



UNIVERSIDAD Y TECNOLOGÍA
FUNDACIÓN PARA LA TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA

ESTUDIO

**“Diagnóstico Plan de Gestión Atmosférica – Región de Valparaíso
Implementación de un Modelo Atmosférico”**

Informe Final

Preparado para:

Secretaría Regional de Medio Ambiente Región Valparaíso

Preparado por:

UNTEC

Fundación para la Transferencia Tecnológica

Junio 2012

Contenido

Índice de figura	5
Índice de tablas.....	14
Abreviaciones	15
Resumen ejecutivo	16
1 Introducción	20
3 Objetivos	22
3.1 Objetivo General	22
3.2 Objetivos Específicos.....	22
4 Revisión de la información de calidad del aire y Meteorología existente	23
5 Modelo numérico	25
6 Validación de la meteorología del modelo WRF.....	32
7 El O ₃ en Los Andes.....	38
7.1 Datos	38
7.1.1 Datos Algoritmos.....	38
7.1.2 Datos CENMA.....	38
7.1.3 Datos MACAM2.....	39
7.2 Análisis de los datos	39
7.2.1 Serie de tiempo completa de mediciones de ozono en Los Andes.....	39
7.2.2 Ciclo diario de ozono en Los Andes	39
7.2.3 Promedio de 8 horas	45
7.2.4 El ozono en Los Andes en un contexto espacial.....	47
8 Análisis del SO ₂ en las zonas Concón y Puchuncaví/Quintero.....	49
8.1 Datos usados.....	49
8.2 Ciclos diarios	50
8.2.1 Ciclos diarios promedios	51
8.3 Ciclos estacionales.....	60
8.3.1 Concón	60
8.3.2 Puchuncaví/Quintero.....	61
8.4 Estabilidad atmosférica	68

8.5 Ciclos diarios durante eventos de concentraciones altas de SO ₂	70
8.6 Estabilidad atmosférica durante eventos de concentraciones altas de SO ₂	72
8.7 Impacto de variaciones en emisiones de SO ₂ de la Fundición CODELCO Ventanas y de AES Gener.....	76
8.8 Relación entre fuentes emisoras e impacto en las estaciones	79
8.7.1 Concón	81
8.7.2 Puchuncaví/Quintero.....	82
8.9 Conclusiones del caso de SO ₂ en Puchuncaví/Quintero y Concón	83
8.9.1 Puchuncaví/Quintero.....	83
8.9.2 Concón	84
9 Análisis del material particulado en la zona de Puchuncaví/ Quintero	85
10 Estimación de área de impacto.....	89
10.1 Zonas Puchuncaví/Quintero y Concón	89
10.2 Zona Catemu	94
11 Modelación Fotoquímica.....	96
11.1 Evaluación de inventarios de emisiones.....	98
11.2 Identificación de masas de aire en la Región de Valparaíso a través de la caracterización del transporte de contaminantes primarios	99
11.2.1 Validación de los NO _x	101
11.2.2 Caracterización de los flujos de masas de aire.....	104
11.2.3 Conclusión del transporte de un contaminante primario	113
11.3 Caracterización de la formación y transporte del ozono.....	115
11.3.1 Validación de ozono.....	117
11.3.2 Caracterización de la formación y transporte de contaminantes secundarios enfocado en el ozono.	133
11.4 Material Particulado	141
11.4.1 Observaciones del material particulado y comparación con el modelo	141
11.4.2 Coclusiones de las simulaciones del material particulado	144
12 Optimización de la red de monitoreo	145
12.1 Ozono en Los Andes	145
12.2 Monitoreo en Catemu	146
Anexo I, Series de Tiempo de las estaciones para el año 2009	147

Anexo II, Figuras complementarias al capítulo 6.....	200
Anexo III, Figuras complementarias al capítulo 8.....	218
Anexo IV, Figuras complementarias para el capítulo 11.....	235
Anexo V, Desafíos en la Modelación del Material Particulado	259

Índice de figuras

Figura 5.1: Ejemplo de configuración para simular la circulación de las masas del aire, las reacciones fotoquímicas y el material particulado. En este ejemplo, el modelo consiste en cuatro dominios anidados de resoluciones de 27 km (rojo), 9 km (verde), 3km (púrpura) y 1 km (amarillo). El dominio exterior captura fenómenos de la escala sinóptica mientras los dominios interiores resuelven las de la meso-escala. El centro para cada dominio en este ejemplo es el mismo para cada dominio con el centro en la localidad de Ventanas . 26

Figura 5.2: El dominio interior consiste en una grilla tri-dimensional de alta resolución horizontal (1km) en la que se resuelven las ecuaciones que controlan el comportamiento físico y químico de la atmósfera. Se resuelve bien la topografía compleja de la Región de Valparaíso. La figura indica las ciudades de Valparaíso y Ventanas. 27

Figura 6.1: Comparación entre vientos observados (flechas azules) y simulados por WRF (flechas rojas). Los puntos negros indican la ubicación de cada estación. Cada flecha comienza en este punto y sus respectivas direcciones muestran hacia dónde sopla el viento; su largo es proporcional a su velocidad. El panel superior muestra el promedio entre las 14:00-18:00 del año 2010 y el panel inferior entre las 02:00-06:00 del mismo año. 33

Figura 6.2: Comparación entre los ciclos diarios de la velocidad y la dirección de viento observados y simulados para la estación Meteorológica de la red Chagres. Los dos paneles superiores muestran los ciclos observados y los dos inferiores los según el modelo WRF. 34

Figura 6.3: Equivalente a la figura 19 pero para la estación Los Maitenes de la red Codelco. En este caso, se puede observar muy bien que existen direcciones de viento dominantes durante el día y la noche; sin embargo en las fases de transición (entre las 08:00-11:00 y 19:00-22:00) los gráficos indican que la dirección puede tomar casi cualquier valor (indicado por bajas frecuencias en todo el rango de las direcciones). 35

Figura 6.4: Comparación de los promedios de las velocidades máximas horarias (puntos rojos), mínimas horarias (puntos verde) y de los promedios anuales (puntos azules) entre observaciones (eje X) y el modelo WRF (eje Y). Cada punto de cada color corresponde a una estación de la figura 6.1. 36

Figura 7.1: Serie de tiempo de ozono en la estación Los Andes obtenidos a través de mediciones de Algoritmos con una resolución temporal de 5 minutos. Se observa una gran variabilidad inter- e intra-diaria. En el panel arriba se muestran los datos originales, en el inferior los datos “corregidos”. 39

Figura 7.2: Ciclo diario de ozono en la estación Los Andes. La línea rosada indica el ciclo diario promedio, los límites superiores e inferiores del área sombreado los percentiles 90 y 10, respectivamente. 40

Figura 7.3: Igual a figura 6.2, pero se indican, además, dos ciclos diarios (13 y 27 de febrero, 2010) que muestran un comportamiento bi-modal. 41

Figura 7.4: Igual a figura 6.2, pero se indican, además, dos ciclos diarios (8 de febrero y 1 de marzo, 2010) que muestran un máximo muy tardío. 42

Figura 7.5: Igual a figura 6.2, pero se indican, además, los dos ciclos diarios de los días con mayor superación de norma.(6 de marzo y 10 de abril, 2010). 43

Figura 7.6: Serie de tiempo del promedio de 8 horas de las concentraciones de ozono en la estación Los Andes. . La línea azul indica la serie completa, los puntos verdes los máximos diarios del promedio de ocho horas menores que la norma ($120 \mu\text{gr}/\text{m}^3$) y los puntos rojos aquellos mayores que la norma. 44

Figura 7.7: Ciclo diario de ozono en los días de superación de norma. La línea roja es el promedio del ciclo diario durante estos días y los límites superiores e inferiores del área sombreada indica los percentiles 10 y 90 (lo que indica la variabilidad de los datos en días de superación de norma), respectivamente. También se incluye el ciclo diario promedio de todos los días a través de la línea rosada. 45

Figura 7.8: Ciclos diarios (tomado en cuenta los datos de la campaña de mediciones del CENMA y de Algoritmos) de las estaciones de mayores concentraciones (Colina y Las Condes), dos de niveles entremedios (Parque O'Higgins y Los Andes y niveles bajos (Viña del Mar y Villa Alemana). 47

Figura 8.1: Ciclos diarios de velocidad (panel superior) y dirección del viento (panel entremedio) y concentraciones de SO_2 (panel inferior) para la estación Junta de Vecinos. En los casos de la velocidad del viento y las concentraciones de SO_2 , se indican los ciclos promedios (líneas azules) y su variabilidad a través de las sombras celestes que contienen el 90% de los datos. El ciclo diario de la dirección de viento a la vez se indica a través de la frecuencia en que ocurre a cada hora del día (en %). La dirección de viento se indica en intervalos discretos de 20 grados. En este caso las concentraciones mayores ocurren durante la noche/madrugada lo que corresponde vientos débiles y con una dirección desde el sur-sureste. 53

Figura 8.2: Equivalente a figura 8.1, pero para la estación Concón Sur. Esta estación muestra niveles bajos de SO_2 todo el día con un leve aumento en la fase de transición entre madrugada y día. 54

Figura 8.3: Equivalente a figura 8.1, pero para la estación Sur. Se pueden observar aumentos graduales de SO_2 durante la noche/madrugada junto con vientos débiles desde el este. Los niveles mayores ocurren en la fase de transición madrugada/día. 55

Figura 8.4: Equivalente a figura 8.1, pero para la estación Los Maitenes. Se observan niveles de SO₂ bajos durante toda la noche y niveles altos durante todo el día, disminuyendo hacia la tarde. En este caso la dirección del viento responsable para los niveles elevados es desde el oeste. 56

Figura 8.5: Equivalente a figura 8.1, pero para la estación La Greda. En esta estación los niveles de SO₂ pueden subir durante las fases de transición madrugada/mañana y tarde/noche. Sin embargo, los niveles son considerablemente menores que en las estaciones Sur y Los Maitenes. 57

Figura 8.6: Equivalente a figura 8.1, pero para la estación GNL. En esta estación los niveles elevados sólo ocurren durante la noche con vientos muy débiles. 58

Figura 8.7: Ciclo estacional del los ciclos diarios de las concentraciones de SO₂ y de la dirección de viento en la estación Junta de Vecinos. El eje x representa el ciclo diario promedio y en el eje y su variabilidad según el mes del año (sólo se indican las primeras letras del mes, E = enero, F = febrero, etc.). Los colores indican la concentración de SO₂ según hora y mes. También se muestra en los gráficos la dirección de viento a través de líneas y puntos (se indica hacia donde sopla el viento desde los puntos). La característica más importante del ciclo en esta estación es el aumento de las concentraciones durante invierno (y durante la noche/madrugada). 61

Figura 8.8: Equivalente a figura 8.7, pero para la estación Concón Sur. La escala de color para las concentraciones se ha adaptado a la magnitud de las concentraciones de esta estación. En esta estación también se registra un aumento durante los meses de otoño/invierno. 62

Figura 8.9: Equivalente a figura 8.7, pero para la estación Sur. La escala de color para las concentraciones se ha adaptado a la magnitud de las concentraciones de esta estación. Durante la noche se puede observar nuevamente un aumento durante invierno. Sin embargo, durante la fase de transición las concentraciones mayores se observan en los meses diciembre, enero, marzo y abril. Por otra parte, febrero registra concentraciones relativamente menores. 63

Figura 8.10: Equivalente a figura 8.7, pero para la estación Los Maitenes. La escala de color para las concentraciones se ha adaptado a la magnitud de las concentraciones de esta estación. También en este caso, las concentraciones máximas se registran en los meses diciembre, enero, marzo y abril con concentraciones menores en febrero. 64

Figura 8.11: Equivalente a figura 8.7, pero para la estación La Greda. La escala de color para las concentraciones se ha adaptado a la magnitud de las concentraciones de esta estación. En este caso existe un ciclo estacional bien marcado con concentraciones mayores en invierno y menores en verano. 65

Figura 8.12: Equivalente a figura 8.7, pero para la estación GNL. La escala de color para las concentraciones se ha adaptado a la magnitud de las concentraciones de esta estación. Se observa un ciclo estacional con concentraciones mayores en invierno y menores en verano. Sin embargo, también en este caso se registran concentraciones aún menores en febrero y un máximo durante mayo aproximadamente. 66

Figura 8.11: Ciclo estacional de los perfiles verticales promedios de la temperatura potencial (entre la superficie y 2000 metros) en Santo Domingo a las 00 UTC (panel superior) y las 12 UTC (panel inferior). El eje x indica los meses y el eje y la altura en metros. Sólo se indican las primeras letras de los meses, E = enero, F = febrero, etc. 68

Figura 8.12: Ciclos diarios de días de eventos en la estación Junta de Vecinos: el panel superior muestra el ciclo diario promedio de la velocidad del viento durante los eventos (línea azul), el viento promedio de todos los días como referencia (línea roja) y el límite en lo que se encuentran el 80% de los valores durante los días de eventos. El panel entremedio indica la frecuencia de la dirección de viento durante los días de eventos. El panel inferior es equivalente al superior pero para las concentraciones de SO₂. 70

Figura 8.13: Relación entre la concentración máxima diaria de SO₂ (eje y) y $\Delta\theta$ (eje x) en los días de eventos en la estación Junta de Vecinos. La línea segmentada separa condiciones de una atmósfera inestable (hacia la derecha) y estable (hacia la izquierda). 73

Figura 8.14: Relación entre $\Delta\theta$ en el día del evento (eje y) y el promedio de $\Delta\theta$ en los tres días anteriores del evento (eje x) en la estación Junta de Vecinos. 73

Figura 8.15: Equivalente a figura 8.13, pero para estación GNL. 74

Figura 8.16: Equivalente a figura 8.14, pero para estación GNL. **Figura 8.17:** Promedios anuales de la concentración de SO₂ en las estaciones Sur, Los Maitenes, La Greda y GNL. 74

Figura 8.17: Promedios anuales de la concentración de SO₂ en las estaciones Sur, Los Maitenes, La Greda y GNL. 77

Figura 8.18: Ubicación de estaciones de monitoreo (círculos) y de fuentes emisoras de SO₂ en las zonas Concón y Puchuncaví/Quintero. 78

Figura 8.19: Ubicación de estaciones de monitoreo (círculos) y de fuentes emisoras de SO₂ en la zona Concón. 79

Figura 8.20: Ubicación de estaciones de monitoreo (círculos) y de fuentes emisoras de SO₂ en la zona Puchuncaví/Quintero. 80

Figura 9.1: Ciclos diarios de velocidad (panel superior) y dirección del viento (panel entremedio) y concentraciones de SO₂ (panel inferior) para la estación Sur. En los casos de la velocidad del viento y las concentraciones de PM₁₀, se indican los ciclos promedios (líneas azules) y su variabilidad a través de las sombras celestes que contienen el 90% de los datos. El ciclo diario de la dirección de viento a la vez se indica a través de la frecuencia en que ocurre a cada hora del día (en %). La dirección de viento se indica en intervalos discretos de 20 grados. En este caso las concentraciones en general son bajas. 85

- Figura 9.2:** Equivalente a la figura 9.3 pero para la estación Los Maitenes. En esta estación se registran niveles bajos durante la noche (vientos desde el este) y un poco más altos durante el día (viento del oeste). 86
- Figura 9.3:** Equivalente a la figura 9.3 pero para la estación La Greda. A contrario del caso de SO₂, es esta estación que registra las concentraciones más altas de todas las tres estaciones. Las concentraciones más altas se observan durante la tarde/noche. 87
- Figura 10.1:** Patrones de dispersión a partir de una fuente superficial en la zona de Puchuncaví/Quintero. Se muestran contornos relativos al máximo de la concentración promedio. Las líneas rojas representan el 70% del valor máximo, las líneas naranjas el 10% y las líneas amarillas el 1% del máximo de los promedios. 90
- Figura 10.2:** Equivalente a la figura 10.1 pero para una fuente en 45 metros de altura en la zona de Puchuncaví/Quintero. 91
- Figura 10.3:** Equivalente a la figura 10.2 pero para una fuente en 45 metros de altura en la zona de Concón. 92
- Figura 10.4:** Equivalente a la figura 10.1 pero para las fuentes Fundición Chagres y Central Los Vientos. 94
- Figura 11.1:** Dominio de modelación. Se indican para una mejor ubicación algunas ciudades y los bordes regionales e internacionales. Se incluyó a la modelación –aparte de la Región de Valparaíso- la Región Metropolitana. 96
- Figura 11.2:** Estaciones de monitoreo con información de NO_x. 99
- Figura 11.3:** Comparación entre concentraciones de WRF (panel superior) y observaciones (panel inferior). Se indican los ciclos promedios (líneas azules) y su variabilidad a través de las sombras celestes que contienen el 90% de los datos. Cabe señalar que los periodos de los datos no coinciden; así que se busca comparar comportamientos generales. En este caso de la estación Maitenes, el modelo sobreestima el promedio pero logra simular bastante bien el ciclo diario. La variabilidad de las observaciones también es mayor que la del modelo. 100
- Figura 11.4:** Equivalente a figura 11.3 pero para la estación La Cruces. En este caso, WRF nuevamente logra simular el algo del ciclo diario con concentraciones más altas durante la noche y más bajas durante el día. Sin embargo, WRF subestima la magnitud de las concentraciones y su variabilidad. 101
- Figura 11.5:** Equivalente a figura 11.3 pero para la estación Los Vientos. En este caso, WRF logra simular algo del ciclo diario con concentraciones más altas durante la noche y más bajas durante el día. Sin embargo, WRF subestima fuertemente la magnitud de las concentraciones y su variabilidad. 102

Figura 11.6: Equivalente a figura 11.3 pero para la estación Colina. En este caso, se considera un buen desempeño del modelo tanto en simular el ciclo diario como la magnitud. 103

Figura 11.7: Promedio de concentraciones de NO_x a las 06:00 durante los meses enero-marzo 2010 según el modelo WRF. Se muestra la topografía como fondo y se indican algunas ciudades de las Regiones Valparaíso y Metropolitana. Las flechas representan los vientos del primer nivel del modelo (aprox. 15 metros de altura) según el modelo WRF. Los contornos representan las concentraciones de NO_x según el modelo WRF (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Se observan vientos débiles a esta hora con poco transporte de contaminantes. 105

Figura 11.8: Promedio de concentraciones de NO_x a las 12:00 durante los meses enero-marzo 2010. Se puede observar el comienzo de las brisas valle/montaña y mar/tierra. Aún así el transporte de contaminantes todavía no está muy desarrollado. 106

Figura 11.9: Promedio de concentraciones de NO_x a las 18:00 durante los meses enero-marzo 2010. A esta hora todas las brisas están bien desarrolladas. Se observa transporte de contaminantes desde la zona de San Antonio hacia la Región Metropolitana, desde Valparaíso/Viña del Mar a lo largo del valle Aconcagua hacia la cuenca de Los Andes y desde la cuenca de Santiago hacia la cuenca de Los Andes. 107

Figura 11.10: Promedio de concentraciones de NO_x a las 00:00 durante los meses enero-marzo 2010. Después de la salida del sol, se debilitan los flujos nuevamente y el impacto de las emisiones es principalmente de carácter local. 108

Figura 11.11: Promedio de concentraciones de NO_x a las 06:00 durante los meses julio-septiembre 2010 según el modelo WRF. A esta hora las diferencias con el caso de verano son pequeñas. 109

Figura 11.12: Promedio de concentraciones de NO_x a las 12:00 durante los meses julio-septiembre 2010. A esta hora, se observan vientos mucho más débiles que durante la época de verano. El transporte limitado y el impacto local de las emisiones se indica a través de los contornos cerrados, casi circulares alrededor de los centros urbanos/industriales. 110

Figura 11.13: Promedio de concentraciones de NO_x a las 18:00 durante los meses julio-septiembre 2010. A contrario de esta hora en verano, en este caso no se observan las brisas valle/montaña y mar/tierra desarrollados, sino más bien vientos débiles. Nuevamente y tal como a las 12:00, el transporte limitado y el impacto local de las emisiones se indica a través de los contornos cerrados, casi circulares alrededor de los centros urbanos/industriales. 111

Figura 11.14: Promedio de concentraciones de NO_x a las 00:00 durante los meses julio-septiembre 2010. A esta hora, se observan vientos desde las montañas hacia los valles (brisa montaña /valle). Aún así el transporte de contaminantes está muy limitado y el impacto más bien local. 112

Figura 11.15: Ubicación de estaciones con mediciones de ozono. Aparte de las estaciones de la Región Valparaíso, también se consideraron tres estaciones de la Región Metropolitana. 115

Figura 11.16: Ciclos diarios de ozono simulado por WRF (panel superior) y observado (panel inferior) para el caso de la estación Los Maitenes. Se indican los ciclos promedios (líneas azules) y su variabilidad a través de las sombras celestes que contienen el 90% de los datos. En este caso, las concentraciones observadas son muy bajas y el modelo, a pesar de también indicar concentraciones bajas, las sobreestima. El aumento de ozono durante el día se debe a la actividad fotoquímica gatillada por la radiación solar. Dadas su ubicación en la costa, las concentraciones bajas se pueden interpretar como la 'línea base' del ozono en esas latitudes. 117

Figura 11.17: Equivalente a la figura 11.17, pero para la estación GNL. También en este caso tanto las concentraciones observadas. 118

Figura 11.18: Equivalente a la figura 11.17, pero para la estación Calera. Esta estación se ubica ya algo más hacia adentro del continente y está sujeto de emisiones de los precursores de ozono lo que explica un leve aumento de ozono. 119

Figura 11.19: Equivalente a la figura 11.17, pero para la estación Colmo. También en este caso las concentraciones son bastante bajas lo que, nuevamente, explica su cercanía a la costa. 120

Figura 11.20: Equivalente a la figura 11.17, pero para la estación Junta de Vecinos. El comportamiento en esta estación es similar a la de la estación Colmo (figura anterior). A contrario del SO₂ (ver sección 8) no existen diferencias muy grandes entre estas dos estaciones. 121

Figura 11.21: Equivalente a la figura 11.17, pero para la estación La Cruz. Esta estación se comporta similar a la estación Calera (figura 11.18). 122

Figura 11.22: Equivalente a la figura 11.17, pero para la estación La Palma. También esta estación es similar en su comportamiento a la estación Calera (figura 11.18). 123

Figura 11.23: Equivalente a la figura 11.17, pero para la estación San Pedro. También esta estación es similar en su comportamiento a la estación Calera (figura 11.18). 124

Figura 11.24: Equivalente a la figura 11.17, pero para la estación Los Vientos. Esta estación se encuentra aún más hacia dentro del continente que la estación Calera (y las otras cercanas a ella) y, por lo tanto, también viento debajo de más fuentes emisoras de precursores de ozono. Esto se refleja en concentraciones más altas (simuladas y observadas). 125

Figura 11.25: Equivalente a la figura 11.17, pero para la estación Los Andes. Dentro de la Región de Valparaíso es la estación con las concentraciones más altas. El modelo logra bastante bien simular tanto la magnitud de las concentraciones como su ciclo diario. Sin embargo, el aumento observado en la mañana es mayor que el simulado. Esto indica una subestimación del potencial de producción por fuentes locales. 126

Figura 11.26: Equivalente a la figura 11.17, pero para la estación Viña del Mar. Las observaciones en este caso sólo cuentan con una serie de tiempo corta. Las concentraciones también en este caso son bastante bajas. 127

Figura 11.27: Equivalente a la figura 11.17, pero para la estación Villa Alemana. Las observaciones en también en este caso sólo cuentan con una serie de tiempo corta. Se nota un leve aumento de las concentraciones comparadas a aquellas de la estación Viña del Mar (figura anterior). Aún así las concentraciones se pueden considerar bajas. 128

Figura 11.29: Equivalente a la figura 11.17, pero para la estación Colina. Esta como las dos figuras siguientes sólo se han incorporado para mostrar el desempeño del modelo en la Región Metropolitana. Se mostrará que el ozono en la Región Metropolitana depende principalmente de emisiones dentro de esa región. Por lo tanto, las diferencias entre el modelo y las observaciones no tienen relación al inventario de emisiones de la región de Valparaíso. 129

Figura 11.30: Equivalente a la figura 11.17, pero para la estación Las Condes. 130

Figura 11.31: Equivalente a la figura 11.17, pero para la estación Parque O'Higgins. 131

Figura 11.31: Promedio de concentraciones de ozono a las 08:00 durante los meses enero-marzo 2010 según el modelo WRF. Se muestra la topografía como fondo y se indican algunas ciudades de las Regiones Valparaíso y Metropolitana. Las flechas representan los vientos del primer nivel del modelo (aprox. 15 metros de altura) según el modelo WRF. Los contornos representan las concentraciones de ozono según el modelo WRF (en $\mu\text{gr}/\text{m}^3$). Se observan concentraciones bajas de ozono en todo el dominio dado que es una hora justo después de la salida del sol con todavía baja actividad fotoquímica. 133

Figura 11.32: Promedio de concentraciones de ozono a las 10:00 durante los meses enero-marzo 2010 según el modelo WRF. Alrededor de esta hora empieza a desarrollarse la actividad fotoquímica. Se puede observar que esta actividad es mayor en Santiago que en cualquier otro lugar del dominio de modelación. 134

Figura 11.33: Promedio de concentraciones de ozono a las 12:00 durante los meses enero-marzo 2010 según el modelo WRF. A la hora cerca del máximo de la radiación existe una actividad fotoquímica muy alta. Es evidente el impacto de Santiago también hacia afuera de sus límites urbanos. Es interesante notar que mientras los contornos alrededor de Santiago son generalmente casi circulares, pero en las cercanías de Los Andes pierden su circularidad a esta hora y se extienden más hacia al norte. Este comportamiento indica la contribución de las fuentes más locales a la producción de ozono. 135

Figura 11.34: Promedio de concentraciones de ozono a las 08:00 durante los meses enero-marzo 2010 según el modelo WRF. A esta hora no sólo se observa una extensión de los contornos hacia el norte (tal como en la figura anterior) sino también por todo el valle Aconcagua hacia las ciudades de Valparaíso y Viña del Mar. Esta extensión indica la contribución de las fuentes emisoras desde la costa hasta Los Andes a las concentraciones de ozono en esta ciudad. 136

Figura 11.35: Promedio de concentraciones de ozono a las 08:00 durante los meses enero-marzo 2010 según el modelo WRF. La situación es similar a la de 14:00 con las circulaciones bien

desarrolladas y un impacto desde Santiago y Valparaíso/Viña del Mar en la cuenca de Los Andes.

137

Figura 11.36: Promedio de concentraciones de ozono a las 18:00 durante los meses enero-marzo 2010 según el modelo WRF. A esta hora ha disminuido la radiación solar lo que explica la menor actividad fotoquímica. Mientras el transporte de contaminantes continua, las concentraciones de ozono bajan.

138

Figura 11.37: Promedio de concentraciones de ozono a las 20:00 durante los meses enero-marzo 2010 según el modelo WRF. Cerca de la hora de la puesta del sol, disminuye la actividad fotoquímica aún más y también el transporte por viento baja en intensidad.

139

Índice de tablas

Tabla 5.1: Posibles configuraciones del modelo WRF	28
Tabla 8.1: Estaciones consideradas en el análisis de SO ₂ . Todas las estaciones cuentan con series de tiempo desde 2000-2010 y una completitud de los datos mayor o igual de 90%. Sólo la estación GNL sólo cuenta con datos entre 2009-2011.	49
Tabla 8.2: Diferencias de los promedios mensuales de SO ₂ entre enero-febrero y marzo-febrero en las estaciones Sur, Los Maitenes, La Greda y GNL. Las diferencias se expresan en % con respecto a los promedios mensuales de los meses enero y marzo, respectivamente.	76
Tabla 8.3: Diferencias de los promedios anuales de SO ₂ entre 2009-2010 en las estaciones Sur, Los Maitenes, La Greda y GNL. Las diferencias se expresan en % con respecto a los promedios anuales del 2009.	77
Tabla 11.1: Estaciones con mediciones de NO _x usados en este estudio. Se indican los periodos de los series de tiempo disponibles y la completitud de datos.	99
Tabla 11.2: Estaciones con mediciones de ozono usados en este estudio. Se indican los periodos de los series de tiempo disponibles y la completitud de datos.	115

Abreviaciones

MP: Material particulado

MP10: Material particulado con diámetro menor de 10 μm

MP2.5: Material particulado con diámetro menor de 2.5 μm

PM: ver MP

PM10: ver MP10

PM2.5: ver MP2.5

UNTEC: Universidad y Tecnología, Fundación para la Transferencia Tecnológica

RM: Región Metropolitana

SINCA: Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire

UAV: Unmanned Aerial Vehicle

WRF: Weather Resaerch and Forecasting Model

1 Resumen ejecutivo

En este resumen ejecutivo se entregan los logros más importantes para cada uno de los objetivos específicos según los Términos de Referencia (TdR). Previa a esa entrega se estima conveniente establecer el contexto de esos objetivos: La modelación siempre es una herramienta con fines de integrar procesos complejos y ayudar a entenderlos. En términos de contaminación atmosférica, esos procesos consisten en emisiones, meteorología y procesos químicos que a la vez se manifiestan en concentraciones de contaminantes mediante mediciones. En este sentido y antes de aplicar los modelos es importante a) caracterizar los problemas de contaminación atmosférica a través de observaciones y b) identificar todas las fuentes emisoras que podrían contribuir a ellos. Mientras para ambos puntos existen estudios paralelos (campañas de mediciones y elaboración de inventarios de emisiones), este estudio también se ha tenido que hacer cargo de algunos aspectos relacionados a la caracterización de los problemas de la contaminación atmosférica, principalmente en establecer las zonas en que esos problemas existen y, en consecuencia, donde se requiere la aplicación de un modelo. En lo que sigue se alistan las zonas junto con sus problemas y se resume la contribución que se espera de la modelación para justamente entender esos problemas. (El problema de ozono en Los Andes ha sido resultado de la campaña de mediciones, los otros se han discutido con miembros del CTA y se establecieron en el acta del día 5 de enero, 2012.)

1) Ozono Los Andes

Los resultados del equipo consultor a cargo de las mediciones claramente han indicado que existen superaciones de norma de ozono en Los Andes. En este caso, la modelación fotoquímica apunta a explicar del origen del problema. O sea, cuáles son las fuentes emisoras responsables y si cuál es la contribución tanto de la Región de Valparaíso como la de la Región Metropolitana.

2) Puchuncaví/Quintero

En la zona Puchuncaví/Quintero existe un gran número de fuentes emisoras. Mientras las mediciones de calidad del aire muestran que el problema principal de la zona misma es el SO_2 , también existen emisiones importantes de NO_x y PM. A pesar que la responsabilidad del problema de SO_2 en la zona parece bastante evidente (ya que existen pocas fuentes importantes de ese contaminante) y, por lo tanto, la modelación es de menor importancia para ese caso, sí puede contribuir a la evaluación de cómo contribuyen las emisiones de NO_x como precursores para contaminantes secundarios como ozono de esas fuentes dentro de la región.

3) Catemu

La contribución clave que se espera de la modelación en el caso de PM en Catemu es evaluar la contribución de las distintas fuentes emisoras en la zona al problema: mientras las fuentes relacionadas a actividades mineras son las que lejos exhiben las emisiones más

importantes de PM la modelación puede contribuir a caracterizar su impacto en las distintas estaciones de monitoreo de la zona.

4) Valle Aconcagua

Existen muchas fuentes emisoras en el Valle Aconcagua. En este caso y a través de la modelación, se busca su contribución al impacto tanto de los contaminantes primarios como de los contaminantes secundarios en la zona.

5) Región de Valparaíso

Mientras en todos los casos anteriores existen antecedentes de problemas manifiestos de contaminación atmosférica, existen otras zonas sin o con muy poco antecedentes. De esta manera e incorporando los inventarios de emisiones desarrollados en el estudio paralelo, la modelación apuntará a contribuir a la caracterización de toda la Región, incluyendo los centros urbanos de Gran Valparaíso, Quillota, La Calera, Llay Llay y San Antonio (aparte de aquellos mencionados en los puntos anteriores).

Para cada uno de los problemas mencionados existen antecedentes. Sin embargo, no existe ninguna base de datos que integre toda la información ambiental de la Región. (El portal SINCA apunta a establecer justamente esa base de datos a nivel nacional, pero por ejemplo todavía no cuenta con la información meteorológica.) En consecuencia, una tarea a la que se ha encargado este estudio, es justamente establecer esa base de datos integrando toda la información que maneja la SEREMI Salud de la Región, los resultados de la campaña de mediciones del estudio paralelo a este, entre otras. En los TdR, sólo se había contemplado recopilar la información del año 2009 y la tarea adicional de establecer una base de datos atmosféricos ha significado un desafío significativamente mayor.

En este contexto y en lo que sigue, se entregan los logros para cada de los objetivos específicos según los TdR originales (indicados por una "O") y aquellos establecidos por el acta en reunión con el Comité Técnico del Aire (CTA) del día 5 de enero del 2012 (indicados por una "A").

O1 Revisión y análisis de la calidad de la información existente de Calidad del Aire y Meteorología

Se ha revisado toda la información que originalmente se había contemplado en este estudio correspondiente a la información del año 2009. En este sentido, se ha cumplido con un 100% con esta objetivo (ver capítulo 4). Sin embargo, en reuniones con el comité técnico asesor (CTA) de este proyecto, se ha decidido que se debería revisar toda la información disponible, es decir todas las variables (meteorológicas y químicas) de todas las estaciones y de todos los años en la Región de Valparaíso. Dado que SINCA todavía no cuenta con toda esa información, la SEREMI Salud de Valparaíso entregó todos los datos disponibles. Estos datos llegaron en formatos muy poco uniformes y requirieron mucho trabajo antes de su revisión.

Este objetivo está tratado en el capítulo 4.

O2 Carga de información de calidad del aire y meteorología al portal SINCA, mediante IAIRVIRO

Se ha cargado un 100% de la información contemplada en este estudio que corresponde a la información del año 2009.

O3 Establecer a través de una modelación atmosférica, la extensión de las zonas latentes o saturadas en torno a áreas con problemas de contaminación por PM10 y PM2.5, o en torno a valles o cuencas de aire. La modelación debe abarcar a lo menos dos inviernos completos

Se realizaron simulaciones fotoquímicas para toda la Región de Valparaíso y simulaciones particulares para los casos Puchuncaví/Quintero, Concón y Catemu. Estas simulaciones, sólo representan un elemento en definir zonas latentes o saturadas y no se deben considerar fuera del contexto de las observaciones. Esta conexión y la falta de datos observacionales, ha sido particularmente importante en el caso del material particulado lo que ha limitado mucho el análisis de este contaminante.

Dados los atrasos en la entrega de los inventarios por razones técnicas, no se simularon dos inviernos completos. Sin embargo y dado que la modelación puede entregar información muy valiosa para el ozono, se simularon –aparte de tres meses de invierno- también tres meses de verano con un enfoque justamente en este contaminante.

Este objetivo será tratado en el capítulo 11.

O4 Identificar el movimiento de las masas del aire y la formación y transporte de contaminantes primarios y secundarios en la región

Este objetivo se ha tratado junto con el O3, a través de la modelación fotoquímica en conjunto al análisis de los datos observacionales.

Este objetivo será tratado en el capítulo 11.

O5 Definición de una red óptima de monitoreo para el control de la calidad del aire

Este objetivo específico es un resultado indirecto de los objetivos específicos O1, O3, O4, A1, A2, A3 y A4. En este sentido, la definición entregada responde a los resultados en estos capítulos. En particular, en cada uno de los objetivos mencionados los respectivos análisis llegan a un límite que a su vez existen en casi todos los casos por la falta de mediciones. De esta manera, las recomendaciones entregadas responden a esas limitaciones de la red existente y, además, apuntan a poder llegar a un análisis más completo de la situación ambiental atmosférica en la Región de Valparaíso en el futuro.

Este objetivo está tratado en el capítulo 12.

O6 Realizar un análisis socioeconómico costo-beneficio versus concentración, analizando el costo que implica un aumento de las concentraciones

No se ha entregado ningún escenario por parte de la CTA.

A1 Análisis de alcance espacial de las emisiones de SO₂ y PM10 en Catemu.

En el caso de Catemu, la preocupación de la autoridad radica en poder identificar contribuciones al impacto de SO₂ y PM10 por parte de la Fundición Chagres y la Central Los Vientos. Este problema se ha abordado a través de una simulación de dispersión (sin química) lo que demuestra que, dada la cercanía de ambas fuentes, parece probable que las estaciones de monitoreo midan en casi cualquier momento un impacto por parte de ambas fuentes emisoras.

Este objetivo está tratado en el capítulo 10.

A2 Análisis de alcance espacial de las emisiones de SO₂ en las zonas Punchuncaví/Quintero y Concón.

Tal como en el objetivo A1, este problema se ha abordado a través de una simulación de dispersión (sin química). Se muestra que los problemas de SO₂ en ambas zonas son problemas locales (y no provocados por fuentes lejanas). Además, los patrones espaciales de la dispersión según la modelación indican hasta dónde se pueden manifestar impactos por las respectivas fuentes.

Este objetivo está tratado en el capítulo 10.

A3 Establecer episodios de SO₂ en las comunas de Punchuncaví/Quintero y Concón

Este objetivo apunta a un análisis de las observaciones existentes en el SINCA con el fin de caracterizar episodios de altas concentraciones de SO₂ en ambas zonas. Para este fin, se presenta, en primer lugar, una caracterización general de los datos en términos de concentraciones de SO₂ y velocidad y dirección de viento en ambas zonas. Seguido, se contrasta la situación general por días de episodios de días de más alta contaminación. (También se define a lo que se refiere con el término “episodio”.) Aparte de los datos locales, también se incorporan los datos del radiosondeo de la estación Santo Domingo a este análisis. También en este caso se puede mostrar el carácter local del problema y, además, el impacto de la meteorología en su modulación.

Este objetivo está tratado en el capítulo 8.

A4 Caracterizar situación de PM10 en la comuna de Puchuncaví/Quintero

Se analizaron los datos de PM10 en la zona de Quintero análogo a aquellos del SO₂ (objetivo A3). Sin embargo, existen mucho menos datos en este caso lo que hace el análisis estadísticamente mucho menos significativo lo que limita este análisis significativamente.

Este objetivo está tratado en el capítulo 9.

2 Introducción

El presente documento, corresponde al informe final del Estudio: **“Diagnóstico Plan de Gestión Atmosférica – Región de Valparaíso Implementación de un Modelo Atmosférico”** elaborada por la Fundación para la Transferencia Tecnológica (UNTEC).

La contaminación atmosférica es un problema en muchas partes del país. Ella se genera a través de emisiones directas de los contaminantes y/o a partir de la existencia en la atmósfera de contaminantes químicamente reactivos (por ejemplo los NOx y los compuestos orgánicos volátiles, COVs) los cuales en presencia de radiación solar, dan lugar a otros contaminantes conocidos como contaminantes secundarios (el más conocido de ellos es el ozono), que a la vez, pueden contribuir a través de los procesos físico-químicos de la nucleación, condensación y coagulación, contribuyendo a la formación y acumulación de material particulado (MP).

En el caso chileno, la región con el mejor diagnóstico del problema de la contaminación atmosférica es la Región Metropolitana (RM), en la cual se supera la norma nacional frecuentemente de ozono, O₃ durante los meses cálidos del año y la de MP durante los meses fríos; con respecto al este último contaminante, también se superan los umbrales para episodios (alertas y pre-emergencias) en forma regular durante los meses indicados. Sin embargo, también existen antecedentes robustos en forma de mediciones en la Región de Valparaíso que indican problemas en términos de SO₂, MP (tanto de MP10 como de MP2.5) y O₃. De hecho, existe actualmente una declaración de zona saturada por SO₂ y MP10 en el área circundante al complejo industrial Las Ventanas, declarada por el D.S. N°346/94 de ministerio de Agricultura. También existe una declaración de zona latente por Anhídrido Sulfuroso (SO₂) en localidad de Chagres, declarada en el 1° artículo transitorio del D.S. N° 185/92 del Ministerio de Minería. Por otra parte, se observa también que existen zonas con concentraciones de O₃ cercanos a la latencia. Tal es el caso de la zona de La Calera y Quillota. Además, existen observaciones de corto plazo que indican una superación significativa de la norma en Llay-Llay o Casablanca.

A pesar de estos antecedentes, no existe un diagnóstico consolidado a nivel regional del problema; no ha existido una coordinación entre mediciones, inventarios de mediciones y modelación, que permitiría crear una base para tal diagnóstico. El Comité Técnico del Aire de V Región (CTA), ha tomado la iniciativa de llevar a cabo un diagnóstico regional, a través de la licitación de tres proyectos paralelos, complementarios y coordinados justamente en las tres áreas mencionadas.

Este estudio, corresponde al área de modelación pero, al mismo tiempo, considerándose un solo elemento en la iniciativa integrada de SEREMI Medio Ambiente V Región. Se implementó un sistema de modelación fotoquímica que permite llegar a un primer diagnóstico para estimar la magnitud del problema de la contaminación atmosférica en la Región de Valparaíso y de sus características en términos de transporte de masas del aire a nivel intra-regional (y lo más probable también inter-regional, ya que sin lugar a dudas la Región Metropolitana, tiene un impacto en la Región de Valparaíso). A pesar de los alcances de los TdR, los cuales ponen en enfoque en el Material Particulado (MP), se consideró importante incluir todos los contaminantes dentro de estudio: en primer lugar, se sabe que gran parte del MP_{2,5} depende de la fotoquímica, por lo que en ese sentido, se hace necesario evaluar el desempeño del modelo en su totalidad.

Este informe está estructurado de la siguiente manera: el capítulo 3 da a conocer los objetivos del estudio.

En el capítulo 4 se entregan los la revisión de las observaciones de calidad del aire y meteorología existente en la región y su transformación de la base de datos a formato SINCA.

El capítulo 5 detalla el modelo que se usa dentro en este estudio.

El capítulo 6 entrega una validación del la meteorología del modelo WRF. Esta validación es relevante para cualquier capítulo siguiente en que se aplique modelación.

En el capítulo 7 se entrega el análisis de los datos con respecto al problema del ozono en la ciudad de Los Andes.

El capítulo 8 entrega los resultados del análisis de los datos observacionales de SO_2 en las zonas de Concón y Puchuncaví/Quintero.

En el capítulo 9 se entrega un análisis similar para PM_{10} y sólo para la zona Puchuncaví/Quintero.

En el capítulo 10 se entrega la estimación de las áreas de impacto de las fuentes emisoras en las zonas de Ventanas, Concón y Catemu.

Los resultados de la modelación fotoquímica se encuentran en el capítulo 11.

Finalmente, el capítulo 12 entrega unas recomendaciones para optimizar la red de monitoreo en la Región de Valparaíso.

3 Objetivos

Los objetivos del estudio según los Términos de Referencia (TdR) y el acta del 05 de enero, 2012, son:

3.1 Objetivo General

Implementar un modelo de dispersión de contaminantes, específicamente PM_{10} y $PM_{2.5}$, para la Región de Valparaíso, que permita definir la movilidad de estos contaminantes al interior de la región, simular la formación de aerosoles secundarios además de identificar y delimitar la extensión de zonas latentes y saturadas.

El modelo implementado debe poder ser usado para corroborar los resultados que se obtendrán durante la elaboración del inventario de emisiones debiendo existir una retroalimentación entre ambas partes del estudio. Además debe existir una coordinación con el proyecto SINCA de CONAMA.

3.2 Objetivos Específicos

1. Revisión y análisis de la calidad de la información existente de Calidad del Aire y Meteorología.
2. Carga de información de calidad del aire y meteorología regional al portal SINCA, mediante IARVIRO.
3. Establecer a través de una modelación Atmosférica, la extensión de las zonas latentes o saturadas en torno a áreas con problemas de contaminación por PM_{10} y $PM_{2.5}$, o en torno a valles o cuencas de aire. La modelación debe abarcar a lo menos dos inviernos completos.
4. Identificar el movimiento de las masas de aire y la formación y transporte de contaminantes primarios y secundarios en la región.
5. Definición de una red optima de monitoreo para el control de la calidad del aire.
6. Realizar un análisis socioeconómico costo-beneficio versus concentración, analizando el costo que implica un aumento de las concentraciones en distintas zonas.
7. Análisis de alcance espacial de las emisiones de SO_2 y PM_{10} en Catemu.
8. Análisis de alcance espacial de las emisiones de SO_2 en las zonas Puchuncaví/Quintero y Concón.
9. Establecer episodios de SO_2 en las comunas de Puchuncaví/Quintero y Concón
10. Caracterizar situación de PM_{10} en la comuna de Puchuncaví/Quintero

4 Revisión de la información de calidad del aire y Meteorología existente

En esta actividad se contempló obtener la información de calidad del aire y de meteorología de las estaciones de monitoreo de la región para el año 2009 y transformarla al formato SINCA.

En total se ha recibido la información de las siguientes 31 estaciones:

Armat, Bomberos-Quillota, Calera, Catemu, Colmo, Concón, Chagres, GNL, Hidroeléctrica La Higuera, Junta de Vecinos, La Cruz-Quillota, La Cruz, La Palma, Las Gaviotas, Lo Campo, Los Vientos, Manzanar, Mina UVA, Nehuenco, Romeral, Rural, San Pedro, Santa Margarita, Terminal de combustibles Campiche, Viña Cosude, TecnoRec San Antonio, Principal, Sur, La Greda, Maitenes, Puchuncaví, Valle Alegre.

Las variables que se miden en gran parte de las estaciones son:

- **Meteorología:**

Velocidad del viento, dirección del viento, desviación estándar de la dirección del viento, presión, humedad relativa, precipitación, radiación.

- **Calidad del aire:**

CO, SO₂, O₃, NO, NO₂, NOx, CH₄, HCNM, THC, MP10, MP2.5.

Las estaciones miden entre una y 15 de estas variables.

En esta etapa del estudio, se ha recopilado toda la información tanto de calidad del aire como de meteorología de todas las estaciones y sus respectivas variables. En el Anexo I se entrega para cada estación los gráficos que indican la disponibilidad de datos; es decir, cuáles son las variables para cada estación y cuán completos son las series de tiempo de cada una de ellas. Además, se incluyen los gráficos de series de tiempo de toda la información meteorológica, más aquellos correspondientes a las variables de calidad del aire de O₃ y PM10. En algunas estaciones, se mide PM₁₀ como promedio diario y, además, sólo cada tres días. Los gráficos sólo muestran las series de tiempo a través de líneas continuas en el caso que estén disponibles los datos a nivel horario. En caso de valores diarios se hace a través de puntos.

En general, las estaciones entregan observaciones de alta calidad. Sin embargo, hay algunas excepciones que llaman la atención:

- 1) **Estación Chagres-La Humedad relativa:** la estación mide 100% de humedad relativa en muchas ocasiones durante todo el año, lo que parece poco razonable.

- 2) **Estación Colmito Hidroeléctrica La Higuera-Dirección del viento:** en la estación durante todo abril, entrega un valor cercano a cero, lo que no es consistente con los valores del resto del año.
- 3) **Estación Campiche-Ozono:** Toda la serie no parece consistente; tanto la línea base cambia como la variabilidad.
- 4) **Estación Campiche-Velocidad del viento:** Parece que hay un valor mínimo de esta variable de 0.6 m/s que es un valor muy alto para considerarlo como umbral de detección del equipo. Además, la serie de tiempo de alguna manera queda “pegada” a este umbral durante los meses de enero hasta la primera mitad de septiembre, no mostrando variabilidad de los valores mínimos diarios. A partir de la segunda mitad de septiembre la serie exhibe un aumento de los valores mínimos y también una variabilidad diaria.
- 5) **Estación Rural-Temperatura:** Los valores que se midieron durante el mes de diciembre no son razonables (entre 20 - 90°C).
- 6) **Estación Rural-Velocidad del viento:** se observa un salto a partir de la segunda semana de septiembre en el promedio de los valores.

Finalmente, toda la información se ha procesado y su formato convertido a un formato **IAIRVIRO** para ser incorporado a **SINCA**. Esta información fue entregada junto con el primer informe de avance en un CD.

5 Modelo numérico

En esta sección se describe el modelo que se usará en este estudio y se entrega una breve descripción de su implementación para la región.

La modelación de la calidad del aire comenzó en su evolución recién en los años 1970 aplicando métodos estadísticos objetivos con fines de pronóstico. Desde entonces los métodos de la modelación han avanzado significativamente, con los avances más recientes conduciendo a modelos acoplando la meteorología y procesos químicos en la atmósfera. Estos modelos se distinguen entre modelos que calculan la parte meteorológica y la parte química por separado ('offline', por ejemplo Jacobs *et al.*, 2001) o un tratamiento integrado ('online', por ejemplo Grell *et al.*, 2005). En lo siguiente se describe un sistema de modelación basado en un modelo 'online'.

El sistema de modelación se basa en un modelo numérico atmósfera-química acoplado de meso-escala. Tales modelos representan las variables de la atmósfera, tanto físicas como químicas (incluyendo los aerosoles) en una grilla tridimensional de alta resolución. Dado una condición inicial, se integran las ecuaciones matemáticas que controlan la evolución de esas variables. En esa integración en el tiempo el modelo considera todas las interacciones en la atmósfera y, en consecuencia, provee una representación completa de los procesos físicos y químicos que controlan la calidad del aire en ambientes complejos tal como la Macrozona.

El modelo numérico aplicado en este proyecto es el "Weather Research and Forecasting Model with Chemistry (WRF-CHEM¹)", 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 centros de investigación y universidades. Es un modelo al estado del arte en términos de tecnología de pronóstico tanto físico como químico. WRF está siendo 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 simulaciones 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 numéricamente avanzado y computacionalmente eficiente, apropiado para la simulación de fenómenos característicos de unos metros hasta miles de kilómetros. El modelo provee una gama de opciones para las parametrizaciones físicas que representan procesos importantes como por ejemplo las interacciones suelo – atmósfera, radiación solar, física de nubes y precipitación. El modelo numérico es inicializado y forzado por los bordes usando datos meteorológicos (por ejemplo Global Forecast Model, GFM o Reanálisis, ambos modelos de NCEP, EE.UU.) y químicos (MATCH-MPI del Instituto Max-Planck, Mainz, Alemania) de modelos globales 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 químicas de la fase gaseosa, más los aerosoles. La química es "online" y su tratamiento numérico es

¹ www.wrf-model.org y www.wrf-model.org/development/wg11/wg11.php

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. En el modelo WRF-CHEM se puede elegir entre distintos *paquetes* químicos. Todos los paquetes tienen en común el método de “resistencia – flujo” para la deposición seca (Wesely, 1989). Para la fotólisis se puede elegir entre el esquema original de Madronich (Madronich, 1987), TUV (Madronich and Flocke, 1998) y FAST-J (Barnard *et al.*, 2004). Para las emisiones biogénicas se puede elegir entre dos esquemas que las calculan en línea, uno basado en Simpson *et al.* 1995 y Guenther *et al.* 1994, el otro basado en MEGAN (Guenther *et al.*, 2006). Los mecanismos químicos que se pueden elegir son RADM2 (Stockwell *et al.*, 1990), RACM (Stockwell *et al.*, 1997) y CBMZ (Zaveri *et al.*, 1999). Finalmente, se puede elegir entre dos módulos para los aerosoles, MADE/SORGAM (Ackermann *et al.*, 1998 and Schell *et al.*, 2001) y MOSAIC (Zaveri *et al.*, 2005).

El modelo se ha usado exitosamente a tanto nivel internacional (por ejemplo Grell *et al.*, 2005) como nacional (Schmitz *et al.*, 2010, Schmitz y Falvey, 2007, Schmitz *et al.*, 2007, Schmitz and Falvey, 2006). De particular interés en este estudio son los trabajos de Schmitz *et al.*, 2007 y Schmitz *et al.*, 2010, donde el modelo fue configurado y aplicado para la macrozona con una resolución de 4 km. En este sentido, la fase de implementación ha avanzado desde antes del comienzo del proyecto. Sin embargo, se pretende tener dominios de más alta resolución horizontal. Las figuras 5.1 y 5.2 son ejemplos del anidamiento del modelo WRF-Chem para llegar de una baja a una alta resolución (de 1km de resolución enfocada en Ventanas en la figura 5.2).

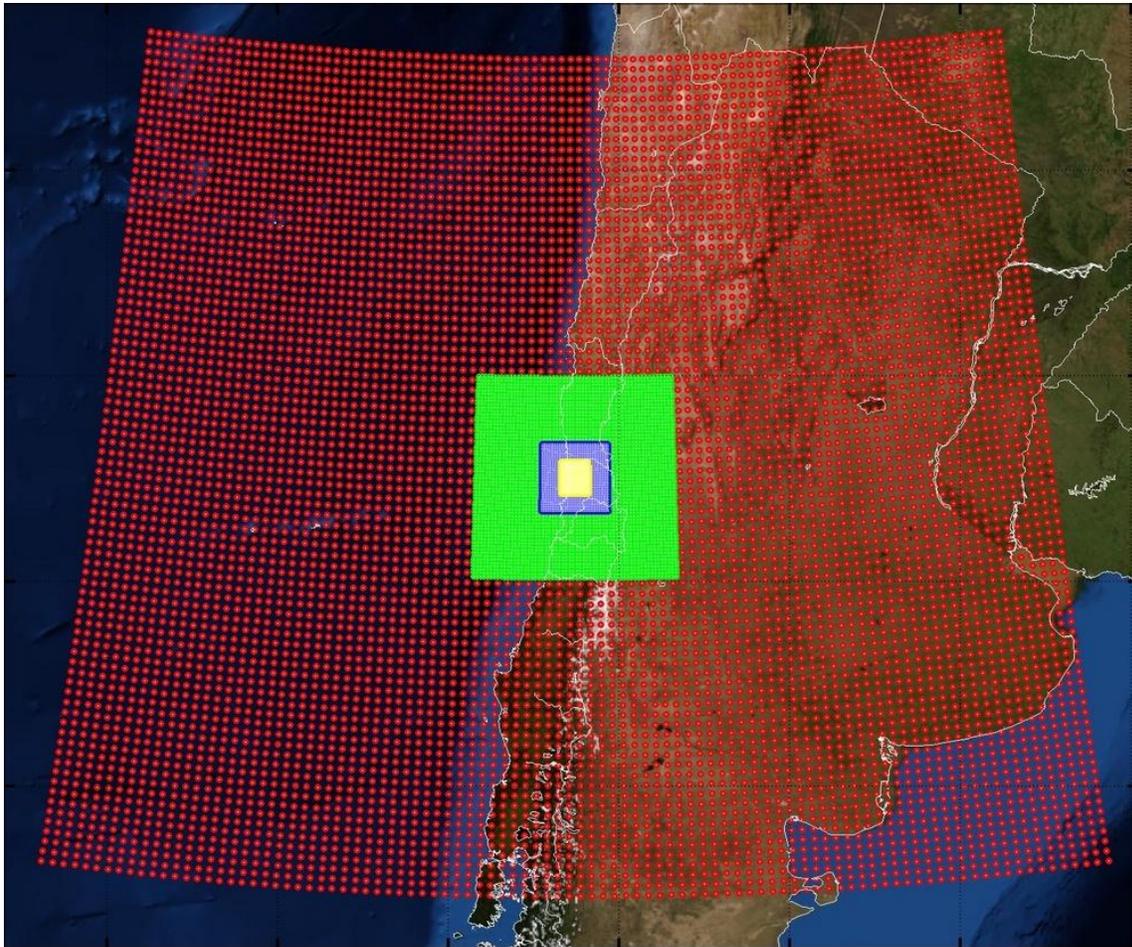


Figura 5.1: Ejemplo de configuración para simular la circulación de las masas del aire, las reacciones fotoquímicas y el material particulado. En este ejemplo, el modelo consiste en cuatro dominios anidados de resoluciones de 27 km (rojo), 9 km (verde), 3km (púrpura) y 1 km (amarillo). El dominio exterior captura fenómenos de la escala sinóptica mientras los dominios interiores resuelven las de la meso-escala. El centro para cada dominio en este ejemplo es el mismo para cada dominio con el centro en la localidad de Ventanas.

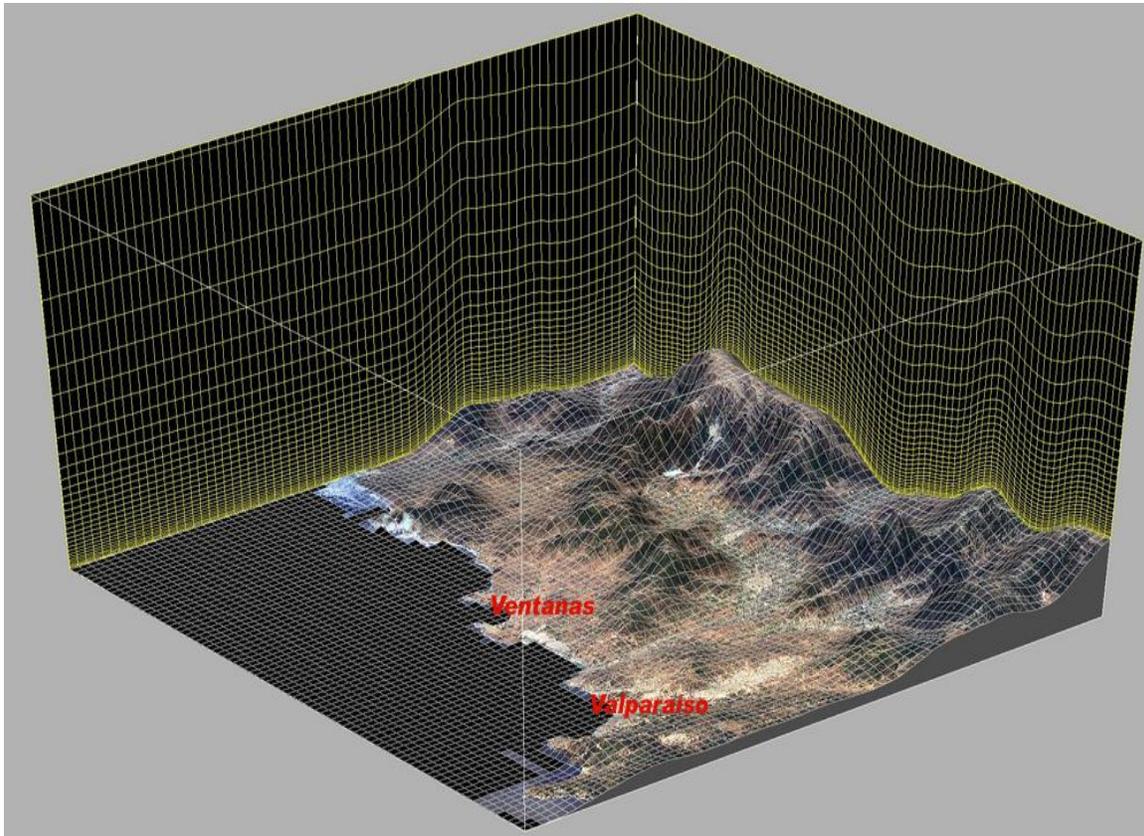


Figura 5.2: El dominio interior consiste en una grilla tri-dimensional de alta resolución horizontal (1km) en la que se resuelven las ecuaciones que controlan el comportamiento físico y químico de la atmósfera. Se resuelve bien la topografía compleja de la Región de Valparaíso. La figura indica las ciudades de Valparaíso y Ventanas.

Dominio	
Resolución horizontal	1 km, 333 m
Número de niveles verticales	42
Puntos de grilla	73 x 73 x 42
Altura del tope del dominio	~20 Km.
Espaciamiento en superficie	~20 m, ~15 m
Espaciamiento 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	NOAH 4 layer scheme
Tratamiento de capa superficial	Monin-Obukhov Similaridad
Parametrización de la Capa Limite	YSU, QNSE
Esquema de convección	Kain-Fritsch
Microfísica de nubes y precipitación	WSM (3 especies microfísicas)
Parametrización de turbulencia	Smagorinsky (primer orden)
Dinámica	
Núcleo Dinámico	EM (Advanced Mass), No-Hidrostática
Advección	Positiva Definitiva
Esquema de integración temporal	Runge-Kutta (3° orden)
Integración Temporal	
Paso del tiempo	~5 s, ~1.85 s
Hora de inicialización	00 UTC
Bordes laterales	GFS, NCEP Reanálisis
Temperatura y humedad de suelo	Libre
Frecuencia de salida	10 minutos ' 1 hora

Tabla 5.1: Posibles configuraciones del modelo WRF.

Referencias Citadas

- Ackermann, I. J., H. Hass, M. Memmesheimer, A. Ebel, F. S. Binkowski, and U. Shankar, 1998: Modal aerosol dynamics model for Europe: Development and first applications. *Atmos. Environ.*, 32, 2981–2999.
- Barnard, J.C., E.G. Chapman, J.D. Fast, J.R. Schmelzer, J.R. Schlusser, and R.E. Shetter, 2004: An evaluation of the FAST-J photolysis model for predicting nitrogen dioxide photolysis rates under clear and cloudy conditions. *Atmos. Environ.*, 38, 3393-3403.
- Grell, G.A., Peckham, S.E., Schmitz, R., McKeen, S.A., Frost, G., Skamarock, W.C., Eder, B., 2005: Fully coupled “online” chemistry within the WRF model. *Atmos. Environ.*, 39, 6957-6975.
- Guenther, A., Zimmerman, P., Wildermuth, M., 1994: Natural volatile organic compound emission rate estimates for US woodland landscapes. *Atmos. Environ.*, 28, 1197–1210.
- Guenther, A., T. Karl, P. Harley, C. Wiedinmyer, P. Palmer and C. Geron, 2006, Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature (MEGAN). bai.acd.ucar.edu/Megan/index.shtml
- Jakobs, H. J., S. Tilmes, A. Heidegger, K. Nester and G. Smiatek, 2001: Short-term ozone forecasting with a network model system during Summer 1999. *J. Atmos. Chem.*, 42, 23-40.
- Madronich, S., 1987: Photodissociation in the atmosphere, 1, actinic flux and the effects of ground reflections and clouds. *J. of Geophys. Res.*, 92, 9740–9752.
- Madronich, S. and S. Flocke, 1998, The role of solar radiation in atmospheric chemistry, in *Handbook of Environmental Chemistry* (P. Boule, ed.), Springer_Verlag, Heidelberg, pp. 1-26.
- Schell B., I. J. Ackermann, H. Hass, F. S. Binkowski, and A. Ebel, 2001: Modeling the formation of secondary organic aerosol within a comprehensive air quality model system. *J. of Geophys. Res.*, 106, 28275–28293.
- Schmitz R., Falvey M., Clerc J., Ozimica N. y Oporto L., 2010, Optimización del Modelo Fotoquímico de alta resolución implementado en la fase 2007 y ampliación de su alcance a material particulado respirable y precursores de interés, Informe Final, CONAMA Nacional
- Schmitz, R., Falvey, M. y Jacques, M., 2007: Implementación de un Modelo Fotoquímico para la Macrozona Central del País, Informe Final, CONAMA
- Schmitz, R. y Falvey M., 2007: Diseño de Plan Operacional de Seguimiento de la Calidad del Aire para Ozono Troposférico en la Región Metropolitana, Informe Final, CONAMA RM.

- Schmitz, R. and Falvey M., 2006: Numerical air quality forecast in Santiago de Chile, 8th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology, Foz de Iguazú, Brasil.
- Simpson D., A. Guenther, C. N. Hewitt and R. Steinbrecher, 1995: Biogenic emissions in Europe I: Estimates and uncertainties. *J. Geophys. Res.* 100D, 22875-22890.
- Stockwell, W. R., P. Middleton, J. S. Chang, and X. Tang, 1990: The second generation regional acid deposition model chemical mechanism for regional air quality modelling. *J. of Geophys. Res.*, 95, 16343–16367.
- Stockwell, W. R., F. Kirchner, M. Kuhn, and S. Seefeld, 1997: A new mechanism for regional atmospheric chemistry modeling. 102, 25847–25879.
- Wesely, M. L., 1989: Parameterization of surface resistance to gaseous dry deposition in regional numerical models. *Atmos. Env.*, 16, 1293–1304.
- Zaveri R.A., and L.K. Peters. 1999: A New Lumped Structure Photochemical Mechanism for Large-Scale Applications. *Journal of Geophysical Research. D. (Atmospheres)*, 104, 30387-30415.
- Zaveri, R.A., R.C. Easter, J.D. Fast, and L.K. Peters, 2005: MOSAIC: Model for simulating aerosol interactions and chemistry. In preparation, to be submitted to *J. Geophys. Res.*

6 Validación de la meteorología del modelo WRF

En el análisis de la sección anterior, se consideraron sólo datos observacionales. En general y con fines de poner las observaciones en un contexto espacial, se requiere el uso de modelos. Y obligatorio al uso de un modelo es su validación. Dado que en los casos analizados en la sección anterior y los otros casos a analizar en la siguiente sección, se trata de una aplicación del modelo con fines de dispersión, la que depende, a esta escala, exclusivamente de la meteorología. En este sentido y en lo que sigue, se entrega una validación de la parte meteorológica del modelo en términos de velocidad y dirección de viento. Los datos meteorológicos simulados del año 2010 corresponden a los datos de Falvey *et al.*, 2011²; estos datos fueron validados que cuenta a nivel país, pero no con las observaciones con las que se cuenta en este estudio. De las observaciones disponibles se tomaron sólo aquellas que contaron con más de un año de datos de viento. (No era necesario contar con datos observacionales del 2010 ya que la comparación con los fines de este estudio más bien es a nivel climatológico (y no a nivel día a día).

En primer lugar, la figura 6.1 muestra cualitativamente la diferencia entre las observaciones del viento observado (flechas azules) y el viento simulado con el modelo WRF (flechas rojas) durante el día (panel arriba) y la noche (panel abajo). En ambos casos se tomaron los promedios de todo el año; se distingue en el análisis durante los vientos durante los periodos entre 14:00-18:00 y la noche entre 02:00-06:00. Ambos periodos se consideran característicos para los flujos diurnos y nocturnos, respectivamente. La figura también muestra muy bien el impacto de la topografía en el viento: durante el día, con mayor insolación, los vientos son más fuertes (resultado de las brisas mar/tierra y valle/montaña) mientras en la noche el forzamiento topográfico es más bien débil y se nota principalmente en las estaciones costeras donde los vientos generalmente muestran una componente del este producto de la brisa tierra/mar (en adición a la componente sinóptica del sur).

Se puede ver que en ambos casos, el modelo se comporta generalmente en comparación con las observaciones tanto en magnitud como en dirección y es capaz de reproducir los rasgos principales de los patrones diurnos y nocturnos. Sin embargo, en la estación Chagres se pueden observar diferencias muy grandes entre WRF y las observaciones. La figura 6.2 compara los ciclos diarios de la velocidad y la dirección de viento en esta estación según las observaciones (paneles arriba) y WRF (paneles abajo). Claramente, el modelo es muy distinto a las observaciones. Las magnitudes del viento e incluso las horas en que ocurren los máximos son distintas entre las observaciones y el modelo. Hay varias posibilidades para estas diferencias. **a)** Podría ser que las coordenadas de la estación que tiene el consultor no son las exactas y, por lo tanto, no se

² Falvey M., Ibarra M., Jacques M., Muñoz R., Schmitz R., Garreaud R., Molina A., 2011, Ámbitos de Investigación Necesarios para el Desarrollo Eólico en Chile Relacionados con el Comportamiento del Recurso Viento, Informe Final, Comisión Nacional de Energía.

comparan datos del mismo lugar. **b)** El viento no se mide a 10 metros de altura lo que resultaría en vientos observados más fuertes. **c)** El desempeño en esta estación es malo.

En un ejemplo de la eficacia del modelo, se ilustra en la figura 6.3 que representa los ciclos diarios de la velocidad y de la dirección de viento en la estación Los Maitenes De acuerdo a lo observado (medido) (paneles arriba) y lo modelado en WRF (paneles abajo). Se puede apreciar que el modelo simula muy bien el comportamiento del viento según las observaciones. En el Anexo II se incluyen los gráficos equivalentes a las de las figuras 6.2 y 6.3 para el resto de las estaciones (figuras A II.1 – AII.18).

Finalmente, la figura 6.4 muestra en forma resumida el desempeño del modelo. Esta figura compara la velocidad del viento observado (eje X) y simulado (eje Y). Los puntos rojos indican el máximo diario de la velocidad promedio, los puntos azules la velocidad promedio y los puntos verdes el mínimo diario de la velocidad promedio. Nuevamente, se destaca la estación “Meteorológica” de la red “Chagres” cuya velocidad del viento es fuerte mente subestimada. Sin embargo, el sesgo general es menos de 1 m/s que se considera muy bajo, es decir que –en promedio- existe muy poca diferencia entre el modelo y las observaciones. Se ha mostrado ya por Falvey *et al.*, 2011, que un sesgo de esta magnitud está dentro de lo que se puede lograr con el modelo WRF en general y en el territorio nacional en particular.

En resumen, se confirma lo señalado por Falvey *et al.*, 2011, en que el modelo tiene un buen desempeño con respecto al viento. Dado que es justamente el viento una de las variables claves para la dispersión de contaminantes, el desempeño del modelo indica que también puede entregar información confiable con respecto a la dispersión de contaminantes. Con respecto a la estación “Meteorológica” de la red “Chagres”, se recomienda una auditoria de la misma con fines de corroborar sus datos. En caso que sean efectivamente tan altos los valores para la velocidad del viento, sería necesario un estudio particular para entender los procesos responsables para ellos.

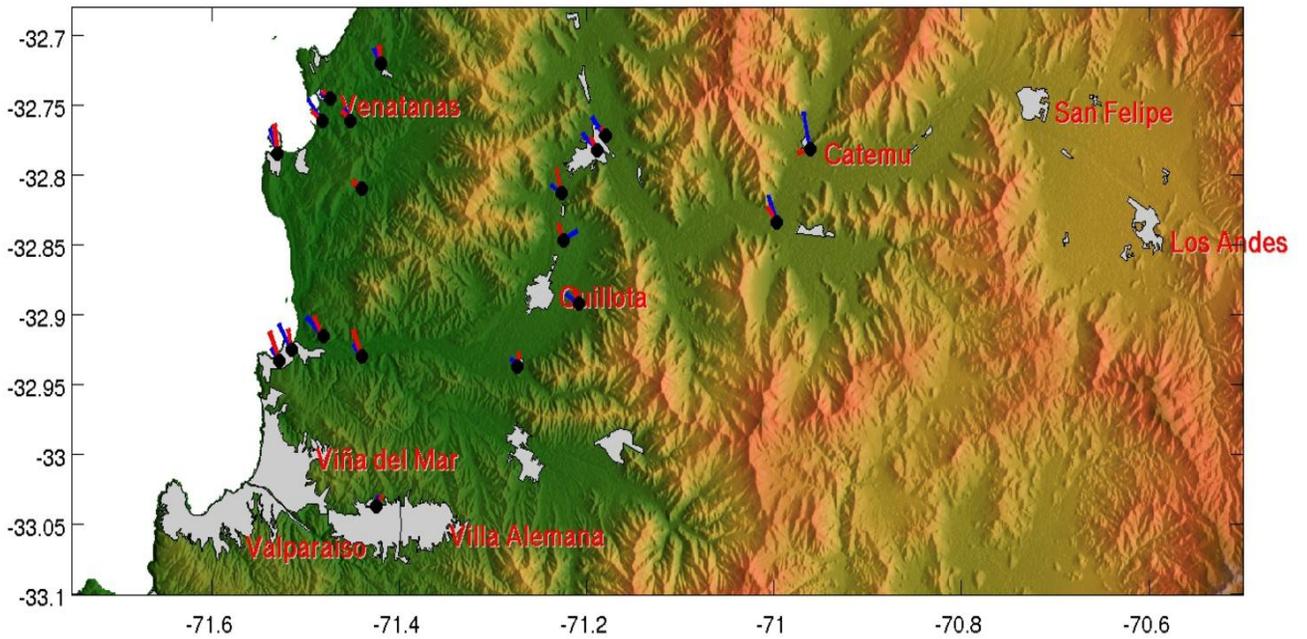
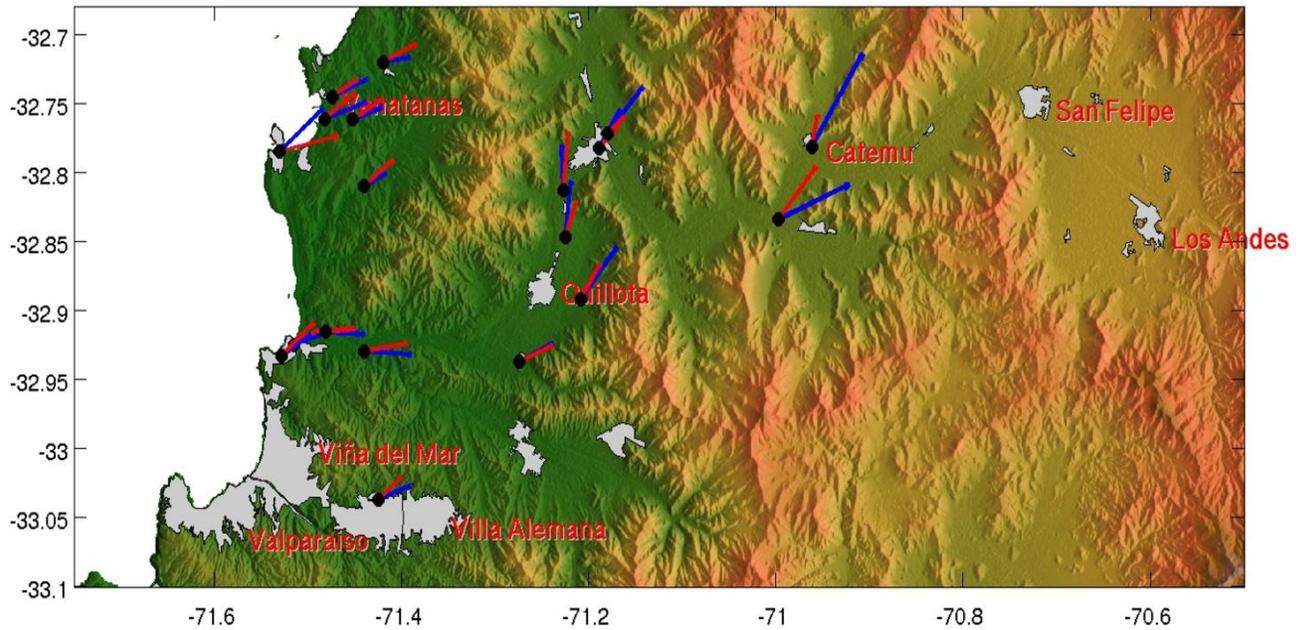


Figura 6.1: Comparación entre vientos observados (flechas azules) y simulados por WRF (flechas rojas). Los puntos negros indican la ubicación de cada estación. Cada flecha comienza en este punto y sus respectivas direcciones muestran hacia dónde sopla el viento; su largo es proporcional a su velocidad. El panel superior muestra el promedio entre las 14:00-18:00 del año 2010 y el panel inferior entre las 02:00-06:00 del mismo año.

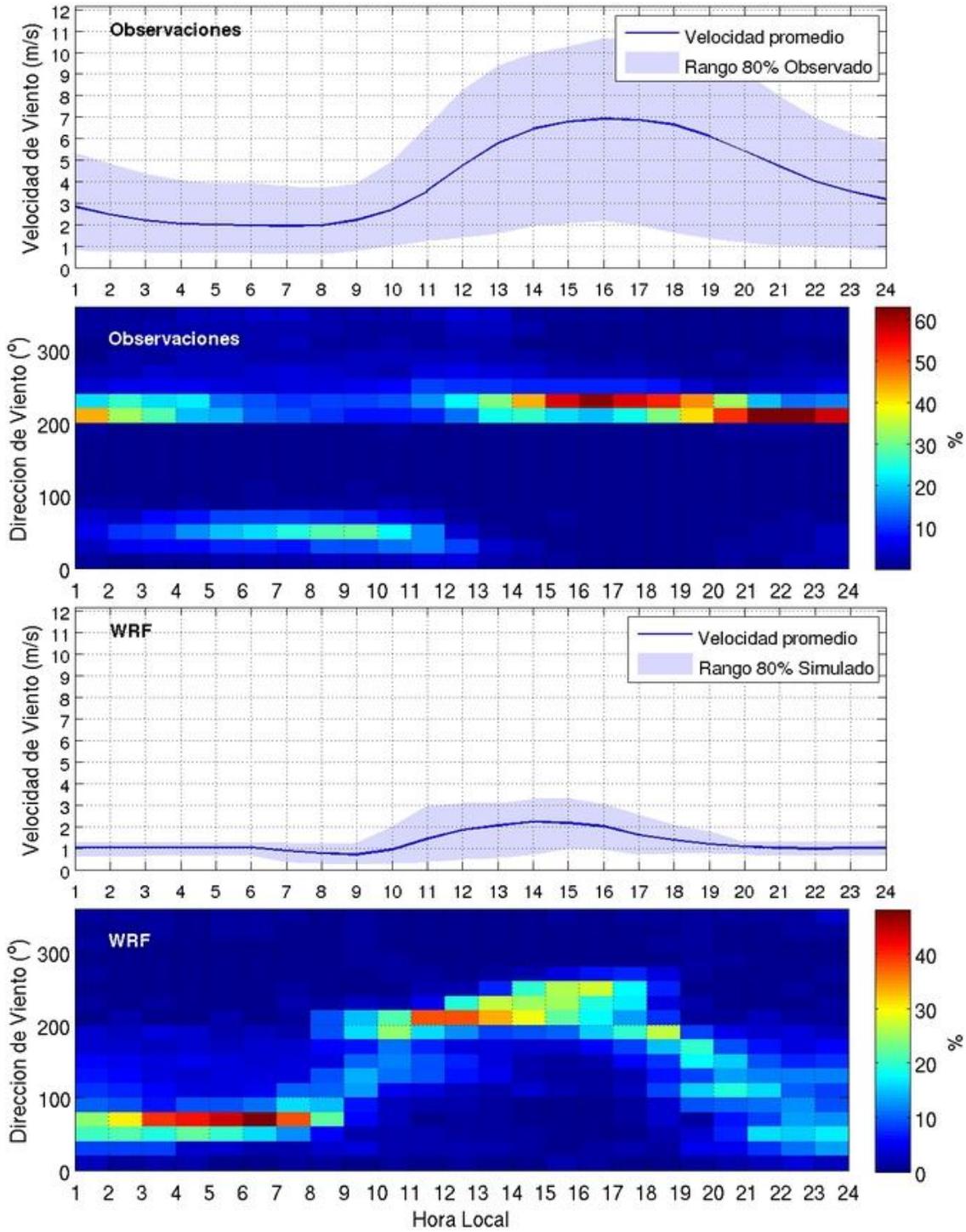


Figura 6.2: Comparación entre los ciclos diarios de la velocidad y la dirección de viento observados y simulados para la estación Meteorológica de la red Chagres. Los dos paneles superiores muestran los ciclos observados y los dos inferiores los según el modelo WRF.

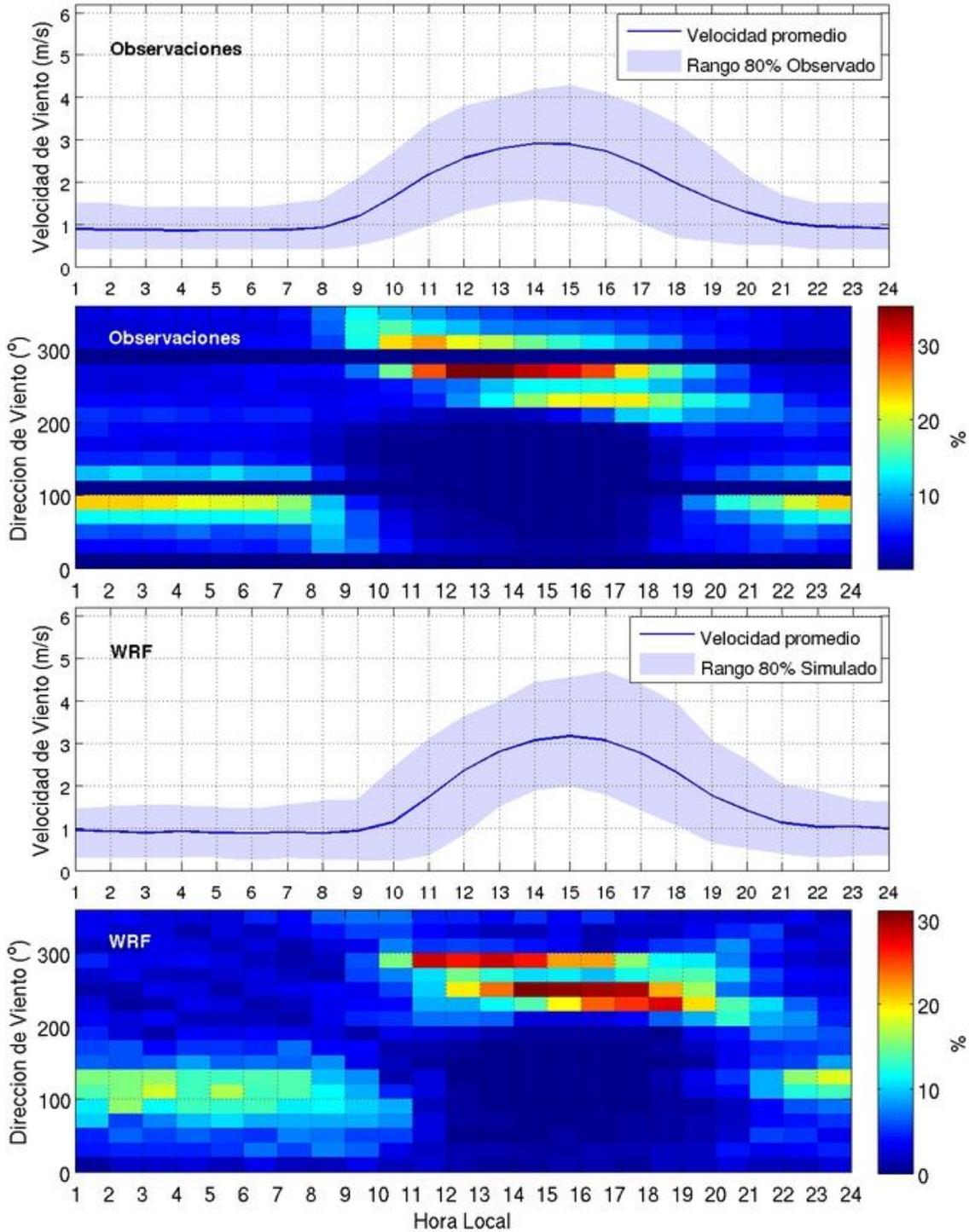


Figura 6.3: Equivalente a la figura 19 pero para la estación Los Maitenes de la red Codelco. En este caso, se puede observar muy bien que existen direcciones de viento dominantes durante el día y la noche; sin embargo en las fases de transición (entre las 08:00-11:00 y 19:00-22:00) los gráficos indica que la dirección puede tomar casi cualquier valor (indicado por bajas frecuencias en todo el rango de las direcciones).

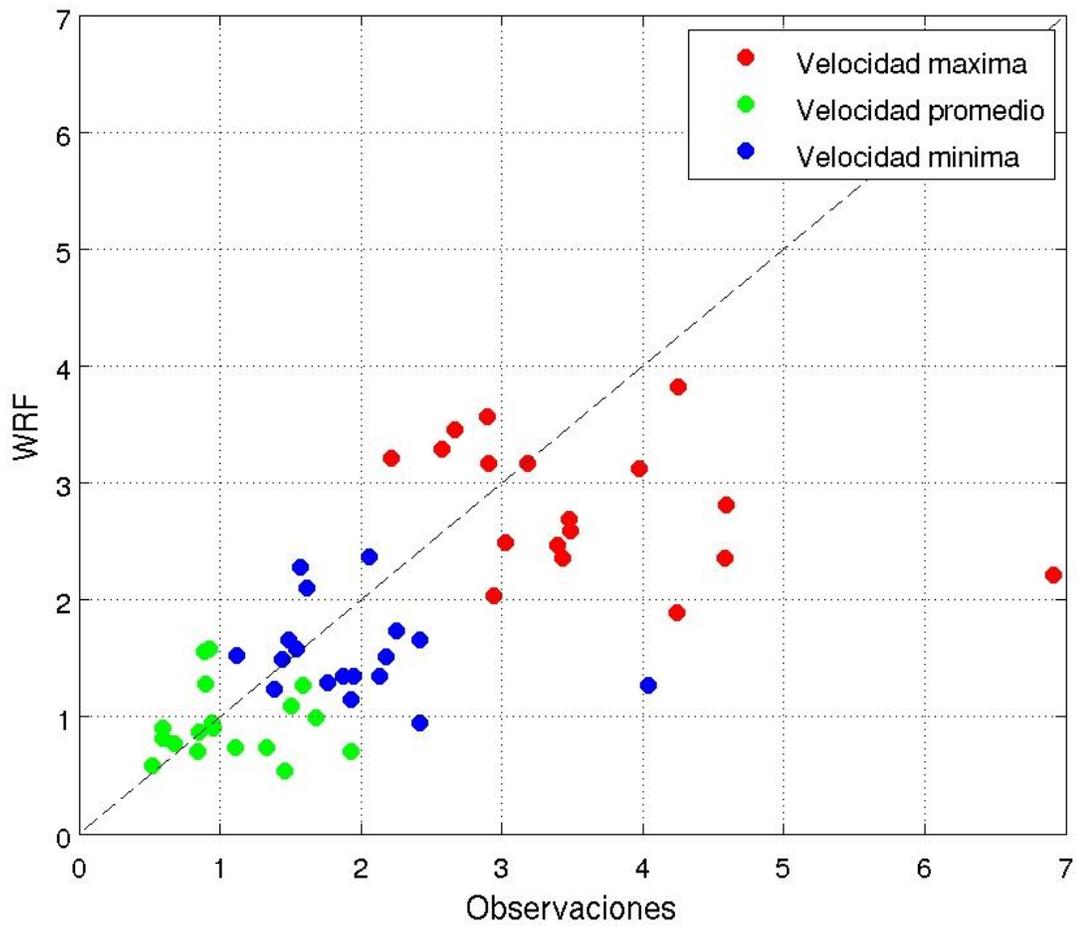


Figura 6.4: Comparación de los promedios de las velocidades máximas horarias (puntos rojos), mínimas horarias (puntos verde) y de los promedios anuales (puntos azules) entre observaciones (eje X) y el modelo WRF (eje Y). Cada punto de cada color corresponde a una estación de la figura 6.1.

7 El O₃ en Los Andes

Antes de ocupar un modelo numérico (sea meteorológico o de dispersión) es importante caracterizar, en primera instancia, el problema a través de un análisis de los datos observacionales. Con este fin, se han analizado los datos de ozono obtenidos en la parte de mediciones del proyecto paralelo (a cargo de la empresa Algoritmos). Además, se ponen estos datos de ozono en un contexto de aquellos de una campaña de mediciones a cargo del CENMA (Estudio Fotoquímico Regional, Informe Final, 2010) y datos obtenidos por la red MACAM2. Aparte de los datos de campañas, también se ha empezado con el análisis de datos entregado por la SEREMI Salud. En lo que sigue, se da un resumen de los datos de campaña considerados en este informe y su análisis. Cabe señalar que en el caso del análisis del ozono en Los Andes no sólo se analizan datos de la Región de Valparaíso, sino también de la Región Metropolitana (datos de las estaciones Parque O'Higgins, Las Condes y Colina). Eso se debe a que el ozono es un contaminante secundario y, por lo tanto, refleja las características de la fotoquímica de más largas distancias. En este sentido y con fines de poder mejor interpretar las características del ozono en Los Andes, se debe considerar también aquella información mencionada de la Región Metropolitana.

7.1 Datos

7.1.1 Datos Algoritmos

Los datos de Algoritmos corresponden a la estación de Los Andes (ver Proyecto Estudio Diagnóstico, Plan de Gestión Atmosférica Región de Valparaíso Monitoreos Exploratorios en Zonas no Evaluadas Monitoreo Calidad del Aire, Informe Avance 1). El periodo de los datos es de 1 de enero, 2010, hasta 2 de mayo, 2010. La resolución de los datos es de 5 minutos y se disponía de datos "validados".

7.1.2 Datos CENMA

Se disponía de los datos de ozono del proyecto CENMA mencionado para las siguientes estaciones y sus respectivos periodos.

Estación	Periodo
Viña del Mar	16.03.2010 a 07.04.2010
Villa Alemana	16.03.2010 a 07.04.2010
Quillota	01.03.2010 a 07.04.2010
Los Andes	01.03.2010 a 06.04.2010
Parque O'Higgins	01.12.2009 a 05.01.2010
Las Condes	01.12.2009 a 05.01.2010
Colina	10.12.2009 a 04.01.2010

Todos los datos están disponibles a una resolución temporal de una hora.

7.1.3 Datos MACAM2

Para las estaciones Parque O'Higgins y Las Condes se han considerado los datos de ozono oficiales de SINCA de la red MACAM2.

7.2 Análisis de los datos

7.2.1 Serie de tiempo completa de mediciones de ozono en Los Andes

La figura 7.1 muestra la serie de tiempo medida por Algoritmos entre 1 de enero y 2 de mayo, 2010. Los datos en la figura se presentan con la resolución original de 5 minutos. La figura muestra una gran variabilidad del ozono inter- e intra-diaria. Aparte de esta variabilidad, también llama la atención que los meses febrero, marzo y los comienzos de abril presentan mayores concentraciones que enero y fines de abril. Mientras la disminución en las concentraciones hacia fines de abril se puede explicar a través del ciclo estacional natural de ozono (concentraciones más altas durante los meses cálidos y más bajas durante los meses fríos), las concentraciones más bajas en enero no tienen una explicación tan intuitiva. Lo que además llama atención son las concentraciones mínimas durante enero cerca de cero (y en muchos días cero) que no se observan durante los otros meses; de hecho, en promedio los valores mínimos diarios durante febrero son unos $12 \mu\text{gr}/\text{m}^3$ más altos que durante enero. En este sentido, se podría pensar que hay una diferencia entre la calibración del equipo durante enero y los otros meses. Sólo a modo de ejemplo se presenta la serie de tiempo "corregida" en el panel inferior. No se sabe si existe la posibilidad de revisar posibles problemas de mediciones en enero posteriormente, sin embargo, creemos que la figura 7.1 enfatiza la necesidad de hacerlo y, en el caso que sea necesario, corregir los datos. Ya que no hay antecedentes de que exista o no un problema real en las mediciones de enero en lo que sigue se ocupan los datos tal como se presentan en el panel superior de la figura 7.1 (es decir sin correcciones).

7.2.2 Ciclo diario de ozono en Los Andes

La figura 7.2 muestra el ciclo diario de ozono en Los Andes que se basa en los datos originales con resolución temporal de cinco minutos. La línea gruesa indica el ciclo promedio de todo el periodo de medición; también se indican en la figura los percentiles 10 y 90. (En el percentil 10 se observa los mínimos de cero lo que, tal como se ha mencionado anteriormente, podría tener su origen en un posible problema de las mediciones.) El ciclo indica valores bajos durante la noche y la mañana de alrededor de $20 \mu\text{gr}/\text{m}^3$. A partir del comienzo de la radiación solar suben las concentraciones que llegan a su máximo poco después del mediodía arriba de los $100 \mu\text{gr}/\text{m}^3$ y se mantienen hasta aproximadamente las 18 hrs con una disminución posterior rápida. Aparte del periodo largo en que se mantiene el máximo (alrededor de 6 horas) también llama la atención la presencia de dos máximos relativos en el percentil 90 que corresponden a las horas 14 y 17 con el último con valores levemente más altos que el primero. Mientras en muchas estaciones de la red MACAM2 de la Región Metropolitana la forma del ciclo diario promedio se mantiene generalmente durante todos los días (lo que sí cambia es la amplitud), eso no es el caso para la estación Los Andes. Las figuras 7.3 – 7.5 muestran esa variabilidad en la forma del ciclo diario a modo de ejemplos de tres tipos de ciclos: i) ciclos bi-modales (figura 7.3), ii) ciclos con el máximo tardío (figura 7.4) y iii) los dos ciclos que representan los días con los máximos valores del promedio de 8 horas de ozono (figura 7.5). Esos ejemplos demuestran claramente la gran variabilidad en la forma del ciclo diario lo que indica, además, una mayor complejidad en el problema de de ozono.

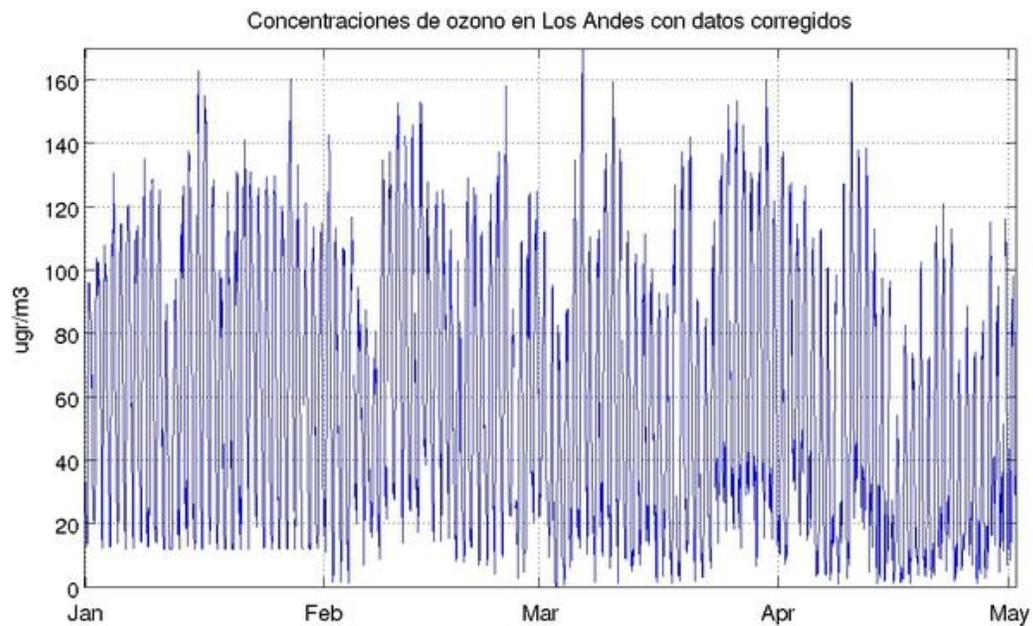
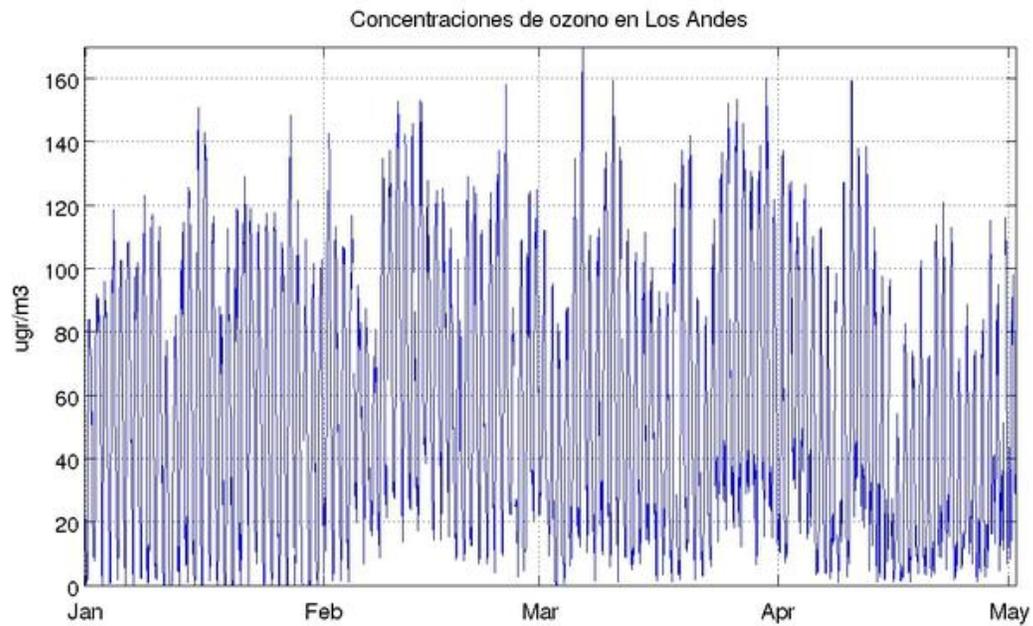


Figura 7.1: Serie de tiempo de ozono en la estación Los Andes obtenidos a través de mediciones de Algoritmos con una resolución temporal de 5 minutos. Se observa una gran variabilidad inter- e intra-diaria. En el panel arriba se muestran los datos originales, en el inferior los datos “corregidos”.

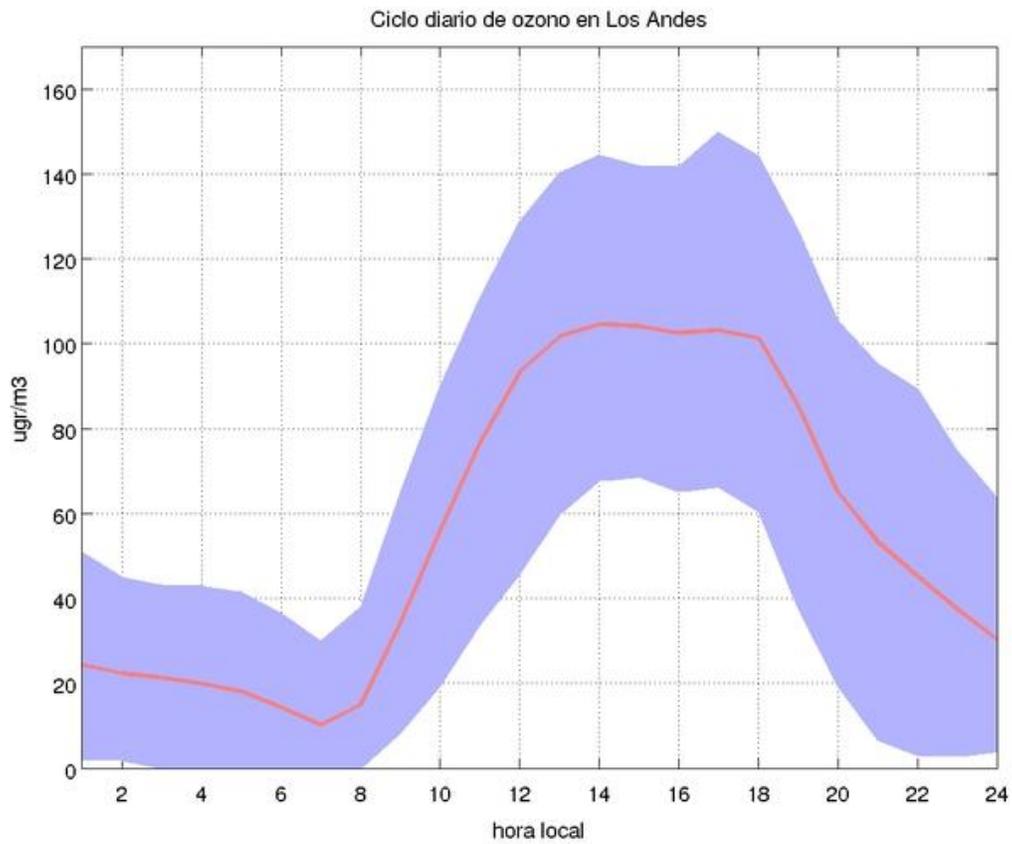


Figura 7.2: Ciclo diario de ozono en la estación Los Andes. La línea rosada indica el ciclo diario promedio, los límites superiores e inferiores del área sombreado los percentiles 90 y 10, respectivamente.

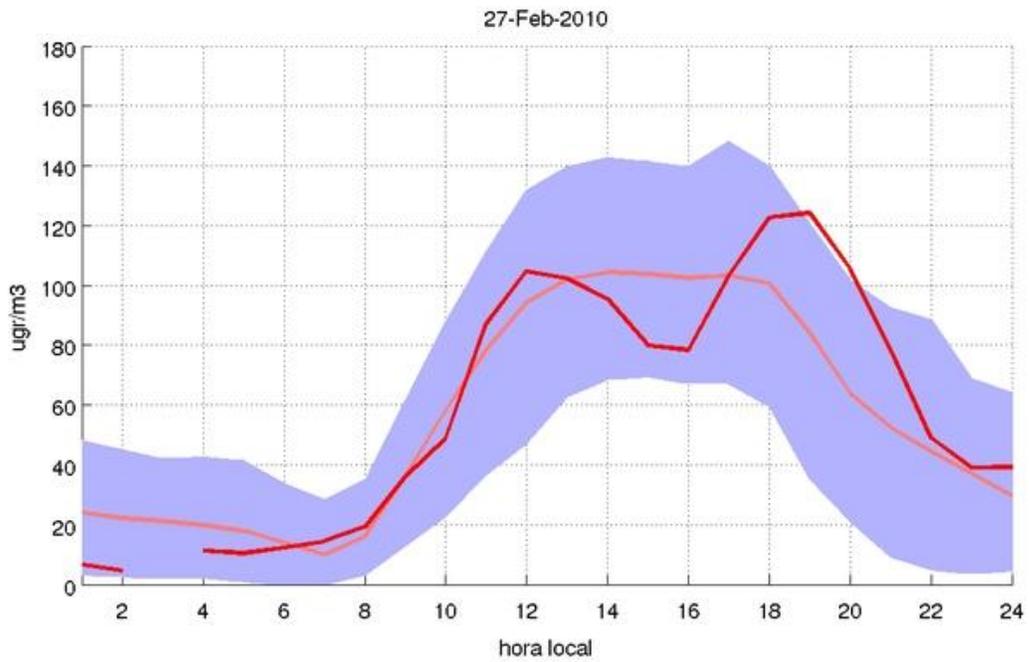
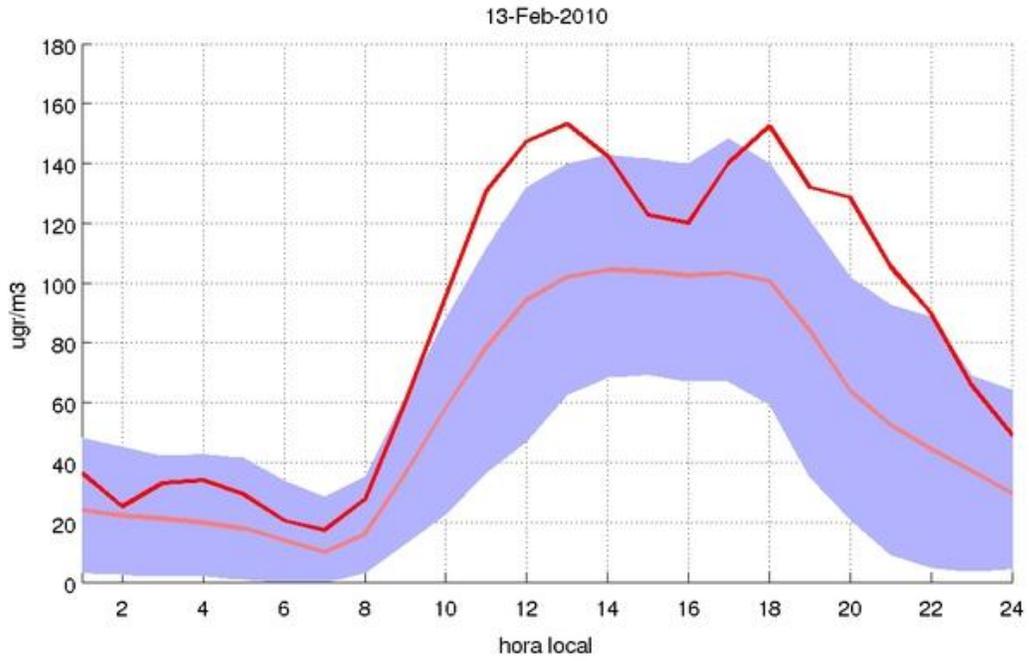


Figura 7.3: Equivalente a figura 7.2, pero se indican, además, dos ciclos diarios (13 y 27 de febrero, 2010) que muestran un comportamiento bi-modal.

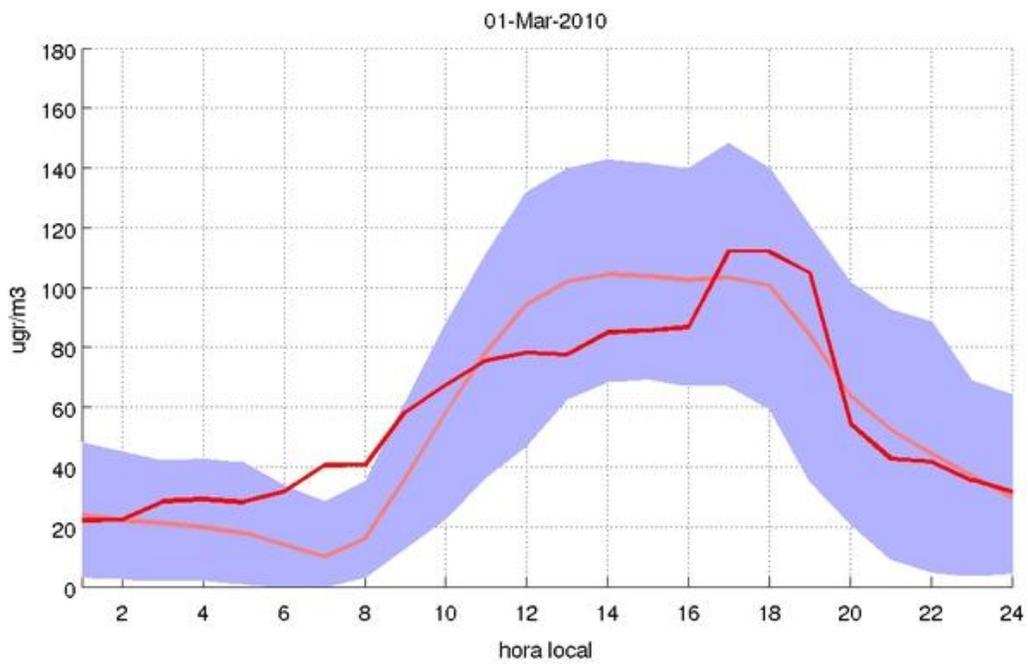
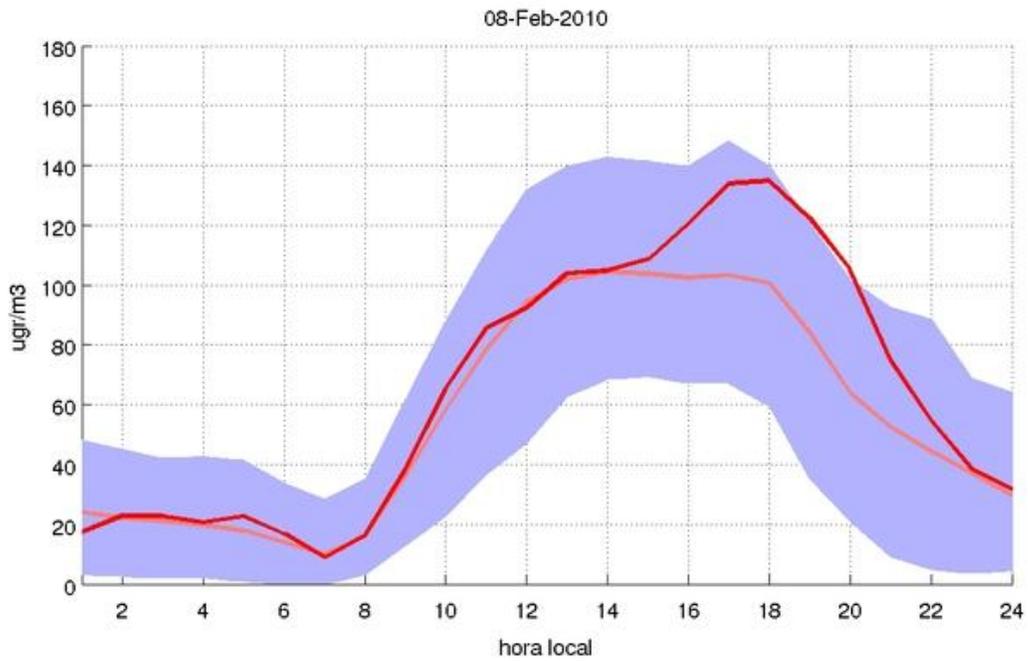


Figura 7.4: Equivalente a figura 7.2, pero se indican, además, dos ciclos diarios (8 de febrero y 1 de marzo, 2010) que muestran un máximo muy tardío.

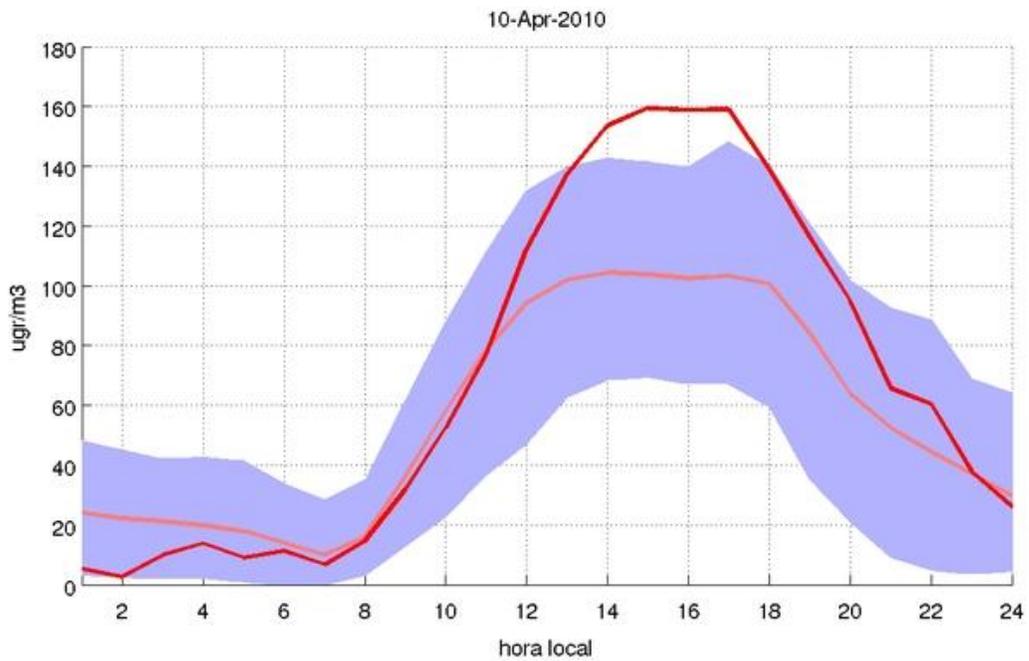
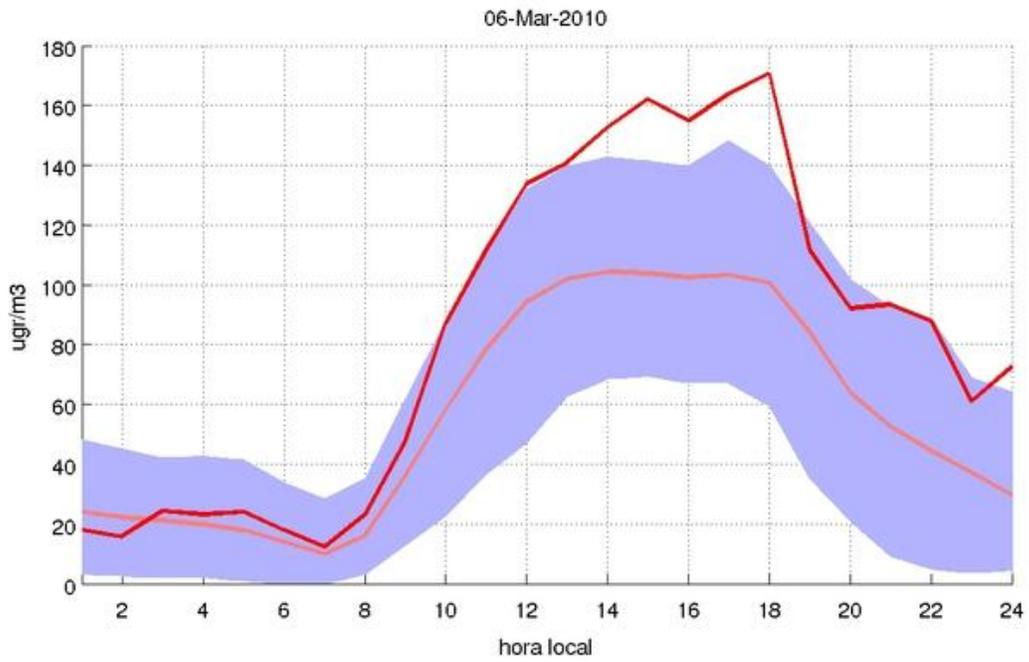


Figura 7.5: Equivalente a figura 7.2, pero se indican, además, los dos ciclos diarios de los días con mayor superación de norma.(6 de marzo y 10 de abril, 2010).

7.2.3 Promedio de 8 horas

Mientras la figura 7.1 muestra la serie de tiempo en la resolución original de 5 minutos, también es importante evaluarla con respecto a la norma que considera un promedio de 8 horas. La figura 7.6 justamente muestra la serie de tiempo del promedio de 8 horas del ozono. La línea azul indica la serie completa, los puntos verdes los máximos diarios del promedio de ocho horas menores que la norma ($120 \mu\text{gr}/\text{m}^3$) y los puntos rojos aquellos mayores que la norma. En total hay 21 días en que se superó el valor de la norma lo que corresponde a un 17.5% de los días entre enero y abril; 11 de esos casos ocurrieron en marzo, 6 en febrero, y 2 en enero y abril. La figura 7.7 muestra el ciclo diario promedio para aquellos días en que se superó la norma del promedio de 8 horas (también se indica el ciclo diario promedio en la figura como referencia). Se observa el que ciclo diario durante días con superación de norma mantiene la forma del ciclo diario promedio, sin embargo, tiende a tener un poco de una forma bi-modal, con un primer máximo a las 14 horas y un segundo a las 18 horas. Cabe también mencionar que, si se aplicara la norma antigua de $160 \mu\text{gr}/\text{m}^3$ concentración horaria se habría observado la superación de norma en un solo día (en el caso de la estación Las Condes casi no hay diferencia entre una norma y otra). Ese hecho, justamente tiene que ver con el periodo prolongado en que se mantienen los niveles máximos de ozono (aunque ellos no sean tan altos a nivel horario).

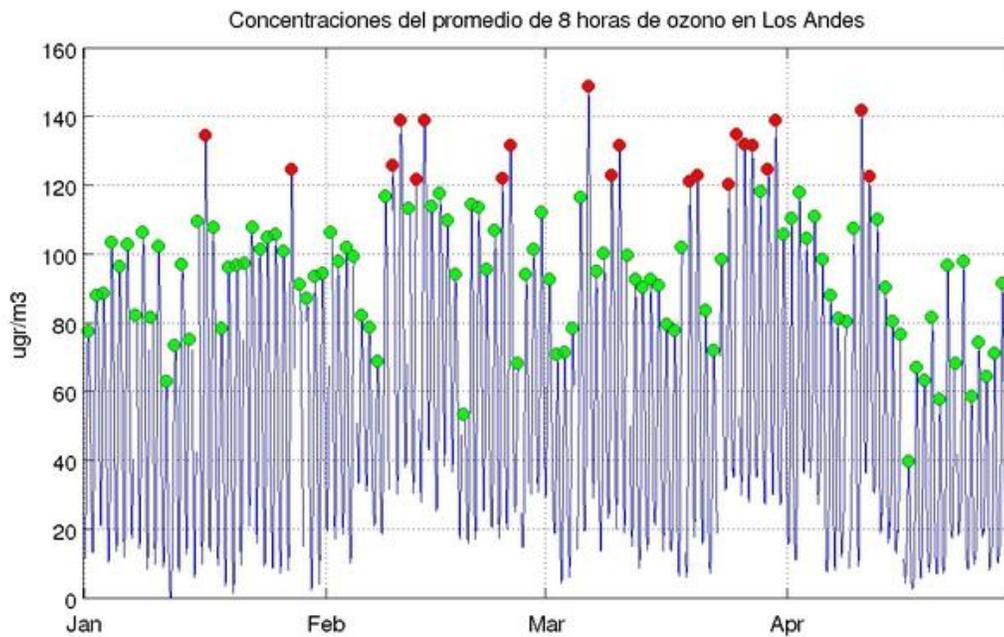


Figura 7.6: Serie de tiempo del promedio de 8 horas de las concentraciones de ozono en la estación Los Andes. . La línea azul indica la serie completa, los puntos verdes los máximos diarios del promedio de ocho horas menores que la norma ($120 \mu\text{gr}/\text{m}^3$) y los puntos rojos aquellos mayores que la norma.

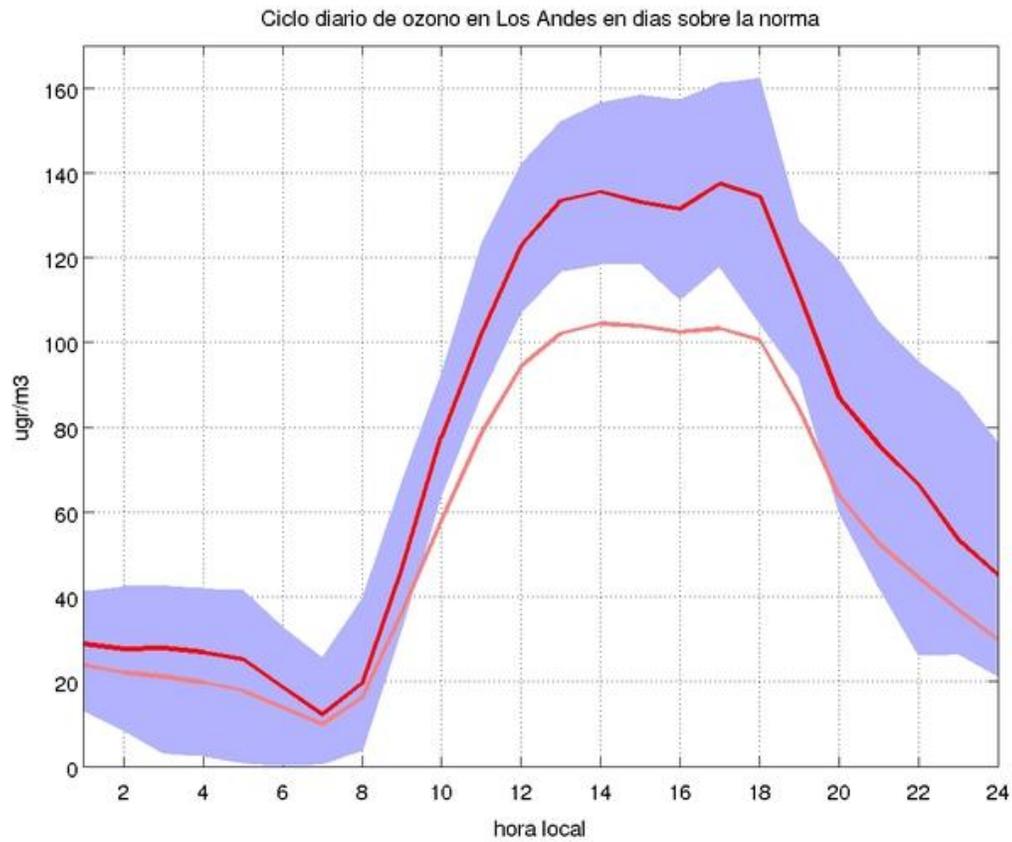


Figura 7.7: Ciclo diario de ozono en los días de superación de norma. La línea roja es el promedio del ciclo diario durante estos días y los límites superiores e inferiores del área sombreada indica los percentiles 10 y 90 (lo que indica la variabilidad de los datos en días de superación de norma), respectivamente. También se incluye el ciclo diario promedio de todos los días a través de la línea rosada.

7.2.4 El ozono en Los Andes en un contexto espacial

Ya se ha mencionado la forma particular del ciclo diario del ozono en la estación Los Andes. Esta particularidad también se destaca comparando este ciclo diario con otros en la Región de Valparaíso y de la Región Metropolitana lo que se muestra en la figura 7.8; en esta figura se muestran los ciclos diarios (tomando en cuenta los datos de la campaña de mediciones del CENMA y de Algoritmos) de las estaciones de mayores concentraciones (Colina y Las Condes), dos de niveles entremedios (Parque O'Higgins y Los Andes y niveles bajos (Viña del Mar y Villa Alemana). Se observa que en las estaciones Colina y Las Condes los máximos diarios son mucho más marcados a un cierto horario (entre las 14 y 15 horas) y antes de ese horario se registra un fuerte aumento y después una fuerte caída en las concentraciones. También llama la atención una menor variabilidad en los datos (representado por los percentiles), lo que es muy marcado en la estación Las Condes, mientras en la estación Los Andes en el periodo de las máximas concentraciones siempre se observa una gran variabilidad. Los niveles en Villa Alemana y Viña del Mar nunca llegan a aquellos observados en Los Andes y, además, los máximos de las concentraciones de ozono se observan a las 15 horas. A contrario de las estaciones Colina y Las Condes el aumento matinal y la caída en la tarde tienen gradientes relativamente suaves. La estación que se parece más a la de Los Andes es la de Parque O'Higgins. Pero también en este caso se observan diferencias importantes. En primer lugar las concentraciones máximas se observan a las 13 horas y aunque la disminución de ellas en la tarde es suave no se mantienen por un periodo tan prolongado como en el caso de Los Andes. Además, los niveles más altos (indicados por el percentil 90) se observan cerca de las 13 horas, mientras en la estación Los Andes a las 17 horas.

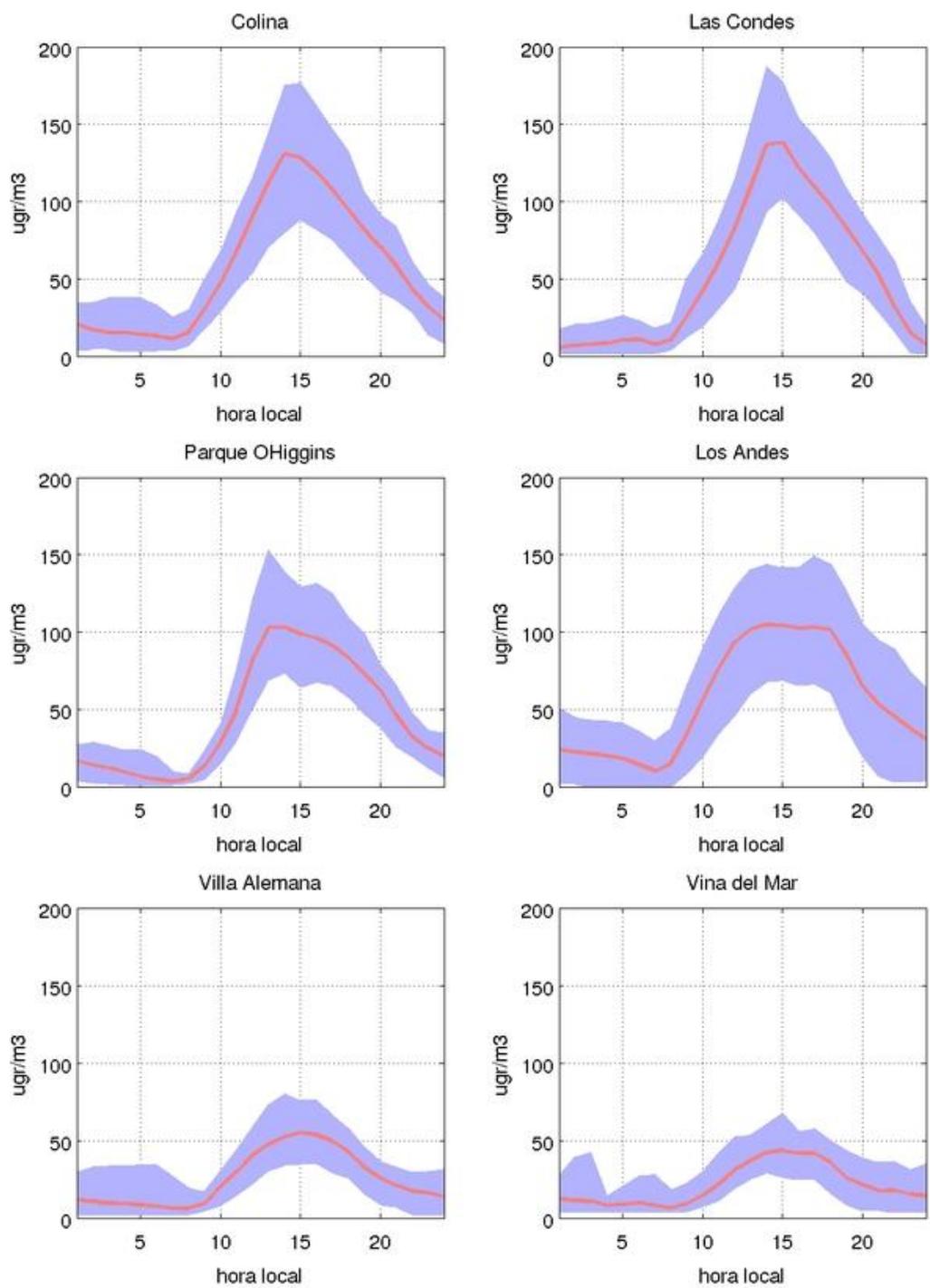


Figura 7.8: Ciclos diarios (tomado en cuenta los datos de la campaña de mediciones del CENMA y de Algoritmos) de las estaciones de mayores concentraciones (Colina y Las Condes), dos de niveles entremedios (Parque O’Higgins y Los Andes y niveles bajos (Viña del Mar y Villa Alemana).

8 Análisis del SO₂ en las zonas Concón y Puchuncaví/Quintero

Dadas las fuentes importantes de SO₂ en la Región Valparaíso, este contaminante sigue siendo un problema ambiental en la zona. Específicamente, las zonas de Concón y Puchuncaví/Quintero cuentan con fuentes industriales de este contaminante. (De particular interés para la zona Puchuncaví/Quintero es el complejo industrial Fundición CODELCO Ventanas y AES Gener y sus alrededores que incluye Quintero y Ventanas. Dado que es un problema para ambas comunas se refiere a esta zona a Puchuncaví/Quintero.). En términos generales, el factor responsable de la *magnitud* de las concentraciones (de cualquier contaminante) son las emisiones (del mismo o de sus precursores). En el caso hipotético que las emisiones sean constantes en el tiempo, el factor responsable para su *variabilidad temporal* es la meteorología. Dado que en la realidad las emisiones no son constantes en el tiempo, ellas también contribuyen a la variabilidad temporal de las concentraciones. El objetivo del siguiente análisis, apunta justamente a caracterizar la situación en las zonas de Concón y Puchuncaví/Quintero en términos de SO₂ y vincular, en primera instancia, variables meteorológicas al comportamiento temporal de sus concentraciones. A través de este análisis se apunta a establecer los factores (las distintas variables meteorológicas y emisiones) que explican la variabilidad del SO₂ en las dos zonas mencionadas.

8.1 Datos usados

Los datos usados provienen de las redes de calidad de ENAP, Codelco-Gener y estación GNL Quintero. Las variables consideradas en este análisis y de esas estaciones son la velocidad y dirección de viento y concentraciones de SO₂. La tabla 1 indica los periodos disponibles y la completitud (en términos del porcentaje de datos válidos dentro del periodo) de cada variable para cada estación. (Cabe señalar que no se incluyeron los datos de las estaciones Colmo y Las Gaviotas de la red Concón ya que no entregan información importante para este análisis. Sólo se entregan dos figuras en el Anexo III que complementan el análisis de la sección 8.2.1.1.) En el Anexo II se grafican las series de tiempo de las tres variables para cada estación (figuras A III.1 - A III.9). En general, sólo se consideran datos que se entregaron en calidad de “validados”. Todos los datos cuentan con una larga historia lo que permite un análisis estadísticamente significativo. No obstante, la estación GNL cuenta con un periodo mucho más corto que en las otras estaciones, aún así se incluyen en este análisis. Dado que en este estudio interesa la relación entre meteorología y contaminación se le quitó la tendencia de la variable SO₂. De esta manera, se evita una ponderación de años más contaminados que más bien puede ser un reflejo de emisiones mayores y no de efectos meteorológicos. Con fines de caracterizar la estabilidad atmosférica también se usaron datos del radiosondeo de la estación de Santo Domingo disponibles a través de la Universidad de Wyoming, EE.UU: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.

Estación	Variable	Periodo	Compleitud (%)
Junta de Vecinos	Velocidad de viento	2000-2010	90
	Dirección de viento	2000-2010	90
	SO ₂	2000-2010	90
Concón Sur	Velocidad de viento	2000-2010	95
	Dirección de viento	2000-2010	95
	SO ₂	2000-2010	95
Los Maitenes	Velocidad de viento	2000-2010	90
	Dirección de viento	2000-2010	90
	SO ₂	2000-2010	95
La Greda	Velocidad de viento	2000-2010	90
	Dirección de viento	2000-2010	90
	SO ₂	2000-2010	95
Sur	Velocidad de viento	2000-2010	93
	Dirección de viento	2000-2010	93
	SO ₂	2000-2010	95
GNL	Velocidad de viento	2009-2011	96
	Dirección de viento	2009-2011	96
	SO ₂	2009-2011	96

Tabla 8.1: Estaciones consideradas en el análisis de SO₂. Todas las estaciones cuentan con series de tiempo desde 2000-2010 y una completitud de los datos mayor o igual de 90%. Sólo la estación GNL sólo cuenta con datos entre 2009-2011.

8.2 Ciclos diarios

En un terreno complejo tal como se presenta en toda la Región de Valparaíso donde la variabilidad meteorológica está fuertemente modulada por efectos térmicos (brisas valle/montaña y mar/tierra), los ciclos diarios son muy importantes para entender la variabilidad intra-diaria de una variable atmosférica. En este sentido y con fines de entender el comportamiento general del SO₂ en ambas zonas, se vinculan en lo que sigue los ciclos diarios de las variables velocidad y dirección de viento con las concentraciones de SO₂ para dos estaciones de monitoreo en Concón (Junta de Vecinos y Concón Sur), tres para Puchuncaví (La Greda, Los Maitenes, Sur) y una para Quintero (GNL). (En lo que sigue se incluye la estación GNL al análisis de Puchuncaví/Quintero). En primer lugar, se analizarán los ciclos diarios promedios, seguidos por los ciclos que representan los días del percentil 90 de los máximos horarios de SO₂ en las respectivas estaciones. El percentil 90 es un límite arbitrario y su uso para los efectos de este estudio, no tiene relación a ninguna norma. Se usa sólo como límite para distinguir entre días “normales” que se describen en esta sección y días de “eventos” que se describen en la siguiente sección. En este apartado se ha ocupado el percentil 90 como límite superior y el percentil 10 como límite inferior para caracterizar el comportamiento promedio. En la sección siguiente, sólo se usan los datos de concentraciones superiores al percentil 90. Así se consideran como eventos el 10% de los días con las mayores concentraciones del año.

8.2.1 Ciclos diarios promedios

En cada una de las siguientes figuras se muestran los ciclos diarios de la velocidad del viento (paneles superiores), dirección del viento (paneles entremedios) y las concentraciones de SO₂ (paneles inferiores). En los casos de la velocidad del viento y las concentraciones de SO₂, se indican los ciclos promedios (líneas azules) y su variabilidad a través de las sombras celestes que contienen el 90% de los datos. El ciclo diario de la dirección de viento a la vez se indica a través de la frecuencia en que ocurre a cada hora del día (en %).

8.2.1.1 Concón

La figura 8.1 muestra los ciclos diarios promedios para la estación Junta de Vecinos. Para la velocidad del viento se observan velocidades bajas durante las horas de la noche y la madrugada (menores de 2 m/s) que aumentan durante el día (en promedio poco más de 3 m/s). En general, se puede decir que la estación registra vientos débiles, lo que también se refleja en la variabilidad: en el percentil 90 se registran aproximadamente 5 m/s.

En términos de la dirección del viento, también se pueden claramente distinguir los regímenes nocturnos y diurnos: durante las horas de la noche y la madrugada dominan los vientos desde el sureste (120–160 grados), mientras durante el día los vientos predominantes soplan desde el oeste-noroeste (260-320 grados).

Finalmente y dado que también exhibe un ciclo diario muy marcado, las concentraciones del SO₂ se pueden relacionar muy bien con las características del viento: Durante las horas de la noche y la madrugada y con vientos débiles y la dirección del viento desde el sureste, las concentraciones son más altas (en promedio alrededor de 70 µgr/m³) que durante el día (aproximadamente 10 µgr/m³) cuando el viento es más fuerte y sopla desde oeste-noroeste. De esta manera, es evidente que durante el día –cuando las concentraciones de SO₂ son realmente muy bajas – la estación se ubica viento arriba de cualquier emisor importante de SO₂ en su cercanía, mientras durante la noche y la madrugada– el aumento en concentraciones indica el impacto de una fuente de SO₂. Además, el hecho que la hora del aumento en las concentraciones coincide muy bien con la en que se establece el régimen nocturno/madrugada (alrededor de las 22:00) tanto de la dirección del viento como de la velocidad (con vientos muy débiles) indica que las fuentes responsables para este aumento se ubican relativamente cerca a la estación.

La figura 8.2 muestra los ciclos diarios promedios para la estación Concón Sur. Los ciclos diarios de la velocidad y la dirección de viento son similares a los de la estación Junta de Vecinos. La diferencia más importante en la velocidad del viento es que los vientos son aún más débiles en la estación Concón Sur que en Junta de Vecinos. En términos de dirección de viento, los regímenes

son muy similares, sólo que se observa una variabilidad levemente mayor en Concón Sur (lo que se refleja en frecuencias más bajas en las direcciones dominantes).

El comportamiento en SO₂ en Concón Sur, sin embargo, es muy distinto al de la estación Junta de Vecinos. En primer lugar, las concentraciones son mucho más bajas con un máximo promedio de menos 30 µgr/m³. Además, mientras en la estación Junta de Vecinos las concentraciones elevadas se mantienen durante toda la noche/madrugada, en la estación Concón Sur el periodo en que se registran los leve aumentos se limitan entre las 08:00 hasta las 13:00. Este también es el periodo de transición (transición entre el régimen nocturno/madrugada y diurno). Durante este periodo el viento cambia generalmente de dirección sureste a este-noreste. Una vez que se establezca el régimen diurno con dirección de viento oeste-noroeste, disminuyen nuevamente las concentraciones. Tal como en el caso de Junta de Vecinos, también en Concón Sur coinciden los cambios en dirección de viento con los cambios en las concentraciones de SO₂ y, además, se asocian con vientos débiles lo que –también en este caso- indica que el impacto (aunque sea muy bajo) proviene de una fuente cercana.

En el Anexo III también se encuentran las figuras equivalentes a las figuras 8.1 y 8.2 para la estación Colmo y Las Gaviotas (figuras A III.25 y A III.26, respectivamente) que demuestran que las concentraciones de SO₂ en ambas estaciones son muy bajas y que estas dos estaciones no contribuyen al objetivo de este análisis.

8.2.1.2 Puchuncaví/Quintero

Las figuras 8.3-8.6 muestran los tres ciclos diarios de la velocidad y dirección de viento y concentraciones de SO₂ para las cuatro estaciones más relevantes de la red de monitoreo de Puchuncaví/Quintero, Sur, Los Maitenes, La Greda y GNL. Las variables velocidad y dirección de viento no requieren mayor descripción ya que se repiten los patrones generales observados en las dos estaciones de Concón. Se destacan tres diferencias con respecto a estos patrones generales:

- 1) La velocidad del viento observada en la estación Sur es mayor durante el día alcanzando aproximadamente 4 m/s.
- 2) La medición de la dirección de viento es discreta (en las estaciones de Concón es continua) lo que también explica la frecuencia de 0 % de algunas direcciones en las figuras.
- 3) La dirección predominante durante la noche/madrugada en las tres estaciones Sur, Los Maitenes y La Greda tiene una componente dominante del este.
- 4) En la estación GNL, se nota el impacto del forzamiento sinóptico predominante del anticiclón a través de una componente del sur durante la noche/madrugada, pero también durante el día. Esta característica se explica por la mayor exposición del flujo sobre el mar por la ubicación de la estación en la “península” de Quintero.

En términos de concentraciones de SO₂, cada una de las tres estaciones tiene un comportamiento único:

En la estación Sur, las concentraciones durante el día (12:00 – 22:00) son muy bajas. Durante la noche/madrugada aumentan las concentraciones cuyo máximo promedio ocurre alrededor de las 09:00. Este máximo promedio es aproximadamente $90 \mu\text{gr}/\text{m}^3$ con el percentil 90 a la misma hora un poco más de $200 \mu\text{gr}/\text{m}^3$. Es evidente según la figura 8.3 que – una vez que se establezca el régimen diurno disminuyen las concentraciones a niveles muy bajos y sólo suben los niveles durante el régimen nocturna/madrugada.

En la estación Los Maitenes, al contrario de la estación Sur, las concentraciones son muy bajas durante la noche y sólo se registran aumentos durante las 09:00 – 18:00, con un máximo promedio a las 11:00 un poco menos de $150 \mu\text{gr}/\text{m}^3$ y el percentil 90 a la misma hora de aproximadamente $340 \mu\text{gr}/\text{m}^3$ (está fuera del rango del gráfico). El comienzo del aumento coincide con el régimen diurno de la dirección del viento predominante del oeste. Esta dirección del viento se mantiene hasta aproximadamente las 18:00. La probable causa de que las concentraciones empiezan a disminuir –a pesar de que la dirección del viento se mantiene- es el aumento en turbulencia (y la altura de capa límite) lo que tiene como consecuencia una dilución de contaminantes.

La estación La Greda sólo registra aumentos durante los periodos de transición; durante el periodo de transición madrugada/día el máximo promedio llega a las 10:00 hasta aproximadamente $50 \mu\text{gr}/\text{m}^3$ y durante el periodo de transición día/noche hasta aproximadamente $25 \mu\text{gr}/\text{m}^3$ a las 18:00. Mientras la dirección de viento en ambos periodos de transición son similares, la altura de mezcla debe ser menor en la mañana que en la tarde, lo que explicaría la diferencia en concentraciones.

Finalmente, la estación GNL muestra en promedio altas concentraciones durante la noche/madrugada/mañana (entre las 21:00-11:00) y concentraciones muy bajas durante el día. El máximo del ciclo diario promedio de aproximadamente $100 \mu\text{gr}/\text{m}^3$ ocurre entre las 06:00 - 08:00. Los vientos que se asocian a los periodos de altas concentraciones son débiles (menores de 2 m/s) y con una componente desde el sur. Durante el día los vientos son más fuertes (en promedio aproximadamente 4.5 m/s) y se observa una dirección de viento predominante del sur-suroeste.

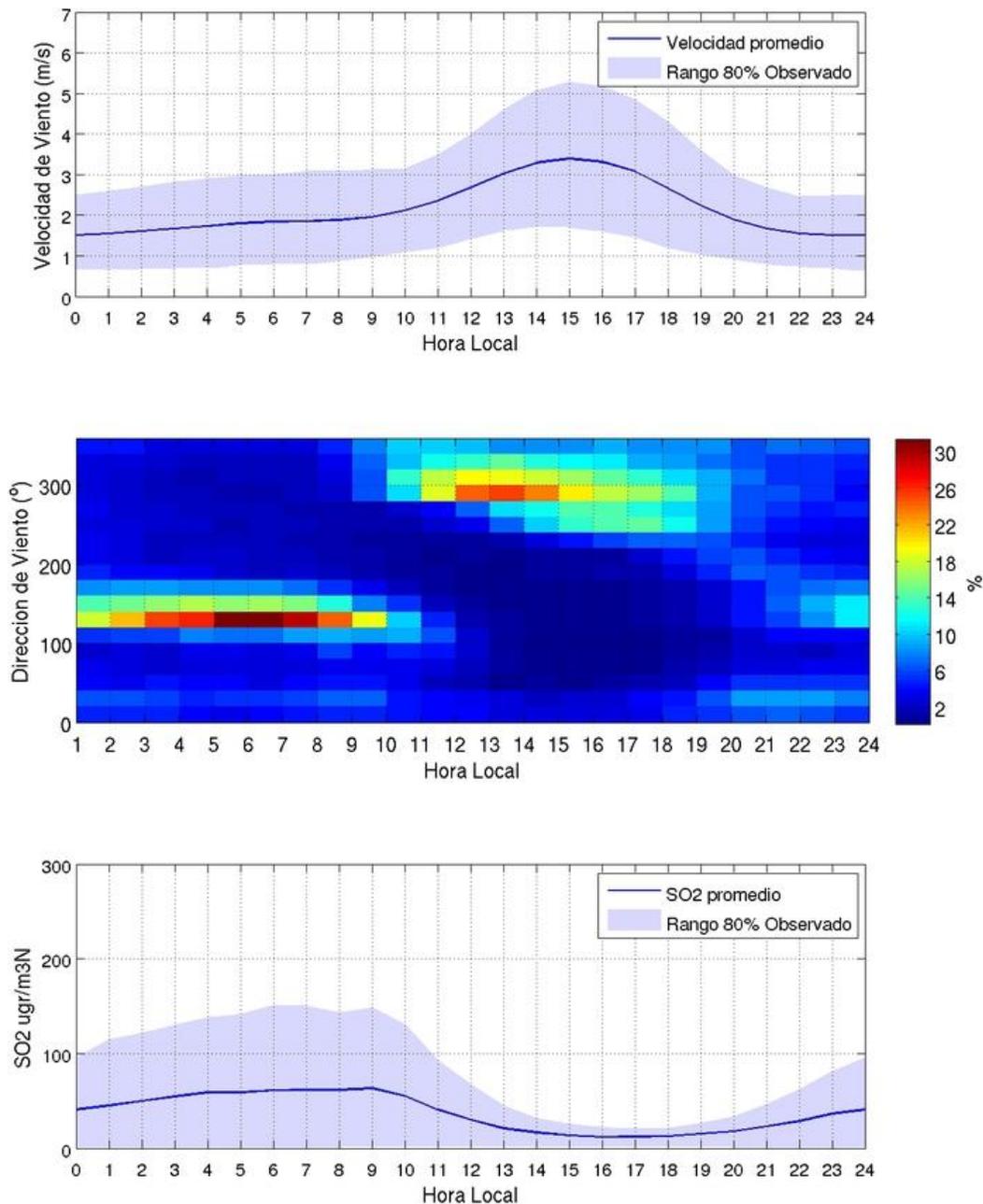


Figura 8.1: Ciclos diarios de velocidad (panel superior) y dirección del viento (panel entremedio) y concentraciones de SO₂ (panel inferior) para la estación Junta de Vecinos. En los casos de la velocidad del viento y las concentraciones de SO₂, se indican los ciclos promedios (líneas azules) y su variabilidad a través de las sombras celestes que contienen el 90% de los datos. El ciclo diario de la dirección de viento a la vez se indica a través de la frecuencia en que ocurre a cada hora del día (en %). La dirección de viento se indica en intervalos discretos de 20 grados. En este caso las concentraciones mayores ocurren durante la noche/madrugada lo que corresponde vientos débiles y con una dirección desde el sur-sureste.

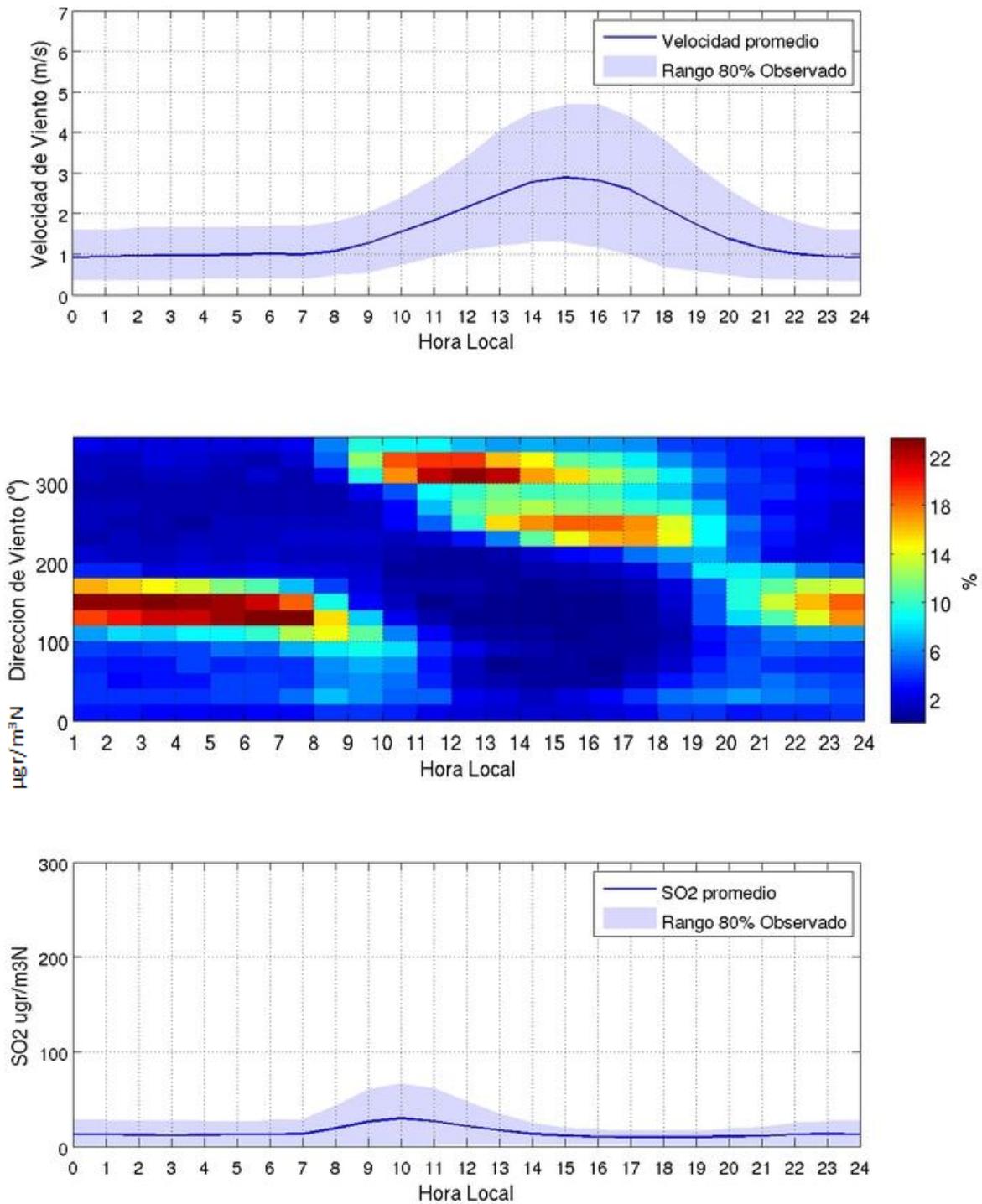


Figura 8.2: Equivalente a figura 8.1, pero para la estación Concón Sur. Esta estación muestra niveles bajos de SO₂ todo el día con un leve aumento en la fase de transición entre madrugada y día.

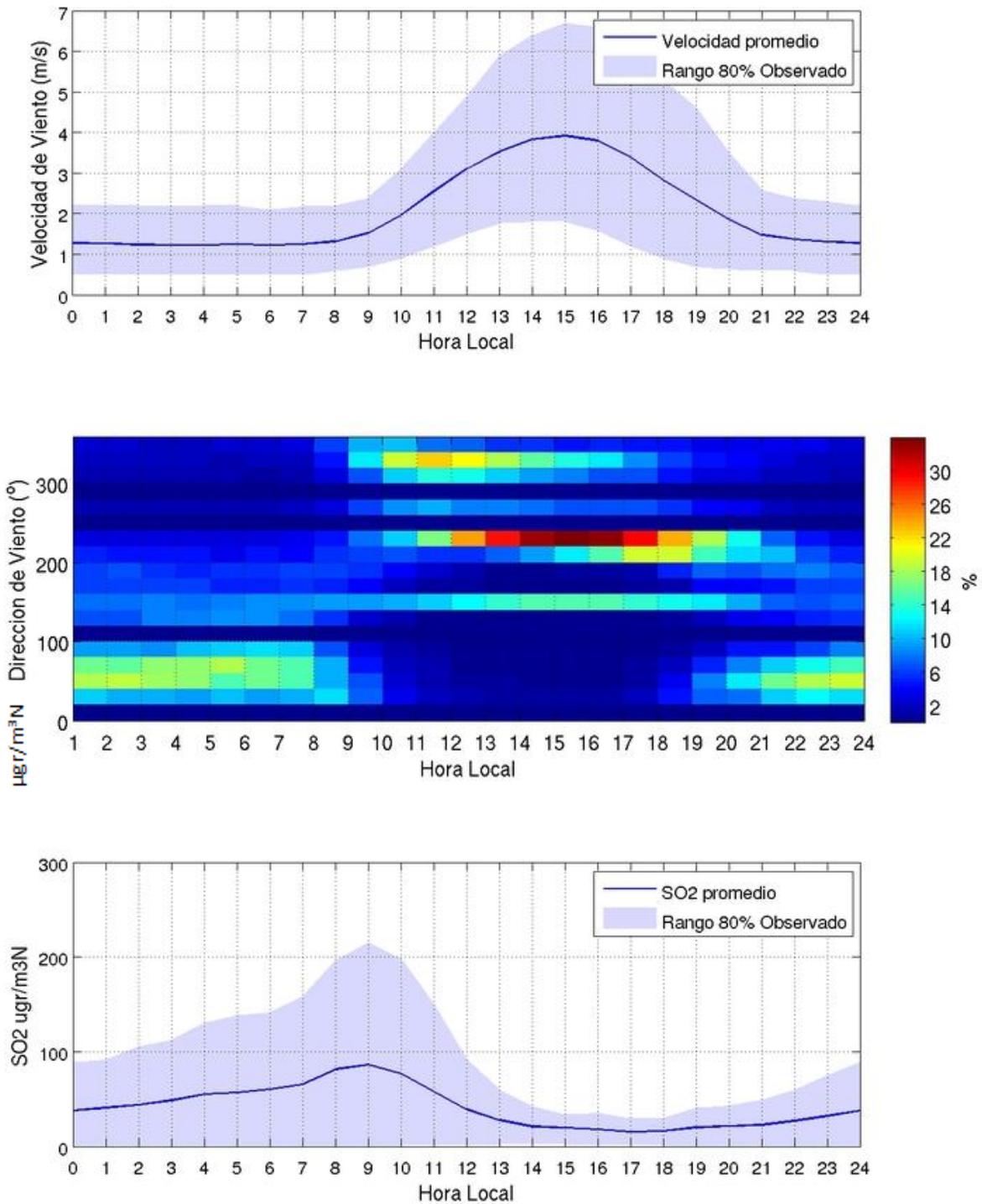


Figura 8.3: Equivalente a figura 8.1, pero para la estación Sur. Se pueden observar aumentos graduales de SO₂ durante la noche/madrugada junto con vientos débiles desde el este. Los niveles mayores ocurren en la fase de transición madrugada/día.

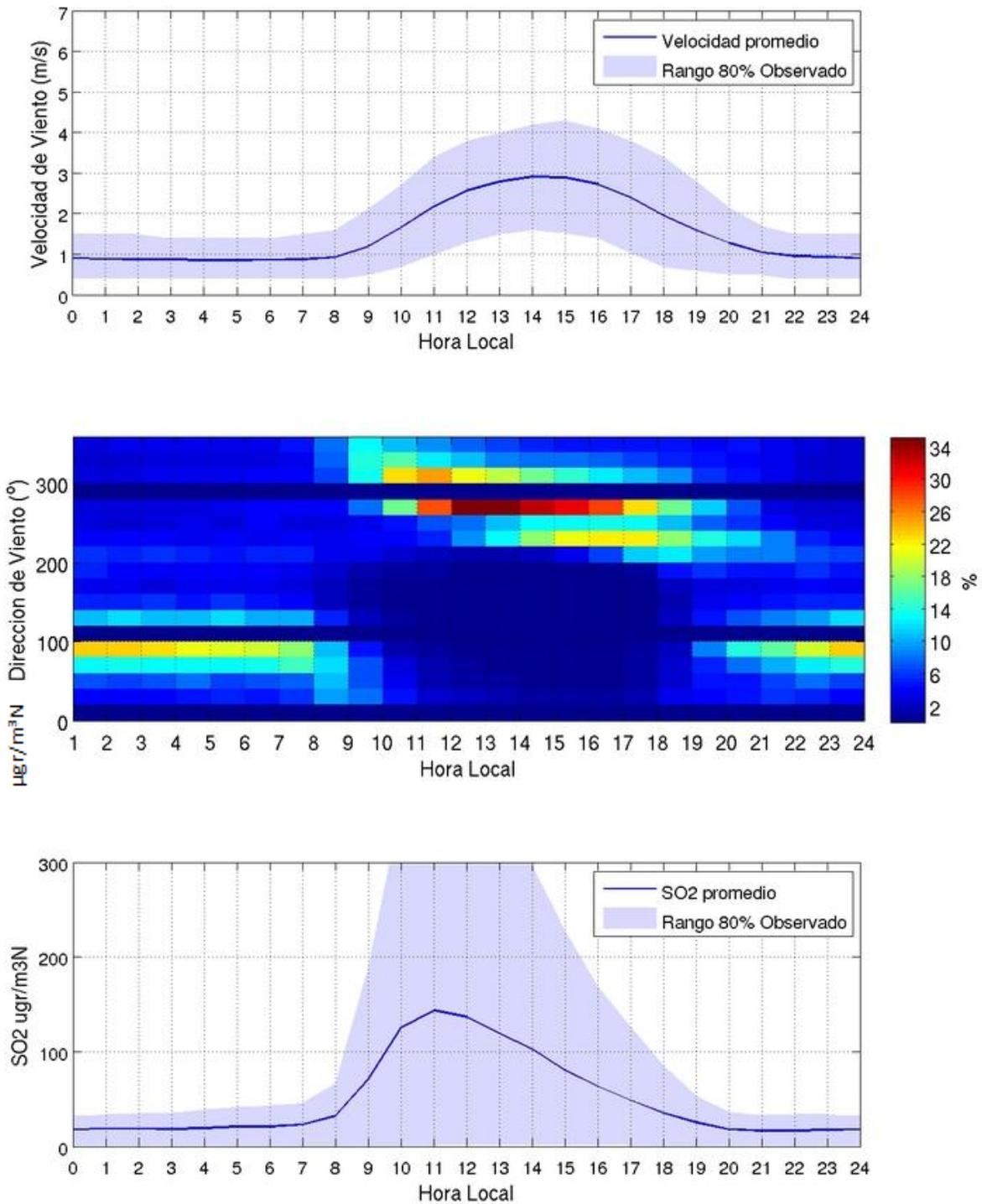


Figura 8.4: Equivalente a figura 8.1, pero para la estación Los Maitenes. Se observan niveles de SO_2 bajos durante toda la noche y niveles altos durante todo el día, disminuyendo hacia la tarde. En este caso la dirección del viento responsable para los niveles elevados es desde el oeste.

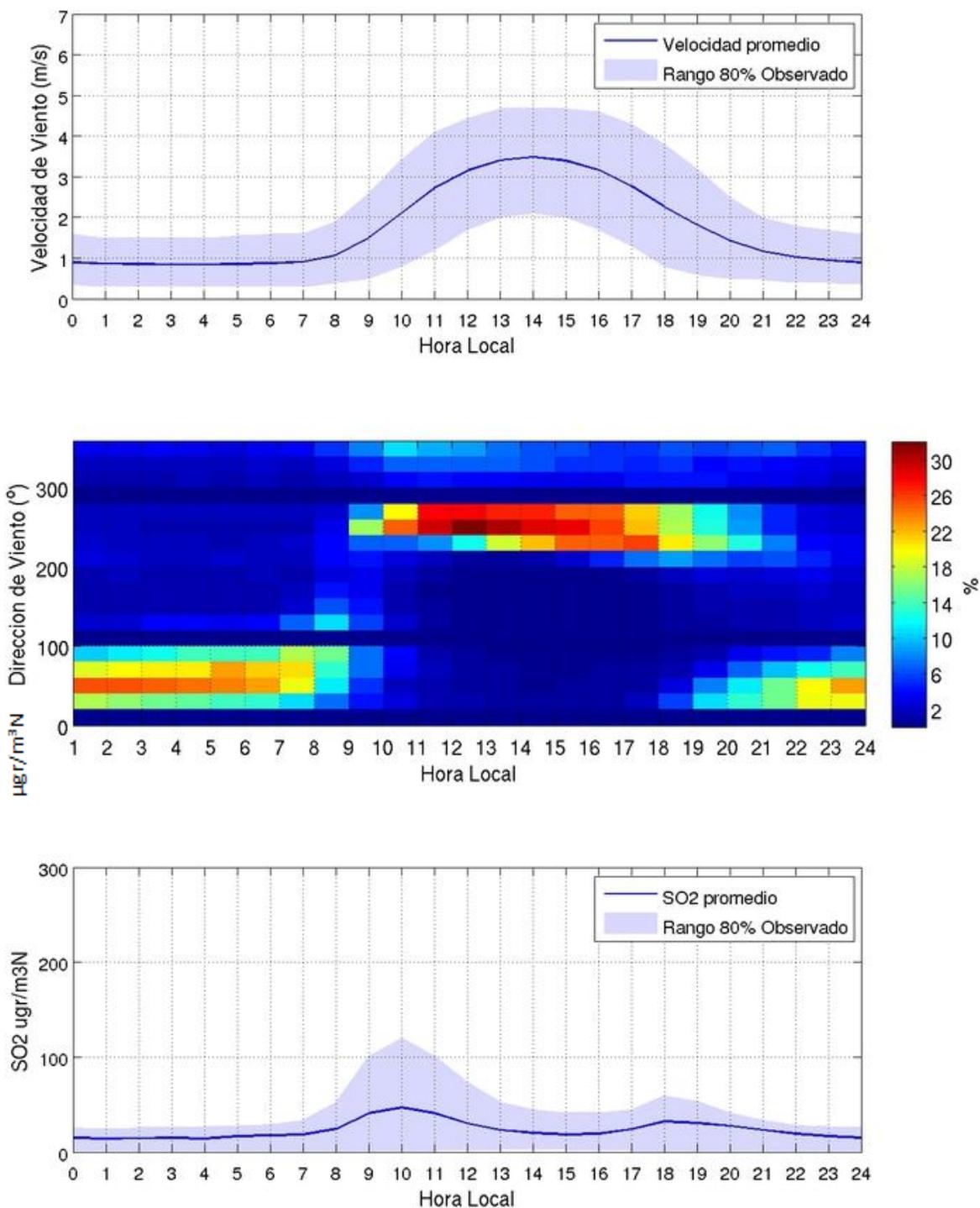


Figura 8.5: Equivalente a figura 8.1, pero para la estación La Greda. En esta estación los niveles de SO₂ pueden subir durante las fases de transición madrugada/mañana y tarde/noche. Sin embargo, los niveles son considerablemente menores que en las estaciones Sur y Los Maitenes.

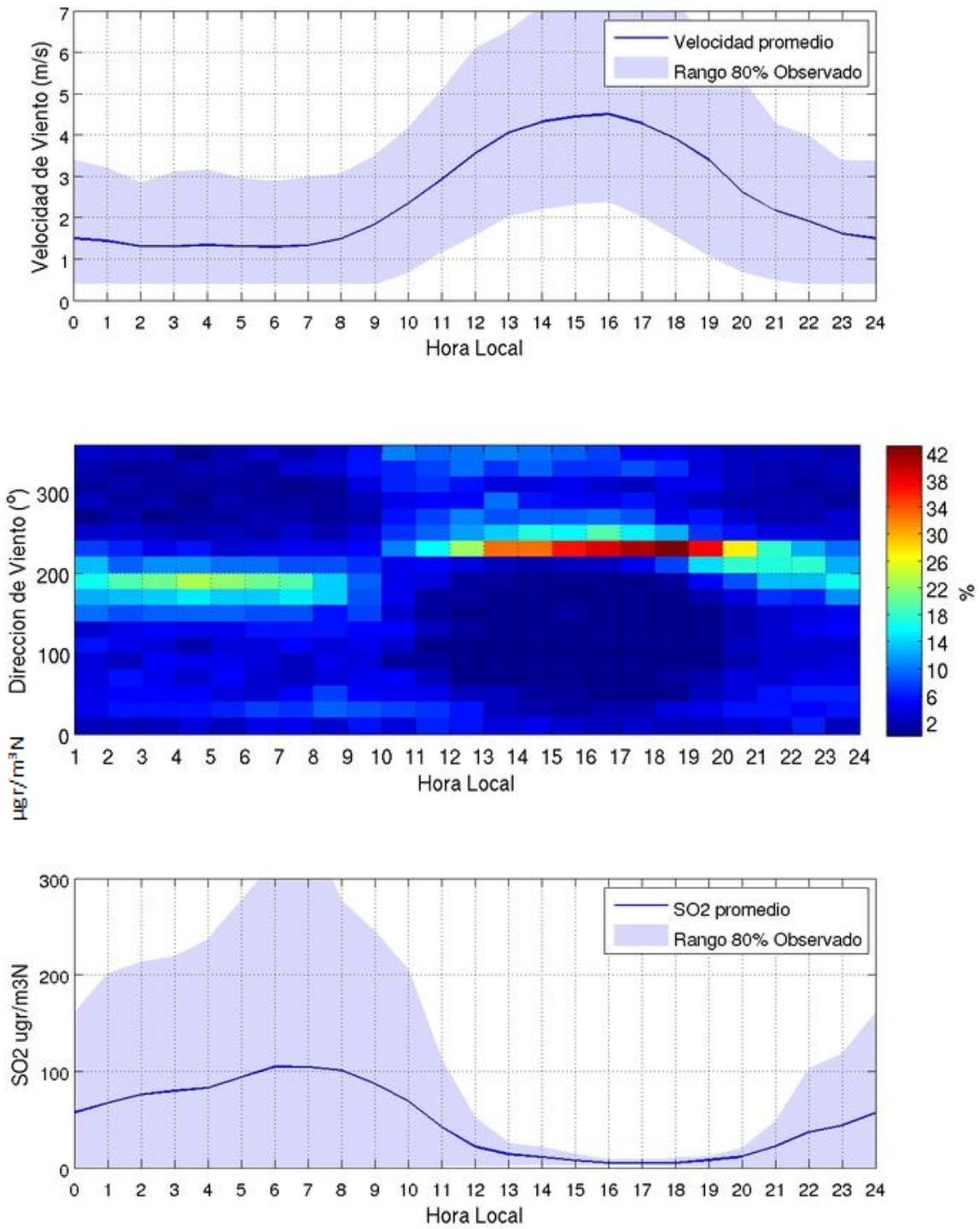


Figura 8.6: Equivalente a figura 8.1, pero para la estación GNL. En esta estación los niveles elevados sólo ocurren durante la noche con vientos muy débiles.

8.3 Ciclos estacionales

Los ciclos diarios muestran el comportamiento promedio durante el día. En este sentido, ocultan la variabilidad que existe durante el año. A modo de ejemplo, no muestran si existen estaciones del año en que un contaminante tiene concentraciones más altas que en otras. Con fines de responder justamente esa pregunta se muestran en lo que sigue los ciclos estacionales de los ciclos diarios de las concentraciones de SO_2 en las estaciones de monitoreo en las zonas Concón y Puchuncaví/Quintero. En cada una de las figuras que siguen se muestra en el eje x el ciclo diario promedio y en el eje y su variabilidad según el mes del año. Los colores indican la concentración de SO_2 según hora y mes. También se muestra en los gráficos la dirección de viento a través de líneas y puntos (se indica hacia donde sopla el viento). La información sobre la dirección de viento –junto con la de las concentraciones de SO_2 – es muy útil ya que, tal como se pudo ver en lo descrito anteriormente, indica muy bien cambios de regímenes durante el día. Sin embargo, tal como se presenta en las figuras que siguen, tiene la limitación que sólo se pueden mostrar los promedios de la dirección (y no las frecuencias como en las figuras anteriores). Estas limitaciones se reflejan principalmente durante los periodos de transición (día/noche y madrugada/día) cuando generalmente se observan direcciones de viento poco definidas; siendo la dirección de viento una variable circular con valores de 0 a 360 y tomando el promedio de esta variable durante esos periodos, resulta en valores promedios poco representativos. En la interpretación de las siguientes figuras se debe considerar esta falencia.

8.3.1 Concón

La figura 8.7 muestra el ciclo estacional para la estación Junta de Vecinos. Se puede observar que en todos los meses se repite la misma forma del ciclo diario, con concentraciones de SO_2 más elevadas durante las horas de la noche/madrugada y concentraciones bajas durante el día. También se puede observar claramente que los dos regímenes siempre se asocian con las direcciones de viento según detallada en la figura 8.1. El cambio de hora de mes a mes en que ocurren los periodos de transición, claramente se pueden asociar con más horas de sol durante los meses de verano y menos durante los meses de invierno. Otro cambio importante a escala estacional, es la magnitud de concentraciones. Concentraciones mayores durante los meses de invierno y menores durante los meses de verano. Tal como se explicará más abajo esta variabilidad depende principalmente de la estabilidad atmosférica.

El ciclo estacional para la estación Concón Sur se muestra en la figura 8.8. Se pueden observar las mismas características de la variabilidad estacional del largo de los distintos regímenes y de la magnitud en concentraciones que se describieron para el caso de la estación Junta de Vecinos. Aquí, las concentraciones máximas ocurren durante el periodo de transición madrugada/día durante dos/tres horas. Las direcciones de viento que indica el gráfico para esta estación, son predominantemente del sur. Sin embargo, en este caso se puede observar justamente el problema que surge de promediar direcciones de viento. Tal como muestra la figura 8.2, claramente indica que no se observa esta dirección en durante esos periodos y, por lo tanto, en este caso se trata de un artefacto de calcular el promedio (tal como se explicó anteriormente).

8.3.2 Puchuncaví/Quintero

La figura 8.9 muestra el ciclo estacional para la estación Sur. En esta estación, se observan similitudes pero también diferencias al comportamiento de los ciclos estacionales respecto de las estaciones de Concón. En primer lugar, se muestran los mismos ciclos estacionales de los largos de los periodos diurnos y nocturnos. En términos de la magnitud de las concentraciones, también se observa un ciclo estacional durante la noche/madrugada y durante el día con concentraciones mayores durante invierno y menores durante verano. Sin embargo, durante el periodo de transición madrugada/día - en que se producen los máximos diarios- se observan las concentraciones máximas a nivel estacional en los meses noviembre-enero y marzo-abril. (Se supone que las concentraciones más bajas se asocian con menor actividad industrial en la zona en este mes). El comportamiento a escala estacional de las concentraciones nocturno/madrugada nuevamente se puede explicar a través de la estabilidad atmosférica. Sin embargo, no es el caso para el comportamiento durante justamente la fase transición madrugada/día que más bien muestra concentraciones más altas durante los meses cálidos del año. No se tiene explicación a este fenómeno en esta instancia.

En la estación Los Maitenes, según la figura 8.10, se observa un fenómeno similar al de la estación Sur respecto de las concentraciones elevadas que, en este caso; se producen durante el régimen diurno y que también exhiben sus valores máximos durante los meses noviembre-enero y marzo-abril (el régimen nocturno muestra los máximos durante los meses de invierno). En este caso, se puede observar que la dirección de viento también muestra una cierta variabilidad estacional justamente en las horas en que se producen los máximos diarios: en los meses noviembre-abril la dirección tiene una leve componente del norte mientras en los otros meses es casi zonal (del oeste). Esto podría ser un indicador que la variable responsable para estos ciclos estacionales con máximos en los meses noviembre-enero y marzo-abril es justamente un pequeño cambio en la dirección del viento.

La figura 8.11 muestra el ciclo estacional de la estación La Greda. En este análisis en que se muestran concentraciones elevadas en ambos periodos de transición y con los máximos estacionales para ambos periodos en invierno. En este caso, nuevamente es la estabilidad atmosférica que podría explicar las características observadas.

Finalmente, en la estación GNL (figura 8.12) se observa un ciclo estacional de la magnitud de las concentraciones durante la noche/madrugada lo que se puede explicar por estabilidad atmosféricas. Las otras características como por ejemplo concentraciones mayores durante el mes de mayo no necesariamente son estadísticamente representativas por la escasez de datos.

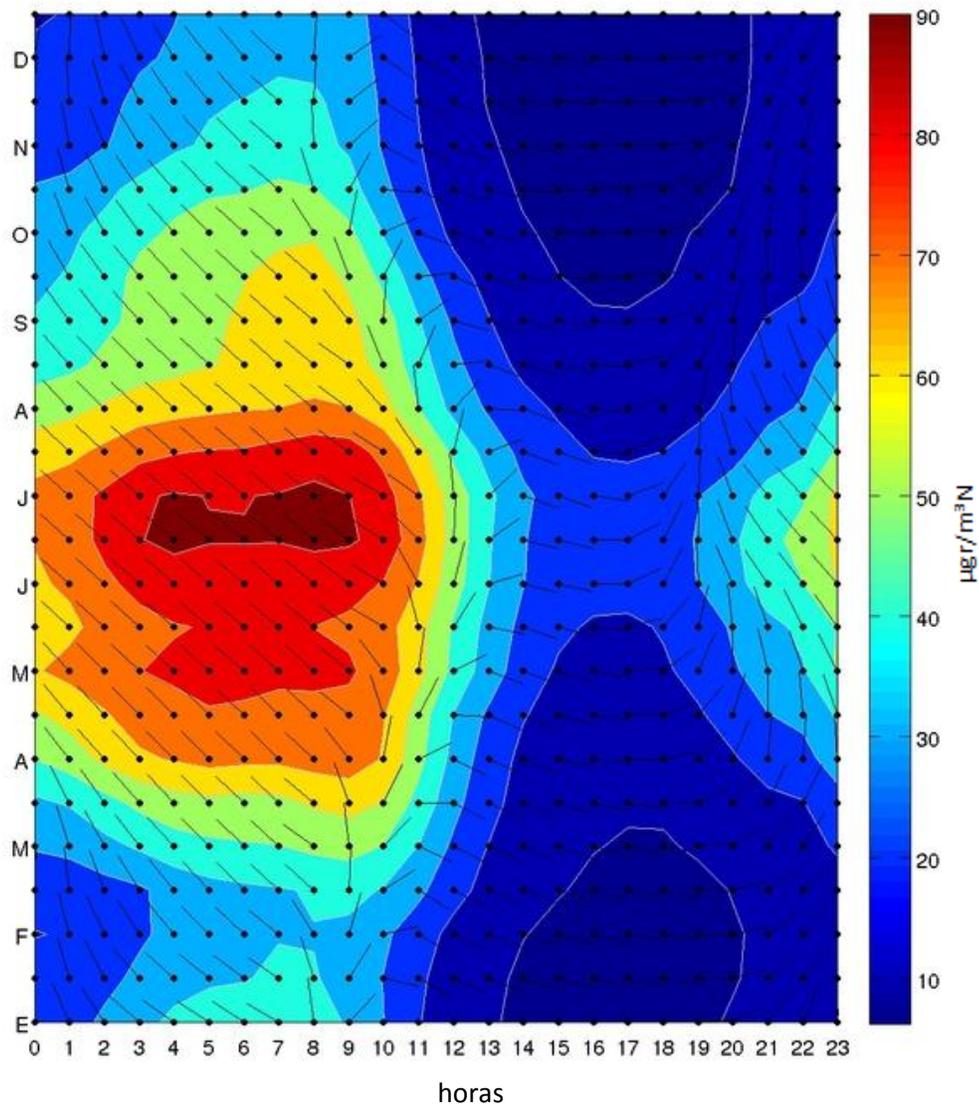


Figura 8.7: Ciclo estacional de los ciclos diarios de las concentraciones de SO_2 y de la dirección de viento en la estación Junta de Vecinos. El eje x representa el ciclo diario promedio y en el eje y su variabilidad según el mes del año (sólo se indican las primeras letras del mes, E = enero, F = febrero, etc.). Los colores indican la concentración de SO_2 según hora y mes. También se muestra en los gráficos la dirección de viento a través de líneas y puntos (se indica hacia donde sopla el viento desde los puntos). La característica más importante del ciclo en esta estación es el aumento de las concentraciones durante invierno (y durante la noche/madrugada).

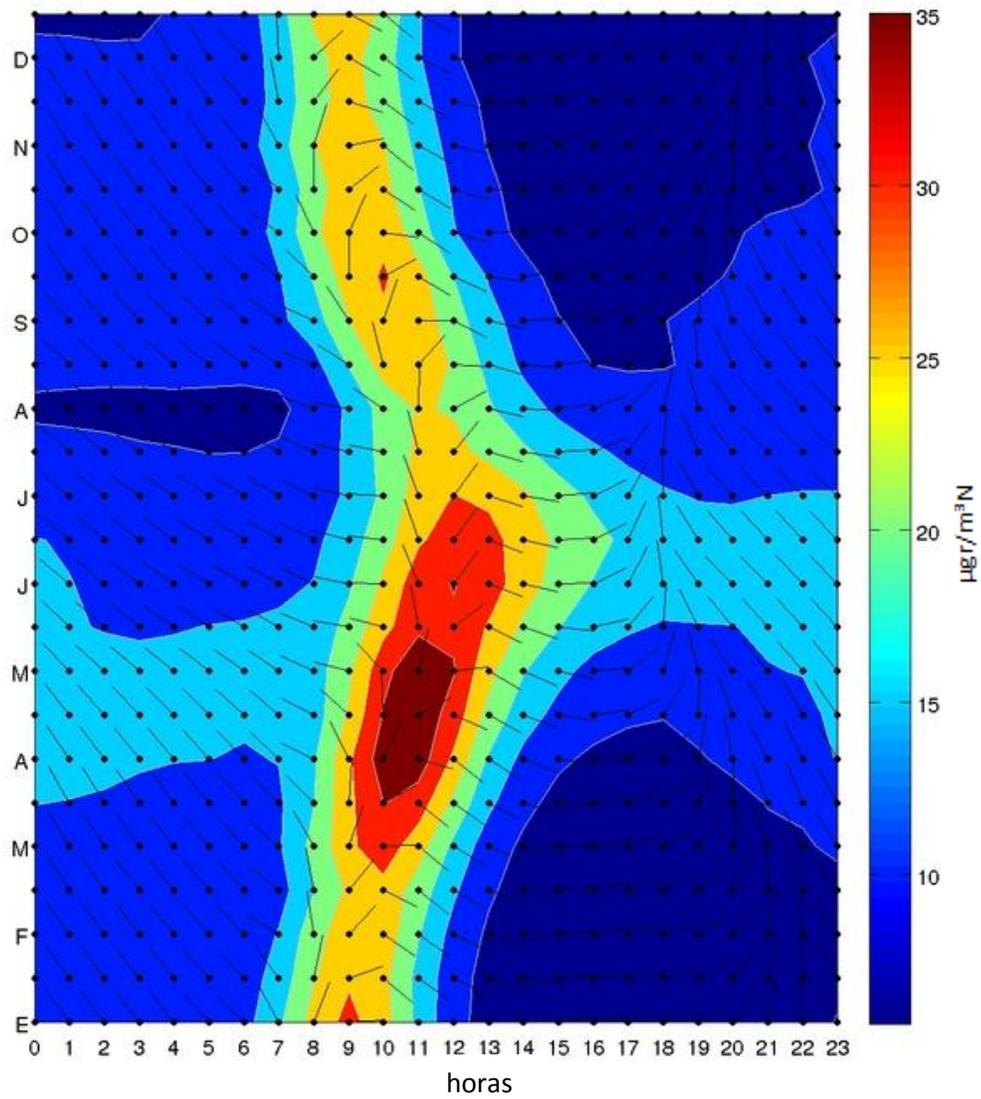


Figura 8.8: Equivalente a figura 8.7, pero para la estación Concón Sur. La escala de color para las concentraciones se ha adaptado a la magnitud de las concentraciones de esta estación. En esta estación también se registra un aumento durante los meses de otoño/invierno.

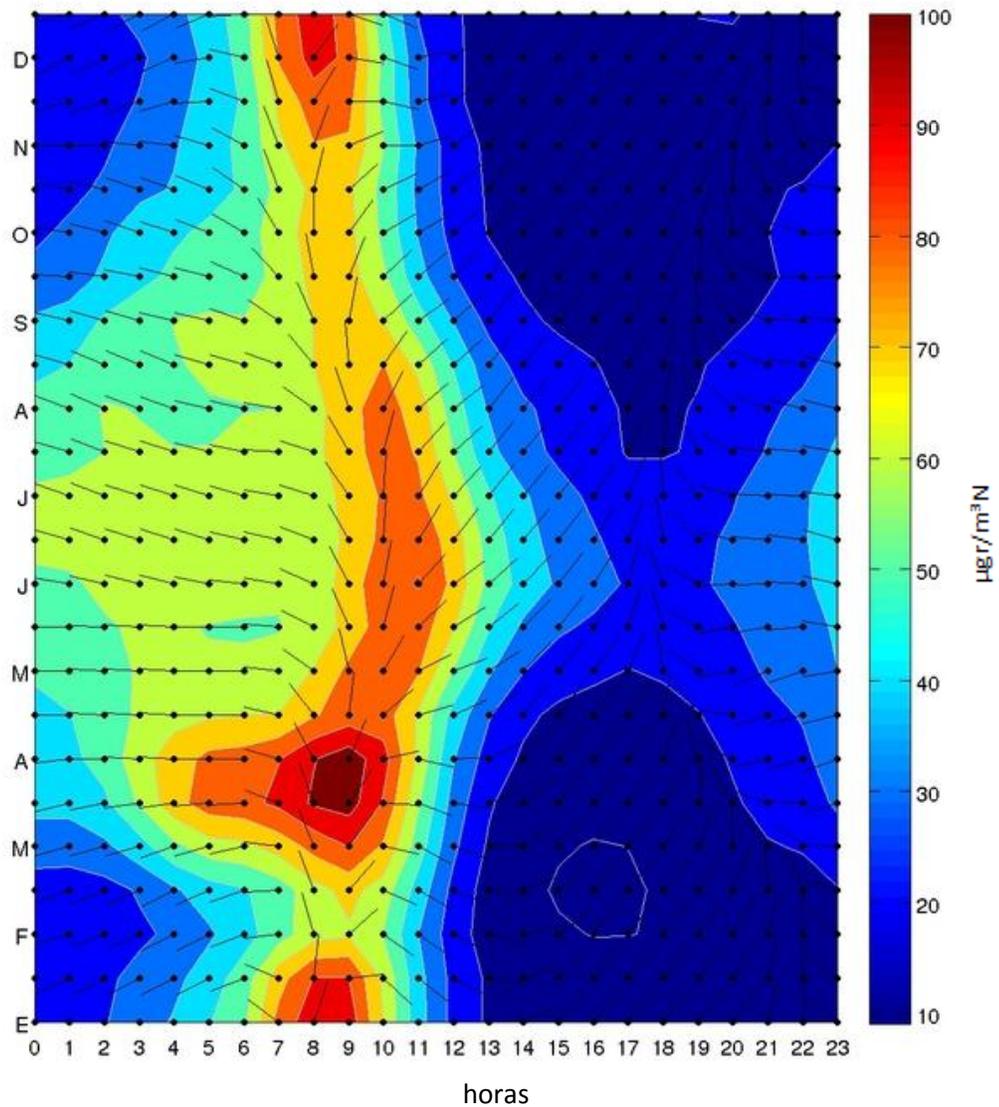


Figura 8.9: Equivalente a figura 8.7, pero para la estación Sur. La escala de color para las concentraciones se ha adaptado a la magnitud de las concentraciones de esta estación. Durante la noche se puede observar nuevamente un aumento durante invierno. Sin embargo, durante la fase de transición las concentraciones mayores se observan en los meses diciembre, enero, marzo y abril. Por otra parte, febrero registra concentraciones relativamente menores.

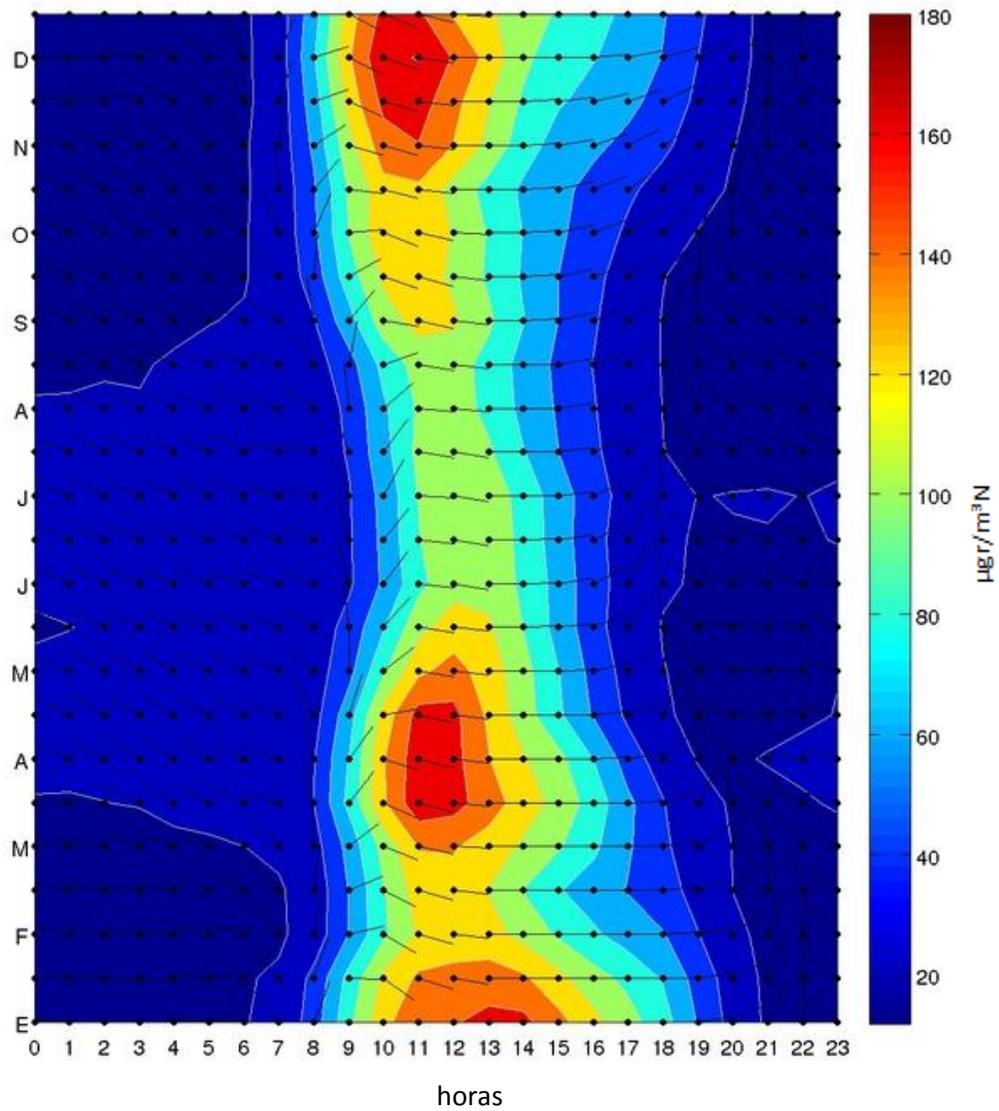


Figura 8.10: Equivalente a figura 8.7, pero para la estación Los Maitenes. La escala de color para las concentraciones se ha adaptado a la magnitud de las concentraciones de esta estación. También en este caso, las concentraciones máximas se registran en los meses diciembre, enero, marzo y abril con concentraciones menores en febrero.

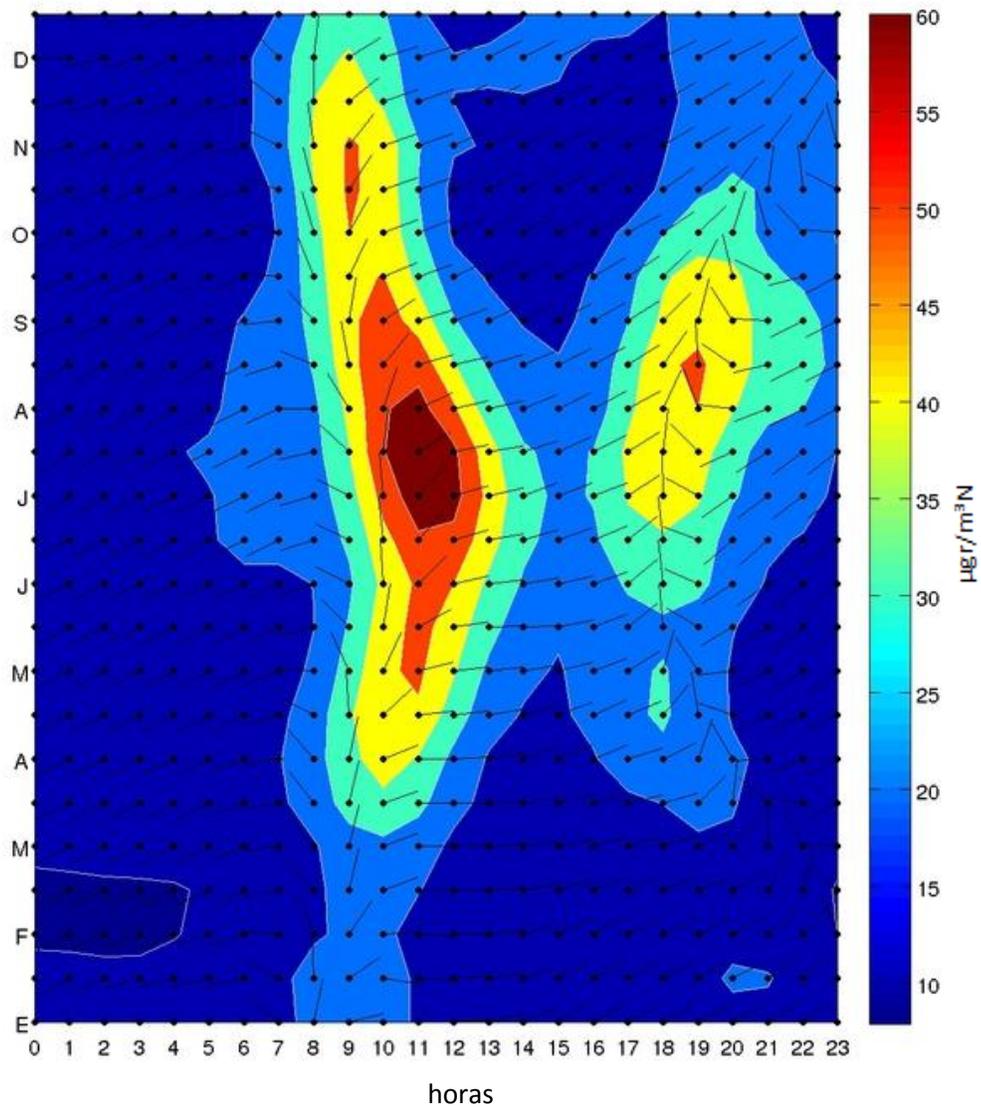


Figura 8.11: Equivalente a figura 8.7, pero para la estación La Greda. La escala de color para las concentraciones se ha adaptado a la magnitud de las concentraciones de esta estación. En este caso existe un ciclo estacional bien marcado con concentraciones mayores en invierno y menores en verano.

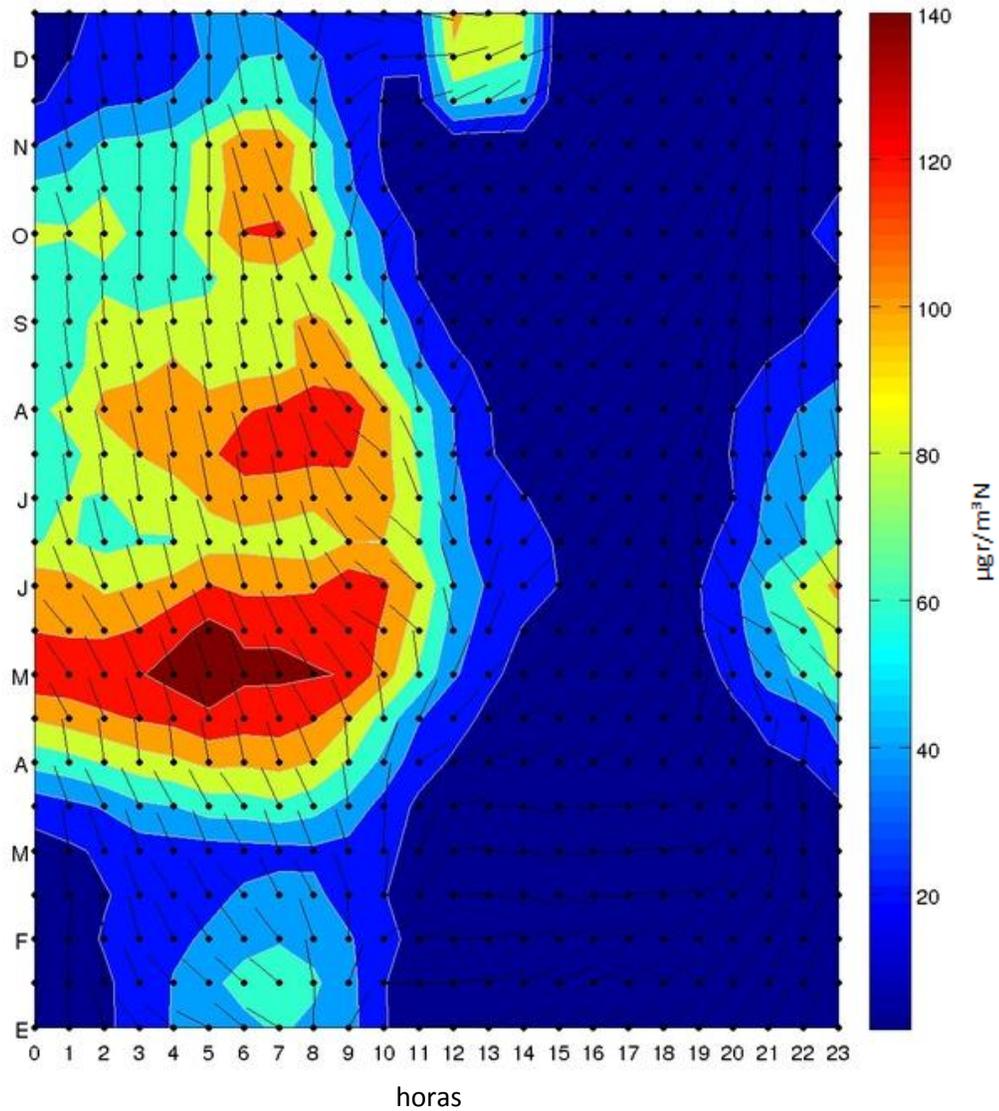


Figura 8.12: Equivalente a figura 8.7, pero para la estación GNL. La escala de color para las concentraciones se ha adaptado a la magnitud de las concentraciones de esta estación. Se observa un ciclo estacional con concentraciones mayores en invierno y menores en verano. Sin embargo, también en este caso se registran concentraciones aún menores en febrero y un máximo durante mayo aproximadamente..

8.4 Estabilidad atmosférica

Ya se mencionó la estabilidad atmosférica como variable importante en la modelación de las concentraciones de SO_2 en las zonas de Concón y Puchuncaví/Quintero. Ella no es una variable que se mide directamente, sino que se puede derivar a través de mediciones en la vertical de la temperatura y la presión. Sin embargo ni la zona de Concón ni la de Puchuncaví/Quintero cuenta con un sistema de este tipo de medición. En este sentido, se debe recurrir a la única medición en la vertical cercana, que es el radiosondeo en la localidad de Santo Domingo que realiza la Dirección Meteorológica de Chile dos veces al día, a las 00 y las 12 UTC (equivalente de las 20:00 y 08:00 hora local, respectivamente). La ausencia de más mediciones durante el día significa que no existe información del ciclo diario de la estabilidad y, por lo tanto, sólo se puede analizar la variabilidad de la estabilidad a la escala estacional. Para el análisis en esta sección se usaron datos del mismo periodo del que también se disponían datos de SO_2 en las zonas Concón y Puchuncaví/Quintero (2000-2010).

La figura 8.11 muestra la variabilidad estacional de los perfiles promedios de la temperatura potencial en los primeros 2000 metros de la tropósfera tanto para las mediciones de la 00 como de las 12 UTC. La temperatura potencial es un buen indicador de la estabilidad atmosférica y se pueden distinguir las tres situaciones:

- 1) La temperatura potencial disminuye con altura: atmósfera inestable
- 2) La temperatura potencial sigue constante con altura: atmósfera neutra
- 3) La temperatura potencial aumenta con altura: atmósfera estable

Tal como se indicó en el análisis de los ciclos estacionales, las concentraciones elevadas de SO_2 en todos casos menos el de la estación Los Maitenes se pueden asociar con el régimen nocturno y el periodo de transición madrugada/día. En este sentido es de particular interés el comportamiento de la temperatura potencial a las 12 UTC (equivalente de las 08:00, panel inferior de la figura 8.11) ya que de los dos radiosondeos diarios es esta que representa mejor las características de esos periodos. Se pueden claramente distinguir los cambios en estabilidad entre los meses de verano y de invierno: en verano, por ejemplo en el mes de enero, la temperatura potencial es constante hasta 500 m de altura. Por el otro lado, en los meses de invierno se puede observar en superficie temperaturas potenciales muy bajas y que aumentan con altura; de hecho, este gradiente es particularmente fuerte en los primeros aproximadamente 200 m. En este sentido, se confirma lo indicado en el análisis de los ciclos estacionales en el sentido que la estabilidad es la probable razón de los ciclos estacionales de las concentraciones de SO_2 , con concentraciones menores durante los meses de verano y mayores de invierno.

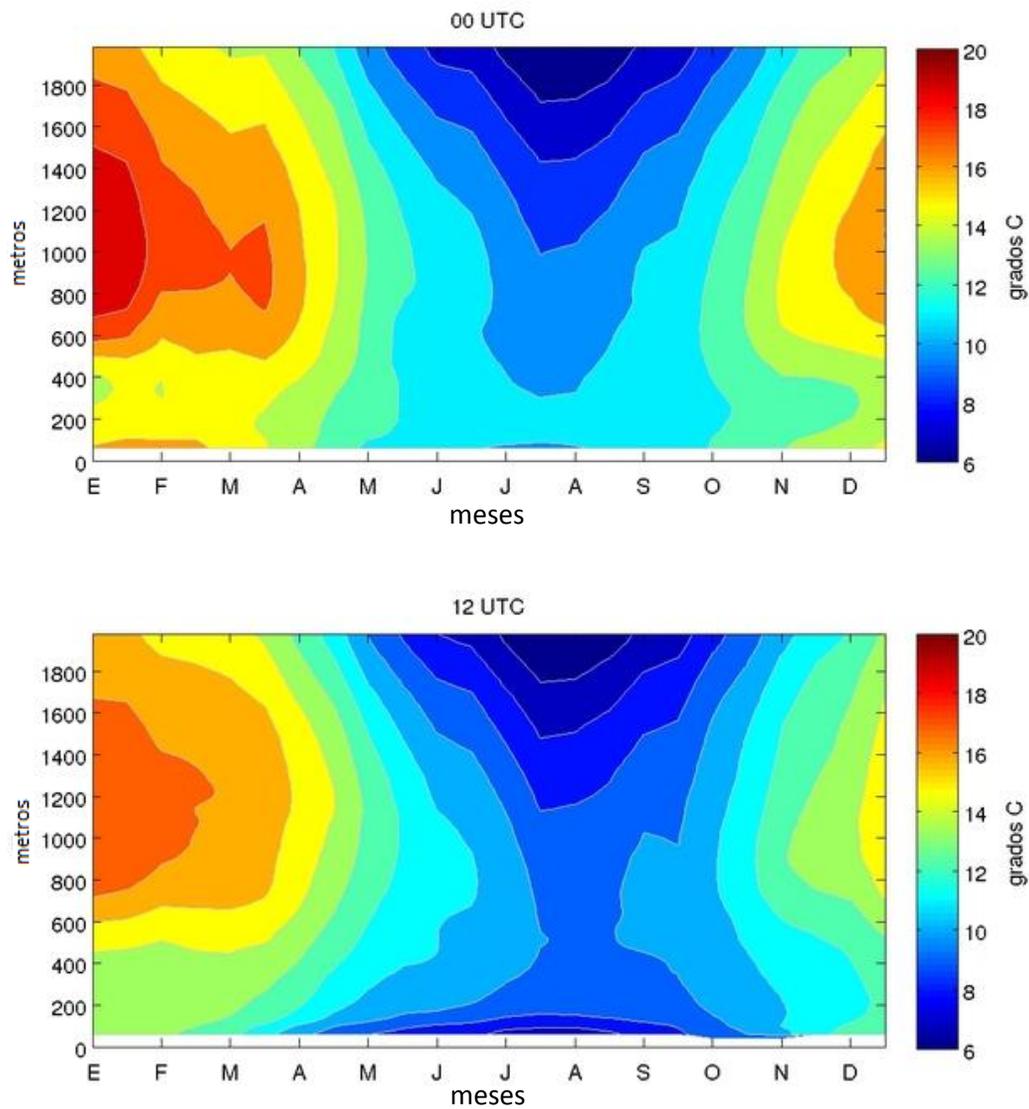


Figura 8.11: Ciclo estacional de los perfiles verticales promedios de la temperatura potencial (entre la superficie y 2000 metros) en Santo Domingo a las 00 UTC (panel superior) y las 12 UTC (panel inferior). El eje x indica los meses y el eje y la altura en metros. Sólo se indican las primeras letras de los meses, E = enero, F = febrero, etc..

8.5 Ciclos diarios durante eventos de concentraciones altas de SO₂

En el análisis de los ciclos diarios se consideraron los ciclos diarios promedios y su variabilidad. Sin embargo, también son de interés las situaciones *extremas* en que se registran las concentraciones de SO₂ más altas en cada estación en el entender del porqué se producen esos *eventos*. Se define como *evento* los días en que se supera el percentil 90 de las concentraciones de SO₂ de manera tal que son justamente aquellos días que *no* se consideraron en la descripción del comportamiento normal de cada estación que fue tratado en las secciones anteriores. Para el cálculo del percentil 90 se eliminaron las tendencias de las series de tiempo de SO₂, restando los respectivos promedios anuales. Este análisis se hará a través de la figura 8.12 para el caso de la estación Junta de Vecinos ya que su comportamiento es representativa para todas las otras estaciones (las figuras de las otras estaciones se entregan en el Anexo III, figuras A III.10 – A III.14).

La figura 8.12 indica en el panel superior el ciclo diario promedio de la velocidad del viento durante los eventos (línea azul), el viento promedio de todos los días como referencia (línea roja) y el límite en lo que se encuentran el 80% de los valores durante los días de eventos. El panel entremedio indica la frecuencia de la dirección de viento durante los días de eventos. El panel inferior es equivalente al superior pero para las concentraciones de SO₂. El panel inferior sólo muestra que en el caso de los eventos efectivamente se trata de días de mayores concentraciones de SO₂. En el caso de la velocidad del viento, la diferencia en los eventos y los otros días es muy pequeña y se considera no significativa. La variable más importante, sin lugar a dudas, es la dirección de viento. Comparando la figura 8.12 con la figura 8.1 (hay diferencias en la escala de color entre las dos figuras) que existe una dirección dominante durante el periodo noche/madrugada en que se producen las concentraciones elevadas desde el sureste (120 grados). Mientras esa dirección también se indica en los promedios (figura 8.1) durante los eventos se acentúa mucho más en una sola dirección. Este comportamiento es indicativo para una relación directa entre una fuente cercana y la estación: mientras más cercana una fuente y una estación más sensible son las concentraciones a la dirección de viento; mientras más lejanas menos sensible son las concentraciones a la dirección de viento. (Este comportamiento también se encuentra en los modelos Gaussianos.)

Tal como se puede ver en las figuras en el Anexo III (figuras A III.10 – A III.14), esta acentuación en la dirección de viento se puede observar en todas las estaciones de monitoreo. En este sentido, se puede concluir que la dirección de viento es una de las variables claves para las concentraciones de SO₂ (junto con la estabilidad atmosférica, tal como se mostró más arriba).

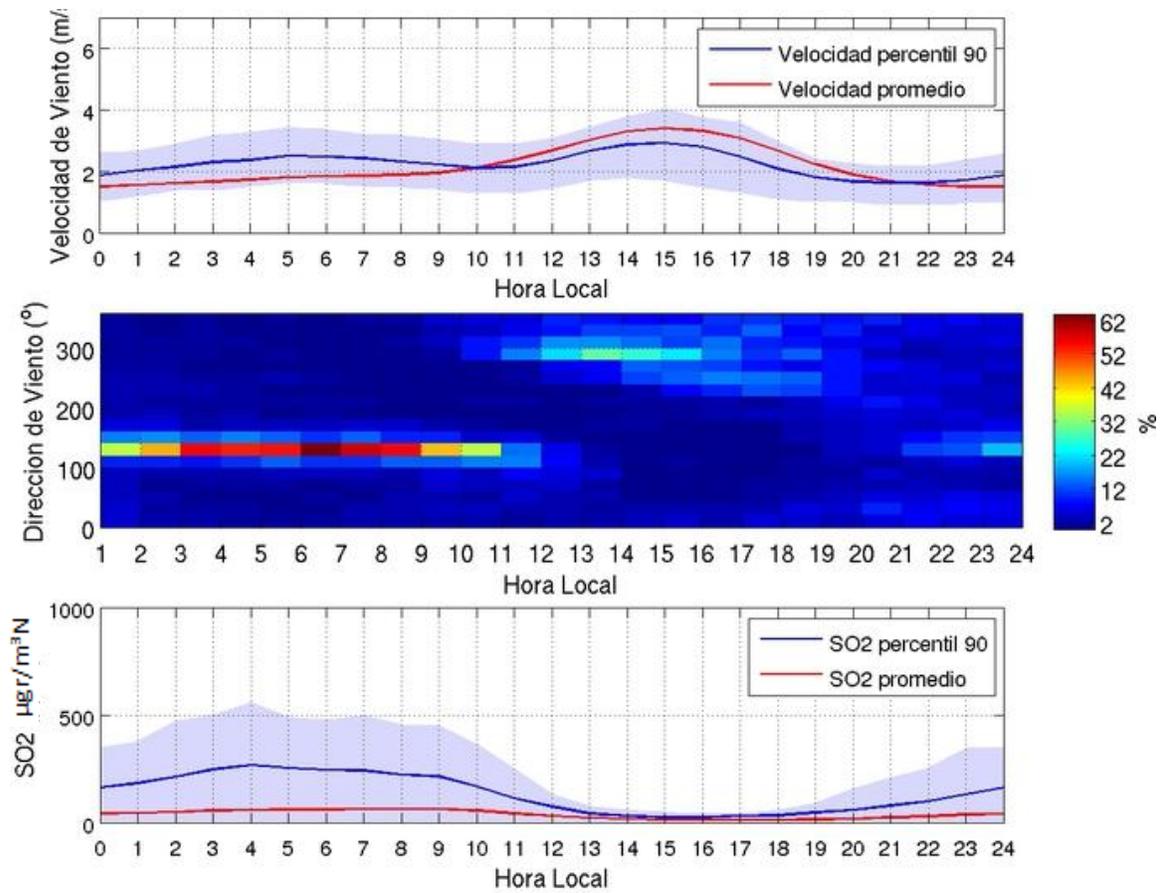


Figura 8.12: Ciclos diarios de días de eventos en la estación Junta de Vecinos: el panel superior muestra el ciclo diario promedio de la velocidad del viento durante los eventos (línea azul), el viento promedio de todos los días como referencia (línea roja) y el límite en lo que se encuentran el 80% de los valores durante los días de eventos. El panel entremedio indica la frecuencia de la dirección de viento durante los días de eventos. El panel inferior es equivalente al superior pero para las concentraciones de SO₂.

8.6 Estabilidad atmosférica durante eventos de concentraciones altas de SO₂

Ya se ha mostrado que la estabilidad es una de las variables importantes en modular la magnitud de las concentraciones a la escala estacional. A una escala temporal menor, también es razonable analizar si la estabilidad (o su variabilidad) representa un rol importante en que se produzcan los eventos de altas concentraciones de SO₂. Este análisis nuevamente se hará sólo para el caso de la estación Junta de Vecinos en representación de las otras estaciones (los gráficos correspondientes de las otras estaciones en el Anexo III, figuras A III.15–A III.119) menos la estación GNL que es tratado por separado. En lo que sigue se describe primero el caso de la estación Junta de Vecinos seguido por el de la estación GNL.

Tal como se mencionó anteriormente, la estabilidad no es una variable que se mide pero que se puede derivar a través del gradiente vertical de la temperatura potencial. Con efectos de este análisis es importante el gradiente de la temperatura potencial cercana a la superficie ya que es allí donde se emiten y se miden los contaminantes. De esta manera, se toma como un indicador de esta estabilidad la diferencia en la temperatura potencial, $\Delta\theta$, entre 50 y 150 metros de altura (no hay datos del radiosondeo en la superficie misma). Un $\Delta\theta < 0$ indica una atmósfera estable y un $\Delta\theta > 0$ una atmósfera inestable.

La figura 8.13 muestra la relación entre el percentil de las concentraciones diarias máximas de SO₂ y $\Delta\theta$. En el eje x se muestra $\Delta\theta$ y en el eje y las concentraciones de SO₂. La línea segmentada separa condiciones de una atmósfera inestable (hacia la derecha) y estable (hacia la izquierda). En primer lugar, se puede observar claramente que la gran mayoría de eventos se puede asociar con días en que se presenta una atmósfera estable (la mayor cantidad de puntos se ubica al lado izquierdo de la línea segmentada). Sin embargo, también existen días con concentraciones elevadas bajo condiciones inestables. Además, no existe una correlación muy fuerte entre la estabilidad y las concentraciones. De hecho, en condiciones de estabilidad muy fuerte de $\Delta\theta$ aproximadamente de -6 grados se pueden observar cuatro eventos con concentraciones muy distintas (entre aproximadamente 300 y 1000 $\mu\text{gr}/\text{m}^3$). Es decir, hay dos observaciones importantes a partir de esta figura:

- 1) Una atmósfera estable induce a condiciones atmosféricas que pueden producir concentraciones elevadas. Sin embargo, no es una relación lineal.
- 2) A pesar que se presenta una atmósfera inestable también se pueden producir eventos.

En consecuencia, no se puede atribuir la estabilidad atmosférica como variable única responsable para que se produzcan eventos. En la sección anterior ya se mencionó que la dirección de viento es otra de esas variables importantes.

Aparte de esas dos variables atmosféricas existen las emisiones de las cuales no existe información sobre su variabilidad y, por lo tanto, no se pueden analizar explícitamente. Sin embargo, se puede incluir en el análisis de la estabilidad en forma implícita a través de la siguiente hipótesis: se

suponen emisiones constantes en el tiempo, además, se considera que según la figura 8.13 la estabilidad atmosférica es una variable importante para que se produzcan eventos de altas concentraciones de SO_2 y, finalmente, se supone también un ciclo diario de la dirección del viento constante en el tiempo. Bajo estas condiciones, se esperaría un aumento en la estabilidad atmosférica desde días anteriores del evento al día del evento mismo. La figura 8.14 considera entonces el promedio de $\Delta\theta$ de los tres días anteriores del evento (eje x) y el $\Delta\theta$ del evento mismo (eje y). La línea segmentada separa los eventos que confirman la hipótesis anteriormente planteada y los que la rechazan: los puntos debajo de la línea indican los eventos en que efectivamente aumentó la estabilidad y, por el otro lado, los puntos arriba de la línea los eventos que incluso disminuyó la estabilidad. Dado que se encuentra un número similar de puntos arriba y debajo de la línea, no hay evidencia por qué confirmar la hipótesis. En consecuencia, las suposiciones de la hipótesis un ciclo diario de la dirección de viento constante en el tiempo y las emisiones constantes en el tiempo se deben rechazar bajo la información disponible. Con respecto a las emisiones, eso significa que -en términos generales- que también, un posible aumento de emisiones de la(s) fuente(s) con impacto en una de las estaciones en las zonas evaluadas sean responsables para que se produzca un evento. A modo de ejemplo, en el caso de la estación Junta de Vecinos que se analizó en las figuras de esta sección, eso significa que no se descarta que una variación de las emisiones de la fuente de SO_2 más importante en su alrededor (ENAP) sea responsable de un aumento en las concentraciones.

El caso de la estación GNL es distinto a las otras estaciones. Los equivalentes a las figuras 8.13 y 8.14 para el caso de GNL se muestran en las figuras 8.15 y 8.16. La figura 8.15 muestra que, en el caso de GNL, todos menos un evento se pueden asociar a una atmósfera estable. Además, la figura 8.16 confirma la hipótesis anteriormente planteada para el caso de la estación GNL en la que se presenta, en general, un aumento de la estabilidad desde días anteriores del evento y el día del evento mismo. En este sentido, parece que el comportamiento de GNL responde mucho más fuertemente a la estabilidad atmosférica que las otras estaciones.

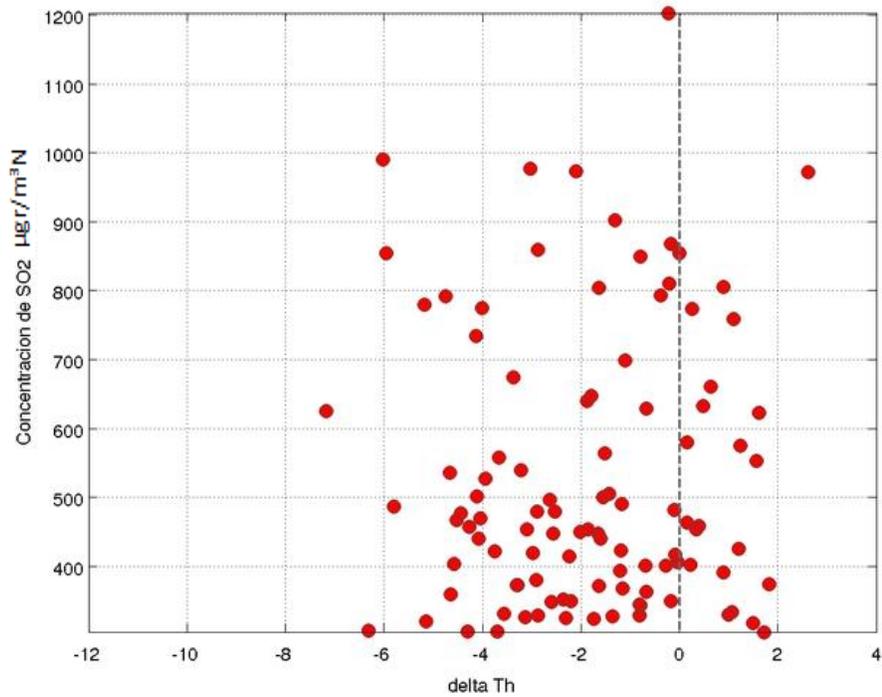


Figura 8.13: Relación entre la concentración máxima diaria de SO₂ (eje y) y $\Delta\theta$ (eje x) en los días de eventos en la estación Junta de Vecinos. La línea segmentada separa condiciones de una atmósfera inestable (hacia la derecha) y estable (hacia la izquierda).

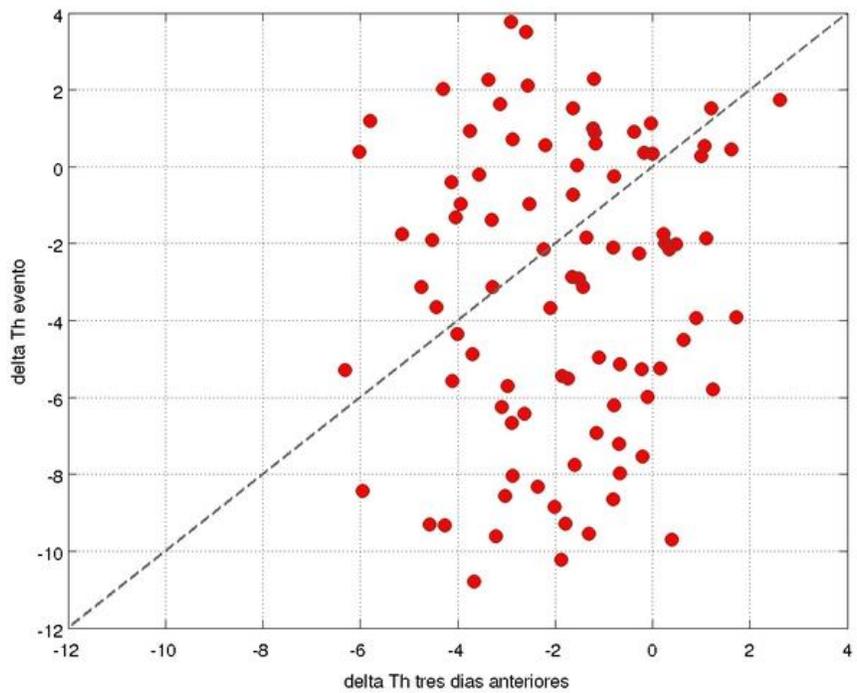


Figura 8.14: Relación entre $\Delta\theta$ en el día del evento (eje y) y el promedio de $\Delta\theta$ en los tres días anteriores del evento (eje x) en la estación Junta de Vecinos.

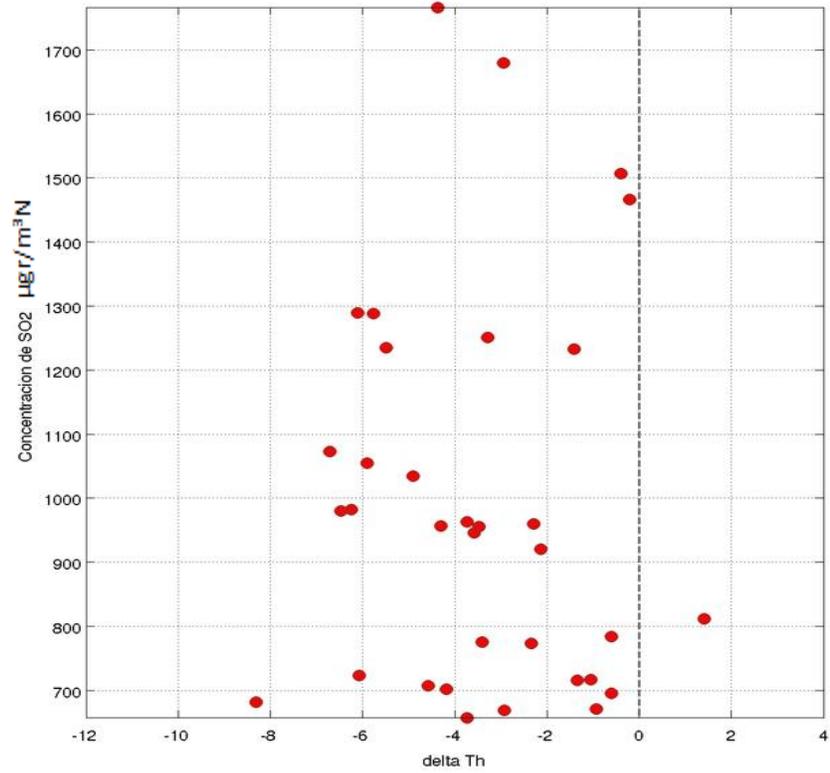


Figura 8.15: Equivalente a figura 8.13, pero para estación GNL.

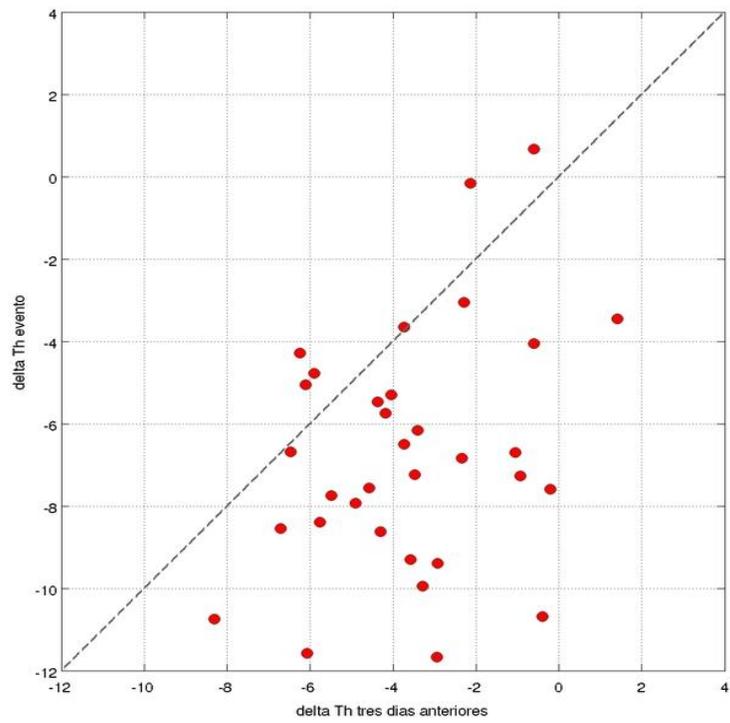


Figura 8.16: Equivalente a figura 8.14, pero para estación GNL.

8.7 Impacto de variaciones en emisiones de SO₂ de la Fundición CODELCO Ventanas y de AES Gener

Las variables de la meteorología día a día se mide a través de las estaciones de monitoreo. Estas mediciones han permitido relacionar –hasta un cierto punto- la variabilidad meteorológica respecto de la variabilidad de las concentraciones (a nivel de los ciclos diarios y estacionales, tal como se presentó anteriormente). Con respecto a las emisiones, es mucho más difícil evaluar su variabilidad en la variabilidad de las concentraciones. De hecho, tal como se mencionó en el análisis meteorológico de las secciones anteriores, siempre se suponían emisiones constantes en el tiempo. Esta suposición puede ser válida en una primera aproximación para las fuentes más controladas (por ejemplo las emisiones de la central termoeléctrica de AES Gener o la de la planta de ácido de la Fundición CODELCO Ventanas). Sin embargo, existen emisiones de otras fuentes de cuyas magnitudes ni momentos en el tiempo se saben. El caso más importante en este caso son las emisiones fugitivas de la fundición CODLCEO Ventanas; mientras se sabe su magnitud a nivel anual (ver también el inventario de emisiones) no se sabe cuánto de ese total se emitió en qué momento del tiempo. Tal como se explicó en la sección 8.2, el impacto en una estación es muy sensible a la dirección del viento, y mientras no se sabe la magnitud de la emisión en cada momento, no es posible relacionar la variabilidad de las emisiones a las mediciones.

Sin embargo, existen dos excepciones de las que sí se sabe algo de la variabilidad de las emisiones:

- i) durante los meses de febrero (aproximadamente) la Fundición CODELCO Ventanas se encuentra en general en mantención y no opera y
- ii) en el año 2010 se implementaron equipos de desulfurización en la central termoeléctrica de AES Gener.

Existen indicaciones sobre el impacto de la reducción en términos de emisiones de los respectivos casos.

En primer lugar, se veía en la sección 8.3.2 en la discusión sobre la variabilidad estacional que y en el caso de las estaciones Sur, Los Maitenes y de cierto modo también en la estación GNL, se manifiesta una reducción de impacto en el mes de febrero. También se mencionó en esa sección que esta reducción no se puede explicar en base de la variabilidad meteorológica; es decir que la reducción de las concentraciones en ese periodo sólo se puede deber a una reducción en emisiones. La Fundición CODELCO Ventanas se encuentra en paralización parcial justamente en ese periodo y considerando también que ella es el emisor de SO₂ más significativo en la zona, es evidente atribuir esa reducción a las emisiones mucho más bajas ella. Con el objeto de estimar el impacto de la paralización parcial de la fundición se calculó la diferencia de los promedios mensuales de SO₂ de los meses febrero y enero y marzo, respectivamente. La tabla 8.2 indica esas diferencias para las estaciones Sur, Los Maitenes, La Greda y GNL. Las diferencias se expresan en %; a modo de ejemplo, la diferencia entre el promedio mensual de enero y febrero en la estación es de un 32%; es decir se reducen las concentraciones de SO₂ en un 32% de enero a febrero. Para

la misma estación también se ven concentraciones más bajas en febrero con respecto a marzo (49% más bajas). De hecho, en las tres estaciones Sur, Los Maitenes y La Greda se observa que las concentraciones en febrero son más bajas que en enero y marzo. Este cambio es mayor en las estaciones Sur y Los Maitenes (entre 32 y 49%) y menor en La Greda (entre 13 y 23%). En la estación GNL en Quintero, no se observa esta diferencia entre enero y febrero (0% de diferencia) y, además, en febrero se observan incluso concentraciones mayores que en febrero. Cabe recordar al respecto que los datos de GNL, debido a su relativamente corto registro, contienen muy pocos datos para estos meses (ver también figura A10), lo que hace este resultado estadísticamente poco significativo.

Estación	Diferencia del promedio mensual de SO ₂ entre enero y febrero en %	Diferencia del promedio mensual de SO ₂ entre marzo y febrero en %
Sur	32	49
Los Maitenes	41	39
La Greda	13	23
GNL	0	-19

Tabla 8.2: Diferencias de los promedios mensuales de SO₂ entre enero-febrero y marzo-febrero en las estaciones Sur, Los Maitenes, La Greda y GNL. Las diferencias se expresan en % con respecto a los promedios mensuales de los meses enero y marzo, respectivamente.

El otro caso en que hubo cambios en emisiones es la implementación de desulfuradores en la central termoeléctrica de AES Gener en el año 2010. Para estimar su impacto en las concentraciones, se calcularon los promedios anuales de las concentraciones de SO₂ en las cuatro estaciones de monitores en la zona (ver figura 8.17). Considerando la diferencia entre los años 2009 y 2010, se puede observar que en todas las estaciones se registró una reducción en las concentraciones. La tabla 8.3 cuantifica estas diferencias en %, es decir se indica en cuánto se reducen los promedios anuales entre 2009 y 2010. En este caso, se registra en todas las estaciones una reducción en las concentraciones. En Sur, esta reducción es la menor con un 19% de reducción del 2009 al 2010 y en la estación La Greda la mayor con un 77%. En el caso de la reducción percibida en La Greda, se trata de un cambio de un año a otro nunca registrado en la historia de esta estación. En el caso de las otras estaciones, se registran cambios importantes desde el año 2009 a 2010. No obstante, se trata de cambios que también se habían observado en años anteriores también. Además, en el caso de la estación GNL para la cual se contaba en este estudio también con datos de 2011; se registró nuevamente un aumento entre 2010 y 2011 (ver figura 8.17). Este aumento se puede deber a un aumento de las emisiones en la zona o a la meteorología. Debido que se trata de un dato de una sola estación, se trata de un dato no representativo. Sin embargo, indica nuevamente lo difícil que es atribuir la variabilidad en las concentraciones a un solo factor.

Finalmente, cabe mencionar tres consideraciones:

- 1) Es evidente que el problema del SO₂ de la zona puede ser mitigado ya que hay claras indicaciones que la reducción de las emisiones locales conlleva una reducción en las concentraciones.

- 2) El caso más evidente en el impacto de las emisiones locales es la paralización parcial de la Fundición CODELCO Ventanas con fines de mantenimiento de su planta que tiene como consecuencia una reducción en concentraciones importantes.
- 3) Durante la paralización parcial por mantenimiento de la Fundición CODECLO Ventanas, también se registran concentraciones de SO₂ importantes. En consecuencia, sólo se pueden lograr resultados significativos en mitigar el problema de la zona si todos los emisores de la zona contribuyen a la reducción de emisiones.

Estación	Diferencia del promedio anual de SO ₂ entre 2009 y 2010 en %
Sur	19
Los Maitenes	25
La Greda	77
GNL	37

Tabla 8.3: Diferencias de los promedios anuales de SO₂ entre 2009-2010 en las estaciones Sur, Los Maitenes, La Greda y GNL. Las diferencias se expresan en % con respecto a los promedios anuales del 2009.

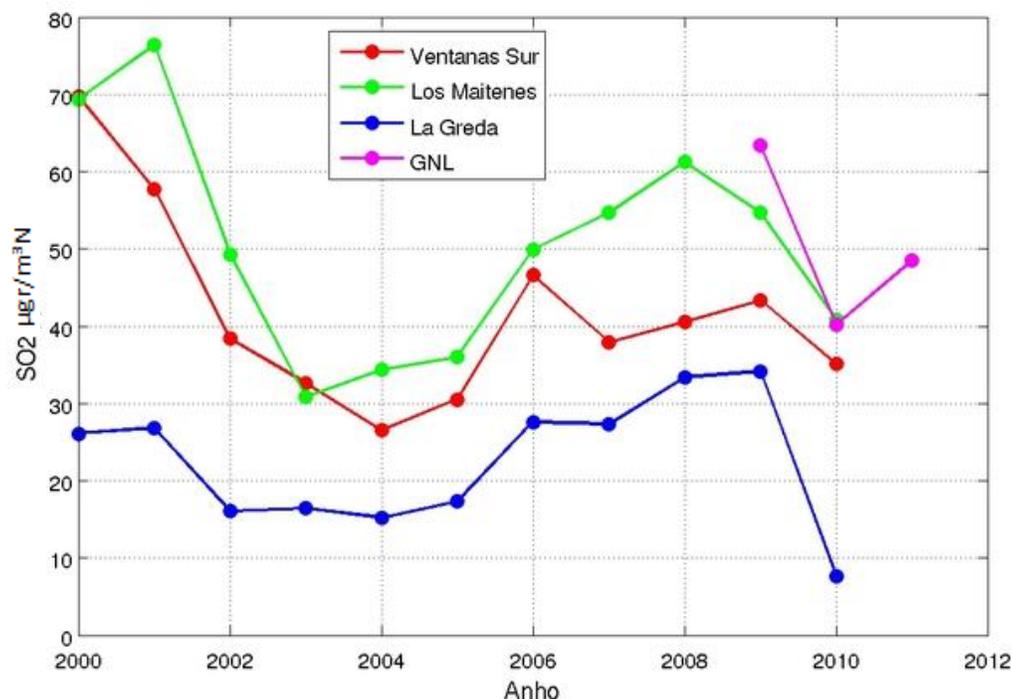


Figura 8.17: Promedios anuales de la concentración de SO₂ en las estaciones Sur, Los Maitenes, La Greda y GNL.

8.8 Relación entre fuentes emisoras e impacto en las estaciones

Finalmente, es importante saber si se pueden atribuir responsabilidades a los impactos en las estaciones anteriormente analizadas. Para este fin, es importante identificar las fuentes emisoras más importantes (en este caso de SO₂) en la zona que son en esta zona el complejo industrial Las Ventanas (CODELCO Fundición Ventanas y AES Gener) y la Empresa Nacional de Petróleo (ENAP) en Concón. La figura 8.18 muestra la ubicación tanto de las fuentes emisoras como de las estaciones de monitoreo. Las figuras 8.19-8.20 entregan los mapas individuales para cada zona.

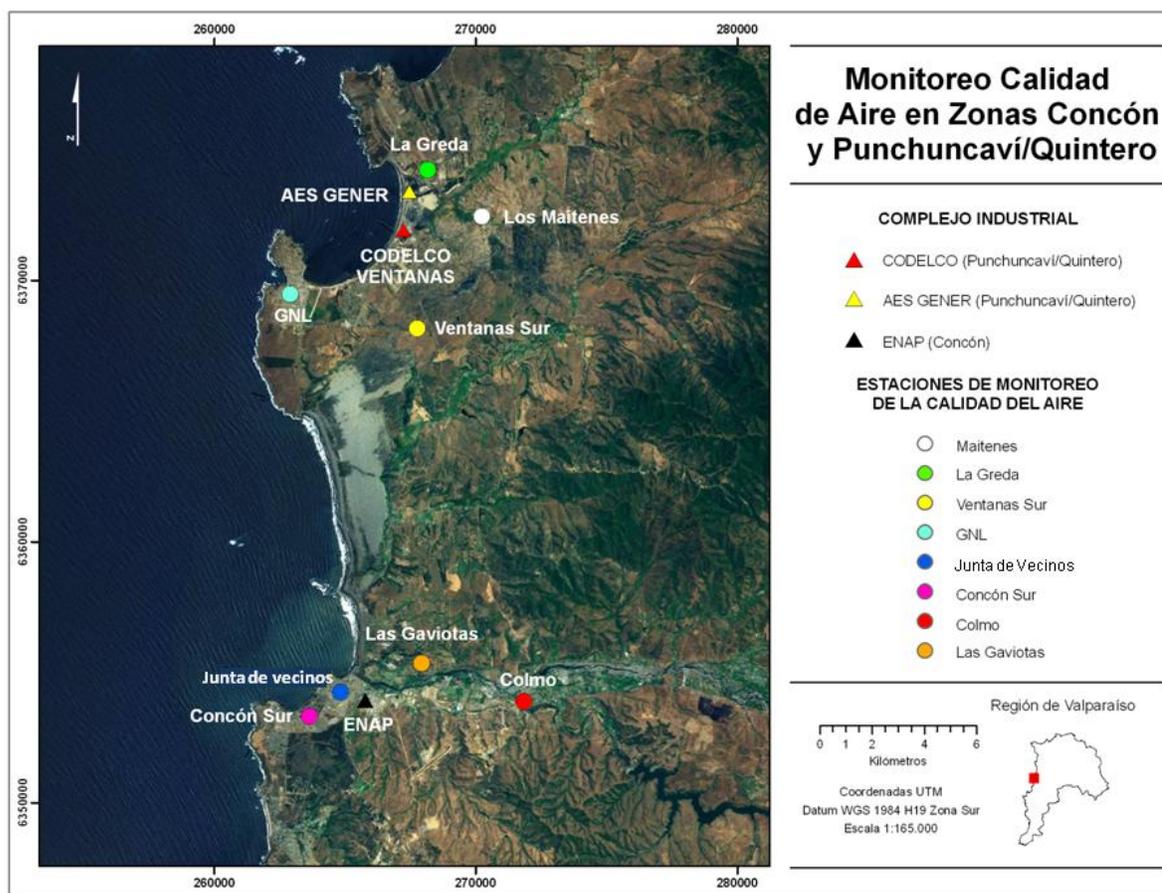


Figura 8.18: Ubicación de estaciones de monitoreo (círculos) y de fuentes emisoras de SO₂ en las zonas Concón y Puchuncaví/Quintero.

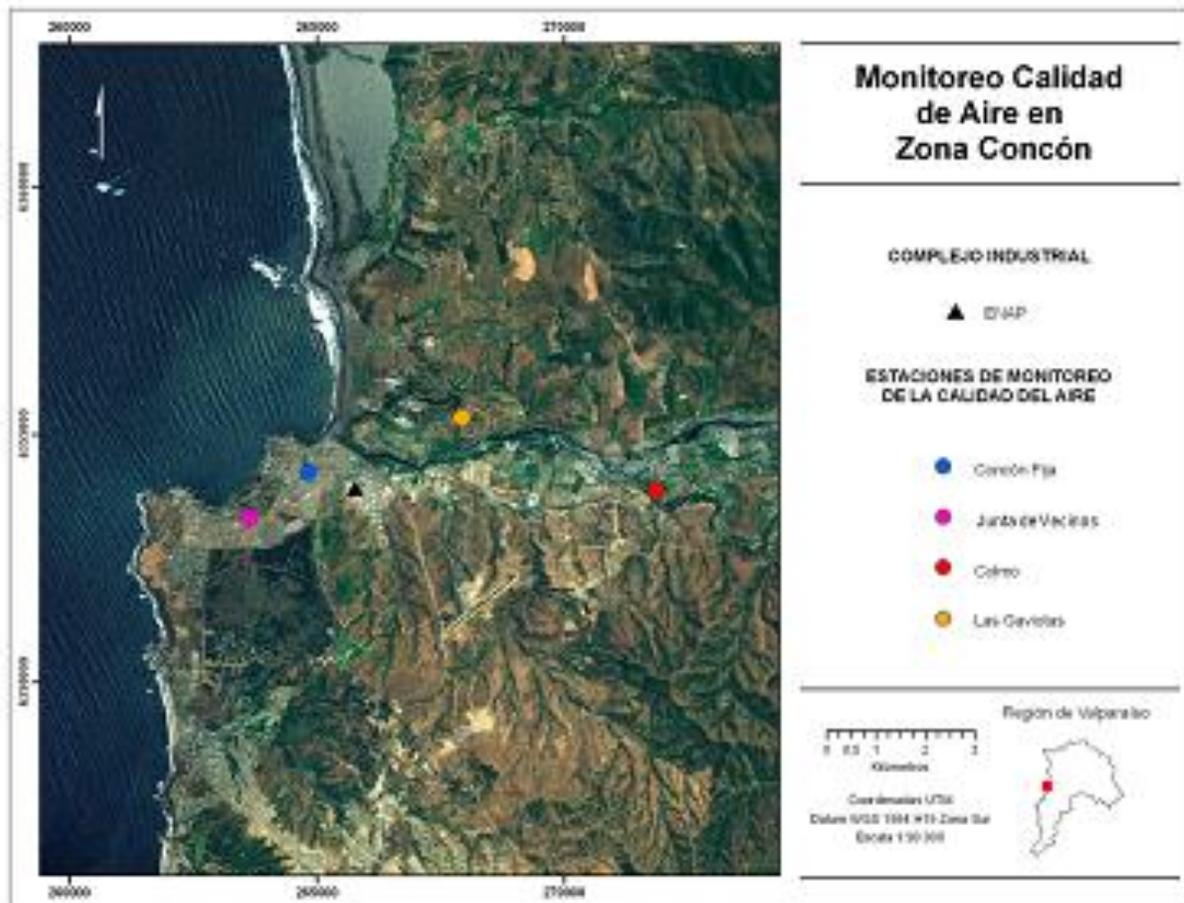


Figura 8.19: Ubicación de estaciones de monitoreo (círculos) y de fuentes emisoras de SO_2 en la zona Concón.

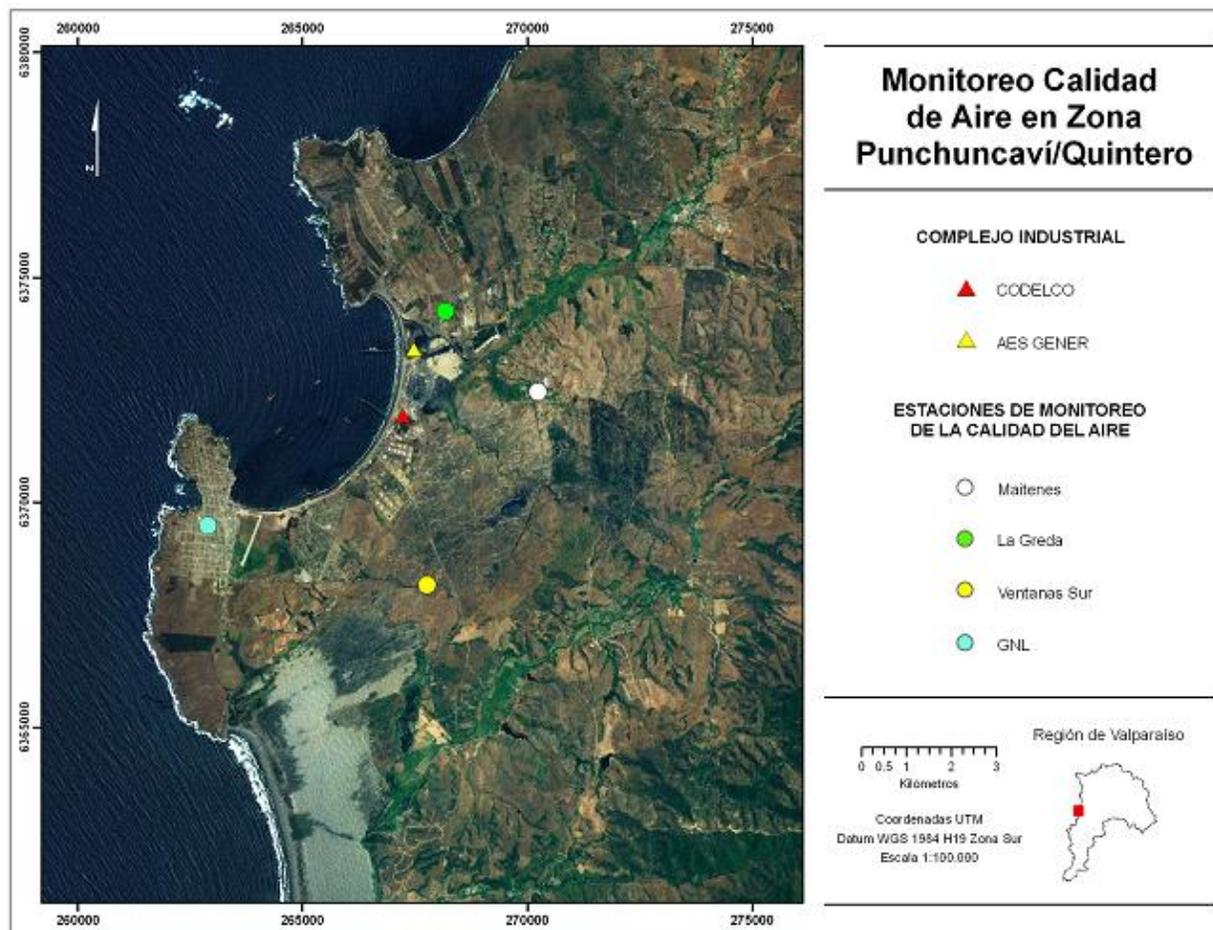


Figura 8.20: Ubicación de estaciones de monitoreo (círculos) y de fuentes emisoras de SO_2 en la zona Puchuncaví/Quintero.

El análisis se debería hacer para las zonas de Concón y Puchuncaví/Quintero en forma independiente.

8.7.1 Concón

La estación de monitoreo en Concón que muestra mayores concentraciones de SO_2 es la estación Junta de Vecinos. Las concentraciones más elevadas de esta estación se registran, tal como se mostró anteriormente, durante el régimen nocturno/madrugada con una dirección de viento desde el este-sureste lo que es justo la dirección en que se ubican las instalaciones industriales de la ENAP. Esta situación persiste también durante los días de episodios Además, la respuesta rápida en el nivel de las concentraciones de SO_2 en esta estación a los cambios de la dirección de viento excluyen otras posibilidades que las emisiones por parte de las instalaciones de ENAP sean responsables del impacto medido. (A pesar que las emisiones de ENAP son muy inferiores a las del complejo industrial de Puchuncaví/Quintero, son justamente la dirección de viento en la zona y los tiempos característicos que eliminan la posibilidad que el complejo industrial de Puchuncaví/Quintero sea el responsable del impacto en esta estación.)

Las bajas concentraciones en Concón Sur se explican por la cercanía de ENAP y que la dirección de viento no apunta directamente a la estación. Esta estación sólo se ve afectada en el periodo de transición. Las concentraciones relativamente bajas indican que no es un impacto directo de ENAP sino que se trata de masas de aire recirculados –y por lo tanto diluidas por el efecto de la dispersión- desde el mar.

También indicadas en las figuras 8.18 y 8.19 son las estaciones Colmo y Las Gaviotas. Tal como se mencionó anteriormente, las concentraciones de SO₂ en ambas estaciones son muy bajas lo que se debe a su mayor distancia a ENAP y a lo que no se encuentran directamente viento abajo de la misma.

Finalmente, son las variables de la dirección de viento, la estabilidad atmosférica y la magnitud de las emisiones las que pueden explicar los eventos extremos en Concón. Sin tener datos robustos de las emisiones no es posible analizar cuantitativamente en cuánto contribuye cada una de ellas en las concentraciones observadas.

8.7.2 Puchuncaví/Quintero

El caso de Puchuncaví/Quintero y las estaciones de su red no requiere mayor análisis en el sentido que, dado su magnitud en emisiones, es evidente que es el complejo industrial el responsable de las concentraciones de SO₂. El último inventario de emisiones (2008) indica tasas de emisiones muy altas para CODELCO Fundición Ventanas (68.1% del total en la zona) y AES Gener (30.7% del total en la zona). Tal como se mostró en las secciones anteriores, es muy difícil cuantificar la responsabilidad de cada una de las empresas en cada una de las estaciones de monitoreo (incluyendo episodios de muy altas concentraciones). Por el otro lado, a nivel global de la zona la responsabilidad es compartida y relativa a sus respectivas tasas de emisión.

Por otro lado, el caso de la estación GNL es indicativo de la complejidad de la meteorología y la contaminación: las concentraciones mayores de SO₂ en la estación GNL ocurren principalmente durante la noche/madrugada. Durante ese periodo la dirección de viento predominante en la estación GNL es desde el sur hacia el norte. Sin embargo, tal como lo indican las figuras 8. 6 y A15, también existe la posibilidad de cualquier otra dirección. Por el otro lado, el viento desde la zona de de las emisiones mismas (por parte de las fuentes emisoras Fundición CODELCO Ventanas y AES Gener) es predominantemente desde el continente hacia el mar (o sea, desde las fuentes principales de SO₂ hacia Quintero). Sin embargo, no es suficiente que exista ese flujo desde las fuentes hacia Quintero, sino que, tal como indica la figura 8.15, es necesario también que se presente una atmósfera estable para que se produzcan concentraciones elevadas.

8.9 Conclusiones del caso de SO₂ en Puchuncaví/Quintero y Concón

8.9.1 Puchuncaví/Quintero

Siendo Puchuncaví/Quintero una zona con un potencial de conflicto ambiental muy alto, amerita la pregunta de ¿qué tan concluyente son los resultados entregados en este estudio? Y ¿cuáles son las recomendaciones para superar las brechas de conocimiento existentes?

Cabe enfatizar nuevamente que el problema del SO₂ en la zona de Puchuncaví/Quintero es un problema causado por fuentes locales. También es evidente que estas fuentes locales son principalmente la Fundición CODELCO Ventanas y AES Gener que, según el inventario de emisiones, contribuyen a un 68.1% y 30.7%, respectivamente, de las emisiones de SO₂ de la zona y que eso también debe ser su responsabilidad relativa al problema global en Puchuncaví/Quintero. En este sentido, se considera concluyente el análisis de este estudio. Sin embargo, quedan dos preguntas principales abiertas:

- 1) ¿Cómo se puede cuantificar mejor la responsabilidad de fuente emisora de SO₂ a los impactos registrados en cada una de las estaciones de monitoreo?
- 2) ¿Cuáles son los procesos responsables para que se registren niveles altos en las estaciones? ¿Son causados estos niveles altos por procesos meteorológicos o de un aumento temporal de emisiones (o ambos)?

Ambas preguntas entonces apuntan a aspectos más detallados que sólo el problema global. Y tal como se ha mostrado en las secciones anteriores, no existe la información necesaria en este momento para responderlas. Es evidente que el inventario de emisiones indica la magnitud de las emisiones de cada fuente. Sin embargo, dadas las alturas de sus respectivas chimeneas (o la ausencia de las mismas) y la incertidumbre de las emisiones con respecto a su ocurrencia temporal (principalmente de las emisiones fugitivas de la Fundición CODELCO Ventanas que no son controladas), hace muy difícil (o imposible) asignar responsabilidades a eventos individuales e incluso al impacto general en cada una de las fuentes. Además, también se ha podido mostrar en este estudio que con la información meteorológica disponible tampoco es suficiente explicar el comportamiento sólo en función de fenómenos meteorológicos.

Es decir, se ha podido caracterizar el comportamiento general, pero la información disponible no es suficiente para explicar lo observado. En este sentido, se recomienda principalmente equipar la zona justamente para complementar la información existente. Las recomendaciones específicas entonces son:

- a) Aumentar la densidad de las estaciones de monitoreo. Mientras las estaciones existentes se deben mantener (ni mover de su lugar), se recomienda implementar una estación adicional entre cada una de las estaciones del “anillo” GNL- Sur-Los Maitenes-La Greda. Cada una de estas estaciones debe contar con mediciones de SO₂ y meteorología.
- b) Instalación de un perfilador vertical meteorológico. Es esencial que esta zona cuente un equipo que realice mediciones meteorológicas en la vertical. Este equipo idealmente es de

tipo RASS o SODAR. También sería recomendable la implementación de una o dos torres meteorológicas. Sin embargo, su alcance vertical es mucho menor que los equipos mencionados.

- c) Campañas de medición. Estas campañas deberían incluir mediciones en la bahía de Quintero. El comportamiento del SO_2 sobre la bahía es desconocido y se supone que es clave para la situación en Quintero. Las campañas también deberían incluir mediciones en altura de SO_2 . Nuevamente, son desconocidas las características de la dispersión del SO_2 en altura. Considerando que gran parte de sus emisiones ocurren justamente en altura sería clave saber cómo se comporta su dispersión a la altura de su emisión. Estas mediciones se podrían realizar con aviones UAV equipados con sensores de SO_2 .
- d) Todas las fuentes emisoras deben ser equipadas con sensores continuos de sus emisiones. Algunas fuentes miden sus emisiones continuamente. Sin embargo, todas las fuentes deben hacerlo. Estos datos deberían estar disponibles en línea lo que permitiría una vigilancia oportuna.

8.9.2 Concón

El caso de Concón es más simple que el de Puchuncaví/Quintero ya que la magnitud del problema es menor y existe una fuente emisora de SO_2 (ENAP) que domina a todas las otras. Mientras siempre es bueno contar con la máxima cantidad de observaciones posibles, la magnitud del problema y las incertidumbres en este caso no justificarían un aumento en mediciones en esta zona. Las estaciones instaladas se consideran adecuadas para caracterizar el comportamiento y vigilar la fuente emisora.

9 Análisis del material particulado en la zona de Puchuncaví/ Quintero

Esta sección apunta a un análisis del material particulado análogo al que se presentó en la sección anterior para el SO₂. Este análisis se debe limitar al PM10 dado que no existen observaciones de PM2.5 en la zona. Además y dado que este tipo de análisis requiere observaciones a nivel horario, éste sólo se puede hacer para las estaciones La Greda, Los Maitenes y Sur, las otras estaciones o no miden PM10 o lo miden cada tres días en forma discreta (promedio diario). En consecuencia, se limita en lo que sigue a los datos horarios que están disponibles para esas tres estaciones, a saber:

Estación	Variable	Periodo	Compleitud (%)
Los Maitenes	Velocidad de viento	2000-2010	90
	Dirección de viento	2000-2010	90
	PM10	10/2009-07/2010	83
La Greda	Velocidad de viento	2000-2010	90
	Dirección de viento	2000-2010	90
	PM10	06/2009-12/2010	80
Sur	Velocidad de viento	2000-2010	93
	Dirección de viento	2000-2010	93
	PM10	06/2009-12/2010	79

Las figuras 9.1–9.3 muestran los ciclos diarios de PM10 en los paneles inferiores para las estaciones Sur, Los Maitenes y La Greda, respectivamente. Las figuras son equivalentes a las figuras 8.3–8.5 en el sentido que se entrega junto a los ciclos diarios de la variable química también los de la velocidad y la dirección de viento (paneles superiores y entremedios, respectivamente). En los tres casos, se puede observar que las características del PM10 son muy distintas a aquellas observadas en el caso del SO₂. En las estaciones Sur y Los Maitenes (figuras 18 y 19) los ciclos diarios de PM10 son muy planos; en ambos casos se observa un leve aumento de las concentraciones alrededor de las 10:00-11:00. Por el otro lado, en la estación La Greda se observa un ciclo diario de PM10 más pronunciado y, además, con concentraciones más altas que en las otras dos estaciones. El máximo se observa entre las 15:00-16:00. También en este caso, el ciclo diario es muy distinto al del SO₂ en la misma estación.

Tal como se elaboró para el caso del SO₂, la estación Maitenes está viento abajo de las fuentes emisoras industriales de la zona durante la noche/madrugada. Sin embargo, es justo en este periodo que bajan las concentraciones de PM10. En este sentido y a contrario del caso del SO₂, no se pueden relacionar los ciclos diarios del PM10 muy bien a las fuentes industriales. Ya que los ciclos de PM10 también en las otras dos estaciones no coinciden muy con los de SO₂, tampoco se puede establecer una relación entre los ciclos diarios de PM10 y las fuentes industriales. Sin embargo, es evidente, que las fuentes industriales tienen también impacto lo que se refleja en la composición de elementos del PM10 disponibles. Sin embargo y a contrario del caso de SO₂, la

información disponible en el caso de PM10 no permite atribuir la responsabilidad única a las fuentes industriales.

No se entregan para PM10 los ciclos estacionales ya no son suficientemente largos ni completos los series de tiempo.

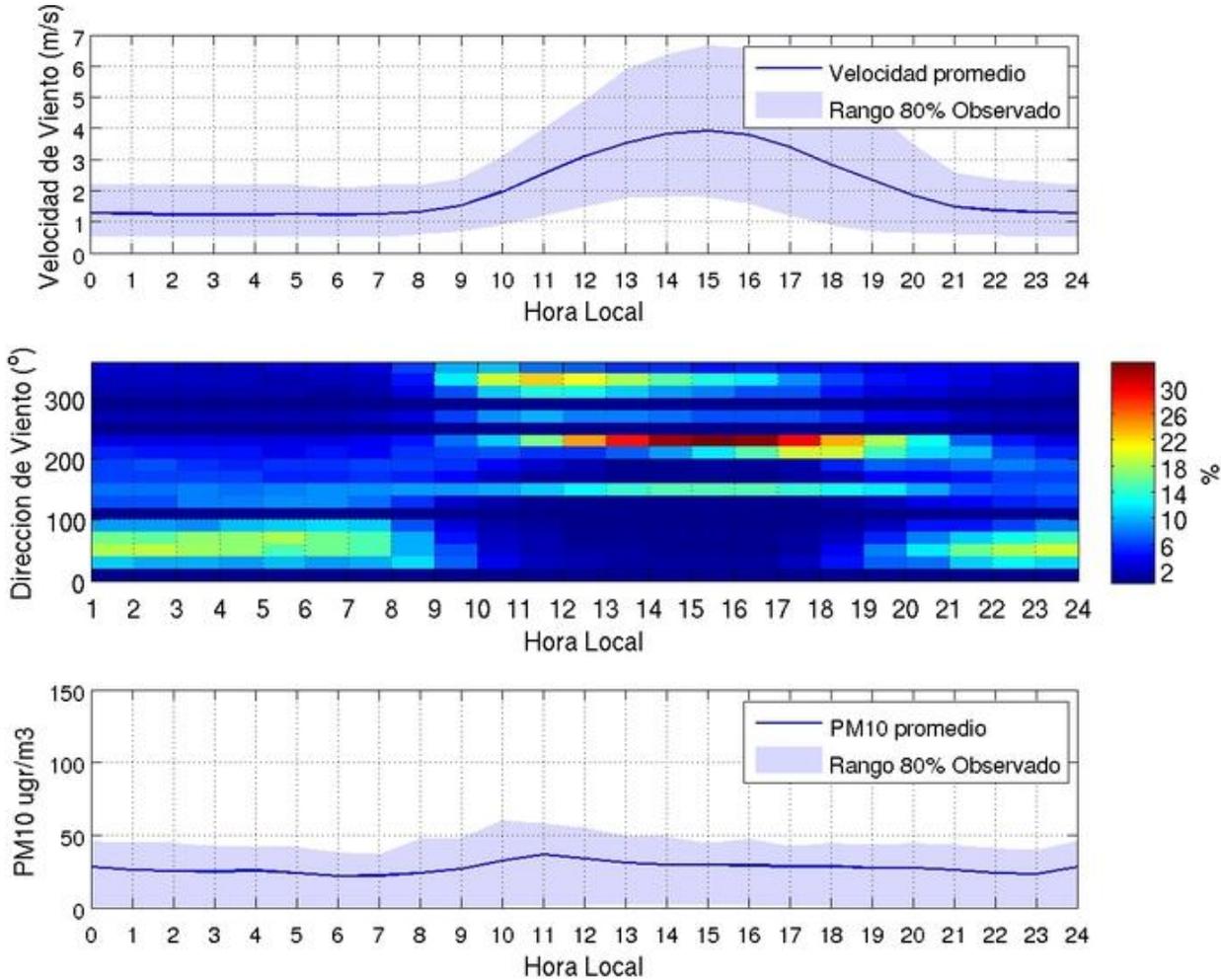


Figura 9.1: Ciclos diarios de velocidad (panel superior) y dirección del viento (panel entremedio) y concentraciones de SO2 (panel inferior) para la estación Sur. En los casos de la velocidad del viento y las concentraciones de PM10, se indican los ciclos promedios (líneas azules) y su variabilidad a través de las sombras celestes que contienen el 90% de los datos. El ciclo diario de la dirección de viento a la vez se indica a través de la frecuencia en que ocurre a cada hora del día (en %). La dirección de viento se indica en intervalos discretos de 20 grados. En este caso las concentraciones en general son bajas.

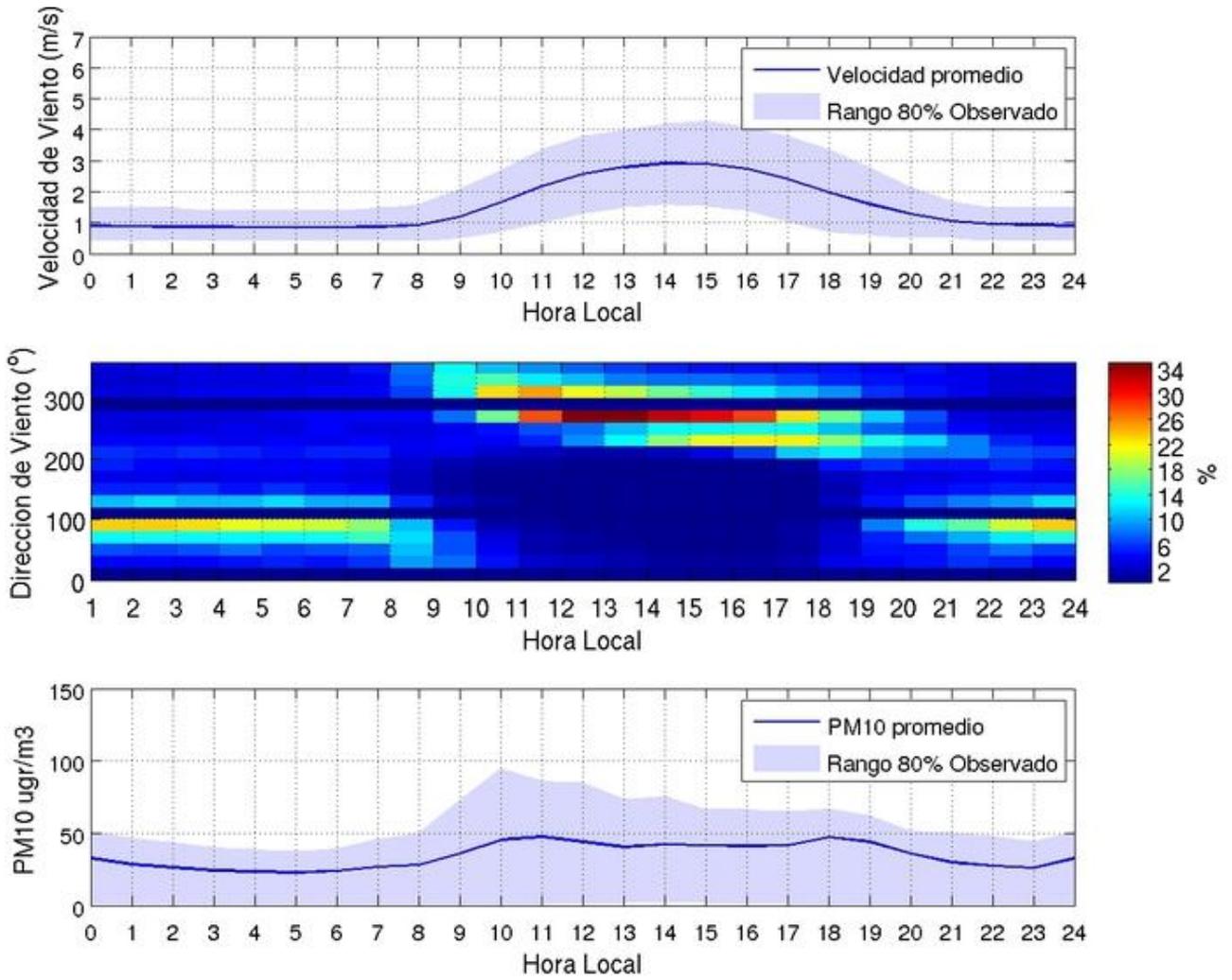


Figura 9.2: Equivalente a la figura 9.3 pero para la estación Los Maitenes. En esta estación se registran niveles bajos durante la noche (vientos desde el este) y un poco más altos durante el día (viento del oeste).

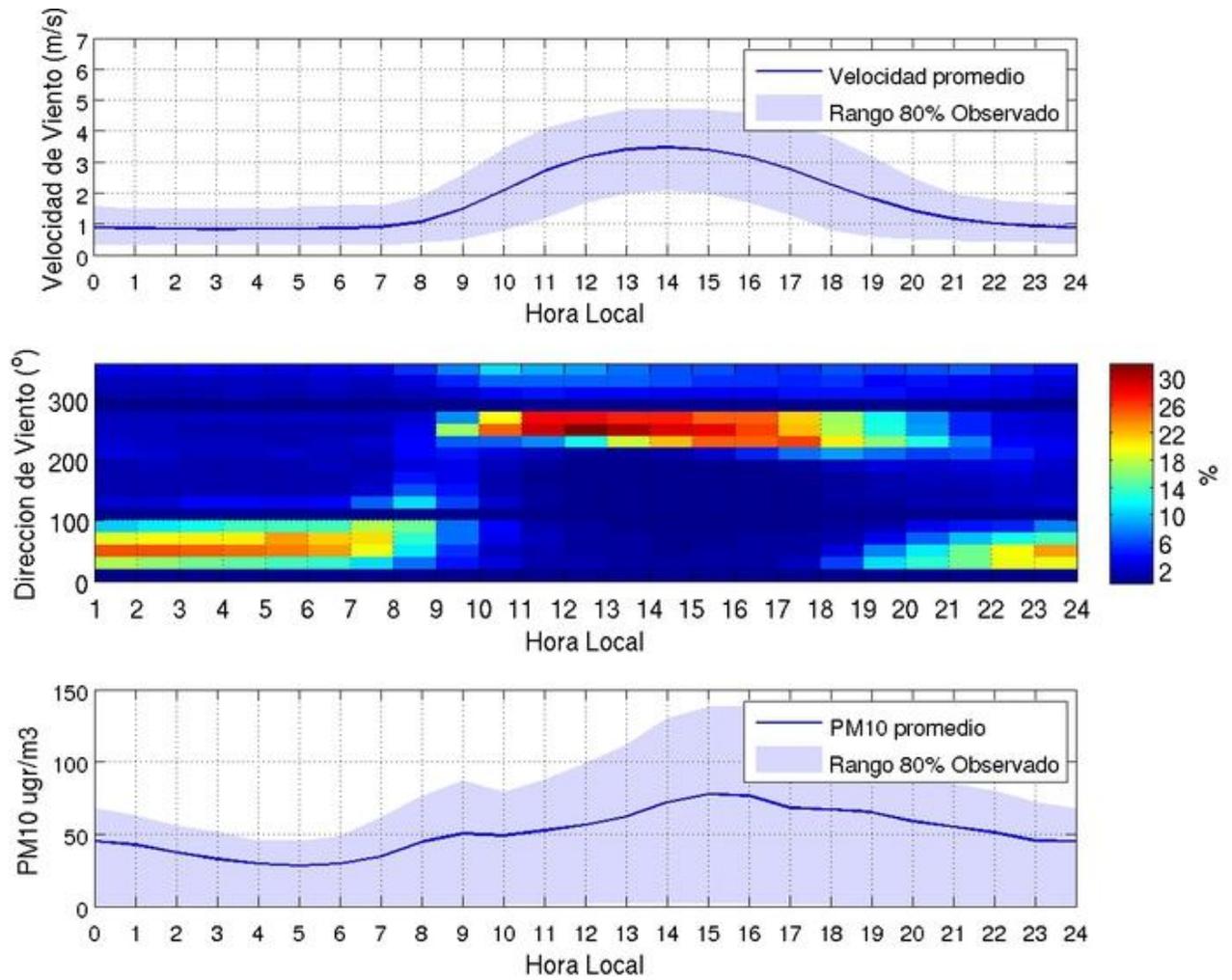


Figura 9.3: Equivalente a la figura 9.3 pero para la estación La Greda. A contrario del caso de SO_2 , es esta estación que registra las concentraciones más altas de todas las tres estaciones. Las concentraciones más altas se observan durante la tarde/noche.

10 Estimación de área de impacto

Mientras el capítulo 8 entregó un diagnóstico sobre las características del problema de SO₂ en las zonas, también es una inquietud por parte de las autoridades la pregunta cuál es la extensión espacial de los impactos. En esta sección se analizan justamente los patrones espaciales de los impactos. En primer lugar, se analizan los impactos a partir de las fuentes de los complejos industriales Puchuncaví/Quintero y Concón. A este análisis sigue uno que se concentra en la zona de Catemu con el enfoque de los patrones de impacto a partir de las fuentes de la fundición Chagres y la Central Los Vientos. Con este objetivo, se realizaron simulaciones de dispersión a través de un modelo de trayectorias. El concepto de un modelo de trayectorias es que matemáticamente se sigue el movimiento de una parcela de aire o de una partícula en la atmósfera. Es decir, si en una posición inicial de una partícula se conoce el viento fácilmente se puede calcular a dónde va esa partícula en un intervalo de tiempo finito (integración en el tiempo). Después de esa integración la partícula tiene una posición nueva en el espacio donde el viento (tanto en su magnitud como en dirección) puede ser distinto que en la posición inicial. Ocupando esa información del viento, nuevamente, se puede integrar en el tiempo moviendo la partícula a otra posición y así sucesivamente se sigue en la integración. El camino que se describe a través de esa integración se llama trayectoria. Aparte de los procesos de transporte por viento, también se incorporan los procesos turbulentos de la atmósfera.

Mientras el cálculo de una trayectoria puede entregar información valiosa sobre el destino de la contaminación de una fuente no permite la estimación de concentraciones. Para este fin, se requiere el cálculo de muchas trayectorias (del orden de un millón por fuente). En los ejemplos de este análisis se simularon del orden de 8 millones de trayectorias por día. El requerimiento principal para el uso de los modelos de trayectorias es la disponibilidad de datos meteorológicos cuatro-dimensional (tres dimensiones en el espacio más el tiempo).

Cabe señalar que las figuras entregadas en este capítulo indican zonas de un posible impacto. Como con todo tipo de modelación, los resultados se deben interpretar como zonas donde existe cierto riesgo. En este sentido, la información entregada puede ser usada también como *un* elemento dentro de la definición de zonas latentes o saturadas de un cierto contaminante. Sin embargo, la modelación no debe ser el único elemento en esta definición.

10.1 Zonas Puchuncaví/Quintero y Concón

Las figuras 10.1-10.3 muestran los patrones de dispersión a partir de una fuente en superficie en la (figura 10.1) y a partir de una chimenea de 45 metros de altura (figura 10.2) en la zona de Puchuncaví/Quintero y a partir de una chimenea con una altura de 45 metros en Concón (figura 10.3). La fuente en superficie en el caso de la zona de Puchuncaví/Quintero se incluyó en representación de las emisiones fugitivas de la Fundición CODELCO Ventanas y las fuentes en altura en representación de cualquier chimenea en las respectivas zonas (Fundición CODELCO

Ventanas y AES Gener en Puchuncaví y ENAP en Concón). En este sentido, se incluyen las características de las fuentes emisoras más importantes en ambas zonas.

Dado que no es de interés en este análisis la magnitud de las concentraciones sino su distribución espacial, las figuras indican concentraciones relativas en el sentido que las líneas rojas representan el 70% del valor máximo, las líneas naranjas el 10% y las líneas amarillas el 1% del máximo de los promedios. En cada figura se distingue entre verano entre diciembre y febrero (paneles superiores) e invierno entre junio y agosto (paneles inferiores) y noche entre las 22:00-06:00 (paneles a la izquierda) y día 10:00-18:00 (paneles a la derecha). En general, se puede observar que la dispersión durante la noche es mucho más débil que durante el día. El alcance espacial mayor durante el día se puede explicar por los vientos más fuertes durante este periodo. Sin embargo, cabe recordar que las concentraciones durante el día también son muy inferiores que durante la noche. Es decir, los impactos que se muestran en todos los casos hacia el este de las fuentes durante el día sólo serían significativos en caso de una emisión muy alta. A modo de ejemplo, si en la estación Los Maitenes se registran en un evento $1000 \mu\text{gr}/\text{m}^3$ durante el día los contornos amarillos apenas significarían $10 \mu\text{gr}/\text{m}^3$.

La dispersión mayor durante el día en los meses de verano se explica por un mayor forzamiento topográfico debido a una mayor radiación solar. Es por eso también que durante esos meses la dirección de la dispersión es más definida hacia el este mientras en los meses de invierno también se observa una dispersión en el eje norte-sur en todos los casos.

La figuras también confirman que es los impactos significativos en las estaciones de cada zona se deben a las emisiones locales y que el impacto por las fuentes de las otras zonas son mínimas.

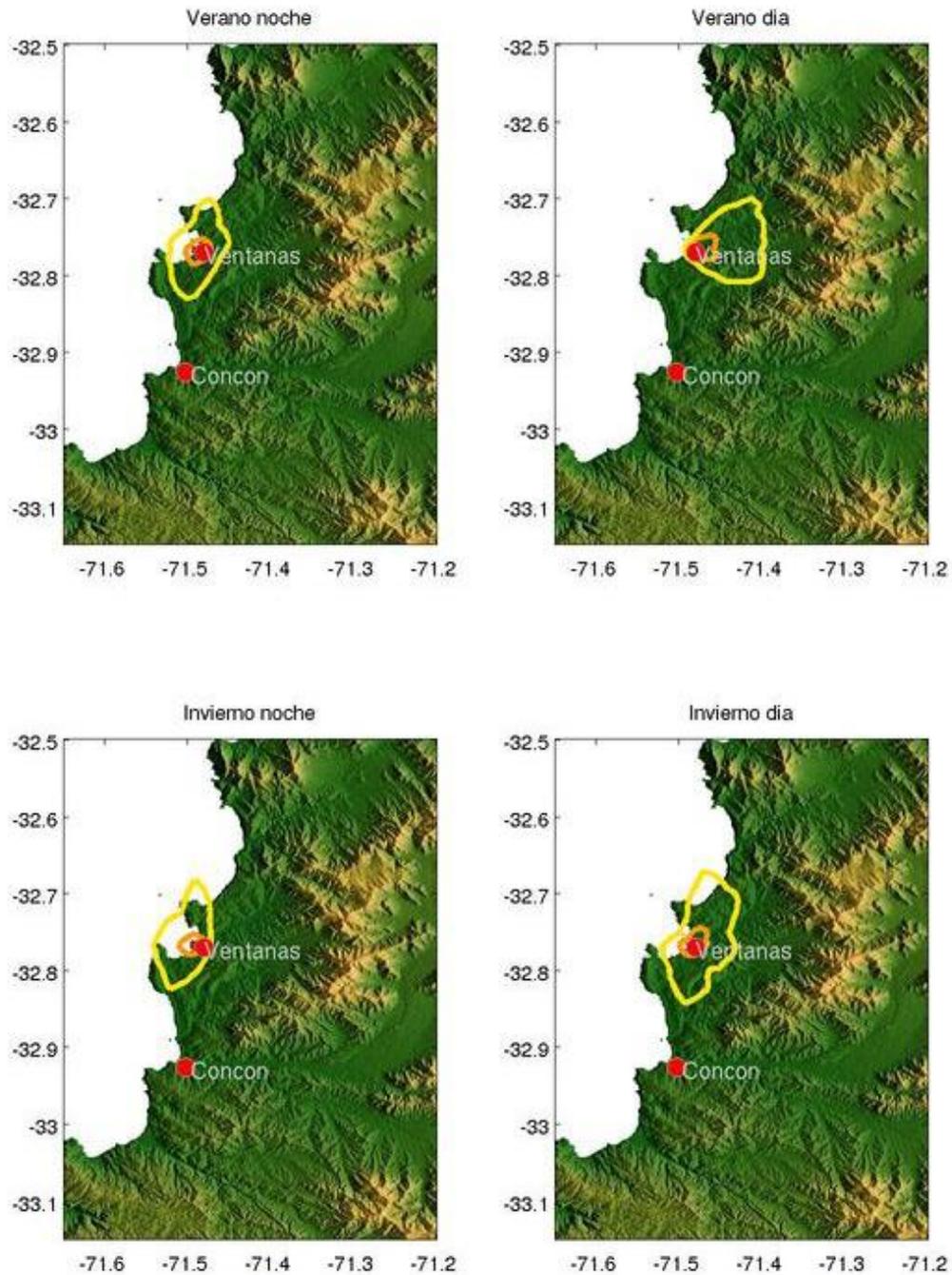


Figura 10.1: Patrones de dispersión a partir de una fuente superficial en la zona de Puchuncaví/Quintero. Se muestran contornos relativos al máximo de la concentración promedio. Las líneas rojas representan el 70% del valor máximo, las líneas naranjas el 10% y las líneas amarillas el 1% del máximo de los promedios.

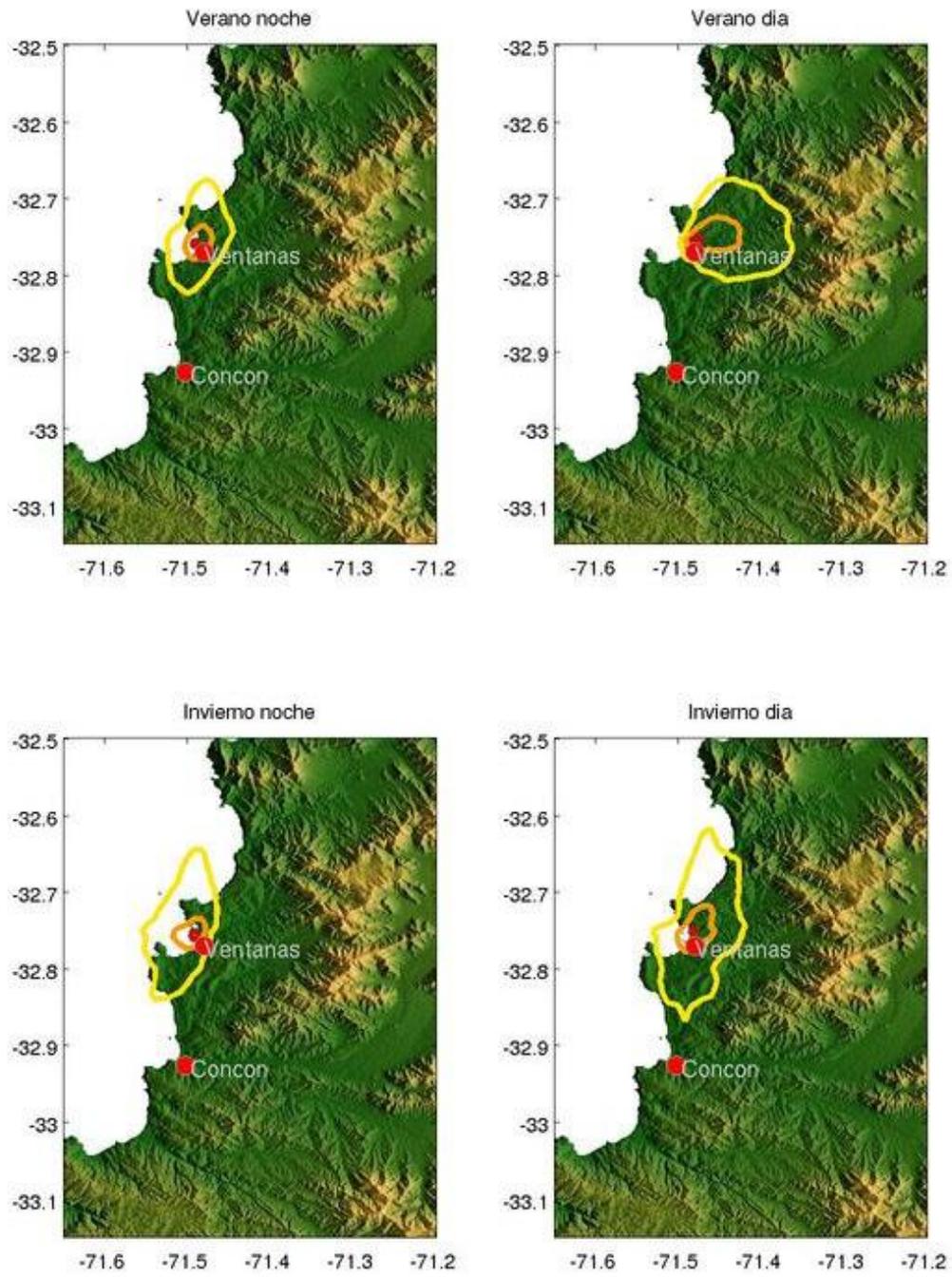


Figura 10.2: Equivalente a la figura 10.1 pero para una fuente en 45 metros de altura en la zona de Puchuncaví/Quintero.

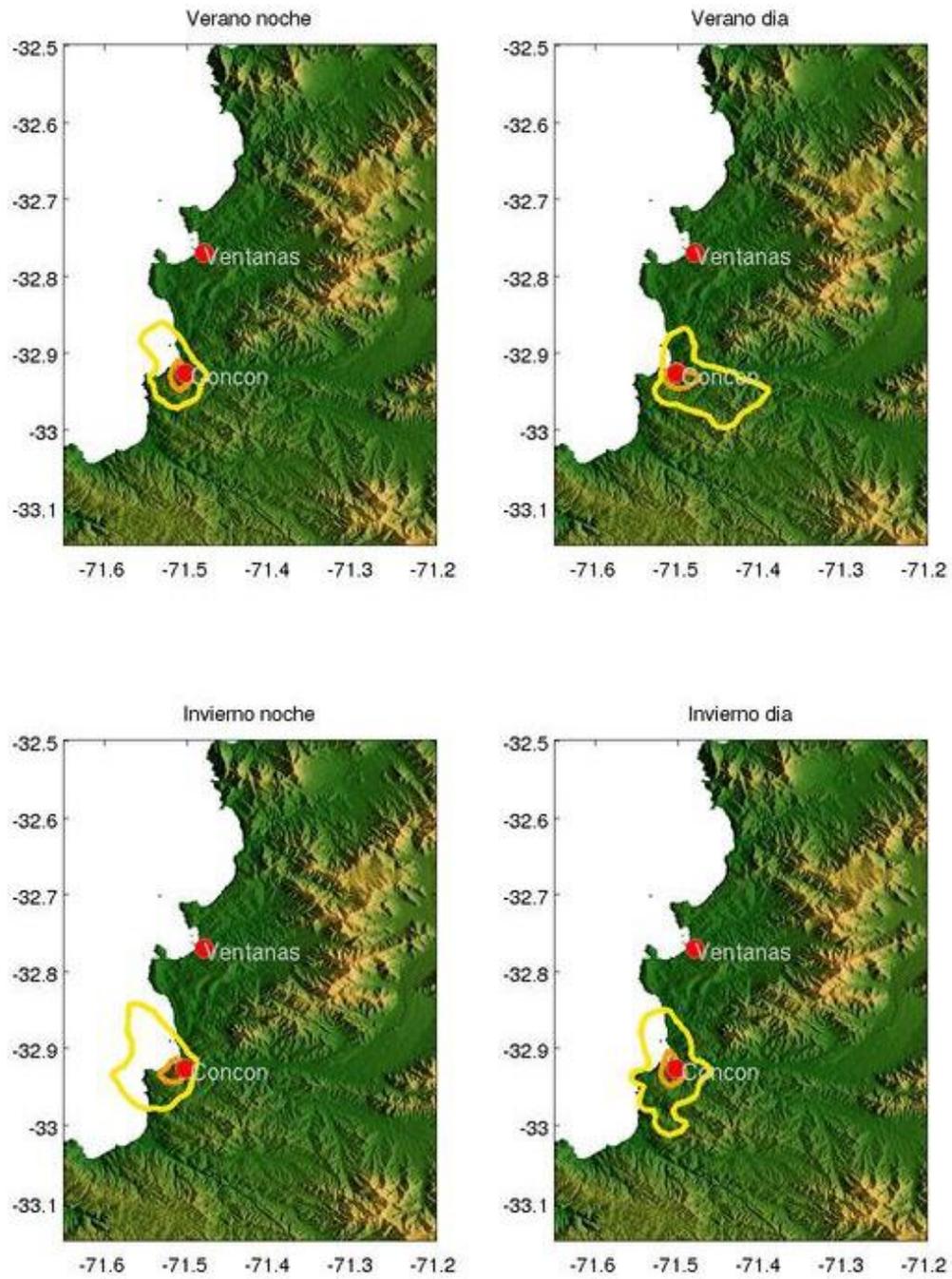


Figura 10.3: Equivalente a la figura 10.1 pero para una fuente en 45 metros de altura en la zona de Concón.

10.2 Zona Catemu

En la zona de Catemu existen dos fuentes industriales grandes: la fundición de Chagres y la central termoeléctrica Los Vientos de AES Gener. Ambas fuentes están ubicadas a unos 8 km. Esta cercanía física es causa de la inquietud si existe traslape en la extensión espacial de su respectivo impacto de contaminación atmosférica. La figura 10.4 es equivalente a la figura 10.1 en que muestra la extensión espacial del impacto relativo de ambas fuentes para los periodos diurnos y nocturnos en verano e invierno.

En general, la figura muestra que durante el día es probable que exista una cierta separación de las áreas de impacto de ambas fuentes; en verano esta separación es más evidente que en invierno. Sin embargo, durante la noche, en condiciones con vientos más débiles y una atmósfera más estable, esta separación no es tan evidente. De hecho, tanto en invierno como en verano hay un acercamiento/traslape de los contornos del 70% del máximo. Cabe enfatizar aquí que la figura 10.4 muestra las concentraciones relativas a las concentraciones máximas de la respectiva fuente. En este sentido, también es importante señalar que las emisiones por parte de la fundición Chagres tanto en SO₂ como PM10 superan por mucho aquellas de la Central Los Vientos. En este sentido. El contorno de 70% de la fuente Chagres también equivale concentraciones mayores que el contorno de 70% de la Central Los Vientos.

En términos prácticos, eso significa que si se mide en esas zonas de traslape no será posible distinguir entre impacto entre una u otra fuente. Es decir, dado que esos traslapes ocurren durante la noche, no será posible distinguir entre el impacto de una u otra fuente. Lo mismo pasa si se mide con equipos discretos; en este caso tampoco sería posible distinguir ya que esas mediciones son de 24 horas y, por lo tanto, incluyen el periodo nocturno, que, a raíz de mayor estabilidad atmosférica, además contribuyen generalmente con concentraciones mayores al promedio de 24 horas. Sólo en caso, que se cuente con mediciones en verano y durante el día sería posible separar el impacto de la fundición de Chagres y la Central los Vientos. Además, es evidente que en caso que no se opere una de las dos empresas, también el impacto durante ese periodo sólo se puede atribuir a la que se opera. En este sentido, cabe mencionar que la Central los Vientos es una central de respaldo que no funciona todos los días.

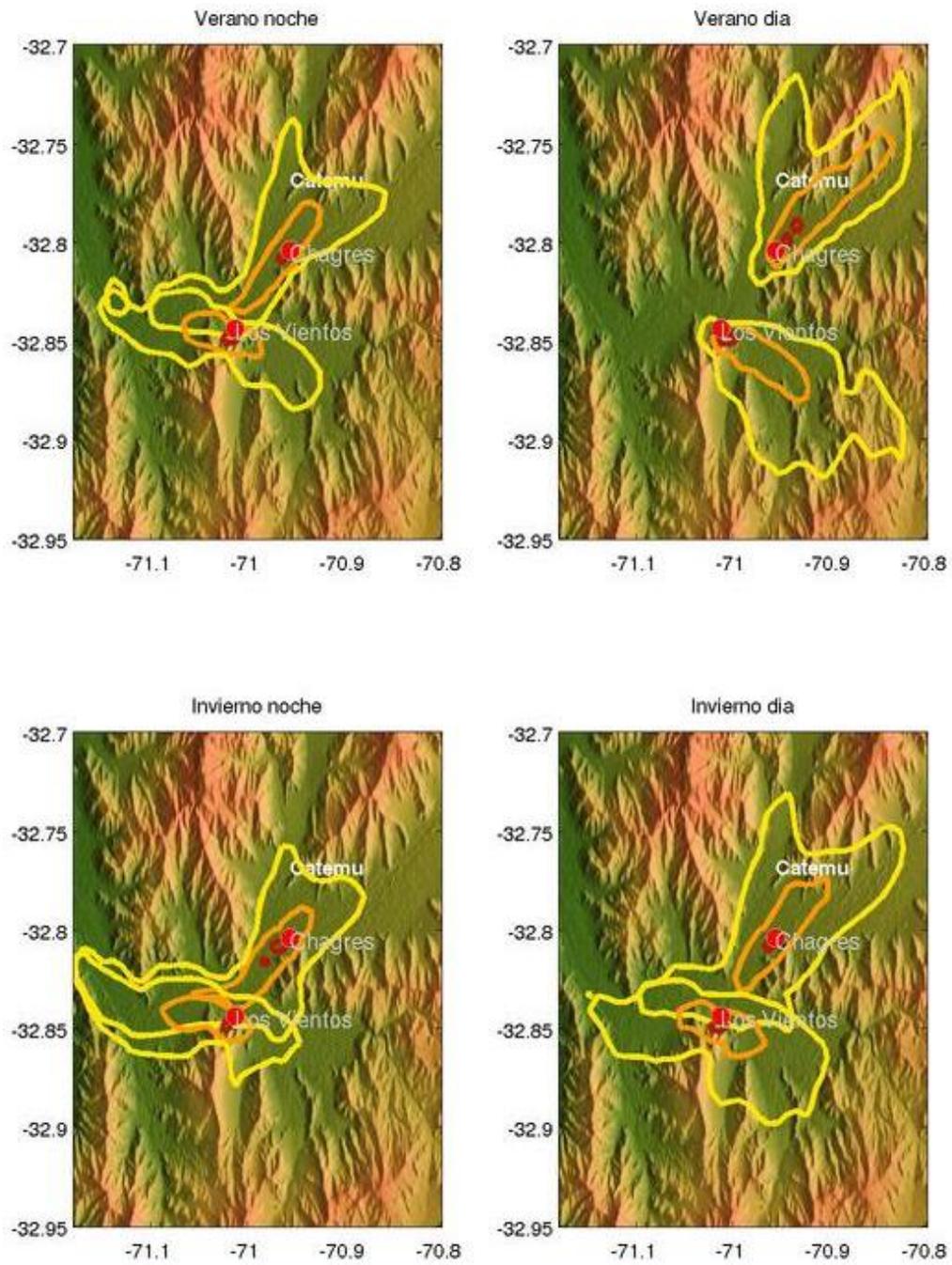


Figura 10.4: Equivalente a la figura 10.1 pero para las fuentes Fundición Chagres y Central Los Vientos.

11 Modelación Fotoquímica

En este capítulo se entregan los resultados de la modelación fotoquímica. Se considera importante recordar que la modelación es una herramienta que se debería usar con fines de una mejor interpretación de un problema o fenómeno ambiental. Esta interpretación siempre debe ser en conjunto con información basada en mediciones. La modelación sin (o con pocas) mediciones entrega información muy limitada. El consultor enfatiza esta consideración dado que, en su experiencia, la confianza y la expectativa en los resultados por parte de los usuarios de la información son demasiado altas y, en muchos casos, no se contemplan las limitaciones de la modelación.

La contribución de la modelación en este estudio es la siguiente:

- 1) Evaluación de inventario de emisiones
- 2) Identificación de masas de aire en la Región de Valparaíso a través de la caracterización del transporte de contaminantes primarios.
- 3) Caracterización de la formación y transporte de contaminantes secundarios enfocado en el ozono.
- 4) Caracterización de la distribución espacial del material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀) en la Región de Valparaíso.

En lo que sigue se trata cada uno de estos puntos por separado. También en forma separada y dentro de cada sección, se entregarán los datos observados usados en la respectiva sección.

El modelo usado es el modelo WRF-Chem descrito en la sección 5. Los módulos químicos aplicados son el RADM2 para la fase gaseosa y MADE/SORGAM para los aerosoles. Los TdR habían contemplado una resolución horizontal de 1 km. El cálculo para esta resolución y con toda la química incluida requiere computadores de muy alto desempeño a los que el consultor tiene a su disposición. Aún con estos computadores, el consultor había contemplado 11 meses de cálculo para este estudio. Debido a la entrega tardía de los inventarios de emisiones el tiempo disponible era mucho menos lo que obligaba a bajar la resolución horizontal a 3km. A juicio del consultor, esta resolución permite también el análisis necesario; no se considera que las limitaciones de la modelación, tal como se señalan en las siguientes secciones, se basan en razones de la resolución horizontal. Se simuló dos periodos: verano (enero, febrero, marzo) e invierno (julio, agosto, septiembre), ambos del año 2010. Nuevamente, por restricciones de tiempo no era posible cubrir un periodo más largo. Pero también en este caso, se considera que un periodo más largo no habría contribuido a resultados (y conclusiones) distintos.

El dominio usado para todos los análisis se muestra en la figura 11.1. Se puede identificar la topografía usada en las simulaciones. También se indican las ciudades y los bordes regionales e internacionales. Para una mejor ubicación se entregan los nombres de algunas ciudades. Se puede ver que el dominio contempla aparte de la Región de Valparaíso también la Región Metropolitana. En las secciones siguientes se muestra que en algunos problemas ambientales atmosféricos en la

Región de Valparaíso se debe también considerar la Región Metropolitana ya que tienen características inter-regionales.

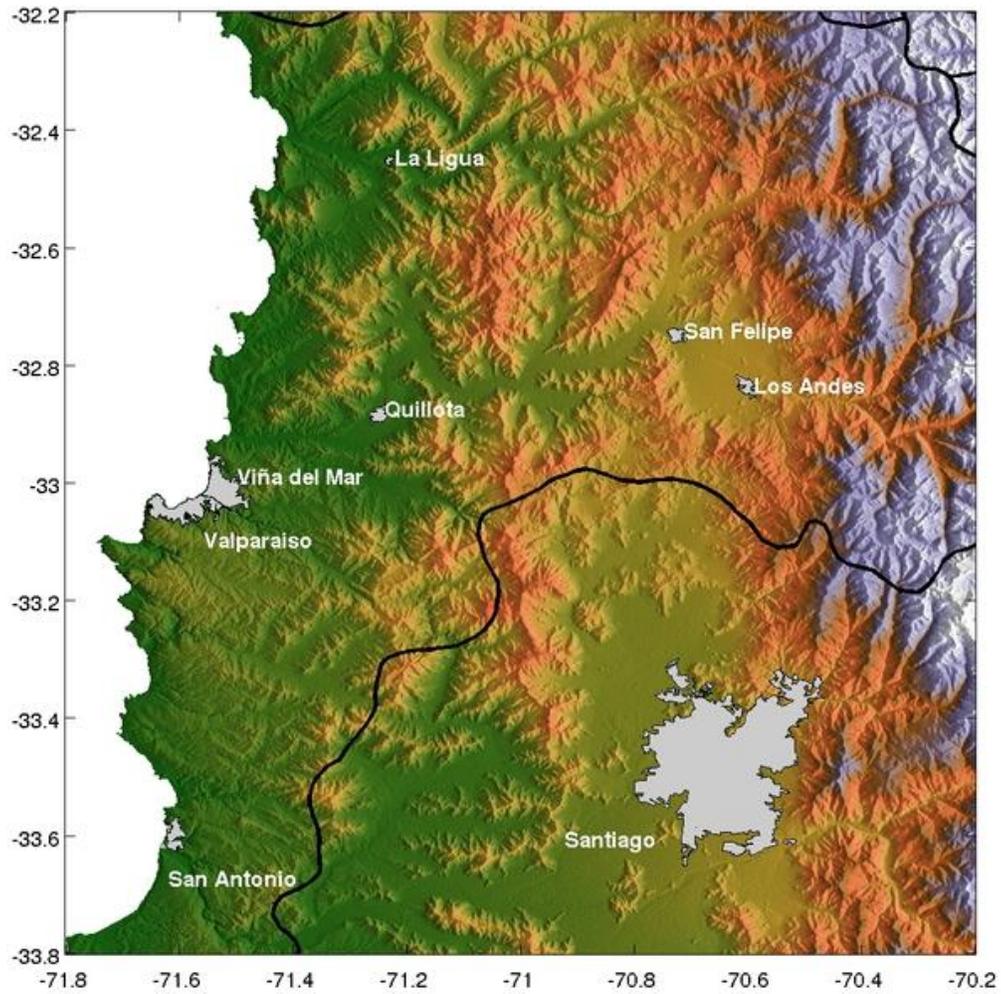


Figura 11.1: Dominio de modelación. Se indican para una mejor ubicación algunas ciudades y los bordes regionales e internacionales. Se incluyó a la modelación –aparte de la Región de Valparaíso- la Región Metropolitana.

11.1 Evaluación de inventarios de emisiones

Es un hecho que los inventarios de emisiones se basan generalmente en estimaciones y en menor grado en mediciones exactas. Es justamente por este hecho también que los inventarios de emisiones deben ser considerados como una aproximación a la realidad. Es una característica de todos los inventarios a nivel mundial. Dado que los modelos fotoquímicos ocupan los inventarios de emisiones como condición de borde (en superficie) para su componente química es evidente que el desempeño de un modelo depende fundamentalmente de la calidad de estos inventarios. Los informes Schmitz y Falvey, 2006, Schmitz y Falvey, 2007, Schmitz *et al.*, 2007 y Schmitz *et al.*, 2010 (referencias de la sección 5) han enfatizado este problema. Además, los informes han demostrado las características deficientes en ese entonces de los inventarios para las Regiones de Valparaíso, Metropolitana y Bernardo O'Higgins. En cada uno de los estudios se mostró la manera en que los inventarios se modificaron para poder utilizarlos en la modelación. Aparte de detalles técnicos (principalmente formatos), unos de los problemas fundamentales siempre fue la estimación de las emisiones de NOx y de los compuestos orgánicos volátiles (COVs). Ambos son precursores fundamentales para el ozono. Tanto la magnitud de estas emisiones como la razón entre ellas determinan el potencial de producir ozono. Hubo casos en los estudios mencionados en los cuales se tuvieron que modificar las emisiones hasta por órdenes de magnitud para que el modelo entregara resultados razonables (razonables en términos de ozono).

Ya se había mencionado anteriormente que paralelo a este estudio se llevaron a cabo dos estudios más, uno a cargo de mediciones y el otro justamente con fines de la elaboración de un inventario de emisiones actualizado. También existe constancia que este estudio se atrasó ya que el inventario de emisiones no estaba disponible hasta el final de sus respectivo estudio. En este sentido, se recomienda evitar ejecutar estudios de modelación exactamente al mismo tiempo que los estudios de los inventarios de emisiones. Por el otro lado, cabe enfatizar que el consultor nunca antes en Chile había recibido información sobre emisiones de tan alta calidad como en este caso. En términos de resolución espacial como temporal, desagregación por tipo de fuente y especiación química el inventario de emisiones para la Región de Valparaíso es único a nivel país y cumple con todos los requisitos para la modelación fotoquímica. Además, todos los resultados entregados en las siguientes secciones se han logrado sin modificaciones en los emisiones. Es evidente que parte de los errores que tienen los resultados mostrados tienen su origen en los inventarios de emisiones. En cada sección se discutirá sobre el rol de estos posibles errores en los inventarios. Sin embargo y como reflexión final en este lugar, se puede decir que el inventario de emisiones se puede considerar –desde un punto de vista de la modelación fotoquímica- de un muy buen nivel lo que está reflejado también en las secciones siguientes. (Se entrega una reflexión aparte sobre el inventario de emisiones del material particulado en la sección 11.4.)

11.2 Identificación de masas de aire en la Región de Valparaíso a través de la caracterización del transporte de contaminantes primarios

En la sección 10 de este informe, se entregó una caracterización a partir de algunos puntos en la Región de Valparaíso. El objetivo de esta sección a su vez es caracterizar los flujos (masas de aire) dentro de toda la Región. Para esta caracterización se requiere –aparte de la información meteorológica- algún trazador que es representativo para la dispersión de contaminantes. Este trazador debería ser representativo para los distintos tipos de fuentes emisoras y –en primera aproximación- un contaminante primario. El contaminante que cumple con estas características son los NO_x (NO + NO₂). Los NO_x son emitidos tanto por fuentes industriales como móviles. Generalmente, las emisiones de procesos de combustión emiten en un 90% NO y un 10% NO₂. A partir de las reacciones fotoquímicas se convierte NO a NO₂. Mientras el NO₂ a su vez se puede transformar a HNO₃ (a través de su reacción con el OH), con los fines de esta sección esta última reacción se puede considerar irrelevante; por lo tanto, se puede suponer –en primera aproximación- la conservación de NO_x a lo largo de su transporte por dispersión.

El objetivo en esta sección es usar los NO_x para caracterizar la dispersión en el dominio de la modelación. En segundo lugar, también indica los patrones espaciales justamente de los NO_x. Sin embargo, existen escasas mediciones de NO_x en la Región de Valparaíso. La figura 11.2 muestra las tres estaciones en la Región de Valparaíso que disponn de mediciones de NO_x. Además, se usaron también datos de la estación Colina (datos CENMA) desde la Región Metropolitana. La tabla 11.1 indica los periodos de cada una de las series de tiempo disponibles y la completitud de esas series.

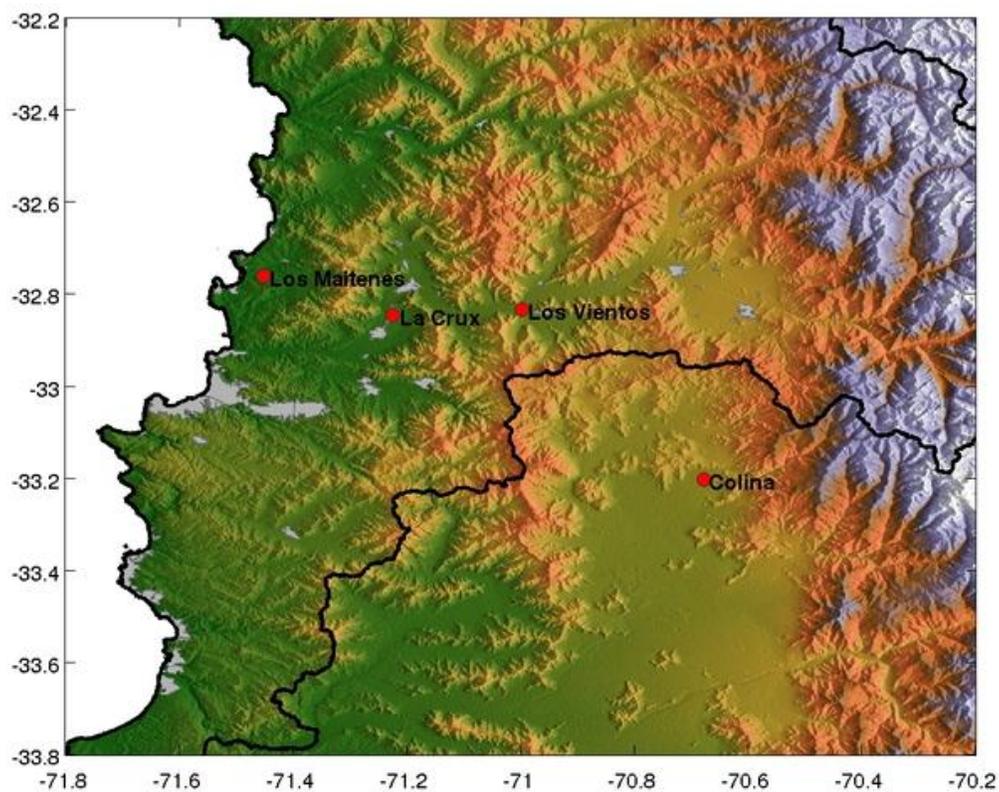


Figura 11.2: Estaciones de monitoreo con información de NOx.

Estación	Periodo	Compleitud (%)
Los Maitenes	Diciembre 2009 – Diciembre 2010	77
La Cruz	Diciembre 2007 – Diciembre 2008	99
Los Vientos	Enero 2007 – Marzo 2010	91
Colina	Enero – Febrero 2009	82

Tabla 11.1: Estaciones con mediciones de NOx usados en este estudio. Se indican los periodos de los series de tiempo disponibles y la completitud de datos.

Es evidente que la información observacional de NOx en la región es muy escasa tanto en términos de números de estaciones como en cobertura temporal. Las figuras 11.3 – 11.6 usan esta información observacional para compararla con las series de tiempo de WRF.

11.2.1 Validación de los NOx

Dada la escasa información disponible y el objetivo de esta sección, se comparan en las figuras 11.3 – 11.6 las “climatologías” de los datos, es decir siempre se considera la totalidad de los datos. En cada figura se entregan los ciclos diarios promedios (líneas azules) y su variabilidad (sombra celeste) según el modelo WRF (panel arriba) y según observaciones (panel abajo). Es importante recordar que los NOx se pueden considerar –en una primera aproximación- como un contaminante primario. En la sección 11.4 se va a entrar en más detalle al problema de la modelación de los contaminantes primarios. En este apartado sólo se indica que a pesar de las diferencias entre las observaciones y las simulaciones, estas diferencias no limitan el análisis de la dispersión. Lo que sí se puede decir también en este lugar es que el modelo subestima mucho las concentraciones de NOx en las estaciones La Cruz y Los Vientos, es decir en las dos estaciones del Valle Aconcagua.

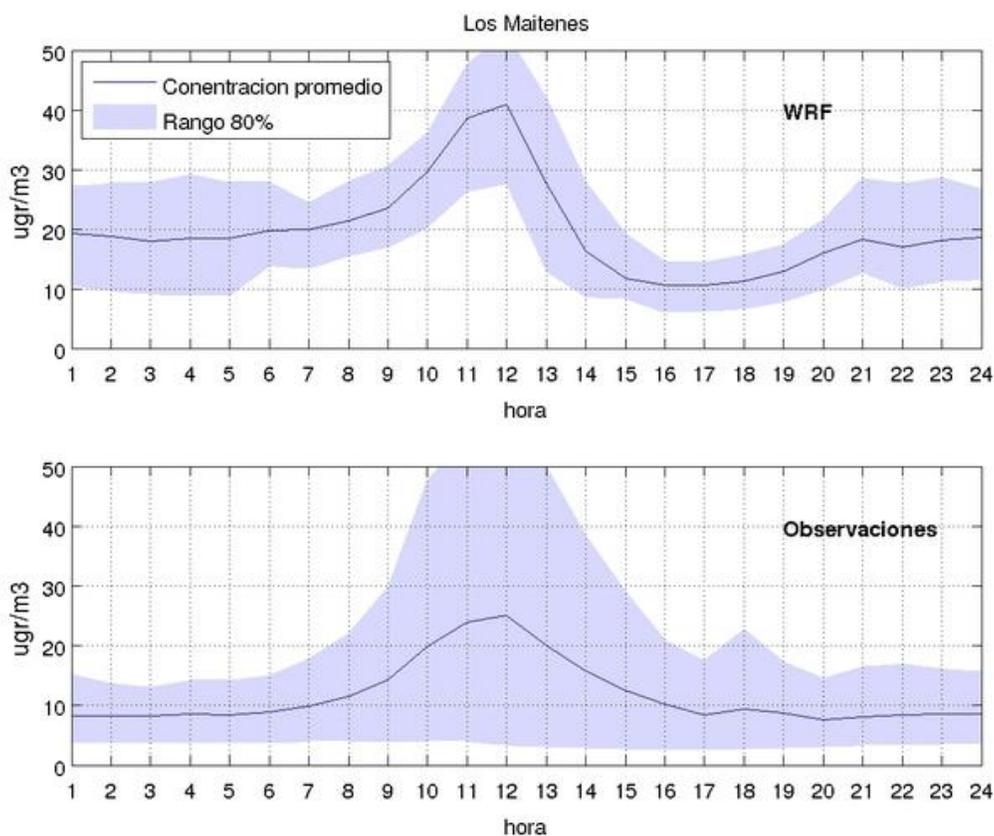


Figura 11.3: Comparación entre concentraciones de WRF (panel superior) y observaciones (panel inferior). Se indican los ciclos promedios (líneas azules) y su variabilidad a través de las sombras celestes que contienen el 90% de los datos. Cabe señalar que los periodos de los datos no coinciden; así que se busca comparar comportamientos generales. En este caso de la estación Los Maitenes, el modelo sobreestima el promedio pero logra simular bastante bien el ciclo diario. La variabilidad de las observaciones también es mayor que la del modelo.

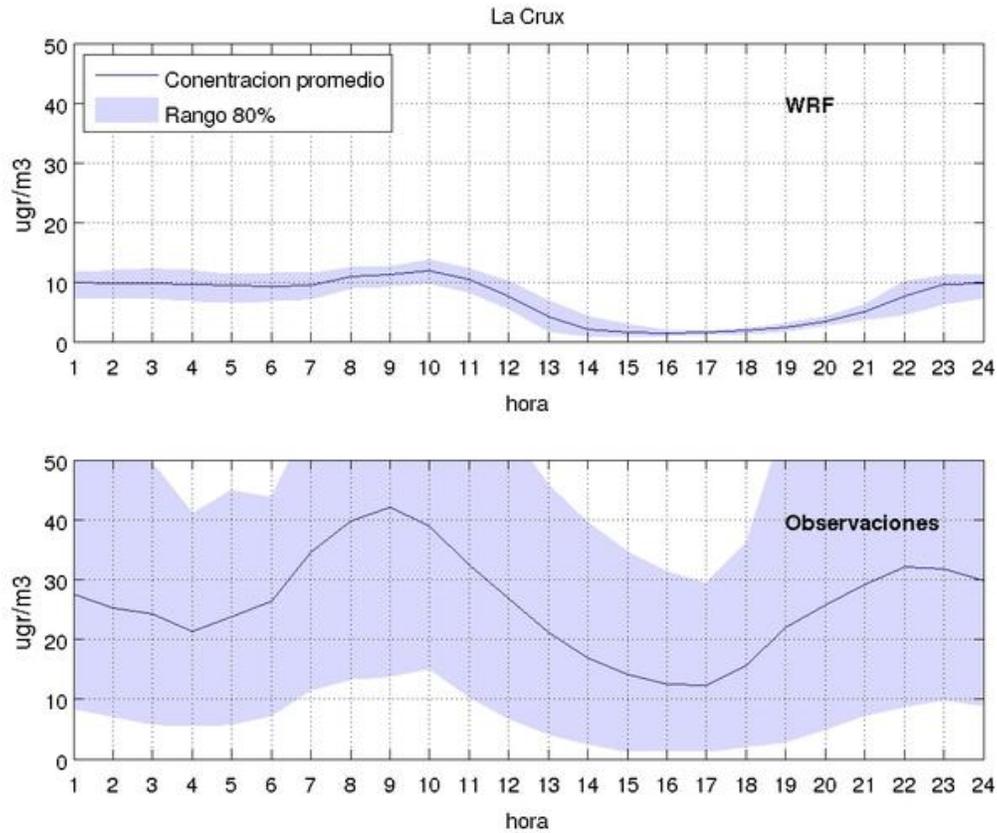


Figura 11.4: Equivalente a figura 11.3 pero para la estación La Cruz. En este caso, WRF nuevamente logra simular el algo del ciclo diario con concentraciones más altas durante la noche y más bajas durante el día. Sin embargo, WRF subestima la magnitud de las concentraciones y su variabilidad.

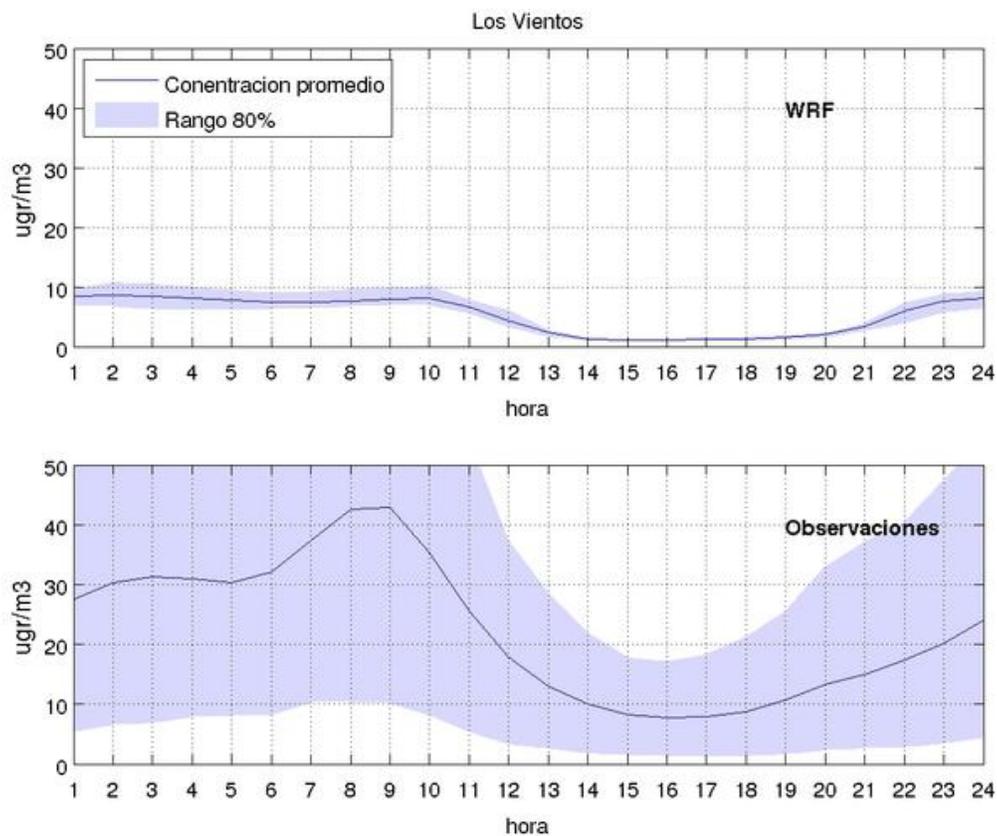


Figura 11.5: Equivalente a figura 11.3 pero para la estación Los Vientos. En este caso, WRF logra simular algo del ciclo diario con concentraciones más altas durante la noche y más bajas durante el día. Sin embargo, WRF subestima fuertemente la magnitud de las concentraciones y su variabilidad.

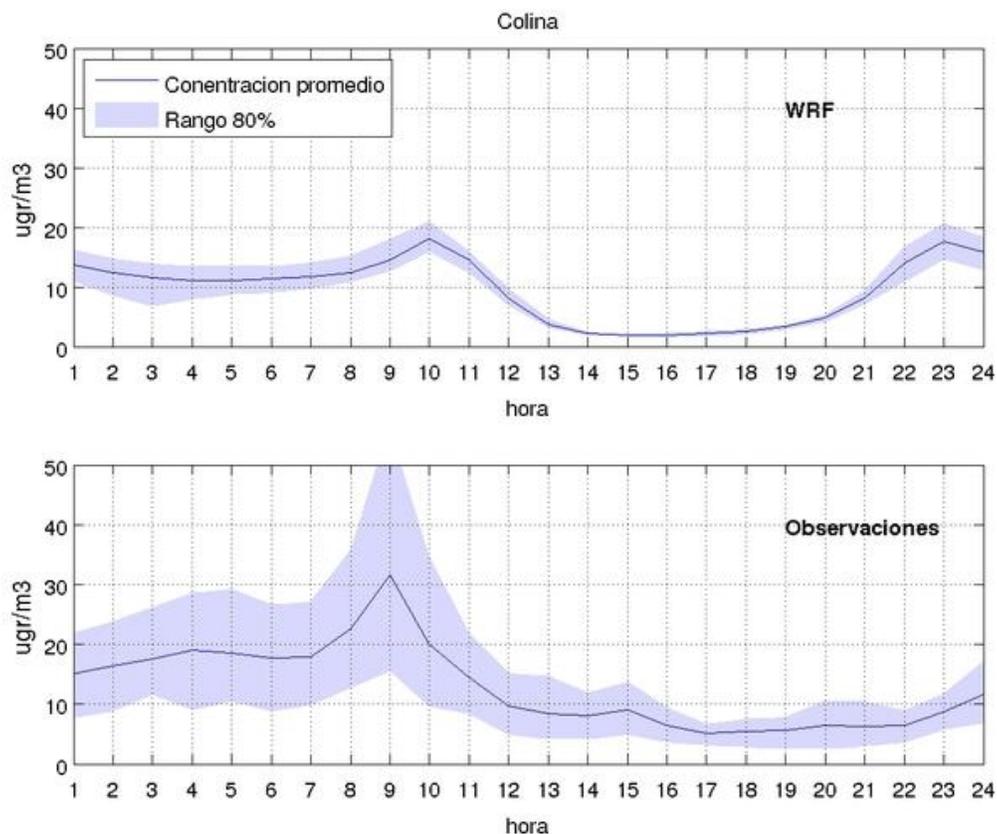


Figura 11.6: Equivalente a figura 11.3 pero para la estación Colina. En este caso, se considera un buen desempeño del modelo tanto en simular el ciclo diario como la magnitud.

11.2.2 Caracterización de los flujos de masas de aire

La caracterización de los flujos de masas de aire tiene como objetivo identificar el transporte de contaminantes dentro de la Región de Valparaíso, pero también el transporte inter-regional, es decir entre la Región de Valparaíso y la Región Metropolitana. Las figuras 11.7 – 11.10 caracterizan esos flujos para los meses de verano y las figuras 11.11 – 11.14 para los meses de invierno. Para este fin, se tomaron los promedios de las variables para los respectivos periodos de simulación. Cada figura contiene la topografía como fondo. Además, se indican algunas ciudades de las Regiones Valparaíso y Metropolitana lo que ayuda ubicarse geográficamente. Las flechas representan los vientos del primer nivel del modelo (aprox. 15 metros de altura) según el modelo WRF; con fines de no sobrecargar las figuras con flechas, sólo se grafican las flechas cada tres puntos de grilla. Finalmente, los contornos representan las concentraciones de NO_x según el modelo WRF (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Dado que el interés principal en este análisis es la caracterización de los flujos en distintos momentos del día (y del año), NO se mantienen fijos los colores para las

concentraciones, sino se ajustan al rango de cada gráfico. Se entregan cuatro gráficos por día y periodo (cada seis horas). Los gráficos cada dos horas se encuentran en el Anexo IV

Las primeras cuatro figuras (11.7 – 11.10) indican los flujos durante el periodo veraniego a las horas 06:00, 12:00, 18:00 y 00:00 (o 24:00). La secuencia entrega mucha información interesante. En primer lugar, es evidente que las concentraciones de un contaminante primario son máximas en el lugar de su emisión. En este sentido, se puede observar las concentraciones mayores en las zonas urbanas, pero también en el complejo industrial Las Ventanas. Efectivamente, las ciudades de Valparaíso/Viña del Mar y el mencionado complejo industrial muestran las concentraciones mayores de NO_x en las simulaciones (cabe recordar la subestimación del modelo en las estaciones La Cruz y Los Vientos). Los gráficos también ponen estas concentraciones en el contexto de la ciudad de Santiago de la Región Metropolitana. Mientras la magnitud de las concentraciones es similar, la extensión geográfica de concentraciones elevadas en el caso de Santiago es mayor. Sin embargo, también se puede observar que las concentraciones en Santiago son mayores durante la noche (figuras 11.7 y 11.10), durante el día la situación es al revés y las concentraciones en Valparaíso/Viña del Mar y Quintero/Ventanas son mayores. Una posible explicación para este fenómeno es que la capa límite continental (en Santiago) crece más durante el día logrando una mayor dispersión de los contaminantes mientras la capa límite en la costa de la Región de Valparaíso es del tipo marino que típicamente varía menos y no crece tanto durante el día como la continental.

En términos de flujos, es evidente que existe un transporte durante el día desde la costa hacia el continente (figuras 11.8 y 11.9). En el caso de la zona sur de la Región de Valparaíso (alrededor de San Antonio), los flujos son desde la costa hacia la cuenca de Santiago. Desde los centros con mayores emisiones (Valparaíso/Viña del Mar y Quintero) el flujo es hacia la cuenca de Los Andes. A este flujo se superpone, además, un flujo desde la Cuenca de Santiago hacia la cuenca de Los Andes. Particularmente en la figura 11.9 es evidente que en la cuenca de Los Andes confluyen las masas de aire desde la costa de la región de Valparaíso y de la cuenca de Santiago. Al mismo tiempo y en la misma figura, también se puede observar que en términos de contaminantes primarios la contribución de los grandes “centros emisores” no es muy alta lo que demuestra nuevamente la eficiencia del proceso de la dispersión.

Durante la noche (figuras 11.7 y 11.10), los vientos son muy débiles y el transporte tanto a nivel intra- como inter-regional es muy limitado.

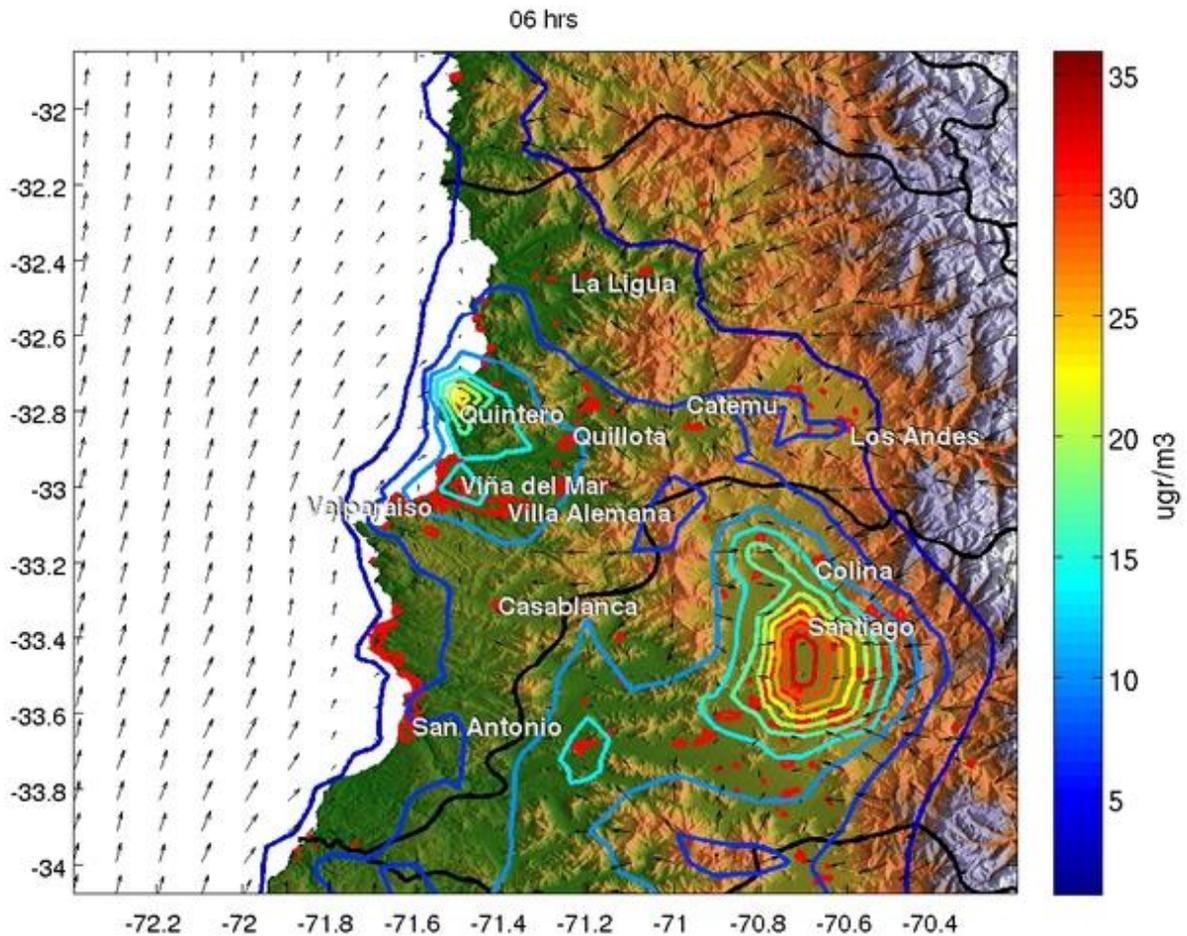


Figura 11.7: Promedio de concentraciones de NO_x a las 06:00 durante los meses enero-marzo 2010 según el modelo WRF. Se muestra la topografía como fondo y se indican algunas ciudades de las Regiones Valparaíso y Metropolitana. Las flechas representan los vientos del primer nivel del modelo (aprox. 15 metros de altura) según el modelo WRF. Los contornos representan las concentraciones de NO_x según el modelo WRF (en µg/m³). Se observan vientos débiles a esta hora con poco transporte de contaminantes.

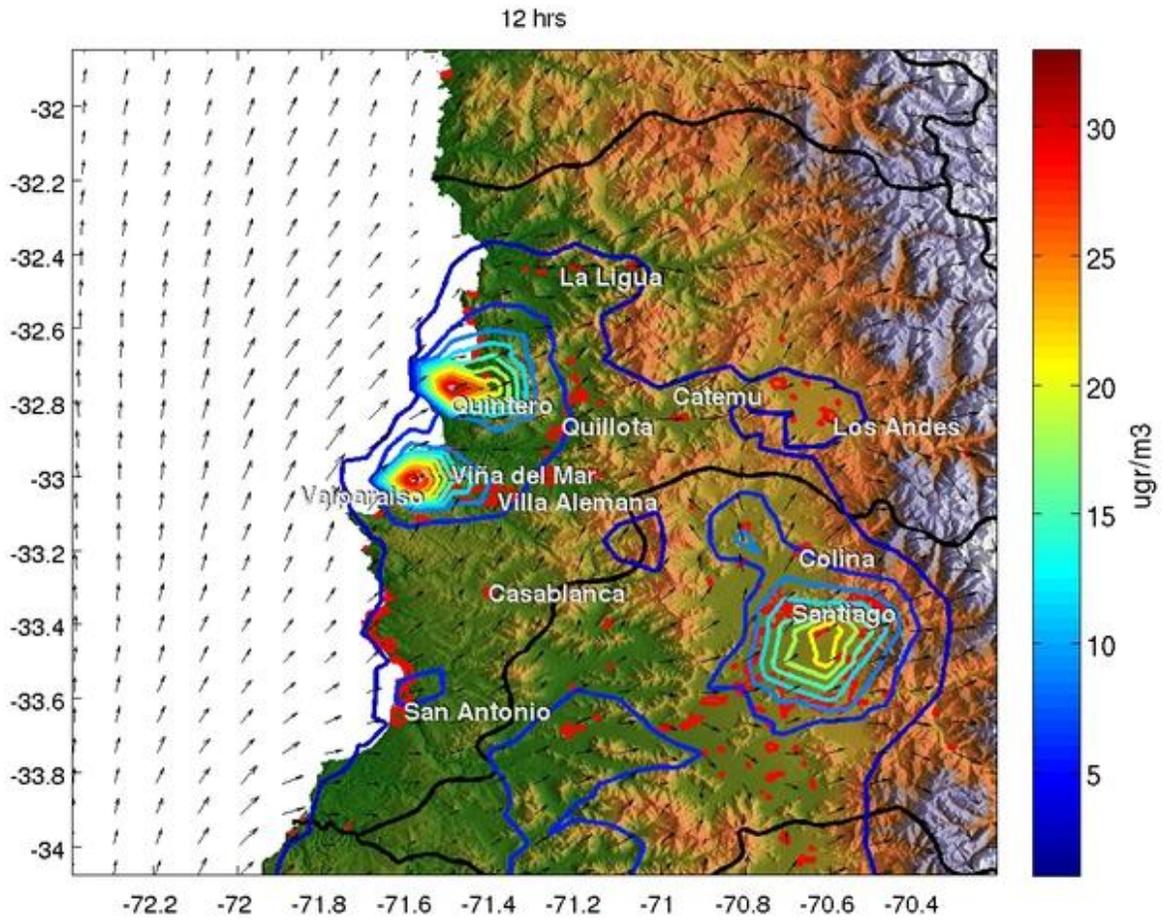


Figura 11.8: Promedio de concentraciones de NOx a las 12:00 durante los meses enero-marzo 2010. Se puede observar el comienzo de las brisas valle/montaña y mar/tierra. Aún así el transporte de contaminantes todavía no está muy desarrollado.

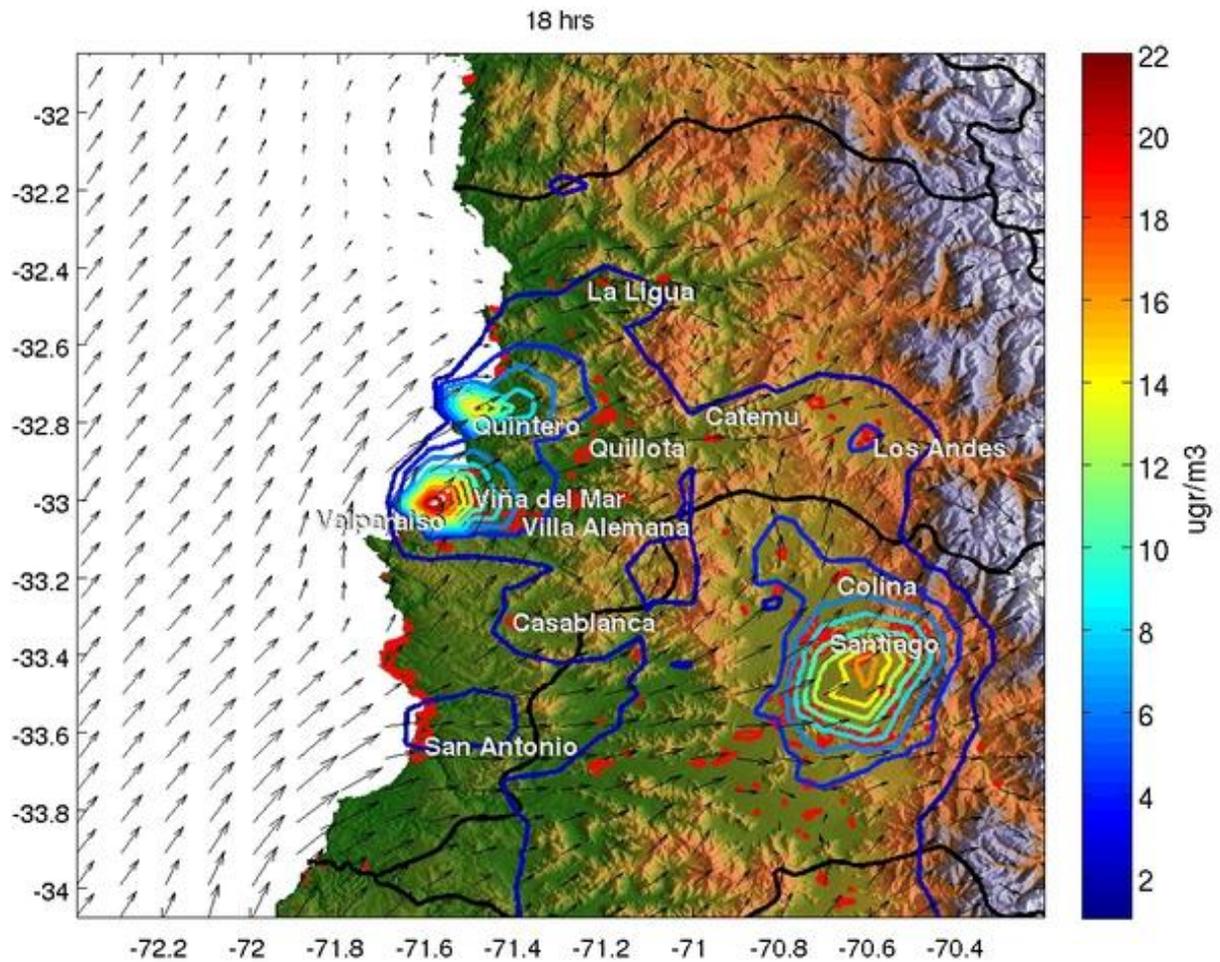


Figura 11.9: Promedio de concentraciones de NOx a las 18:00 durante los meses enero-marzo 2010. A esta hora todas las brisas están bien desarrolladas. Se observa transporte de contaminantes desde la zona de San Antonio hacia la Región Metropolitana, desde Valparaíso/Viña del Mar a lo largo del valle Aconcagua hacia la cuenca de Los Andes y desde la cuenca de Santiago hacia la cuenca de Los Andes..

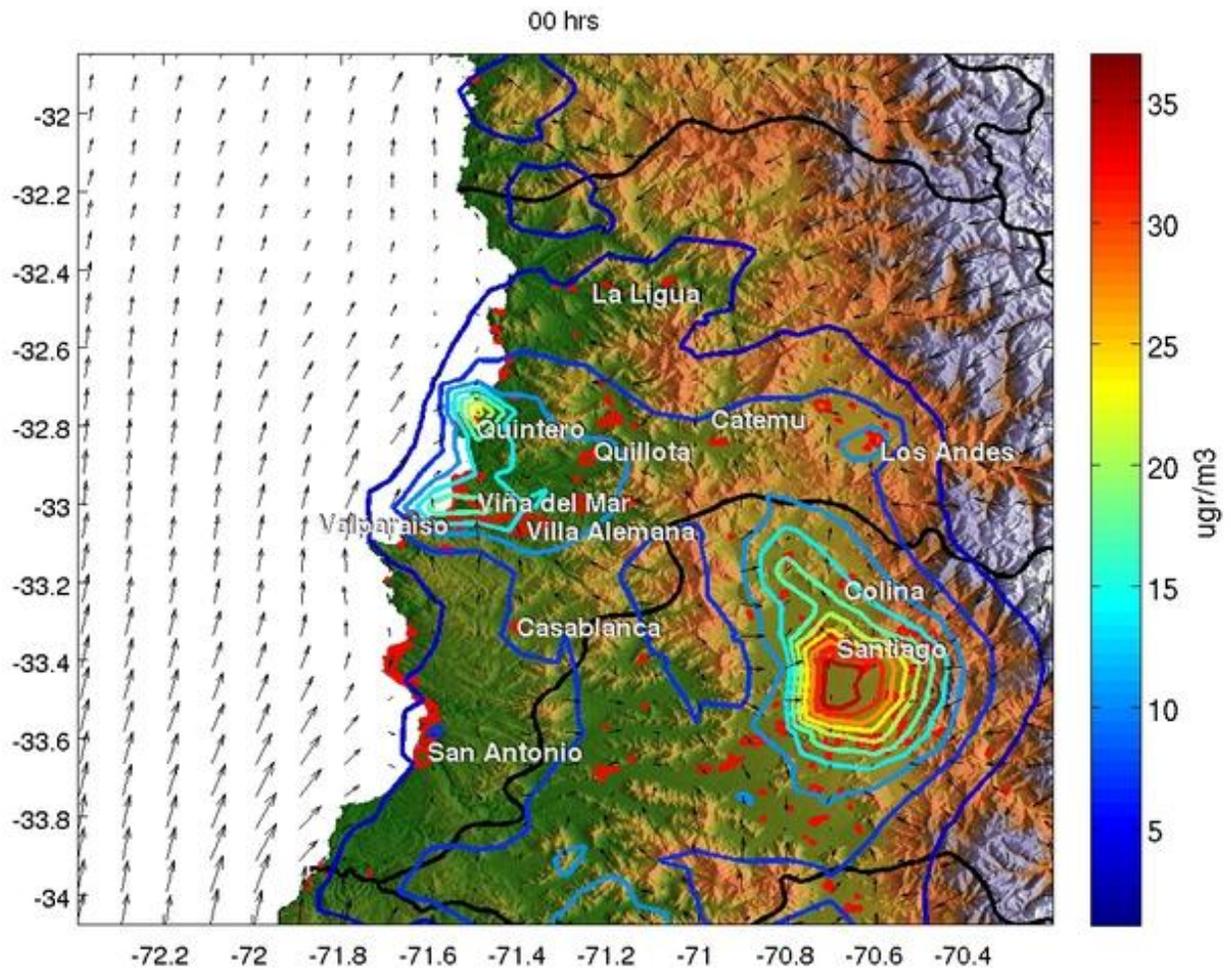


Figura 11.10: Promedio de concentraciones de NO_x a las 00:00 durante los meses enero-marzo 2010. Después de la salida del sol, se debilitan los flujos nuevamente y el impacto de las emisiones es principalmente de carácter local.

Las figuras 11.11 – 11.14 son equivalentes a las figuras 11.7 – 11.10, con la diferencia que muestran la secuencia para el periodo de invierno. También en este caso, se pueden observar las concentraciones mayores en los lugares de su emisión. A diferencia del periodo de verano, los flujos son mucho más débiles (principalmente durante el día). Estos flujos más débiles se pueden observar muy bien a las 12:00 y 18:00 hrs (figuras 11.12 y 11.13, respectivamente); a ambas horas los contornos alrededor de los centros urbanos son aproximadamente circulares alrededor de estos. Incluso las ciudades de San Antonio, Casablanca y Los Andes muestran estos contornos cerrados y casi circulares. Es decir, en situaciones con vientos débiles (periodo de invierno y también noches de verano) el fenómeno del transporte es muy restringido y los problemas de calidad del aire son más bien de carácter local.

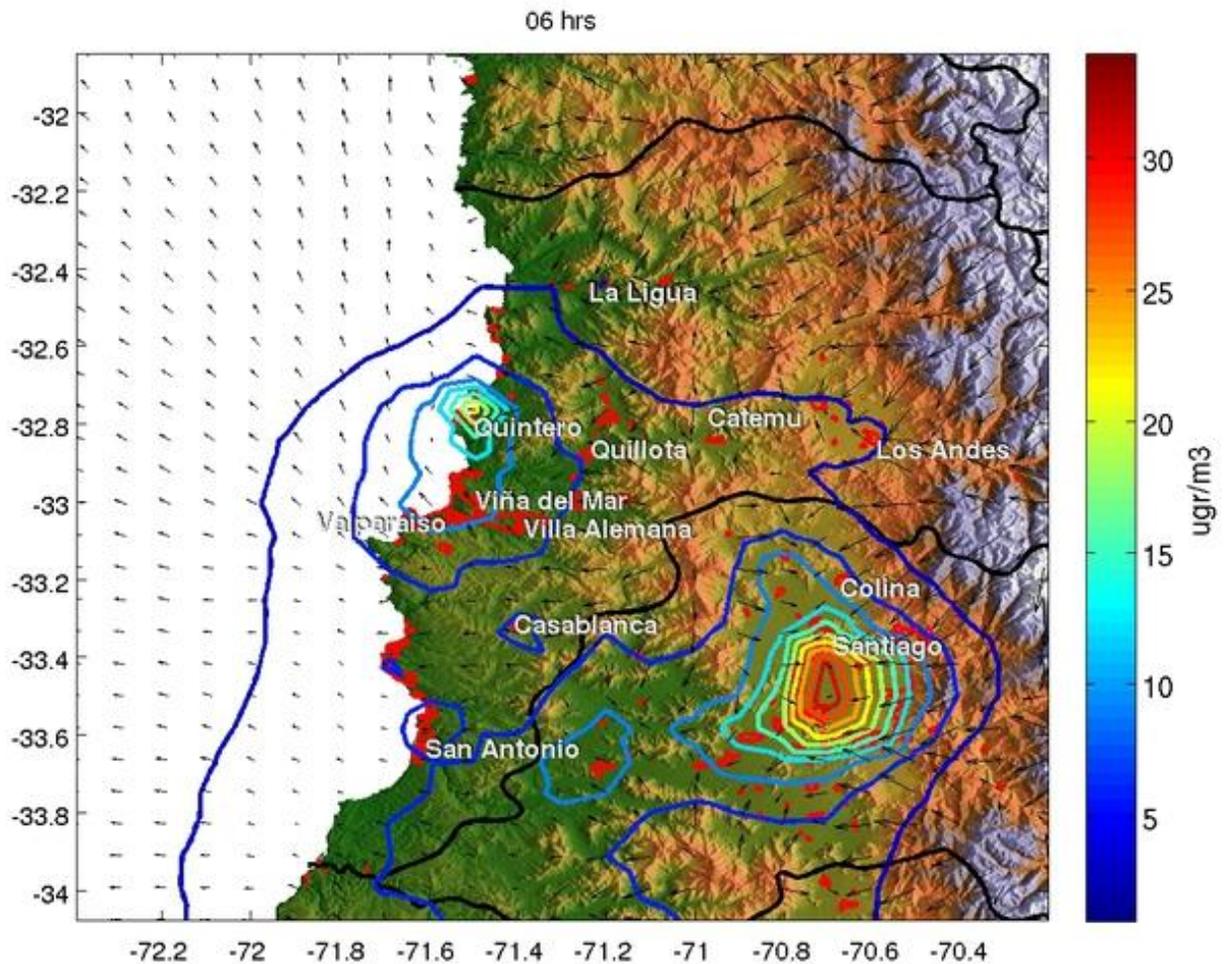


Figura 11.11: Promedio de concentraciones de NOx a las 06:00 durante los meses julio-septiembre 2010 según el modelo WRF. A esta hora las diferencias con el caso de verano son pequeñas.

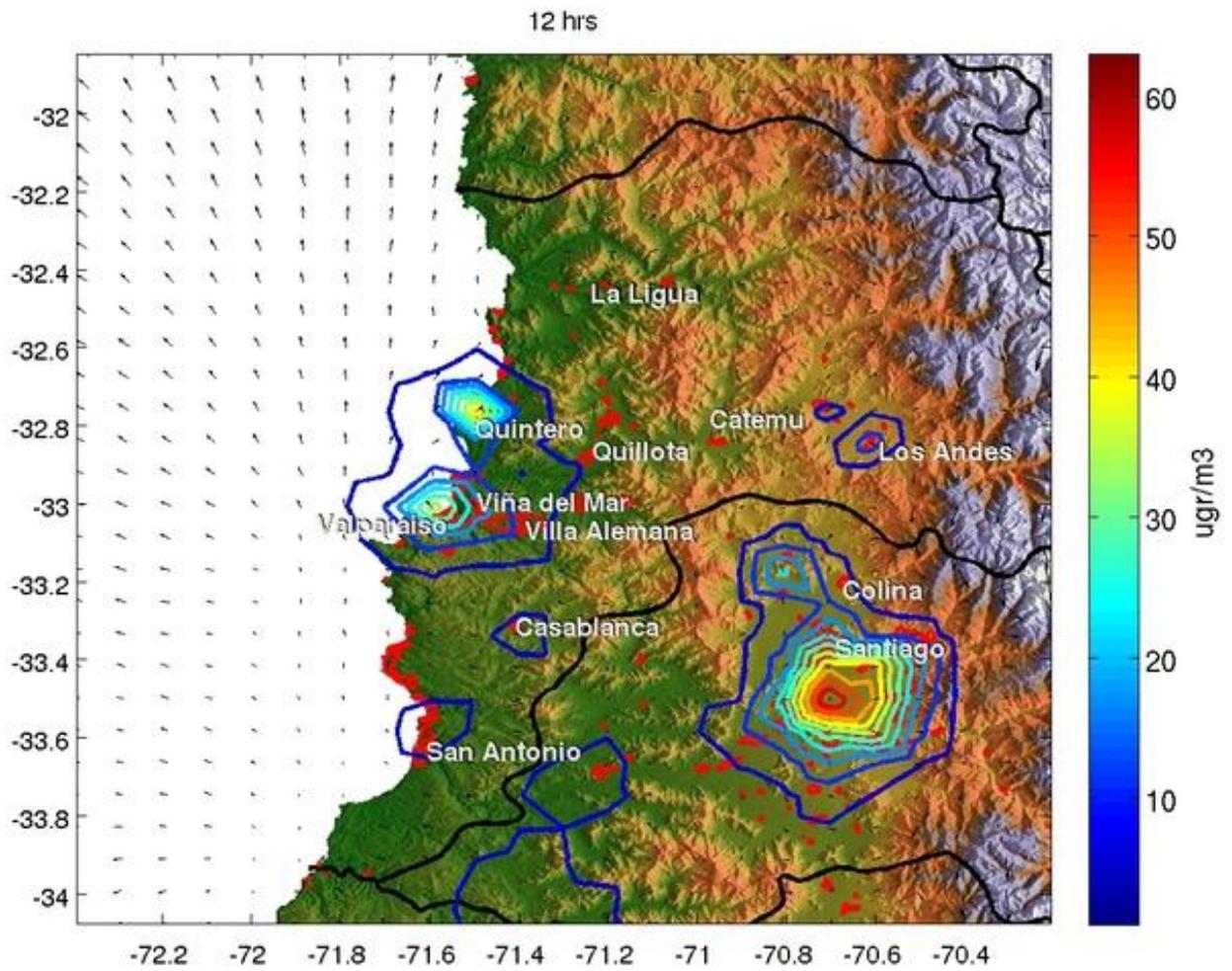


Figura 11.12: Promedio de concentraciones de NOx a las 12:00 durante los meses julio-septiembre 2010. A esta hora, se observan vientos mucho más débiles que durante la época de verano. El transporte limitado y el impacto local de las emisiones se indica a través de los contornos cerrados, casi circulares alrededor de los centros urbanos/industriales.

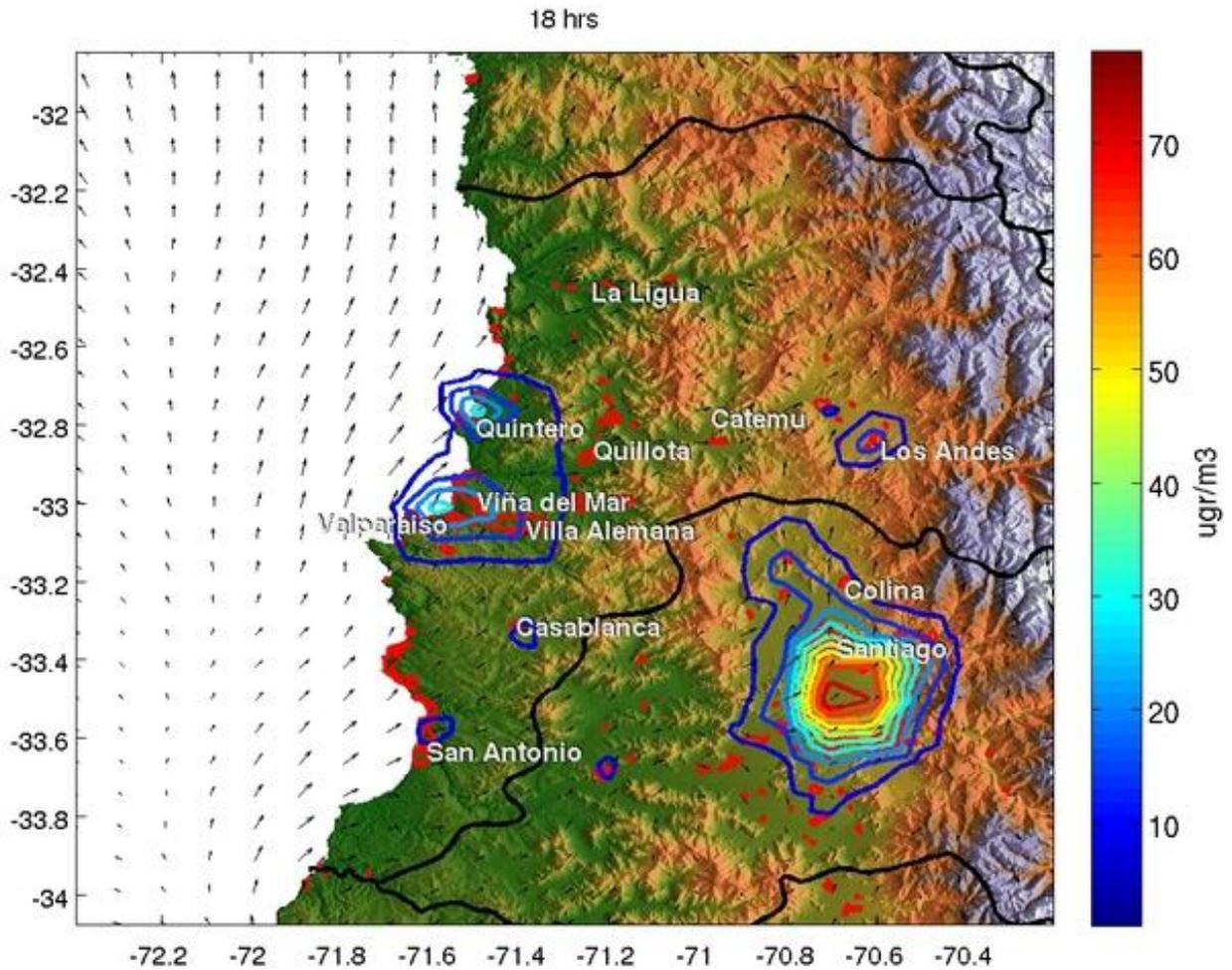


Figura 11.13: Promedio de concentraciones de NOx a las 18:00 durante los meses julio-septiembre 2010. A contrario de esta hora en verano, en este caso no se observan las brisas valle/montaña y mar/tierra desarrollados, sino más bien vientos débiles. Nuevamente y tal como a las 12:00, el transporte limitado y el impacto local de las emisiones se indica a través de los contornos cerrados, casi circulares alrededor de los centros urbanos/industriales.

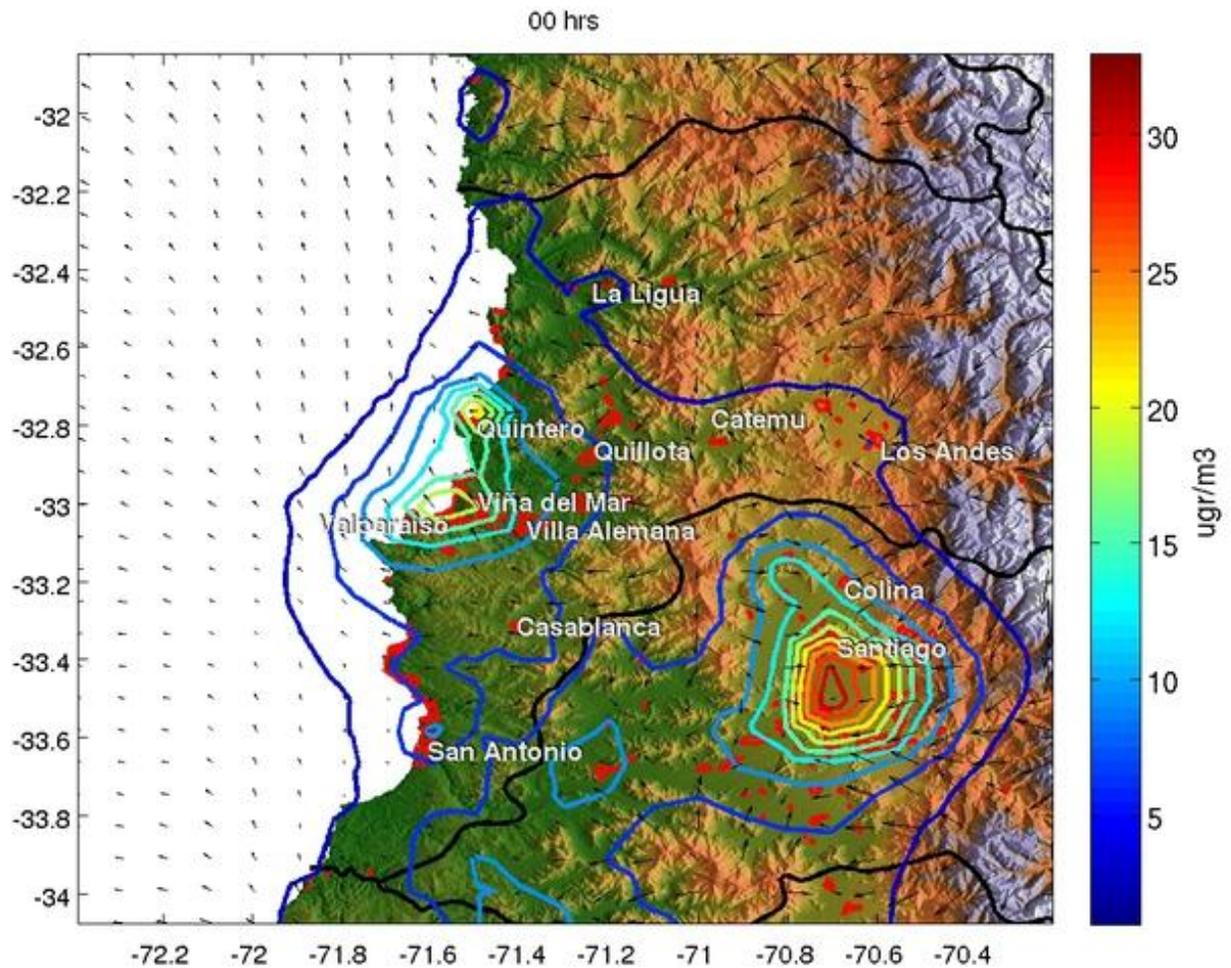


Figura 11.14: : Promedio de concentraciones de NO_x a las 00:00 durante los meses julio-septiembre 2010. A esta hora, se observan vientos desde las montañas hacia los valles (brisa montaña /valle). Aún así el transporte de contaminantes está muy limitado y el impacto más bien local.

11.2.3 Conclusión del transporte de un contaminante primario

Cabe reiterar que la caracterización del transporte se ha hecho a través del ejemplo de los NO_x como contaminante primario y de los cuales también se suponía en primera aproximación que se conserven en el tiempo a esta escala. Además, los NO_x representan tanto las fuentes industriales como las móviles lo que significa que la caracterización de su transporte representa el transporte de contaminantes justamente de las fuentes emisoras más importantes. A través de las observaciones disponibles (aunque escasas) se podía ver un desempeño del modelo de manera tal

que permite esta caracterización del transporte de los contaminantes en la Región de Valparaíso. Se observan diferencias entre las observaciones y las simulaciones, sin embargo, éstas están dentro de lo esperable para un contaminante primario.

En primer lugar cabe reiterar lo que ya se había señalado en las secciones anteriores que los contaminantes primarios tienen su mayor impacto en y cerca de su lugar de emisión. Evidentemente, cuán cercano depende también de la altura de su emisión. Sin embargo y en todos los casos, una vez emitidos a la atmósfera los contaminantes son sujetos a dispersión. El grado de la eficiencia de la dispersión depende de factores meteorológicos; no obstante en todos los gráficos mostrados para la modelación (que cubren las situaciones promedio de verano e invierno) queda en evidencia que las concentraciones de los NOx disminuyen rápidamente alejándose de la fuente de su emisión.

En segundo lugar, se puede decir que en promedio el transporte de contaminantes dentro de la Región de Valparaíso y entre ésta y la Región Metropolitana está muy limitada durante el invierno (durante el día y la noche) y durante la noche de invierno. En el caso de un desarrollo de las brisas mar/tierra y valle/montaña –tal como se presenta durante el día en verano- el transporte que se observa es desde la zona de San Antonio hacia la región Metropolitana, desde la zona Valparaíso/Viña del Mar (y en menor grado desde Puchuncaví/Quintero) hacia la cuenca de Los Andes) y desde la cuenca de Santiago hacia la cuenca de Los Andes. Nuevamente, este transporte no produce concentraciones elevadas de los contaminantes primarios sino es importante para la formación de ozono tal como se presentará en la siguiente sección.

11.3 Caracterización de la formación y transporte del ozono

Uno de los resultados de los estudios de CONAMA Nacional para la Macrozona en Schmitz *et al.*, 2007, y Schmitz *et al.* 2010 (ver referencias en sección 5 de este informe) fue una indicación de un potencial problema en términos de concentraciones altas en la cuenca de Los Andes. Sin embargo, en ese entonces no se contaba con un inventario de emisiones completo ni con observaciones justamente en la ciudad de Los Andes. En este sentido, se puede considerar este estudio como una continuación de esos dos. Además, a través de los dos estudios paralelos a este (mediciones e inventario de emisiones) llenaron los vacíos que existían antes.

En la sección 7 ya se entregó un análisis de las observaciones de ozono en la ciudad de Los Andes. En lo siguiente se usan los resultados de la modelación fotoquímica para mejor interpretar las observaciones. Dado que en el caso del ozono se trata de un fenómeno de los meses cálidos del año, sólo se muestran resultados de las simulaciones del periodo de verano. La figura 11.15 muestra las estaciones que se usaron para la validación del modelo. En este caso, se puede notar un número mucho mayor de estaciones que miden (o midieron) ozono comparado con estaciones que miden NOx. Basado en los resultados de la sección anterior que muestran un transporte de contaminantes desde la cuenca de Santiago hacia la cuenca de Los Andes, también se incluyeron tres estaciones de la Región Metropolitana (Parque O'Higgins, Las Condes y Colina). La tabla 11.2 indica todas las estaciones usadas, el periodo de los series de tiempos disponibles y la completitud de esos series. Tal como en el caso NOx, no se compararon los periodos iguales a los de la simulación sino las "climatologías" de los veranos de los veranos 2007 a 2010 (cualquier información anterior se consideraba no necesariamente representativa para la actualidad). Es decir, a lo más se usaron cuatro años con tres meses cada uno (enero – marzo). Para algunas estaciones ni siquiera se contaba con tres meses enteros (colina, Villa Alemana, Viña del Mar) para otros (principalmente de la red MACAM2 no se usó toda la información disponible.

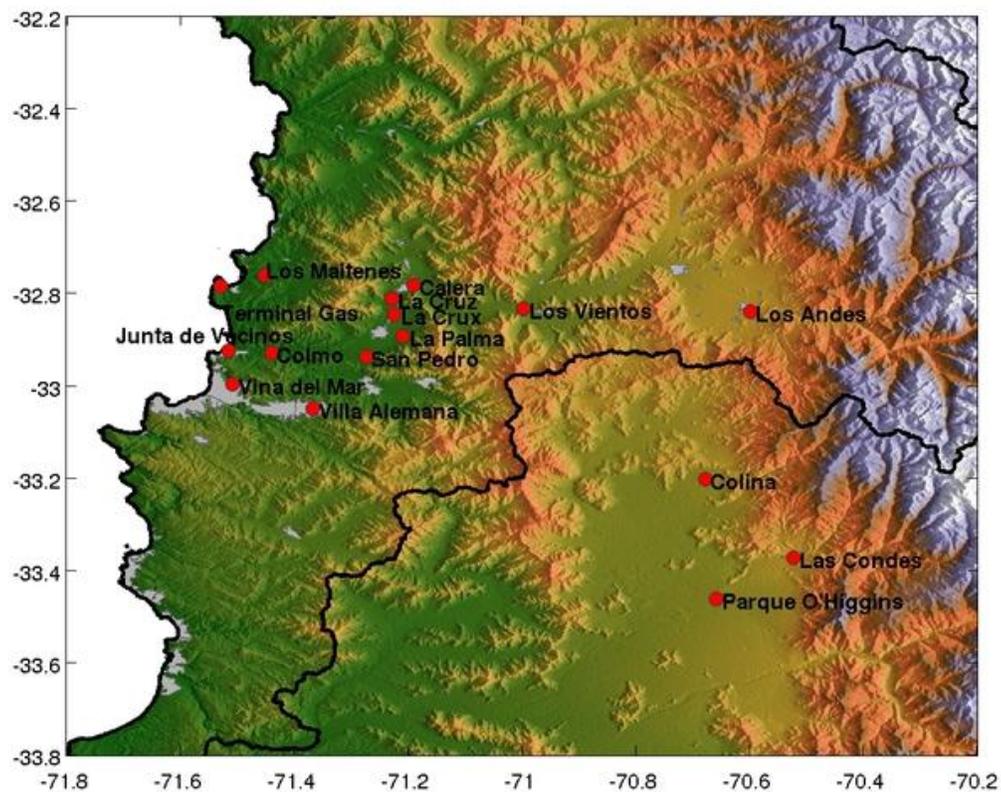


Figura 11.15: Ubicación de estaciones con mediciones de ozono. Aparte de las estaciones de la Región Valparaíso, también se consideraron tres estaciones de la Región Metropolitana.

Estación	Periodo	Complejitud (%)
Los Maitenes	diciembre 2009 - diciembre 2010	77
GNL	diciembre-2008 - marzo-2009	99
Calera	diciembre-2005 - diciembre-2009	86
La Cruz	enero-2004 - febrero-2005	100
Colmo	diciembre-2002 --diciembre-2008	99
Junta de Vecinos	febrero-2002 - diciembre-2008	99
La Cruz	diciembre-2007 - diciembre-2008	98
La Palma	enero-2001 --marzo-2003	79
San Pedro	enero-2000 --marzo-2003	86
Los Vientos	enero-2007 --marzo-2010	91
Los Andes	enero-2010 - diciembre-2010	99
Colina	enero-2009 - febrero2009	82
Villa Alemana	enero-2010 - febrero-2010	99
Viña del Mar	enero-2010 - febrero-2010	94
Las Condes	diciembre-1997 - marzo-2012	99
Parque O'Higgins	diciembre-1997 - marzo-2012	97

Tabla 11.2: Estaciones con mediciones de ozono usados en este estudio. Se indican los periodos de los series de tiempo disponibles y la completitud de datos.

11.3.1 Validación de ozono

En lo que sigue se entregan los gráficos correspondientes a la validación del ozono (figuras 11.16 – 11.30). En cada figura se entregan los ciclos diarios promedios (líneas azules) y su variabilidad (sombra celeste) según el modelo WRF (panel arriba) y según observaciones (panel abajo). Se mantiene en todos los gráficos la escala del eje y, ya que facilita ver también la capacidad del modelo reproducir los gradientes. Generalmente, se puede decir que el modelo tiene un muy buen desempeño en reproducir las observaciones. En este contexto, se estima importante mencionar tres factores importantes para este desempeño:

- 1) Tal como se mencionó en la sección 11.1, los resultados se obtuvieron sin modificar los inventarios de emisiones. Generalmente, estas modificaciones se realizan a través de una manipulación de las emisiones de los COVs. Dado que también en estas simulaciones se observan diferencias entre el modelo y las observaciones, se hicieron algunos experimentos con las emisiones de COVs modificadas. Sin embargo, estos experimentos no condujeron a resultados mejores, por lo que se entregan en esta instancia los resultados con las emisiones no modificadas. El buen desempeño del modelo refleja entonces también la alta calidad del inventario.
- 2) El desempeño en términos de ozono parece ser superior que en el caso de los NOx (la escasa información observacional de los NOx limita un poco esta afirmación). Ese mejor desempeño se debe a que el ozono es un contaminante secundario. Siendo un contaminante secundario, las mediciones del mismo siempre son más representativas (en el espacio) que de un contaminante primario. Dada la resolución horizontal del modelo (3x3 km) esa representatividad espacial de las mediciones es importante en su uso con fines de validar un modelo. Este punto de la representatividad de las mediciones va a ser central también en la sección 11.4.
- 3) El ozono es un contaminante que integra muchas variables (tanto meteorológicas como químicas). Es decir, el ozono es capaz de compensar errores de otras variables. No cabe dentro de estudio elaborar mucho sobre esta característica. Sin embargo se estima pertinente dar un ejemplo en qué se manifiesta dentro de un cierto rango se puede decir que mientras la razón entre las concentraciones de NOx y COVs es constante, la concentración absoluta del ozono tampoco varía. Si ahora el modelo tienen un error en su estimación de la altura de la capa límite, este error se refleja de igual medida en las concentraciones de NOx y COVs; en consecuencia, la razón entre NOx y COVs se mantiene y el ozono también. Es decir, un error del comportamiento meteorológico del modelo puede ser compensado por el ozono.

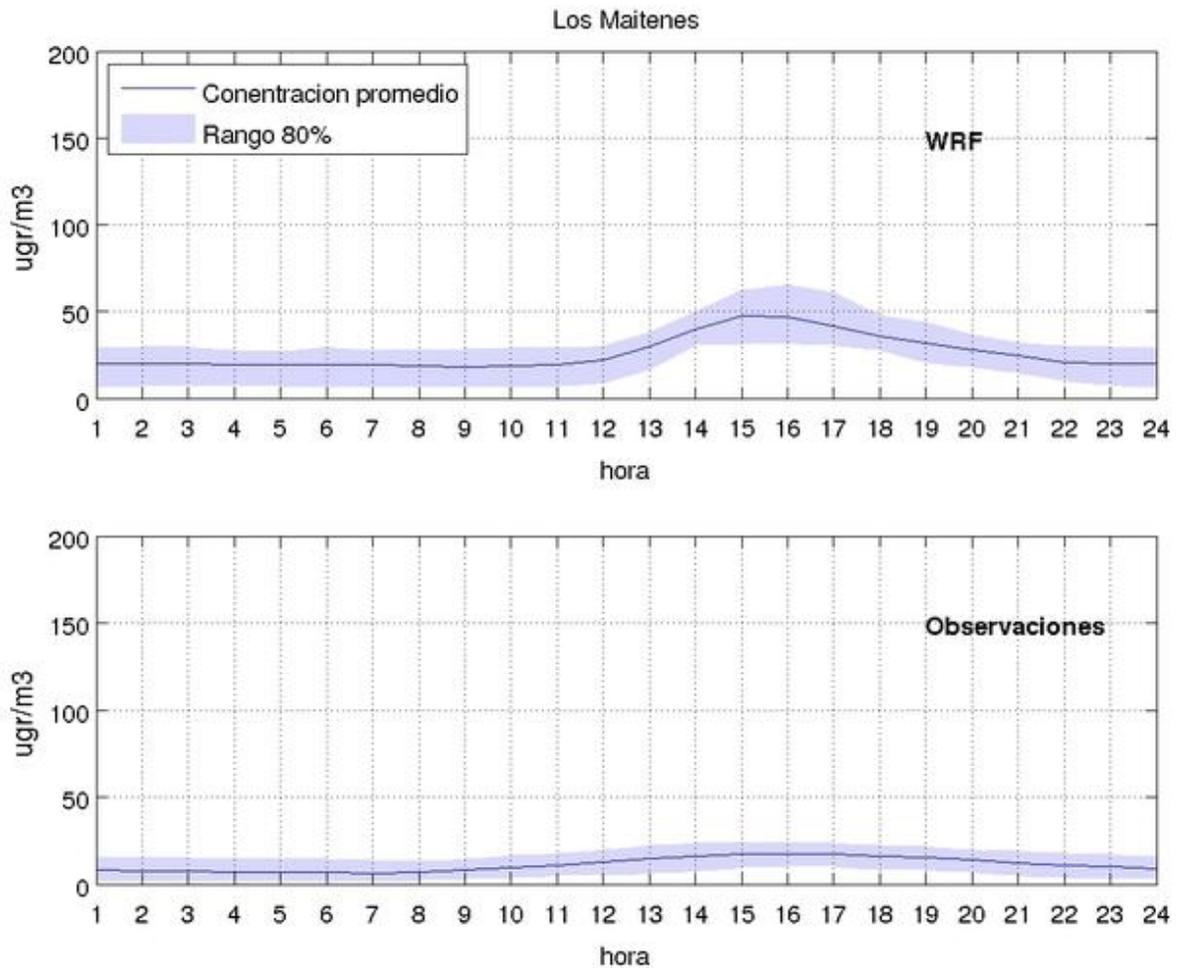


Figura 11.16: Ciclos diarios de ozono simulado por WRF (panel superior) y observado (panel inferior) para el caso de la estación Los Maitenes. Se indican los ciclos promedios (líneas azules) y su variabilidad a través de las sombras celestes que contienen el 90% de los datos. En este caso, las concentraciones observadas son muy bajas y el modelo, a pesar de también indicar concentraciones bajas, las sobreestima. El aumento de ozono durante el día se debe a la actividad fotoquímica gatillada por la radiación solar. Dadas su ubicación en la costa, las concentraciones bajas se pueden interpretar como la 'línea base' del ozono en esas latitudes.

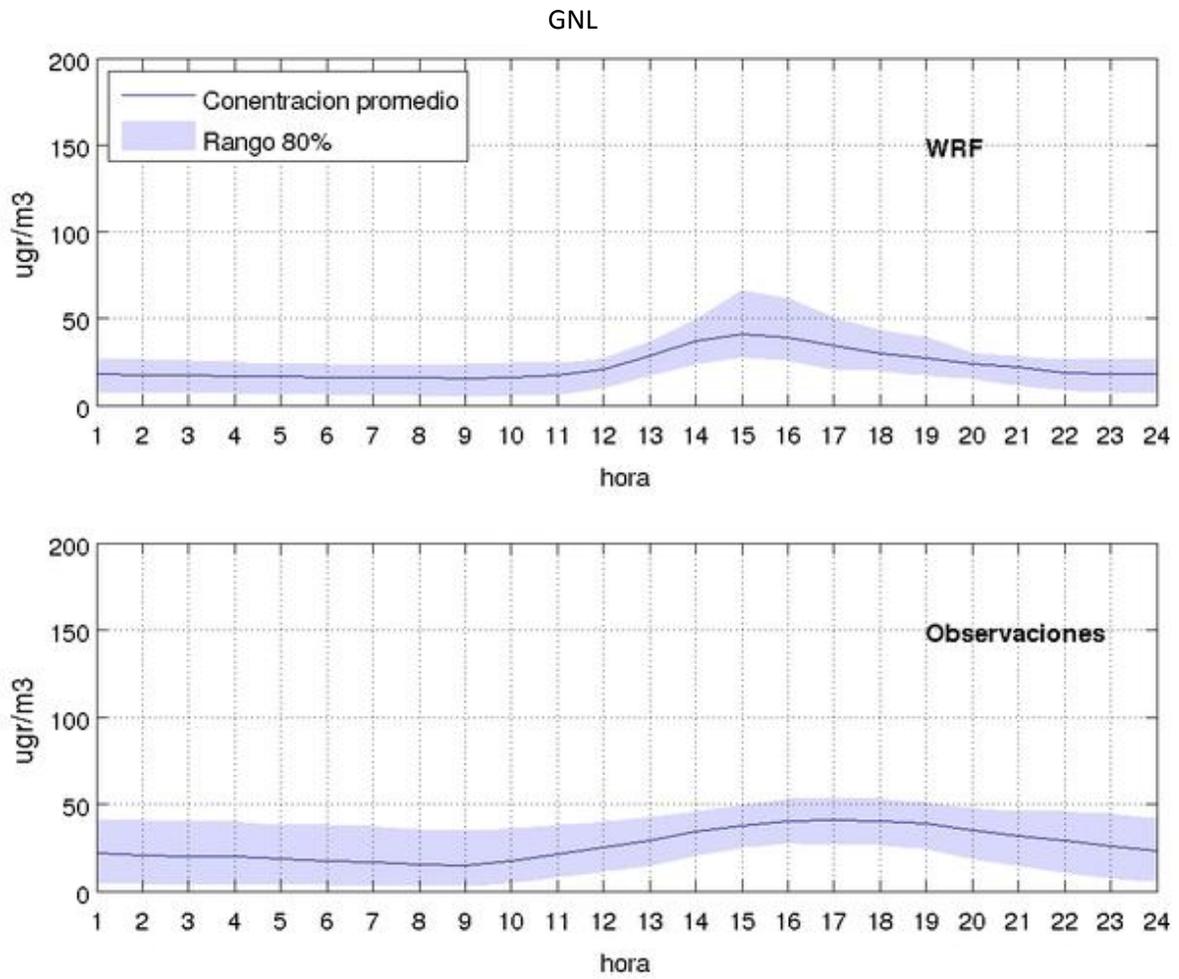


Figura 11.17: Equivalente a la figura 11.17, pero para la estación GNL. También en este caso tanto las concentraciones observadas.

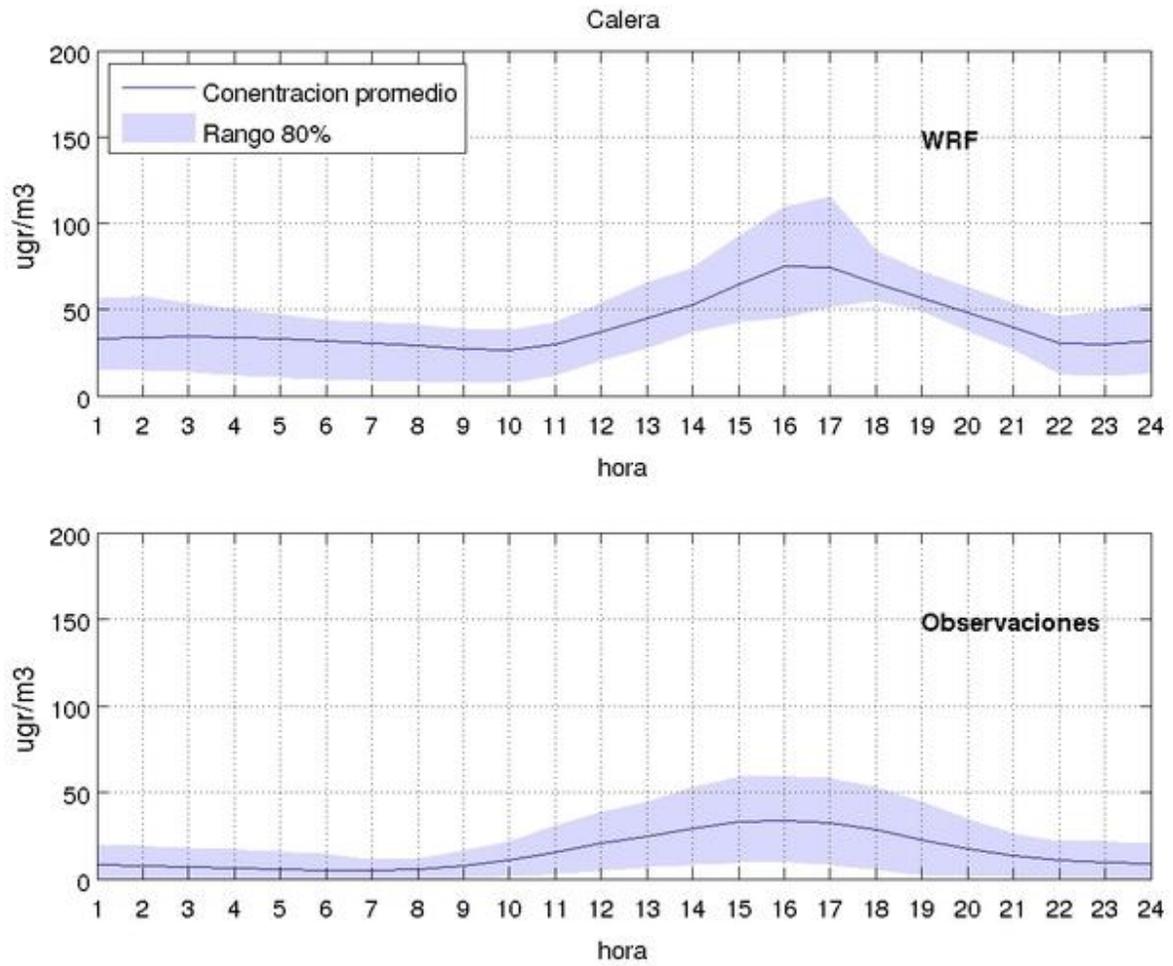


Figura 11.18: Equivalente a la figura 11.17, pero para la estación Calera. Esta estación se ubica ya algo más hacia adentro del continente y está sujeta de emisiones de los precursores de ozono lo que explica un leve aumento de ozono.

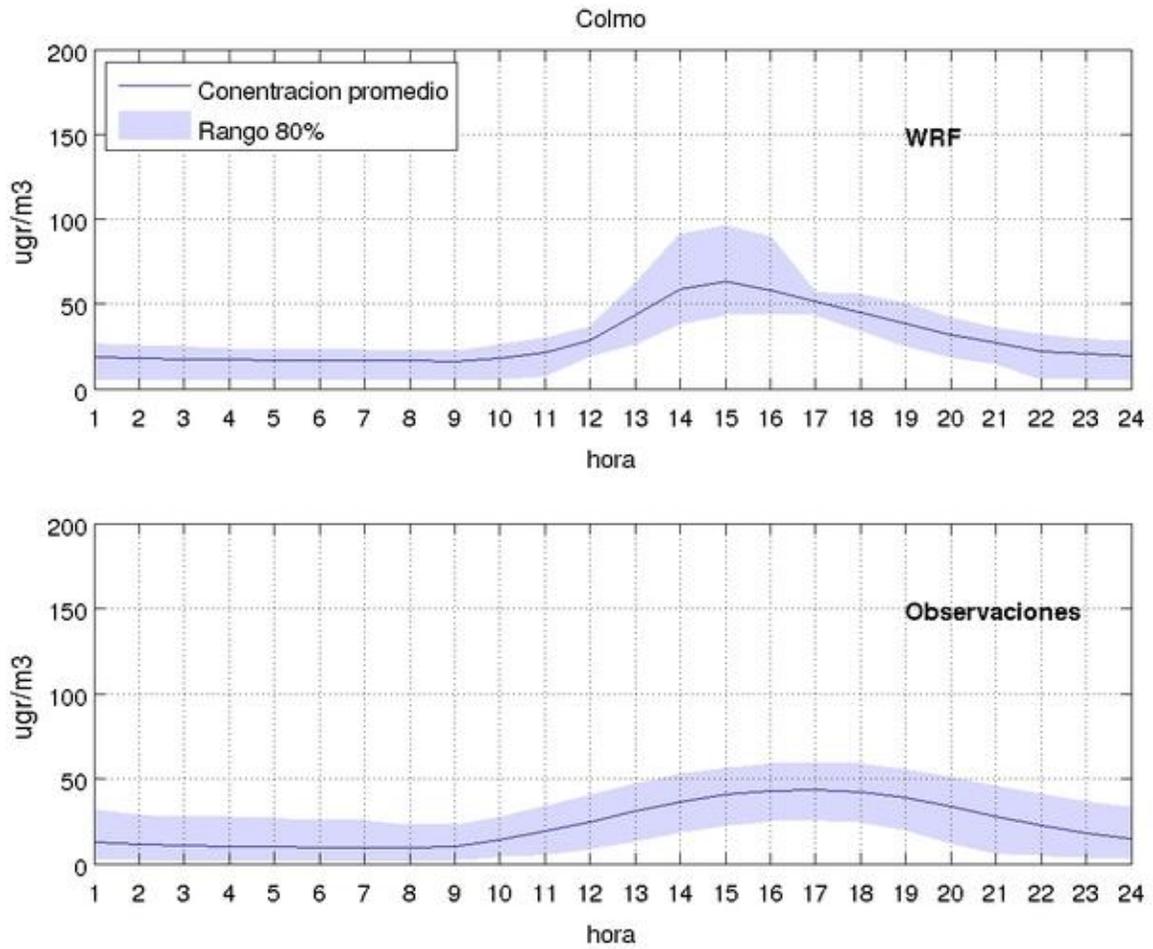


Figura 11.19: Equivalente a la figura 11.17, pero para la estación Colmo. También en este caso las concentraciones son bastante bajas lo que, nuevamente, explica su cercanía a la costa.

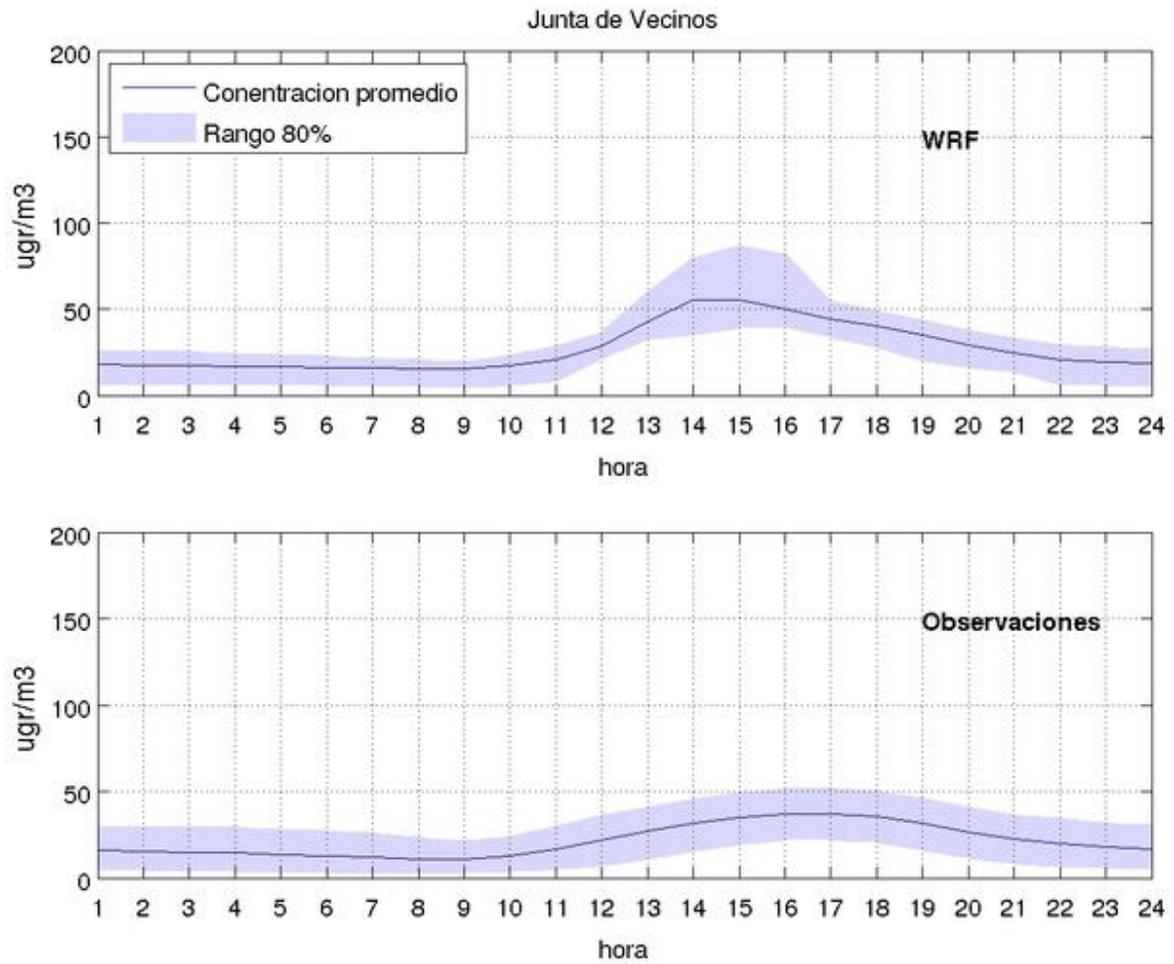


Figura 11.20: Equivalente a la figura 11.17, pero para la estación Junta de Vecinos. El comportamiento en esta estación es similar a la de la estación Colmo (figura anterior). A contrario del SO_2 (ver sección 8) no existen diferencias muy grandes entre estas dos estaciones.

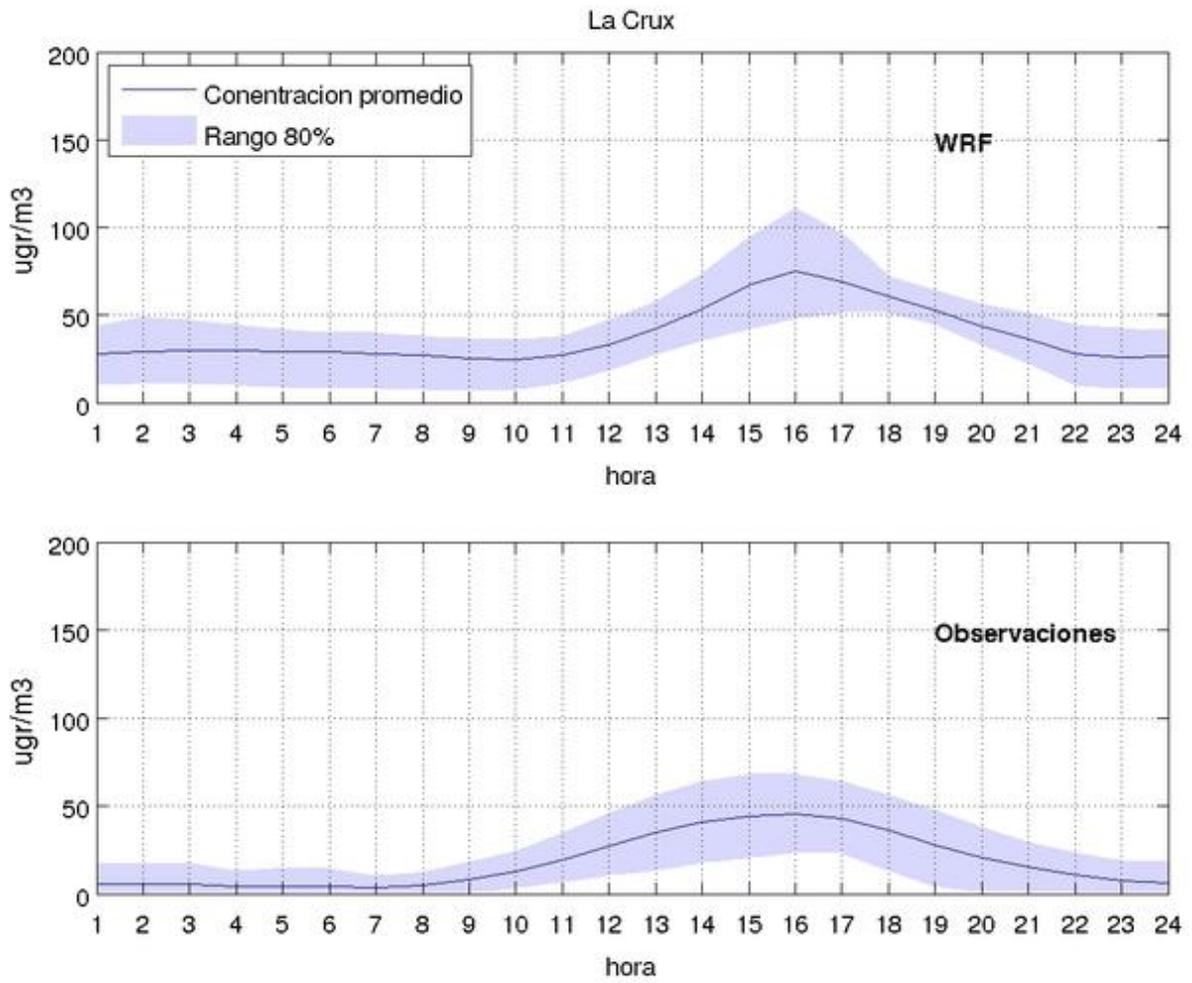


Figura 11.21: Equivalente a la figura 11.17, pero para la estación La Cruz. Esta estación se comporta similar a la estación Calera (figura 11.15).

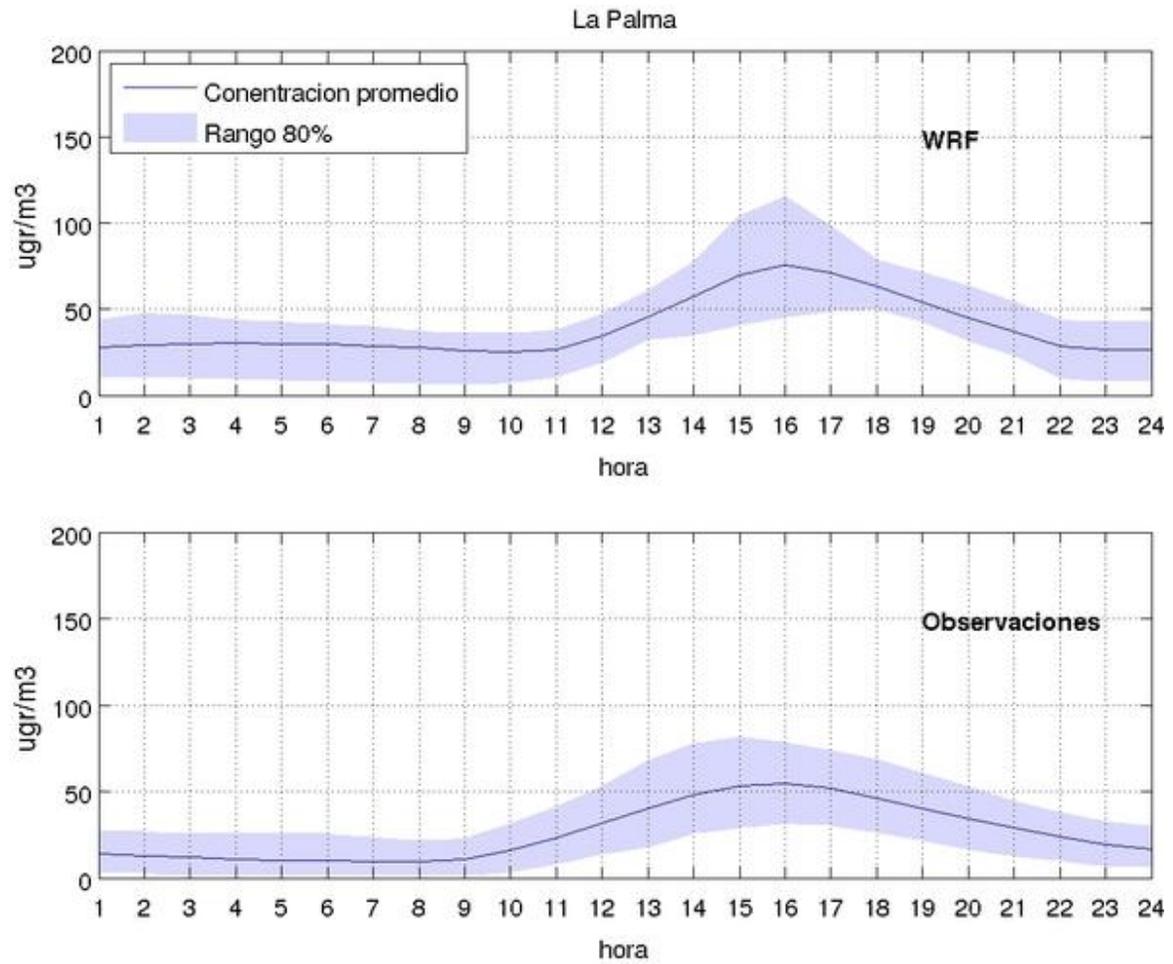


Figura 11.22: Equivalente a la figura 11.17, pero para la estación La Palma. También esta estación es similar en su comportamiento a la estación Calera (figura 11.15)..

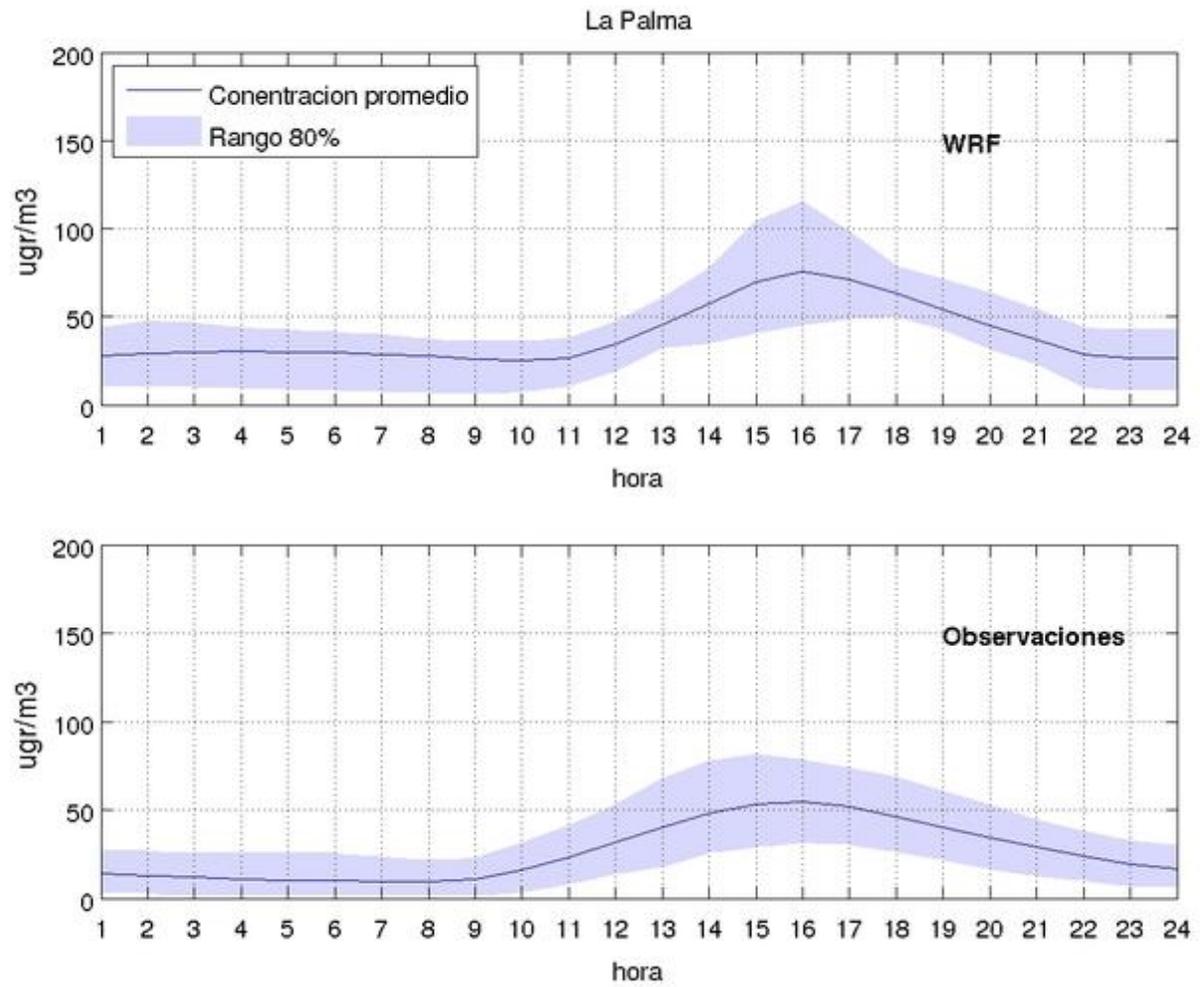


Figura 11.23: Equivalente a la figura 11.17, pero para la estación San Pedro. También esta estación es similar en su comportamiento a la estación Calera (figura 11.15)..

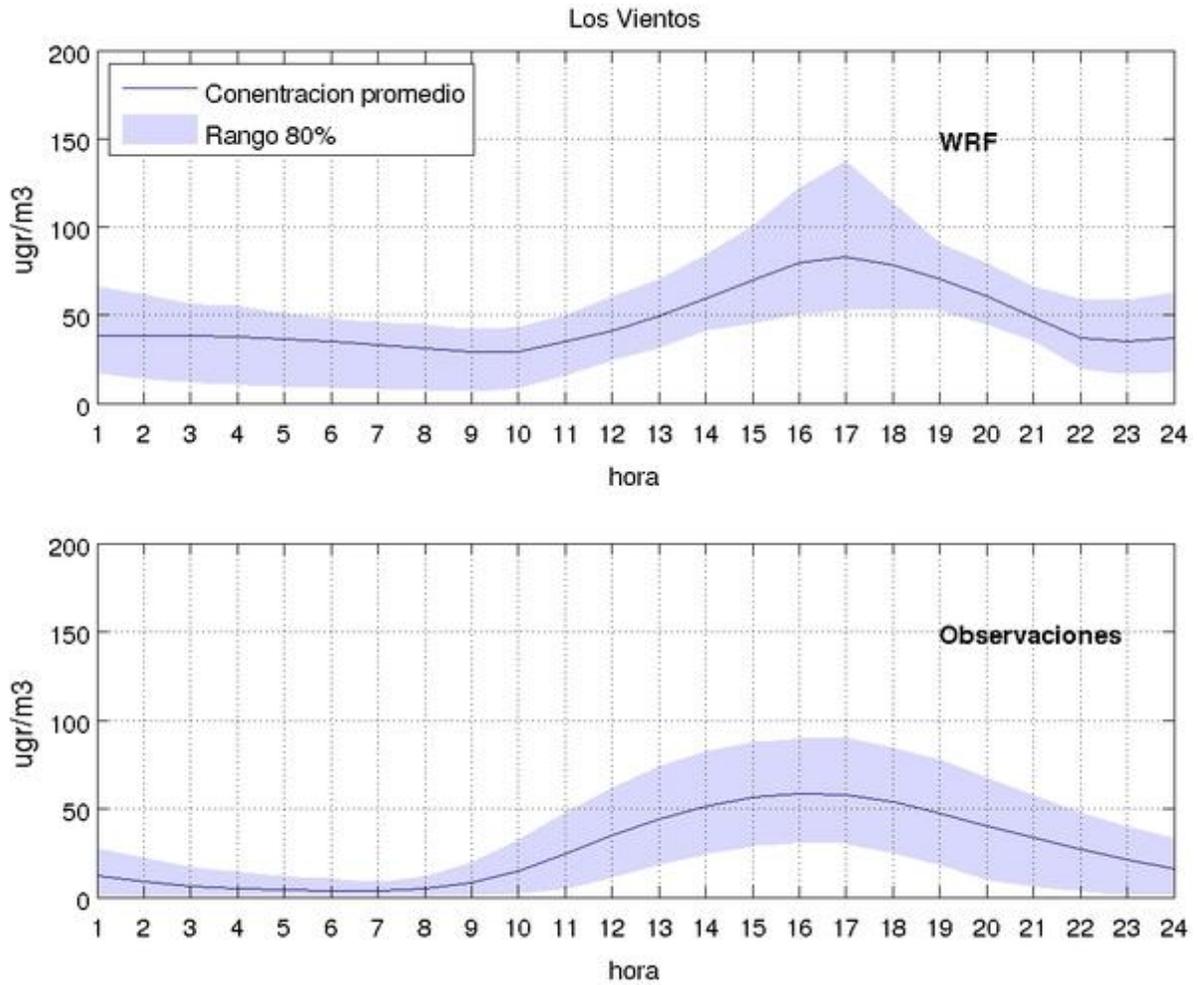


Figura 11.24: Equivalente a la figura 11.17, pero para la estación Los Vientos. Esta estación se encuentra aún más hacia dentro del continente que la estación Calera (y las otras cercanas a ella) y, por lo tanto, también viento debajo de más fuentes emisoras de precursores de ozono. Esto se refleja en concentraciones más altas (simuladas y observadas).

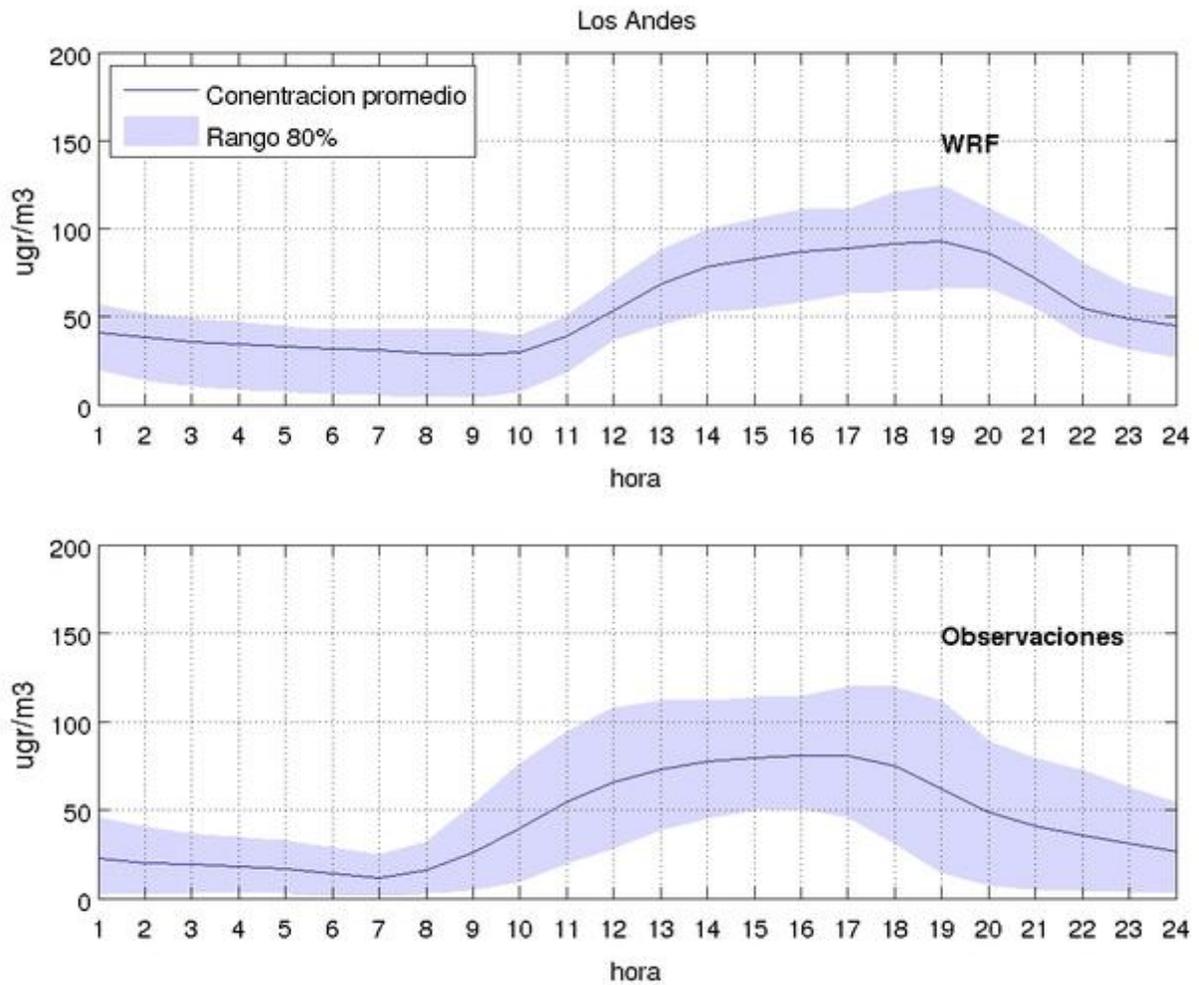


Figura 11.25: Equivalente a la figura 11.17, pero para la estación Los Andes. Dentro de la Región de Valparaíso es la estación con las concentraciones más altas. El modelo logra bastante bien simular tanto la magnitud de las concentraciones como su ciclo diario. Sin embargo, el aumento observado en la mañana es mayor que el simulado. Esto indica una subestimación del potencial de producción por fuentes locales.

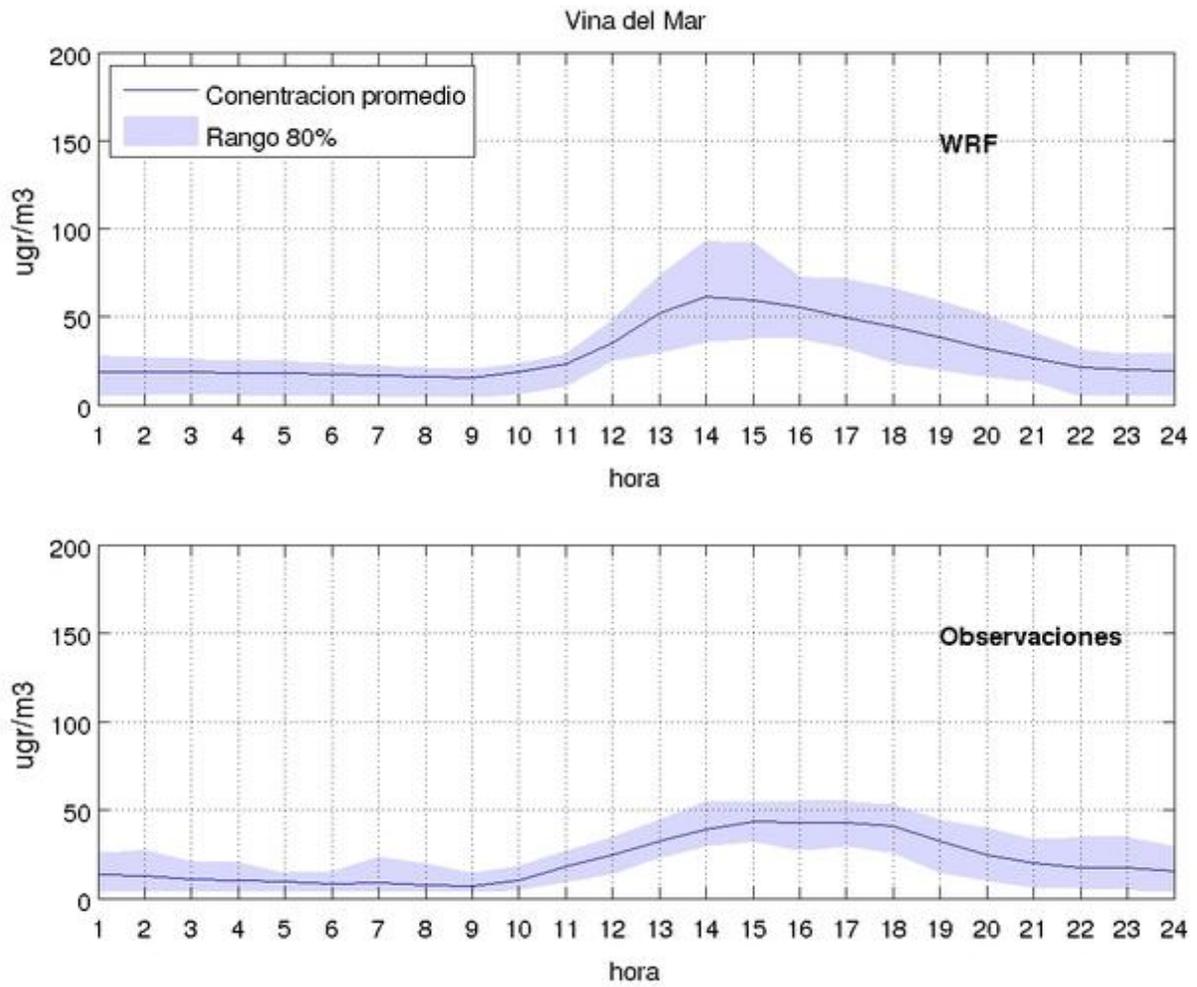


Figura 11.26: Equivalente a la figura 11.17, pero para la estación Viña del Mar. Las observaciones en este caso sólo cuentan con una serie de tiempo corta. Las concentraciones también en este caso son bastante bajas.

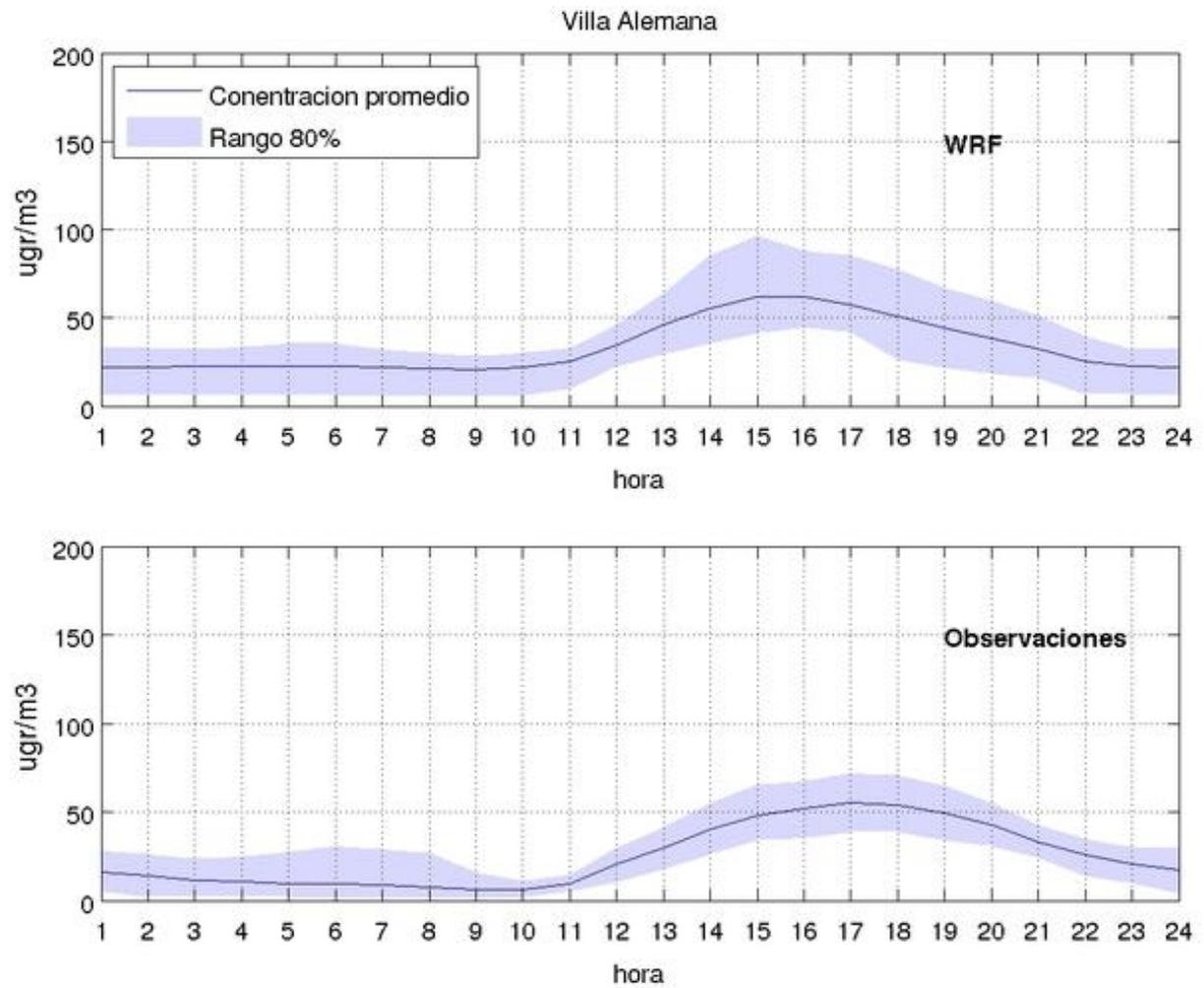


Figura 11.27: Equivalente a la figura 11.17, pero para la estación Villa Alemana. Las observaciones en también en este caso sólo cuentan con una serie de tiempo corta. Se nota un leve aumento de las concentraciones comparadas a aquellas de la estación Viña del Mar (figura anterior). Aún así las oncentraciones se pueden considerar bajas.

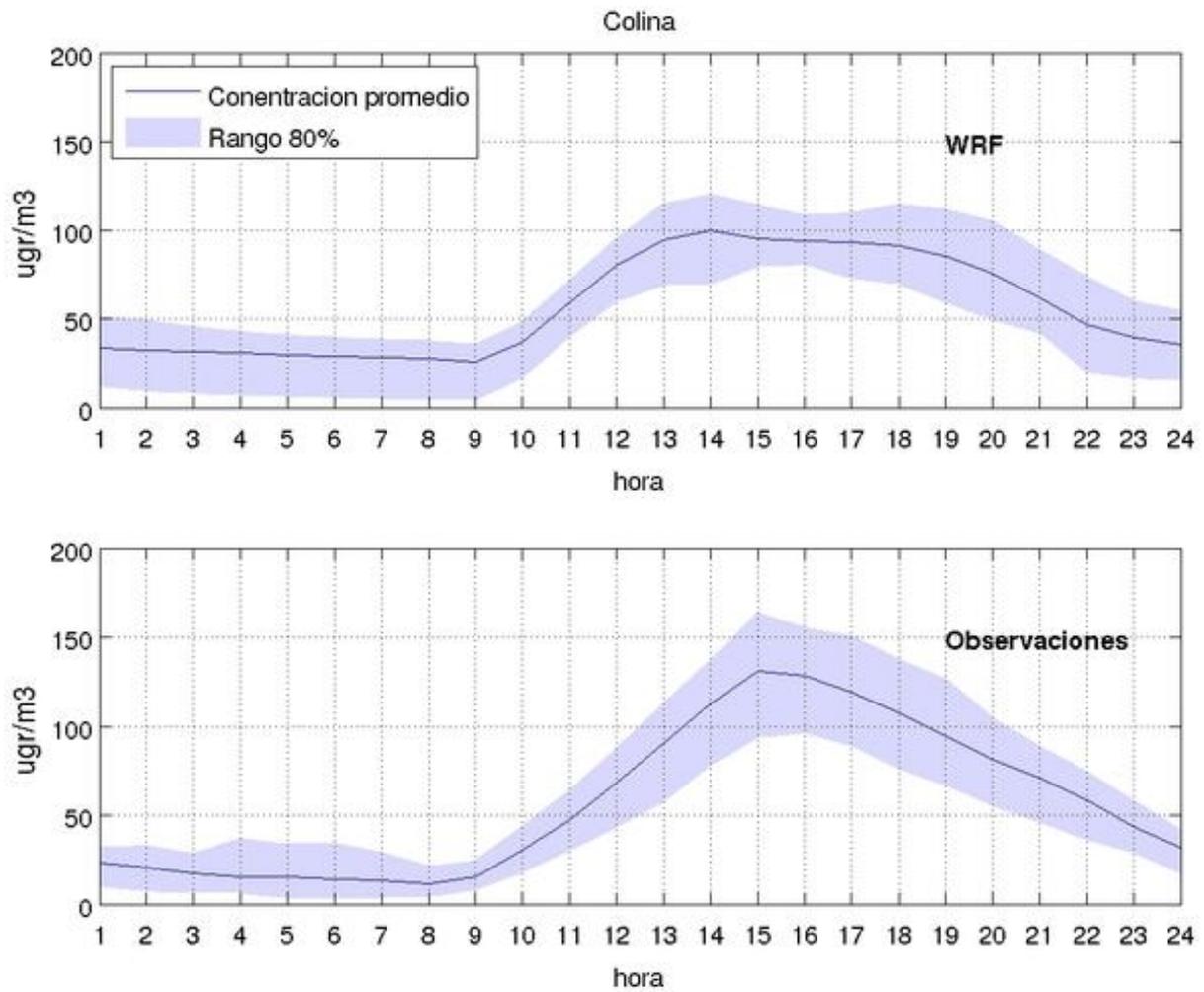


Figura 11.29: Equivalente a la figura 11.17, pero para la estación Colina. Esta como las dos figuras siguientes sólo se han incorporado para mostrar el desempeño del modelo en la Región Metropolitana. Se mostrará que el ozono en la Región Metropolitana depende principalmente de emisiones dentro de esa región. Por lo tanto, las diferencias entre el modelo y las observaciones no tienen relación al inventario de emisiones de la región de Valparaíso.

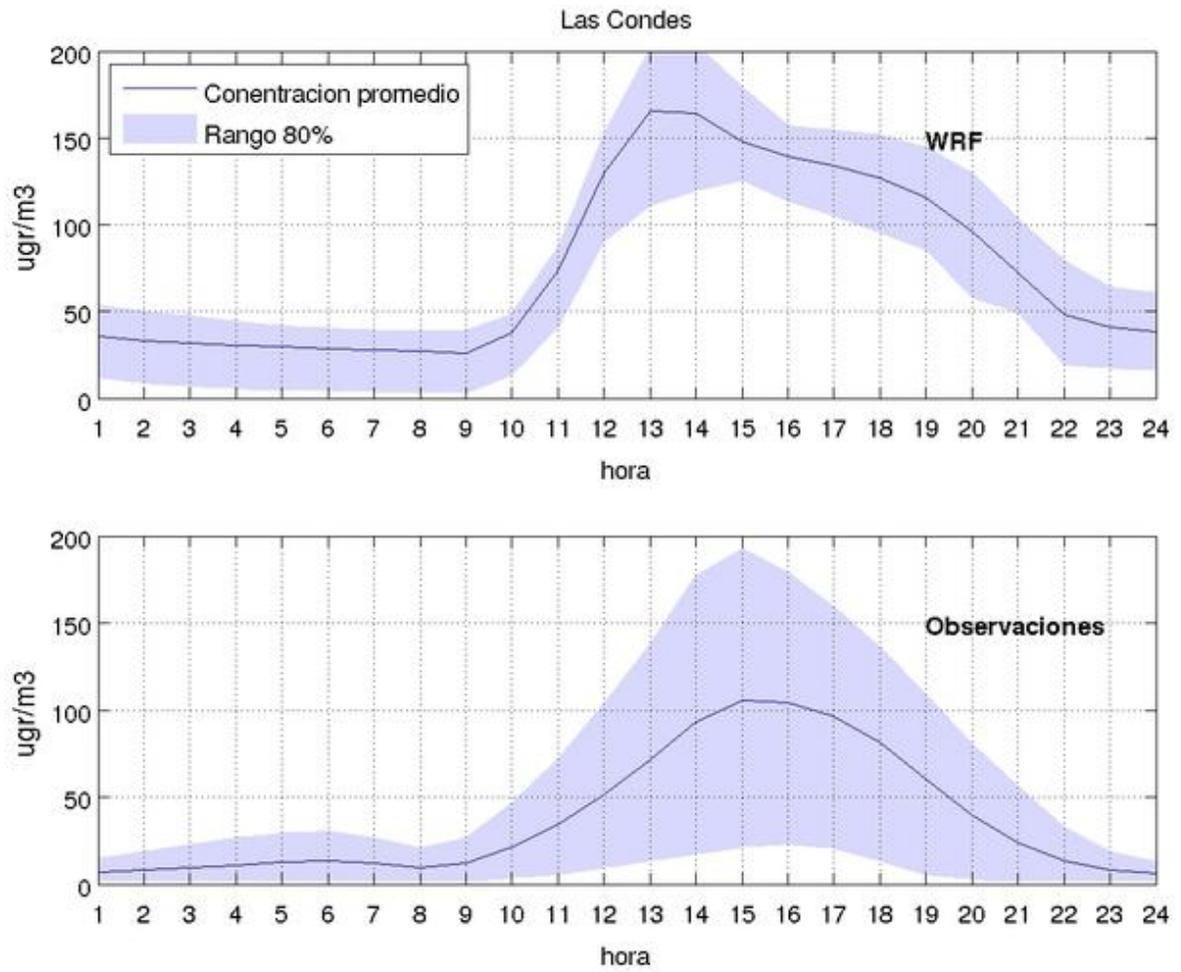


Figura 11.30: Equivalente a la figura 11.17, pero para la estación Las Condes.

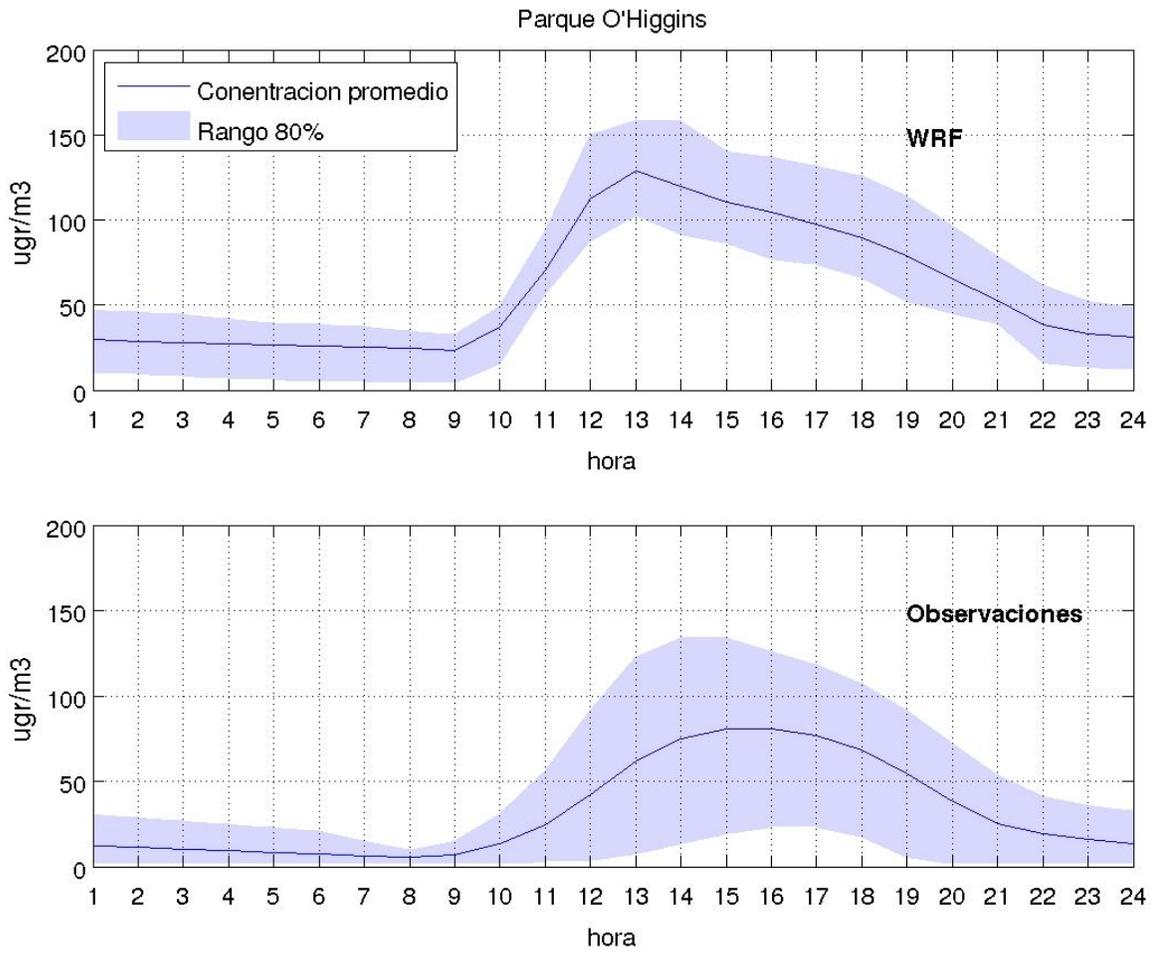


Figura 11.31: Equivalente a la figura 11.17, pero para la estación Parque O'Higgins.

11.3.2 Caracterización de la formación y transporte de contaminantes secundarios enfocado en el ozono.

Basado en la validación de la sección anterior, se entrega en esta sección la caracterización espacial y temporal del ozono (figuras 11.31 – 11.37). Nuevamente, sólo se consideran en este análisis los meses enero – marzo. Para cada figura se tomaron los promedios de los variables para los respectivos periodos de simulación. Además, cada figura contiene la topografía como fondo. También se indican algunas ciudades de las Regiones Valparaíso y Metropolitana lo que ayuda ubicarse geográficamente. Las flechas representan los vientos del primer nivel del modelo (aprox. 15 metros de altura) según el modelo WRF; con fines de no sobrecargar las figuras con flechas, sólo se grafican las flechas cada tres puntos de grilla. Finalmente, los contornos representan las concentraciones de ozono según el modelo WRF (en $\mu\text{gr}/\text{m}^3$). Dado que importa en este caso la variabilidad de la magnitud de las concentraciones en el tiempo (a contrario del caso de los NOx), se mantiene la misma escala de color en todas las figuras. Se muestra un secuencia de figuras cada dos horas desde las 08:00 hasta las 20:00. Este periodo coincide con las concentraciones elevadas durante el día. (El comportamiento nocturno del ozono no es de un interés práctico.)

Le secuencia comienza a las 08:00 hrs; a esta hora recién ha salido el sol y la actividad fotoquímica todavía está muy limitada. Además los vientos son débiles y, por lo tanto hay poco transporte de contaminantes. Entre las 10:00 y las 12:00 se puede observar el comienzo de una fotoquímica muy activa dentro de la Región Metropolitana. Dentro de la región de Valparaíso las concentraciones se mantienen mucho más bajas (lo que coincide con las observaciones). A las 12:00 comienza también el impacto desde la Región Metropolitana en la cuenca de Los Andes. Es interesante comparar la figura 11.8 (que muestra las concentraciones de NOx) con la figura 11.33 (que muestra las concentraciones de ozono). Ambas figuras muestran los promedios de sus respectivas variables químicas a las mismas horas. Mientras en el caso de los NOx el impacto desde la región Metropolitana hacia la cuenca de Los Andes no se nota, sí se observa que el ozono comienza llegar alrededor de esta hora. A partir del 14:00 se junta al transporte de ozono desde la Región Metropolitana el transporte desde la costa de la Región de Valparaíso. Este último llega desde la costa a través del valle Aconcagua hasta la cuenca de Los Andes. Esta mezcla de flujos se mantiene hasta el final del día (20:00 hrs).

Es evidente en el caso de Los Andes que el problema del ozono tiene muchas fuentes:

- 1) Fuentes locales dentro de la cuenca.
- 2) Todas las fuentes de la Región Metropolitana.
- 3) Las ciudades a lo largo del camino de Valparaíso/Viña del Mar hasta Los Andes.
- 4) Todas las industrias en la costa y a lo largo del valle Aconcagua.

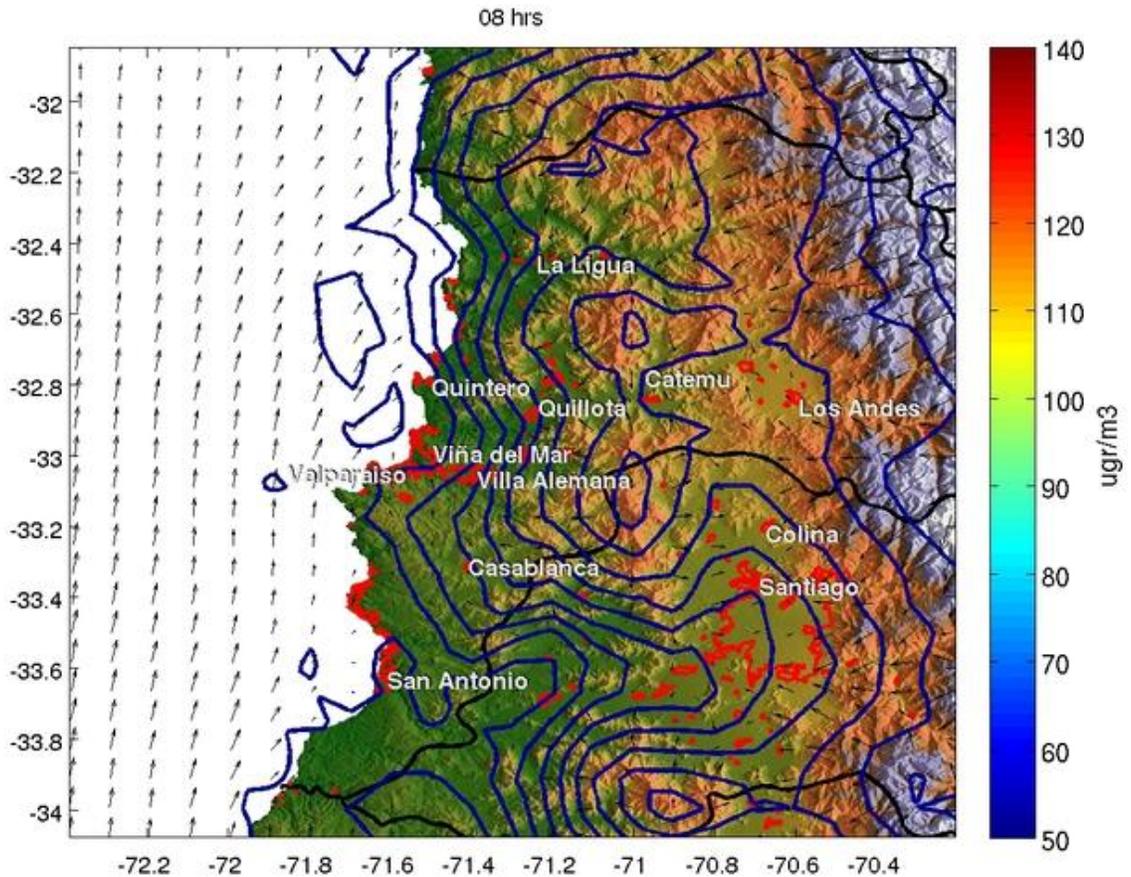


Figura 11.31: Promedio de concentraciones de ozono a las 08:00 durante los meses enero-marzo 2010 según el modelo WRF. Se muestra la topografía como fondo y se indican algunas ciudades de las Regiones Valparaíso y Metropolitana. Las flechas representan los vientos del primer nivel del modelo (aprox. 15 metros de altura) según el modelo WRF. Los contornos representan las concentraciones de ozono según el modelo WRF (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Se observan concentraciones bajas de ozono en todo el dominio dado que es una hora justo después de la salida del sol con todavía baja actividad fotoquímica.

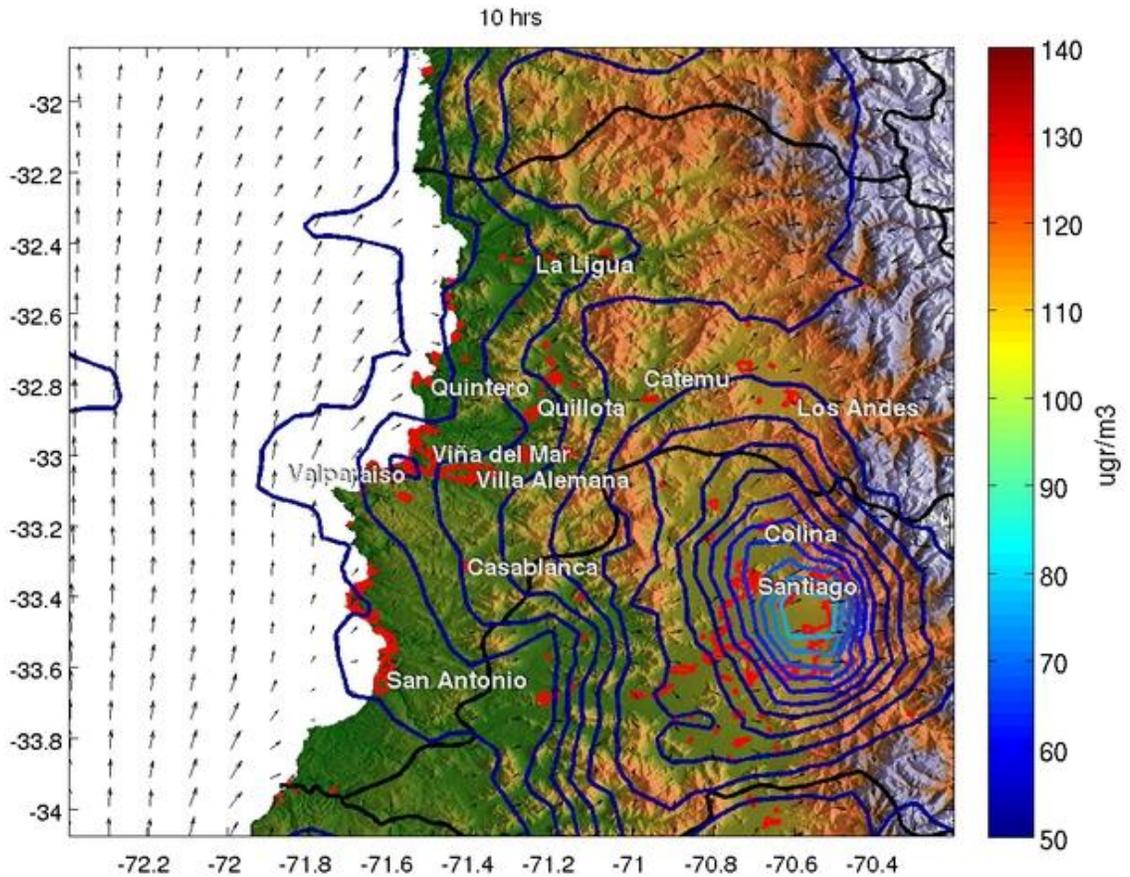


Figura 11.32: Promedio de concentraciones de ozono a las 10:00 durante los meses enero-marzo 2010 según el modelo WRF. Alrededor de esta hora empieza a desarrollarse la actividad fotoquímica. Se puede observar que esta actividad es mayor en Santiago que en cualquier otro lugar del dominio de modelación.

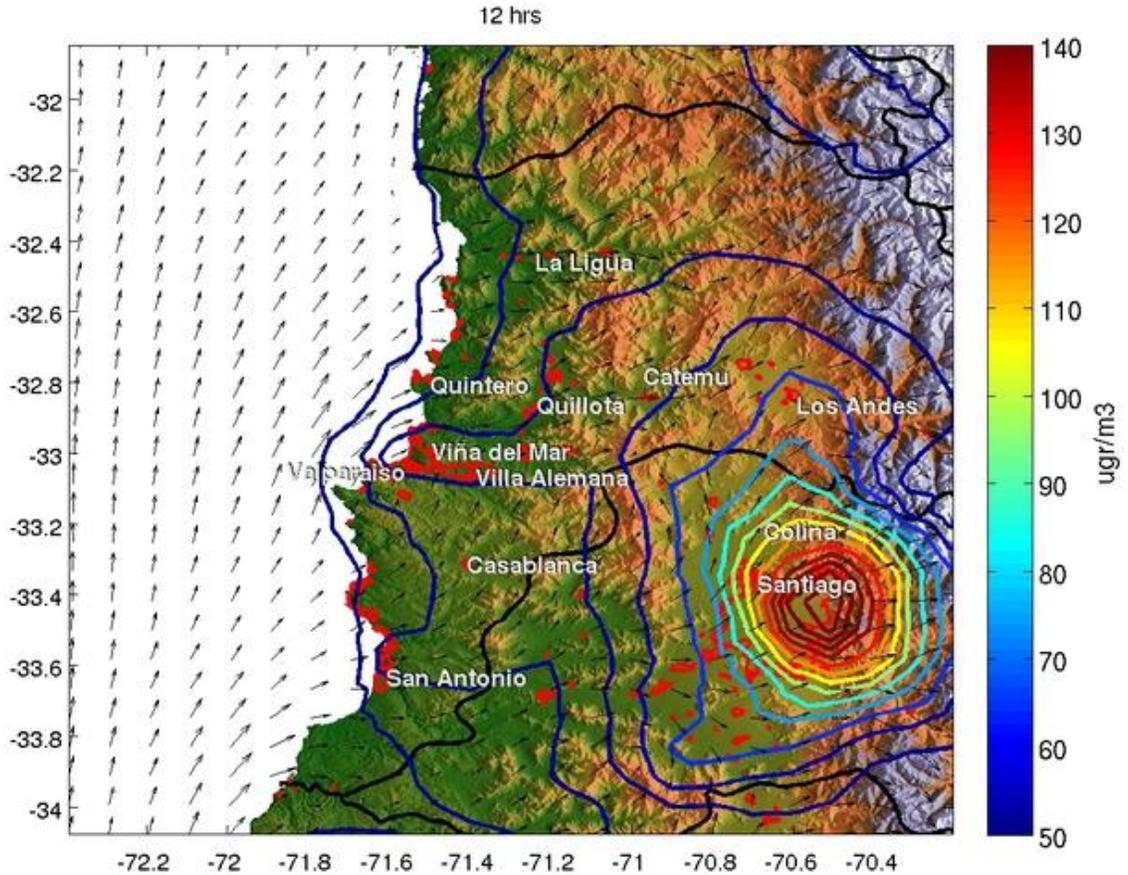


Figura 11.33: Promedio de concentraciones de ozono a las 12:00 durante los meses enero-marzo 2010 según el modelo WRF. A la hora cerca del máximo de la radiación existe una actividad fotoquímica muy alta. Es evidente el impacto de Santiago también hacia afuera de sus límites urbanos. Es interesante notar que mientras los contornos alrededor de Santiago son generalmente casi circulares, pero en las cercanías de Los Andes pierden su circularidad a esta hora y se extienden más hacia al norte. Este comportamiento indica la contribución de las fuentes más locales a la producción de ozono.

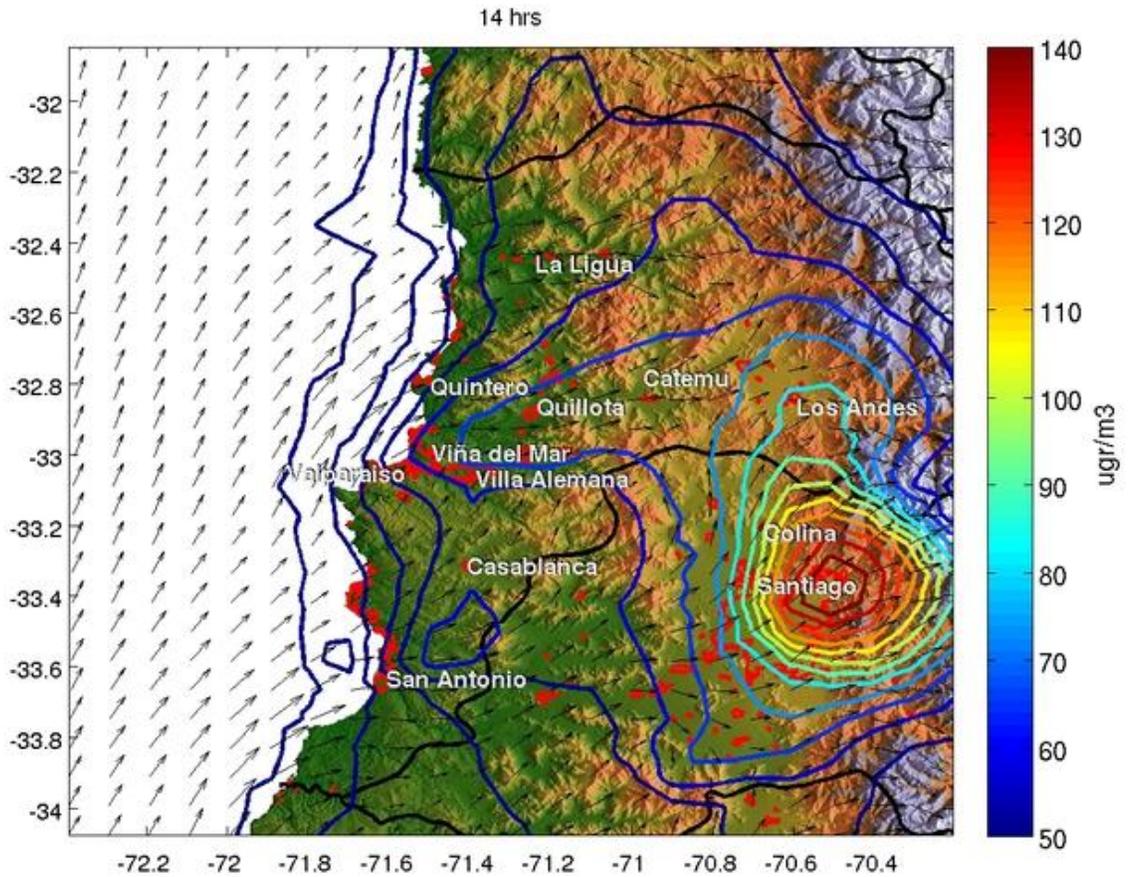


Figura 11.34: Promedio de concentraciones de ozono a las 08:00 durante los meses enero-marzo 2010 según el modelo WRF. A esta hora no sólo se observa una extensión de los contornos hacia el norte (tal como en la figura anterior) sino también por todo el valle Aconcagua hacia las ciudades de Valparaíso y Viña del Mar. Esta extensión indica la contribución de las fuentes emisoras desde la costa hasta Los Andes a las concentraciones de ozono en esta ciudad.

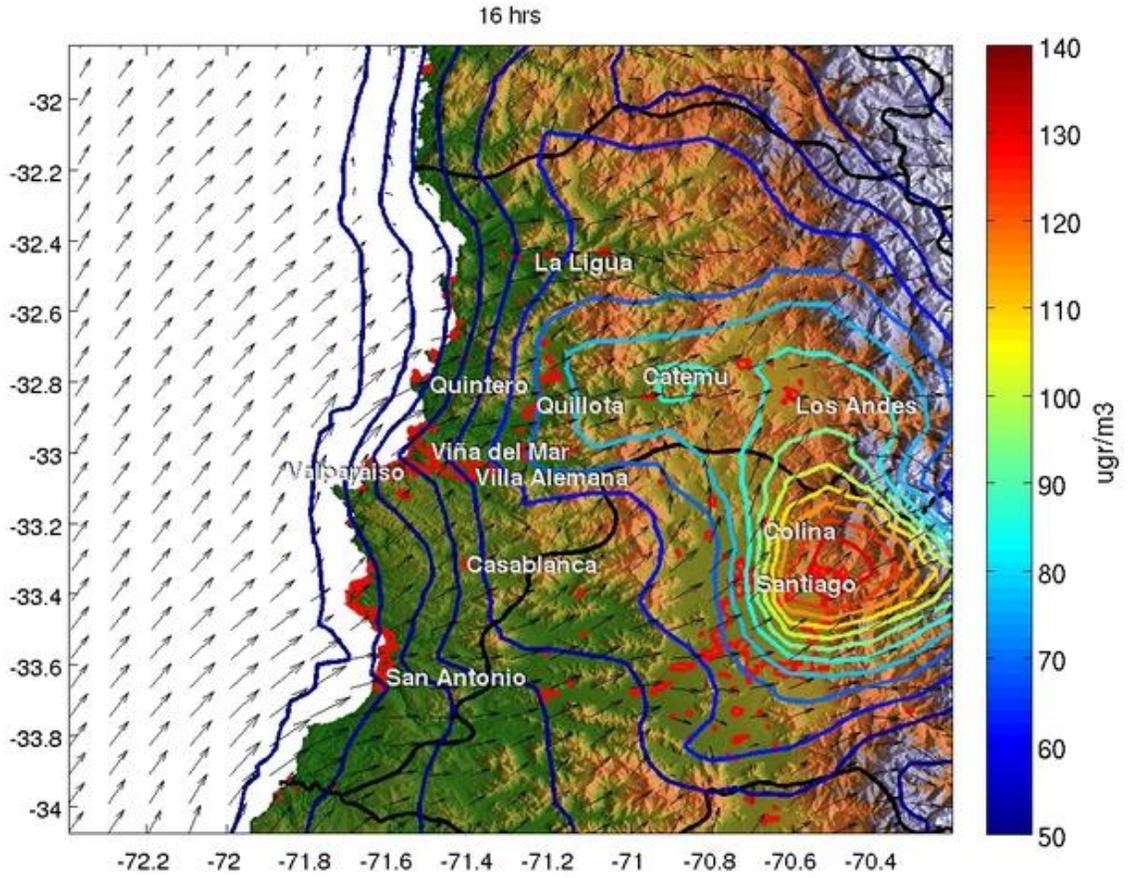


Figura 11.35: Promedio de concentraciones de ozono a las 08:00 durante los meses enero-marzo 2010 según el modelo WRF. La situación es similar a la de 14:00 con las circulaciones bien desarrolladas y un impacto desde Santiago y Valparaíso/Viña del Mar en la cuenca de Los Andes.

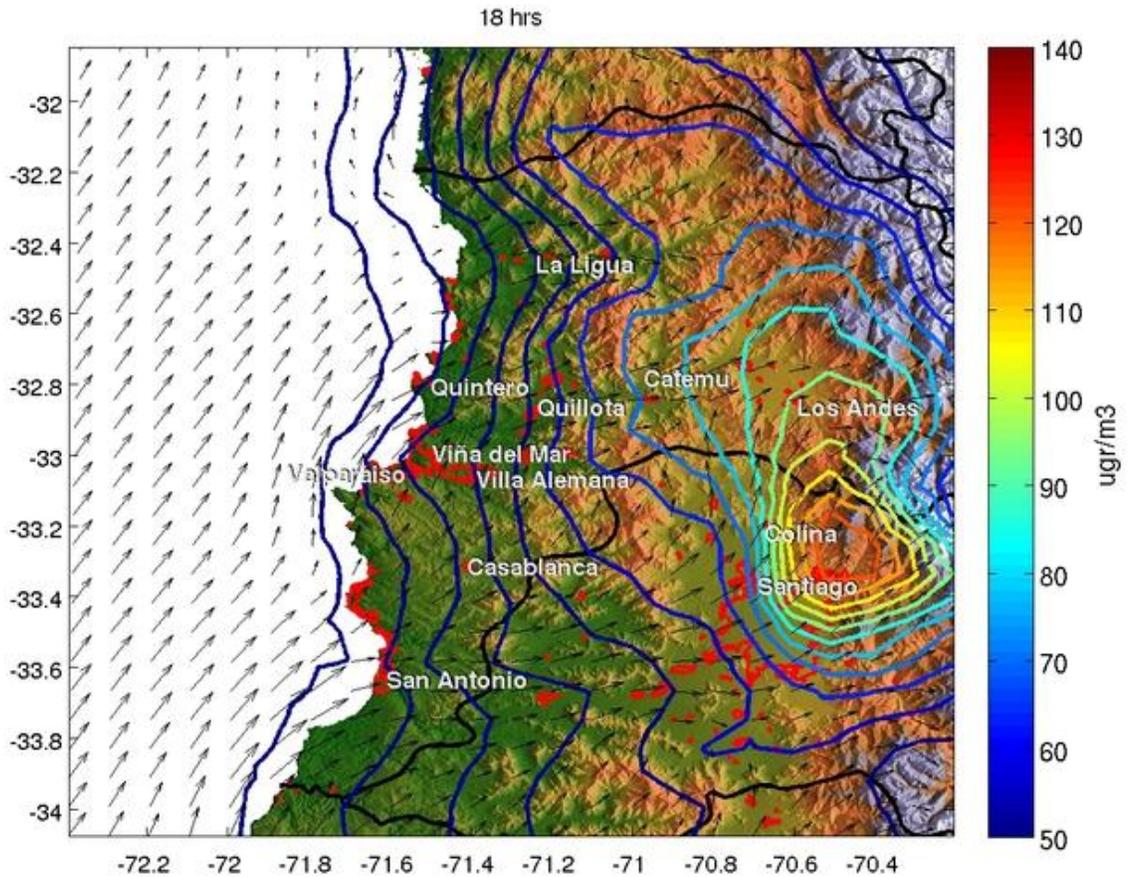


Figura 11.36: Promedio de concentraciones de ozono a las 18:00 durante los meses enero-marzo 2010 según el modelo WRF. A esta hora ha disminuido la radiación solar lo que explica la menor actividad fotoquímica. Mientras el transporte de contaminantes continua, las concentraciones de ozono bajan.

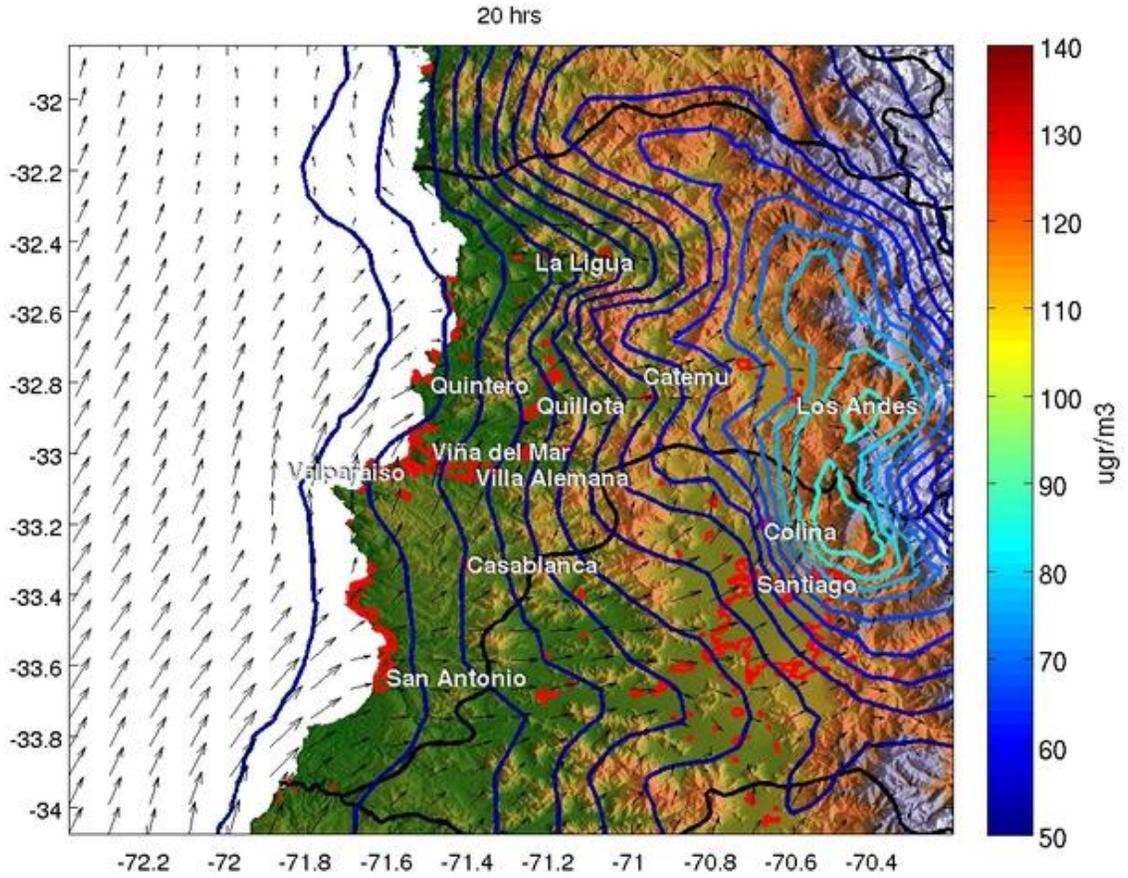


Figura 11.37: Promedio de concentraciones de ozono a las 20:00 durante los meses enero-marzo 2010 según el modelo WRF. Cerca de la hora de la puesta del sol, disminuye la actividad fotoquímica aún más y también el transporte por viento baja en intensidad.

11.4 Material Particulado

Mientras el problema del material particulado es uno de los más importantes dentro del contexto de la contaminación atmosférica también está dentro de los más difíciles de abordar. En la propuesta del consultor para este estudio se había entregado un breve documento que explicaba las dificultades relacionadas. Este documento se adjunta nuevamente a este informe dentro del Anexo V. En resumen, existen muchas incertidumbres asociadas al material particulado. Estas incertidumbres se relacionan a:

- 1) Procesos de formación de material particulado
- 2) Representatividad de las mediciones
- 3) Módulos computacionales todavía no bien desarrollados para fines de modelación

Además a estas tres incertidumbres se agregan las incertidumbres de los inventarios de emisiones. Tal como se verá en lo que sigue, estas incertidumbres relacionadas a los inventarios son centrales en el contexto de la modelación. Estas incertidumbres hacen necesario comentar nuevamente en la sección siguiente sobre el inventario de emisiones (adicional a los comentarios de la sección 11.1).

Dentro de esta sección se tratarán PM₁₀ y PM_{2.5} al mismo tiempo. El análisis limitado de ambos no justifica secciones aparte. En lo que sigue se presentan las observaciones disponibles para PM₁₀ y PM_{2.5} junto con una comparación entre los resultados del modelo.

11.4.1 Observaciones del material particulado y comparación con el modelo

Uno de los problemas fundamentales de las observaciones es que casi no existen observaciones continuas para el PM₁₀. En su gran mayoría, las observaciones disponibles son discretas (promedios diarios) y sólo cada tres días. Sólo en las estaciones La Greda, Los Maitenes, Sur (desde fines de 2009/comienzo 2010) y la estación Los Vientos están disponibles algunas mediciones continuas. La importancia de mediciones continuas se ha mostrado en las secciones anteriores en las que cualquier análisis empieza con los ciclos diarios. Estos ciclos diarios son fundamentales para decir algo sobre el comportamiento de un contaminante y para relacionarlo con factores meteorológicos. En el caso de observaciones discretas (y, además cada tres días) sólo se puede decir algo sobre la magnitud de un problema pero muy poco sobre alguna otra característica. En términos generales se puede decir entonces que las observaciones de PM₁₀ disponibles son muy limitadas para su uso en el análisis del comportamiento de este contaminante y, por lo tanto, tampoco para su comparación con el modelo. En el caso del PM_{2.5}, además, sólo existen datos de la estación Junta de Vecinos que también en forma discreta. Además, dentro de periodos muy cortos están disponibles datos continuos obtenidos dentro del estudio de mediciones paralelo a

éste. Pero también en el caso de PM2.5 se debe decir que la información disponible es muy escasa lo limita mucho su análisis.

En las tablas 11.3 y 11.4 se entregan los periodos de series de tiempo de PM10 y PM2.5, respectivamente, para cada estación de monitoreo. Sólo se entregan los promedios entre los años 2007 a 2010 (o menos en caso de que las estaciones no cuentan con información desde 2007). Junto a estos promedios también se entregan los promedios según el modelo (promedios de ambos periodos simulados).

Las tablas 11.3 y 11.4 representan efectivamente un resumen de las características de las observaciones. La información novedosa y central para esta sección son las últimas columnas: los resultados de las simulaciones. Nuevamente, sólo se trata de los promedios de ambas simulaciones (verano e invierno). Estos promedios se comparan con la climatología de las observaciones entre 2007 – 2010. En otro caso, esta comparación se consideraría demasiado poco detallado. Sin embargo, en este caso esta comparación es suficiente para revelar el problema central: en todas las estaciones las concentraciones observadas son mayor en alrededor un orden de magnitud. Es decir, el modelo no es capaz de simular ni las concentraciones de PM10 ni las de PM2.5 en forma adecuada. Si se acuerda que la modelación es **un** elemento que debe contribuir al análisis, es evidente que con estos resultados ni siquiera es un elemento relevante.

La pregunta que surge entonces es ¿cuál es la razón por el mal desempeño del modelo? En primer lugar y tal como se señala en el Anexo V, los errores de la parte meteorológica y de la fase gaseosa se propagan a los resultados del material particulado. Sin embargo, también se había podido mostrar que los resultados meteorológicos, de NOx y de ozono han sido muy buenos y los errores –aunque existente, bastante bajos. Es decir, las incertidumbres en estos componentes no explican los resultados insatisfactorios de PM10 y PM2.5.

La otra fuente de incertidumbres que contribuyen a los resultados del modelo son los inventarios de emisiones. En el contexto del mal desempeño del modelo se deben analizar con dos enfoques: a) en comparación con el desempeño del modelo en el caso de los NOx y b) en términos de la razón PM10/PM2.5 según las observaciones y según los inventarios.

Según el inventario de emisiones desarrollado en el estudio paralelo a éste, se estiman las emisiones totales de PM10 en 11458 toneladas/año y las de los NOx en 48903 toneladas/año; es decir emisiones de NOx aproximadamente cuatro veces mayores que PM10 (cabe recordar que las emisiones del PM10 contienen las del PM2.5). Si ahora se consideran ambos contaminantes (PM10 y NOx) en primera aproximación primarios y no se consideran procesos de remoción, sus concentraciones globales respectivas en el dominio de modelación deben ser proporcionales a sus emisiones, es decir dentro de todo el dominio debe haber aproximadamente concentraciones cuatro veces mayores de NOx que PM10. Y, efectivamente, a pesar de que todas esas suposiciones no son estrictamente válidas, la razón entre NOx y PM10 es alrededor de 4. En consecuencia, el modelo es consistente en sus resultados y la fuerte subestimación de material particulado tiene su raíz en el inventario de emisiones.

Estación	Periodo	Promedio observado ($\mu\text{gr}/\text{m}^3$)	Promedio simulado ($\mu\text{gr}/\text{m}^3$)
Armat	Enero-2002 --Diciembre-2009	45	4
Catemu	-Enero-2005 --Diciembre-2009	57	2
Lo Campo	Enero-2005 --Diciembre-2009	40	2
La Greda	Enero-2000 --Julio-2010	50	4
Los Maitenes	Enero-2000 --Diciembre-2010	34	4
Valle Alegre	Enero-2000 --Diciembre-2010	28	4
Punchuncaví	Enero-2000 --Marzo-2007	31	3
Hospital Cabildo	Enero-2000 --Diciembre-2009	24	1
Calera	Enero-2000 --Diciembre-2009	61	2
Colmo	Enero-2002 --Diciembre-2008	39	4
Junta de Vecinos	Enero-2000 --Diciembre-2008	60	5
Los Vientos	Enero-2007 --Noviembre-2010	48	2
Casablanca	Julio-2010 --Agosto-2010	50	3
La Ligua	Junio-2010 --Junio-2010	22	2
San Antonio	Julio-2010 --Agosto-2010	32	3
San Felipe	Agosto-2010 --Septiembre-2010	26	2
Villa Alemana	Junio 2010 – Julio 2010	43	4

Tabla 11.3

Estación	Periodo	Promedio observado ($\mu\text{gr}/\text{m}^3$)	Promedio simulado ($\mu\text{gr}/\text{m}^3$)
Junta de Vecinos	Enero-2000 --Diciembre-2008	18	4
Casablanca	Julio-2010 --Agosto-2010	40	3
La Ligua	Junio-2010 --Junio-2010	12	2
San Antonio	Julio-2010 --Agosto-2010	17	2
San Felipe	Agosto-2010 --Septiembre-2010	14	2
Villa Alemana	Junio 2010 – Julio 2010	27	3

Tabla 11.4

En segundo lugar, según el inventario de emisiones un aproximadamente 82% de las emisiones de PM10 son PM2.5 (9376 toneladas por año de PM2.5 que a su vez están incluidas en las 11458 toneladas por año de PM10). En el estudio de mediciones paralelo a éste, se midieron PM10 y PM2.5 n forma simultánea en las estaciones Casablanca, La Ligua, San Antonio, San Felipe y Villa Alemana. Sólo en la estación Casablanca se cumple esta razón de aproximadamente 80%. En las otras varía aproximadamente entre 50 y 60%. Es decir, también hay aquí una muestra de una incertidumbre alta en los inventarios.

Cabe enfatizar en este lugar que la gran mayoría de temas relacionados con material particulado tienen grandes incertidumbres. La brecha en el conocimiento de procesos físicos y físico-químicos

que contribuyen a la formación del material particulado ya se han mencionado en el Anexo V Pero también se permite por parte de este consultor un comentario sobre la dificultad de la estimación de emisiones material particulado. Algunas de las emisiones (en general) se pueden medir; por ejemplo emsiones por chimenea o por un tubo de escape. En el caso del material particulado muchas de sus emisiones justamente no ocurren en forma controlada. Sólo a modo de ejemplo se menciona la erosión eólica. No existe el conocimiento general de cómo cuantificar las emisiones por este proceso. Y es evidente que ellas dependen del viento, la granulometría del suelo, su humedad y vegetación, entre otras. Y también es evidente que es poco probable llegar a una fórmula generalizada para su estimación. Aquellas fórmulas que se encuentran (por ejemplo por parte de la EPA) pueden servir como referencia pero incluso la misma EPA señala de su uso limitado. Ahora, es muy probable que por ejemplo la erosión eólica también contribuya en la Región de Valparaíso, pero con el conocimiento hoy en día es imposible dar estimaciones exactas. Es decir, que la erosión eólica podría ser un factor importante en las emisiones (y que no se considera adecuadamente), pero tampoco que existe evidencia que eso efectivamente sea el caso.

11.4.2 Conclusiones de las simulaciones del material particulado

Tal como se había señalado por parte del consultor en su propuesta a este estudio, el tema de material particulado es muy difícil de abordar. En el caso de la Región de Valparaíso, el primer gran limitante para un análisis del mismo son las observaciones disponibles que generalmente se hacen en forma discreta y día por tercero. Estas mediciones sólo permiten analizar la situación en términos de superación o no superación de normas. Lo que no permiten es analizar procesos y responsabilidades. En segundo lugar, la aplicación del modelo WRF ha mostrado que la información disponible en los inventarios de emisiones n es suficiente para explicar las concentraciones de material particulado en la Región. Cabe enfatizar que aquí no se implica ninguna crítica al estudio de los inventarios; estas incertidumbres son una característica de todos los inventarios de emisiones.

La modelación no ha podido cumplir con la expectativa de las autoridades que fue expresada en los TdR de este estudio. Sin embargo, la aplicación del modelo y sus resultados que evidencian los problemas mencionados también se consideran como un entregable importante de este estudio. También son parte de la base que justifican la optimización de la red de monitoreo en la Región de Valparaíso según la próxima sección.

12 Optimización de la red de monitoreo

El diseño de una red de monitoreo es una tarea compleja que requiere mucho trabajo, discusión, recursos humanos y económicos. Su optimización, además, depende de los recursos económicos disponibles de inversión en cuya función se optimiza la cantidad de las estaciones y la cantidad de variables que se miden en cada una de ellos. Está entonces fuera del alcance de este estudio proponer un diseño óptimo de una red de monitoreo para la Región de Valparaíso. Lo que sí se debe y puede hacer en este estudio dejar por escrito los aspectos que se deberían considerar en el futuro en una red de monitoreo y que tienen un fundamento técnico en los resultados de este informe.

En primer lugar, se considera pertinente mencionar algunos aspectos que son generales (y no específicos para la Región de Valparaíso) pero no necesariamente menos importante:

- 1) Todas las mediciones deben ser continuas (y no discretas). A juicio del consultor no hay justificación hoy en día de limitar el monitoreo a monitoreo equipos discretos. Quedaron en evidencia en este informe los beneficios de mediciones continuas, principalmente en su contribución al análisis de un problema.
- 2) Todas las estaciones con mediciones de calidad del aire deben ser acompañadas por mediciones meteorológicas.
- 3) Es evidente la brecha entre la importancia de la nueva norma de PM2.5 y la falta de monitoreo de este contaminante. Dado su impacto en salud es imprescindible su monitoreo en los centro urbanos de la Región de Valparaíso. La cantidad de centros urbanos que se pueden monitorear depende de los recursos económicos disponibles.
- 4) Debido a sus características físicas y químico-físicas se recomienda acompañar cualquier estación mediciones de PM2.5 con las de PM10, ozono, NOx, hidrocarburos y SO₂. Todas estas variables contribuyen a un posible análisis que a su vez es necesario para tomar medidas de mitigación fundadas.
- 5) Se recomienda mantener todas las estaciones existentes y, además, adecuar su equipamiento según las recomendaciones anteriores.

Aparte de estas recomendaciones generales, también se considera pertinente hacer algunas recomendaciones basadas en resultados de este informe, específicamente relacionadas al problema de ozono en la cuenca de Los Andes y el material particulado en Catemu. (La situación en Puchuncaví/Quintero se ha tratado en forma separada en la sección 8.9.1.)

12.1 Ozono en Los Andes

Las mediciones hechas en Los Andes indican que es muy probable que se supere la norma de ozono en esta ciudad. Siendo un contaminante secundario, también es muy probable que éste no

sea un fenómeno local sino que se extienda a toda la cuenca. La modelación de este estudio sugiere, además, que contribuyen fuentes locales (dentro de la cuenca), fuentes urbanas desde la costa y en el interior de la Región de Valparaíso, fuentes industriales a lo largo del valle Aconcagua y, finalmente, fuentes desde la Región Metropolitana. En este contexto se recomiendan considerar los siguientes aspectos para mejorar vigilar e interpretar la situación:

- 1) Monitoreo continuo de ozono en Los Andes (tal como se mencionó, esta estación debe ser, además, completa en un sentido meteorológico y de calidad del aire). Mientras la campaña de mediciones indica la superación de norma, es evidente que se requiere el monitoreo para establecer el hecho y también vigilar la situación a largo plazo.
- 2) Siendo un contaminante secundario, se puede suponer que el problema sea similar en la ciudad de San Felipe. También se recomienda monitorear en esta ciudad. Esta estación, además, completaría bien el trayecto entre la estación Los Vientos y la de Los Andes.
- 3) La modelación también sugiere un aporte de precursores (y ozono) desde la cuenca de Santiago. Con fines de cuantificar este aporte (y también de cualquier otro contaminante), se recomienda monitorear todas las variables justo en el borde de las dos regiones. Estas mediciones permitirían cuantificar mejor esta contribución “inter-regional”.

12.2 Monitoreo en Catemu

Las mediciones de PM10 en Catemu indican una superación de norma. En este momento, las mediciones (discretas) disponibles no permiten un mayor análisis de la situación aparte de la constatación del hecho de concentraciones elevadas. También existen mediciones de la composición de elementos en el PM10 que demuestran la presencia de cobre y arsénico entre otras. Sin embargo, la única conclusión de que permiten esas mediciones es la contribución de la Fundación Chagres al PM10. Sin embargo, no permite ninguna cuantificación de su contribución en las distintas estaciones de monitoreo. Tampoco excluye la posibilidad de la contribución de otras fuentes. A juicio del consultor no existe otra herramienta en este momento que el inventario de emisiones para asignar responsabilidades. Las mediciones tal como están disponibles no permiten mayor análisis. En este sentido, se recomienda en forma urgente equipar todas las estaciones con sensores continuas. Sólo así se podrá analizar la situación en más detalle a través de sus ciclos diarios y estacionales.

Anexo I, Series de Tiempo de las estaciones para el año 2009

Este anexo incluye los gráficos indicados en la sección 3. Las unidades para las variables en los gráficos de las series de tiempo son: velocidad del viento (m/s), dirección del viento (grados), temperatura (grados Celsius), humedad relativa (%), presión (mbar), precipitación (mm/hr), radiación (W/m^2), ozono ($\mu gr/m^3$), MP10 ($\mu gr/m^3$), MP2.5 ($\mu gr/m^3$).

No se incluyen estas unidades en los gráficos. La información de cada estación se encuentra en:

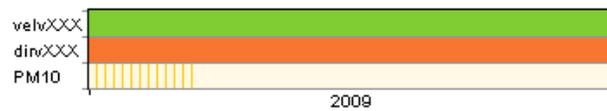
Estación Armat	148
Estación Bomberos-Quillota	150
Estación Calera	152
Estación Catemu	154
Estación Colmo	155
Estación Concón	157
Estación Chagres	160
Estación GNL	163
Estación Hidroeléctrica La Higuera	165
Estación Junta de Vecinos	167
Estación La Cruz-Quillota	169
Estación La Cruz	171
Estación La Palma	173
Estación Las Gaviotas	175
Estación Lo Campo	177
Estación Los Vientos	178
Estación Manzanar	181
Estación Mina UVA	183
Estación Nehuenco	185
Estación Romeral	187
Estación Rural	188
Estación San Pedro	191
Estación Santa Margarita	193
Estación Terminal de combustibles Campiche	194
Viña Cosude	196

Estación Armat

Variables

velvXXX, dirvXXX

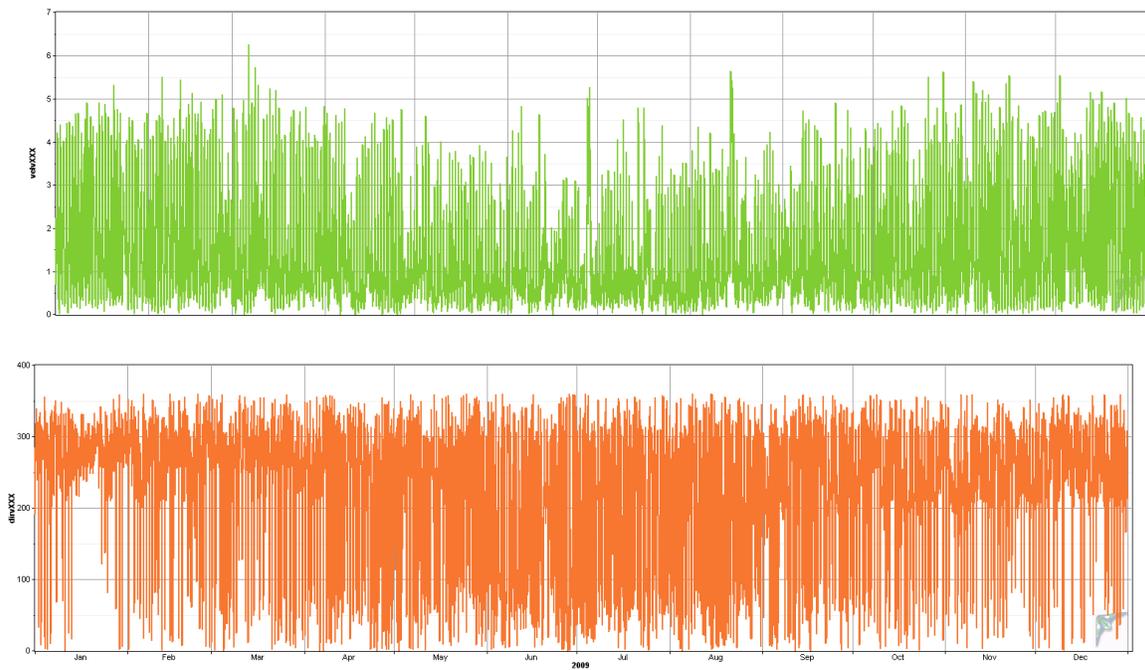
Cobertura temporal de los datos



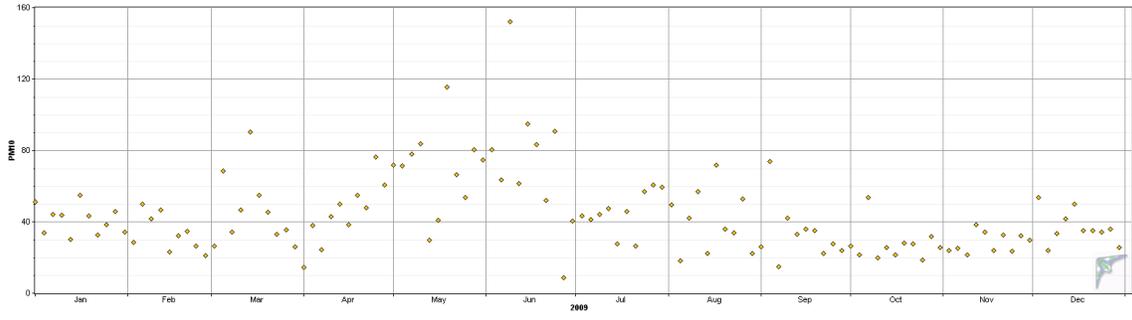
(colores indican que el período cuenta con registros)

Gráficos de las series de tiempo

Velocidad y dirección del viento



PM10

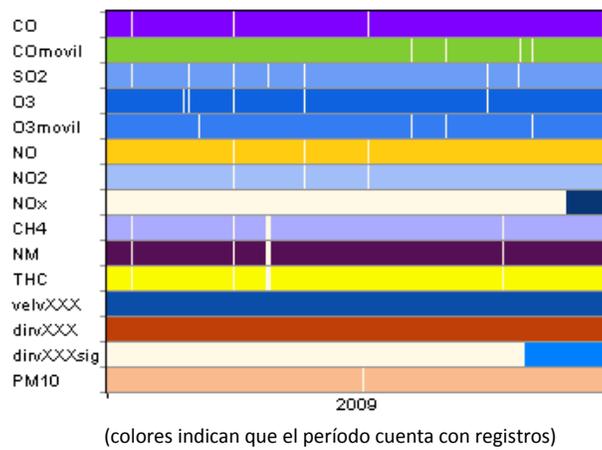


Estación Bomberos-Quillota

Variables

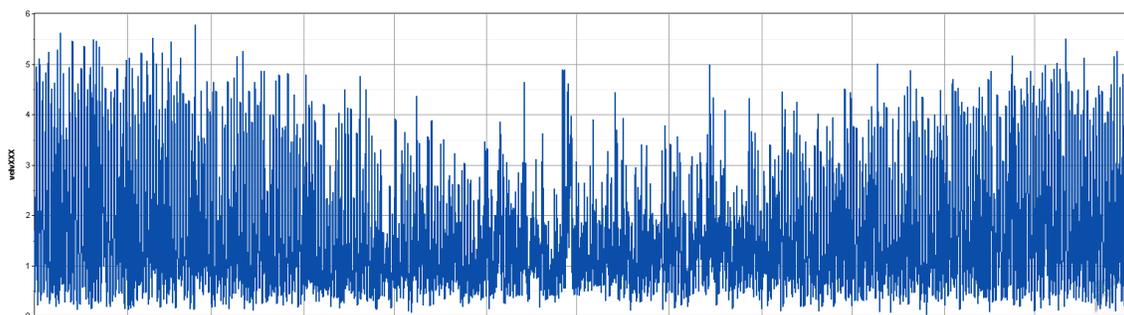
CO, COmovil, SO2, O3, O3movil, NO, NO2, NOx, CH4, HCNM, THC, velvXXX, dirvXXX, dirvXXXsig, PM10

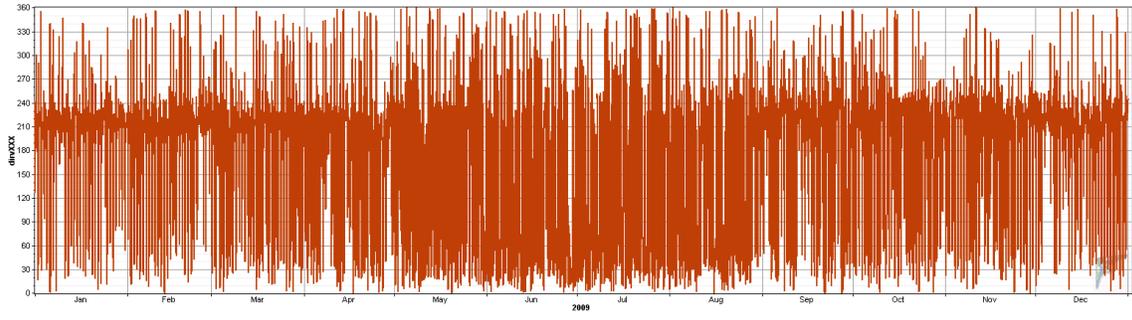
Cobertura temporal de los datos



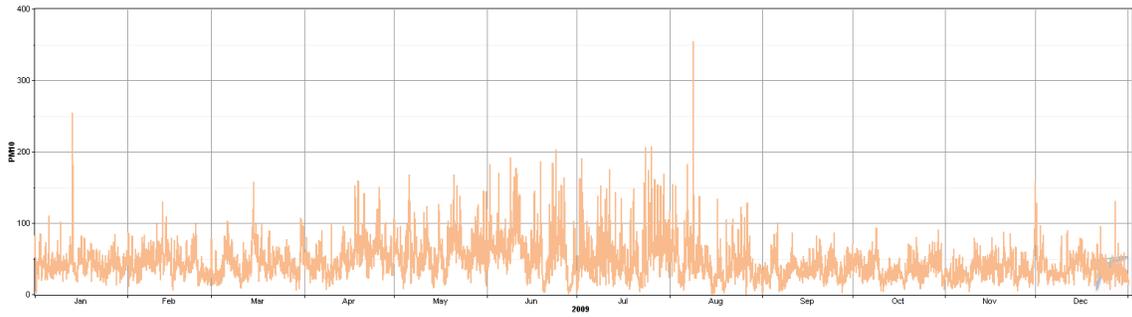
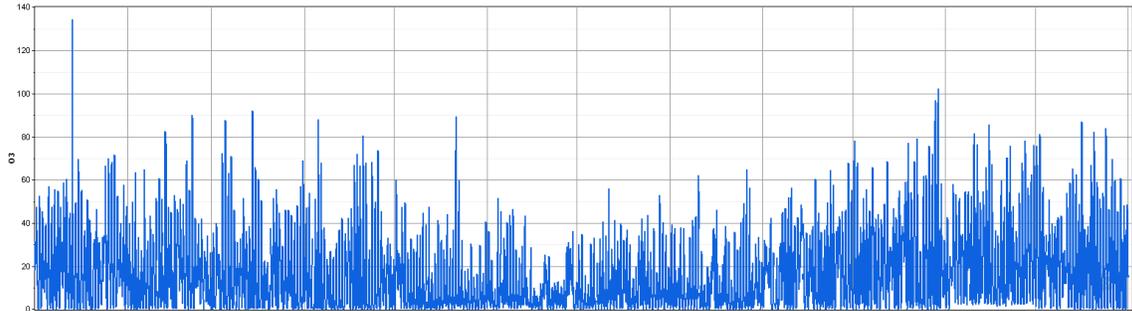
Gráficos de las series de tiempo

Velocidad y dirección del viento





O3 y PM10

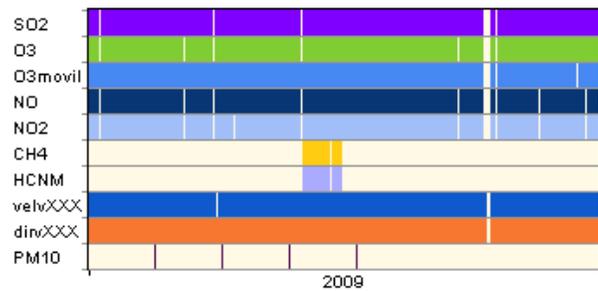


Estación Calera

Variables

SO2, O3, O3movil, NO, NO2, CH4, HCNM, velvXXX, dirvXXX, PM10

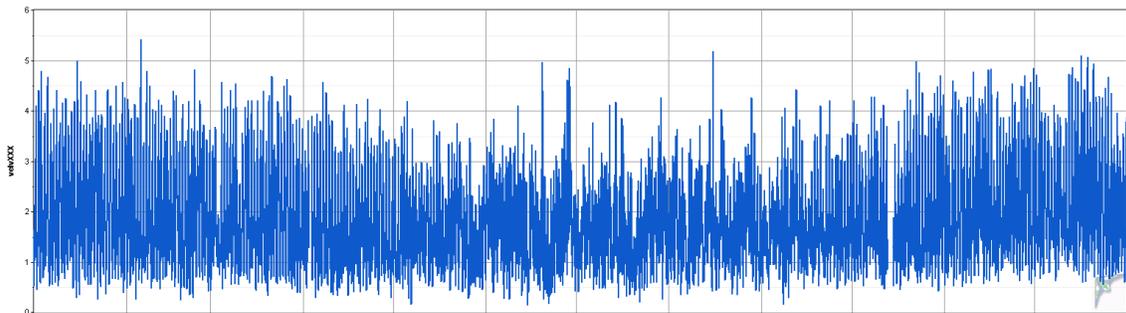
Cobertura temporal de los datos

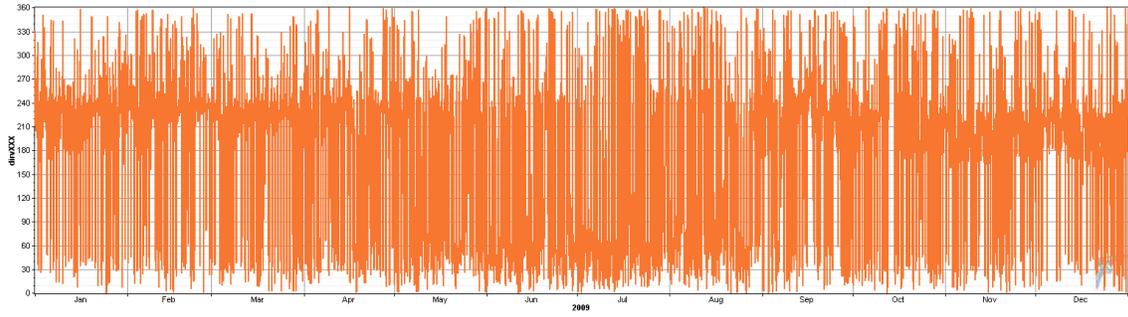


(colores indican que el período cuenta con registros)

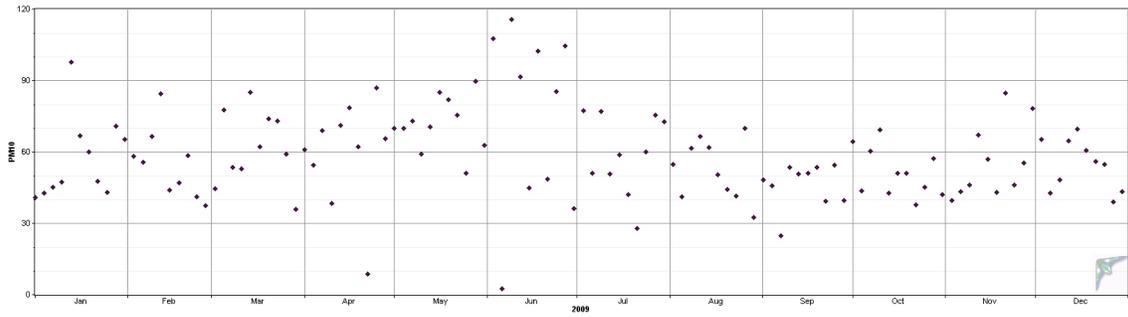
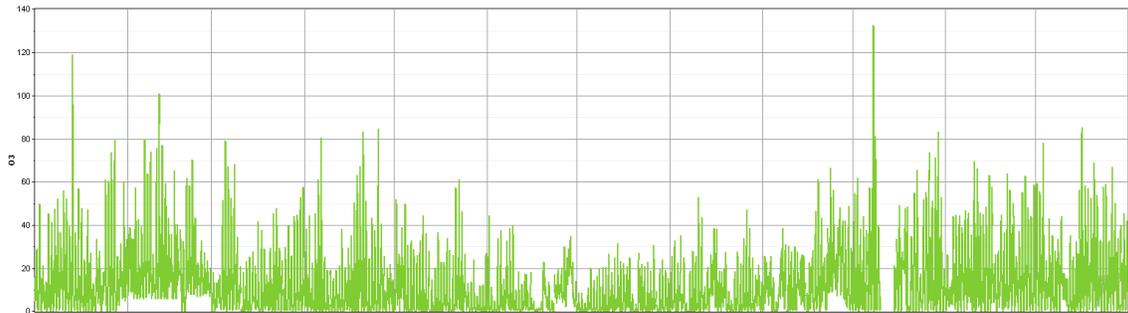
Gráficos de las series de tiempo

Velocidad y dirección del viento





O3 y PM10



Estación Catemu

Variables

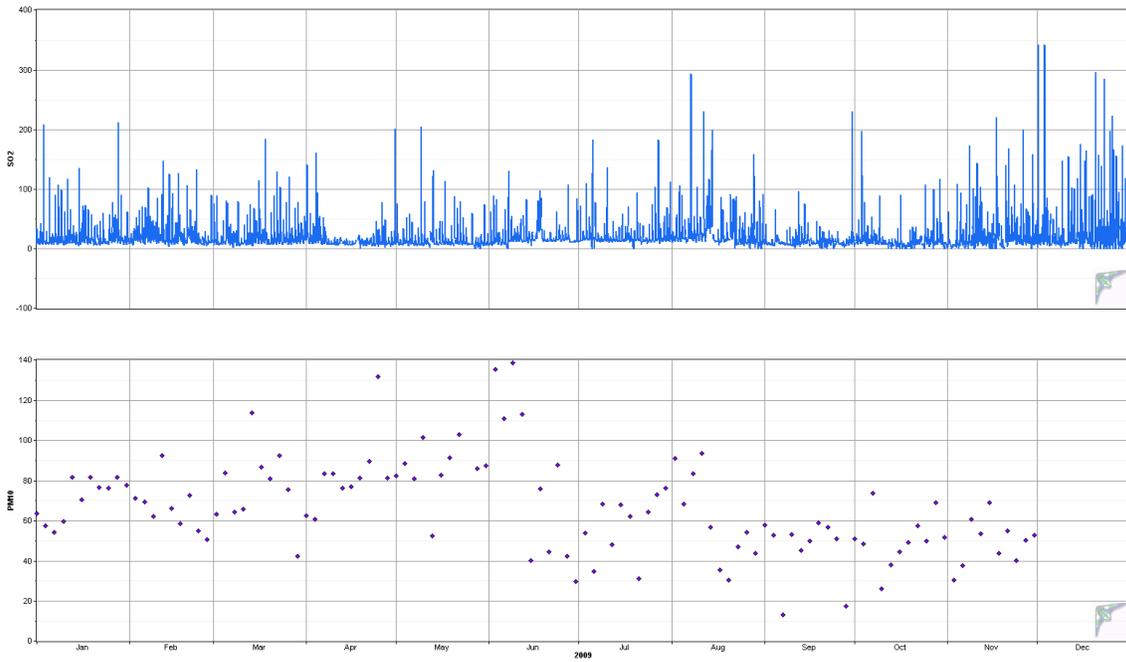
SO2 y PM10

Cobertura temporal de los datos



Gráficos de las series de tiempo

SO2 y PM10

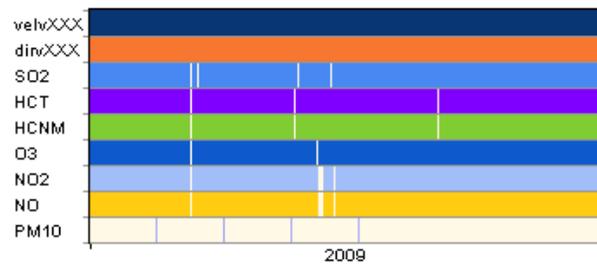


Estación Colmo

Variables

velvXXX, dirvXXX, SO2, HCT, HCNM, O3, NO2, NO, PM10

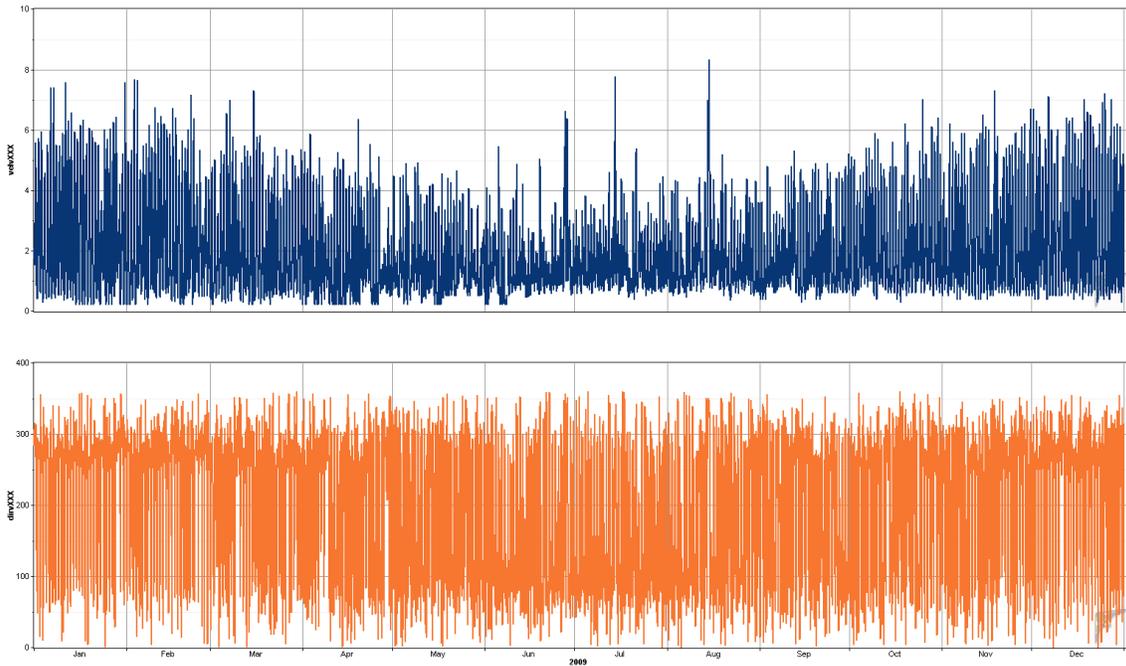
Cobertura temporal de los datos



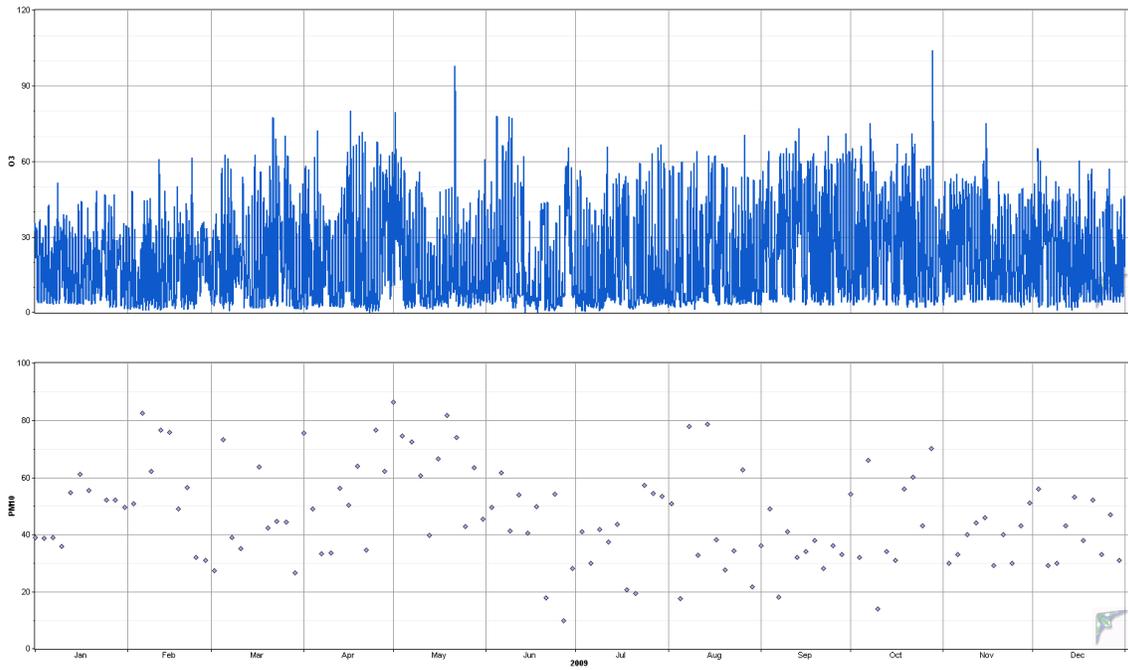
(colores indican que el período cuenta con registros)

Gráficos de las series de tiempo

Velocidad y dirección del viento



O3 y PM10

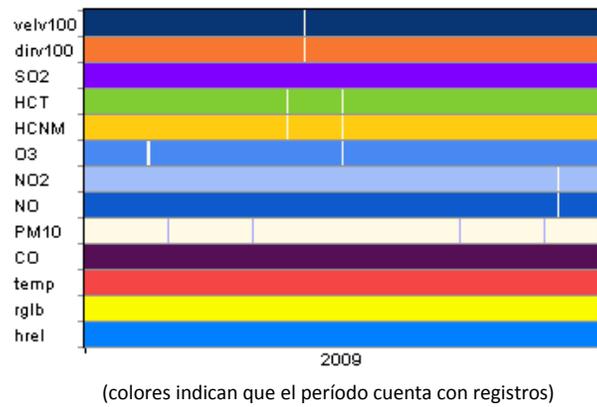


Estación Concón

Variables

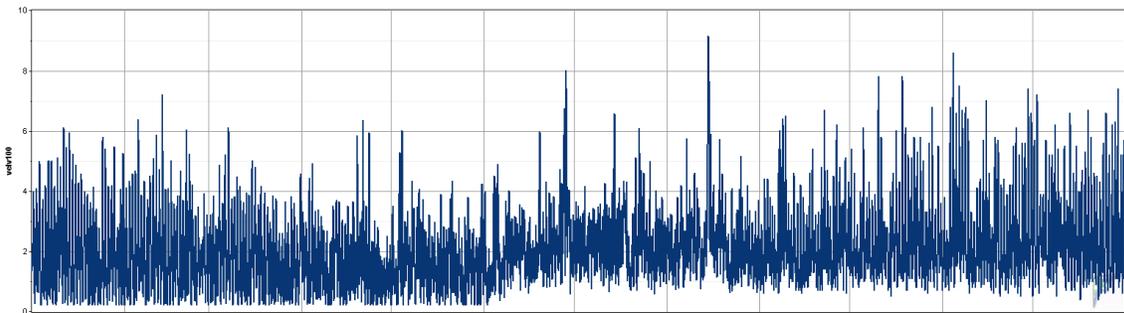
velv100, dirv100, SO2, HCT, HCNM, O3, NO2, NO, PM10, CO, temp, rglb, hrel

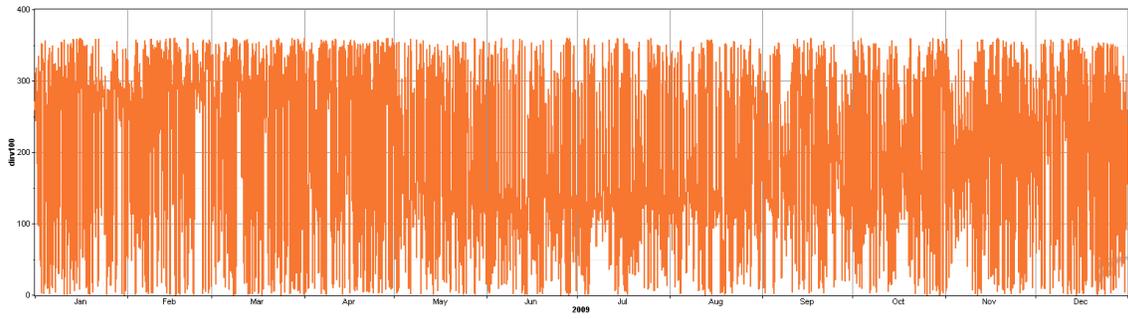
Cobertura temporal de los datos



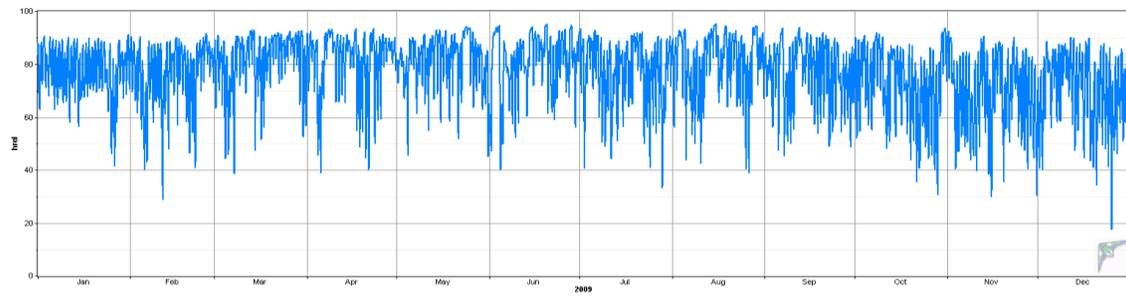
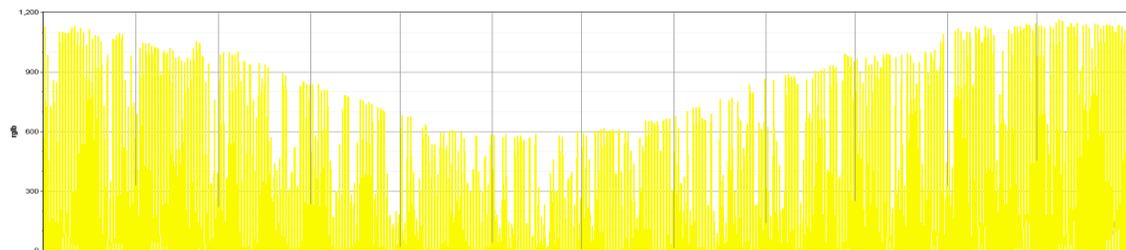
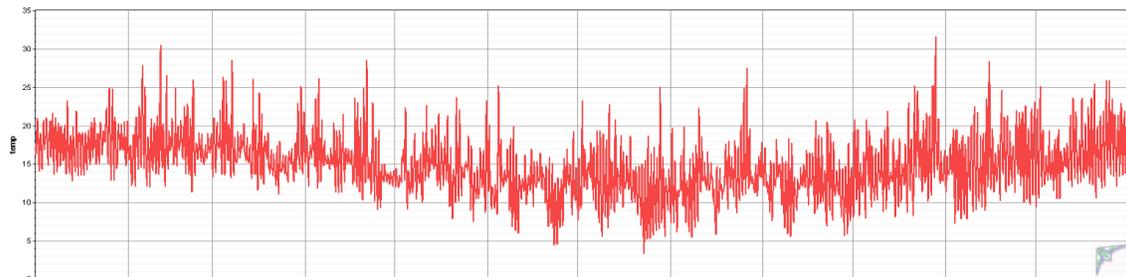
Gráficos de las series de tiempo

Velocidad y dirección del viento

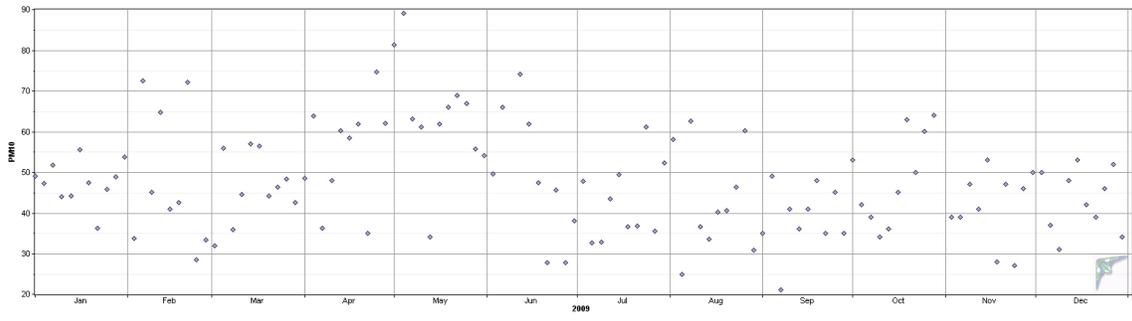
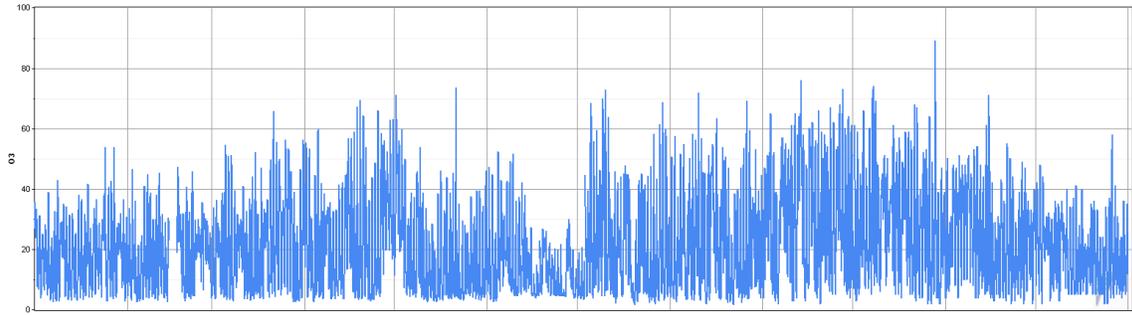




Temperatura, Radiación Solar y Humedad Relativa



O3 y PM10

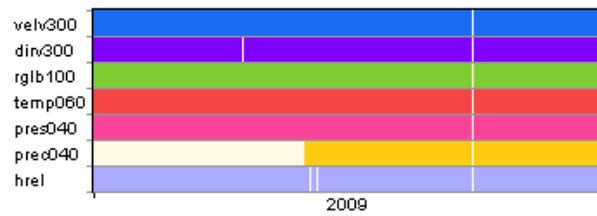


Estación Chagres

Variables

velv300, dirv300, rglb100, temp060, pres040, prec040, hrel

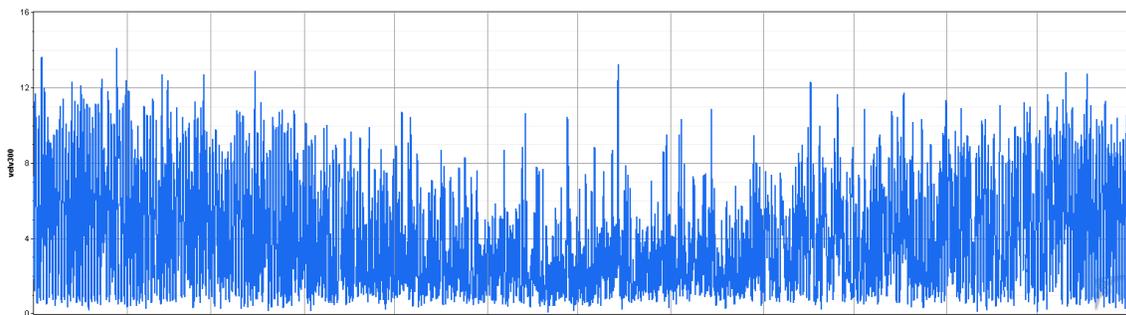
Cobertura temporal de los datos

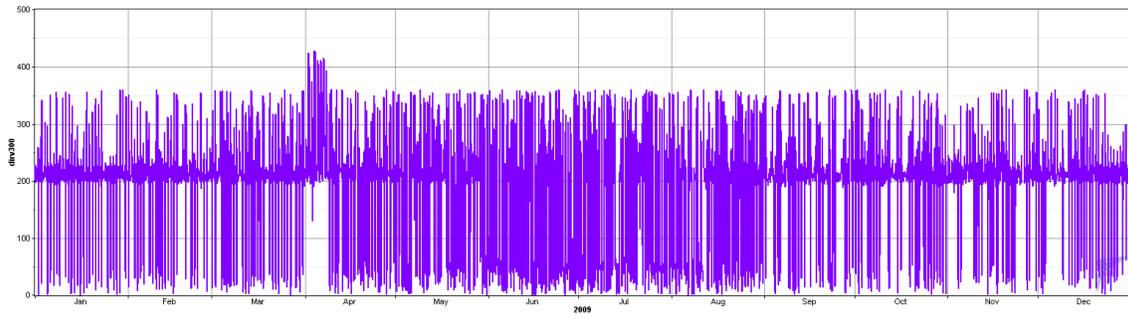


(colores indican que el período cuenta con registros)

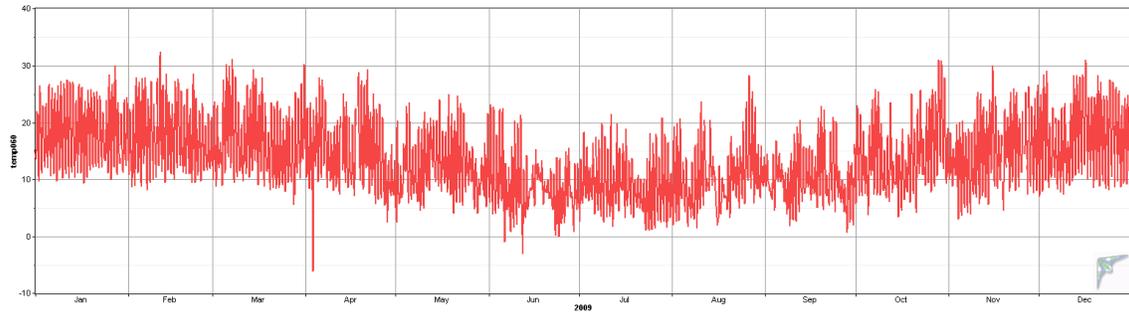
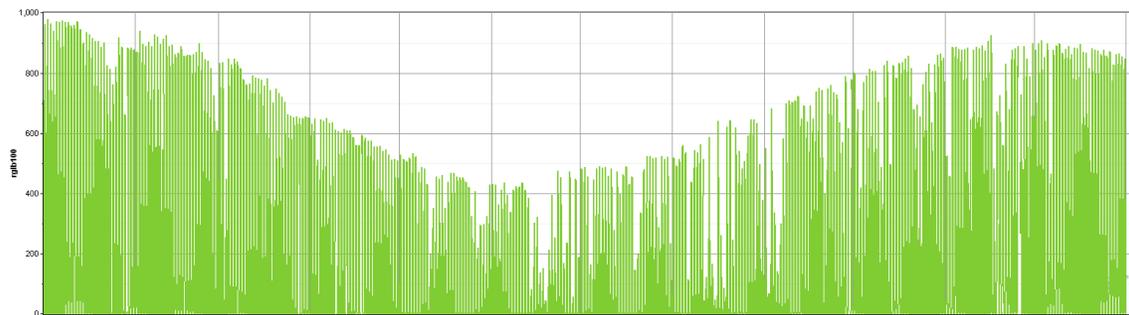
Gráficos de las series de tiempo

Velocidad y dirección del viento

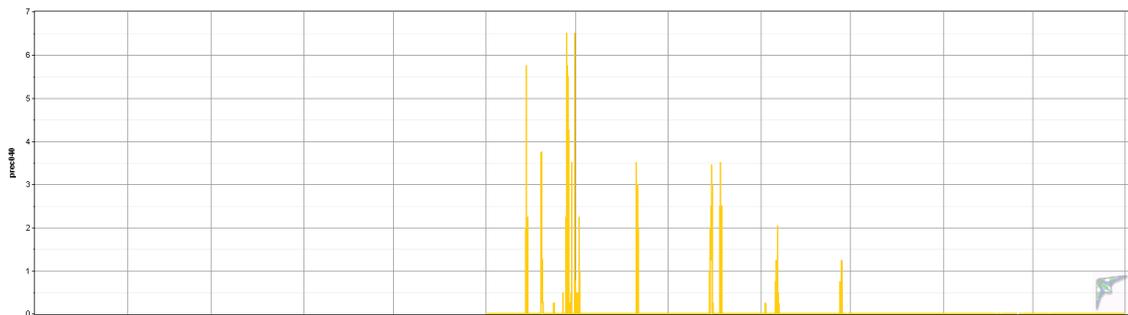


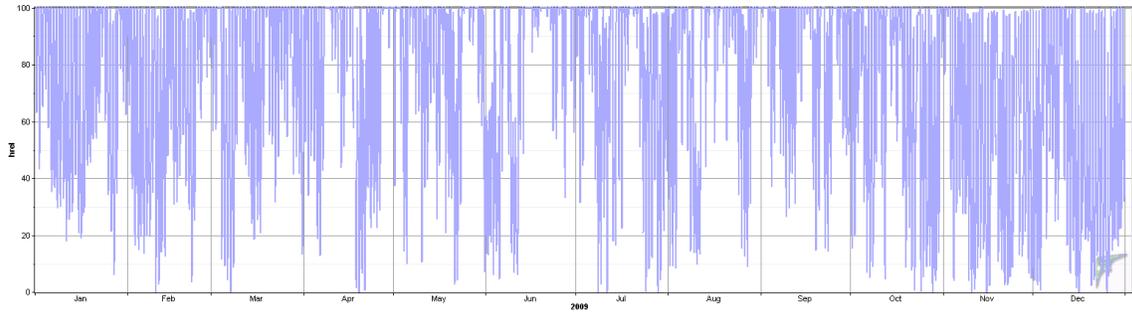


Radiación Solar y Temperatura



Precipitación y Humedad Relativa



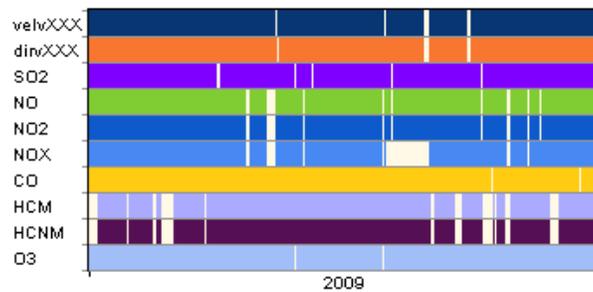


Estación GNL

Variables

velvXXX, dirvXXX, SO2, NO, NO2, NOX, CO, HCM, HCNM, O3

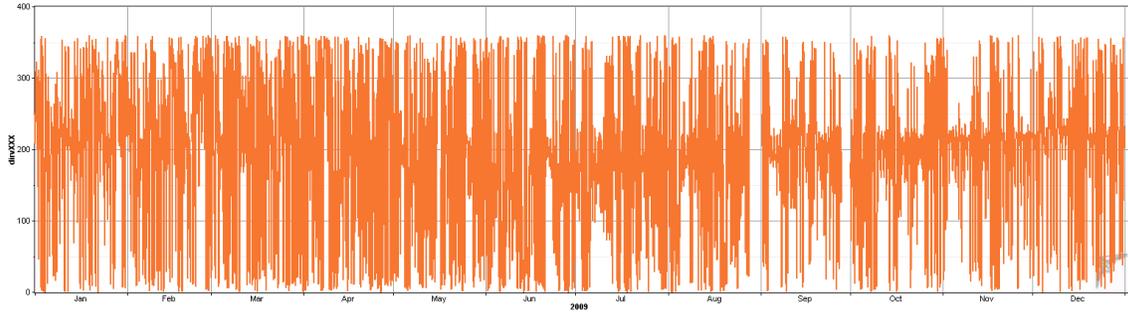
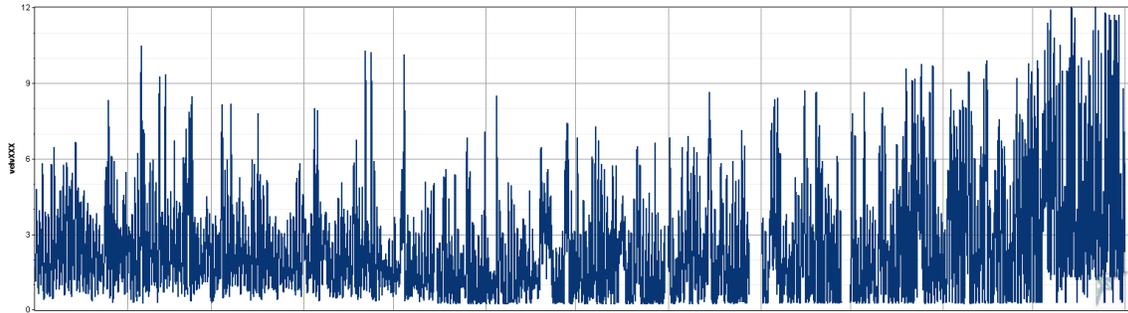
Cobertura temporal de los datos



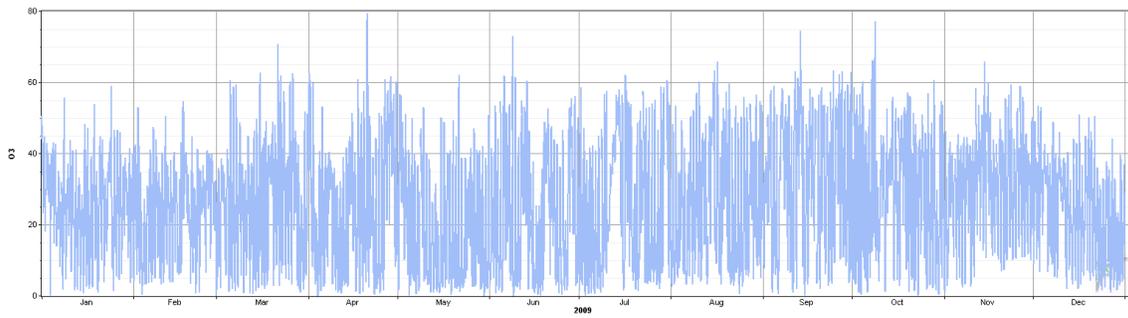
(colores indican que el período cuenta con registros)

Gráficos de las series de tiempo

Velocidad y dirección del viento



O3

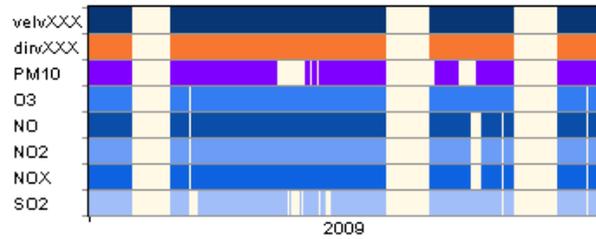


Estación Hidroeléctrica La Higuera

Variables

velvXXX, dirvXXX, PM10, O3, NO, NO2, NOX, SO2

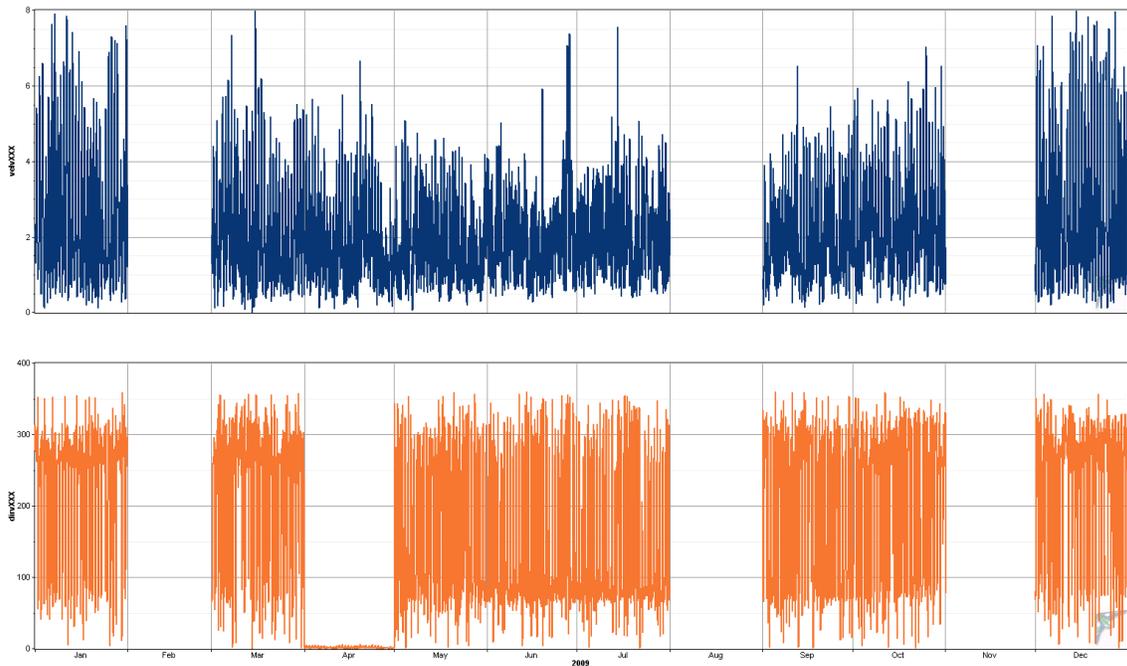
Cobertura temporal de los datos



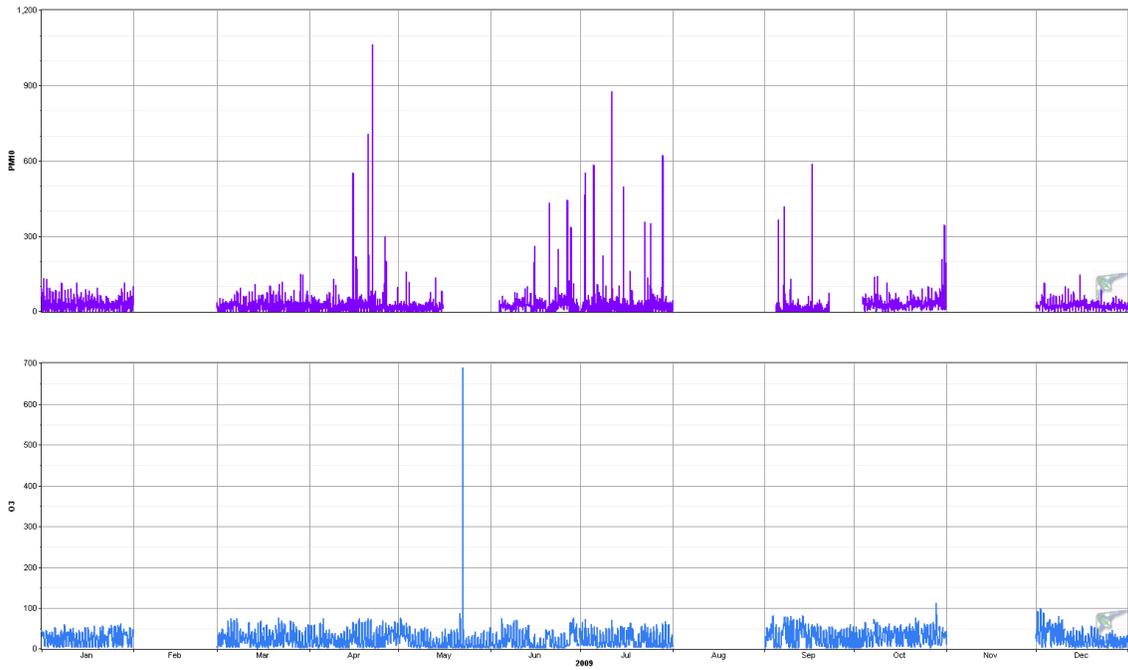
(colores indican que el período cuenta con registros)

Gráficos de las series de tiempo

Velocidad y dirección del viento



O3 y PM10

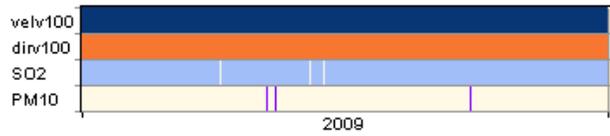


Estación Junta de Vecinos

Variables

velv100, dirv100, SO2, PM10

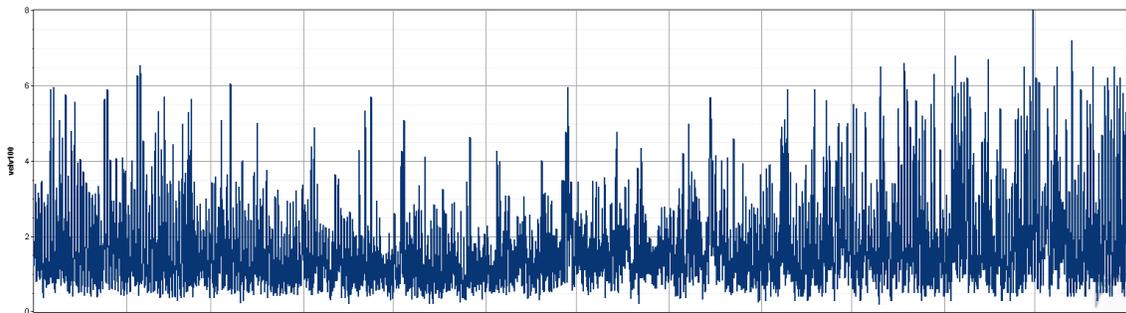
Cobertura temporal de los datos

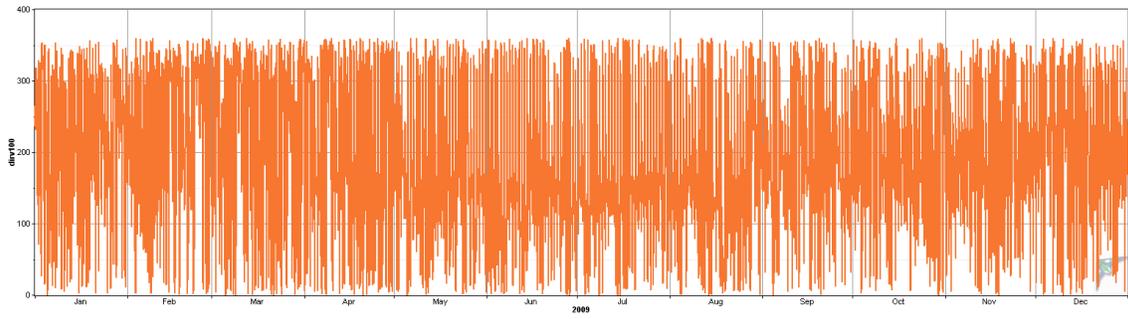


(colores indican que el período cuenta con registros)

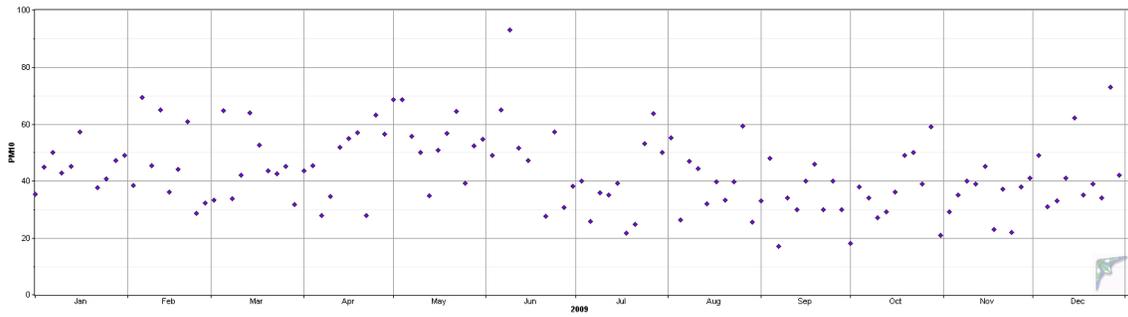
Gráficos de las series de tiempo

Velocidad y dirección del viento





PM10

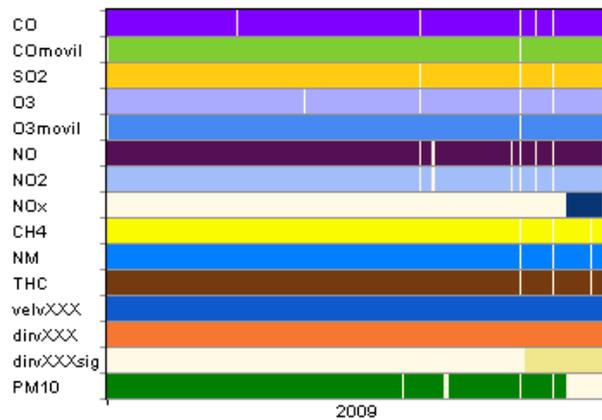


Estación La Cruz-Quillota

Variables

CO, COmovil, SO2, O3, O3movil, NO, NO2, NOx, CH4, NM, THC, velvXXX, dirvXXX, dirvXXXsig, PM10

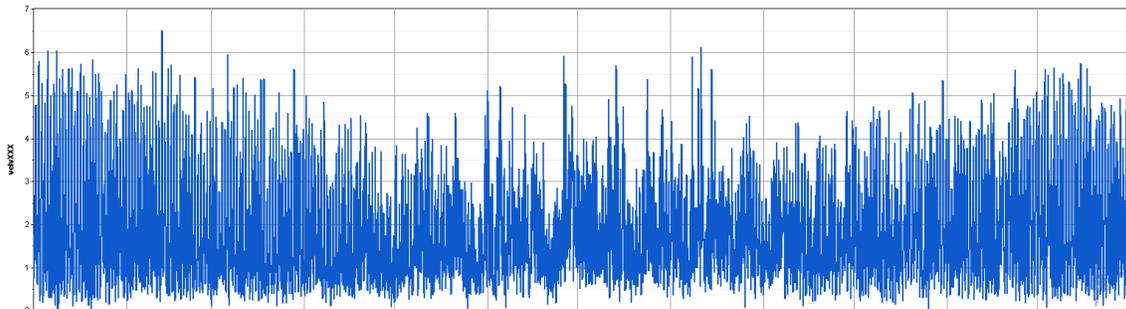
Cobertura temporal de los datos

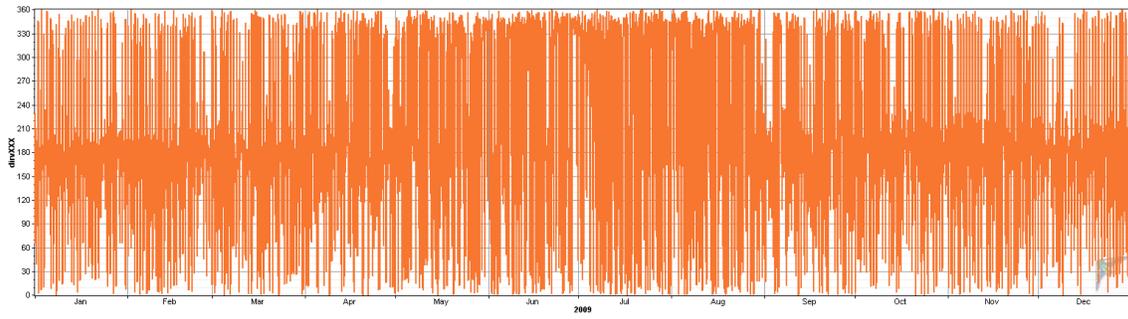


(colores indican que el período cuenta con registros)

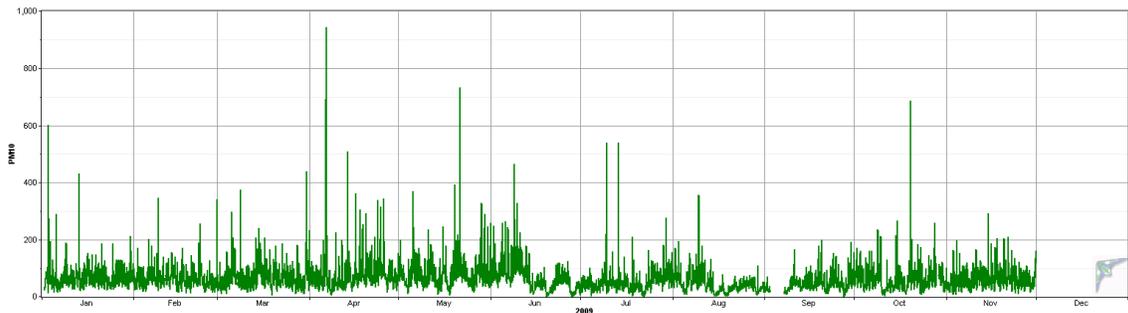
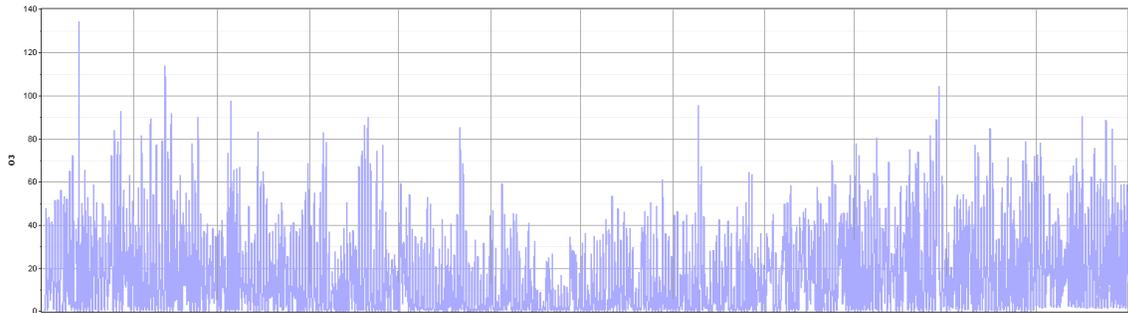
Gráficos de las series de tiempo

Velocidad y dirección del viento





O3 y PM10

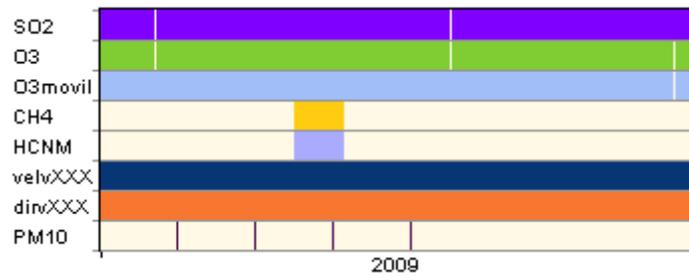


Estación La Cruz

Variables

SO2, O3, O3movil, CH4, HCNM, velvXXX, dirvXXX, PM10

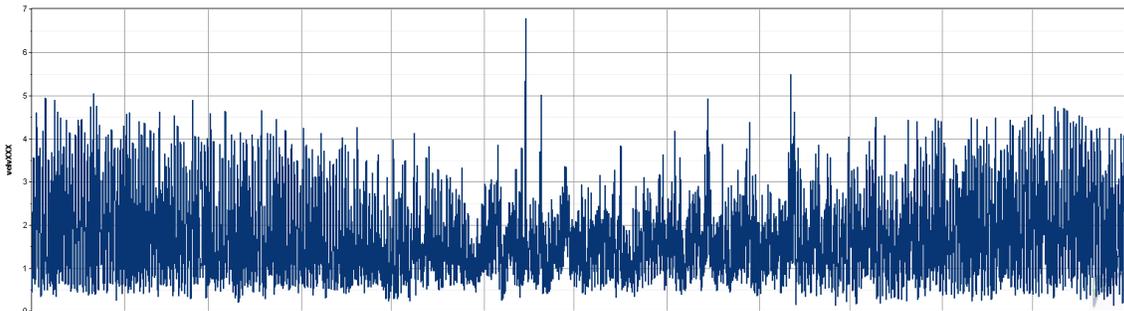
Cobertura temporal de los datos

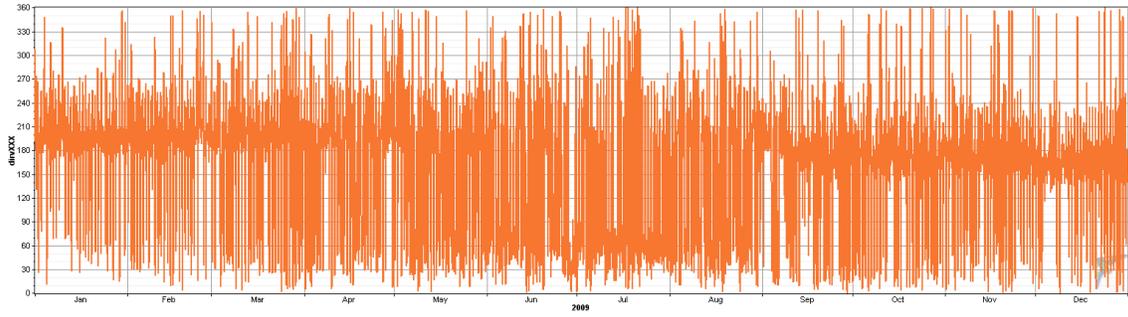


(colores indican que el período cuenta con registros)

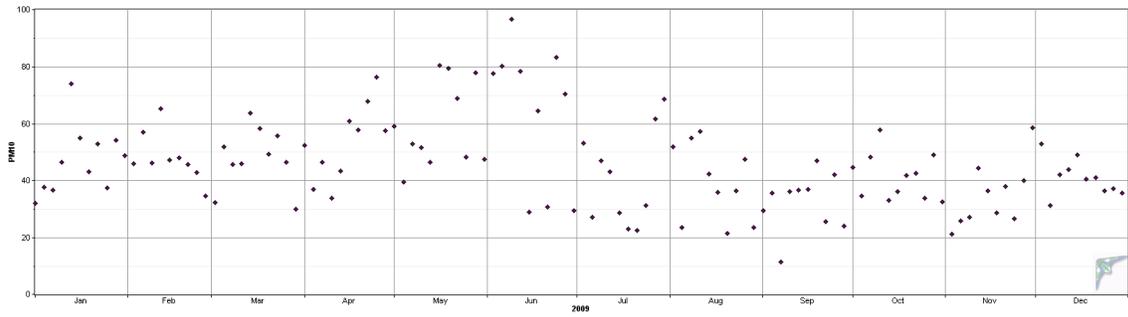
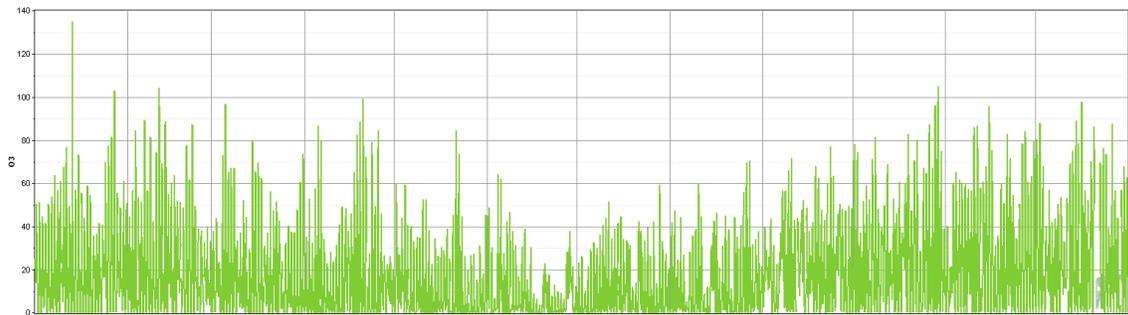
Gráficos de las series de tiempo

Velocidad y dirección del viento





O3 y PM10

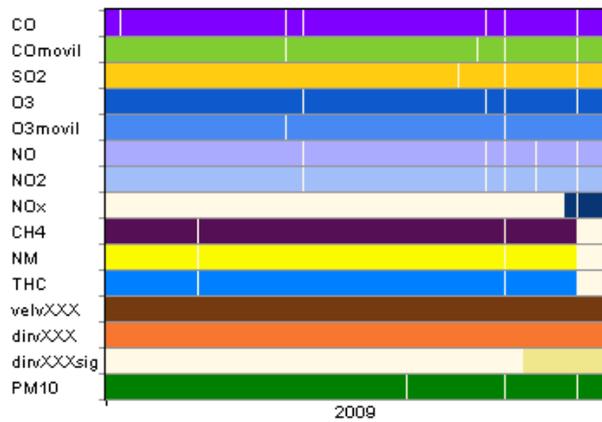


Estación La Palma

Variables

CO, COmovil, SO2, O3, O3movil, NO, NO2, NOx, CH4, NM, THC, velvXXX, dirvXXX, dirvXXXsig, PM10

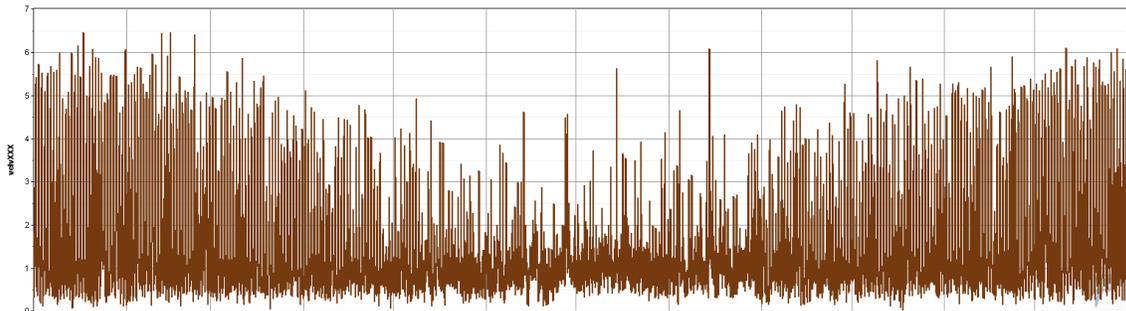
Cobertura temporal de los datos

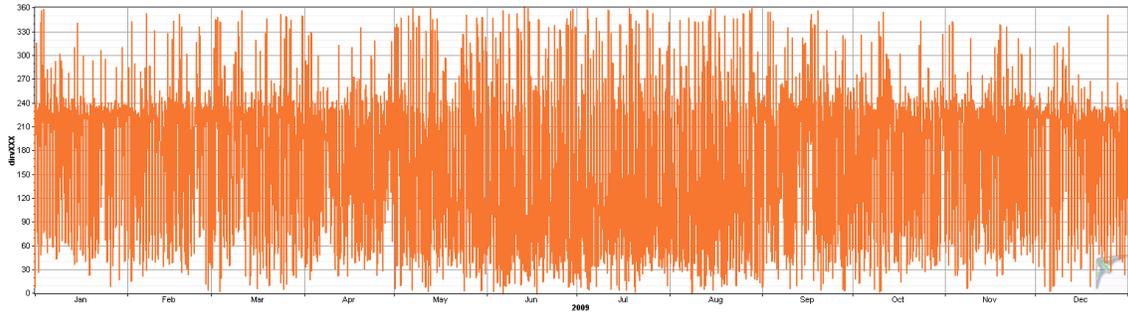


(colores indican que el período cuenta con registros)

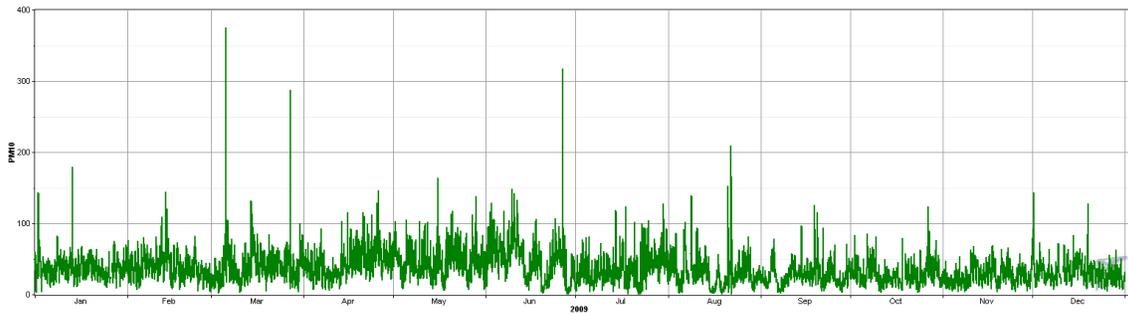
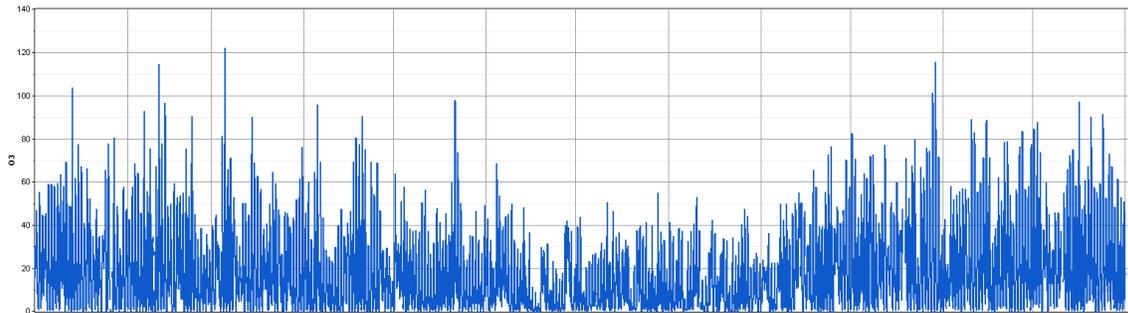
Gráficos de las series de tiempo

Velocidad y dirección del viento





O3 y PM10



Estación Las Gaviotas

Variables

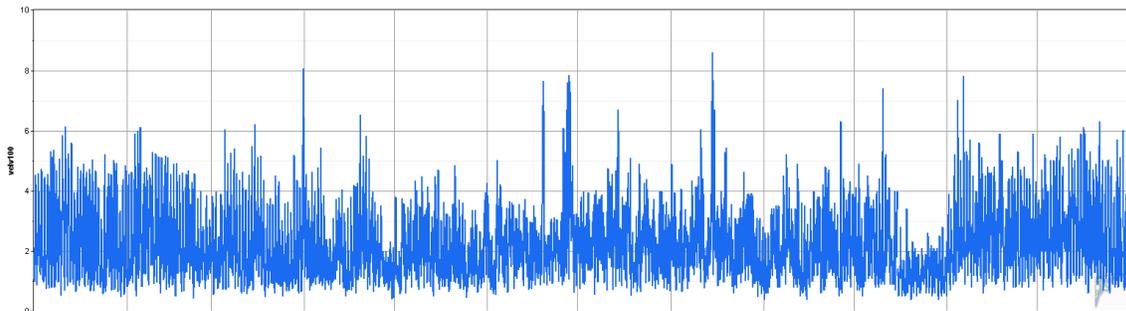
velv100, dirv100, SO2

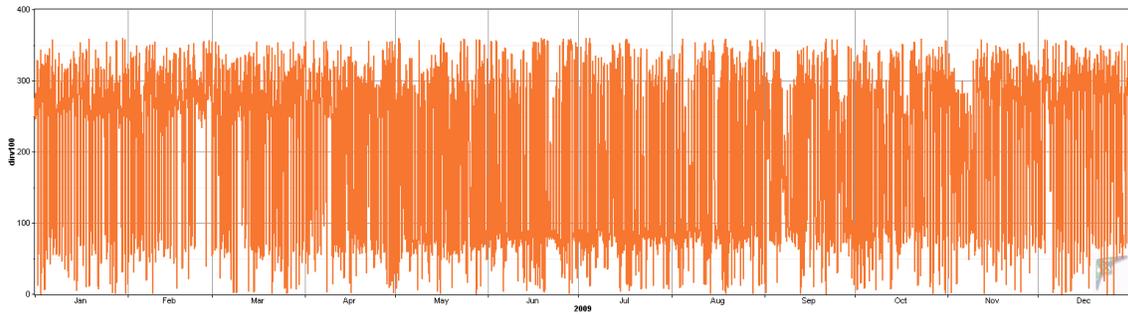
Cobertura temporal de los datos



Gráficos de las series de tiempo

Velocidad y dirección del viento



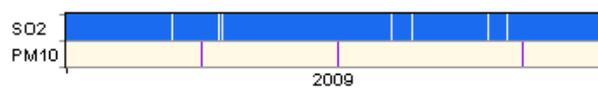


Estación Lo Campo

Variables

SO2 y PM10

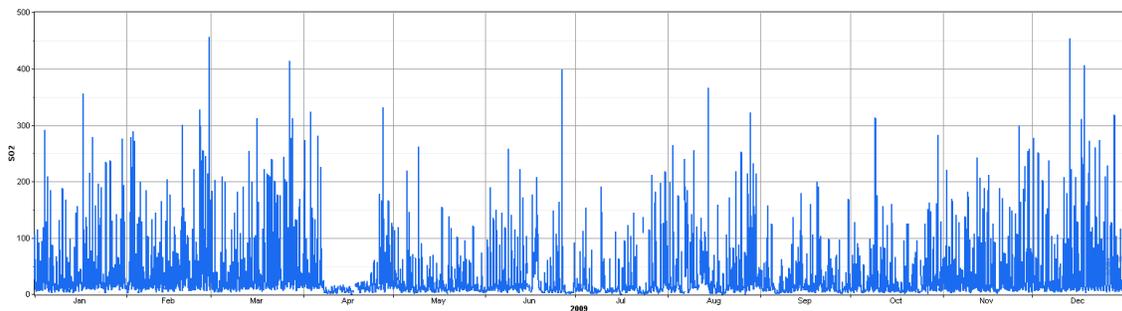
Cobertura temporal de los datos



(colores indican que el período cuenta con registros)

Gráficos de las series de tiempo

SO2

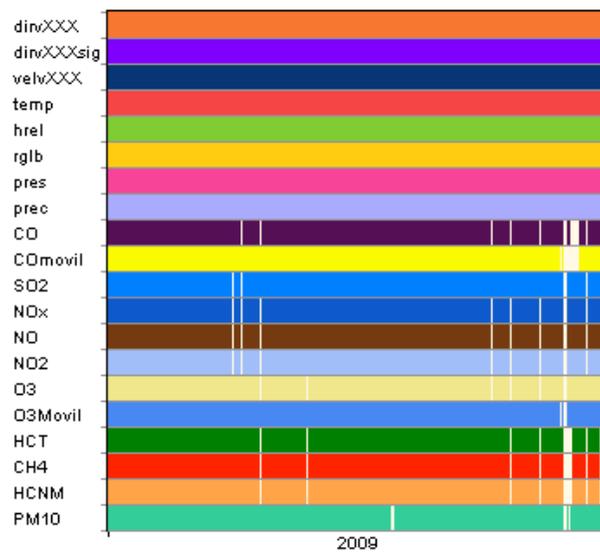


Estación Los Vientos

Variables

dirvXXX, dirvXXXsig, velvXXX, temp, hrel, rglb, pres, prec, CO, COmovil, SO2, NOx, NO, NO2, O3, O3Movil, HCT, CH4, HCNM, PM10

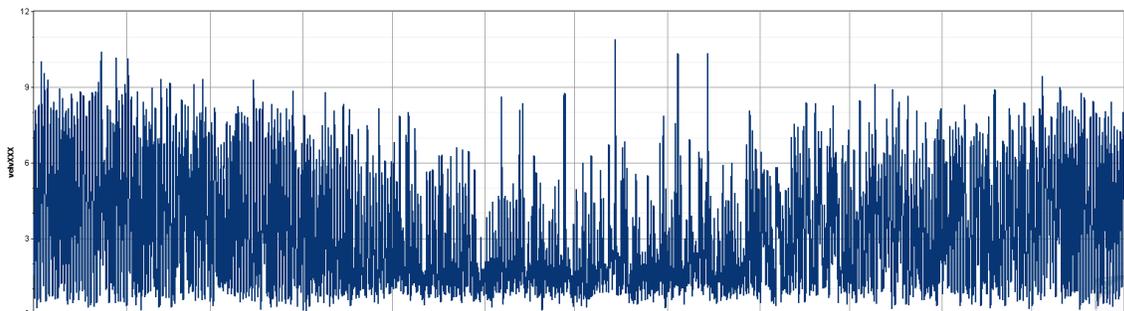
Cobertura temporal de los datos

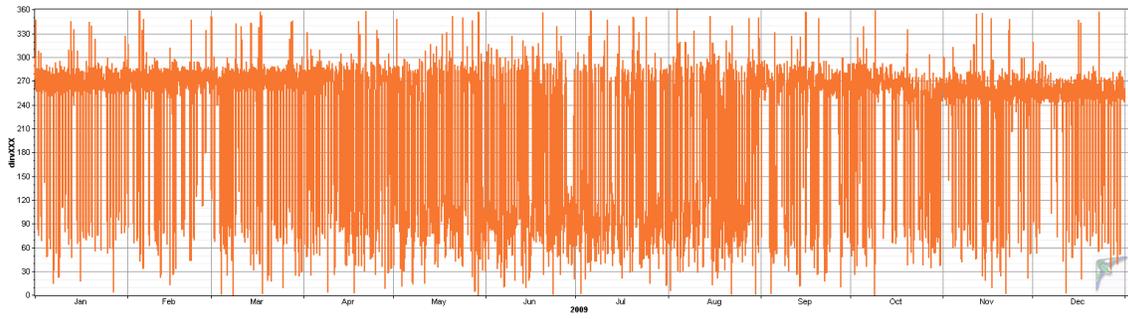


(colores indican que el período cuenta con registros)

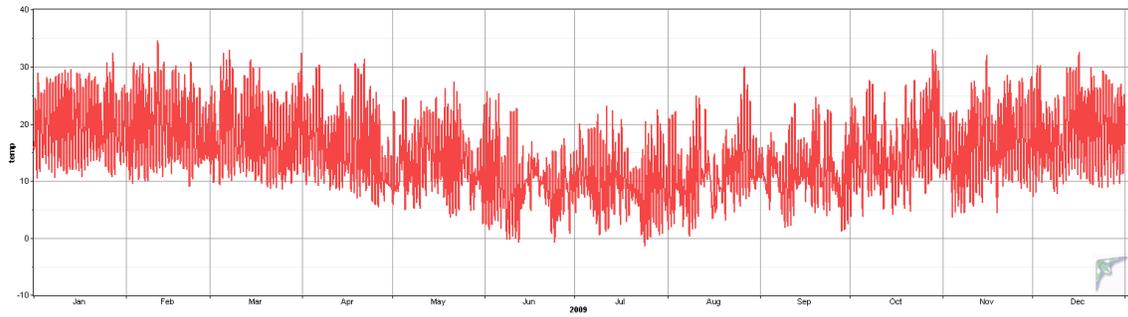
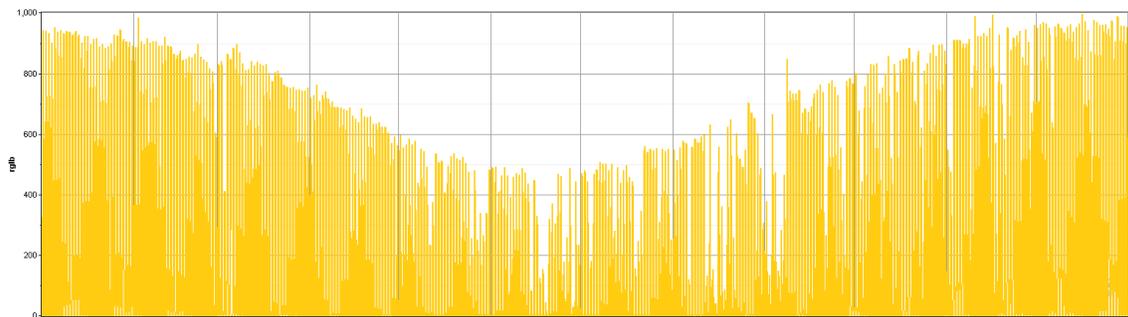
Gráficos de las series de tiempo

Velocidad y dirección del viento



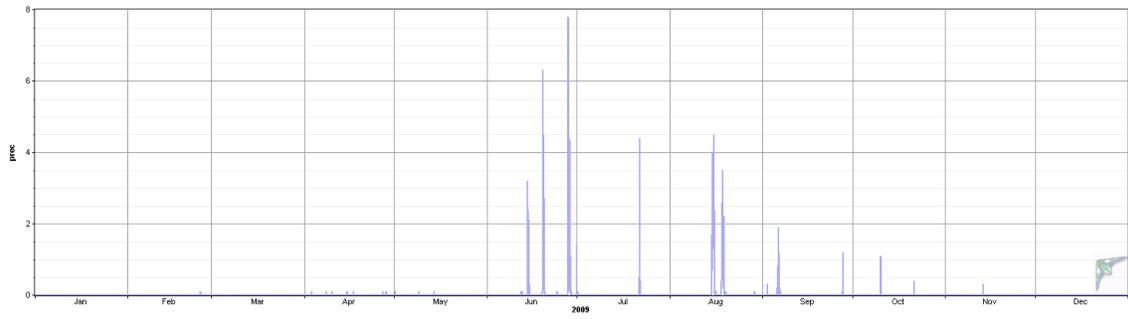


Radiación Solar y Temperatura

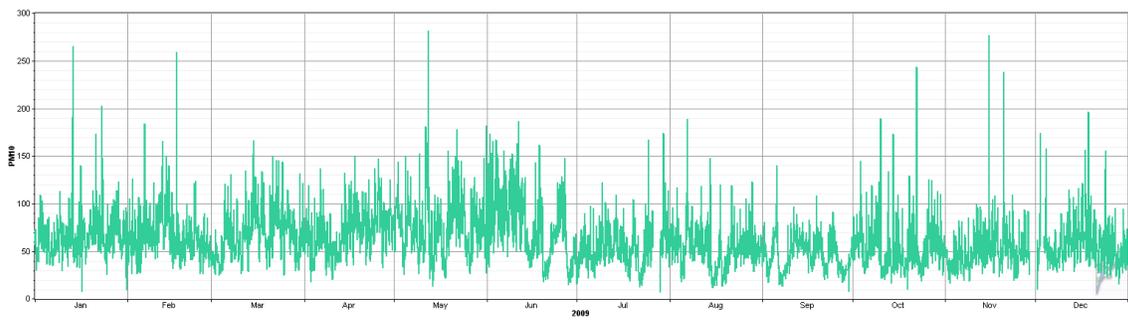
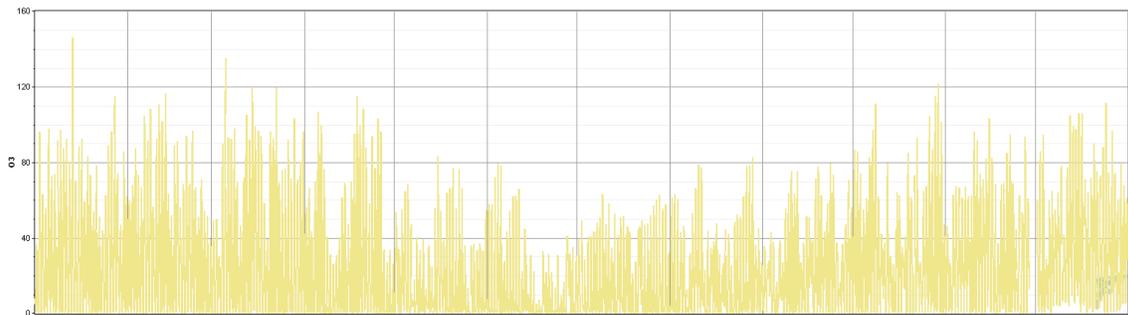


Humedad Relativa y Precipitación





O3 y PM10

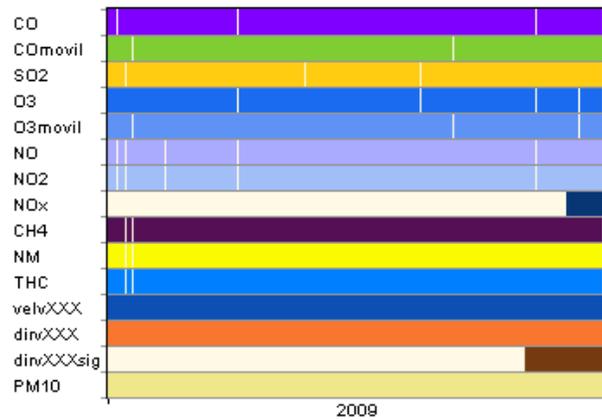


Estación Manzanar

Variables

CO, COmovil, SO2, O3, O3movil, NO, NO2, NOx, CH4, NM, THC, velvXXX, dirvXXX, dirvXXXsig, PM10

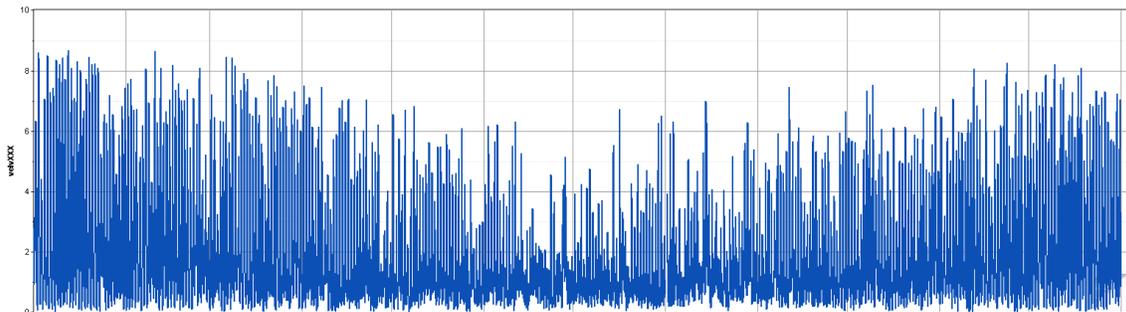
Cobertura temporal de los datos

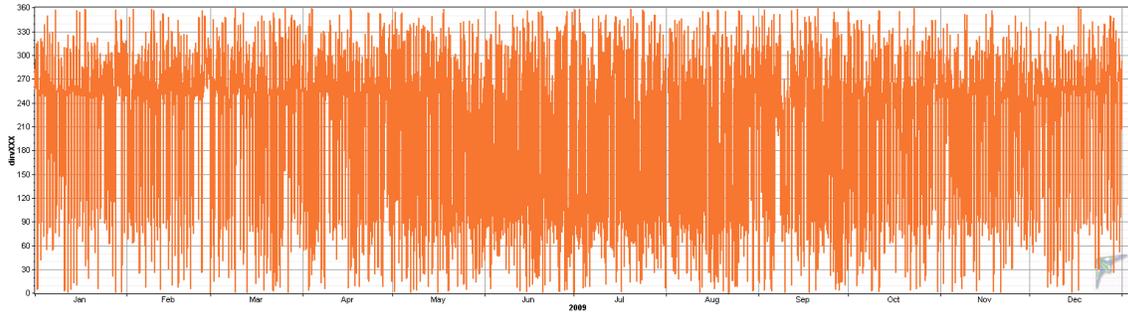


(colores indican que el período cuenta con registros)

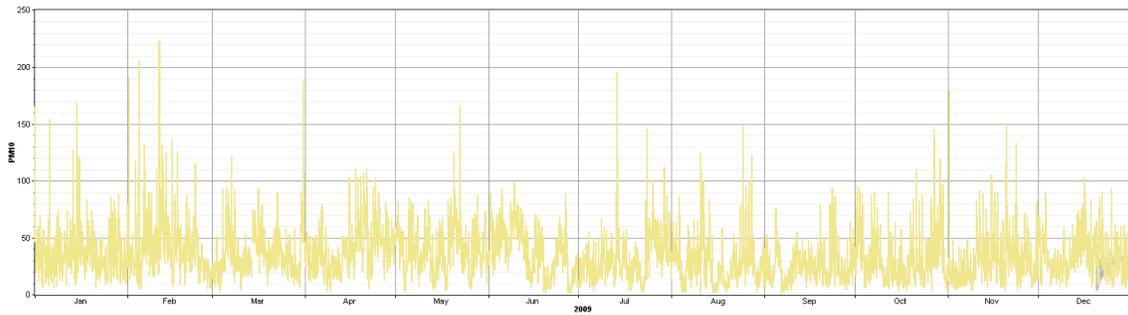
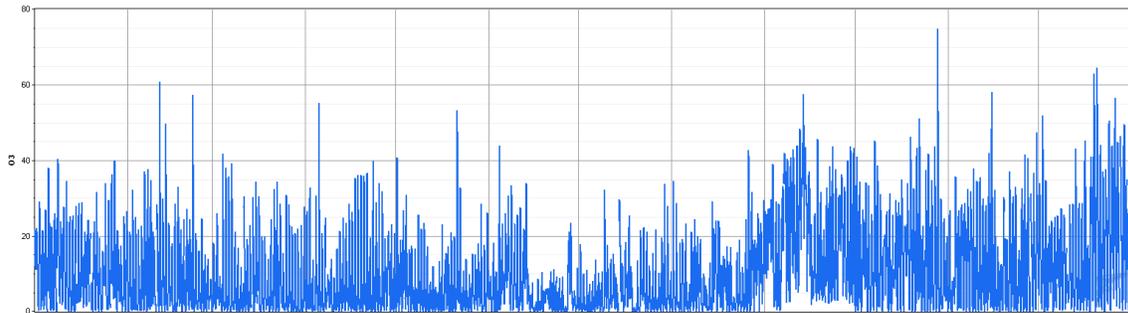
Gráficos de las series de tiempo

Velocidad y dirección del viento





O3 y PM10

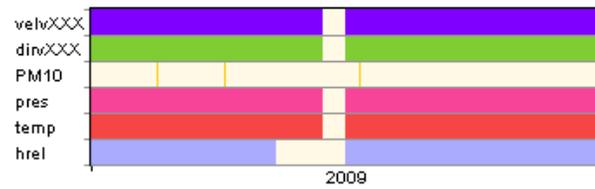


Estación Mina UVA

Variables

velvXXX, dirvXXX, PM10, pres, temp, hrel

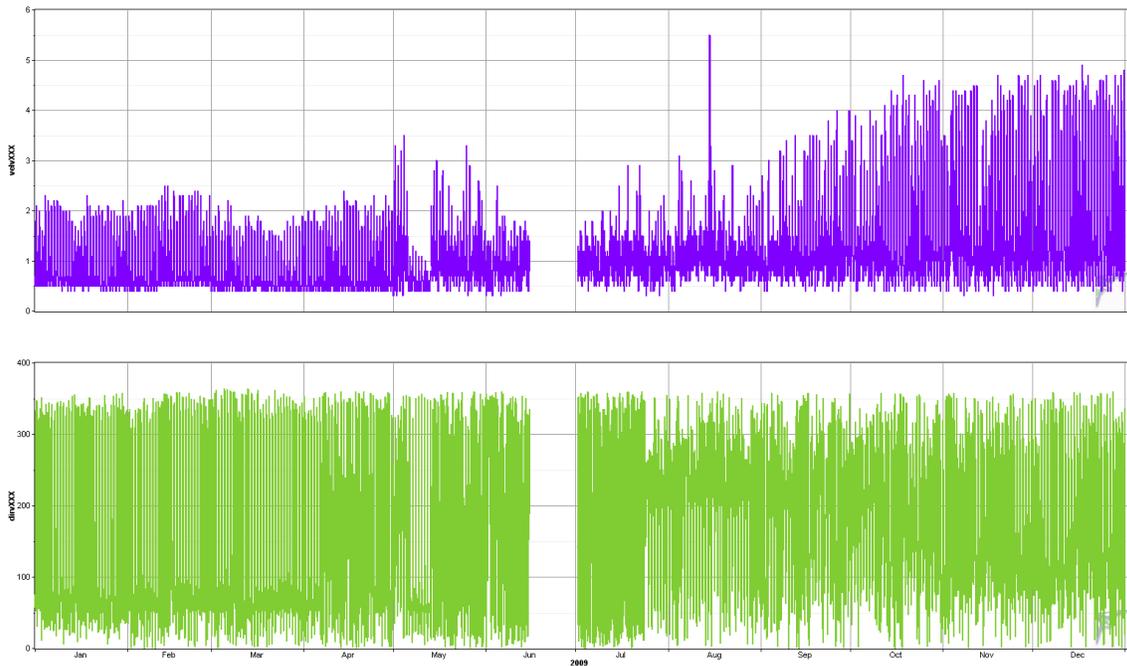
Cobertura temporal de los datos



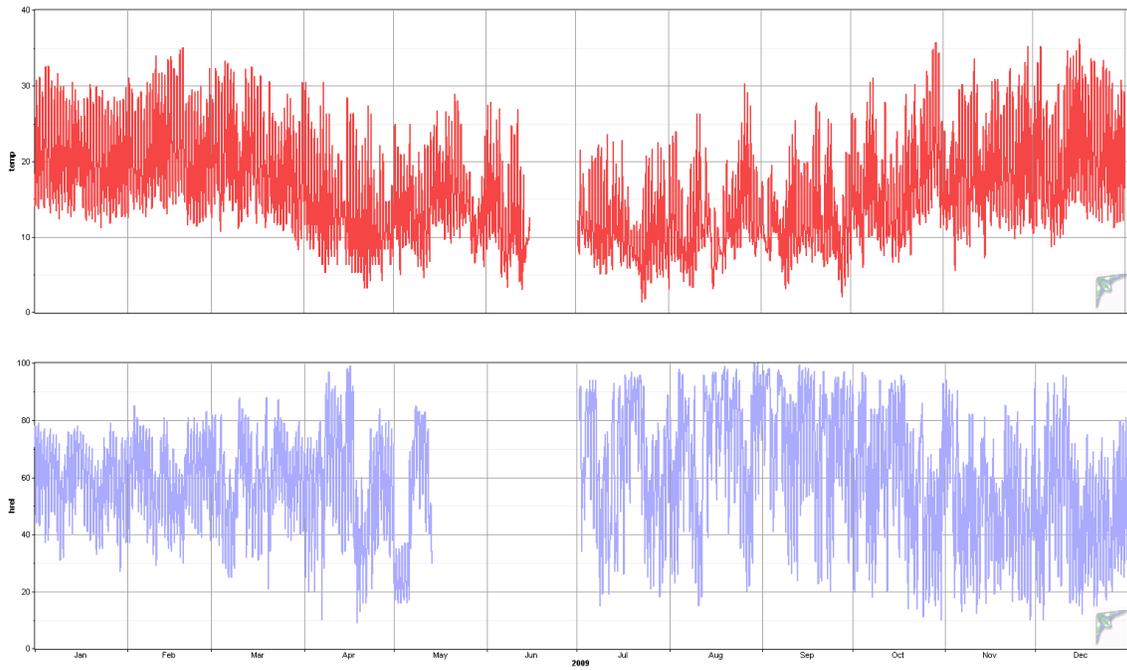
(colores indican que el período cuenta con registros)

Gráficos de las series de tiempo

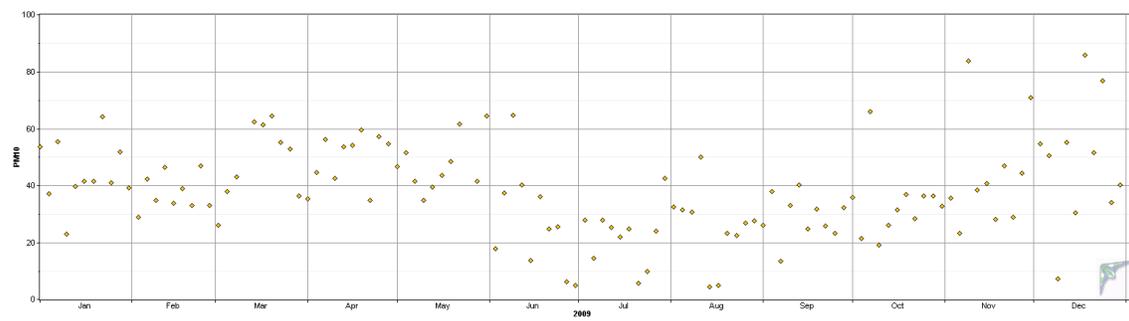
Velocidad y dirección del viento



Temperatura y Humedad Relativa



PM10

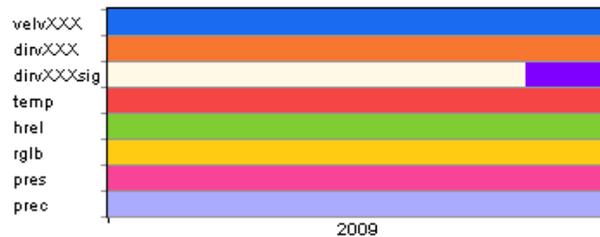


Estación Nehuenco

Variables

velvXXX, dirvXXX, dirvXXXsig, temp, hrel, rglb, pres, prec

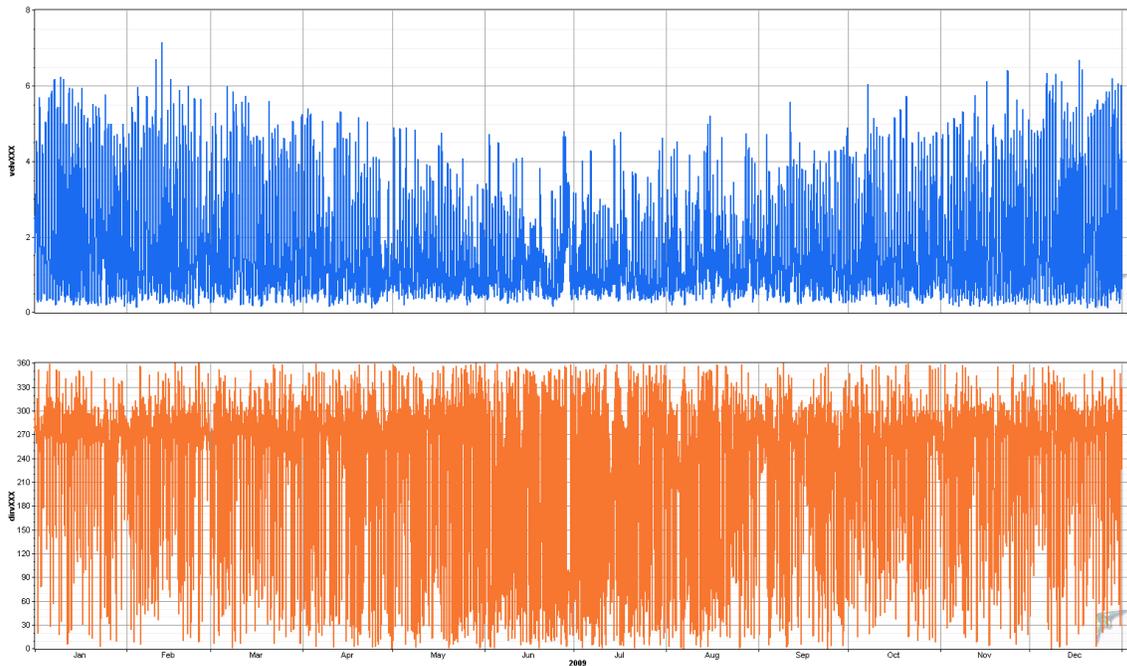
Cobertura temporal de los datos



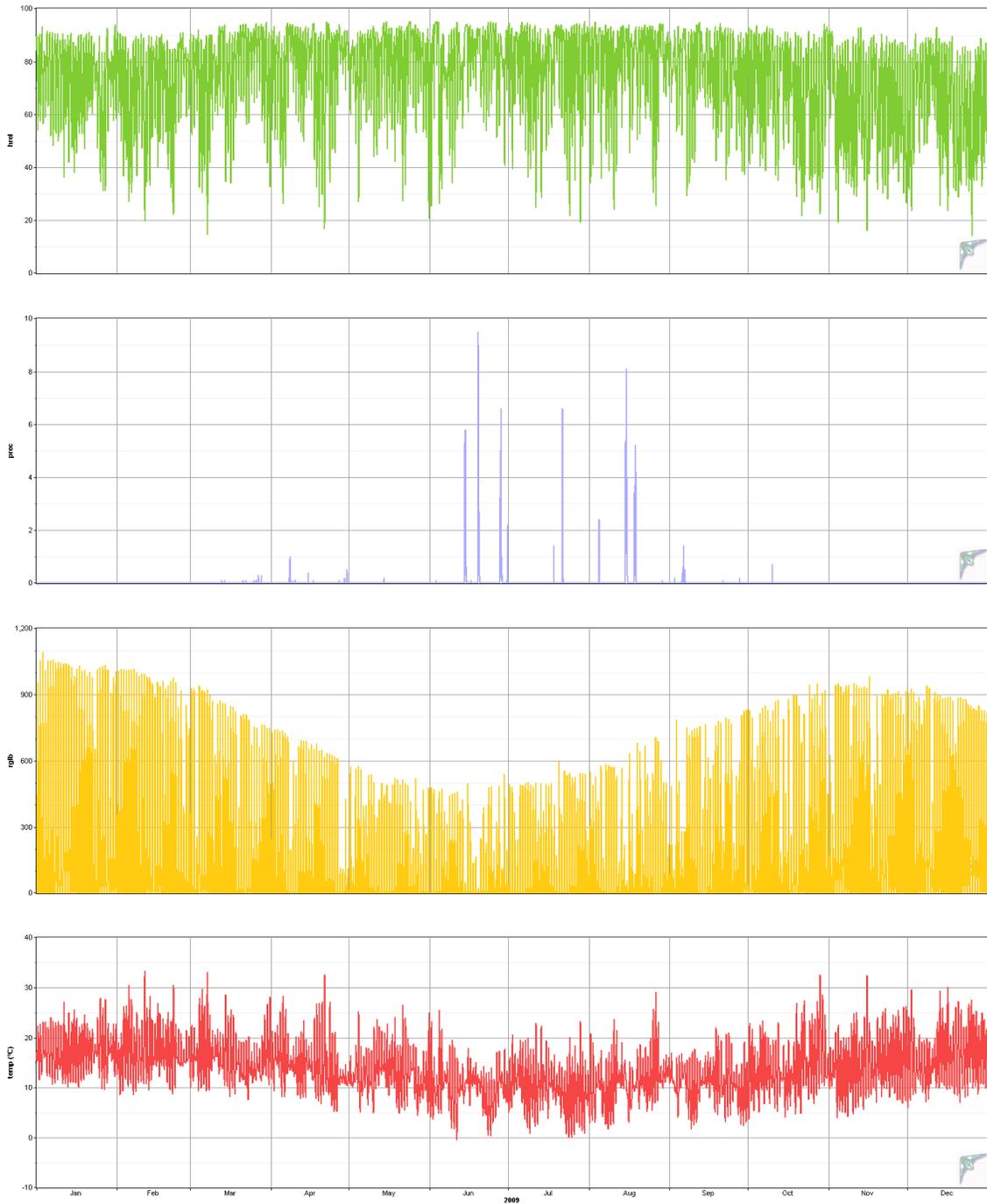
(colores indican que el período cuenta con registros)

Gráficos de las series de tiempo

Velocidad y dirección del viento



Humedad Relativa, precipitación, radiación solar y temperatura



Estación Romeral

Variables

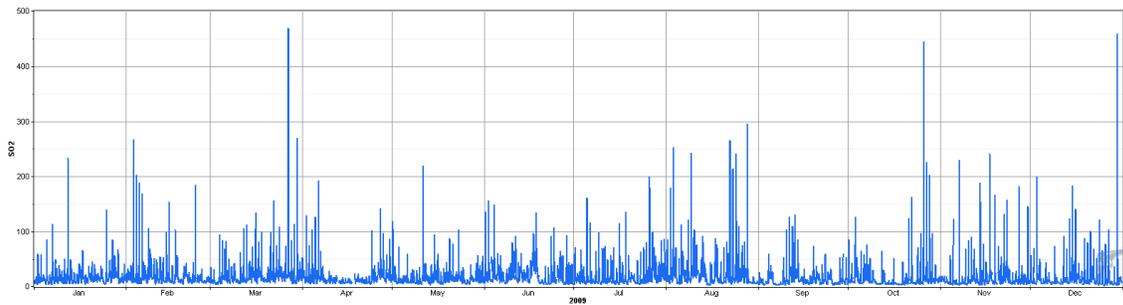
SO2

Cobertura temporal de los datos



Gráficos de las series de tiempo

SO2

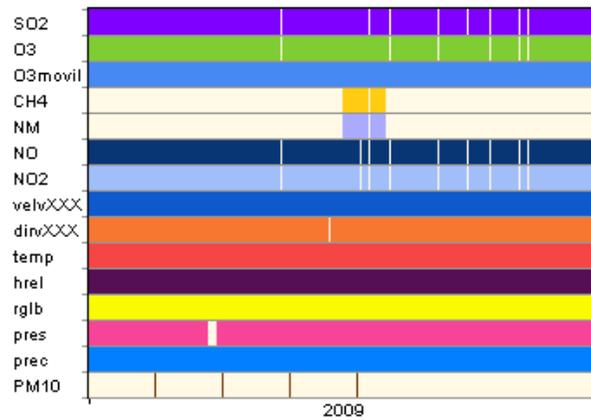


Estación Rural

Variables

SO2, O3, O3movil, CH4, NM, NO, NO2, velvXXX, dirvXXX, temp, hrel, rglb, pres, prec, PM10

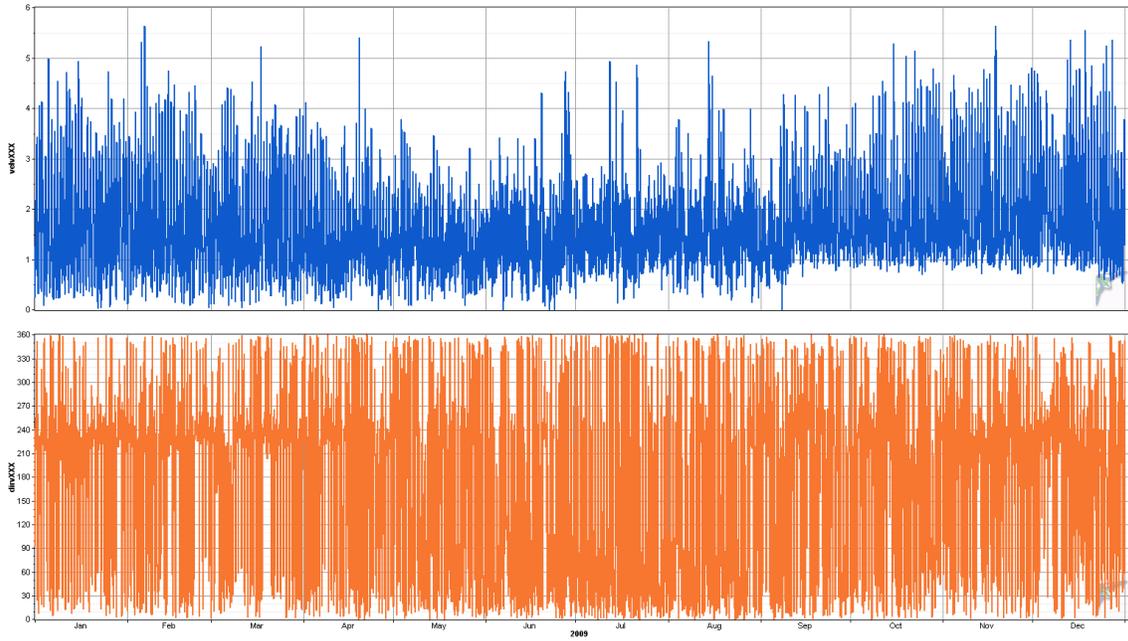
Cobertura temporal de los datos



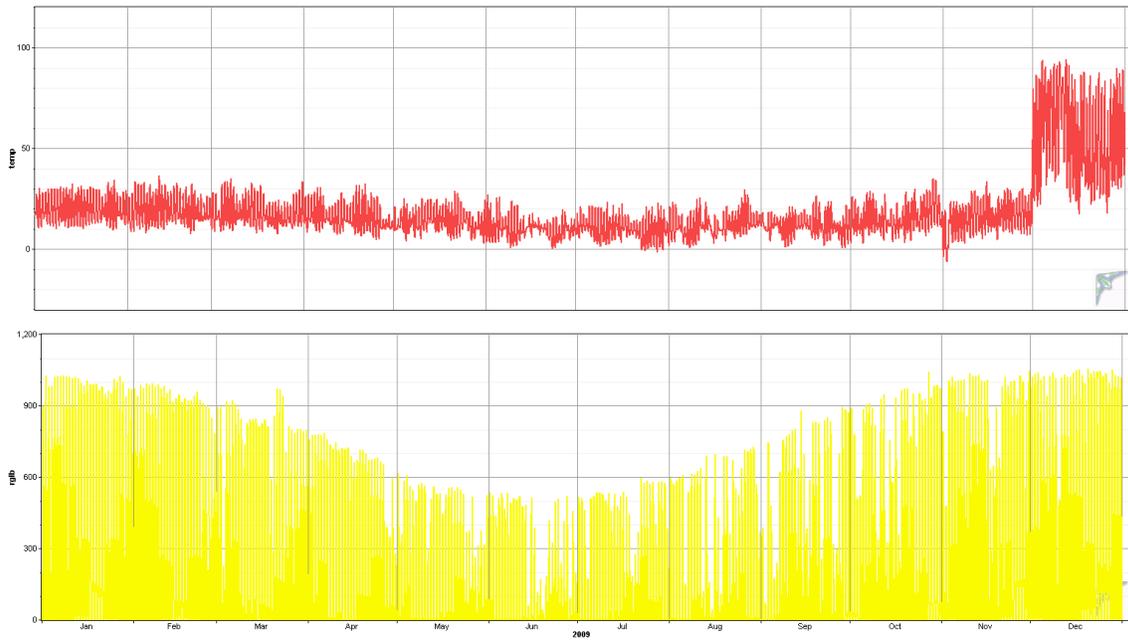
(colores indican que el período cuenta con registros)

Gráficos de las series de tiempo

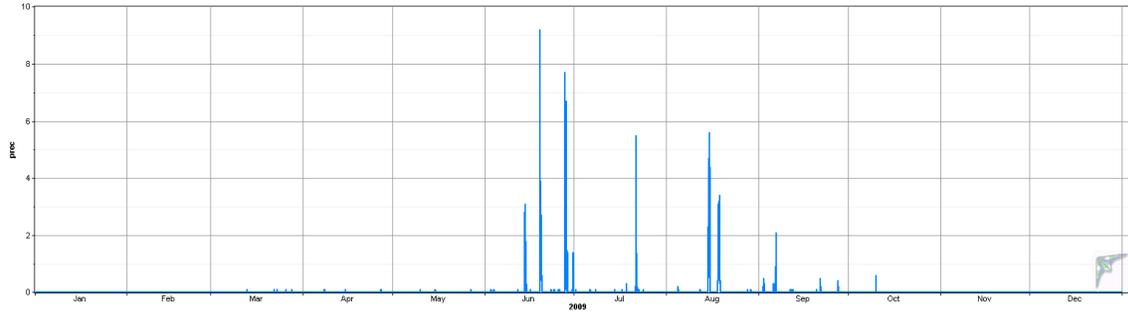
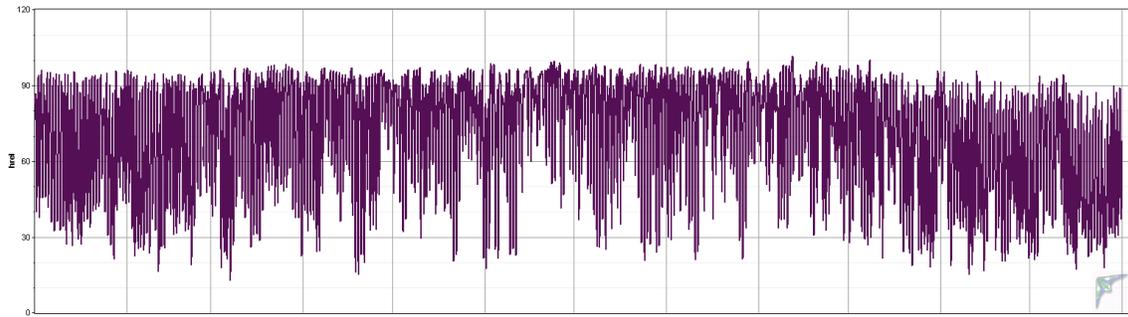
Velocidad y dirección del viento



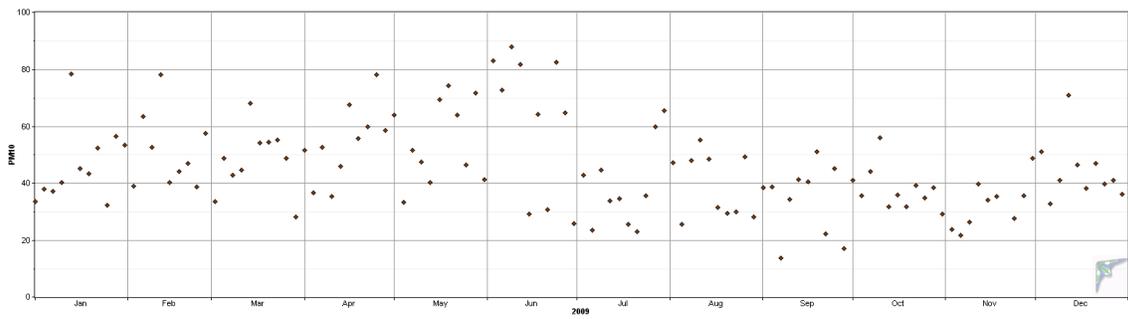
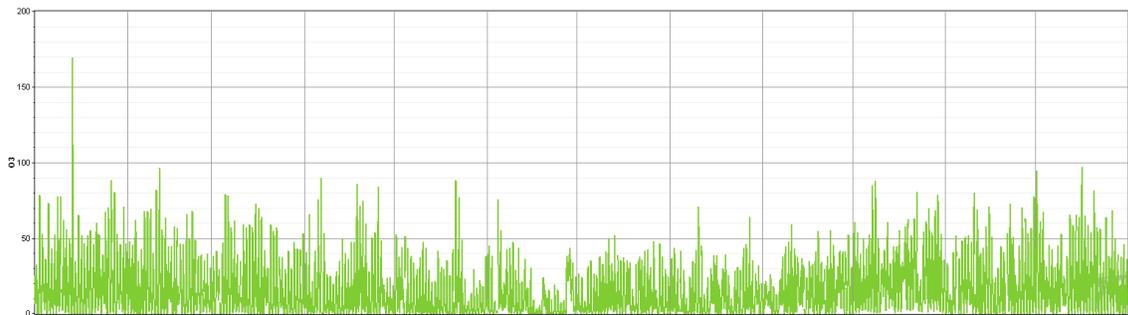
Temperatura y radiación solar



Humedad relativa y precipitación



O3 y PM10

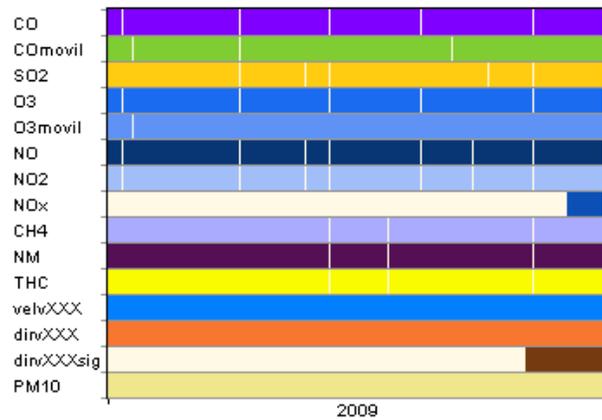


Estación San Pedro

Variables

CO, COmovil, SO2, O3, O3movil, NO, NO2, NOx, CH4 ,NM ,THC, velvXXX, dirvXXX, dirvXXXsig, PM10

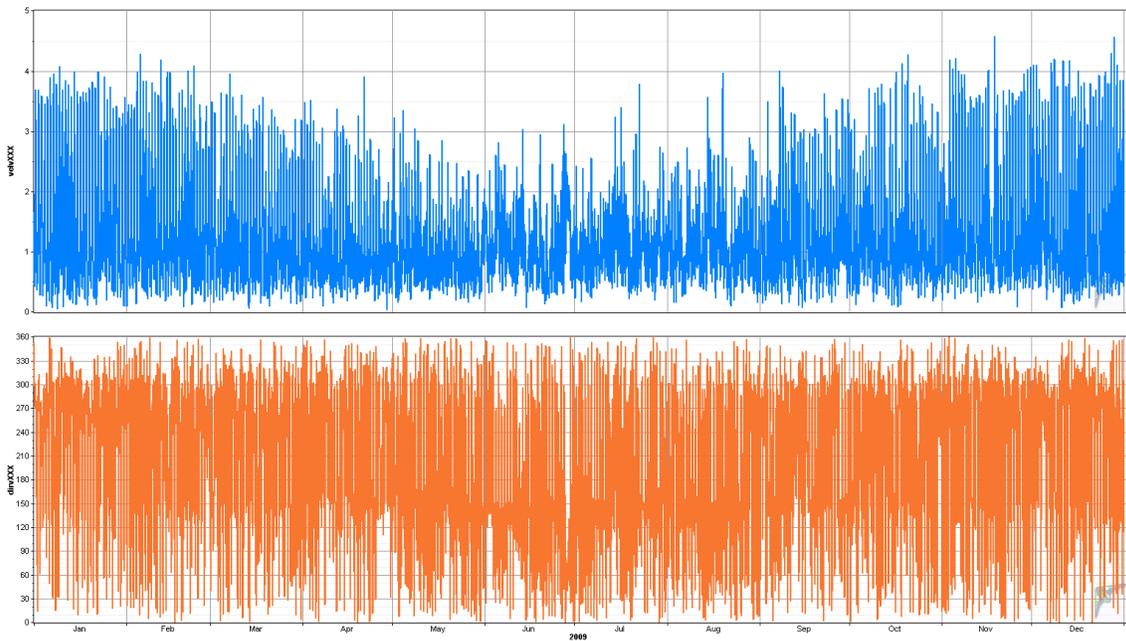
Cobertura temporal de los datos



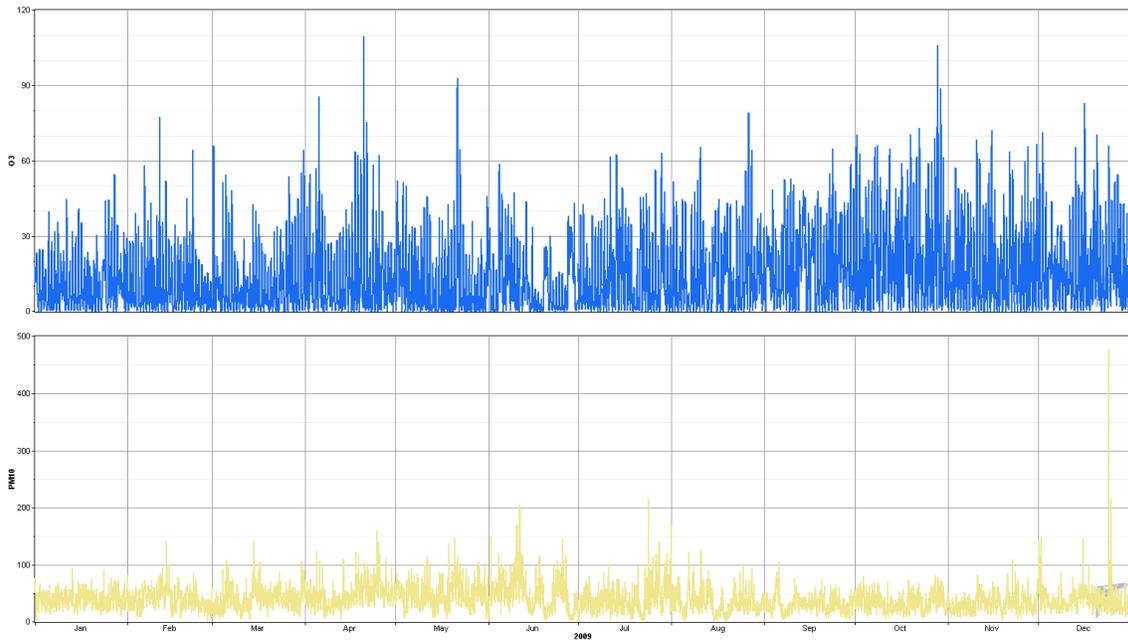
(colores indican que el período cuenta con registros)

Gráficos de las series de tiempo

Velocidad y dirección del viento



O3 y PM10



Estación Santa Margarita

Variables

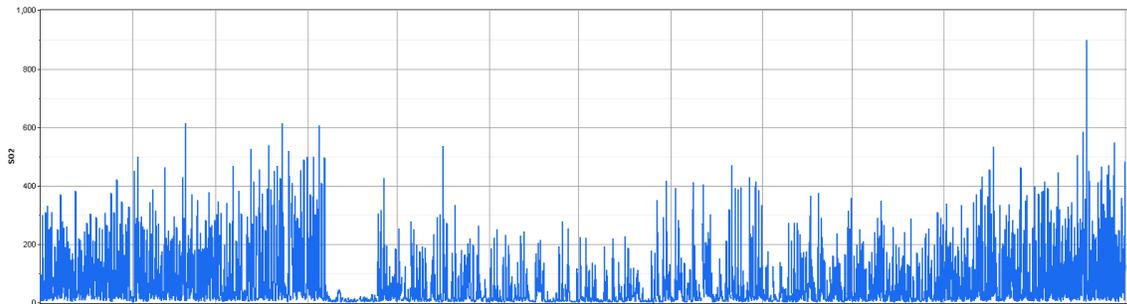
SO2

Cobertura temporal de los datos



Gráficos de las series de tiempo

SO2

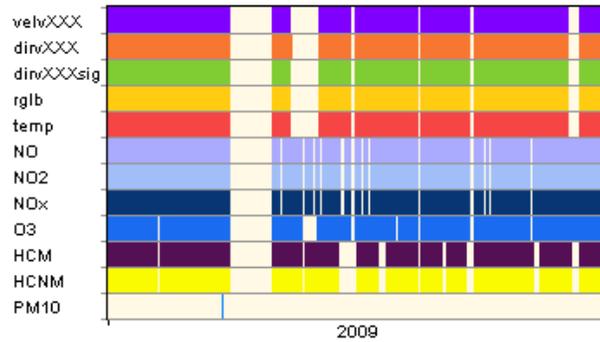


Estación Terminal de combustibles Campiche

Variables

velvXXX, dirvXXX, dirvXXXsig, rglb, temp, NO, NO2, NOx, O3, HCM, HCNM, PM10

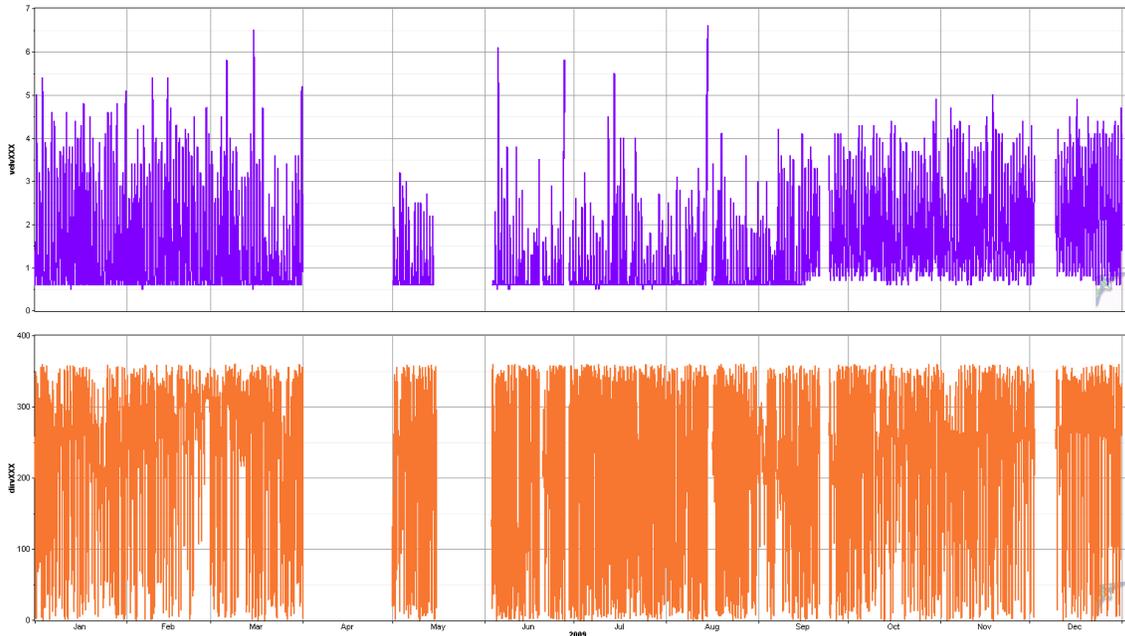
Cobertura temporal de los datos



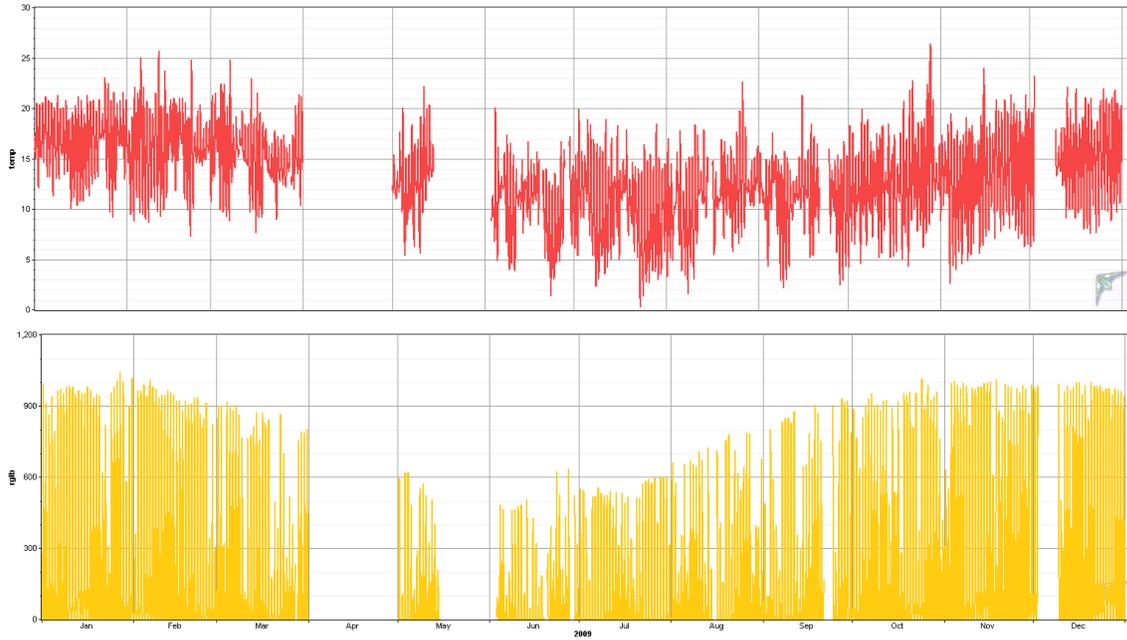
(colores indican que el período cuenta con registros)

Gráficos de las series de tiempo

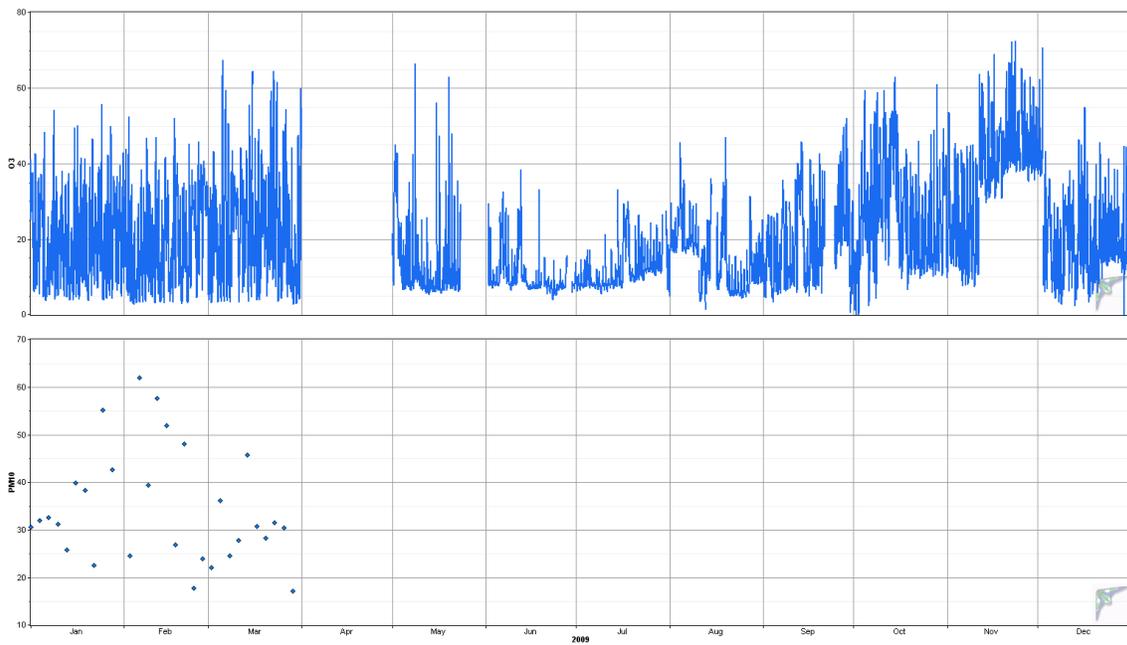
Velocidad y dirección del viento



Temperatura y radiación solar



O3 y PM10

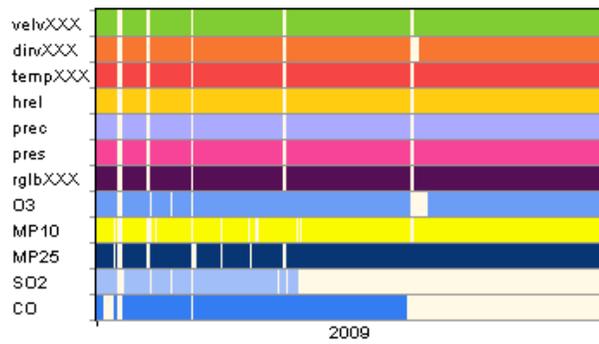


Viña Cosude

Variables

velvXXX, dirvXXX, tempXXX hrel, prec, pres, rglb, O3, PM10, MP25, SO2, CO

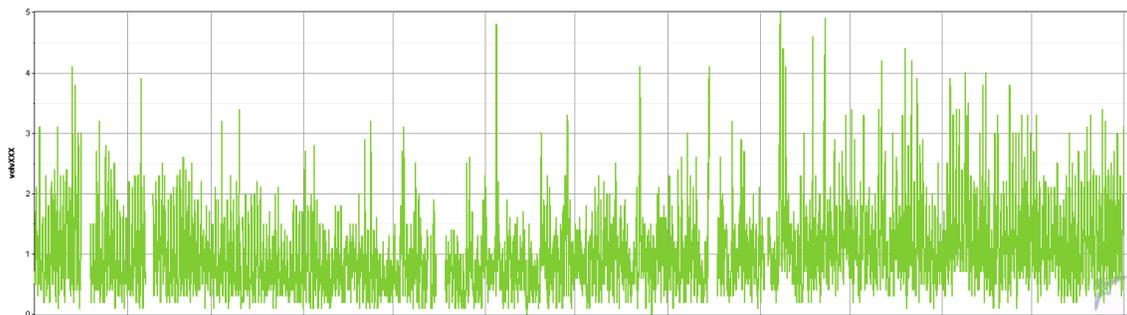
Cobertura temporal de los datos

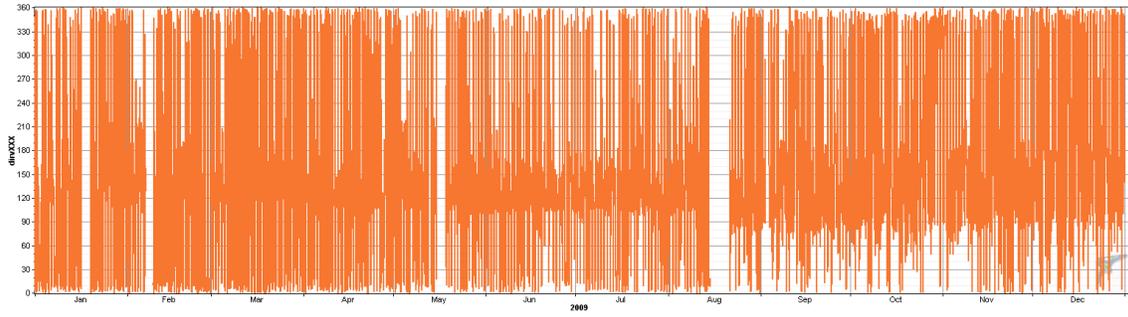


(colores indican que el período cuenta con registros)

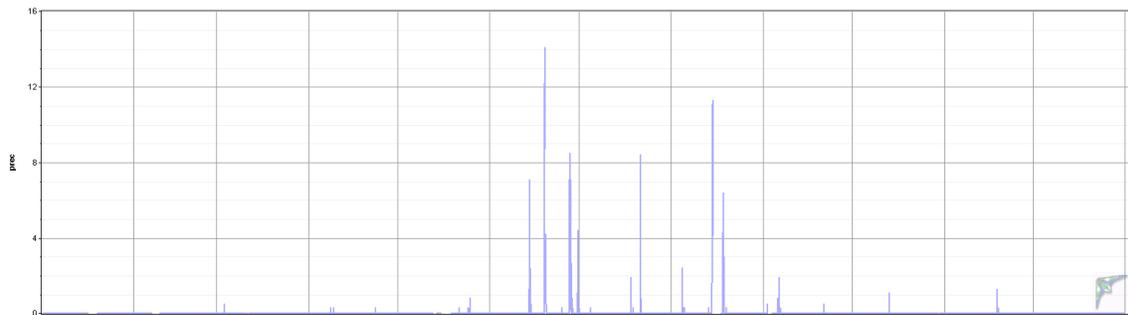
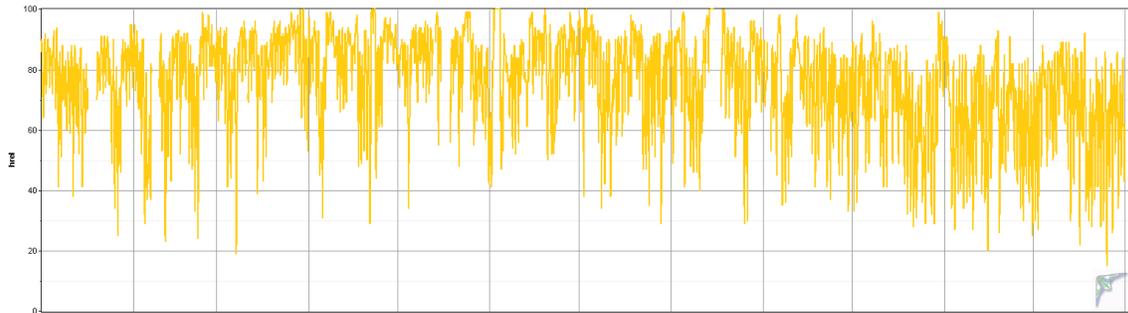
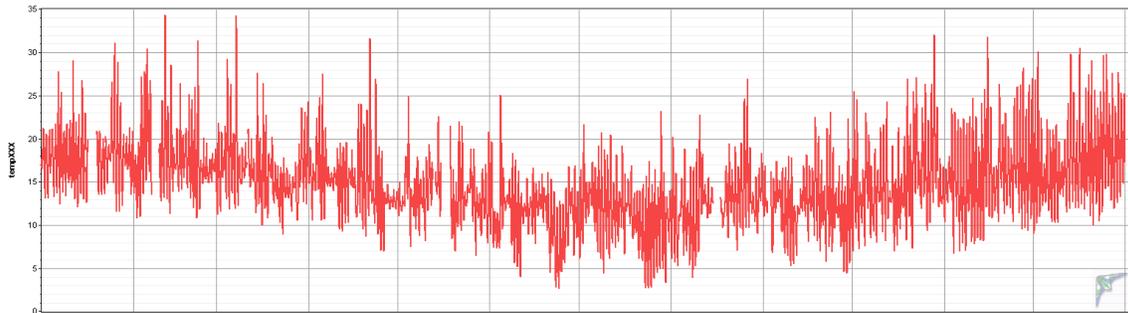
Gráficos de las series de tiempo

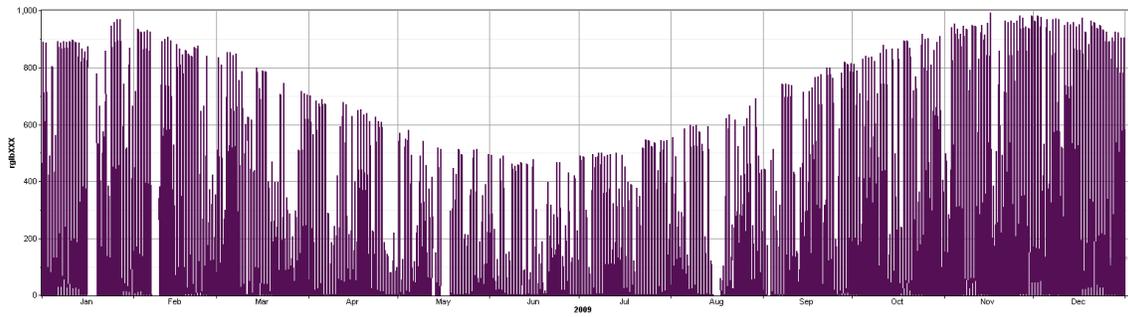
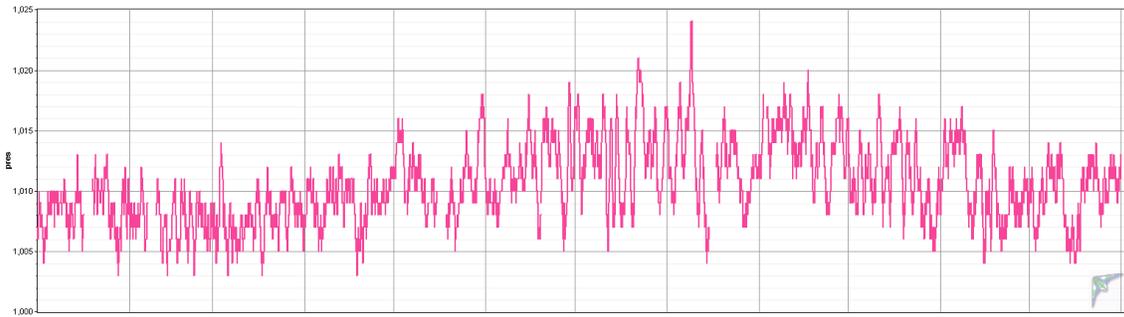
Velocidad y dirección del viento



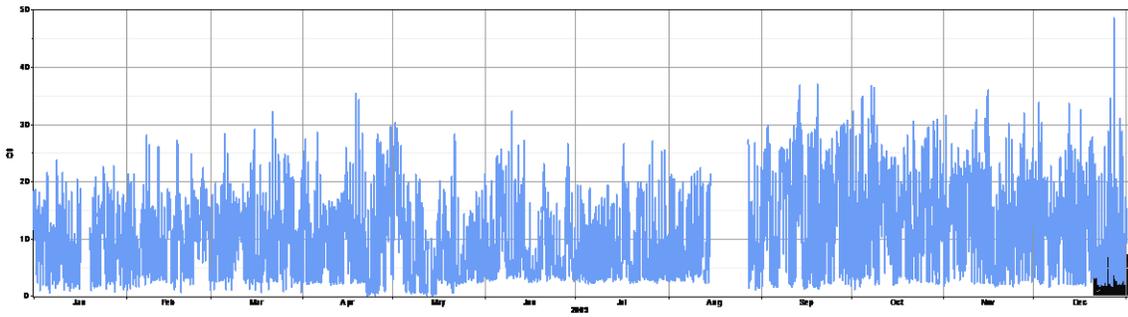


Temperatura, humedad relativa, precipitación, presión y radiación solar

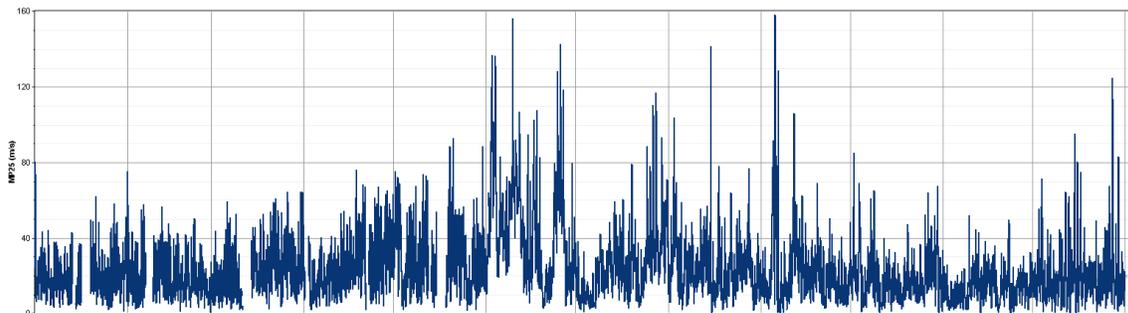


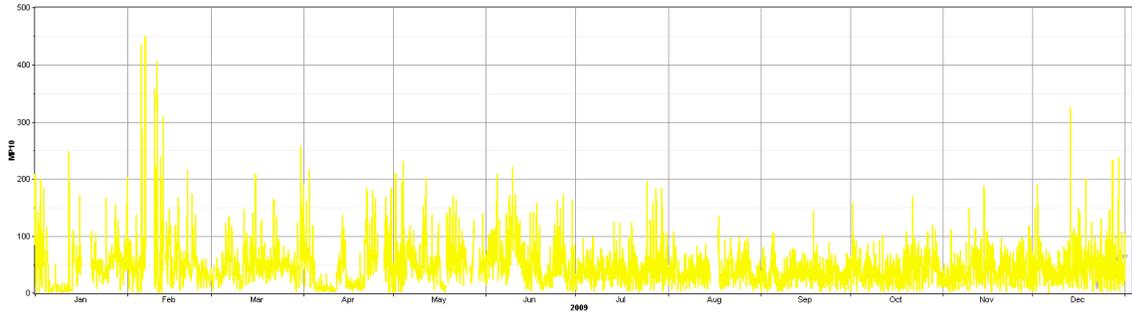


O3



MP2.5 y MP10





Anexo II, Figuras complementarias al capítulo 6

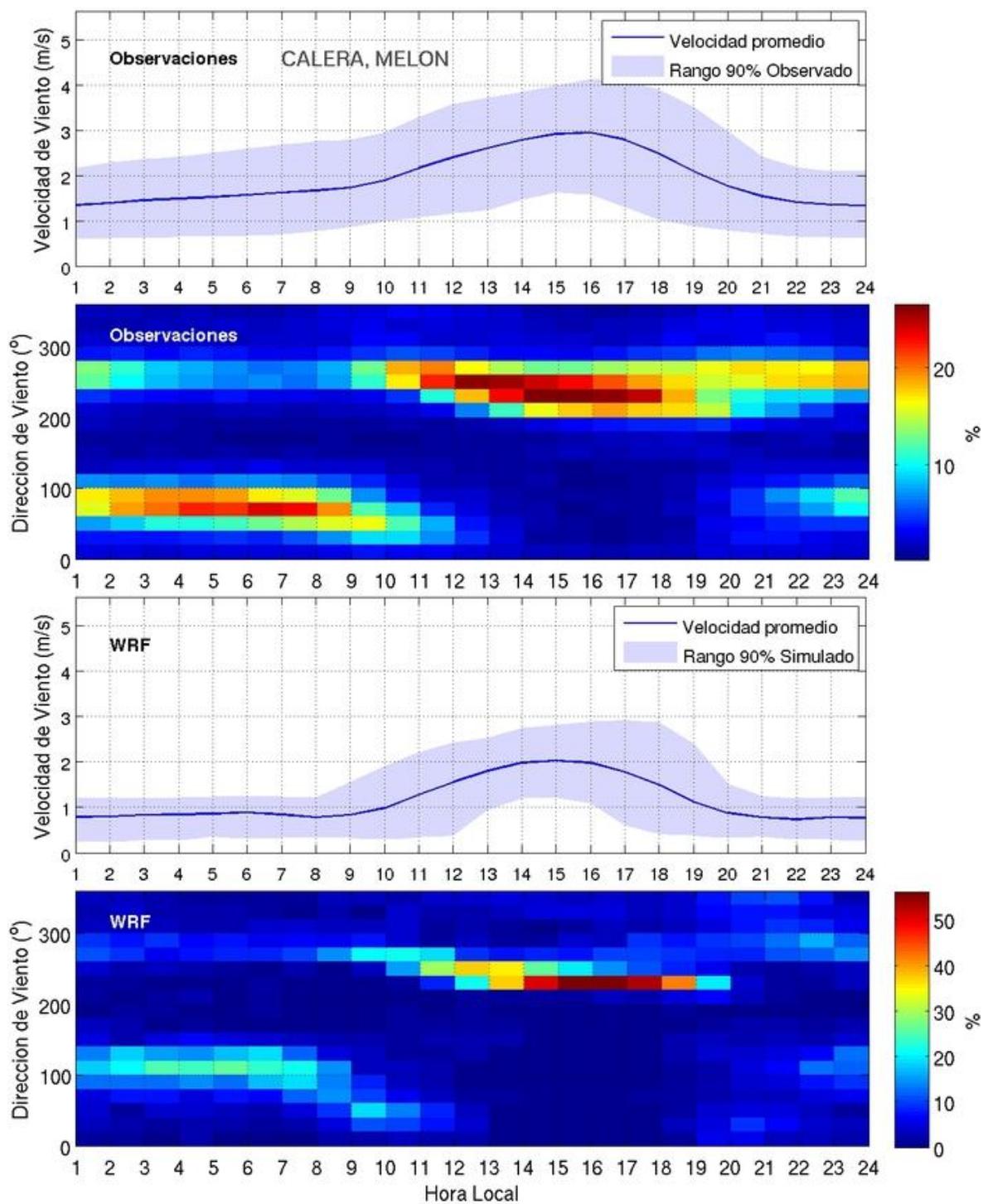


Figura A II.1: Equivalente a figura 6.2 pero para la estación Calera.

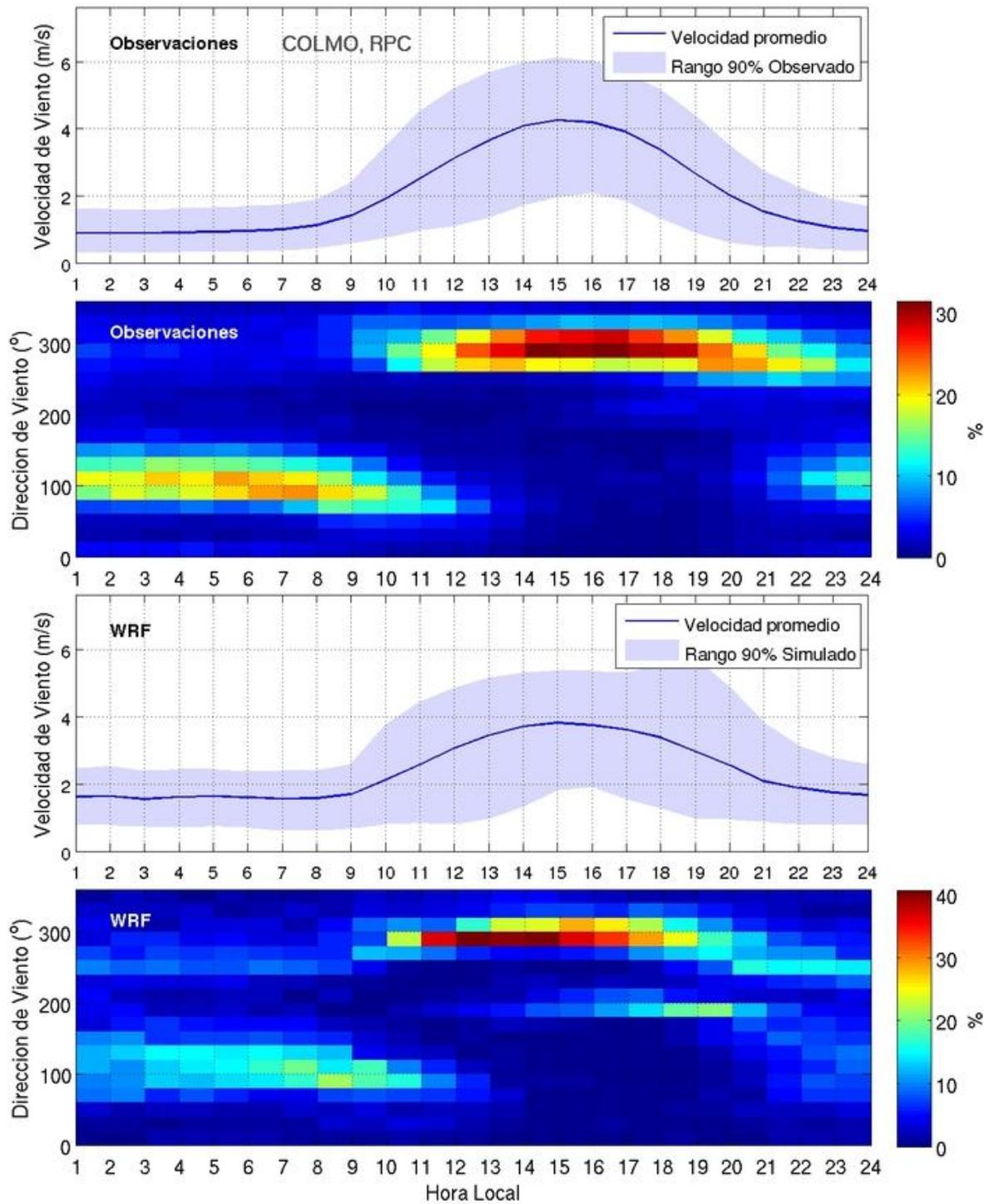


Figura A II.2: Equivalente a figura 6.2 pero para la estación Colmo

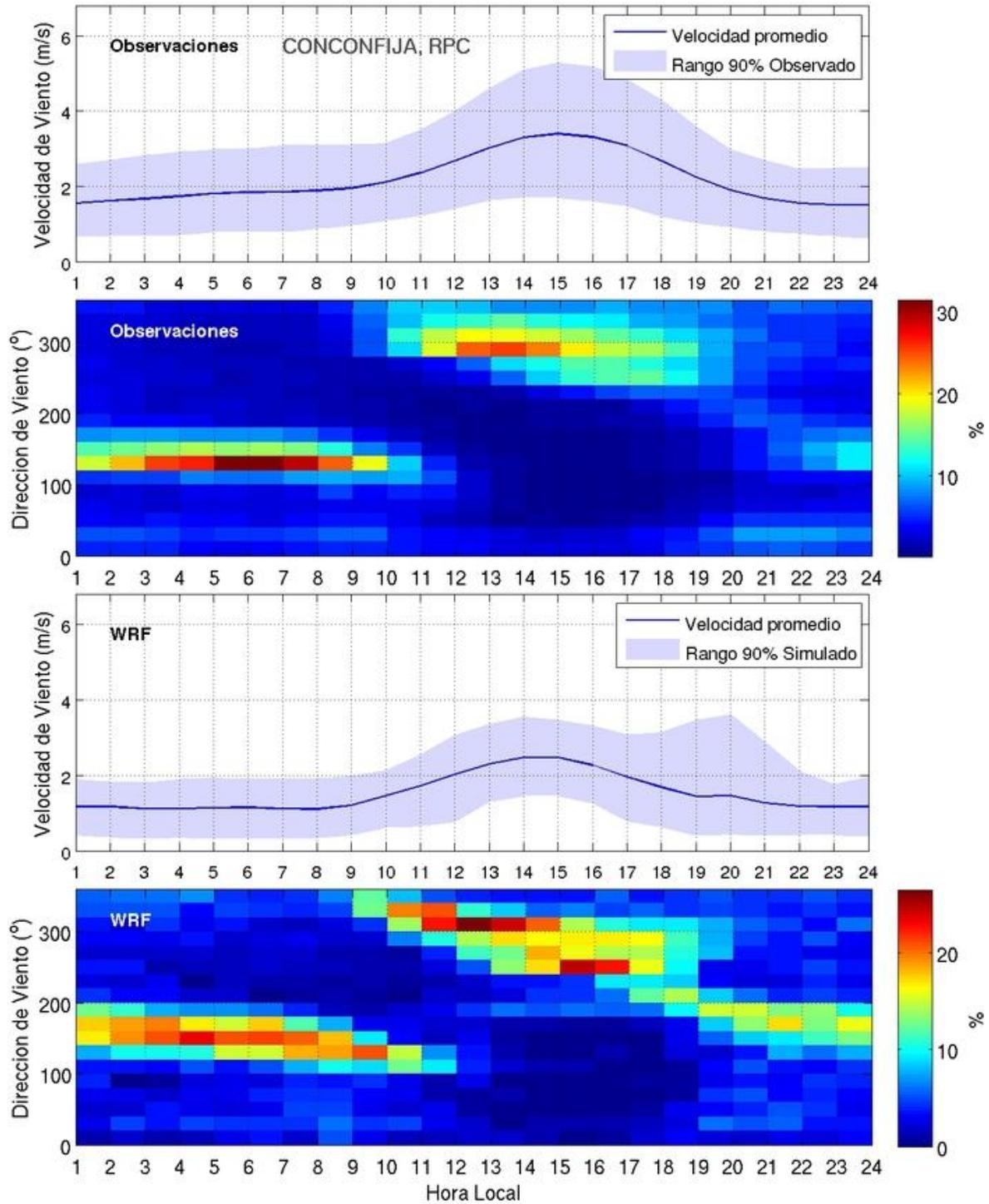


Figura A II.3: Equivalente a figura 6.2 pero para la estación Junta de Vecinos

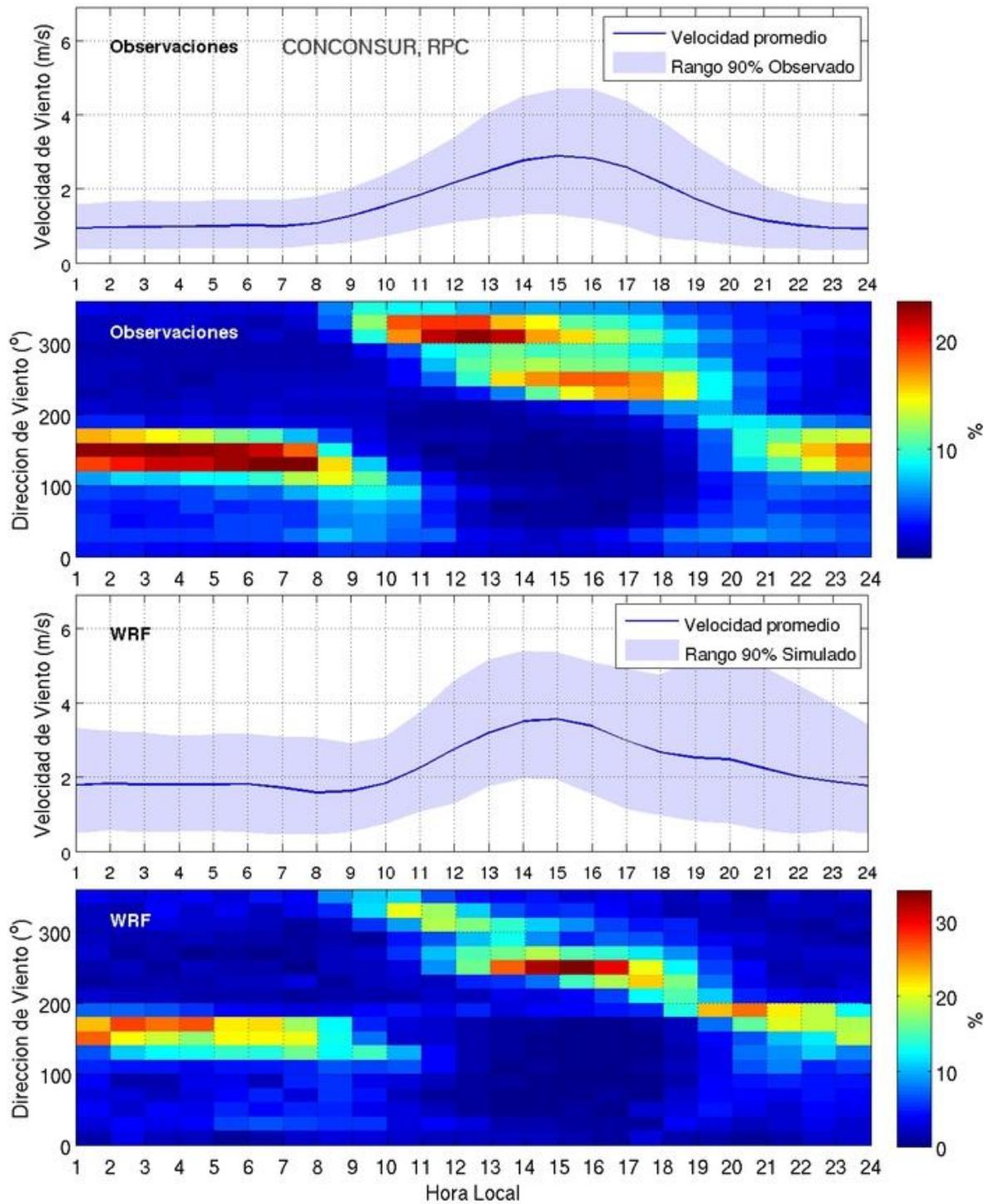


Figura A II.4: Equivalente a figura 6.2 pero para la estación Concón Sur

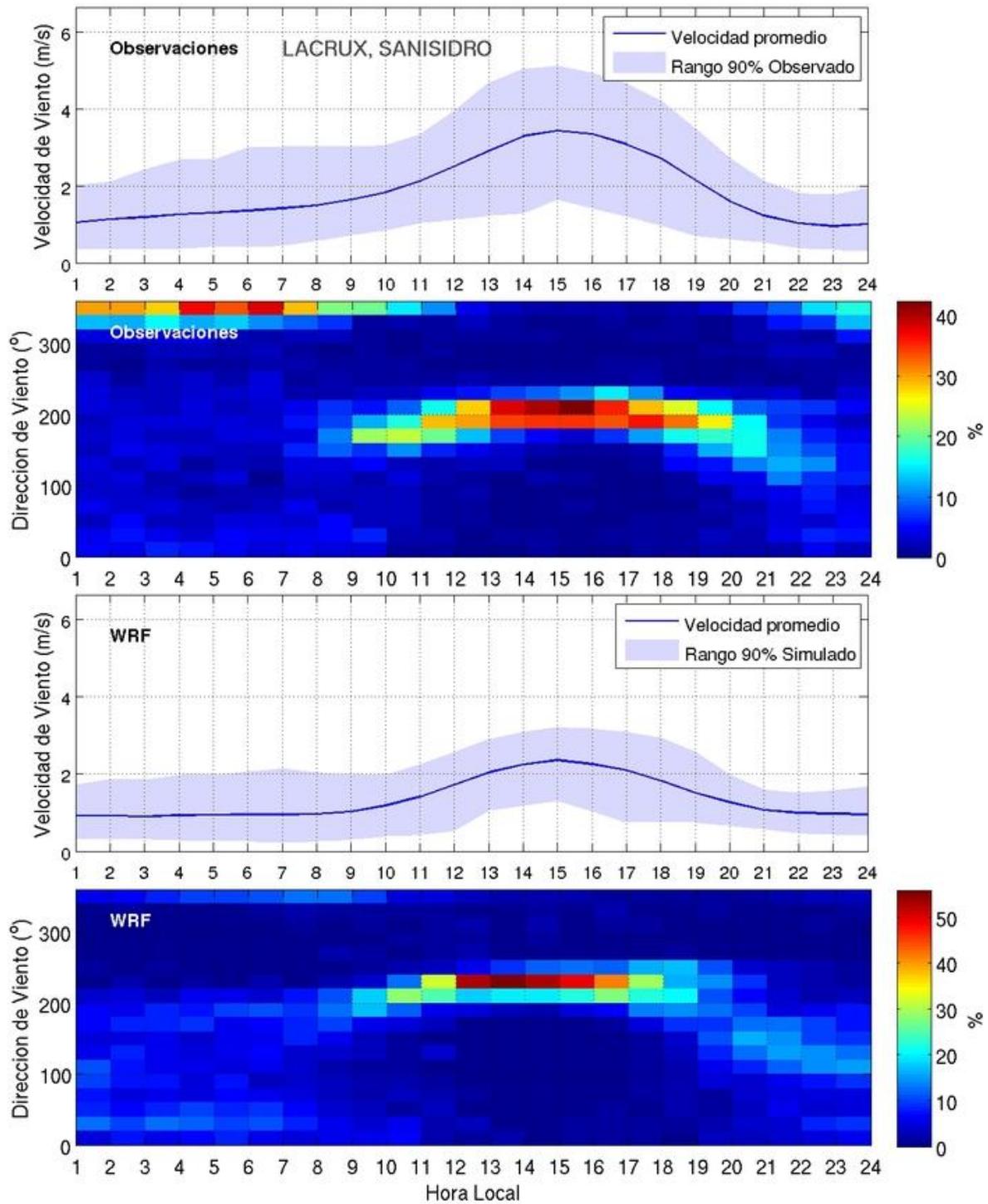


Figura A II.5: Equivalente a figura 6.2 pero para la estación La Cruz

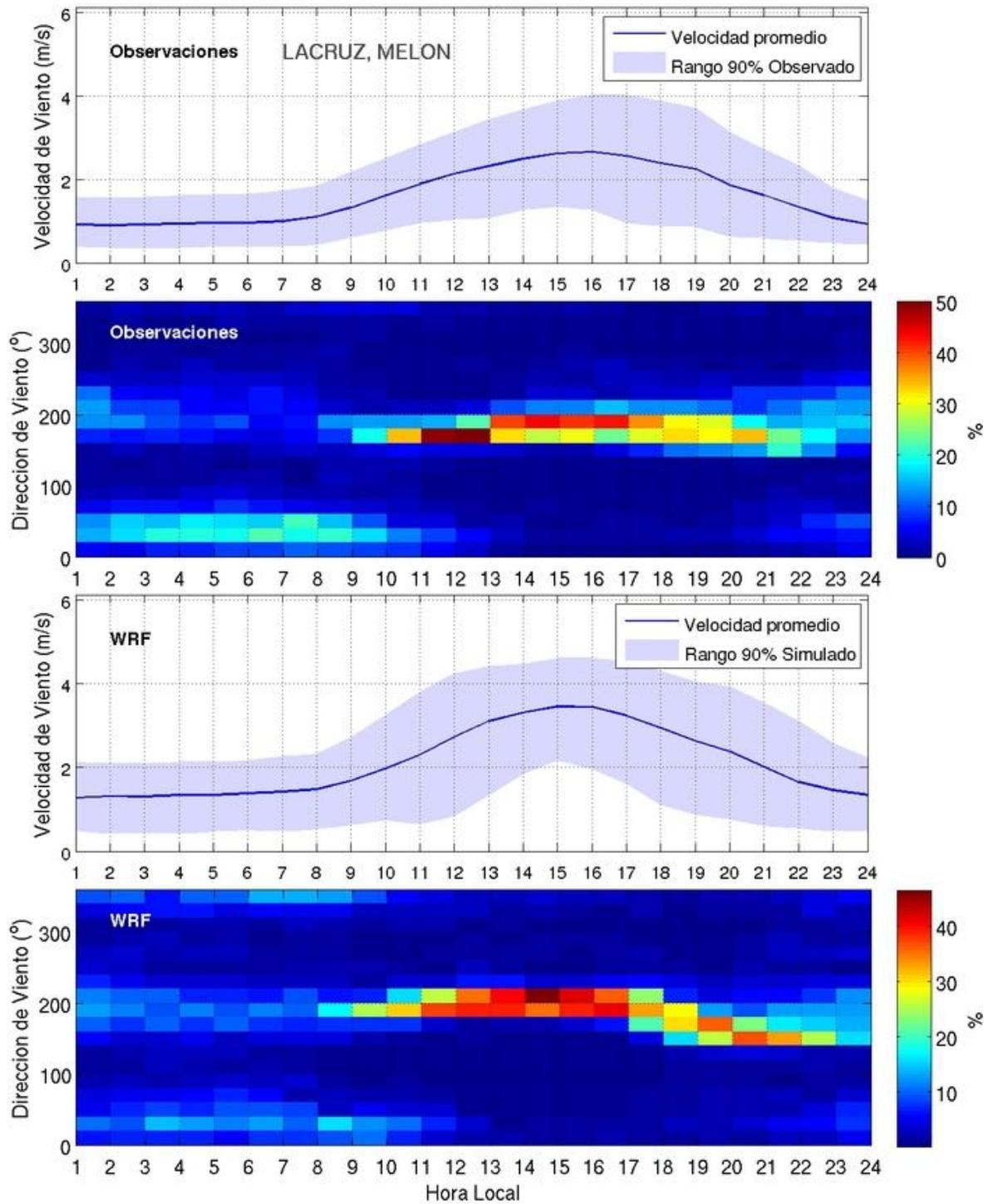


Figura A II.6: Equivalente a figura 6.2 pero para la estación La Cruz

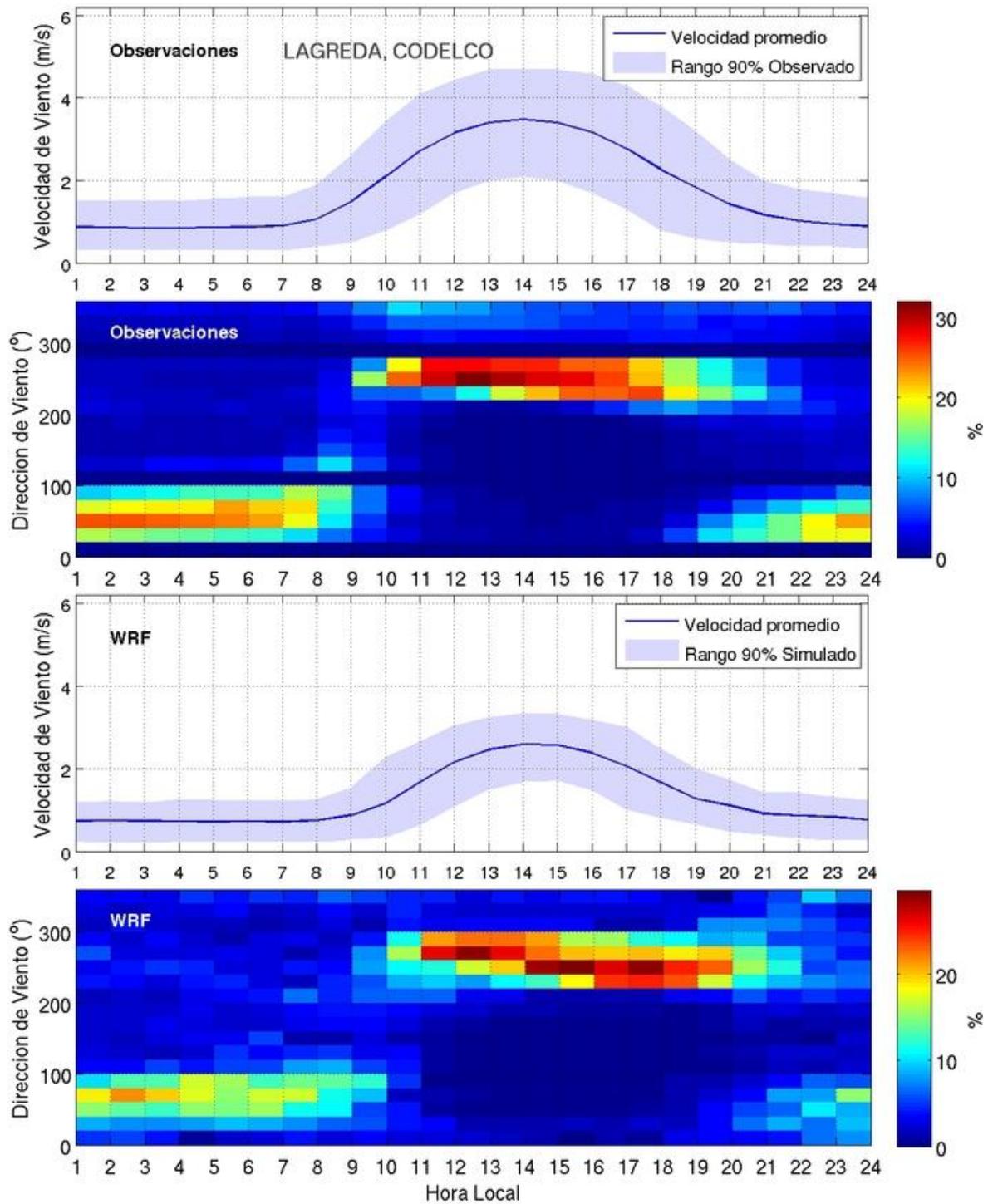


Figura A II.7: Equivalente a figura 6.2 pero para la estación La Greda

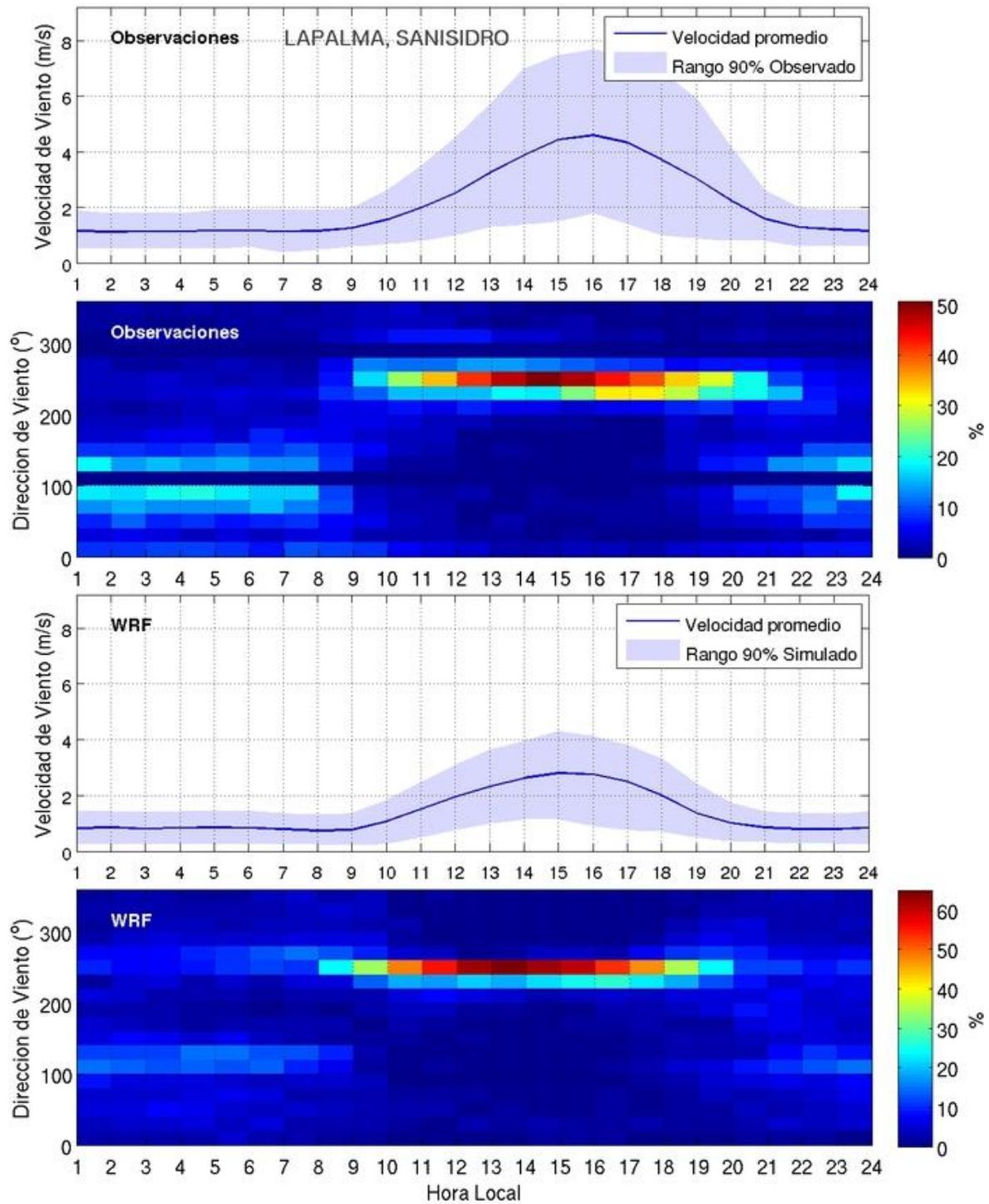


Figura A II.8: Equivalente a figura 6.2 pero para la estación La Palma

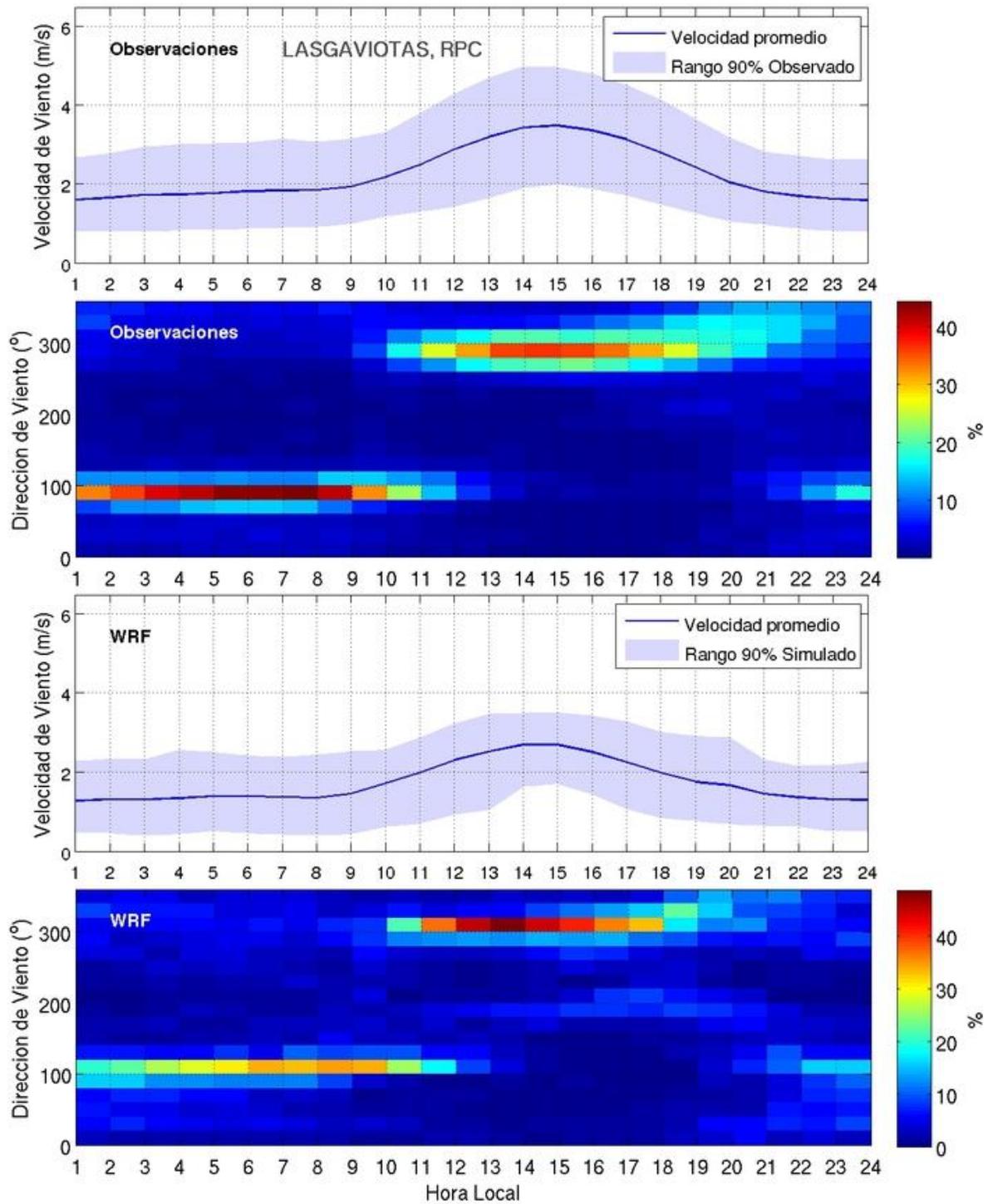


Figura A II.9: Equivalente a figura 6.2 pero para la estación Las Gaviotas

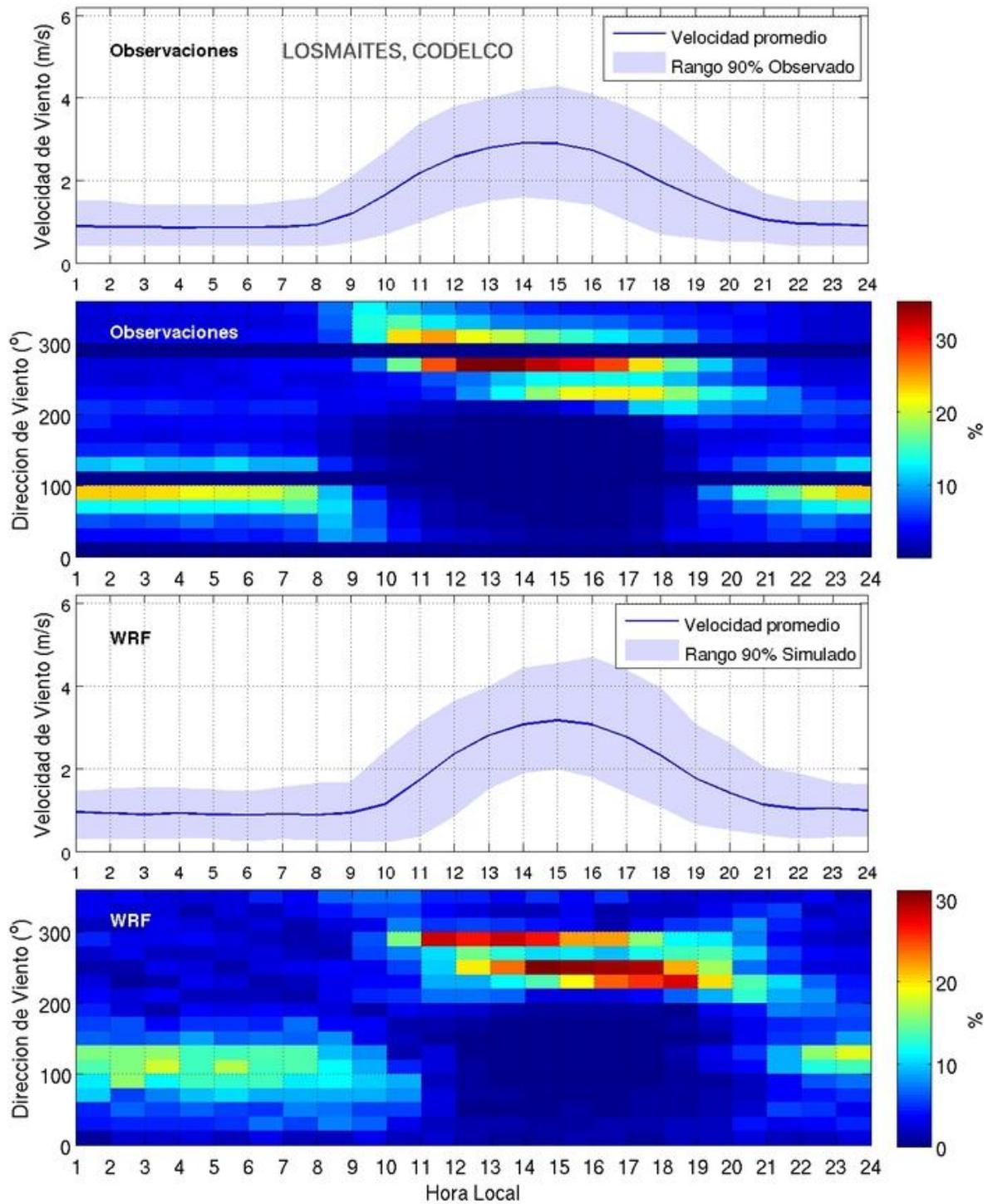


Figura A II.10: Equivalente a figura 6.2 pero para la estación Los Maitenes

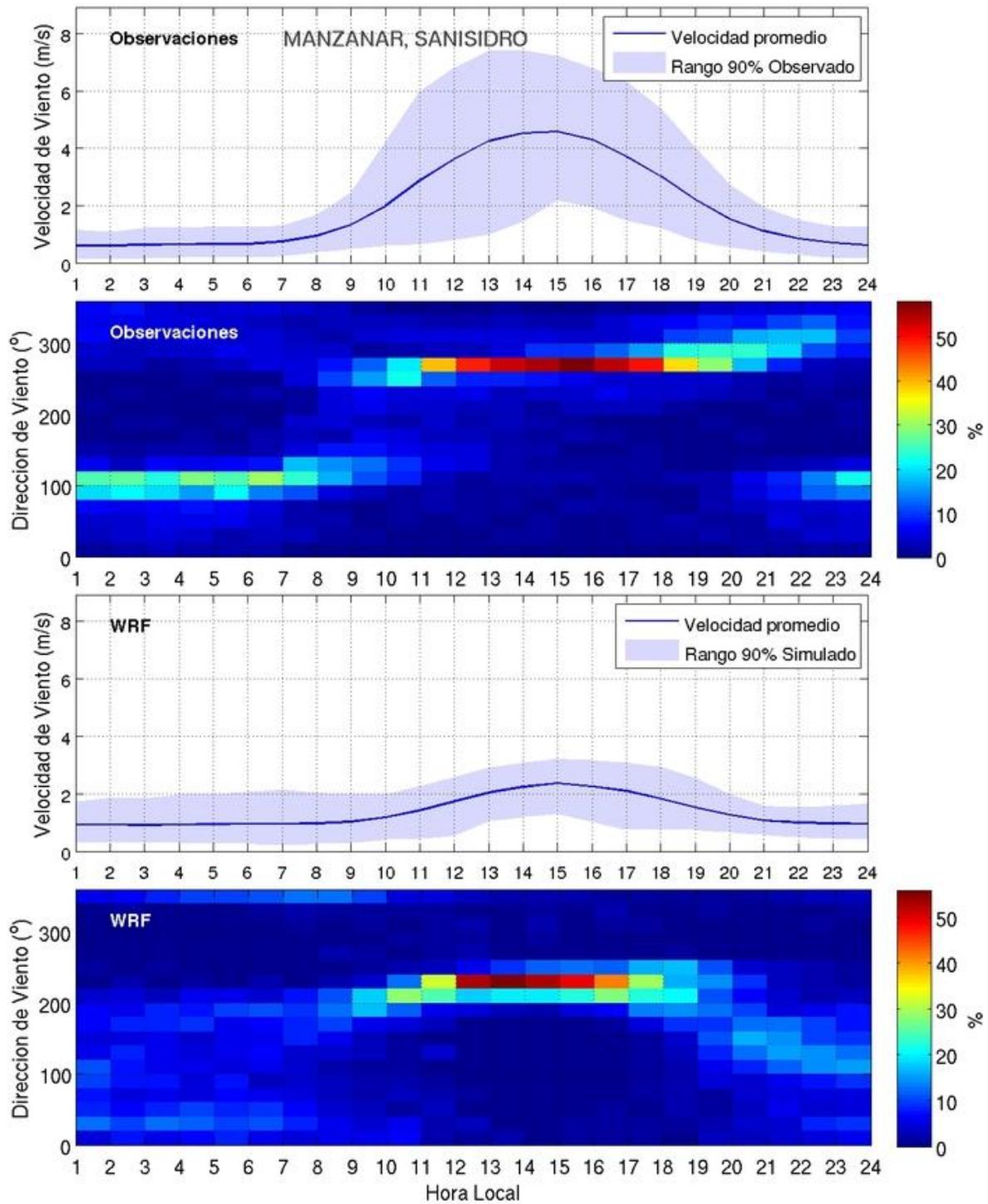


Figura A II.11: Equivalente a figura 6.2 pero para la estación Manzanar

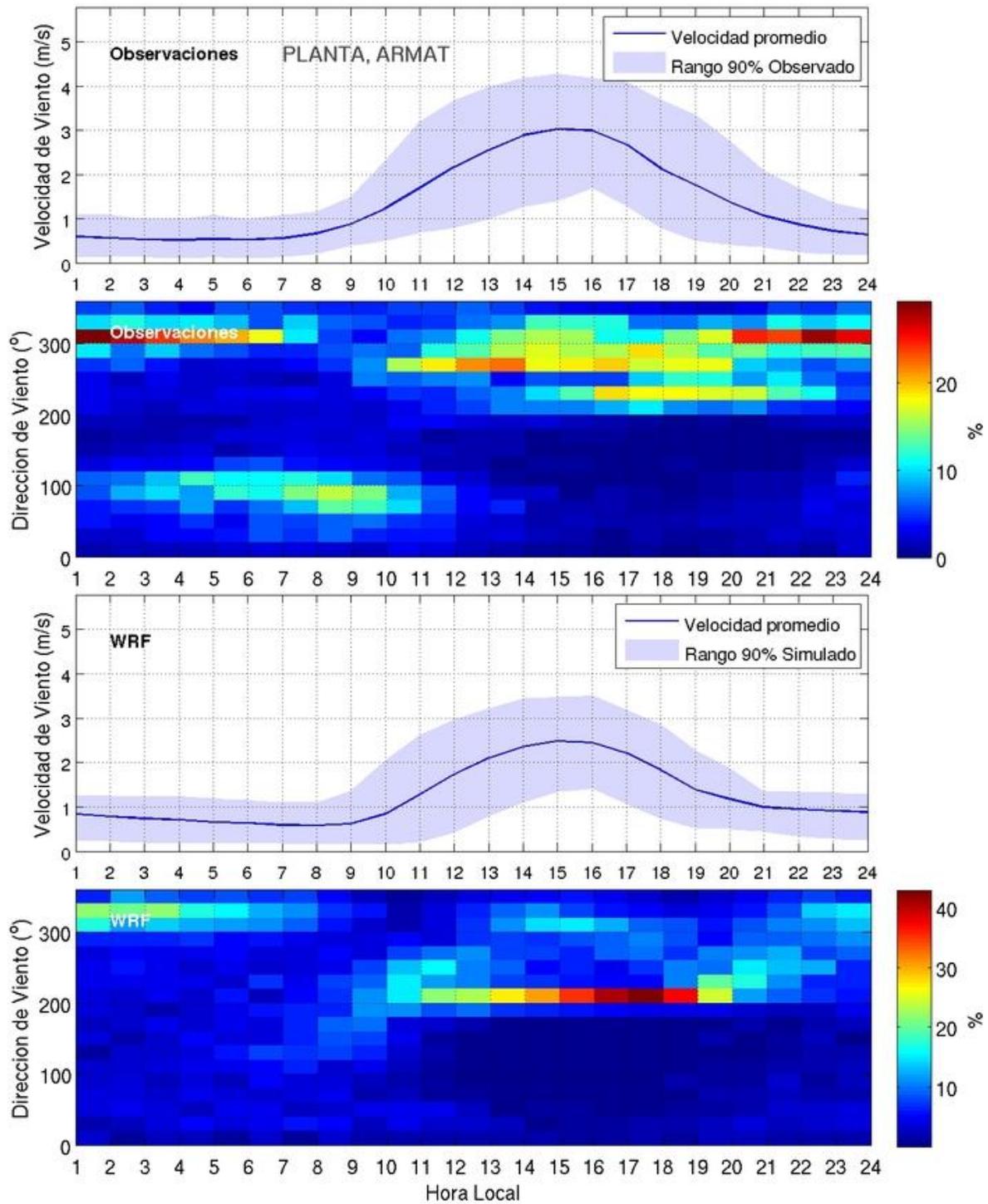


Figura A II.12: Equivalente a figura 6.2 pero para la estación Planta

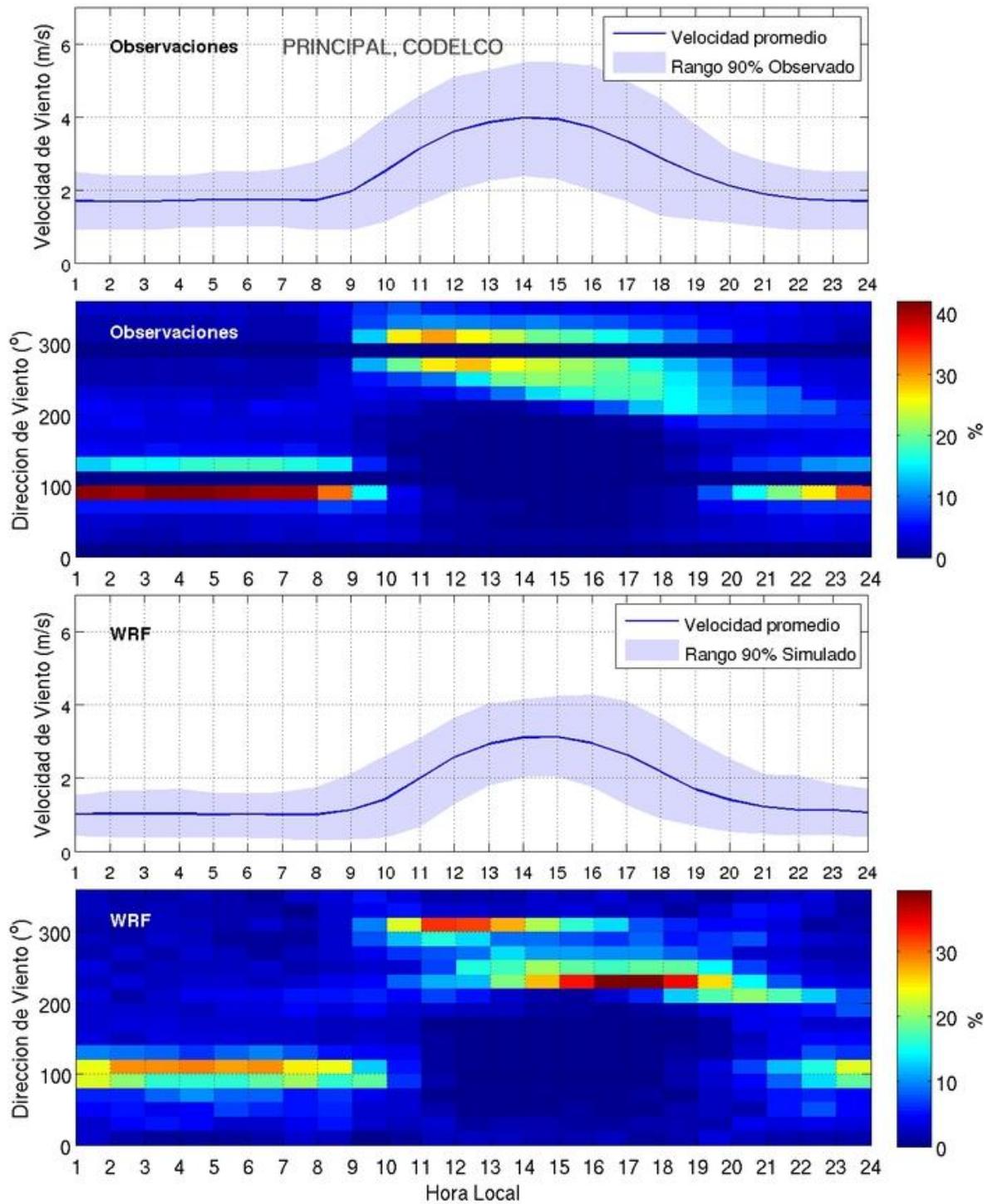


Figura A II.13: Equivalente a figura 6.2 pero para la estación Principal

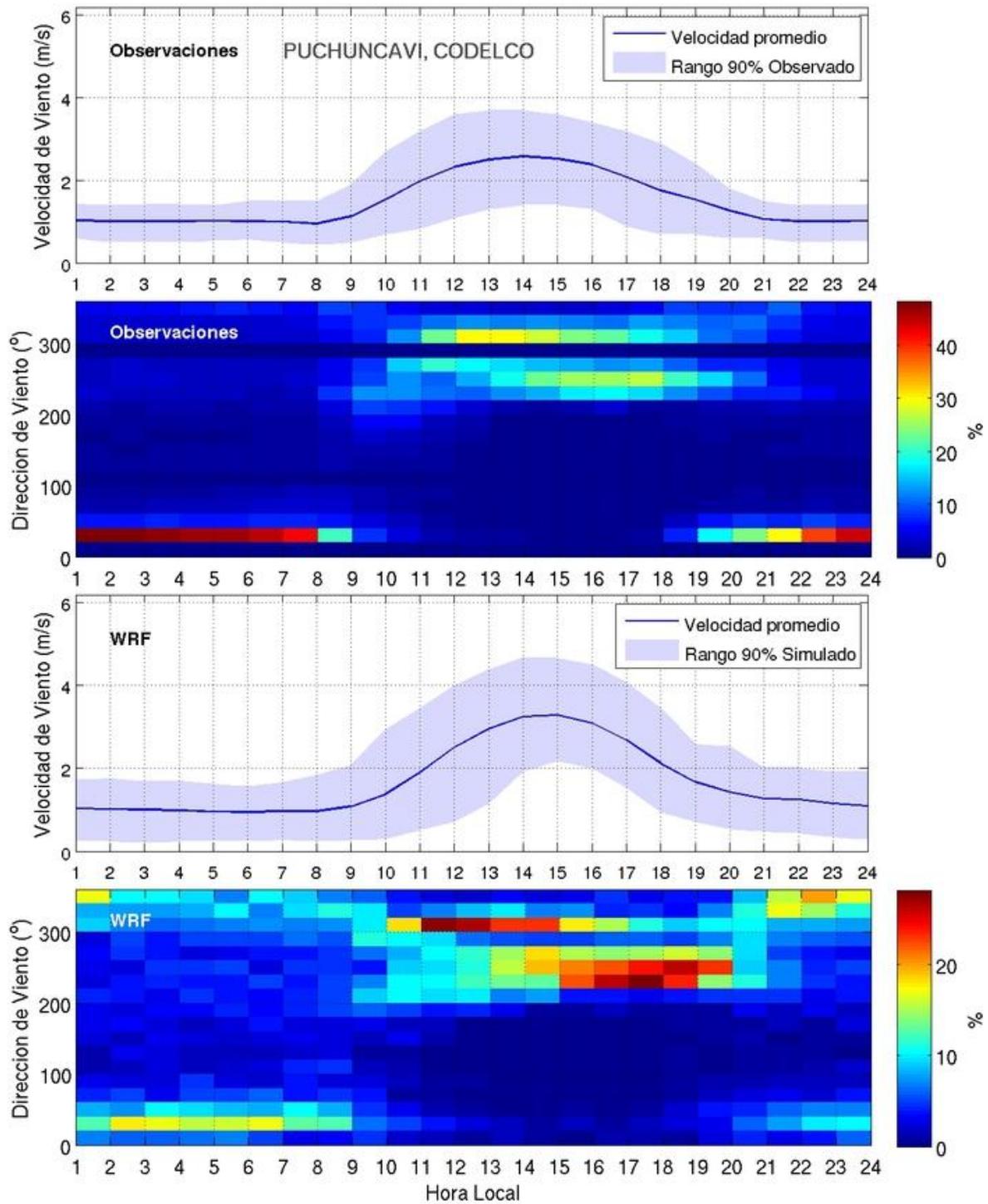


Figura A II.14: Equivalente a figura 6.2 pero para la estación Puchuncaví

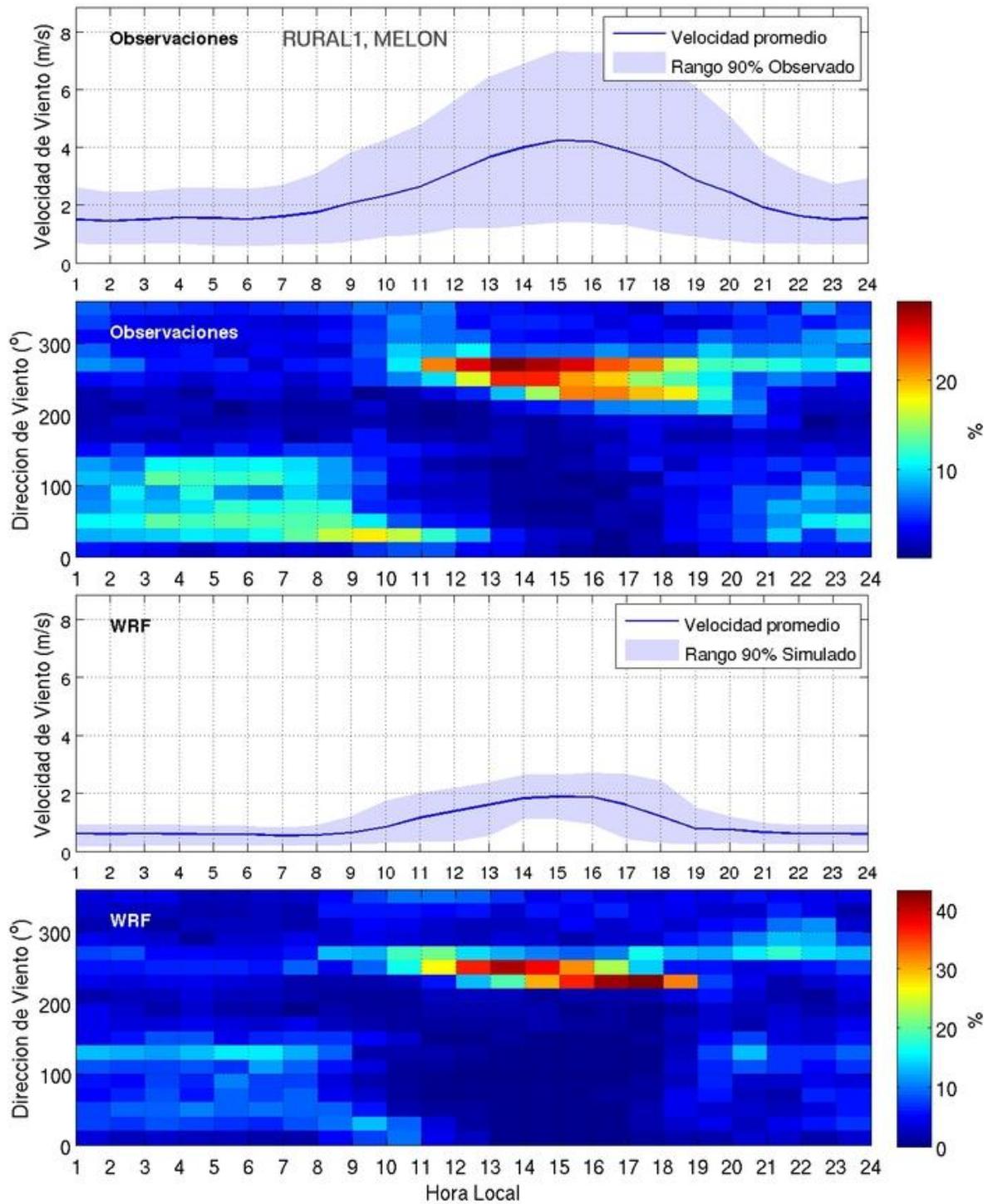


Figura A II.15: Equivalente a figura 6.2 pero para la estación Rural 1

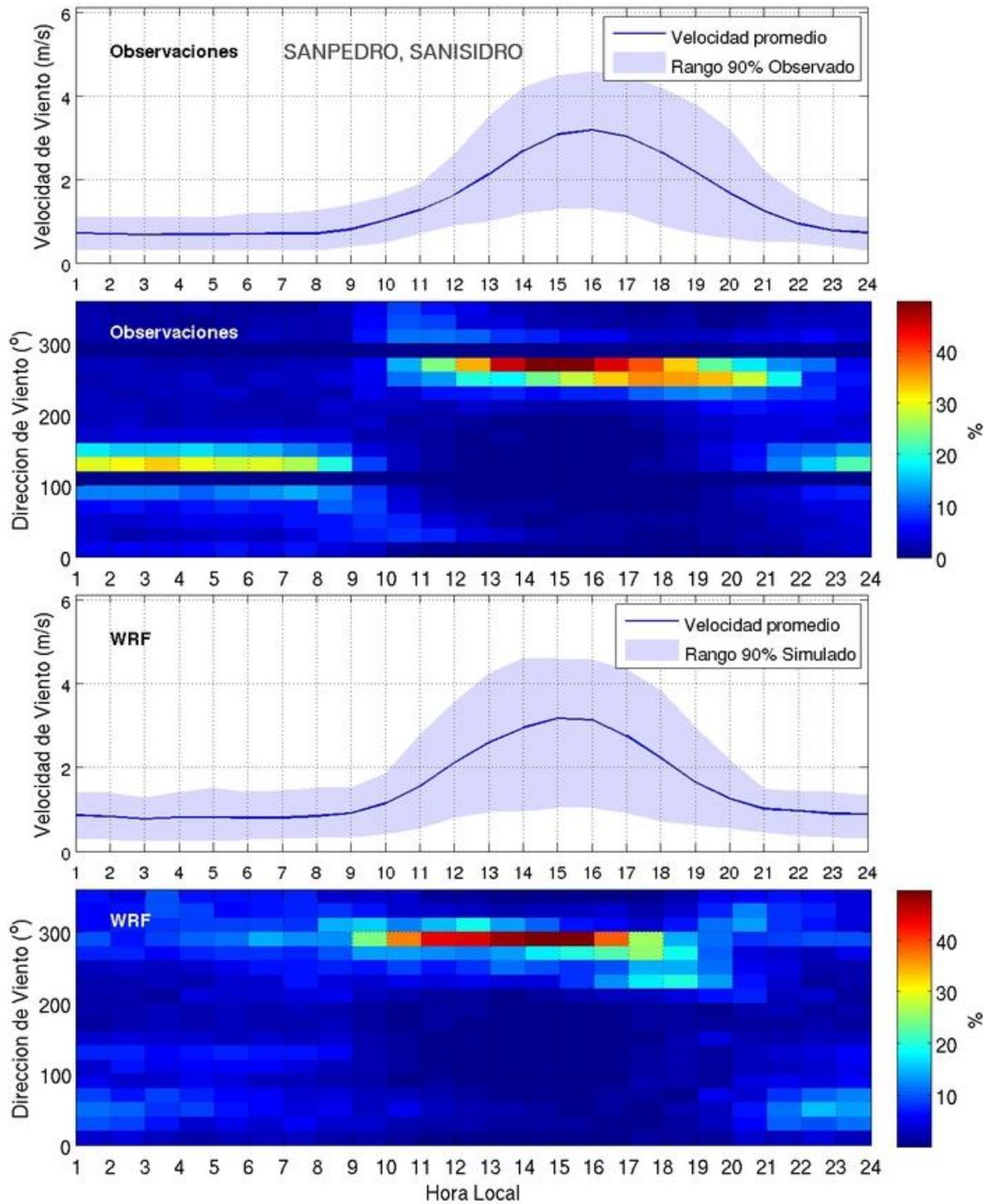


Figura A II.16: Equivalente a figura 6.2 pero para la estación San Pedro

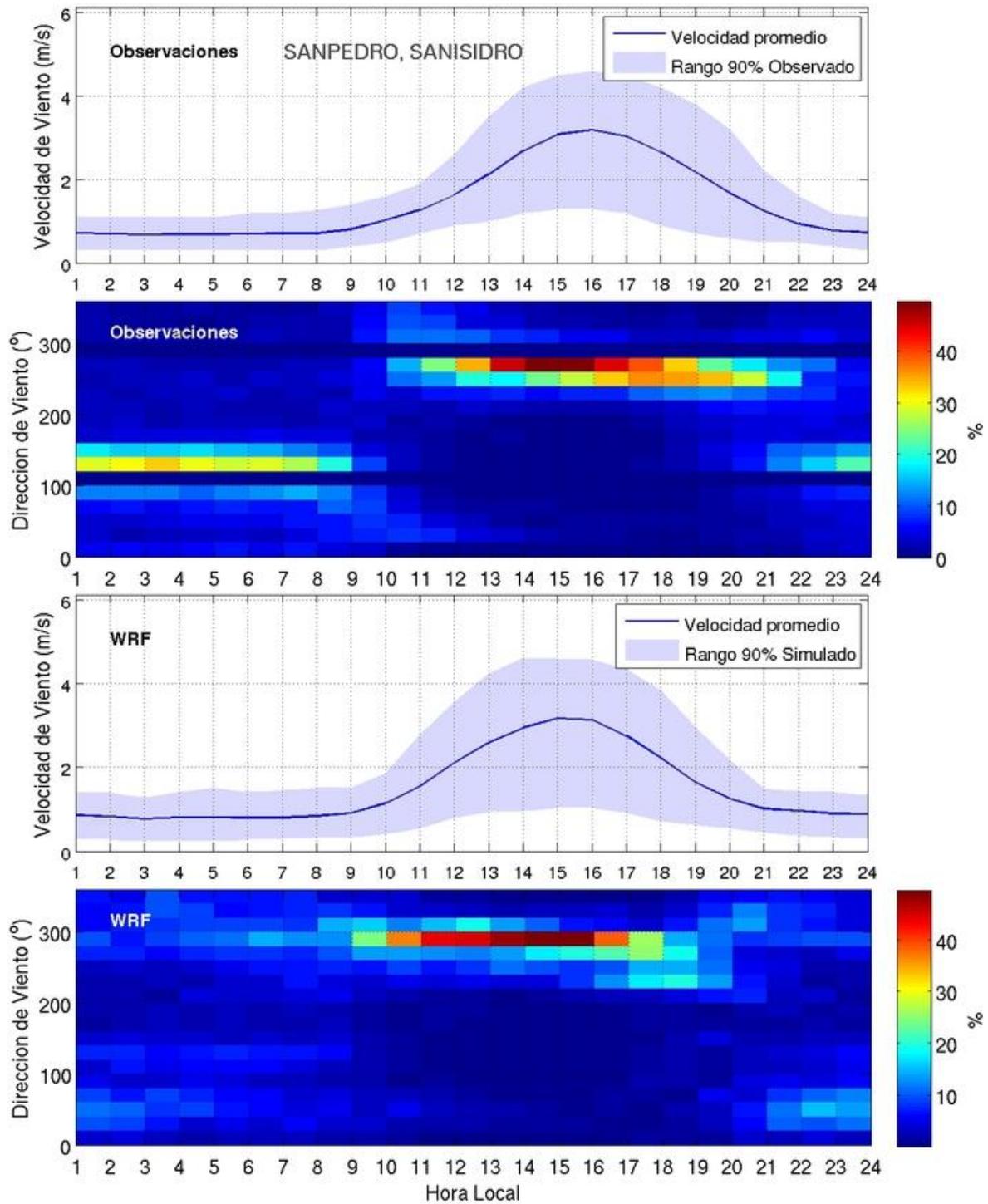


Figura A II.17: Equivalente a figura 6.2 pero para la estación San Pedro

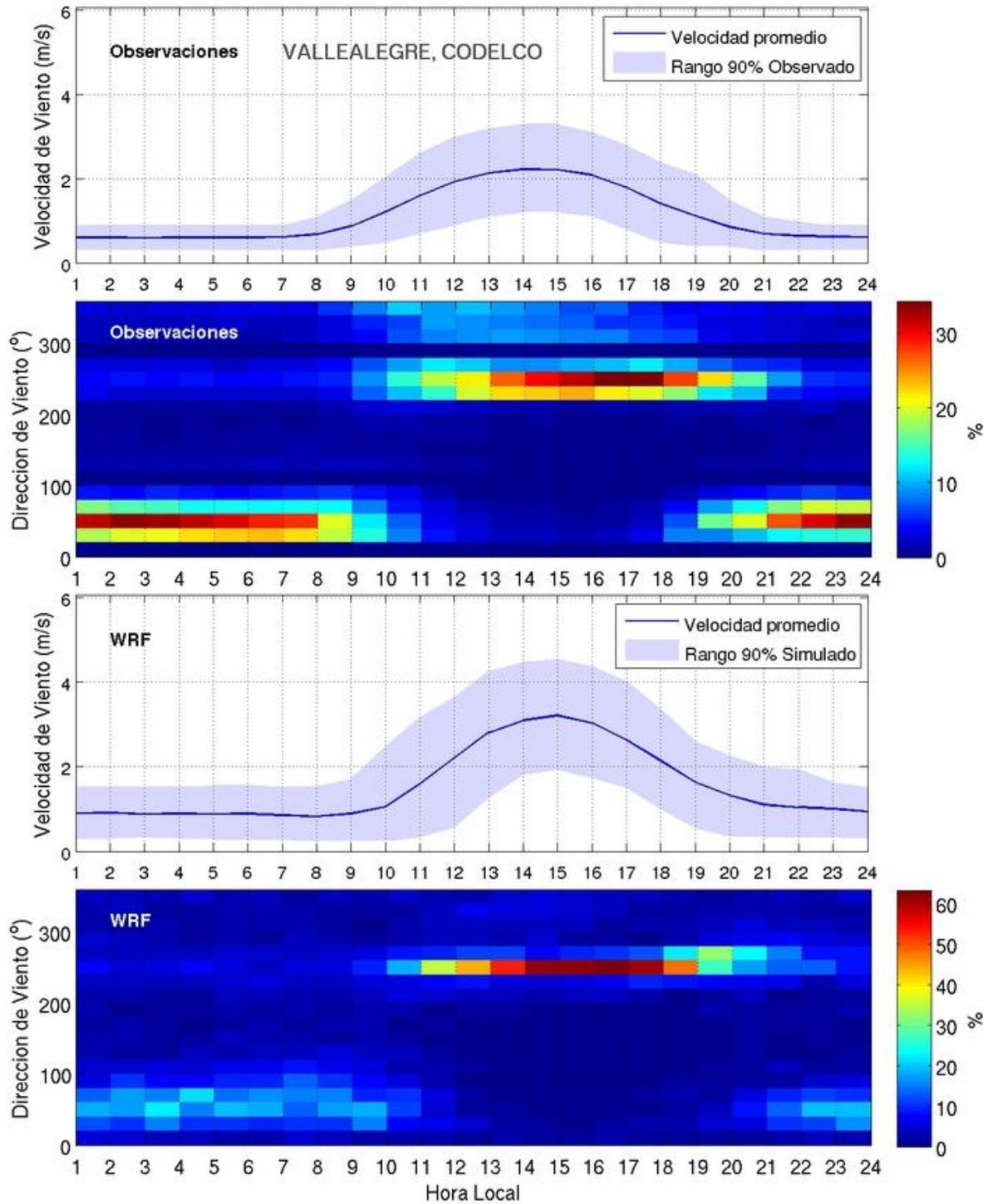


Figura A II.18: Equivalente a figura 6.2 pero para la estación Valle Alegre

Anexo III, Figuras complementarias al capítulo 8

Series de tiempo

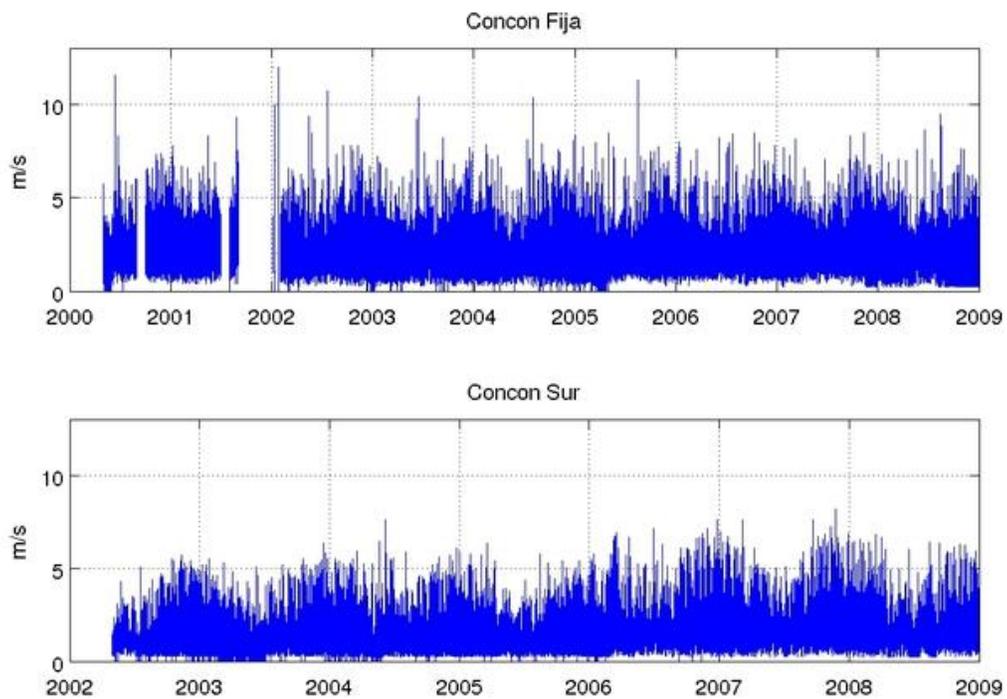


Figura A III.1: Series de tiempo completas de la velocidad de viento en las estaciones Junta de Vecinos y Concón Sur.

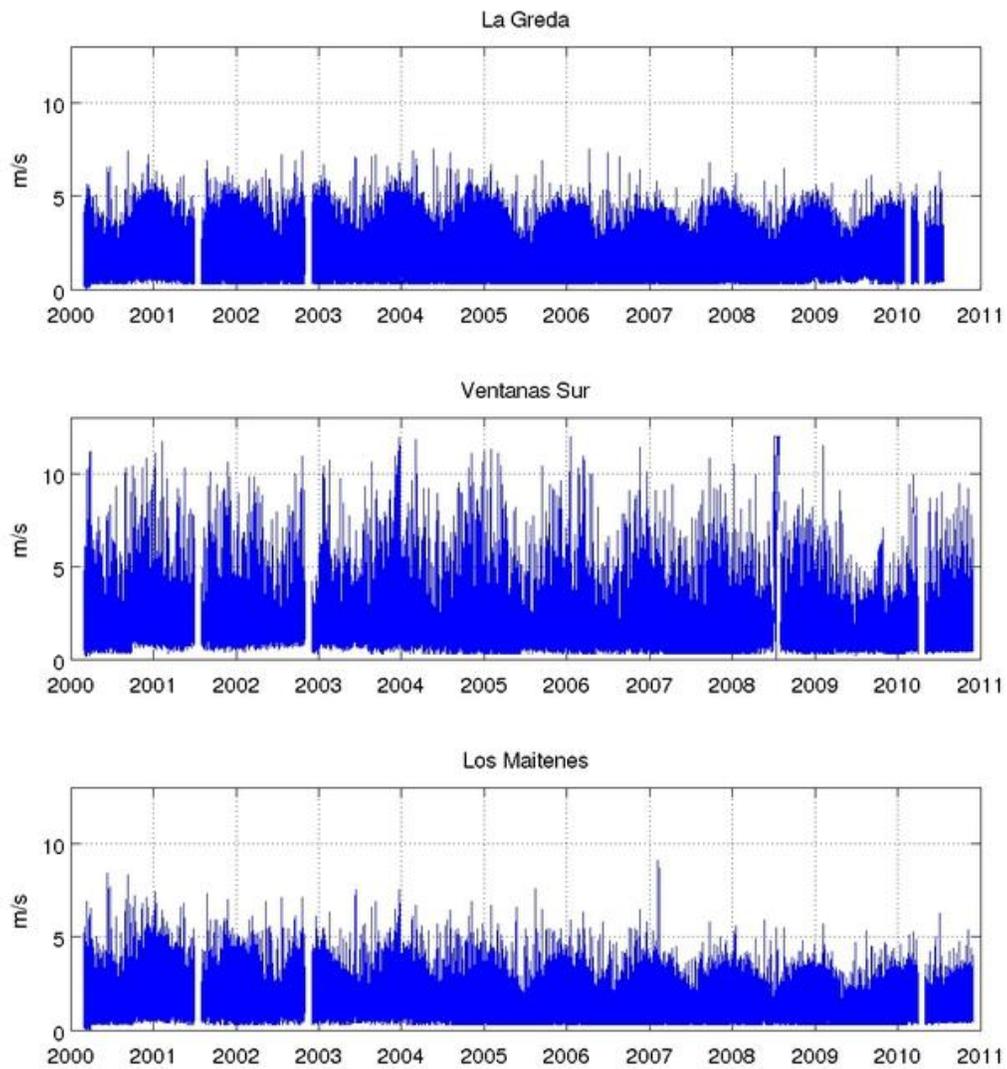


Figura A III.2: Series de tiempo completas de la velocidad de viento en las estaciones La Greda, Sur y Los Maitenes.

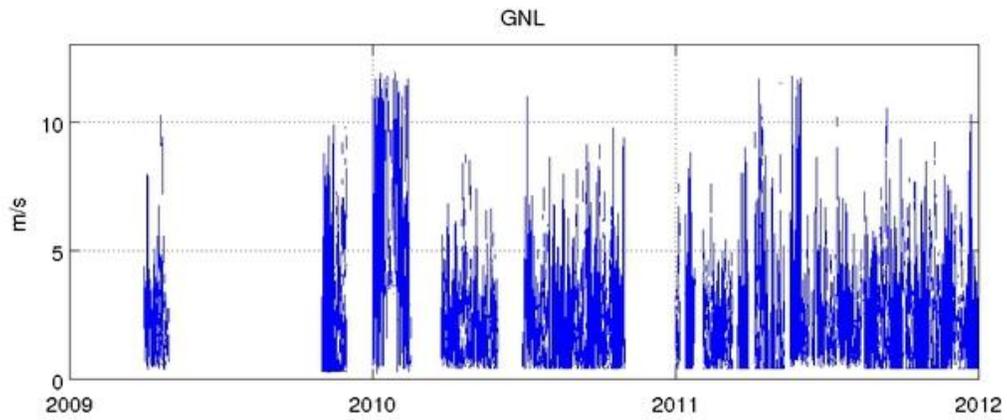


Figura A III.3: Serie de tiempo completa de la velocidad de viento en la estación GNL.

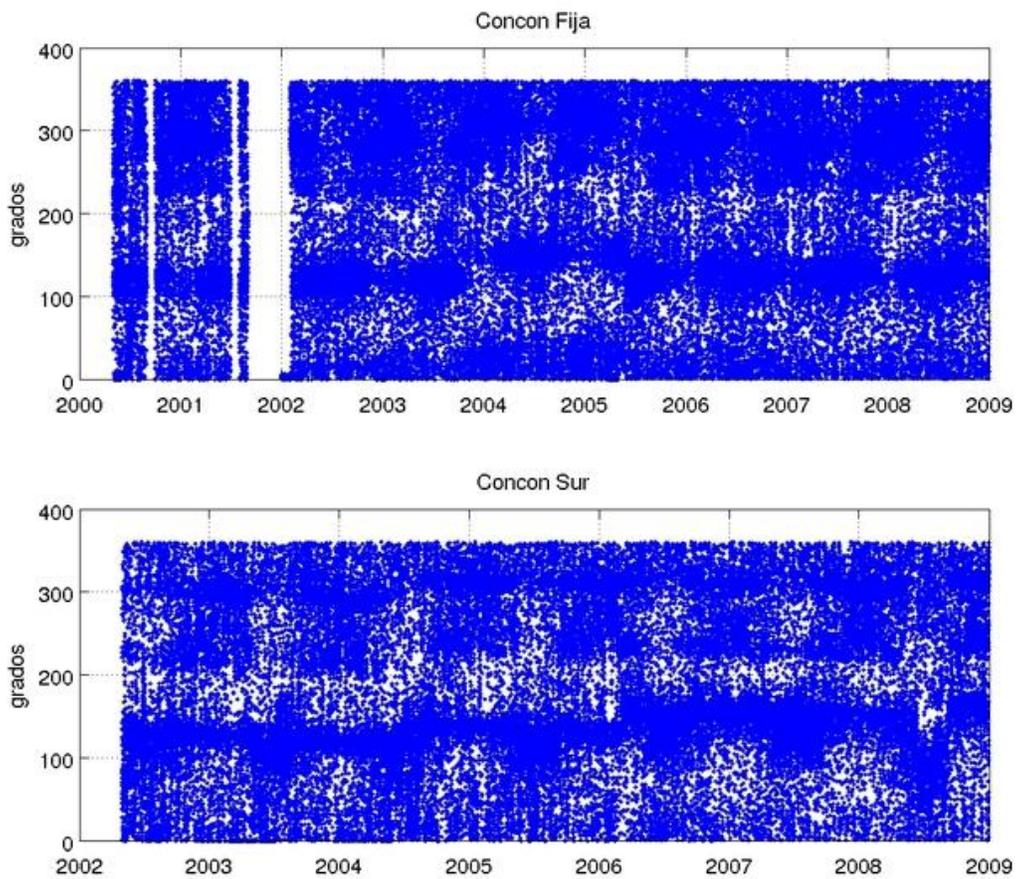


Figura A III.4: Series de tiempo completas de la dirección de viento en las estaciones Junta de Vecions y Concón Sur.

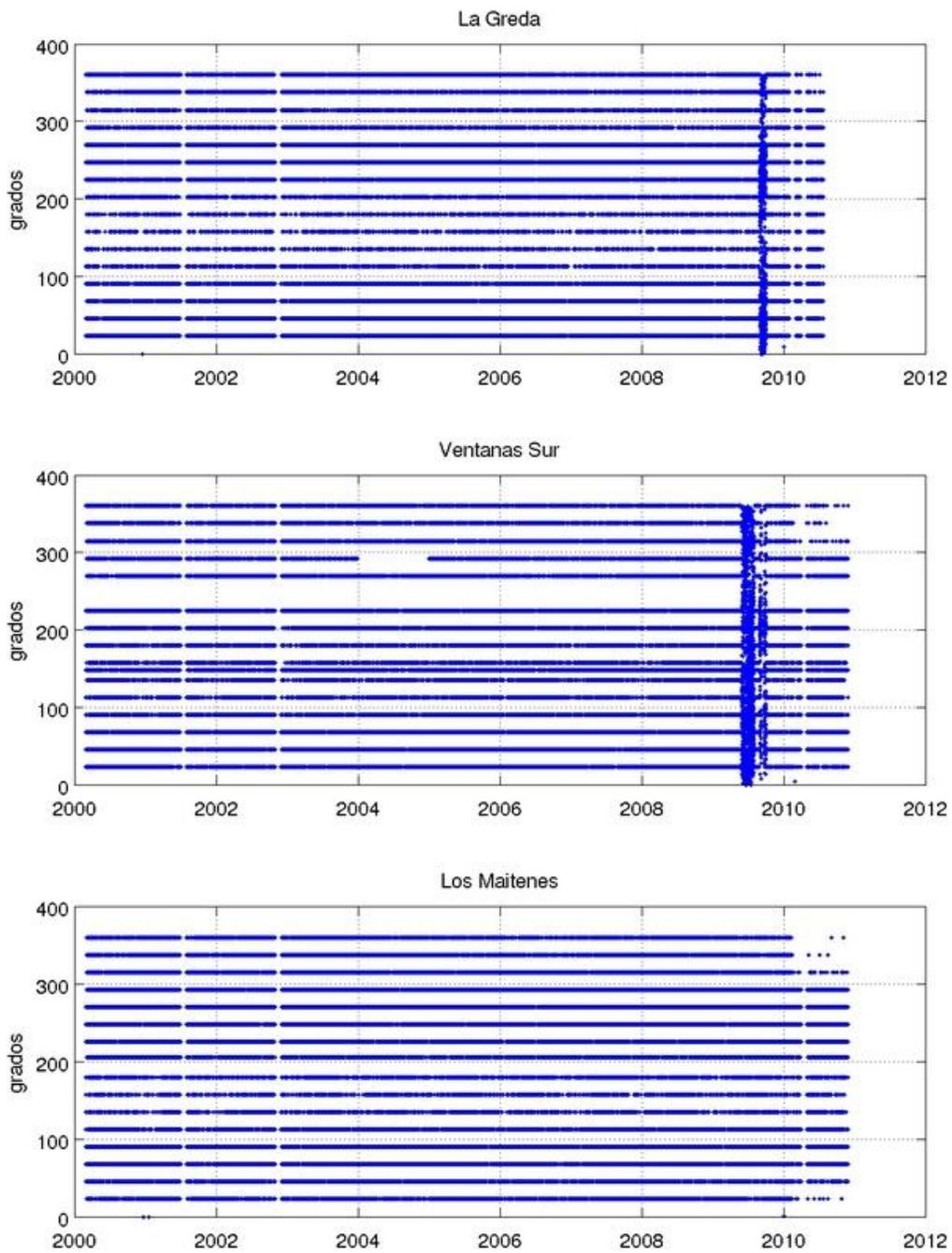


Figura A III.5: Series de tiempo completas de la dirección de viento en las estaciones La Greda, Sur y Los Maitenes

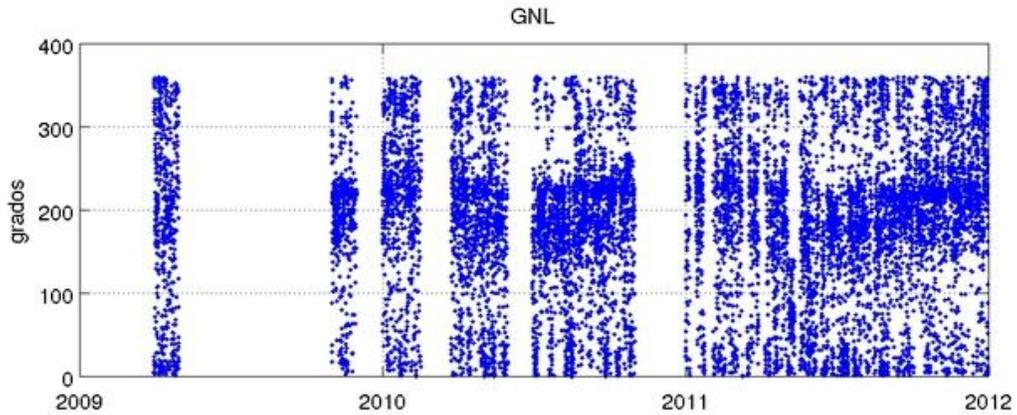


Figura A III.6: Series de tiempo completas de la dirección de viento en la estación GNL.

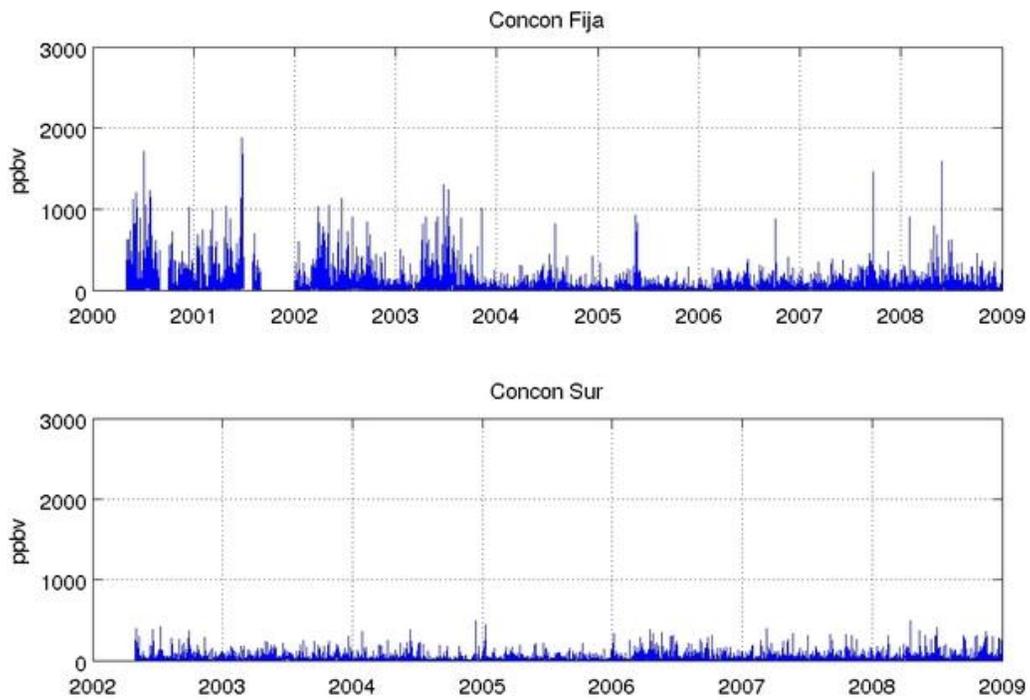


Figura A III.7: Series de tiempo completas de las concentraciones de SO_2 en las estaciones Junta de Vecinos y Concón Sur.

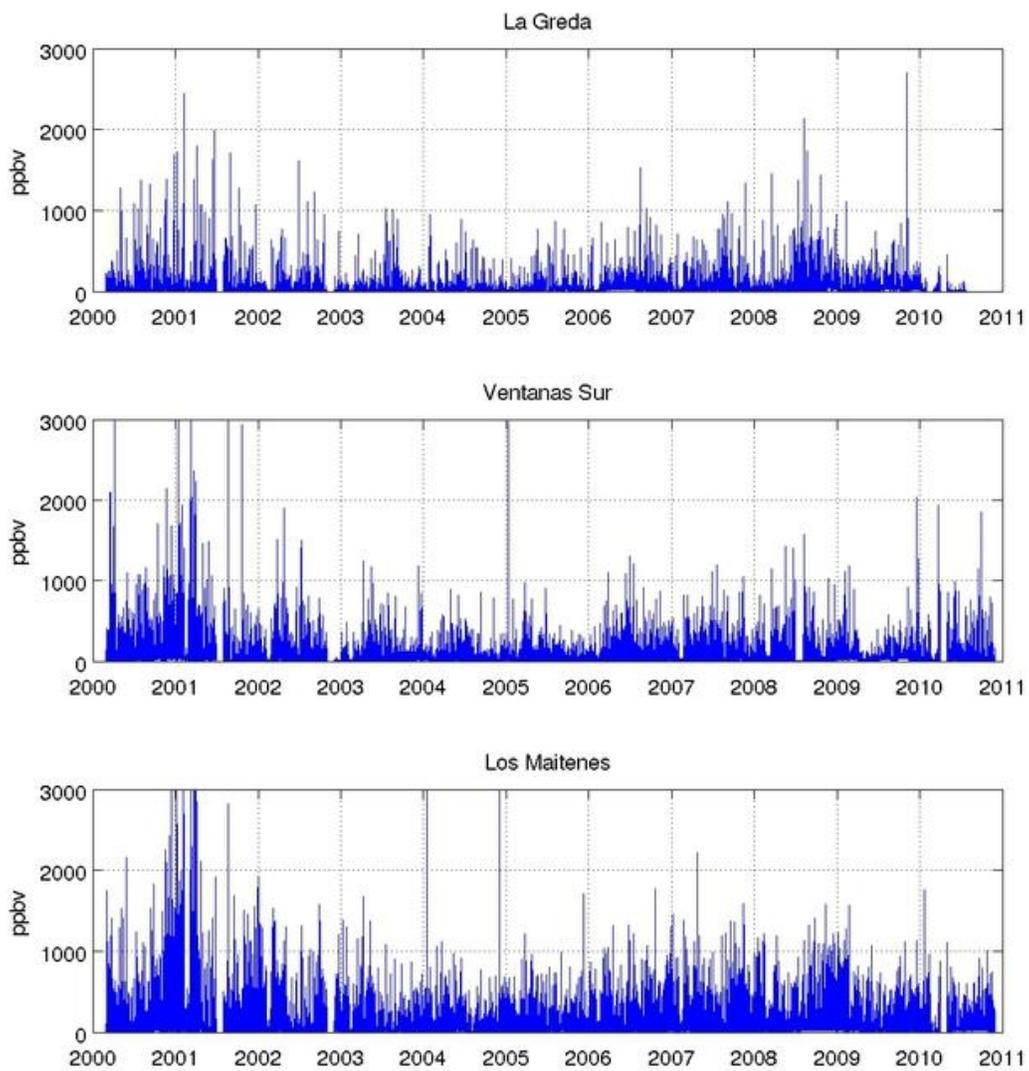


Figura A III.8: Series de tiempo completas las concentraciones de SO₂ de en las estaciones La Greda, Sur y Los Maitenes.

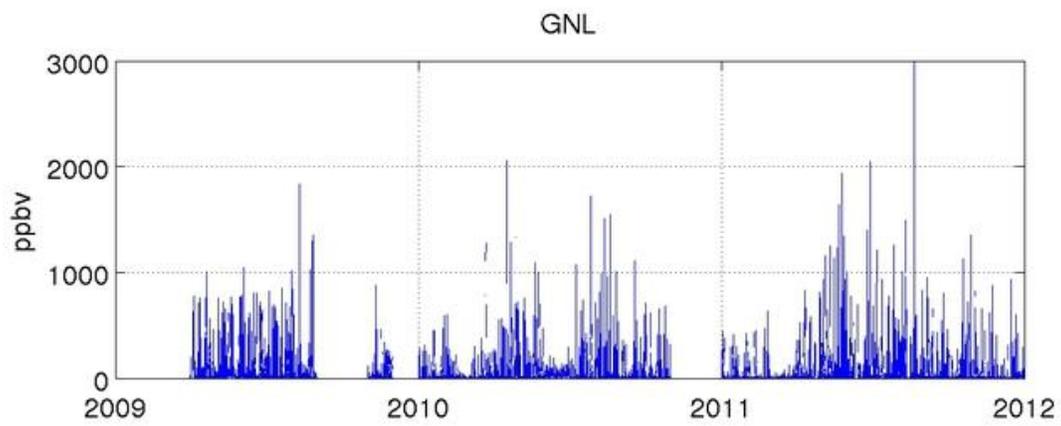


Figura A III.9: Series de tiempo completas las concentraciones de SO₂ de en las estación GNL.

Ciclos diarios durante eventos de concentraciones altas de SO₂

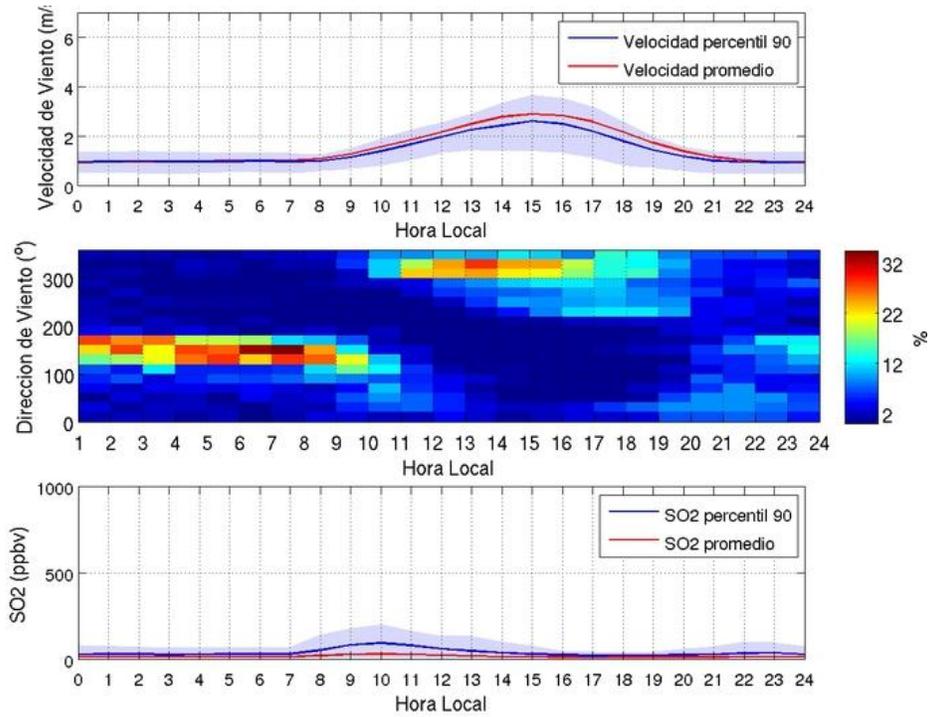


Figura A III.10: Equivalente a figura 8.12 pero para la estación Concón Sur.

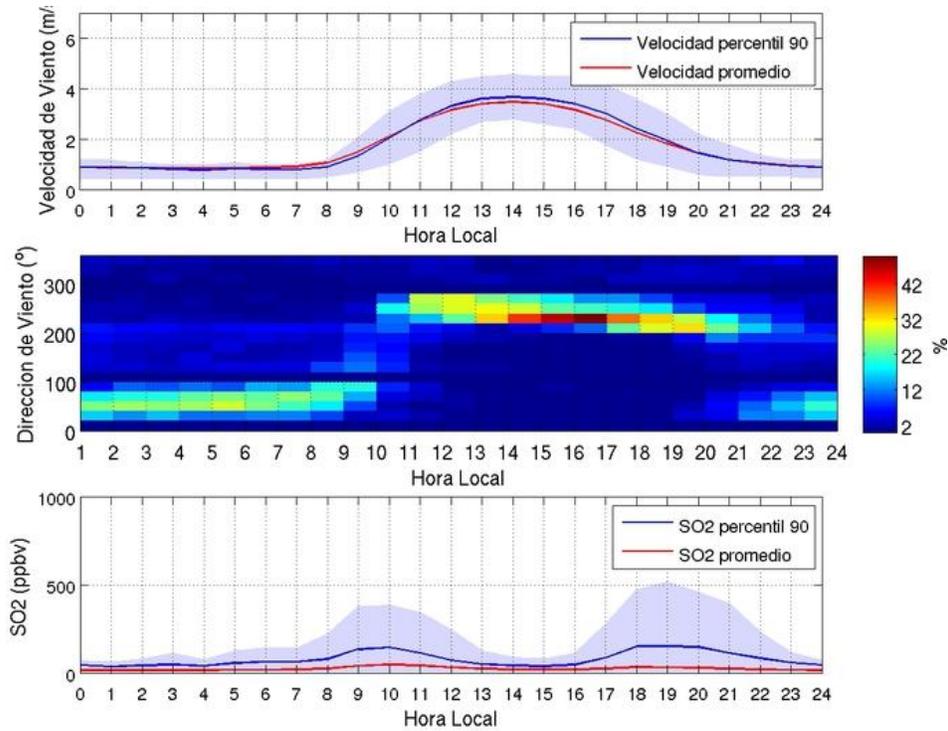


Figura A III.11: Equivalente a figura 8.12 pero para la estación La Greda.

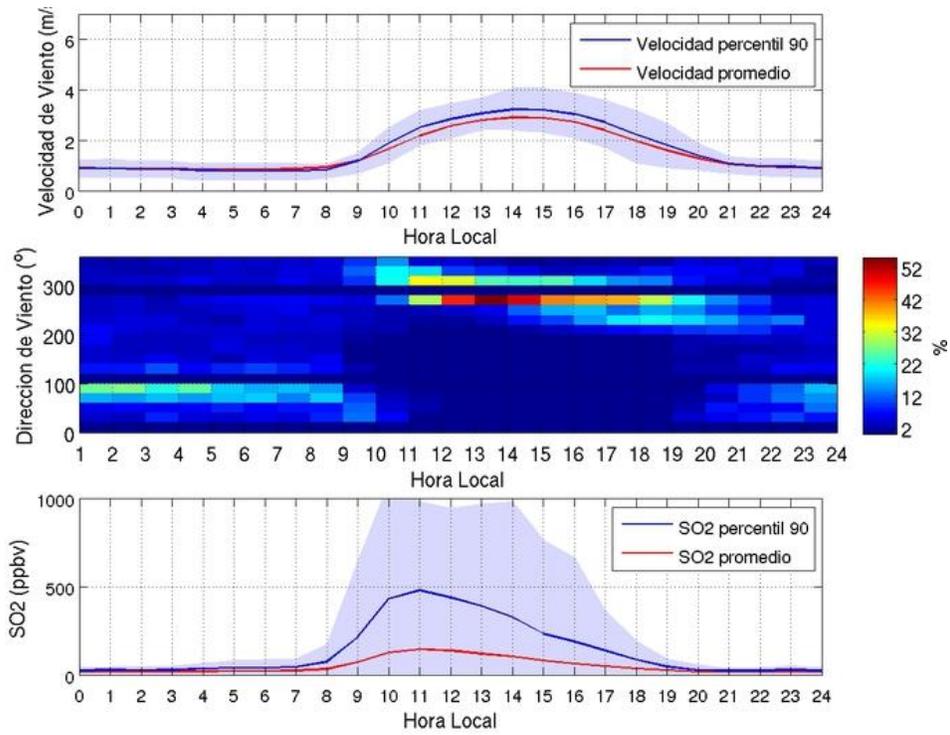


Figura A III.12: Equivalente a figura 8.12 pero para la estación Los Maitenes.

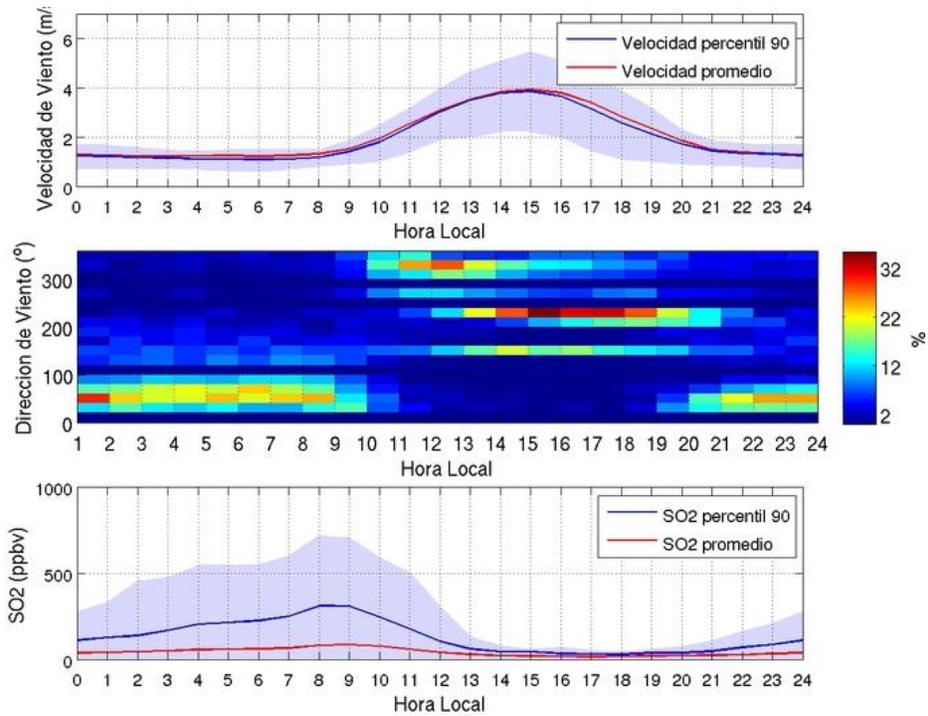


Figura A III.13: Equivalente a figura 8.12 pero para la estación Sur.

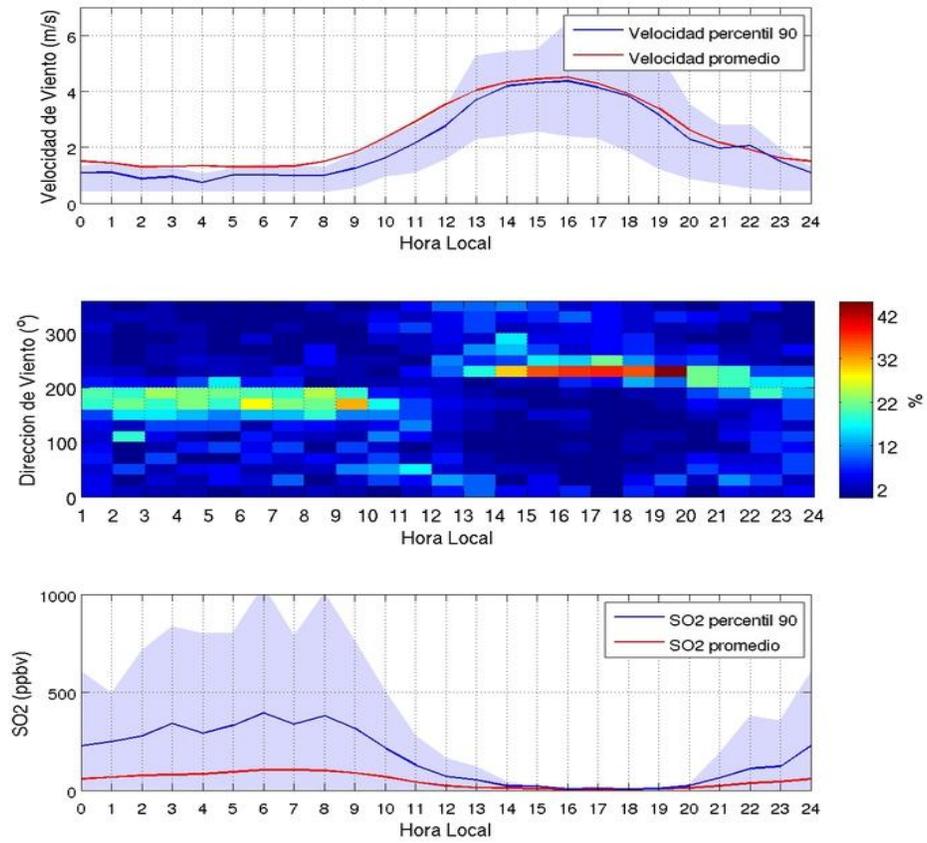


Figura A III.14: Equivalente a figura 8.12 pero para la estación GNL.

Estabilidad atmosférica durante eventos de concentraciones altas de SO₂

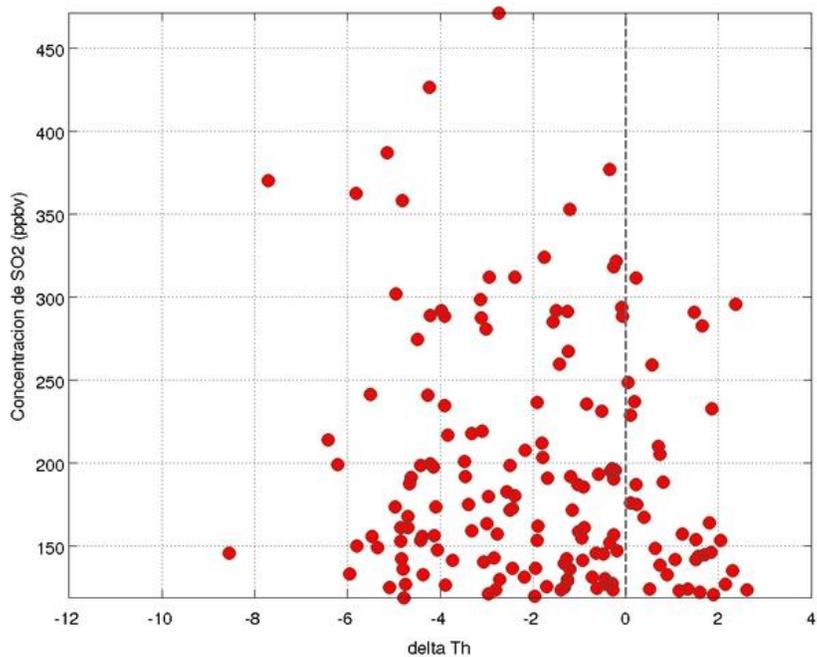


Figura A III.15: Equivalente a figura 8.13 pero para la estación Concón Sur.

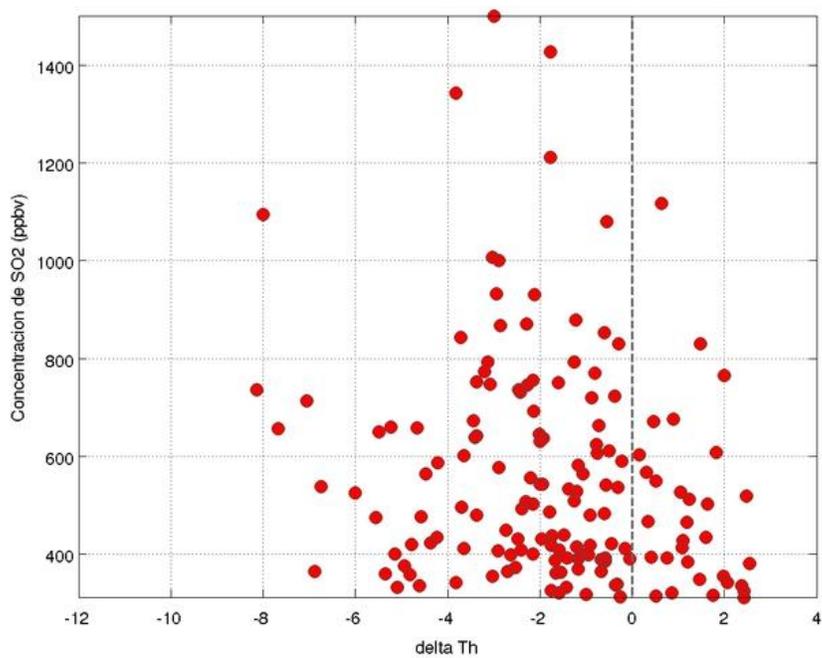


Figura A III.16: Equivalente a figura 8.13 pero para la estación La Greda

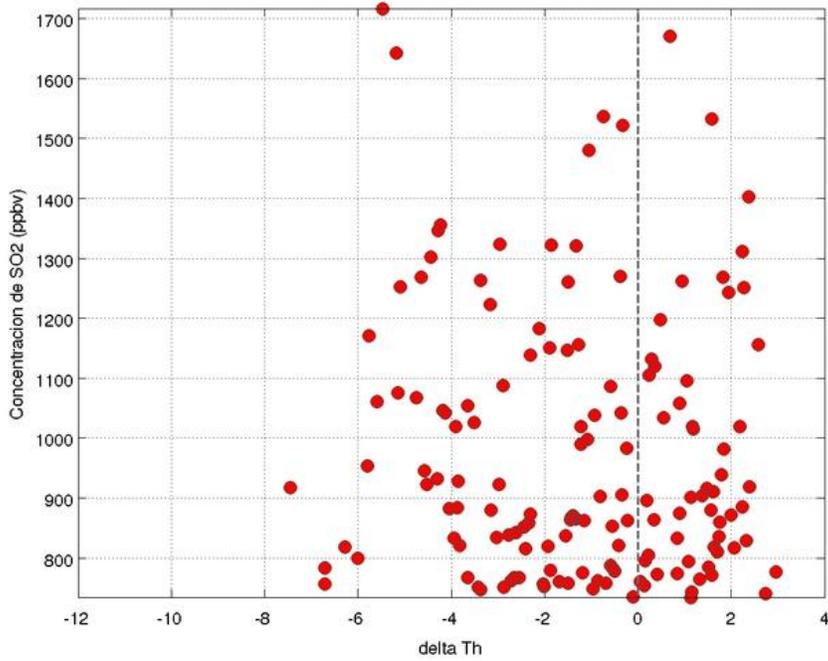


Figura A III.17: Equivalente a figura 8.13 pero para la estación Los Maitenes.

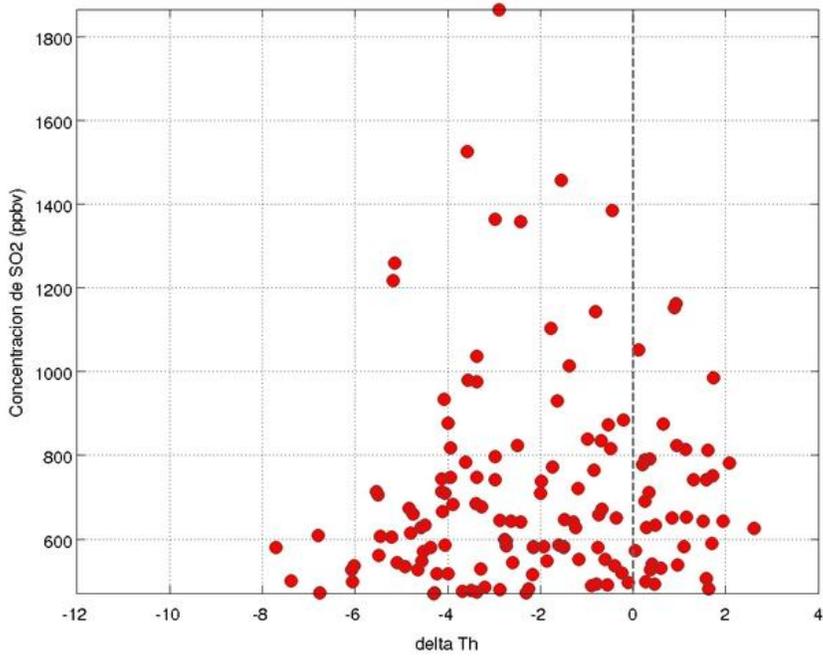


Figura A III.18: Equivalente a figura 8.13 pero para la estación Sur.

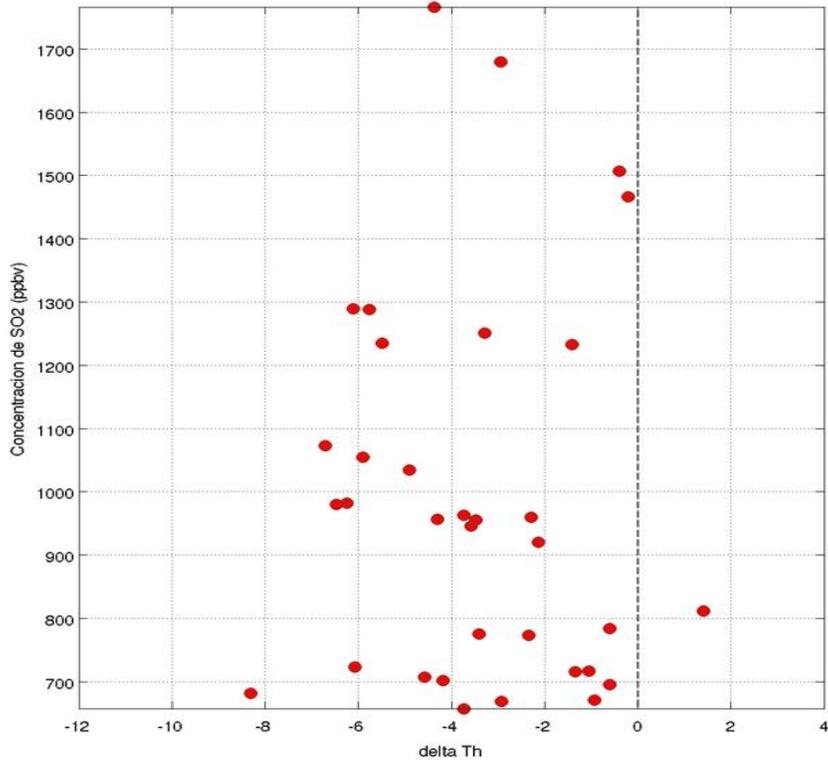


Figura A III.19: Equivalente a figura 8.13 pero para la estación GNL.

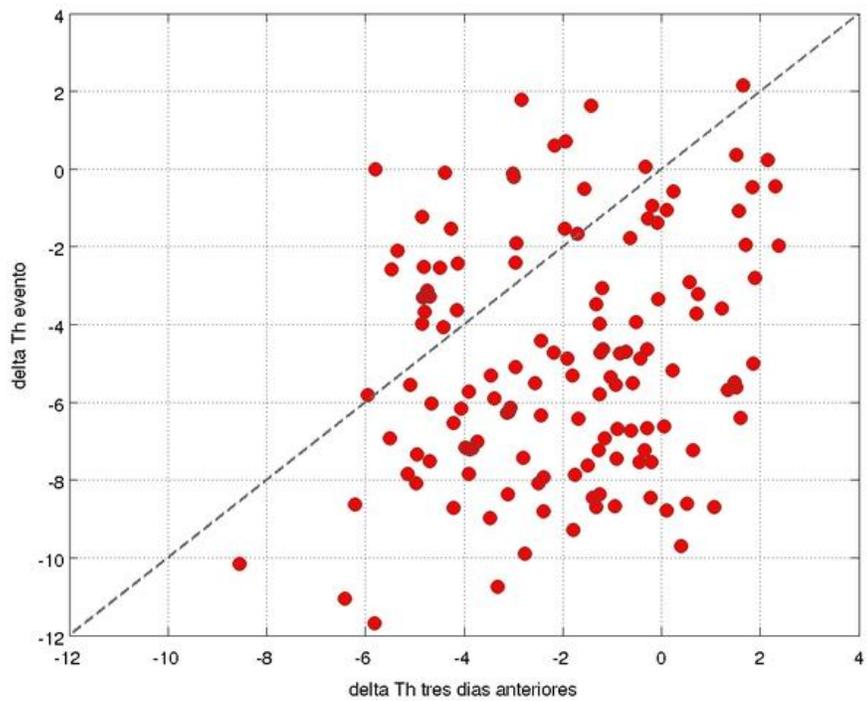


Figura A III.20: Equivalente a figura 8.14 pero para la estación Concón Sur.

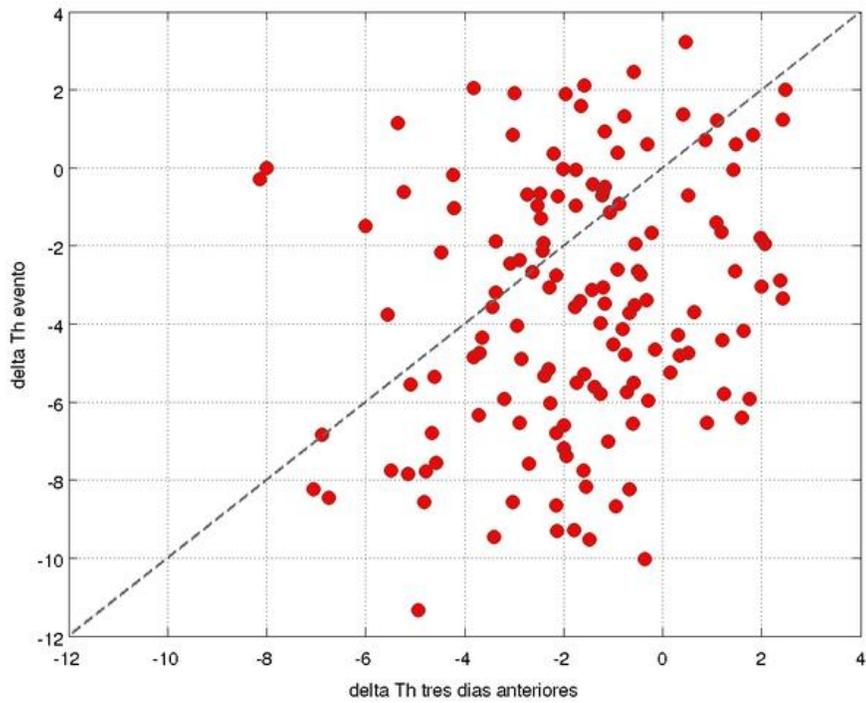


Figura A III.21: Equivalente a figura 8. 14 pero para la estación La Greda.

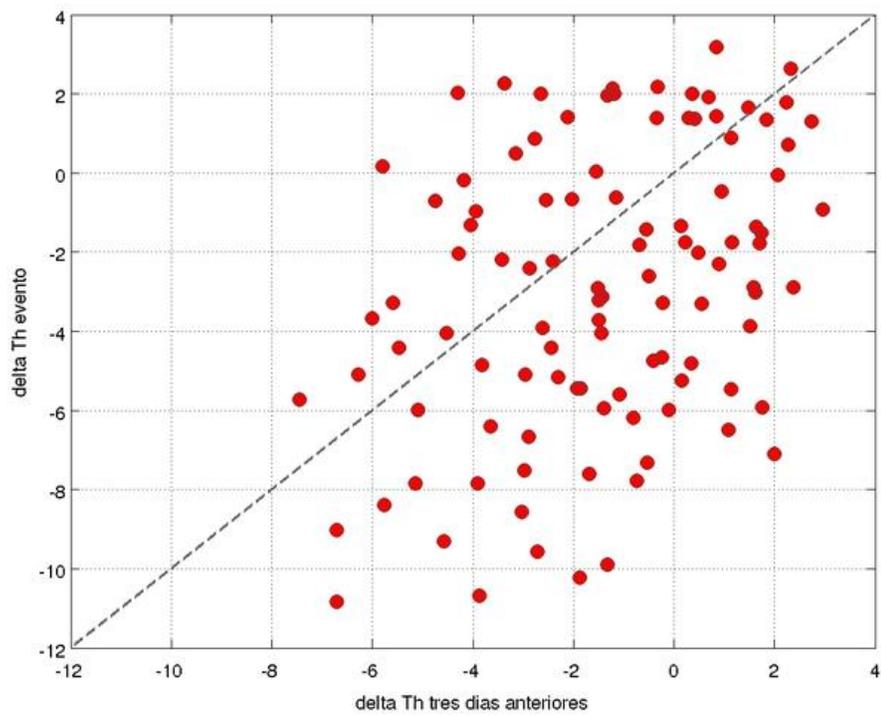


Figura A III.22: Equivalente a figura 8.14 pero para la estación Los Maitenes.

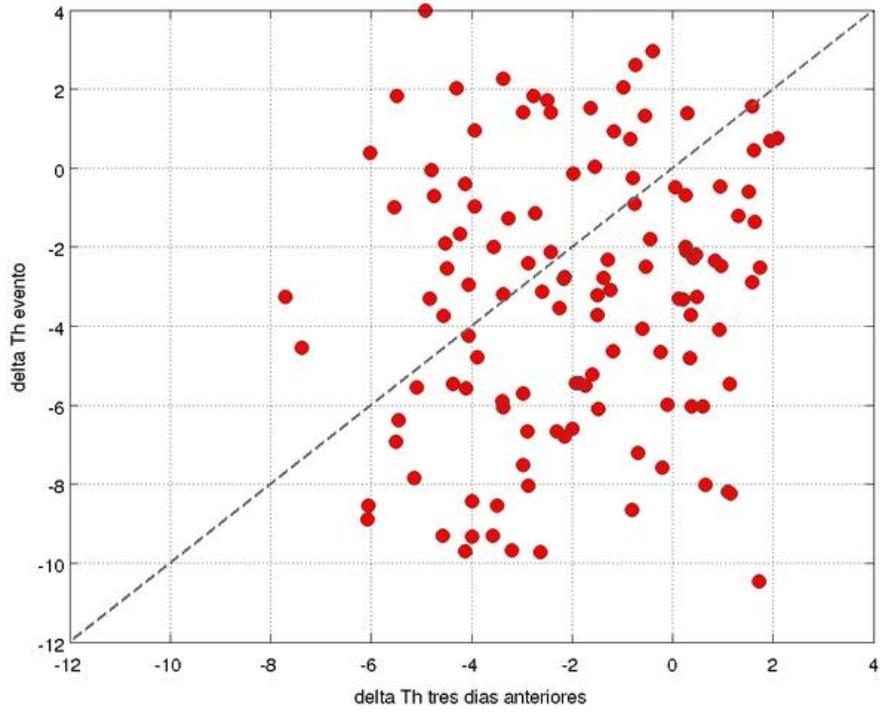


Figura A III.23: Equivalente a figura 8.14 pero para la estación Sur.

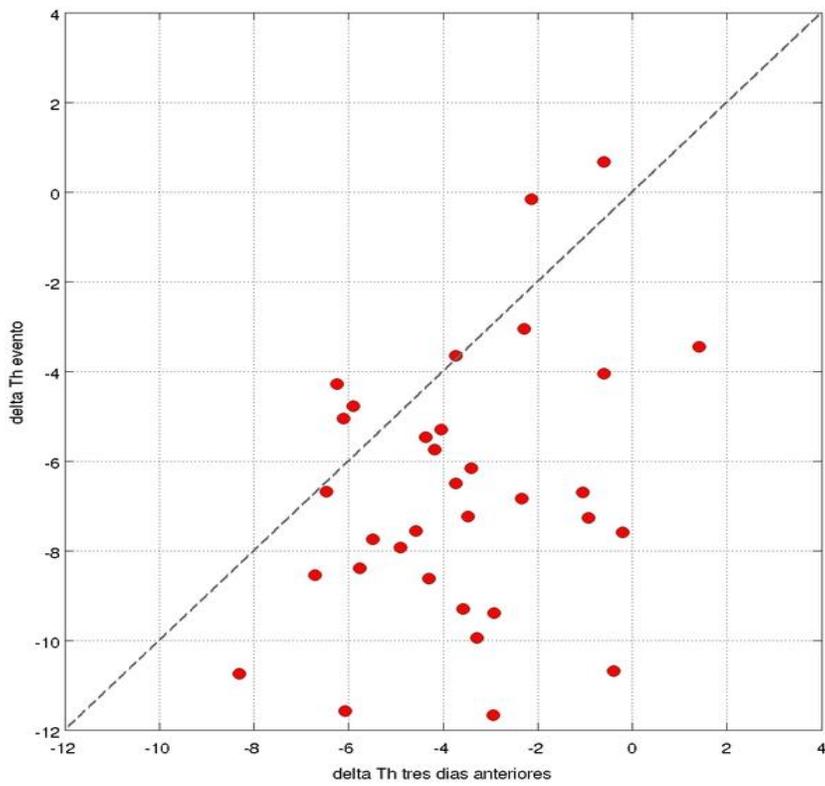


Figura A III.24: Equivalente a figura 8.14 pero para la estación GNL.

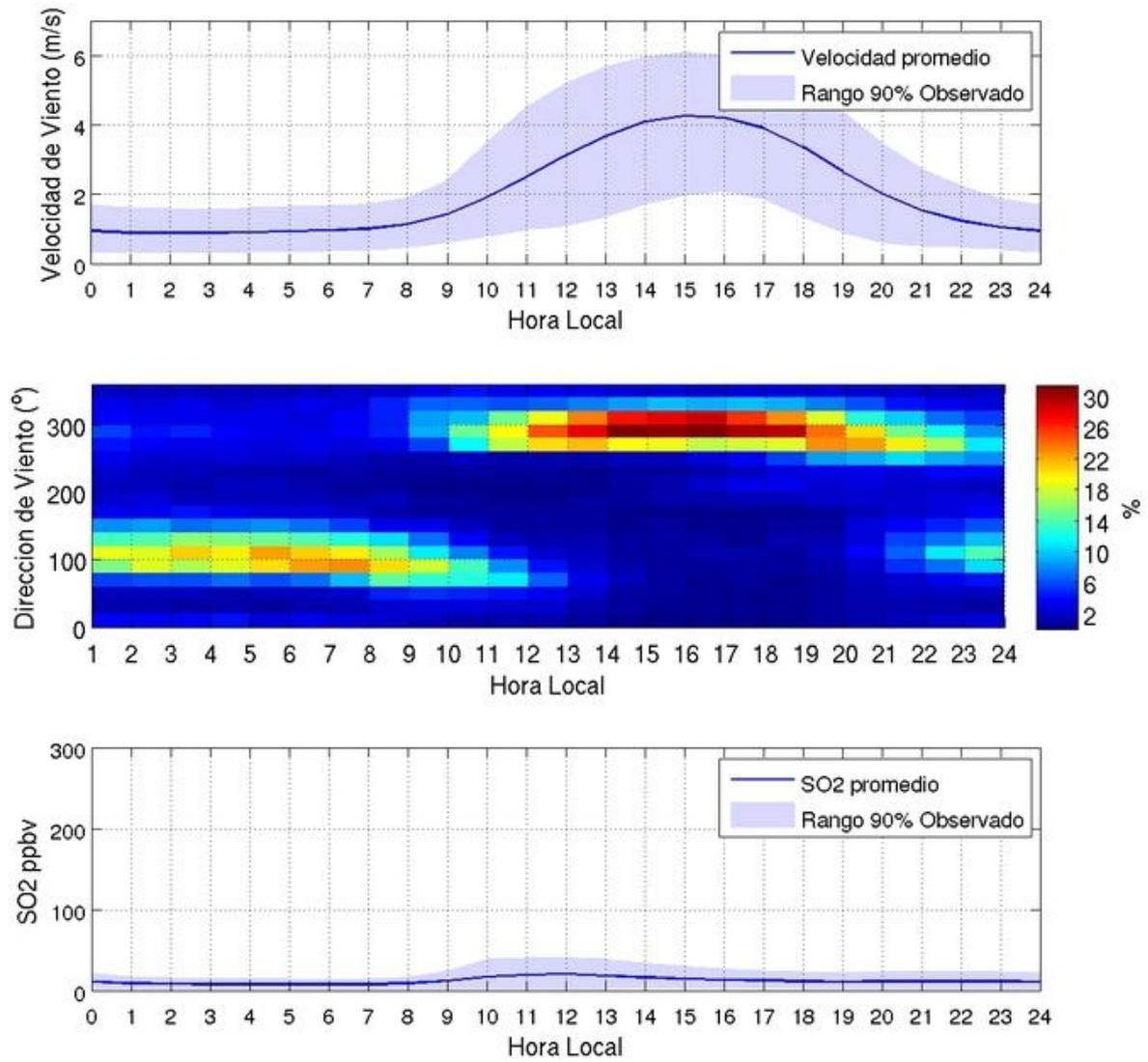


Figura A III.25: Equivalente a figura 8.1 pero para la estación Colmo.

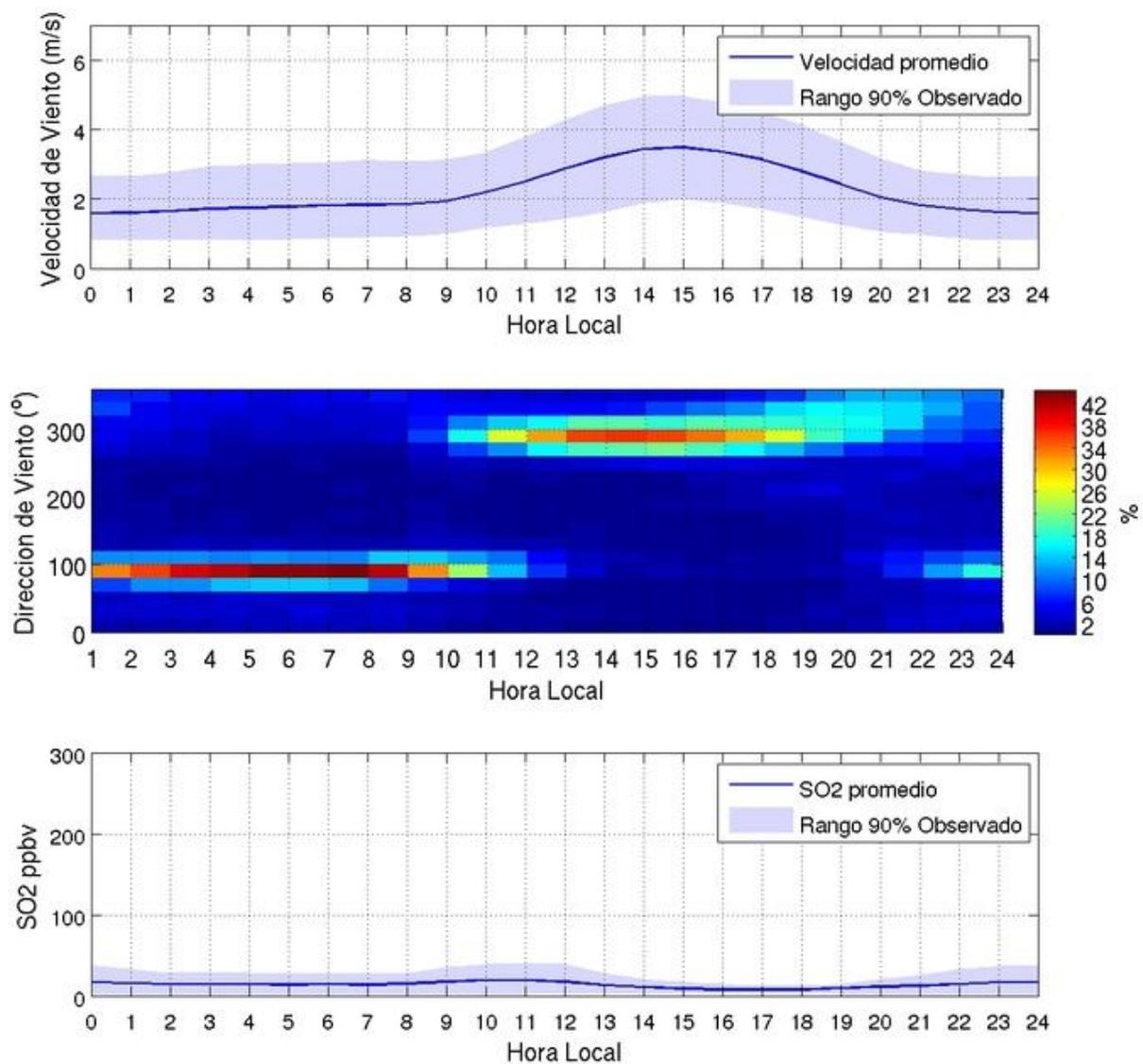


Figura A III.26: Equivalente a figura 8.1 pero para la estación Las Gaviotas.

Anexo IV, Figuras complementarias para el capítulo 11

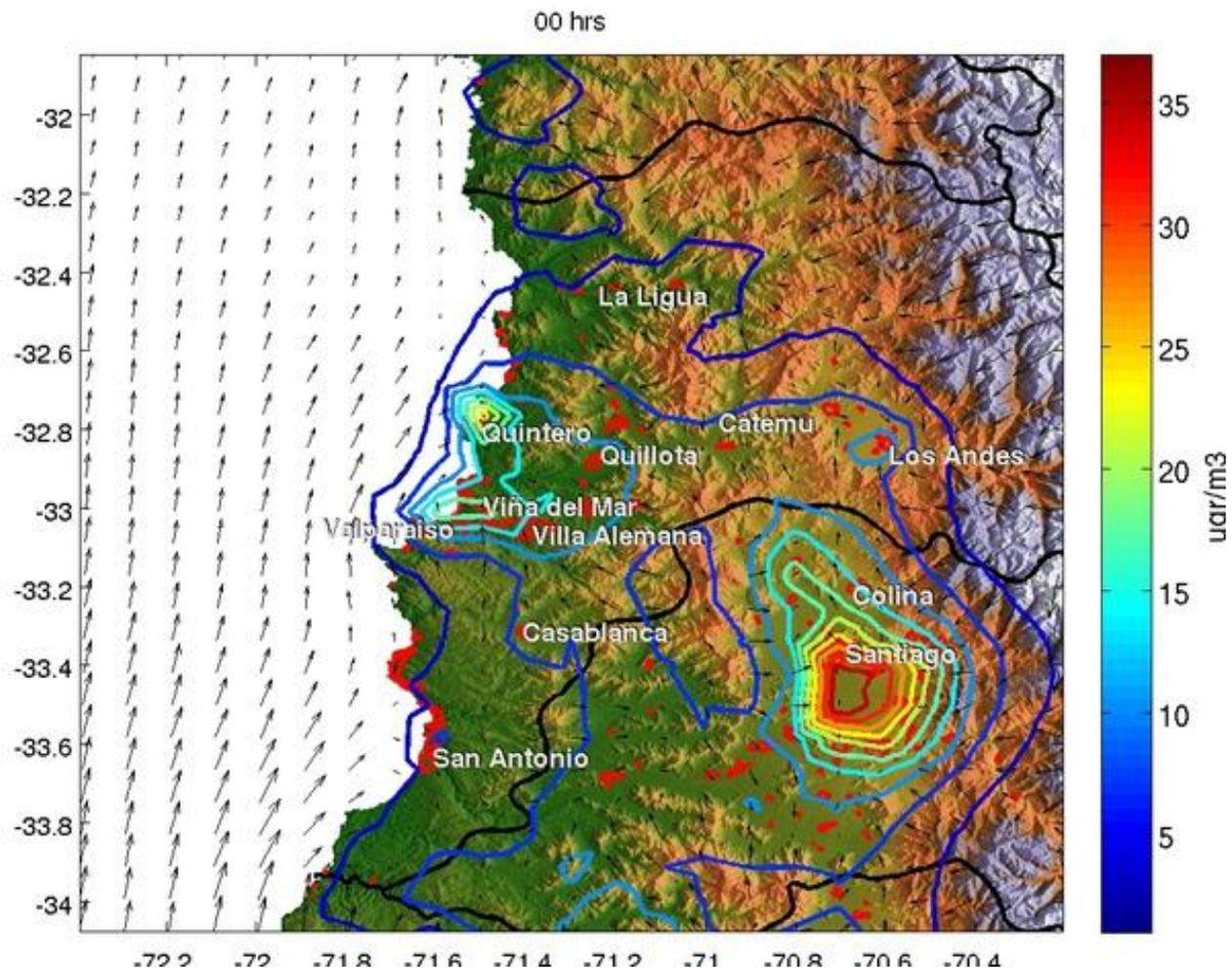


Figura IV.1: Promedio de concentraciones de NOx a las 00:00 durante los meses enero-marzo 2010 según el modelo WRF. Se muestra la topografía como fondo y se indican algunas ciudades de las Regiones Valparaíso y Metropolitana. Las flechas representan los vientos del primer nivel del modelo (aprox. 15 metros de altura) según el modelo WRF. Los contornos representan las concentraciones de NOx según el modelo WRF (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Se observan vientos débiles a esta hora con poco transporte de contaminantes.

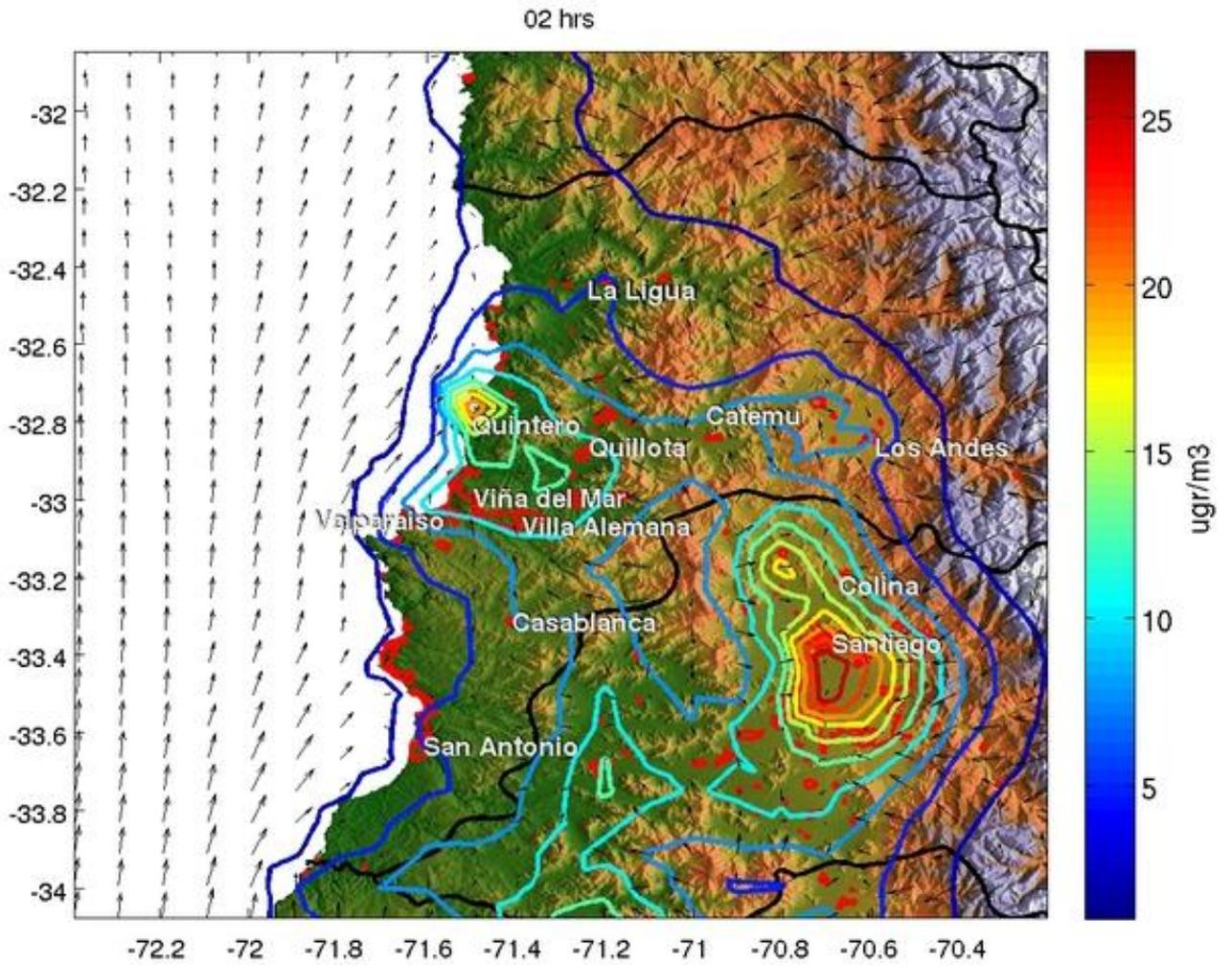


Figura IV.2:Equivalente a la figura IV.1 pero a las 02:00.

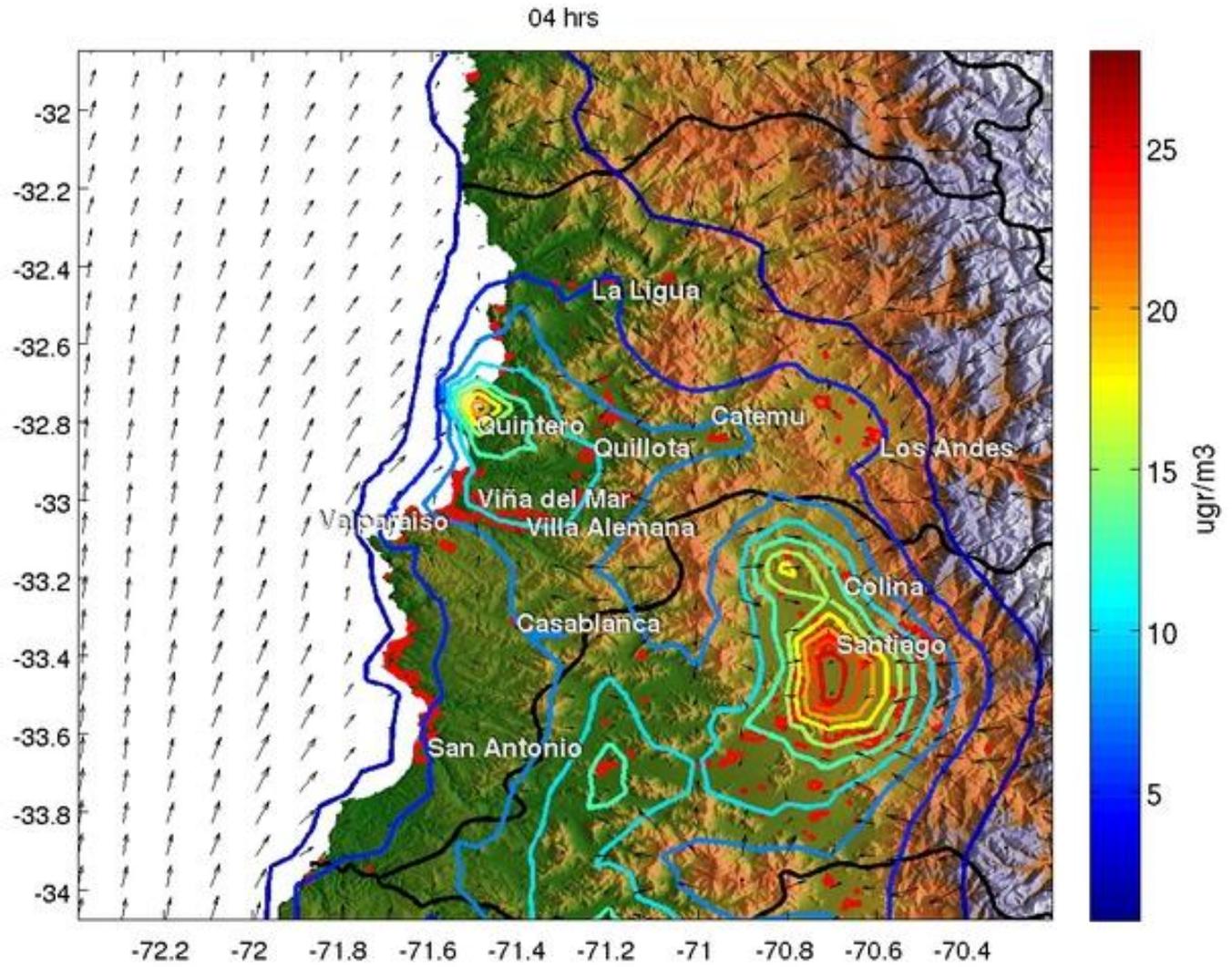


Figura IV:3 Equivalente a la figura IV.1 pero a las 04:00.

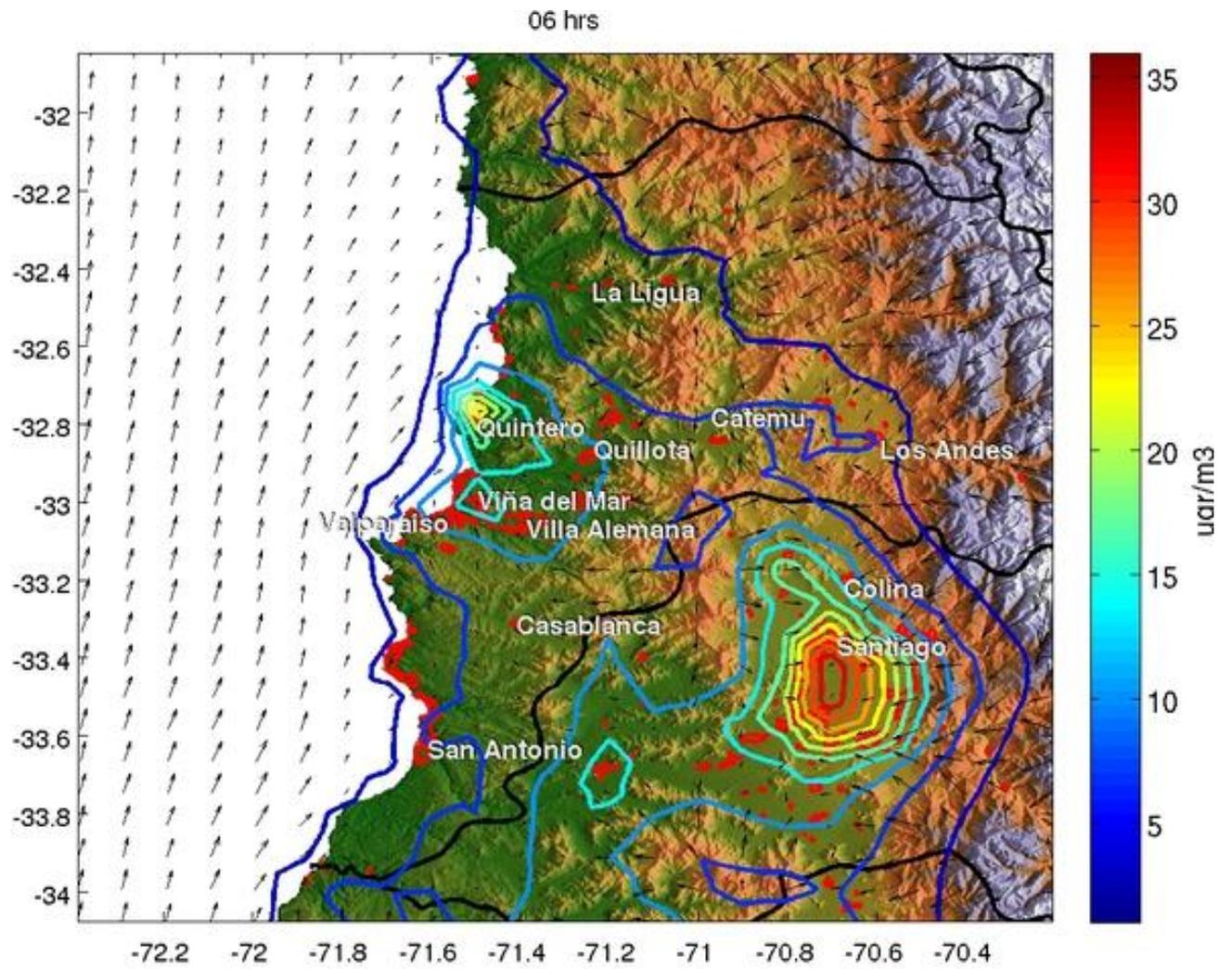


Figura IV.4: Equivalente a la figura IV.1 pero a las 06:00.

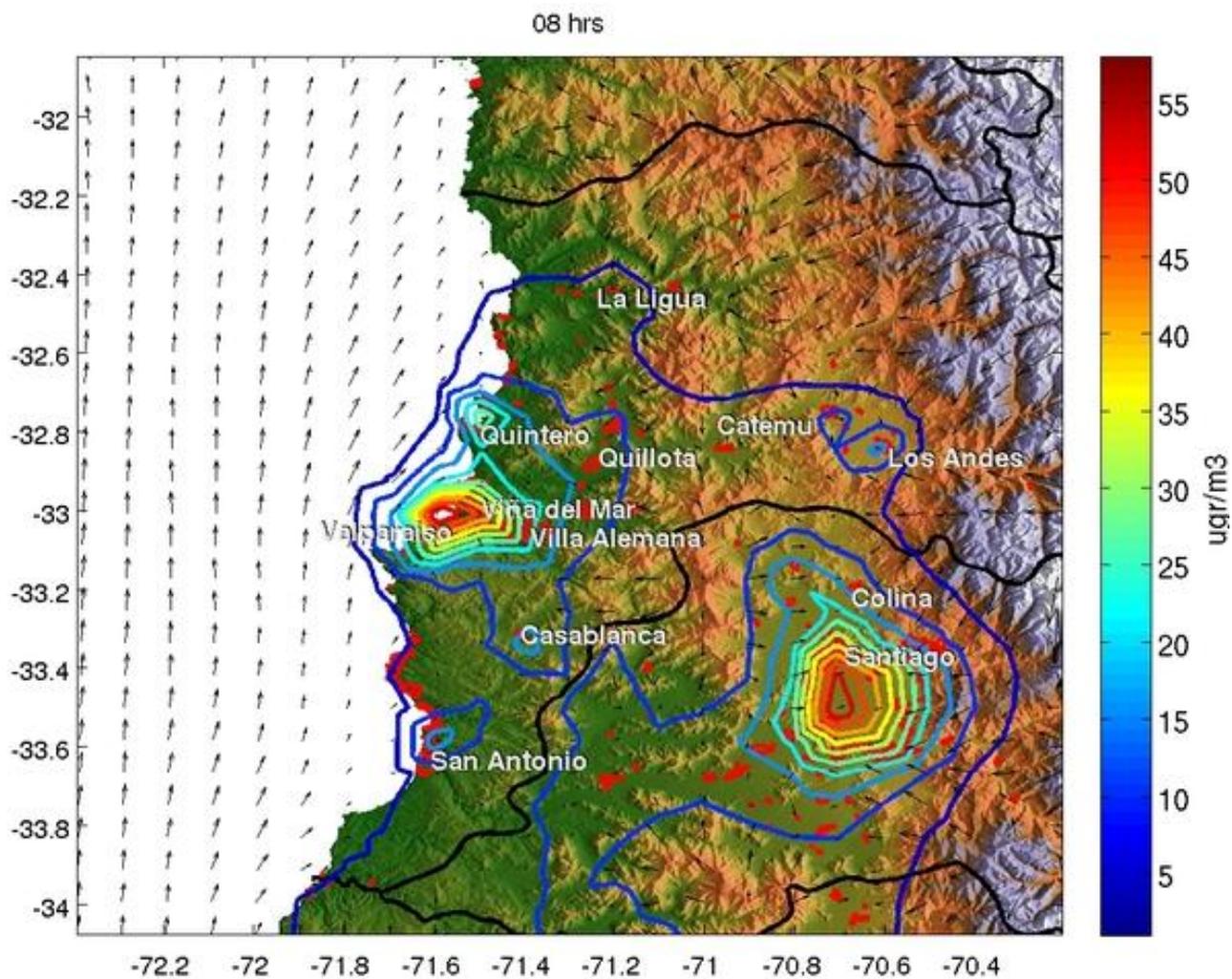


Figura IV.5: Equivalente a la figura IV.1 pero a las 08:00.

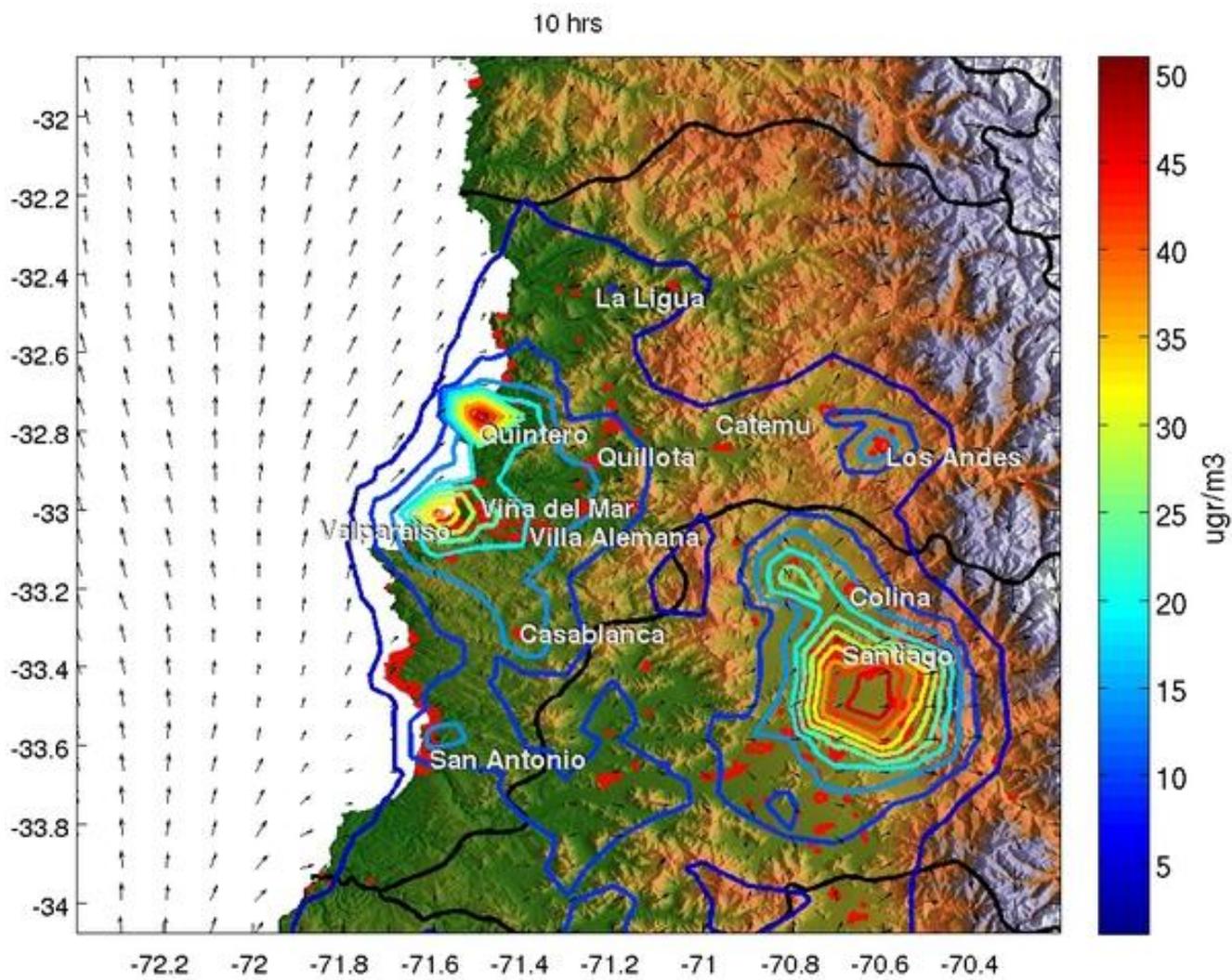


Figura IV.6: Equivalente a la figura IV.1 pero a las 10:00.

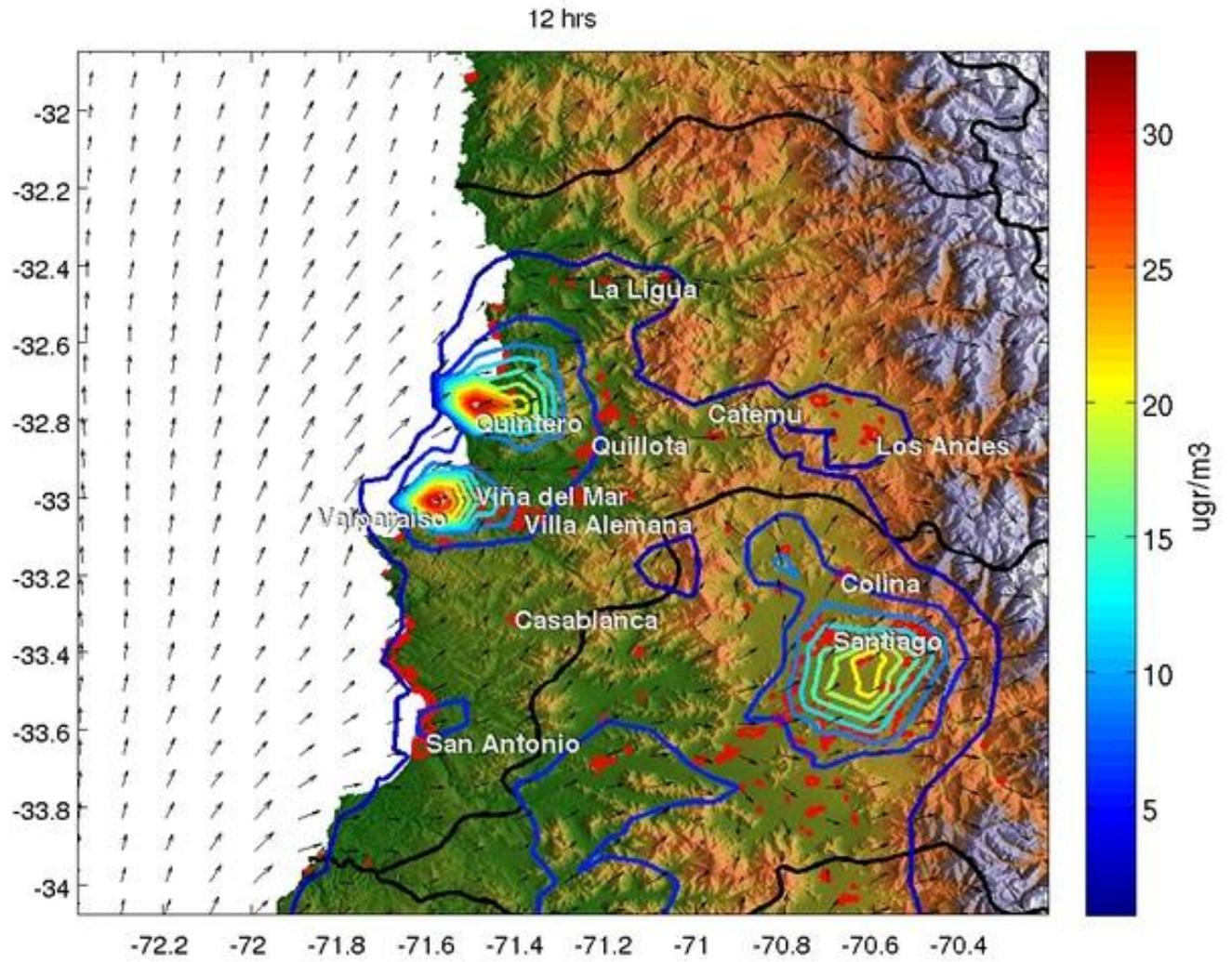


Figura IV.7: Equivalente a la figura IV.1 pero a las 12:00.

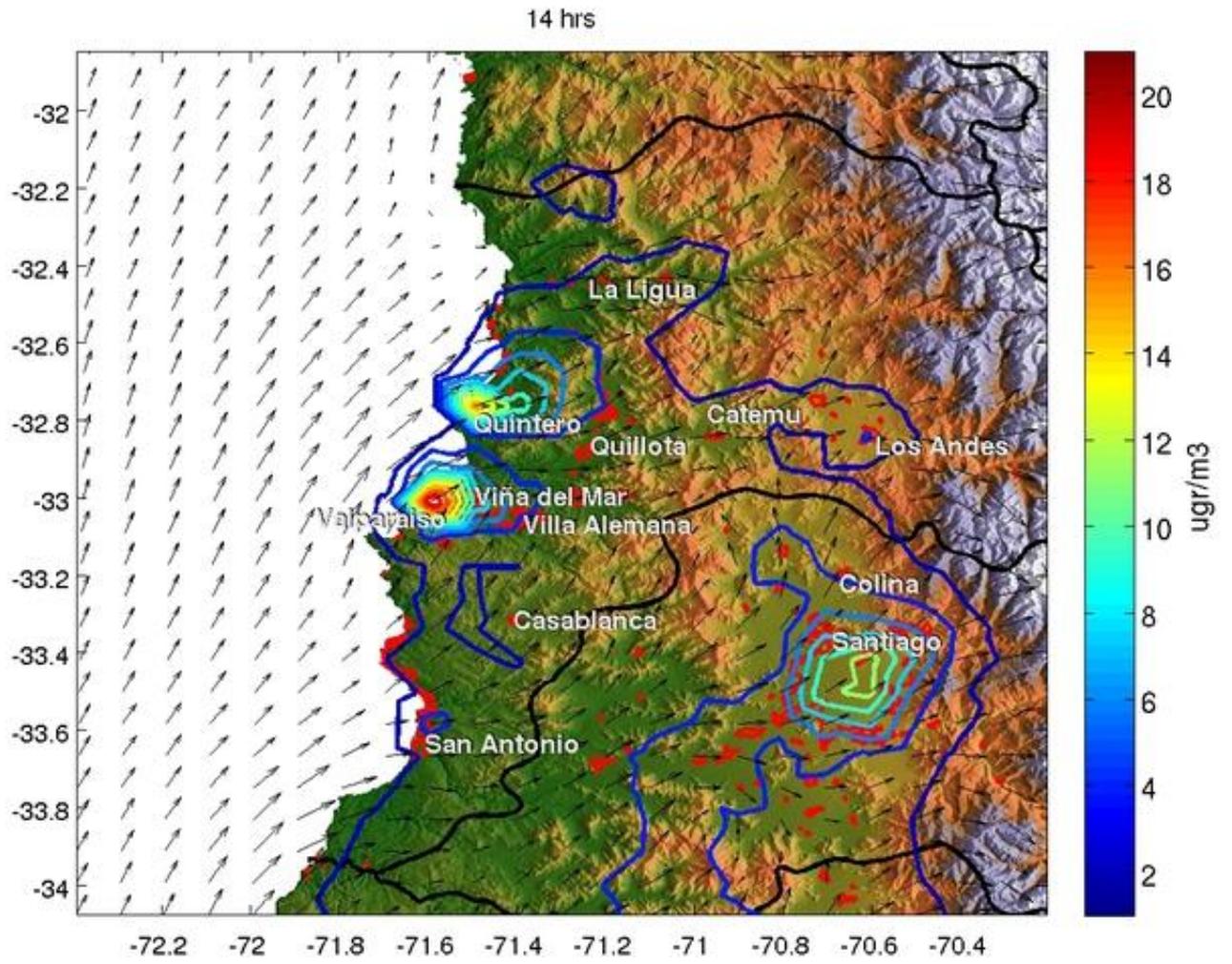


Figura IV.8: Equivalente a la figura IV.1 pero a las 14:00.

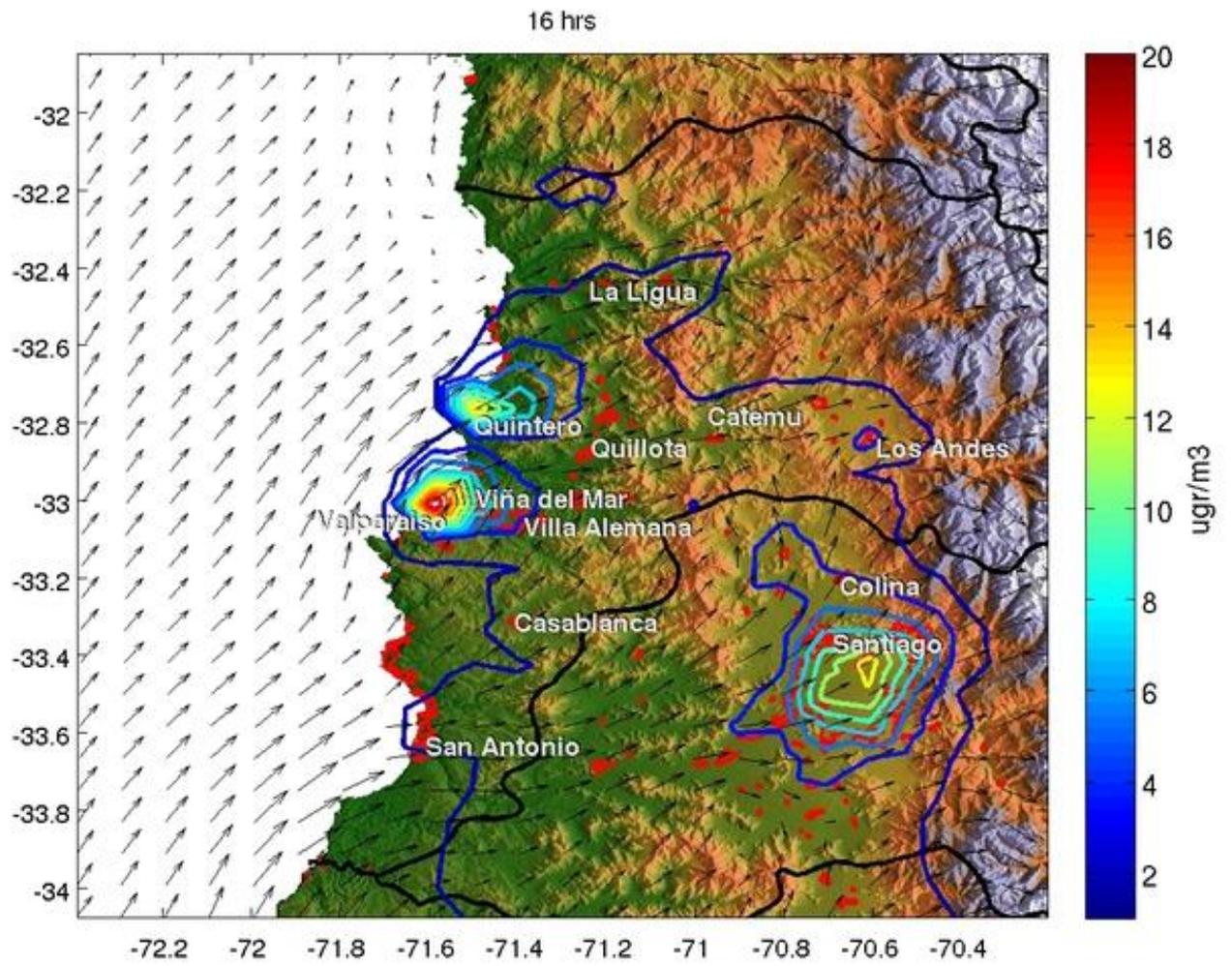


Figura IV.9: Equivalente a la figura IV.1 pero a las 16:00.

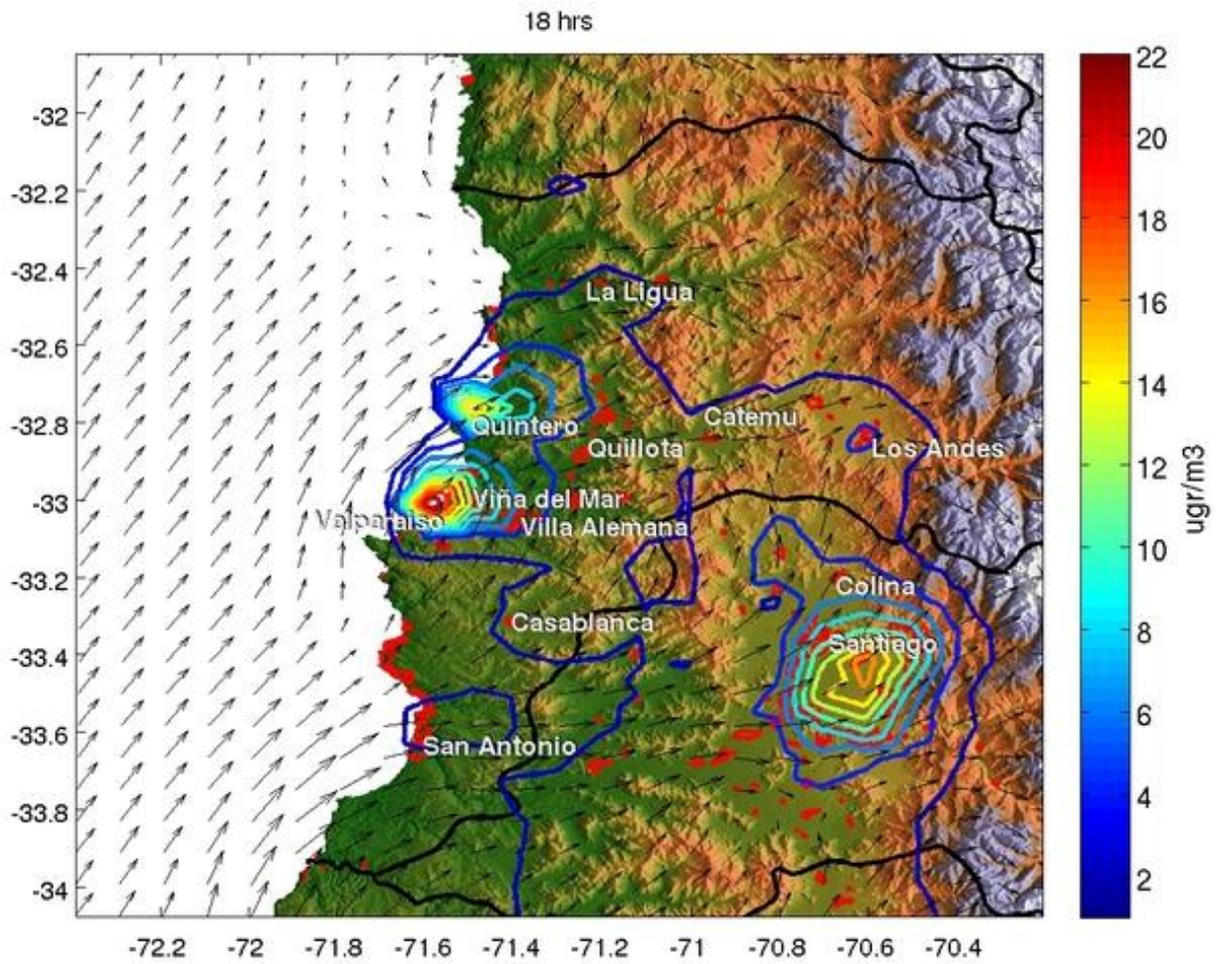


Figura IV.10: Equivalente a la figura IV.1 pero a las 18:00.

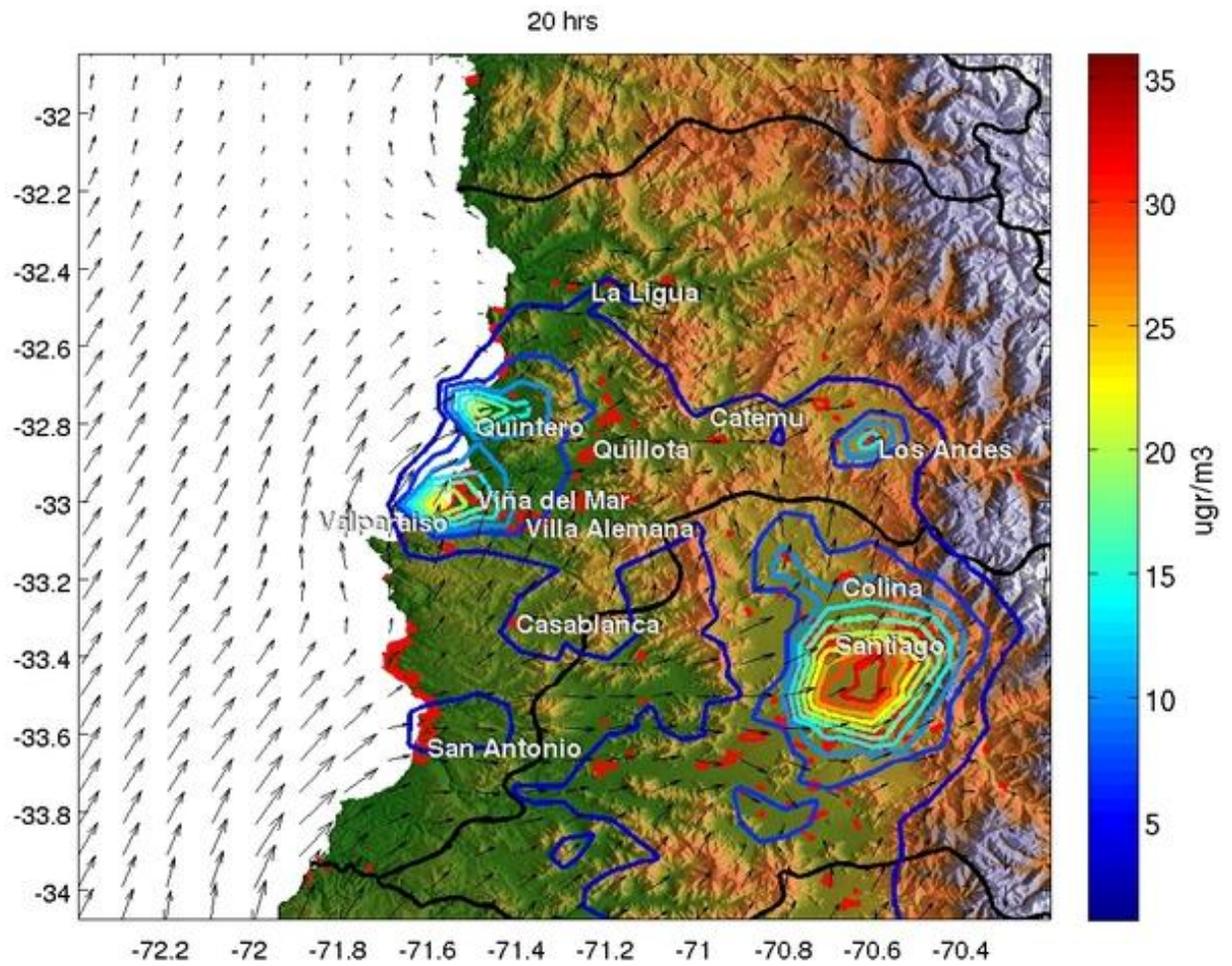


Figura IV.11: Equivalente a la figura IV.1 pero a las 20:00.

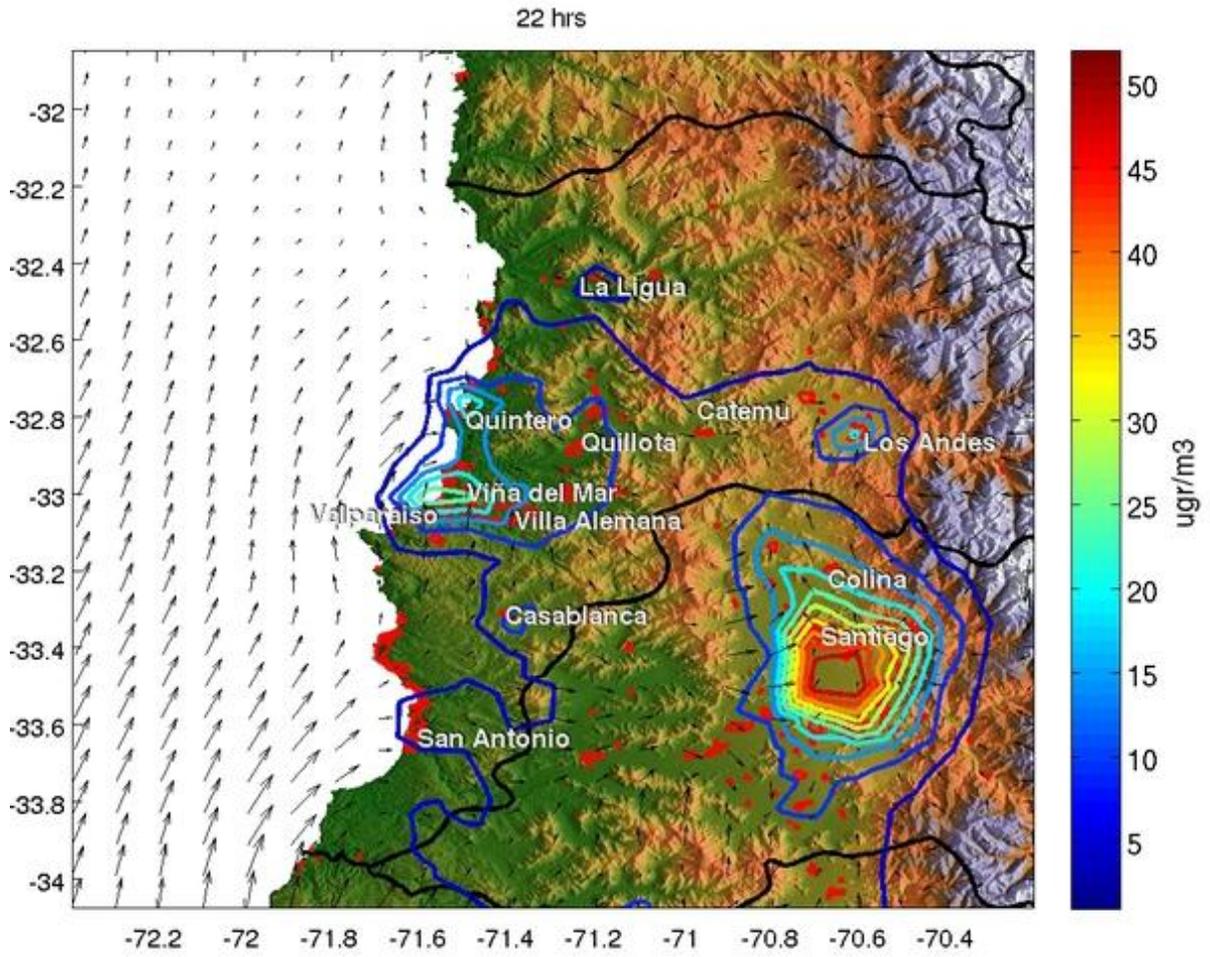


Figura IV.12: Equivalente a la figura IV.1 pero a las 22:00.

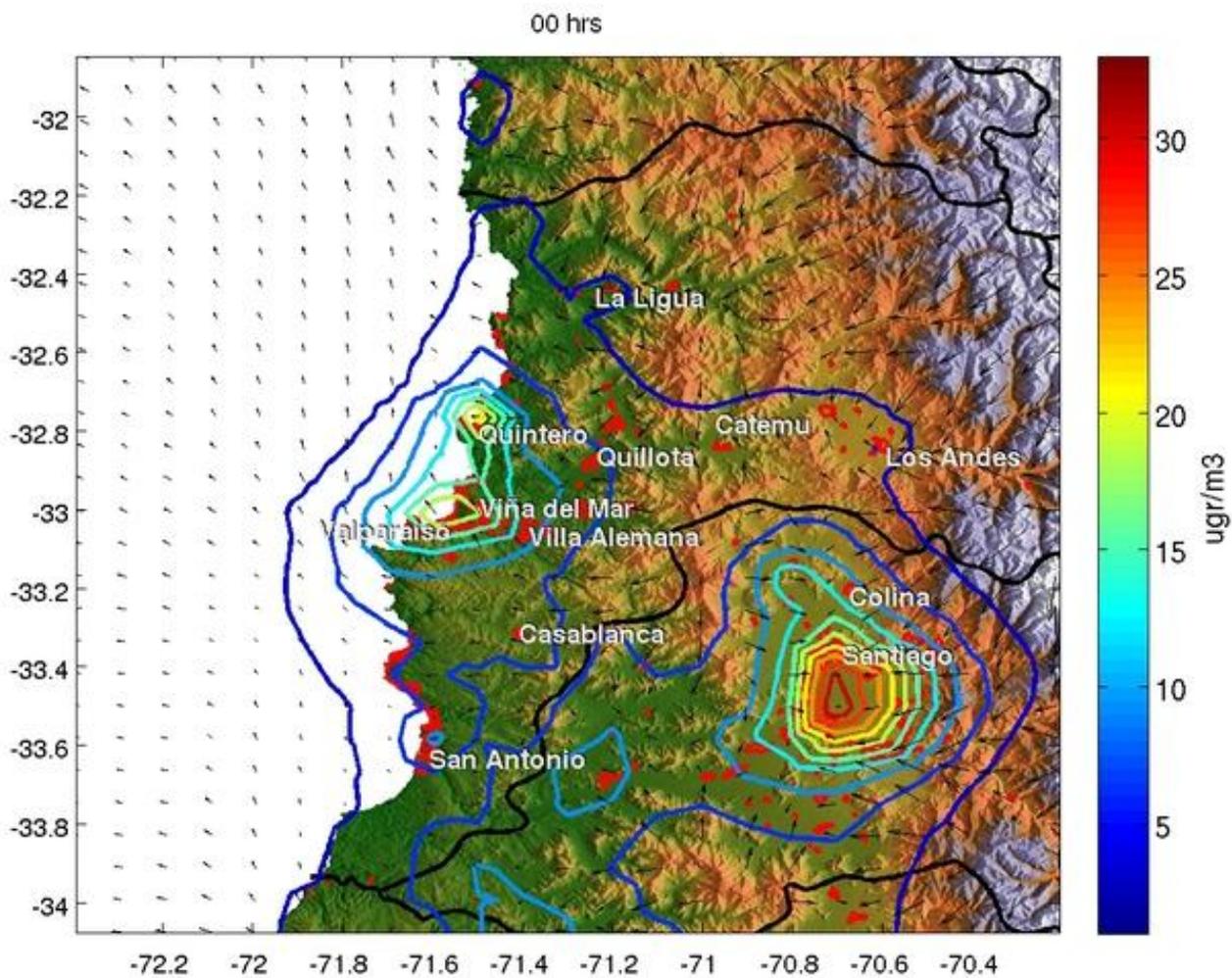


Figura IV.13: Promedio de concentraciones de NOx a las 00:00 durante los meses julio-septiembre 2010 según el modelo WRF.

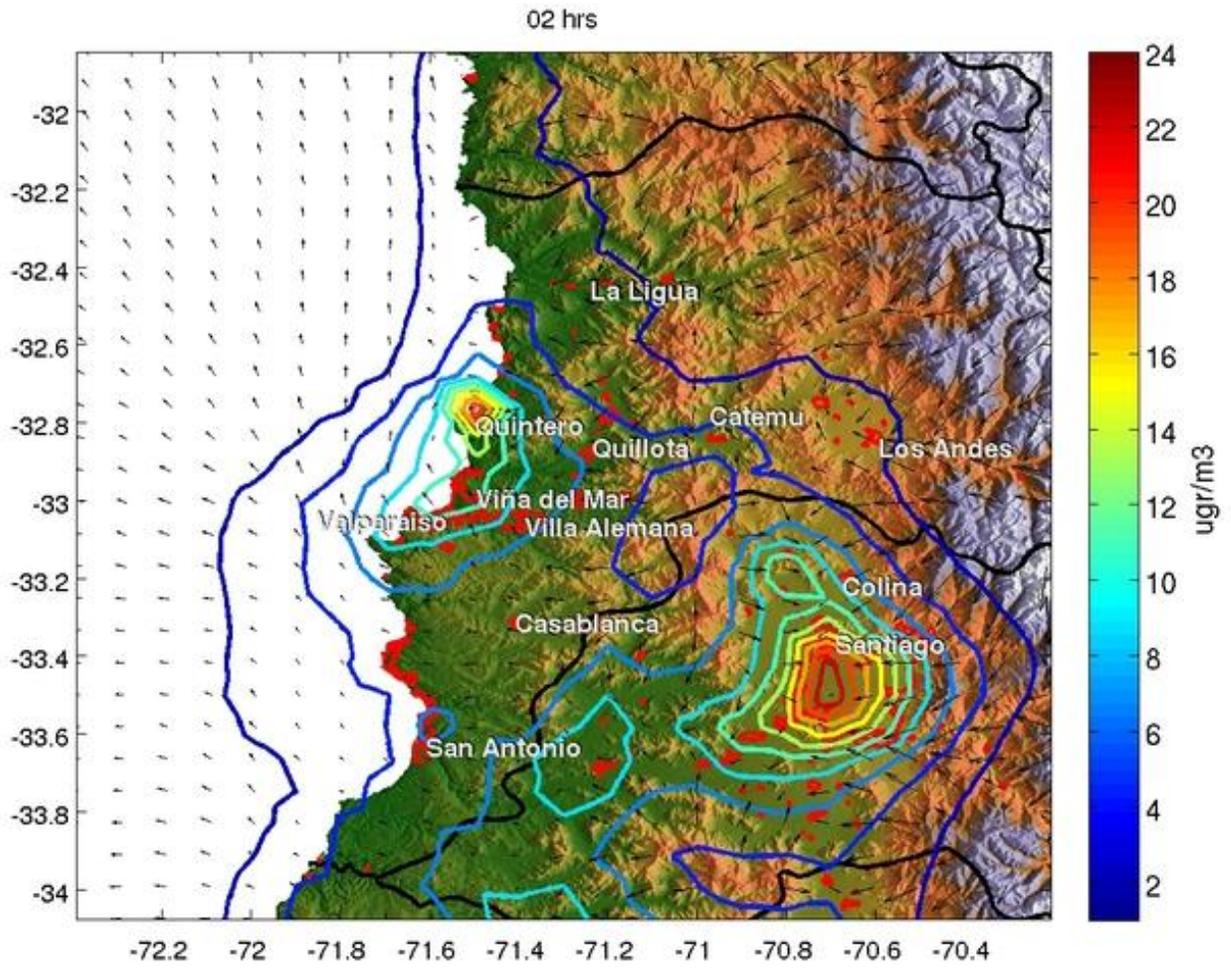


Figura IV.14: Equivalente a la figura IV.13 pero a las 02:00.

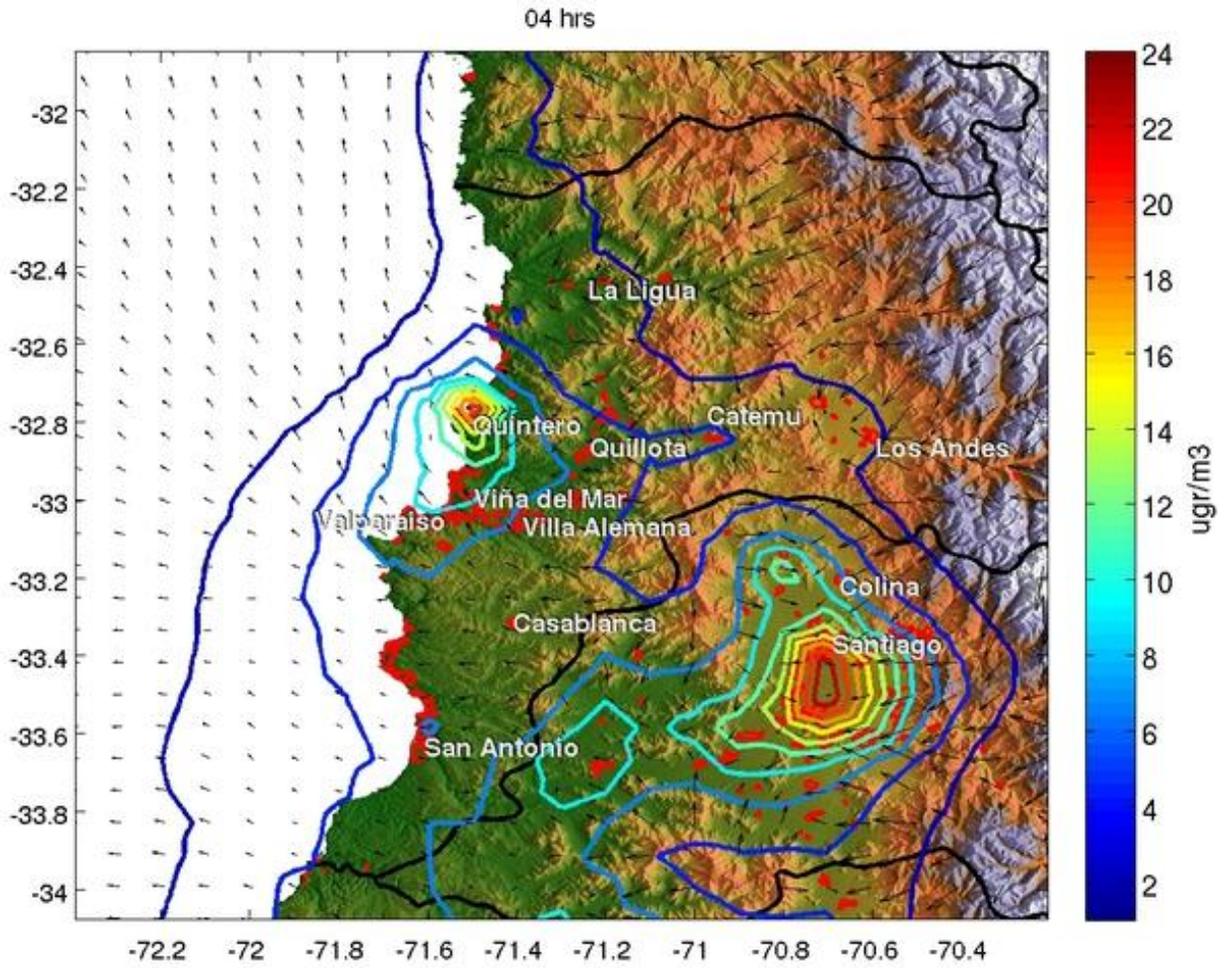


Figura IV.15: Equivalente a la figura IV.13 pero a las 04:00.

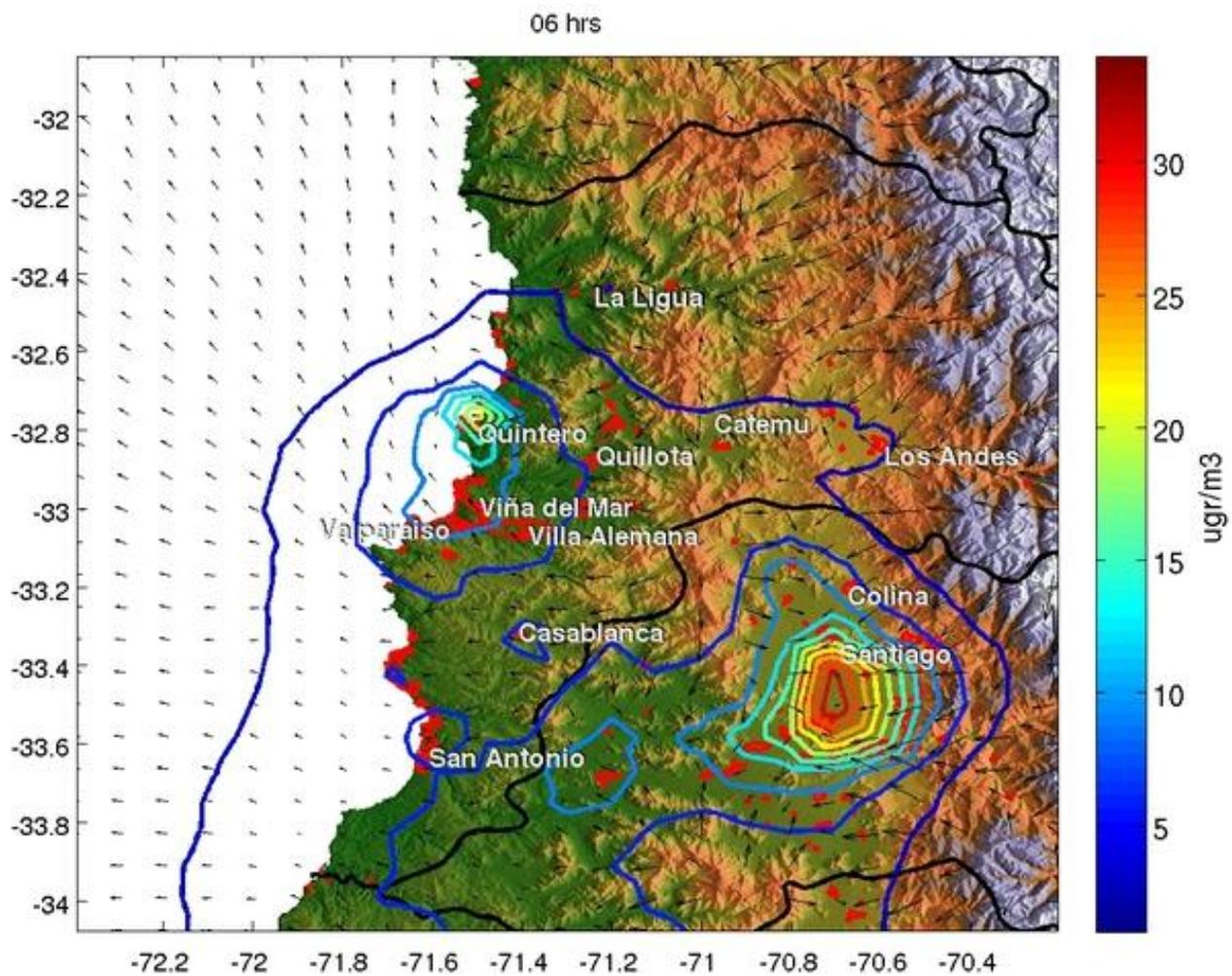


Figura IV.16: Equivalente a la figura IV.13 pero a las 06:00.

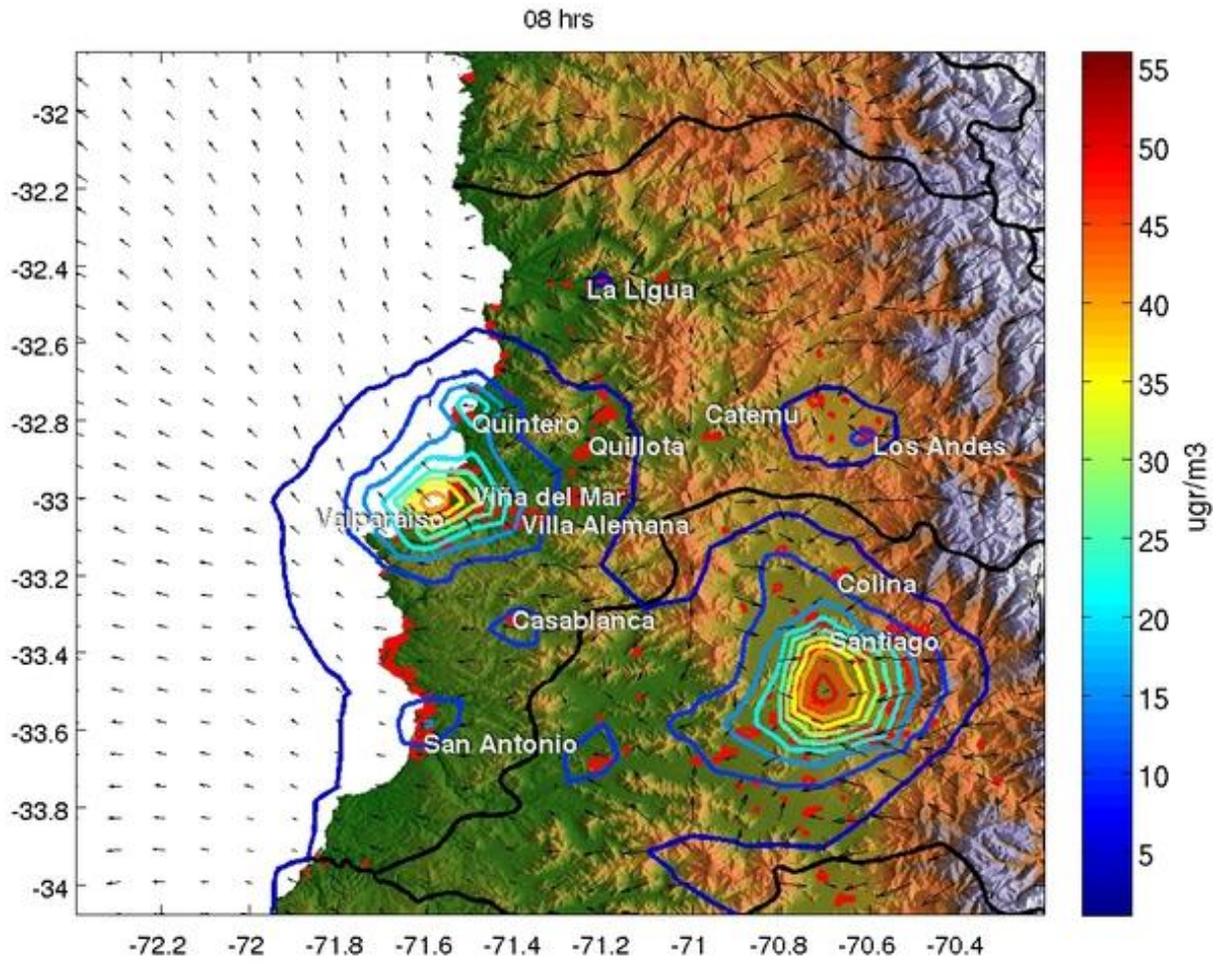


Figura IV.17: Equivalente a la figura IV.13 pero a las 08:00.

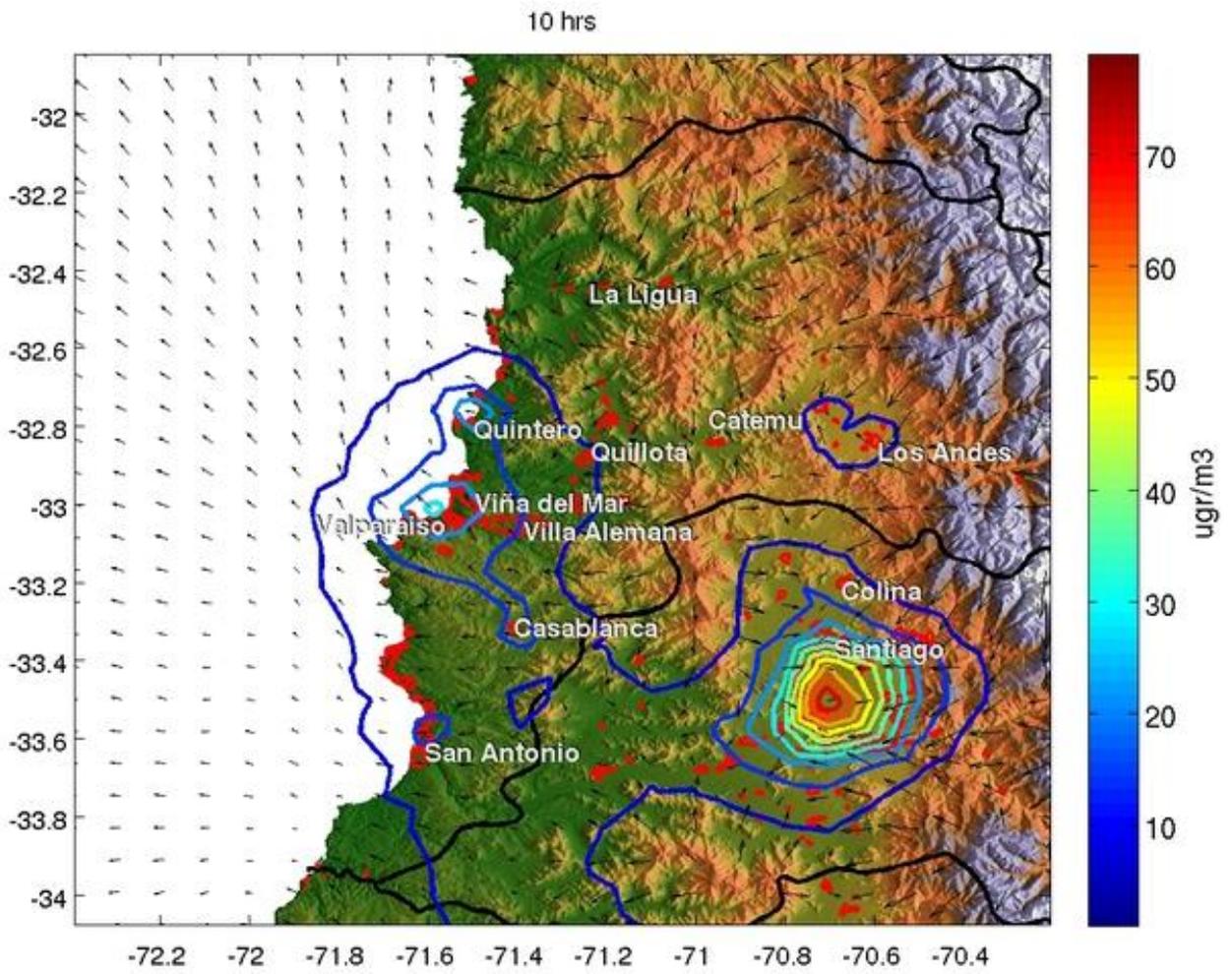


Figura IV.18: Equivalente a la figura IV.13 pero a las 10:00.

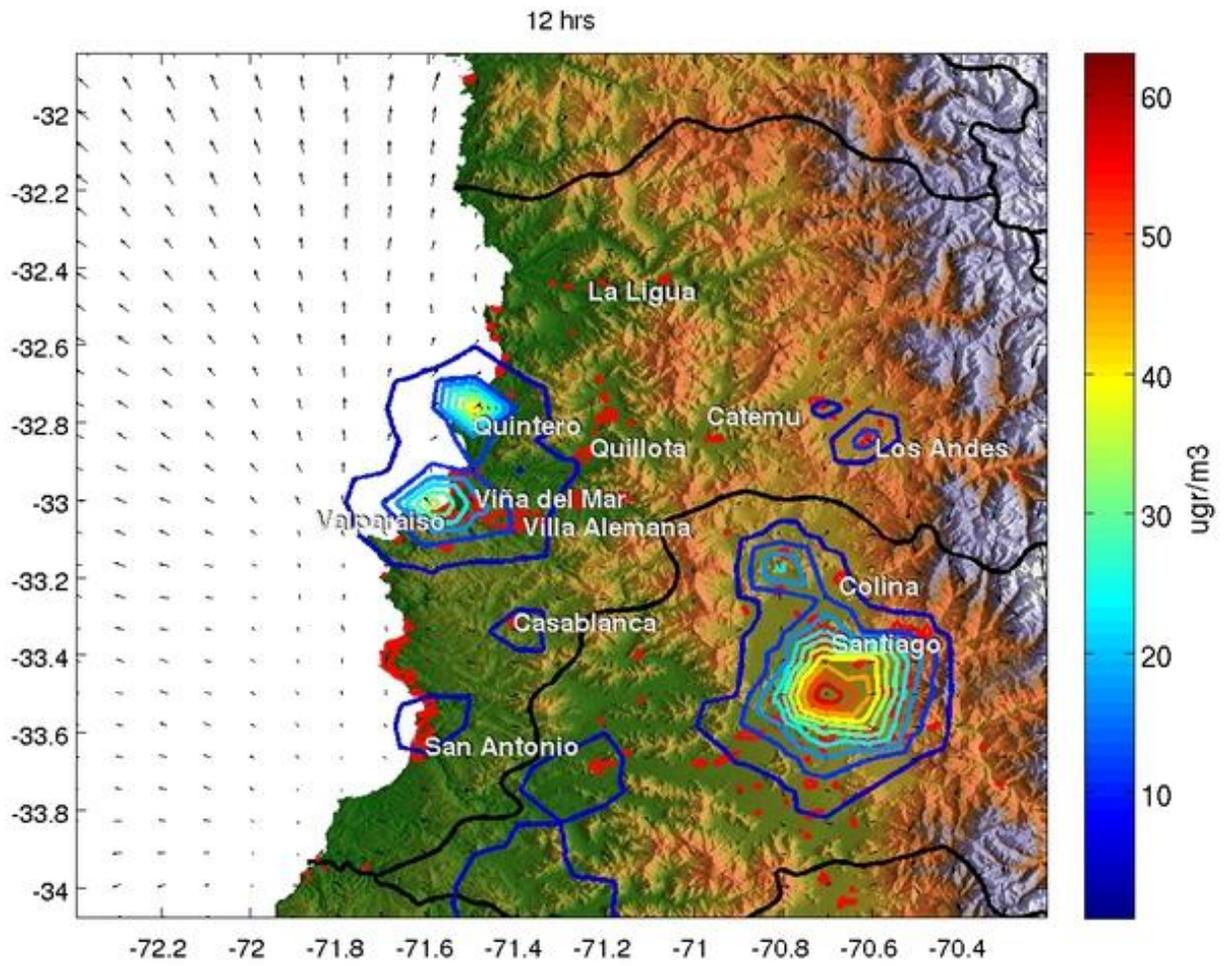


Figura IV.19: Equivalente a la figura IV.13 pero a las 12:00.

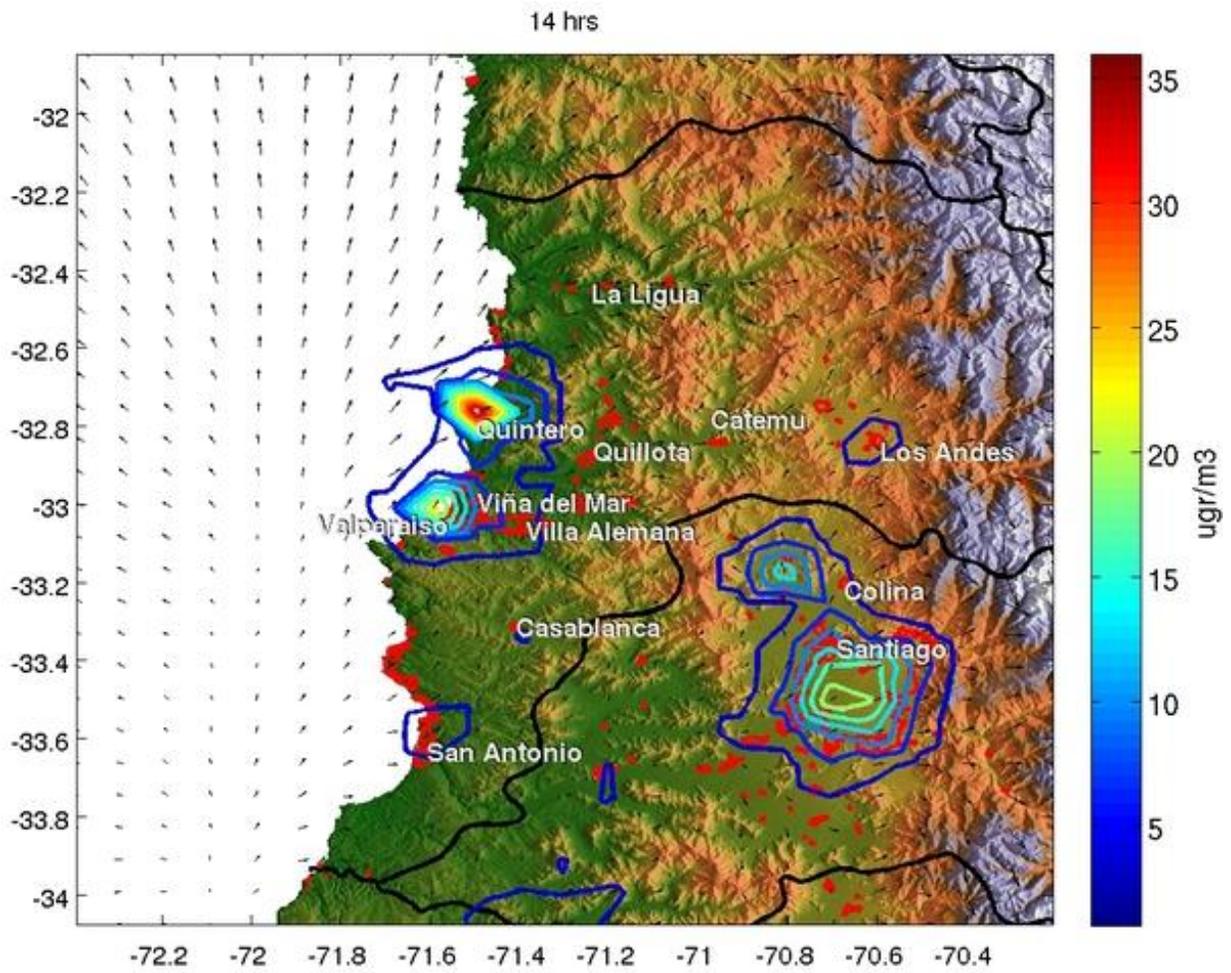


Figura IV.20: Equivalente a la figura IV.13 pero a las 14:00.

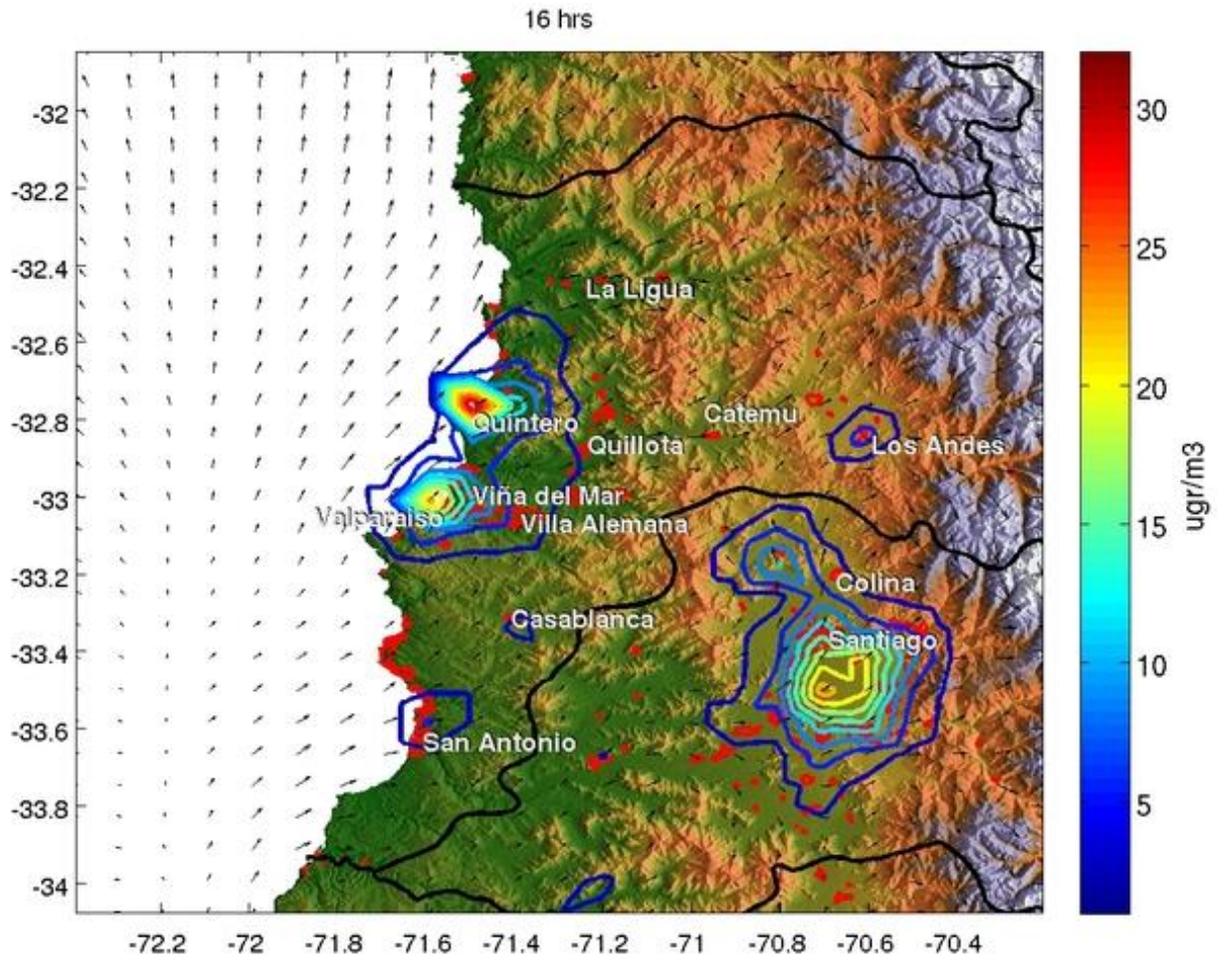


Figura IV.21: Equivalente a la figura IV.13 pero a las 16:00.

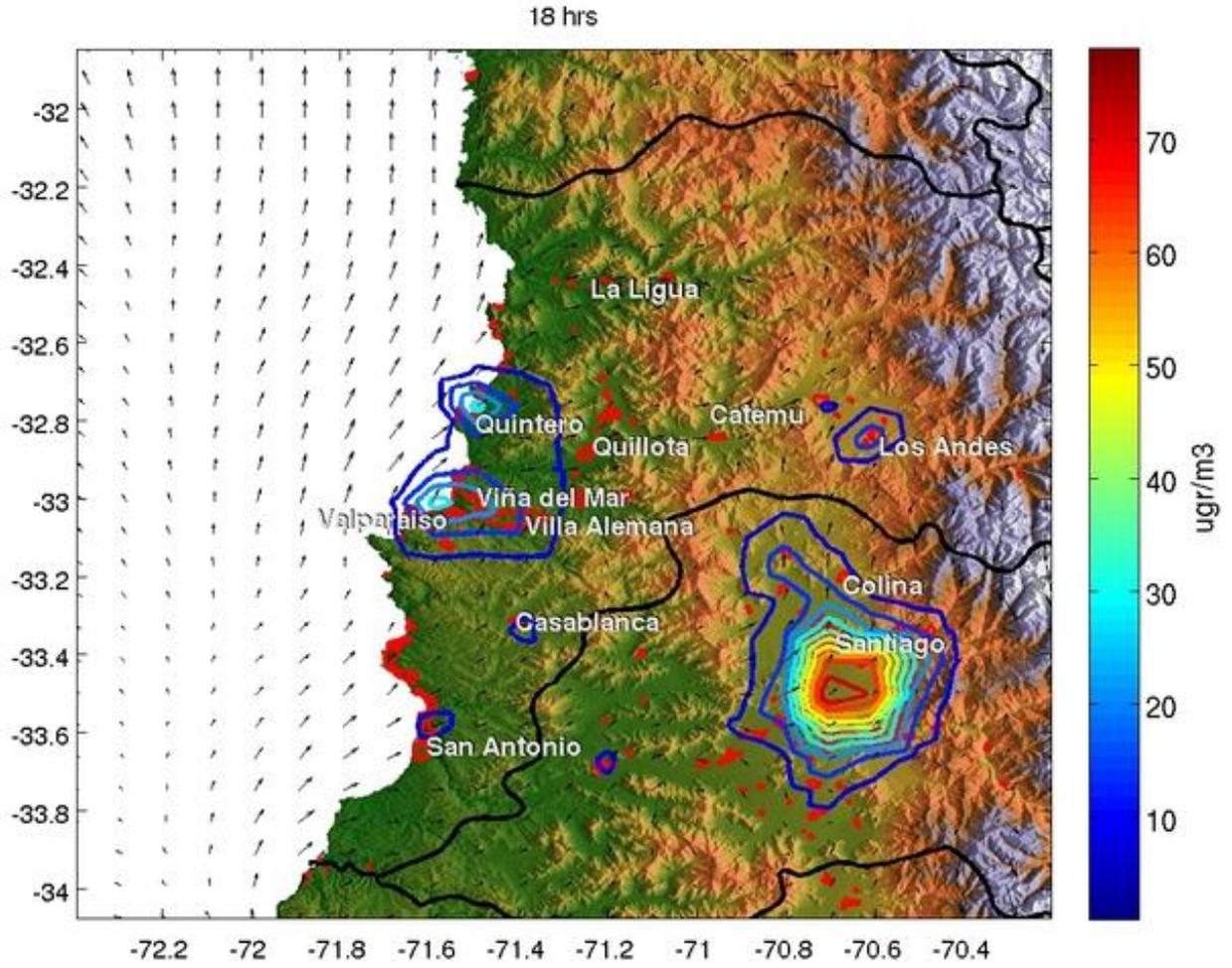


Figura IV.22: Equivalente a la figura IV.13 pero a las 18:00.

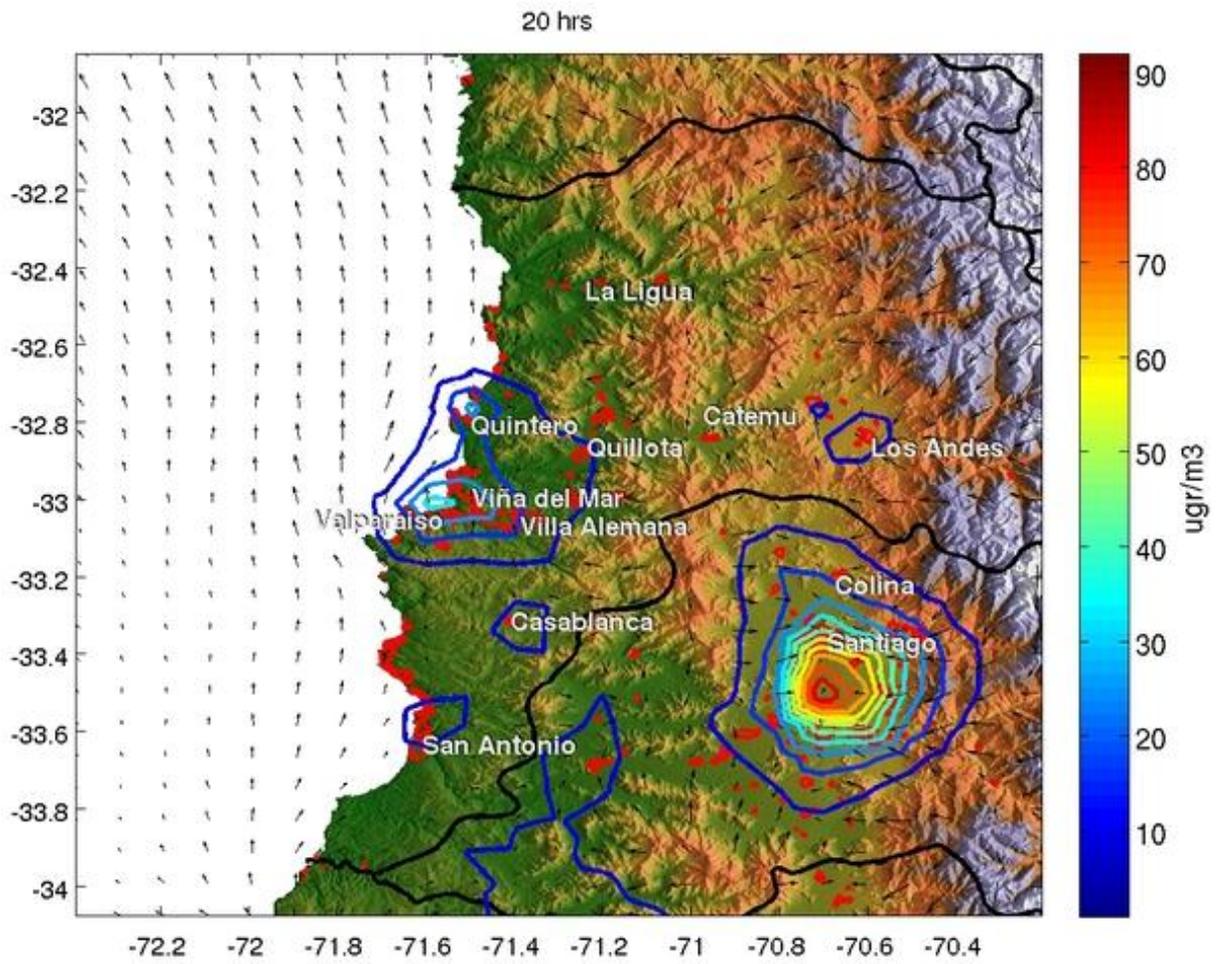


Figura IV.23: Equivalente a la figura IV.13 pero a las 20:00.

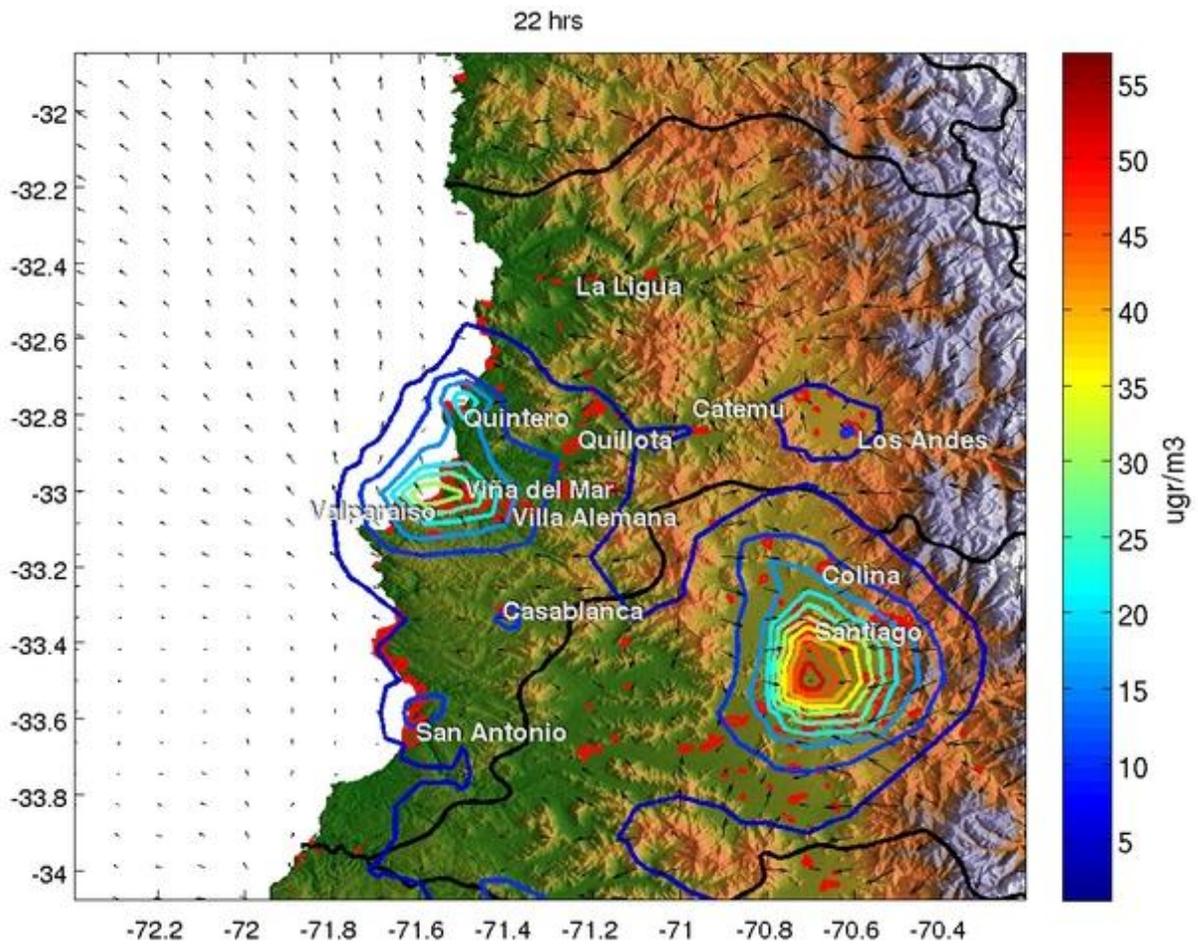


Figura IV.24: Equivalente a la figura IV.13 pero a las 22:00.

Anexo V, Desafíos en la Modelación del Material Particulado

Antes de presentar la propuesta técnica para este estudio y dado que no existen antecedentes de este tipo de estudios a nivel país, se permite entregar algunos antecedentes sobre los desafíos que presenta la modelación de material particulado (MP) en general. A parte de ser el primer estudio de su tipo a nivel nacional y por lo tanto ser pionero -lo que por su mismo ya representa un desafío, cabe destacar el desafío general de la modelación de material particulado, su estado del arte y sus alcances y limitaciones. Con fines de poner ese desafío en un contexto y apreciar su magnitud, se estima importante tener en mente las siguientes tres consideraciones:

- 1) ¿Qué es el MP y cuáles son los procesos asociados más relevantes?
- 2) ¿Cuál es el estado de arte en la modelación del MP?
- 3) ¿Cuál es la representatividad de las mediciones de MP?

En lo que sigue se explicará brevemente cada una de estas consideraciones.

¿Qué es el MP y cuáles son los procesos asociados más relevantes?

El MP, también conocido como aerosoles, se define por ser una partícula (sólida o líquida) en un gas (en el caso de la atmósfera, en el aire). En términos generales, se caracteriza el MP a través de a) su distribución por tamaño y b) su composición química. Mientras en la realidad su distribución por tamaño puede ser muy compleja, en la práctica se diferencia entre MP de diámetro menor de 2.5 μm en diámetro (**MP2.5**) y MP de diámetro menor de 10 μm (**MP10**). Al MP2.5 se refiere también a la fracción fina y a la diferencia de MP10 y MP2.5 a la fracción gruesa del MP; es decir que el MP10 representa la suma de la fracción fina y gruesa. Los procesos que determinan la distribución por tamaño son la nucleación (formación de aerosoles nuevos), condensación (que aumenta la masa/tamaño de un aerosol) y coagulación (dos partículas se juntan para formar uno solo). Estos procesos tienen características físico-químicas.

En términos químicos, se sabe que el MP se caracteriza por una gran complejidad y que gran parte tiene un origen antropogénico. En general, el MP contiene sulfato (SO_4^-), amonio (NH_4^+), nitrato (NO_3^-), sodio (Na^+), cloruro (Cl^-), metales trazas, material orgánico, minerales de la corteza terrestre y agua. De particular interés dentro de este estudio por su origen antropogénico y su magnitud se consideran - aparte del **material orgánico** - en la parte inorgánica **sulfato, amonio y nitrato** cuya sistema se describe brevemente en lo que sigue.

Mientras hay emisiones directas de sulfato (principalmente por los océanos), lo que se mide en general es sulfato secundario, formado por procesos oxidación del gas dióxido de azufre (SO_2) en la atmósfera. El SO_2 sí se emite directamente a la atmósfera por ejemplo por la combustión de motores diesel o de la industria minera. El amonio dentro del MP proviene de y está en equilibrio con el gas amoníaco que proviene principalmente de la actividad agrícola. Finalmente, el nitrato es un producto de la oxidación de NO_2 con los radicales OH, NO_3 y el ozono. Ya, en esta instancia, se puede hacer notar que las concentraciones ambientales de cada una de estas sustancias depende, en primer lugar, de las emisiones de los respectivos gases precursores. Además, una vez que las sustancias se han formado, ellas buscan un equilibrio termodinámico dentro de un aerosol, el cual determina finalmente sus concentraciones medibles. Este equilibrio se establece a través de un sistema químico complejo de la fase gaseosa y la fase líquida y sólida, que es sumamente no-lineal en su comportamiento. Es decir, no se puede derivar concentraciones de una sustancia en particular a través en base del conocimiento de la magnitud de las emisiones de su respectivo gas precursor; para tomar toda la complejidad del sistema se requiere justamente un modelo.

El material orgánico a la vez consiste en carbono elemental (**EC**) y una enorme variedad de compuestos orgánicos. EC se emite directamente a la atmósfera –principalmente por combustión– mientras el carbono orgánico (**OC**) puede ser emitido directamente (OC primario) o se forma a través de la condensación de vapores de baja volatilidad que son productos de la fotooxidación de hidrocarburos (OC secundario). Los hidrocarburos principales en este sentido son los alcanos, alquenos (incluyendo los bio-alquenos) y los aromáticos. Las reacciones de oxidación de esos hidrocarburos pasan a través de los radicales OH y NO_3 y el ozono. Sin embargo, cabe señalar que la investigación de todos los procesos relevantes y su cuantificación es parte de la ciencia vigente y que ella está lejos de ser concluyente.

¿Cuál es el estado de arte en la modelación del MP?

En primer lugar, cabe señalar que la modelación del MP es un área más bien reciente y es uno de los que cuenta con menos años de desarrollo dentro de la modelación atmosférica (en comparación por ejemplo con la modelación meteorológica o la fotoquímica). Los módulos que representan el MP en los modelos atmosféricos tratan de tomar en cuenta toda la complejidad que representan los procesos físico-químicos (formación (nucleación), condensación y coagulación) y químicos (termodinámica de fases y equilibrio químico). Entre los procesos más desarrollados dentro de estos modelos se encuentran los procesos físico-químicos y la representación de la química inorgánica. Sin embargo y a pesar de un estado ya bien desarrollado, su aplicación todavía tiene mayores dificultades por dos razones: i) falta de información de inicialización y ii) dependencias de la calidad de información de los gases precursores. Con respecto a lo primero, cabe señalar que en un modelo tri-dimensional hay que inicializar en cada punto de la grilla todas las características (distribución por tamaño y composición química) del MP. Es evidente que no hay mediciones que podrían sustentar esta inicialización lo que resulta en un error desde el principio de una modelación. Con respecto a la segunda razón, cabe recordar que

todos los compuestos inorgánicos (sulfato/amonio/nitrato) dependen de sus gases precursores (SO_2 , NH_3 , NO_2) y sus respectivas reacciones fotoquímicas. Es decir, la calidad de información que llega a los módulos que se encargan al cálculo del MP dentro de un modelo atmosférico depende a) de la información de los inventarios de emisiones y ii) de la calidad de la información generada en la parte fotoquímica. Por la experiencia de todos los proyectos conocidos que incluyen modelación fotoquímica a nivel nacional se sabe que los inventarios de emisiones todavía muestran deficiencias y, en consecuencia, también la fotoquímica se puede asociar con errores muy significativos. (De particular relevancia son los estudios y en particular por los proyectos “Implementación de un Modelo Fotoquímico para la Macrozona Central del País, 2007” y “Optimización del Modelo Fotoquímico de alta resolución implementado en la fase 2007 y ampliación de su alcance a material particulado respirable y precursores, 2008”, anteriormente mencionados. Los dos estudios incluyen las regiones Valparaíso, Bernardo O’Higgins y Metropolitana y muestran esas deficiencias en todas las regiones.) Dado que el MP depende tanto de los inventarios de emisiones como de las reacciones fotoquímicas, significa que los errores asociados a ellos se propagan y acumulan finalmente en los resultados del MP.

Aparte de los procesos físico-químicos y la química inorgánica también representa un papel importante la química orgánica responsable para la formación de los aerosoles orgánicos secundarios. Este sí es un área muy incipiente a nivel científico y, a pesar que se conocen los procesos relevantes más importantes, la ciencia está lejos para permitir de considerar los respectivos módulos en los modelos atmosféricos como *bien* desarrollados. Además y aparte de lo poco que se sabe de la parte orgánica del MP, se aplica lo mismo que se mencionó en el caso de la química inorgánica con respecto a los inventarios de emisiones y la dependencia fotoquímica. Es decir, en ambos casos (química orgánica e inorgánica) los resultados dependen de la calidad de la información de los inventarios y de los resultados de las reacciones fotoquímicas; en el caso de química orgánica además se tienen que sumar los pocos avances que se han logrado en el conocimiento y la cuantificación de los procesos.

En resumen, dentro de los módulos que representan el MP en los modelos atmosféricos hay partes más y otros menos avanzados, lo que ya se tiene que tomar en cuenta en cualquier análisis de sus resultados. Además de las incertidumbres dentro de esos módulos se suman las incertidumbres de la información de los inventarios de emisiones como de la modelación fotoquímica de las que depende el cálculo del MP.

¿Cuál es la representatividad de las mediciones de MP?

Cualquier aplicación de un modelo atmosférico requiere una evaluación de su desempeño a través de una comparación de datos del modelo con observaciones en situ. Dado que un modelo siempre discretiza el espacio, la información entregada por él, aunque sea en un punto, siempre representará un cierto área. A modo de ejemplo, la información de un punto de un modelo de una resolución horizontal de 5 km siempre es representativa de un área de 5x5 km; es decir el modelo nunca podrá entregar información a nivel de sub-grilla (en este caso a menos de 5x5 km). En este

sentido y considerando la comparación de valores del modelo y de mediciones, es muy importante saber qué tan representativa es la información de las mediciones. A modo de ejemplo y para tomar un caso conocido a nivel nacional, dentro de la red MACAM2 las mediciones de temperatura en muchas estaciones –a pesar de su distancia- son muy similares. Por otro lado, con respecto a las concentraciones de MP10 se han podido observar diferencias en concentraciones a nivel horario en más de 40% a distancias de aproximadamente 2 km. Es decir, en el caso de temperatura, lo más probable es que una estación de monitoreo sea representativa para un área grande (su tamaño exacto depende de su alrededor), mientras en el caso de MP10 esta representatividad por lo menos en áreas contaminadas no se da. Eso último se debe a que dentro de las concentraciones de MP se encuentra mucho MP primario, lo que en general exhibe gradientes espaciales muy fuertes en sus concentraciones. En el uso de los datos observados para evaluar un modelo, eso resulta que los errores que indican tales evaluaciones para variables como la temperatura tienen su origen con mayor probabilidad en los modelos, mientras en el caso de MP10 pueden tener su origen tanto en los modelos como en la representatividad de la estación de monitoreo.

En resumen, se estima importante tener en mente que el desafío de la modelación de MP es lejos mayor que la de la meteorología y la de la fotoquímica. Sea por falta de conocimiento o propagación de errores por parte de la meteorología y fotoquímica que se acumulan en los cálculos de MP, los errores siempre van a ser mayores en el MP que en otras variables atmosféricas. Sumando a este problema el problema de la representatividad de las mediciones enfatiza la magnitud que presenta el desafío de la modelación del MP en general y el de este estudio en particular. Por esta razón, se esperan a priori incertidumbres muy grandes en esta parte de la modelación. Se pondrá un particular énfasis en la estimación de las incertidumbres y, además, se espera también que ellas se puedan disminuir a durante el transcurso del estudio.