 (pero sin incluirla) hasta la Costa. Es decir, la Región VI, solamente muestra emisiones de NOx en las zonas rurales y no en las zonas urbanas, mientras en la Región RM la situación es la contraria.

COV totales

Tal como se describió en la sección 5, aparte de los NO_x, los otros precursores relevantes para el ozono son los COVs. En lo que sigue se caracterizarán estas emisiones. La figura 9.4 muestra las emisiones totales de los COVs en la Macrozona. Se observa claramente que la zona con mayores emisiones es Santiago, con valores alrededor de seis hasta siete veces mayores que los valores máximos en las regiones V y VI. Tal como ya se ha observado en el caso de los NO_x, en las regiones V y RM las emisiones se relacionan más bien a las áreas urbanas, mientras en la VI Región se extienden además a las zonas rurales hacia la costa.

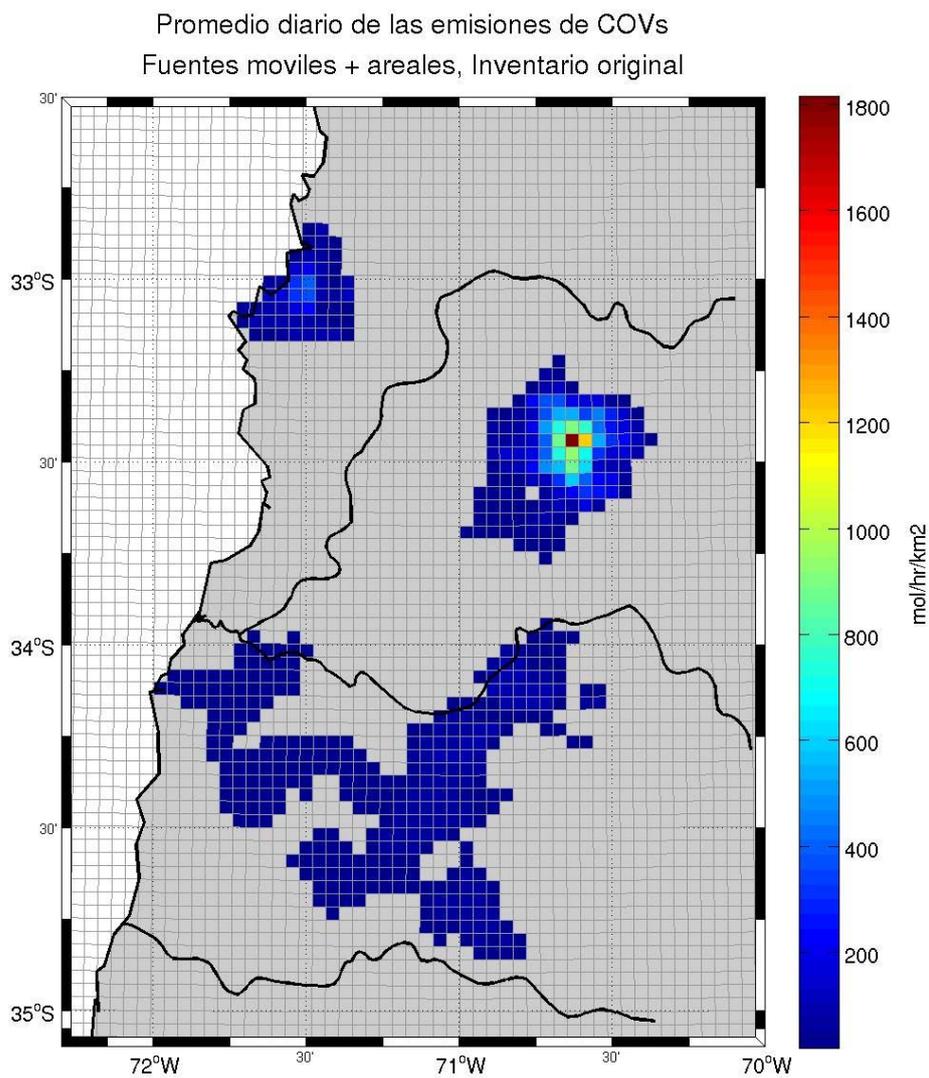


Figura 9.4: Promedio diario de las emisiones totales de COV (fuentes móviles y areales).

COV móviles

Considerando solamente las emisiones de COVs por parte de las fuentes móviles (ver figura 9.5), se puede observar que solamente se registran emisiones en las zonas urbanas. Las carreteras de la VI Región consideradas en los inventarios no muestran emisiones significativas. Además, en términos generales, parecen difíciles de entender las razones de NO_x/COVs (ver figuras 9.2 y 9.5). En términos de NO_x , Santiago muestra emisiones relativamente bajas con emisiones más altas en las regiones V y VI, la situación es al revés en el caso de los COVs. El consultor habría esperado una razón NO_x/COV similar en zonas urbanas no encuentra explicación que estas zonas dentro de la Macrozona tengan tendencias tan poco similares.

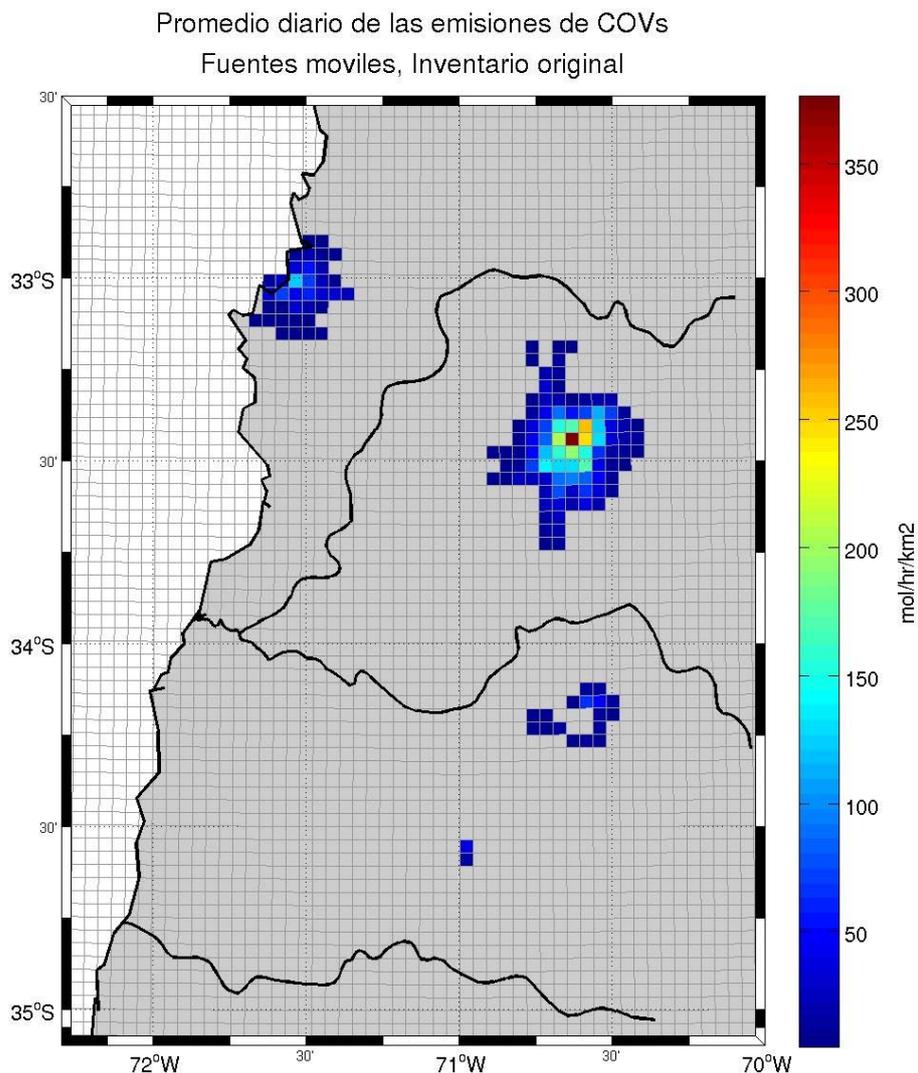


Figura 9.5: Promedio diario de las emisiones de COV de fuentes móviles.

COV areales

También en el caso de las fuentes areales, Santiago muestra emisiones mayores que las regiones V y VI (figura 9.6), con valores alrededor de cinco hasta seis veces superiores que los máximos de las otras dos regiones. Además, se nota que, en ausencia de emisiones de COV por parte de las fuentes móviles en la Región VI (ver figura 9.5), las emisiones de COV en esta región se deben casi exclusivamente a las fuentes areales; éstas, además, se distribuyen desde la Ruta 5 hasta la costa.

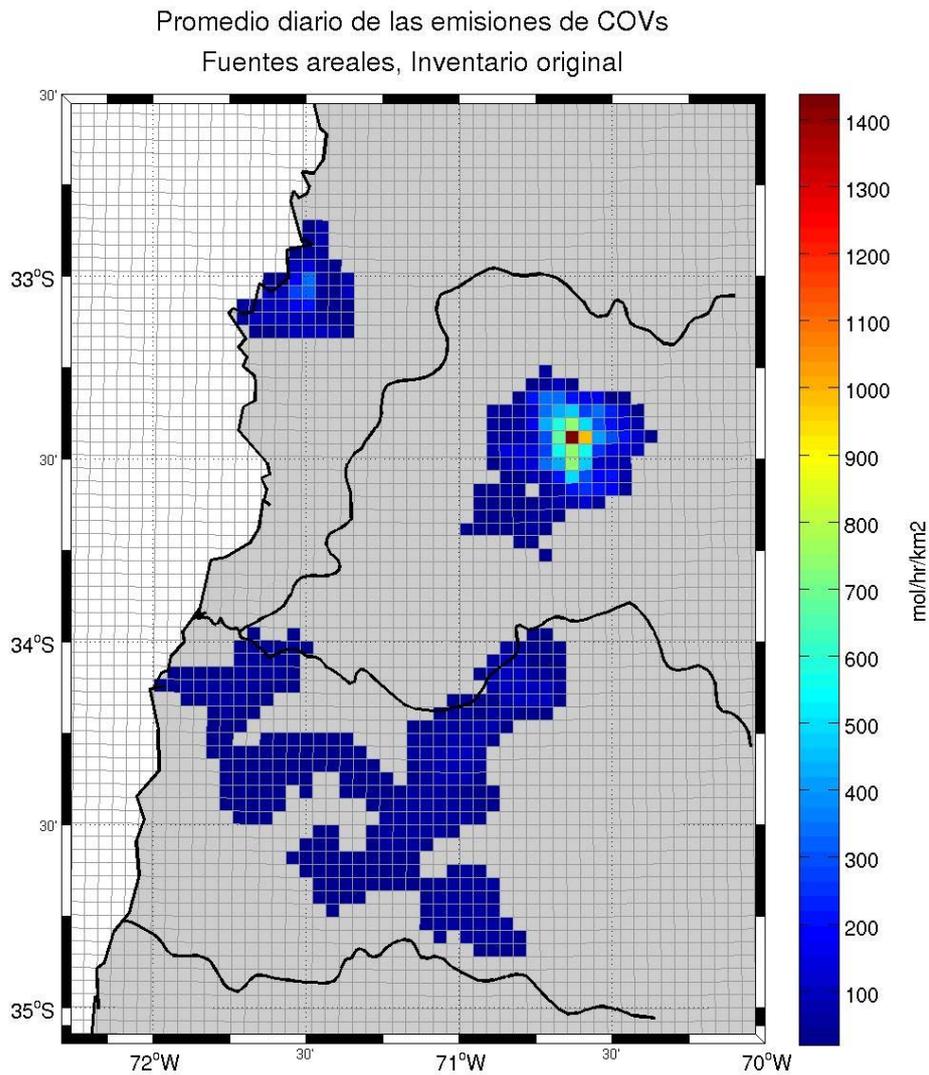


Figura 9.6: Promedio diario de las emisiones de COV de fuentes areales.

Razón COV/NOX

El potencial de producción de ozono no solamente depende de los valores absolutos de las emisiones de sus precursores (COVs y NO_x), sino también de su razón. En consecuencia, hace necesario también analizar los inventarios en este sentido. La manera en que se debería expresar la razón COV/NO_x es en molC/mol². Sin embargo, tal como están disponibles los inventarios (en un formato CBM4) no permite una evaluación de los COVs en términos de molC, ya que las especies de COVs en el CBM4 no tienen un número de carbón. En falta de esta información se supuso una mezcla de COVs con un promedio de cuatro átomos de carbón. La figura 9.7 muestra la distribución de la razón COV/NO_x. Con excepción de un punto en la ciudad de Santiago la razón de COV/NO_x varía entre valores de menos que uno hasta aproximadamente 3. Es conocido, que valores tan bajos tienen, en primer lugar, un potencial muy bajo de producción de ozono y, además, se puede esperar poca variabilidad de las concentraciones de ozono (Seinfeld y Pandis, 1996).

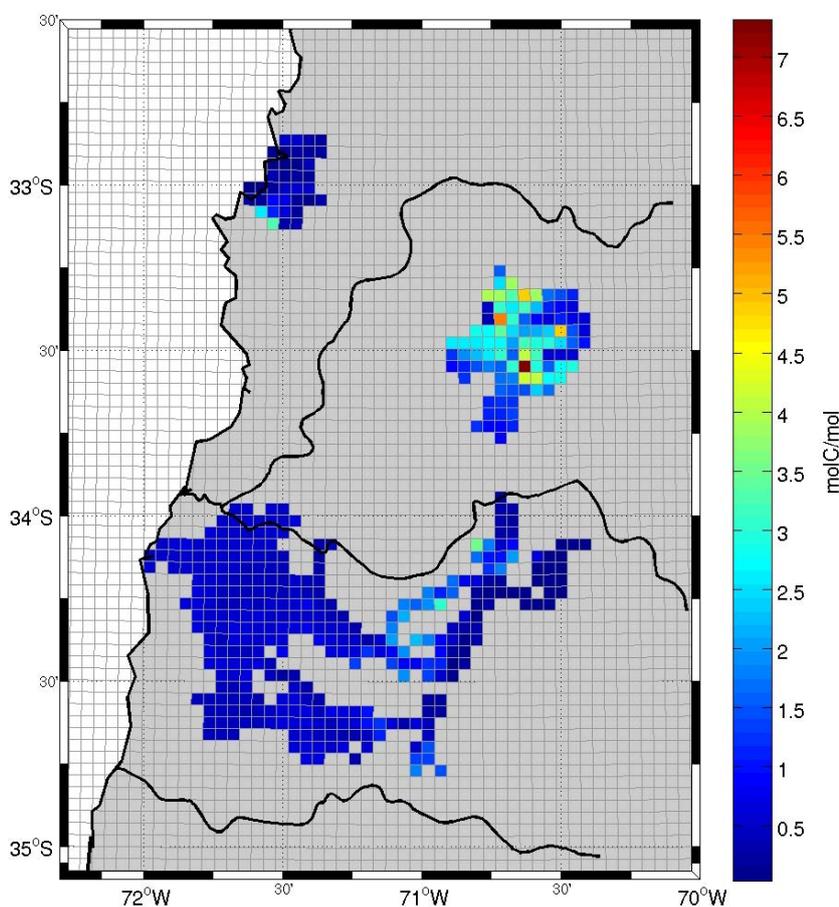


Figura 9.7: Promedio diario de la razón COVs/NO_x s (fuentes móviles y areales) en los inventarios de emisiones originales suponiendo un promedio de 4 del número de carbón para todos los COVs.

² Un molC = mol de átomos de carbón. Por ejemplo 1 mol de metano es equivalente a 1 molC dado que una molécula de metano solamente cuenta con un átomo de carbón; 1mol de etano a la vez es equivalente a 2 molC dado que una molécula de etano cuenta con 2 átomos de carbón.

9.2 Resumen del análisis de los inventarios de emisiones

Según lo descrito anteriormente, al consultor le parece poco consistente la información de los inventarios de emisiones lo que más se nota en las diferencias tanto de las emisiones de NOx como COVs entre las regiones. Además, llaman la atención los valores bajos en la razón COV/NOx. Tal como se demuestra en la sección 10.1, con los inventarios tal como fueron entregados no se logra producir ozono a niveles apreciables en el modelo WRF/Chem.

En base de esas observaciones se decidió modificar los inventarios de emisiones de una manera subjetiva. Estos inventarios modificados se describen en lo que sigue.

9.3 Inventarios modificados

La construcción de los inventarios de emisiones se basó en dos factores: i) la experiencia del consultor y ii) la distribución espacial y temporal de los inventarios de emisiones originales.

En términos generales, se trató de encontrar razones de COV/NO_x en los centros urbanos que permiten la producción de ozono. Se modificaron los inventarios hasta llegar razones de COV/NO_x según figura 9.8; se considera el rango de valores que demuestra esta figura como “razonable” (razonable en el sentido de permitir la producción de ozono; no se trata de un análisis riguroso de las fuentes en términos de factores de emisiones para cada sustancia que emite). Además de este criterio, también se eliminaron los valores extremos en todas tipos de fuentes y se emparejaron los niveles de emisiones por celda de grilla. Detrás de estas eliminaciones/armonizaciones está la suposición que dentro de un área urbana limitada (del tamaño equivalente por ejemplo de una celda de grilla) hay un límite máximo de actividad (sea de tráfico u otra).

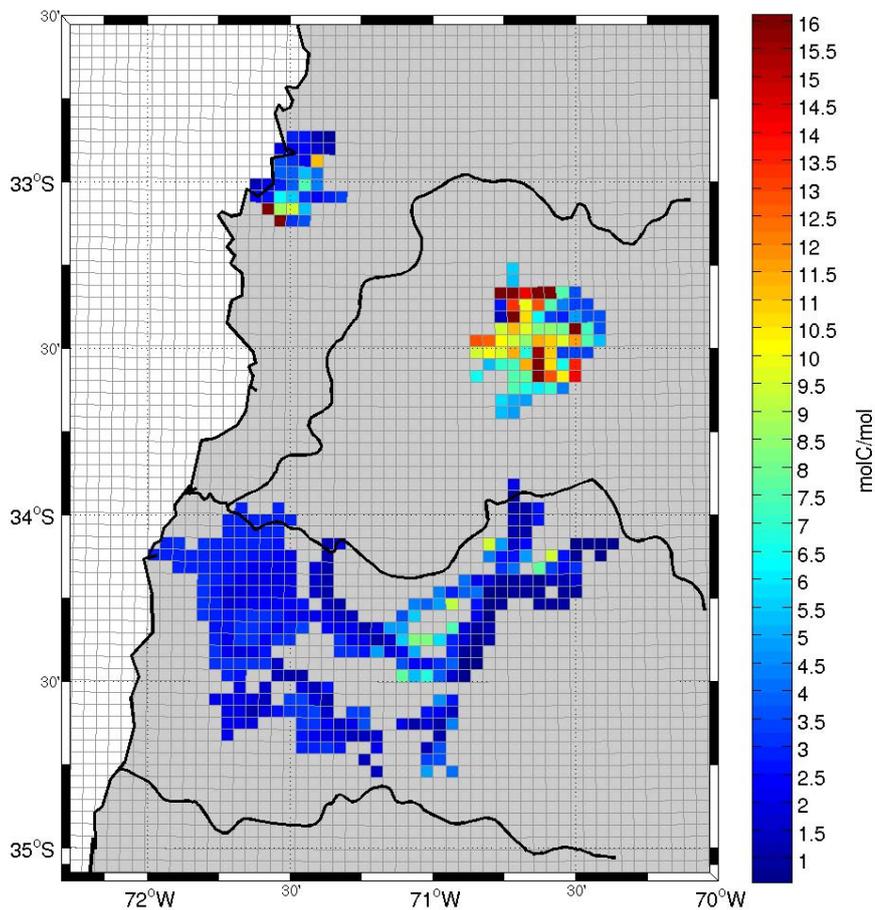


Figura 9.8: Promedio diario de la razón COVs/NO_x s (fuentes móviles y areales) en los inventarios de emisiones modificados suponiendo un promedio de 4 del número de carbón para todos los COVs.

Las siguientes figuras muestran los promedios diarios de estos inventarios modificados en términos de NOX y COVs. También se detalla, donde es necesario, cuáles fueron las suposiciones específicas para las modificaciones con respecto a cada fuente y contaminante. Cabe señalar, que las modificaciones no representan ningún criterio riguroso que se debería aplicar en el desarrollo de los inventarios de emisiones (factores de emisión, nivel de actividad, etc.). Además, fueron construidas sin mayores iteraciones. En consecuencia, también todavía exhiben algunas inconsistencias.

La sección 10 muestra los resultados de la aplicación de estos inventarios modificados en las simulaciones fotoquímicas con el modelo WRF/Chem.

NOx totales

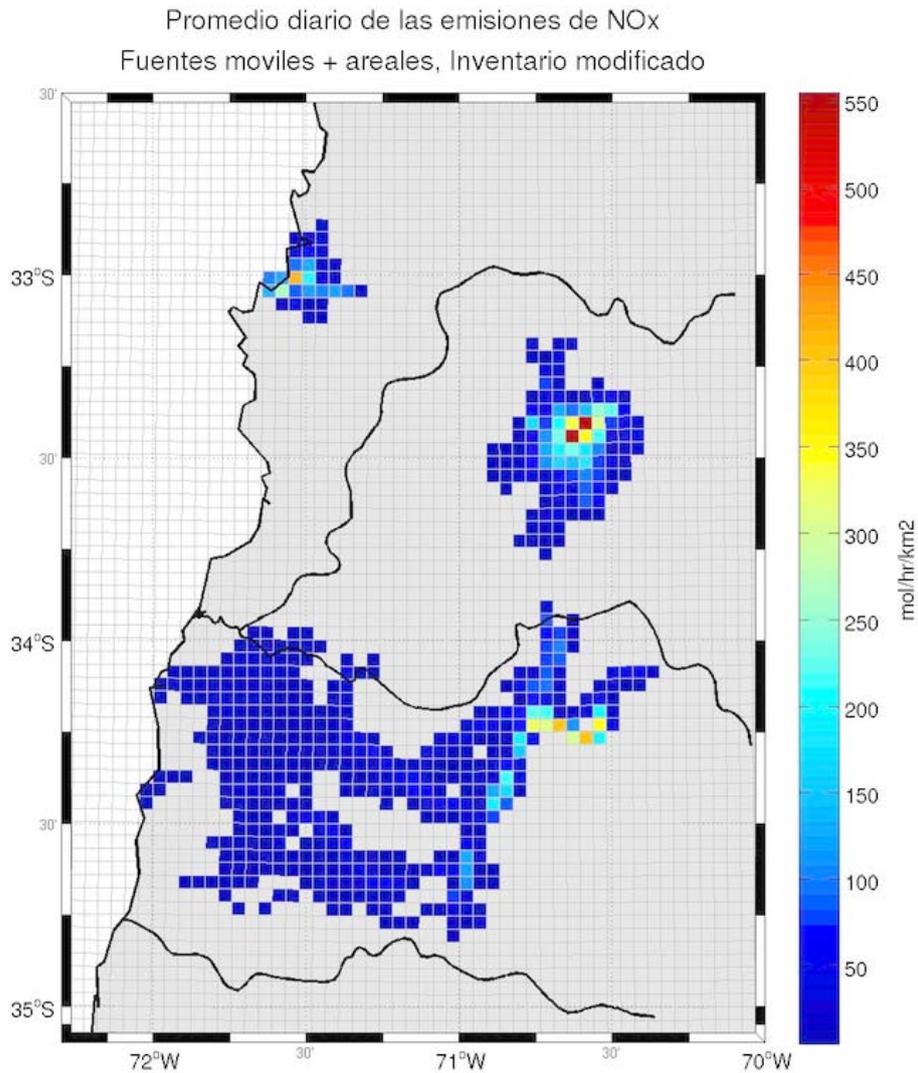


Figura 9.9: Promedio diario de las emisiones totales de NOx (fuentes móviles y areales) en los inventarios de emisiones modificados.

La figura 9.9 muestra claramente una cierta armonización espacial de las emisiones. Tal como se ha explicado anteriormente y debido a la falta de criterios alternativos, algunos rasgos en lo relativo a la distribución espacial que parecen poco consistentes se mantienen.

NOx móviles

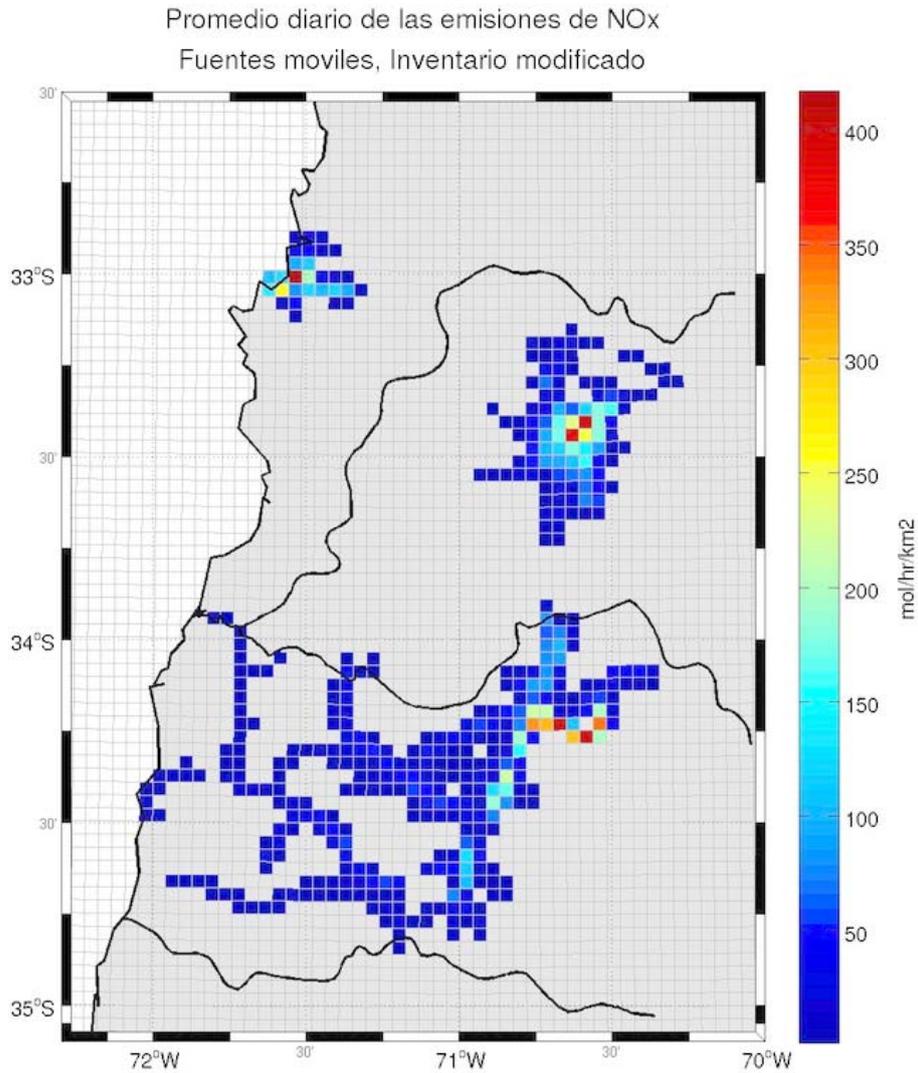


Figura 9.10: Promedio diario de las emisiones de NOx de fuentes móviles en los inventarios de emisiones modificados.

La figura muestra claramente que, mantener las emisiones de carreteras redujeron en mayores emisiones en las zonas rurales en la Región VI que en las otras dos. Sin embargo, tampoco parecía razonable no incluirlas. A contrario de los inventarios originales, donde las emisiones de NOx por fuentes móviles eran muy bajas, en las modificadas éstas se subieron. Para la Región VI las emisiones se bajaron drásticamente.

NOx areales

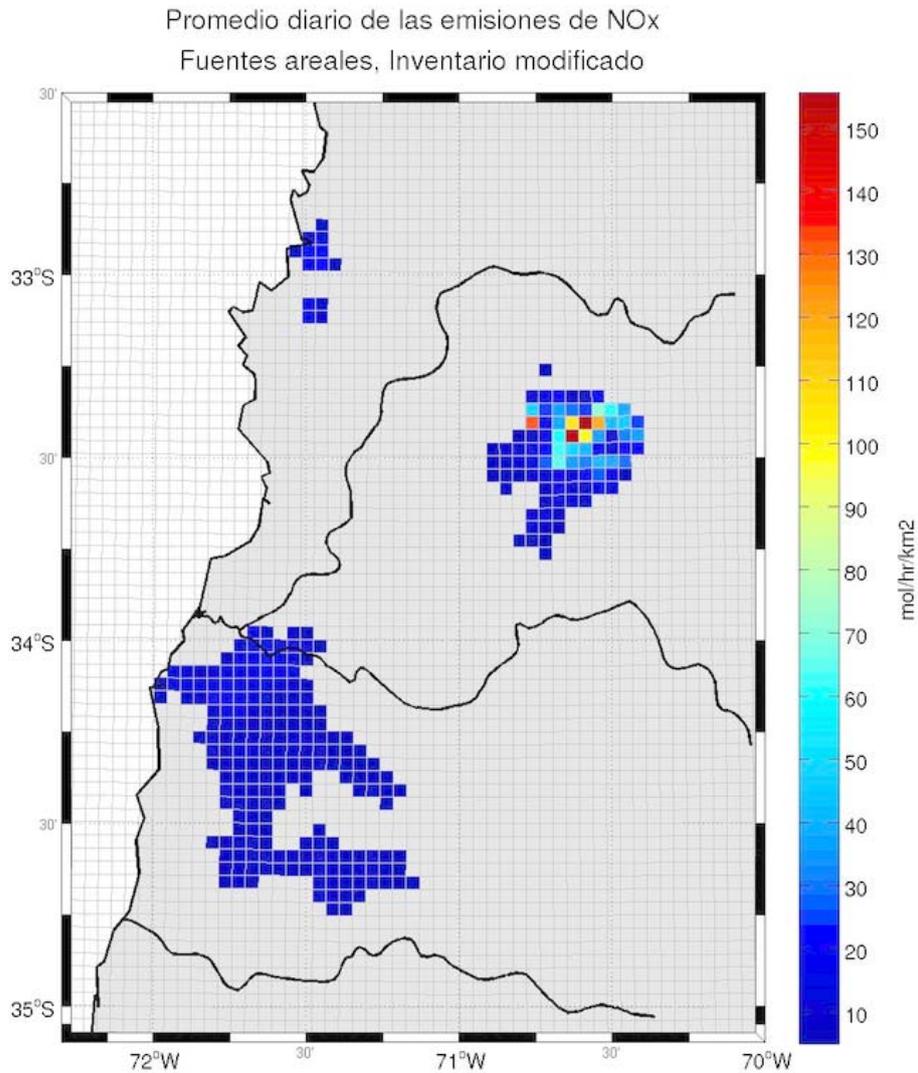


Figura 9.11: Promedio diario de las emisiones de NOx fuentes areales en los inventarios de emisiones modificados.

En el caso de las fuentes areales se mantiene el rasgo que los centros urbanos de la Región VI no cuentan con fuentes de NOx apreciables. En el caso de Santiago se bajaron las fuentes areales drásticamente con respecto a los inventarios originales; además en este caso están por debajo de las fuentes móviles.

COVs totales

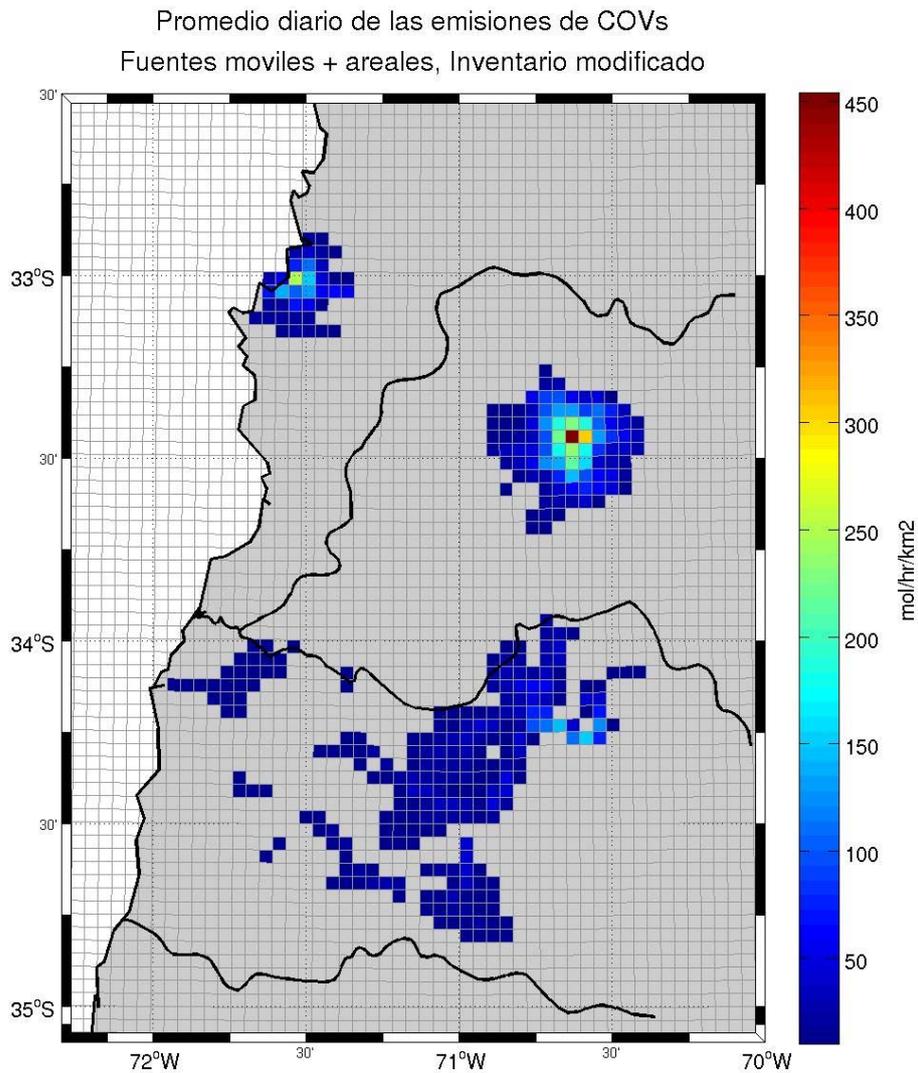


Figura 9.12: Promedio diario de las emisiones totales de COVs (fuentes móviles y areales) en los inventarios de emisiones modificados.

En el caso de las emisiones totales de los COVs, se mantuvieron bastante los rasgos de la distribución espacial (incluyendo la distribución entre las regiones).

COVs móviles

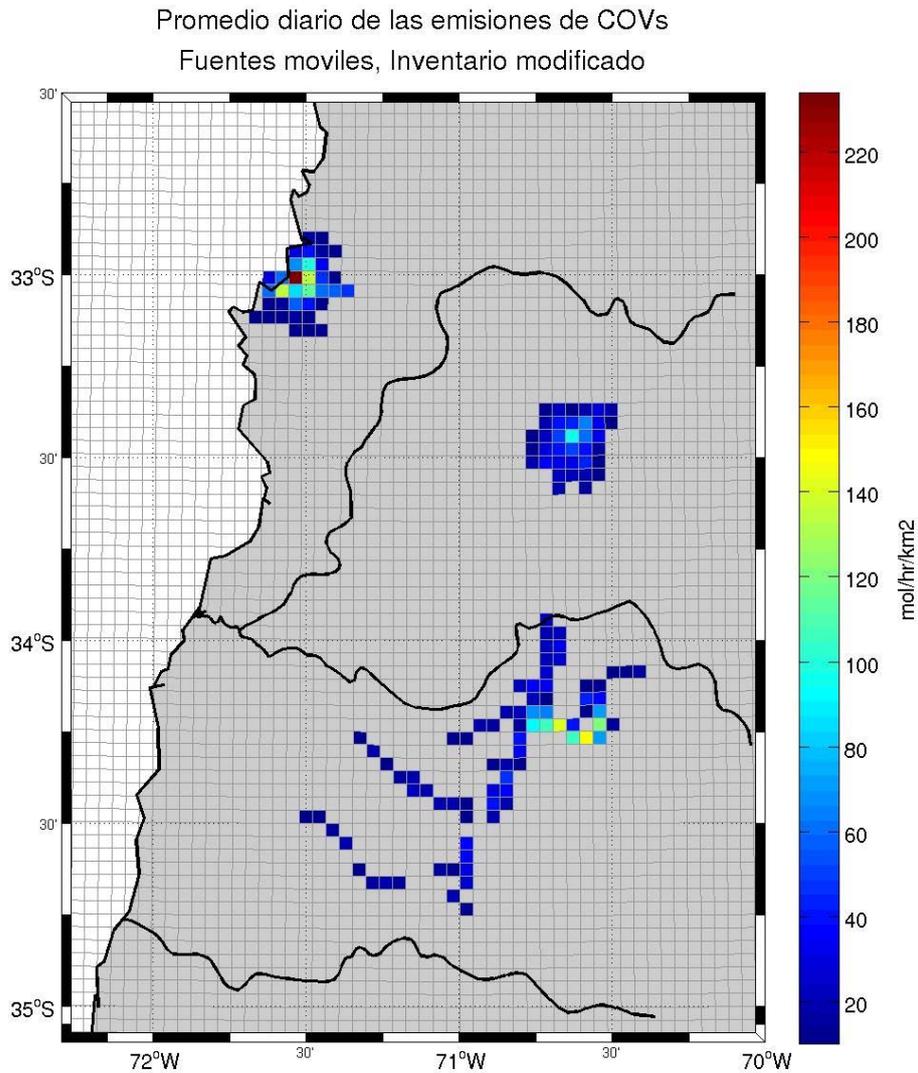


Figura 9.13: Promedio diario de las emisiones de COVs de fuentes móviles en los inventarios de emisiones modificados.

En el caso de las emisiones de COVs de las fuentes móviles, éstas estaban casi ausentes en la Región VI. Como se puede ver en la figura 9.11, en los inventarios modificados se aumentaron significativamente. En el caso de Santiago, las emisiones aparecen demasiado bajas, lo que se debería corregir en iteraciones futuras.

COV areales

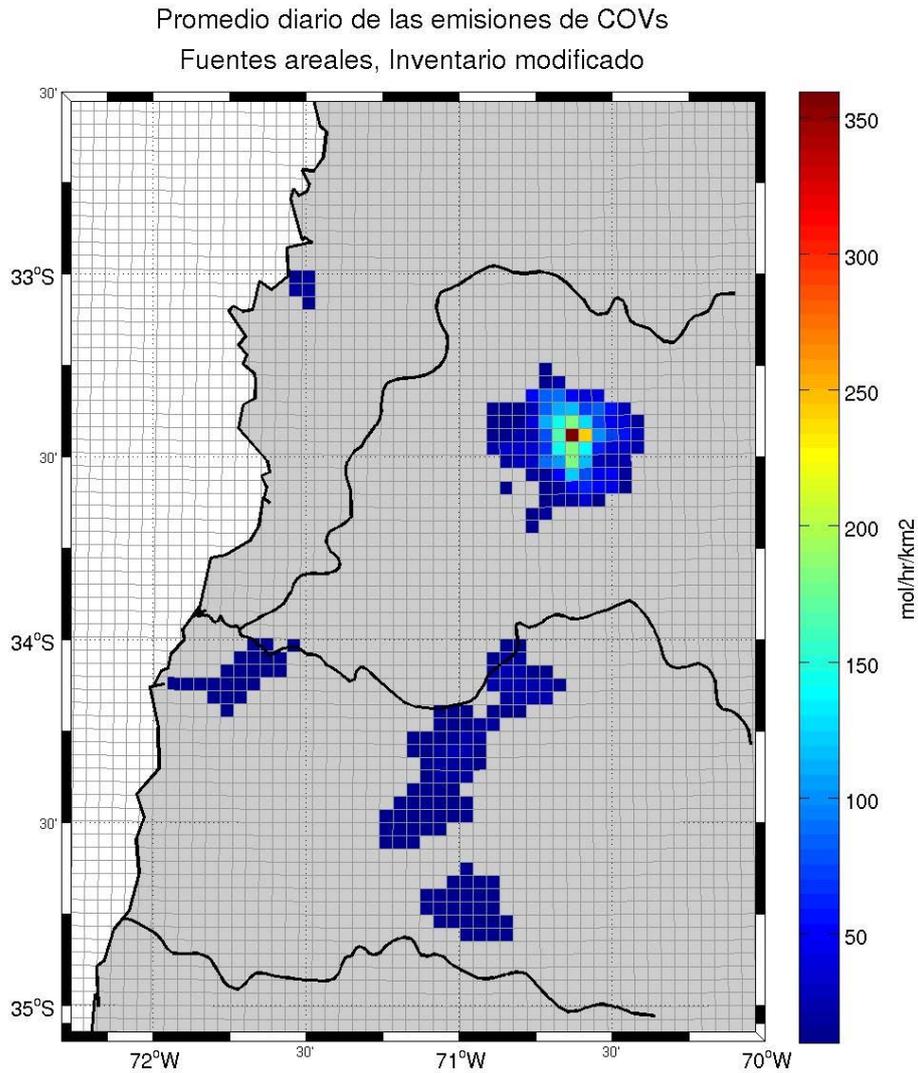


Figura 9.14: Promedio diario de las emisiones de COVs de fuentes areales en los inventarios de emisiones modificados.

También en este último caso -las emisiones de COVs de fuentes areales- se encuentran algunas inconsistencias, las que principalmente se notan en las emisiones muy bajas en Valparaíso. Sin duda, esta fuente requiere más modificaciones.

9.4 Conclusiones

Dentro de este proyecto, el objetivo con respecto al análisis de los inventarios de emisiones apuntaba hacia su aplicabilidad en los modelos fotoquímicos. En primer lugar es importante enfatizar que los inventarios no estaban disponibles en otros formatos que CBM4. El procesamiento de los datos para permitir su aplicación en modelos que trabajan con otros mecanismos químicos distintos de CBM4 (como es el caso del modelo WRF/Chem) habría significado costos altos que no se habían considerado dentro de este proyecto. Para evitar estos costos y garantizar al mismo tiempo el cumplimiento de los objetivos, se tuvo que re-programar gran parte de la química del modelo WRF/Chem.

En segundo lugar, el análisis de los inventarios de las regiones que conforman la Macrozona dio luz de posibles inconsistencias entre los inventarios de cada región. Además, en su aplicación dentro de un modelo fotoquímico los inventarios no mostraron un potencial de formación de ozono, lo que contradice las observaciones.

La modificación de los inventarios de emisiones tuvo como fin de realizar simulaciones que, a juicio del consultor, podrían resultar en concentraciones de ozono más realistas. Sin embargo, es importante reiterar que estas modificaciones son subjetivas y no obedecen a ninguna metodología rigurosa y objetiva.

10 Simulaciones fotoquímicas

En la sección anterior se describieron las características de los inventarios de emisiones para las regiones que conforman la Macrozona. Dentro de esta sección se describen los resultados de la aplicación de los inventarios en las simulaciones fotoquímicas. Considerando las deficiencias de los inventarios de emisiones anteriormente descritas se limitó las simulaciones a un periodo de la semana de enero del 2008. A pesar que los inventarios más actualizados eran del año 2006 (VI Región), se eligió un periodo del año 2008, ya que se disponía de información química para la condición de borde

10.1 Inventarios originales

La figura 10.1 muestra el promedio de los máximos diarios de las concentraciones de ozono durante el periodo de la simulación. Los colores verdes indican las concentraciones de la línea base, mientras los colores azules indican valores más bajos que la línea base, y los colores rojos valores más altos. Se puede observar que, en términos generales, el modelo no desarrolla concentraciones muy altas dentro de la Macrozona. Los valores más altos se encuentran en la Región VI hacia la costa. Sin embargo, lo que llama más la atención son las concentraciones en las Regiones V y RM. Tanto en las observaciones como en los resultados de modelación (ver [12]) se manifiestan valores muy superiores que las que muestra la figura 10.1. Viento abajo del Gran Valparaíso a la vez, se observa un área de niveles de ozono muy deprimidas.

Estos resultados comprueban el análisis teórico de la sección anterior, en el que ya se indicaba el bajo potencial de producción de ozono de los inventarios a raíz de una baja razón de COVS/NO_x. También la comparación entre mediciones y simulación muestran esta subestimación del potencial de producción de ozono por parte de las simulaciones. Los círculos rojos en la figura 10.1 indican la ubicación de las estaciones de monitoreo. Con fines de simplificar el análisis en la tabla 10.1 se agruparon estaciones de las regiones; esta simplificación permite destacar en forma resumida el desempeño del modelo (de los inventarios) y se justifica por las cercanías de las estaciones. Se agruparon las tres estaciones en la costa de la V Región, las otras restantes en el interior de esta región, las estaciones de la Región Metropolitana y las de la VI región. La tabla 10.1 compara los promedios de los máximos horarios de ozono para el periodo considerado. Claramente se subestiman fuertemente los niveles de ozono para todas las zonas.

Región	Promedio máximo ($\mu\text{gr}/\text{m}^3$)	
	Observado	Simulado
V costa	38	20
V interior	50	22
VI	38	34
Metropolitana	109	25

Tabla 10.1: Comparación del promedio de los máximos horarios de ozono observado y simulado por zonas.

A la luz del análisis de los inventarios de emisiones en la sección anterior, se asumió que el problema principal de estos resultados sorprendentes tuvieron su origen en justamente estos inventarios. En lo que sigue se presentan los resultados con los inventarios modificados descritos en la sección anterior.



Figura 10.1: Promedio de los máximos diarios de ozono usando los inventarios de emisiones originales.

10.2 Inventarios modificados

La figura 10.2 muestra el promedio de los máximos diarios de las concentraciones de ozono durante el periodo de la simulación. En este caso, usando los inventarios de emisiones modificados, se aprecian los rasgos conocidos del ozono dentro de la Región Metropolitana, con concentraciones altas viento abajo de las emisiones principales en el oriente de la ciudad de Santiago. En el caso de la Región V, también se muestra un gradiente general desde la costa hacia el interior, que es consistente con las observaciones. Además se observa la producción de ozono viento abajo de las fuentes del Gran Valparaíso; sin embargo, no hay mediciones que podrían confirmar este rasgo. Con respecto a la Región VI también existen muy pocas observaciones con las que se podrían contrastar los resultados de las simulaciones. Lo que sí es evidente es la sobre-estimación del ozono cerca de Rancagua. Sin embargo, dado las modificaciones en los inventarios de emisiones no fueron sujetos a muchas iteraciones, es decir no se optimizó este aspecto local.

La tabla 10.2 muestra los resultados del análisis equivalente al de las simulaciones con los inventarios originales. Tanto las estaciones de V costa como de la Región Metropolitana son bastante parecidos entre simulaciones y observaciones; sin embargo, tanto V interior como VI Región muestran una fuerte sobre-estimación por parte del modelo.

Región	Promedio máximo ($\mu\text{gr}/\text{m}^3$)	
	Observado	Simulado
V costa	38	33
V interior	50	83
VI	38	112
Metropolitana	109	107

Claramente, estas simulaciones no presentan resultados concluyentes. Tampoco permiten una delimitación de áreas afectadas por ozono. Dadas las incertidumbres y la subjetividad en las modificaciones de los inventarios de emisiones, los resultados presentados aquí, solamente se basan en la opinión del consultor. Sin embargo, considerando la escasez de observaciones, tampoco se puede “evaluar esta opinión”.

Lo que sí los resultados muestran es la necesidad de distribuir mejor las estaciones existentes como la necesidad de la instalación de más estaciones adicionales para obtener una mayor cobertura de estaciones en la Macrozona con fines de llegar a un mejor diagnóstico y mejor información para evaluar los modelos.

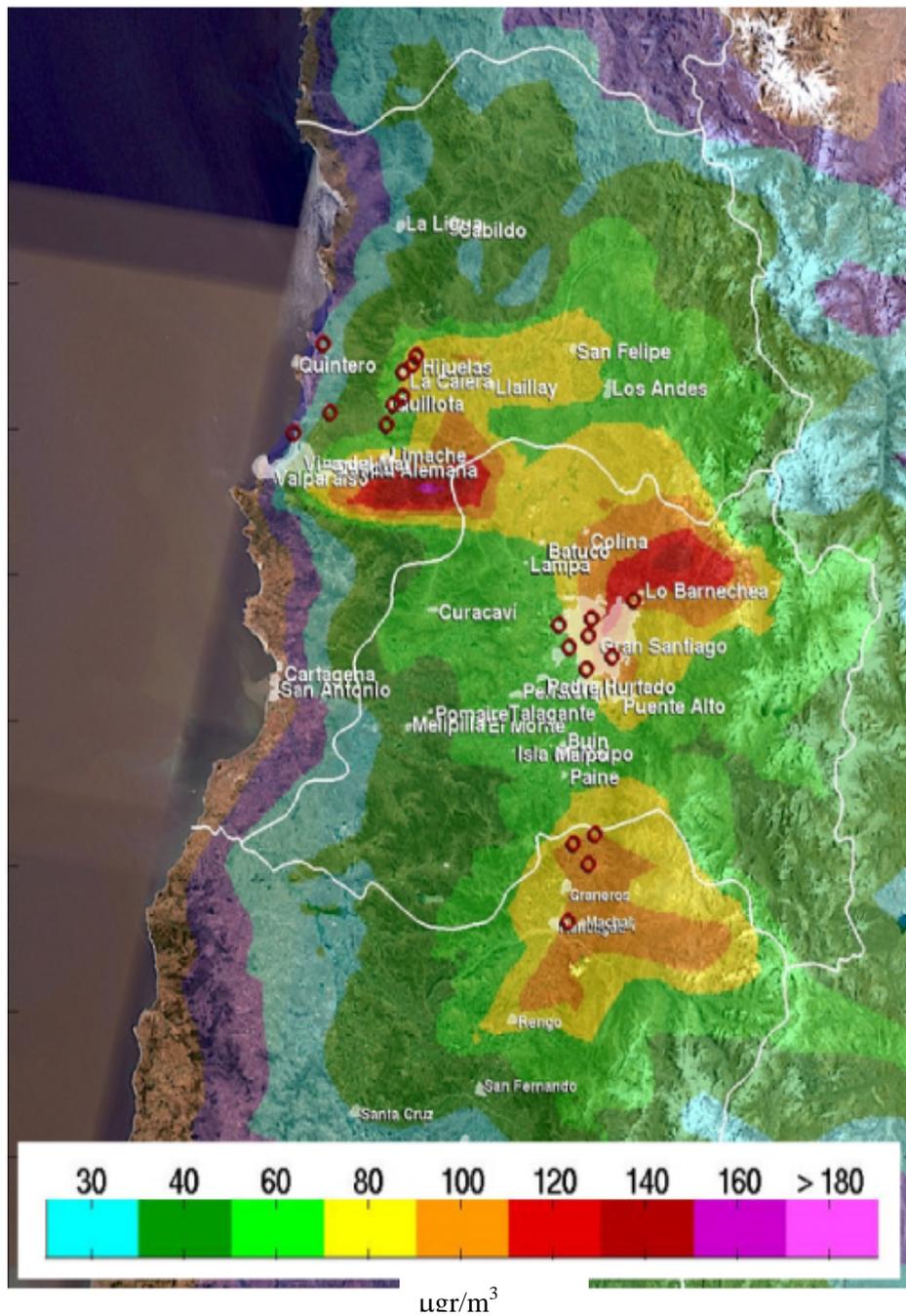


Figura 10.2: Promedio de los máximos diarios de ozono usando los inventarios de emisiones modificados.

11 Capacitación y material gráfico para SINCA

Unos de los objetivos señalados en sección 2 fue la capacitación de personal de la CONAMA en materias de contaminación fotoquímica y herramientas de modelación como de aplicación y operación del software desarrollado. Tal capacitación se realizó con un número total de 15 personas. En dicho taller se entregaron los fundamentos de los procesos fotoquímicos en la atmósfera, relevantes para la producción de ozono y los conceptos de los modelos numéricos atmosféricos (este material está incluido en la copia electrónica de este informe). La capacitación, sin embargo, todavía no se termina y se contempla otra oportunidad para entregar más detalles sobre los resultados de este estudio.

En términos de material gráfico para SINCA, cabe mencionar que ya todos los gráficos generados para este informe estarían disponibles. Sin embargo, como fue acordado previamente con la contraparte de CONAMA, se va a entregar más material una vez aprobado este informe. El material incluirá animaciones y gráficos estáticos. También se van a generar textos de documentación relevantes para la modelación fotoquímica y para la educación general sobre este tema.

12 Conclusiones y sugerencias

Este estudio significa un esfuerzo sin precedentes en términos de modelación atmosférica en la Macrozona. A pesar de varias dificultades en el transcurso del desarrollo del proyecto, se ha logrado cumplir con la mayoría de los objetivos.

En primer lugar, cabe mencionar que se ha implementado un **modelo fotoquímico** (WRF/Chem) para la Macrozona. Este modelo está configurado dentro de un sistema que permite la **generación automática** de simulaciones de largo tiempo y, en consecuencia, de información con una **significancia estadística**.

Con este modelo se efectuaron **simulaciones meteorológicas** de un total de 12 meses estivales, lo que resultó en una **caracterización detallada y exhaustiva** de los patrones de viento en la Macrozona del país. Las simulaciones fueron **validadas** a través de su comparación con observaciones de más de 60 estaciones meteorológicas.

Utilizando estas simulaciones y con fines de analizar el intercambio de masas del aire entre las regiones que conforman la Macrozona, se calcularon más de **3 millones de trayectorias**. A través de estas trayectorias se pudo mostrar el mayor intercambio inter-regional existente entre la Región V y RM, con masas del aire, que provienen de centros de alta actividad humana como por ejemplo San Antonio y Gran Valparaíso, entrando a la cuenca de Santiago.

Las simulaciones meteorológicas incluían la **dispersión de un trazador inerte**. El análisis de este trazador confirmó los resultados obtenidos en el análisis de las trayectorias.

En términos de un **diagnóstico de los niveles de ozono** en base de las observaciones, se analizaron todos los datos de las regiones V y VI. Se identificaron posibles puntos con superación de la norma. Sin embargo, el análisis también mostró que la cobertura espacial de información es insuficiente para llegar a resultados concluyentes.

En términos de las simulaciones fotoquímicas el proyecto se enfrentó con un problema mayor. A contrario de que se suponía cuando se licitó el proyecto, no estaban disponibles los inventarios de emisiones para cualquier modelo fotoquímico. Dadas las características muy específicas del formato de los inventarios se tuvo que **re-programar** la parte química del modelo **WRF/Chem** para incluir el mecanismo fotoquímico **CBM4**. Esta re-programación no estaba contemplada dentro del proyecto y, sin duda, resultó en un atraso del mismo. Sin embargo, su implementación también significa que el modelo implementado en la Macrozona tiene una **mayor flexibilidad** en su uso futuro.

En lo relativo a los inventarios propiamente tales, se hizo un análisis de su utilidad dentro de los modelos fotoquímicos. Se detectaron varias **inconsistencias** tanto en términos de la distribución espacial como en las magnitudes de las emisiones. En base de esas observaciones se construyeron **inventarios modificados**.

Tanto los inventarios originales como los modificados se aplicaron en **simulaciones fotoquímicas** en toda la Macrozona. A través de los inventarios originales no se lograron los rasgos de ozono que se esperaban y que las pocas observaciones disponibles muestran. Aplicando los inventarios modificados los campos de ozono parecían más razonables.

Considerando la subjetividad en las modificaciones de los inventarios y la escasez de observaciones estos resultados no se pueden considerar concluyentes.

Lo que concierne trabajos futuros, se considera que este proyecto ha llegado a resultados bastante satisfactorios en lo relativo a los aspectos meteorológicos, incluyendo la caracterización de intercambio de masas del aire a nivel inter-regional. No obstante, también en este aspecto se pueden considerar actividades relacionadas a la optimización de la parte meteorológica del modelo.

Sin lugar a dudas, lo que requiere mayores esfuerzos en el futuro se relaciona a los inventarios de emisiones y las mediciones. El análisis de los inventarios de emisiones dentro de este estudio, claramente mostró debilidades en esta área. Se espera que el proyecto “Adquisición, Instalación e Implementación de software de inventarios de emisiones atmosféricas, y poblamiento de bases de datos” resuelva algunos de los problemas detectados. En futuros proyectos relacionados al desarrollo de inventarios de emisiones, se recomienda vincularlos a la modelación numérica. Se considera importante este vínculo, ya que permite una evaluación complementaria.

Otra debilidad que se detectó dentro de este estudio es la escasez de observaciones de ozono. La mayor cantidad de las observaciones se efectúa dentro de redes de monitoreo de la industria. Ya que estas industrias en muchos casos están ubicadas a distancias cortas, resulta que están espacialmente muy mal distribuidas las estaciones. Se recomienda establecer una red de monitoreo independiente de la localización de las industrias,

13 Referencias

- [1] I.M. Ackermann, H. Hass, M. Memmesheimer, A. Ebel, F.S. Binkowski, and U. Shankar. Modal aerosol dynamics for Europe: Development and first applications. *Atmospheric Environment*, 32(17):2981–2999, 1998.
- [2] Centro de Estudio de los Recursos Energéticos de la Universidad de Magallanes. Mejoría del conocimiento y administración de la información eólica en Chile, informe final. Technical report, CNE, 2005.
- [3] G. A. Grell, S. E. Peckham, R. Schmitz, S. A. McKeen, G. Frost, W. C. Skamarock and B. Eder. Fully coupled online chemistry within WRF model. *Atmospheric Environment*, 39:6957–6975, 2005.
- [4] A. Guenter, P. Zimmermann, and M. Wildermuth. Natural volatile organic compound emission rate estimates for U.S. woodland landscapes. *Atmospheric Environment*, 28:1197–1210, 1994.
- [5] H. J. Jakobs, S. Tilmes, A. Heidegger, K. Nester, and G. Smiatek. Short-term ozone forecasting with a network model system during summer 1999. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 42:23–40, 2001.
- [6] S. Madronich. Photodissociation in the atmosphere 1. Actinic flux and the effects of ground reflections and clouds. *Journal of Geophysical Research*, 92(D):9740–9752, 1987.
- [7] B. Schell, I.J. Ackermann, Heinz Hass, F.S. Binkowski, and Adolf Ebel. Modeling the formation of secondary organic aerosol within a comprehensive air quality model system. *Journal of Geophysical Research*, 106(D22):28,275–28,293, 2001.
- [8] D. Simpson, A. Guenther, C.N. Hewitt, and R. Steinbrecher. Biogenic emissions in Europe: Estimates and uncertainties. *Journal of Geophysical Research*, 100D:22875–22890, 1995.
- [9] W.R. Stockwell, P. Middleton, J.S. Chang, and X. Tang. The second generation regional acid deposition model chemical mechanism for regional air quality modeling. *Journal of Geophysical Research*, 95:16,343–16,368, 1990.
- [10] M.L. Wesley. Parameterizations of surface resistance to gaseous dry deposition in regional-scale, numerical models. *Atmospheric Environment*, 23:1293–1304, 1989.
- [11] Fundación para la Transferencia Tecnológica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Mejoría del conocimiento del recurso eólico en el norte y centro del país. CNE, 2003.
- [12] R. Schmitz y M. Falvey, Diseño de Plan Operacional de Seguimiento de Calidad del Aire para Ozono Troposférico (O₃) en la Región Metropolitana, CONAMA RM, 2007
- [13] M.W. Gery, G.Z. Whitten, J.P. Killus and M.C. Dodge, A photochemical kinetics mechanism for urban and regional scale computer modelling, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 94, no. D10, 12,925-12,956, 1989