



## INFORME FINAL



---

### Estudio “Determinación de la Zona Saturada por Material Particulado Respirable de Osorno”

---

Desarrollado por:

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE TEMUCO  
ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
UNIDAD DE CALIDAD DEL AIRE

Para

Comisión Nacional del Medio Ambiente  
Región de Los Lagos.

Octubre, 2009

*UNIDAD DE CALIDAD DEL AIRE (UCA) - ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL*

*LUIS DÍAZ ROBLES*, Ph.D. Ingeniería Civil Ambiental

*PABLO ETCHARREN ULLOA*, MSc. (c) Ingeniería - INGENIERO AMBIENTAL

*JEAN PAUL PINAUD*, INGENIERO AMBIENTAL

*BORIS PACHECO SILVA.*, INGENIERO AMBIENTAL

*EDDIO CARIMAN LINARES.*, INGENIERO AMBIENTAL

*CRISTIAN VARELA BRUCE*, ING. (c) AMBIENTAL

**Dirección:** Escuela de Ingeniería Ambiental, Universidad Católica de Temuco, Rudecindo Ortega 02950, Casilla 15-D, Temuco, Chile.

**Teléfonos:** 45-205483, 815-836-51

**Fax:** 45-205430

**Correo electrónico:** [ldiaz@uct.cl](mailto:ldiaz@uct.cl)

## Resumen

Este informe, desarrollado por la Unidad de Calidad del Aire ([www.uct.cl/aire](http://www.uct.cl/aire)), perteneciente a la Universidad Católica de Temuco, se enmarca en la ejecución del proyecto “Determinación de Zona Saturada por Material Particulado Respirable de Osorno”, solicitado por la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) Región de Los Lagos.

El estudio contiene un análisis estadístico básico de la calidad del aire a través de la data meteorológica (temperatura, velocidad y dirección del viento); junto al análisis de la normativa primaria de calidad del aire, promedio de 24 horas para MP10 del período 2008 y hasta Junio de 2009, a partir de la data validada por CENMA para la SEREMI de Salud. Dentro de este análisis, se determinaron los episodios críticos de superación de norma, en los cuales se centró el estudio de modelación meteorológica, con el objetivo de analizar trayectorias de vientos, movimiento de masas de aire y comportamiento de temperaturas en la zona.

De acuerdo a los análisis realizados y considerando la disponibilidad de información, se pudo determinar que durante el año 2008, en el período comprendido entre mayo a octubre, se superó la norma de 24 horas en 19 oportunidades. Lo anterior, muestra una marcada estacionalidad, siendo asociados los eventos de superación a períodos de bajas temperaturas y condiciones de alta estabilidad atmosférica. Pese a no contar con un inventario que permita definir las principales emisiones del área, existen antecedentes que indican que la contaminación producida en la zona de Osorno es generada principalmente por emisiones provenientes de la combustión residencial de leña, tal como ocurre en otras ciudades del sur de Chile (Temuco, Chillán y Los Ángeles )

En función de los resultados obtenidos de las simulaciones de las trayectorias de las masas de aire y temperatura, se determinó un área potencial a ser declarada como zona saturada por MP10. Esta zona comprende todo el radio urbano de Osorno, más el sector suroeste, que es hacia donde tienden a desplazarse las masas de aire.

## Contenido

1.	Antecedentes Generales .....	6
1.1.	Antecedentes área de Estudio .....	8
2.	Problemática del Área de Estudio .....	10
3.	Alcances y objetivos del Estudio .....	13
3.1.	Objetivo General .....	13
3.2.	Objetivos Específicos.....	13
4.	Análisis Data Meteorológica del Área de Estudio .....	15
4.1.	Análisis de Velocidad de Vientos (VV), estadística descriptiva de la Estación El Alba, Enero 2008 – Julio 2009.....	16
4.2.	Análisis de Rosa de los vientos estación el Alba Enero 2008 – Julio 2009.....	19
4.2.1.	Análisis de rosa de los vientos año 2008.....	19
4.2.2.	Análisis de rosa de los vientos año 2009.....	23
4.3.	Análisis de Temperatura (°C), estadística descriptiva de la Estación El Alba, Enero 2008 – Julio 2009 .....	26
5.	Análisis Calidad del Aire .....	29
5.1.	Normativa para (MP10) considerada en el Estudio .....	29
5.2.	Análisis del Monitoreo de Calidad del Aire .....	30
5.2.1.	Episodios a modelar y dominio de modelación .....	30
5.2.2.	Selección de Año base del estudio.....	30
5.2.3.	Análisis por periodos de Superación de Norma de 24 hrs para MP10 durante el año 2008.....	32
5.2.4.	Serie de tiempo de concentraciones horarias año 2008.....	38
5.2.5.	Análisis por periodos de Superación de Norma de 24 hrs para MP10 durante el año 2009.....	39
6.	Análisis de temperatura diaria v/s concentraciones de MP10 en período episodio 19-22 Junio 2008.....	44
7.	Modelación meteorológica .....	48
7.1.	Metodología de Empleo del Modelo Meteorológico WRF-ARW .....	48
7.1.1.	Características del modelo WRF-ARW .....	48

7.1.2.	Selección de los periodos de Modelación .....	51
7.1.3.	Selección del Dominio de modelación. ....	53
7.1.4.	Validación del Modelo Meteorológico .....	57
7.2.	Resultados de la Modelación meteorológica.....	58
7.2.1.	Descripción de los Episodios Modelados .....	58
7.2.2.	Temperaturas .....	60
7.2.3.	Dirección y Velocidad del Viento.....	61
7.2.4.	Relación entre Velocidad del Viento y la Temperatura .....	67
7.2.5.	Caracterización de trayectoria de vientos sobre el valle 3D.....	68
7.3.	Aplicación de Modelo de Trayectorias de vientos .....	70
7.3.1.	Características del modelo de trayectorias HYSPLIT.....	70
7.3.2.	Análisis trayectorias de masas de aire .....	71
8.	Determinación del área geográfica a declarar como zona saturada por material particulado respirable de Osorno.....	76
9.	Conclusiones generales .....	80
10.	Referencias .....	83

## 1. Antecedentes Generales

Las ciudades chilenas muestran claros indicios de deterioro ambiental, según lo han concluido diversos estudios de la CONAMA y de las Universidades que han trabajado los aspectos urbanos, fundamentalmente de las grandes metrópolis y algunas ciudades intermedias<sup>[1]</sup>

Uno de los aspectos tal vez menos estudiados y profundizados, es la contaminación del aire en ciudades intermedias latinoamericanas, ya que solo se encuentran en una fase inicial. Se sabe que la contaminación por material particulado afecta negativamente la calidad del aire y la salud de las personas<sup>[2]</sup>. De hecho, tal como lo señalan las investigaciones, esta contaminación en las ciudades está ligada directamente a las actividades antropogénicas, donde se conjugan el transporte vehicular, la actividad industrial, el movimiento de las personas, los espacios con poca ventilación, y el microclima característico de la urbe<sup>[3]</sup>

En Chile la contaminación atmosférica adquirió ribetes de problema ambiental a partir de la década de los 80 en la ciudad de Santiago, y debido a esto, a partir de 1990 se comienzan a aplicar medidas para el control de la contaminación, estableciéndose un sistema de medición de contaminantes.<sup>[4]</sup> Con los antecedentes obtenidos a partir de estas mediciones, durante el año 1996 se declara por medio del Decreto Supremo N°131 a la Región Metropolitana como Zona Saturada por Material Particulado (MP10), Ozono Troposférico ( $O_3$ ), Partículas Totales en Suspensión (PTS) y Monóxido de Carbono (CO) y como Zona Latente por Dióxido de Nitrógeno ( $NO_2$ )<sup>[5]</sup>

A pesar de los numerosos esfuerzos y estudios para mitigar los efectos de la contaminación: establecimiento del sistema de declaración de emisiones, mejoramiento de la red de Monitoreo Automático, desarrollo de modelos de pronósticos y actualizaciones de los inventarios de emisiones<sup>[6]</sup>, el problema sigue vigente en Santiago, con superaciones constantes de las normas de MP10 y  $O_3$ , extendiéndose a otras ciudades de la macrozona centro sur del país<sup>[7]</sup>.

De acuerdo a lo señalado anteriormente, estudios de contaminación atmosférica desarrollados por la CONAMA en los últimos años, han permitido identificar problemas de contaminación por MP10 en varias ciudades. Es así, como tras mediciones continuas realizadas a partir del año 2001 en las Estaciones de Monitoreo de Las Encinas (Temuco) y Padre Las Casas, se declara en el año 2005, por medio del Decreto Supremo N°35 como Zona Saturada por MP10 a las comunas de Temuco y

Padre Las Casas<sup>[8]</sup>, que de acuerdo al inventario de emisiones actualizado al año 2005, tienen como fuente principal a la combustión residencial de leña con un aporte del 92,7% de las emisiones<sup>[9]</sup>. A lo anterior se suma Concepción Metropolitano (que agrupa a las comunas de Lota, Coronel, San Pedro de la Paz, Hualqui, Concepción, Chiguayante, Talcahuano, Hualpén, Penco y Tomé) declarado como Zona Latente en el año 2006<sup>[8]</sup>, y las ciudades de Rancagua, Talca, Los Ángeles, Chillán y Coyhaique. Todas a la espera de estudios que avalen la solicitud de Zona Saturada por MP10<sup>[10]</sup>; al igual que Osorno (ver Figura 1), donde ya se cuenta con data de monitoreo que respalde lo antes mencionado.



**Figura 1:** Fotografía de la ciudad de Osorno, con claros indicios de contaminación Atmosférica

La Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente (N°19.300), define como Zona Saturada, aquella en que una o más normas de calidad ambiental se encuentran sobrepasadas y como Zona Latente en que la medición de la concentración de contaminantes en el aire se sitúa entre el 80% y el 100% del valor de su respectiva norma de calidad ambiental. Pesé a lo anterior, la toma de decisiones involucra aspectos diversos, entre ellos la existencia de precedentes nacionales o internacionales; la naturaleza de la fuente emisora principal; viabilidad, eficiencia y eficacia de las medidas de reducción de emisiones en un escenario sin plan; la evolución esperada del problema y las implicancias de todo orden que genera la decisión<sup>[11]</sup>.

## 1.1. Antecedentes área de Estudio

El presente estudio se centra en la ciudad de Osorno, la cual se ubica en la zona sur de Chile, en la Región de Los Lagos y es la ciudad capital de la Provincia de Osorno. Posee una superficie comunal aproximada de 6.805 km<sup>2</sup> y se encuentra ubicada a 946 km al sur de la capital del país, Santiago; a 110 km al norte de la capital Regional Puerto Montt, y a 110 km al sur de Valdivia capital de la Región de los Ríos (Figura 2).

De acuerdo a los datos del censo de 2002<sup>[12]</sup>, posee una población de 132.245 habitantes y se estima una población de 160.447 para el presente año. Esta ciudad es un importante centro agrícola, en donde su principal actividad económica se basa en la producción agropecuaria (cultivo de trigo y avena, crianza de ganado para el procesamiento de carnes y lácteos, y fabricación de equipos agrarios).

Osorno al igual que la mayoría de las ciudades de nuestro país se encuentra inserta dentro de una cuenca hidrográfica conformada por los ríos Rahue y Damas, y actualmente tiene la condición de “*ciudad de paso*” a centros lacustres y montañosos, situados al este y sureste, y a los Parques Nacionales que se encuentran a los pies de la cordillera de los Andes.



Figura 2. Ubicación geográfica del Área de Estudio

Osorno posee un clima templado lluvioso, con influencia mediterránea, cuya característica es la elevada pluviosidad en los meses de invierno. La temperatura media anual es de  $9,2^{\circ}\text{C}$  con una media en verano de  $14^{\circ}\text{C}$  y en invierno de  $5^{\circ}\text{C}$ , pudiendo bajar a los  $-1^{\circ}\text{C}$  en ocasiones. Sus precipitaciones alcanzan un valor de 1500mm anuales.

En Osorno durante gran parte del año, y en particular en los meses fríos, los índices de calidad del aire superan las normativas vigentes en Chile para MP10, principalmente producto de actividades como la combustión residencial de leña. Esto trae como consecuencia efectos en la salud de la población, principalmente enfermedades respiratorias y cardiovasculares.<sup>[10]</sup>

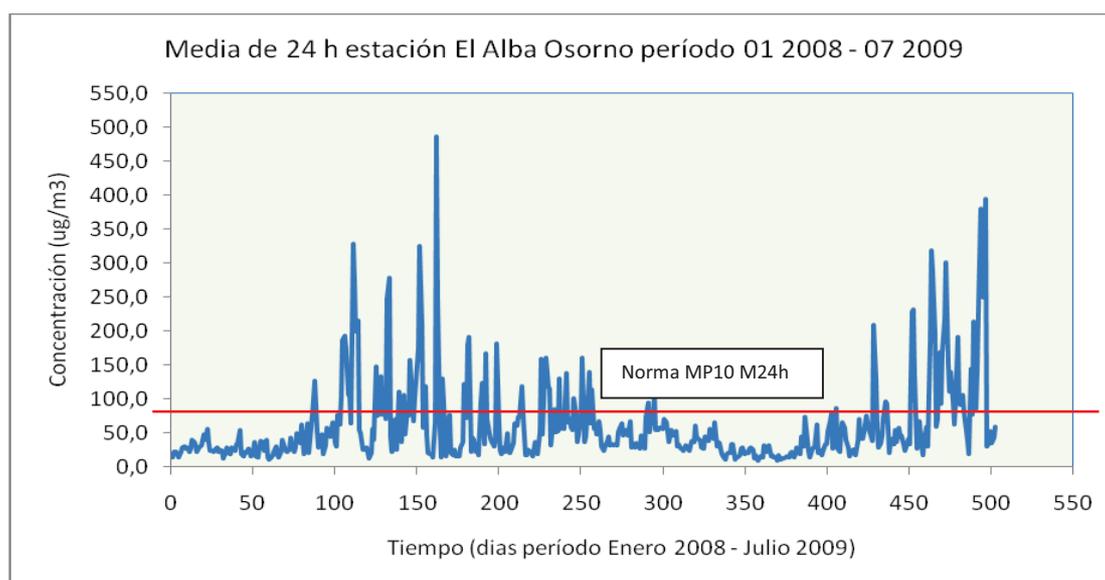
## 2. Problemática del Área de Estudio

De acuerdo a los antecedentes previos conocidos en otras ciudades con problemas similares en el sur del país, y de acuerdo al comportamiento histórico de la calidad del aire de la ciudad de Osorno, existe una alta probabilidad de que los registros de monitoreo se encuentren en niveles de saturación de la norma diaria de MP10, según lo indica el D.S. N°59/98. Esto es respaldado por la data de monitoreo del año 2008 (la más completa de la zona de estudio), en la cual queda de manifiesto la superación del límite de  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  como promedio horario de 24 hrs, por más de 7 días. Dentro de los antecedentes de la ciudad de Osorno, destaca el hecho de no contar aún con un inventario de emisiones atmosféricas que permita identificar las responsabilidades del aporte a las emisiones de cada una de las fuentes, sin embargo, se presume que la principal fuente de contaminación en Osorno, tal como ocurre en otras ciudades del sur de Chile como Temuco, Chillán y Los Ángeles, es en su mayoría es el uso de biomasa forestal como combustible en cocinas y calefactores domésticos<sup>[16-19]</sup>. Esta combustión produce principalmente emisiones atmosféricas de material particulado, monóxido de carbono, óxidos nitrosos, compuestos orgánicos, residuos minerales, y en menor grado óxidos de azufre<sup>[13, 14]</sup>. Las cantidades y tipos de emisiones son altamente variables, dependiendo de un gran número de factores, incluyendo las etapas de ciclos de combustión, composición y características del combustible, diseño del equipo (calefactor, cocina) donde se produce la combustión, prácticas de operación y mantenimiento, entre otros factores<sup>[13, 15]</sup>

Entre los años 2001 y 2003 en la estación “César Ercilla” se comenzó a monitorear el MP10 en la ciudad de Osorno, mediante un equipo TEOM (2001), para luego utilizar un Monitor Dicotómico. Los valores obtenidos de estas mediciones históricas indican que la norma primaria para MP10 (24 horas) se encuentra sobrepasada, tanto por el número de días como por el valor del percentil 98. Lo anterior es fundamentado por el estudio “Mediciones de calidad de aire y análisis de la contaminación atmosférica en la ciudad de Osorno, X región” realizado por CENMA<sup>[20]</sup> para CONAMA en el año 2003 y que entre sus principales resultados determinó que en el periodo de Julio de 2002 a Octubre de 2003 se registraron 26 días de superación de norma, de los cuales 21 ocurrieron el año 2003. Cabe mencionar que desde el mes de Enero del año 2008, se comenzó a monitorear oficialmente el material Particulado grueso y fino, de acuerdo al DS N° 59/1998 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, en la estación “El Alba”, ubicada en dependencias del Hogar de Niñas del mismo nombre, la cual cuenta

con la clasificación de estación de monitoreo con representatividad poblacional (EMRP), cuya resolución es la N°1346 de fecha 17 de diciembre de 2008.

Como antecedente más reciente, durante el año 2008 se registraron 20 días de superación, mientras que durante el año 2009 (periodo de enero a julio) los registros de la estación de monitoreo "El Alba" muestran 19 días de superaciones de la norma media de 24 horas, con máximos que alcanzan los  $395 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (ver Figura 3). De acuerdo a estos antecedentes y considerando que en el área de Osorno no existen muchos estudios en materia de contaminación atmosférica, ni tampoco un inventario de emisiones, se hace necesario contar con un estudio que entregue antecedentes relevantes que avalen a CONAMA en la solicitud de declaración de zona saturada por MP10 para esta comuna. Debido a que la contaminación atmosférica está fuertemente determinada por la meteorología, la delimitación de un área de influencia de las emisiones que causan efecto de saturación se debe obtener por la relación entre contaminantes y la meteorología.



Fuente: Elaboración propia en base a data de monitoreo de Calidad del Aire proporcionada por CONAMA

**Figura 3.** Comportamiento del promedio 24 horas de MP10 año 2008-2009.

Dentro de las ciudades de la zona centro sur del país que han presentado problemas de contaminación atmosférica, las comunas de Temuco y Padre Las Casas, ya declaradas como Zona Saturada y Chillán, en proceso de declaración, han realizado estudios para la delimitación de un área de influencia para declaración de zonas saturada por MP10. Estos estudios han utilizado distintas metodologías para estimar el

área de influencia. Para Temuco y Padre Las Casas <sup>[9]</sup> se realizó un análisis de las trayectorias que siguen las masas de aire que llegan a la estación de monitoreo en días en que hay superación de norma de MP10, para ello se utilizó un modelo de trayectorias que usa información de meteorología y topografía, que realiza una simulación del comportamiento del viento sobre una determinada zona. Para Chillán<sup>[13]</sup> se realizó un análisis mediante la aplicación de un modelo de predicción meteorológica y de dispersión de contaminantes para asociar los episodios de elevadas concentraciones y la meteorología de la zona. Para este último caso se requiere de información de las emisiones del área de estudio, información que para el caso de Osorno, no está determinada.

Por lo antes descrito, para realizar un estudio de delimitación de Zona Saturada por MP10 de Osorno, la metodología más adecuada respecto a la información con la que se cuenta es la del análisis de las trayectorias de masas de aire, el cual se desarrollara utilizando el modelo Hysplit (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model), perteneciente a NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration).

Para el caso de este estudio también se utilizará el modelo meteorológico WRF (Weather Research and Forecasting) v3.0, el cual constituye la herramienta de modelación meteorológica más sofisticada en la actualidad a nivel mundial.

### 3. Alcances y objetivos del Estudio

El presente estudio tiene como alcances principales:

- La caracterización de la meteorología de la zona de estudio entendiendo su rol preponderante sobre la ocurrencia de episodios de contaminación atmosférica.
- Determinación de la totalidad de episodios, en los que se ha sobrepasado el promedio de norma diaria de MP10, entre el periodo correspondiente a Enero de 2008 y Julio de 2009.
- La aplicación de modelo meteorológico que permita el análisis espacial de las principales variables meteorológicas con el fin de establecer los sectores de la comuna con potenciales problemas de contaminación atmosférica.

Para llevar a cabo el estudio se plantearon los siguientes objetivos.

#### 3.1. Objetivo General

Determinar el área geográfica de una zona saturada por material particulado respirable de Osorno.

#### 3.2. Objetivos Específicos

- Recopilar, sistematizar y analizar toda la información meteorológica que sea representativa de las condiciones de Osorno.
- Recopilar, sistematizar y analizar toda la información de monitoreo de calidad de aire de Osorno de las campañas y de la estación de monitoreo existente desde Enero del 2008.
- Identificar en forma preliminar las condiciones meteorológicas que propician la ocurrencia de altas concentraciones de material particulado: ello con el fin de entregar antecedentes que sirvan para el establecimiento futuro de herramientas de pronóstico de episodios de alta contaminación.

- Realizar un análisis de las trayectorias que siguen las masas de aire que llegan al lugar de monitoreo en aquellos días en los cuales se supera la norma diaria de MP10
- Proponer la zona geográfica que debiera ser considerada como zona saturada por material particulado respirable en la ciudad de Osorno.

## 4. Análisis Data Meteorológica del Área de Estudio

En la ciudad de Osorno, a la fecha solo se encuentra una estación de monitoreo, la cual cumple con las condiciones exigidas para calificarla como “EMRP”. En esta estación, se monitorean de forma horaria, contaminantes y parámetros meteorológicos, los que describen a continuación en la Tabla 1

Estación de monitoreo “El Alba” Coordenadas UTM N 659215 y UTM-E 5505662.

**Tabla 1.** Parámetros medidos por la estación de monitoreo

Nombre estación	Contaminantes		Meteorología		
	MP10	MP2.5	DV	VV	TA
El Alba	X	X	X	X	X

Las variables consideradas en el análisis básico son detalladas a continuación y corresponden a los siguientes parámetros.

- MP<sub>10</sub> : Material particulado con diámetro aerodinámico  $\leq 10 \mu\text{m}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
- MP<sub>2.5</sub> : Material particulado con diámetro aerodinámico  $\leq 2.5 \mu\text{m}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
- VV : Velocidad del viento (m/s)
- DV : Dirección del viento (Grados)
- TA : Temperatura ambiental (°C)

En base a la información de vientos y temperaturas, obtenida por la estación de monitoreo durante el año 2008 y los meses Enero a Julio, correspondiente al 2009, se realizó un análisis estadístico general, en el cual se procedió a determinar el promedio mensual y anual de velocidades (m/s) de los vientos existentes y temperaturas (°C), además de los promedios máximos y mínimos de los mismos. De igual forma se procedió a realizar las respectivas series de tiempo; y determinar la rosa de los vientos a modo de identificar su frecuencia en la dirección.

#### 4.1. Análisis de Velocidad de Vientos (VV), estadística descriptiva de la Estación El Alba, Enero 2008 – Julio 2009

En base a la información meteorológica horaria-anual obtenida de la estación de monitoreo El Alba, se desarrolló la determinación de los promedios de velocidad de vientos, además de sus máximos y mínimos alcanzados, para los años 2008 (Tabla 2) y 2009 (Tabla 3); esto subdividido en meses.

**Tabla 2.** Velocidad de vientos en promedios, máximos y mínimos mensuales para el año 2008.

Estación	Año	Mes	m/s		
			Promedio	Max	Min
		Enero	2,0	3,8	0,6
		Febrero	2,2	4,0	0,6
		Marzo	1,9	3,6	0,5
		Abril	1,8	3,5	0,5
		Mayo	1,6	3,2	0,5
El Alba	2008	Junio	1,6	2,8	0,6
		Julio	2,1	3,5	0,9
		Agosto	2,2	3,7	0,6
		Septiembre	1,5	3,2	0,3
		Octubre	1,8	3,6	0,4
		Noviembre	2,2	3,9	0,7
		Diciembre	2,1	3,8	0,7

Fuente: Elaboración Propia

De la Tabla 2 se aprecia que los vientos durante el año 2008 poseen un rango de velocidad promedio que fluctúa entre los 1,5 y 2,2 m/s, alcanzando en los meses de Febrero, Agosto y Noviembre, este mayor valor; a su vez, se muestra que la mínima velocidad reportada es de 0,3 m/s en el mes de Septiembre, y la máxima de 4,0 m/s en Febrero.

A continuación en la Tabla 3, se presentan los resultados obtenidos para el año en curso (2009), en donde se realiza un análisis de los datos recopilados entre los meses de Enero y Julio.

**Tabla 3.** Velocidad de vientos en promedios, máximos y mínimos mensuales para el año 2009. (en m/s).

Estación	Año	Mes	m/s		
			Promedio	Max	Min
		Enero	2,1	4,2	0,5
		Febrero	1,7	3,4	0,4
		Marzo	1,6	3,1	0,4
El Alba	2009	Abril	1,7	3,3	0,4
		Mayo	1,7	3,3	0,4
		Junio	1,6	3,3	0,4
		Julio	1,7	3,2	0,2

Fuente: Elaboración Propia

Se extrae de la Tabla 3, que durante los meses evaluados, el promedio de velocidad de vientos fluctúa entre 1,6 y 2,1 m/s, alcanzando este mayor valor en el mes de Enero; se observa notoriamente la supremacía en la velocidad de vientos durante este mismo mes, informando un valor máximo de 4,2 m/s y un mínimo de 0,5 m/s.

De acuerdo a una breve comparación entre las Tablas 2 y 3, se puede destacar que las velocidades de los vientos son bajas con respecto a otras zonas del país, como es el caso de zonas costeras, y por otro lado semejantes a las condiciones presentadas en la ciudad de Temuco, la cual reúne características geográficas similares a Osorno.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se presenta la estadística descriptiva de los datos de velocidad del viento correspondientes a los años 2008 y 2009, en donde se muestra la cantidad de datos disponibles y el porcentaje de estos validos; además de un promedio de velocidad anual de datos diarios, en m/s, y las máximas y mínimas anuales.

**Tabla 4.** Estadística de velocidad del viento Estación El Alba.

Estación	Año	Totales	Datos Disponibles N°	Datos Validos %	m/s		
					Prom.	Max	Min
El Alba	2008	366	351	95,9	1,9	3,5	0,6
	2009	365	216	59,2	1,7	3,4	0,4

Fuente: Elaboración Propia

Se observa que el porcentaje de datos válidos para el año 2008 alcanzan un valor cercano al 96 %, el cual es un porcentaje aceptable para el desarrollo de este análisis, y a su vez para el año 2009 el porcentaje de datos validos corresponde a un 59 %, lo cual básicamente se debe a que no se cuenta con una data anual completa, ya que el año se encuentra en curso.

En la Figura 4, se presenta gráficamente una serie de tiempo, representativa de la totalidad de datos diarios (promedios) de velocidades de vientos (m/s) en la ciudad de Osorno.

Se observa que la serie de tiempo de esta estación es caótica en cuanto a sus tendencias o estacionalidad; pero de igual manera se logra apreciar una agrupación en tendencia zigzagueante, la cual es la característica general de las series de tiempo de vientos.

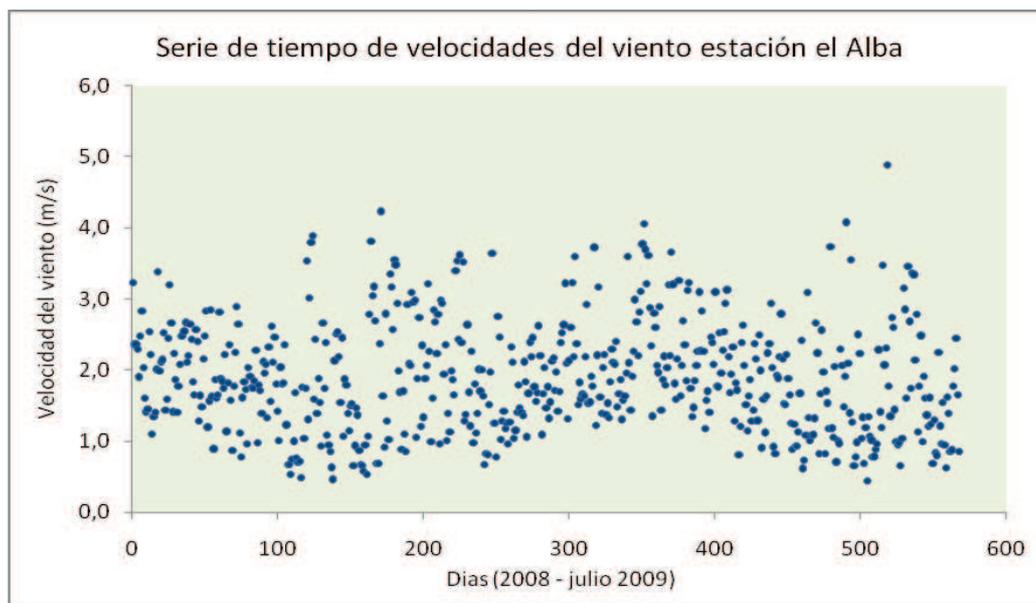


Figura 4. Registros de VV presentes en el área de estudio según estación El Alba.

## 4.2. Análisis de Rosa de los vientos estación el Alba Enero 2008 – Julio 2009

La estadística de dirección de los viento en la ciudad de Osorno se aborda en base al análisis de la rosa de los vientos, la cual indica la frecuencia de la dirección de los vientos y la magnitud o velocidades alcanzadas en el período analizado. De acuerdo a la información obtenida por parte de CONAMA y Servicio de Salud de la región de Los Lagos, la información procesada corresponde a los períodos de Enero-Diciembre 2008 y luego Enero – Julio de 2009 para la Estación El Alba de la Ciudad de Osorno. Se analiza las frecuencias de vientos, en las cuatro estaciones del año, con el fin de determinar las tendencias y analizar el movimiento de las masas de aire en la zona.

### 4.2.1. Análisis de rosa de los vientos año 2008

La Figura 5a) muestra la rosa de los vientos para el período de enero –febrero de 2008. Se observa que en esta época, el viento sopla mayoritariamente en dirección Nor-Oeste y Norte, con velocidades que se encuentran entre los 2,1 y 5,7 m/s. en este período se registran además vientos en dirección Nor-Este y en Sur con una frecuencia despreciable.

El gráfico de frecuencias (Figura 5b) muestra que predominan en este período velocidades de entre 0,5-2,1 m/s con un 48,7%, por su parte, las velocidades de entre 2,1 y 3,6 m/s se producen un 32,8% de las veces y velocidades mayores de hasta los 8,8 m/s se producen un 10,8%.

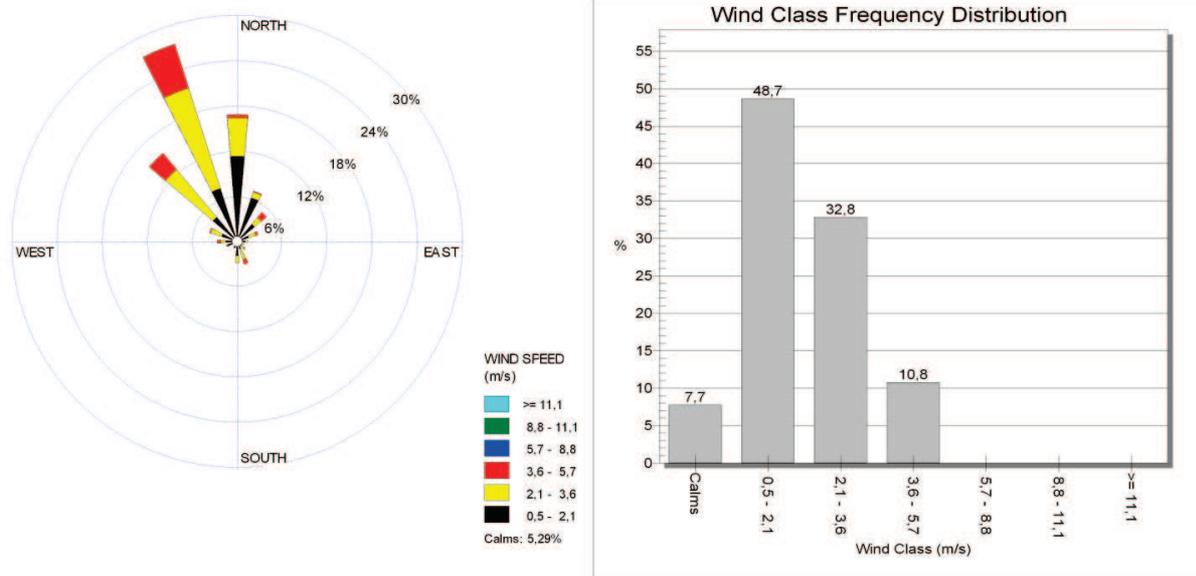


Figura 5. a) Rosa de los vientos período Enero-Febrero 2008 y b) gráfica de distribución de frecuencias.

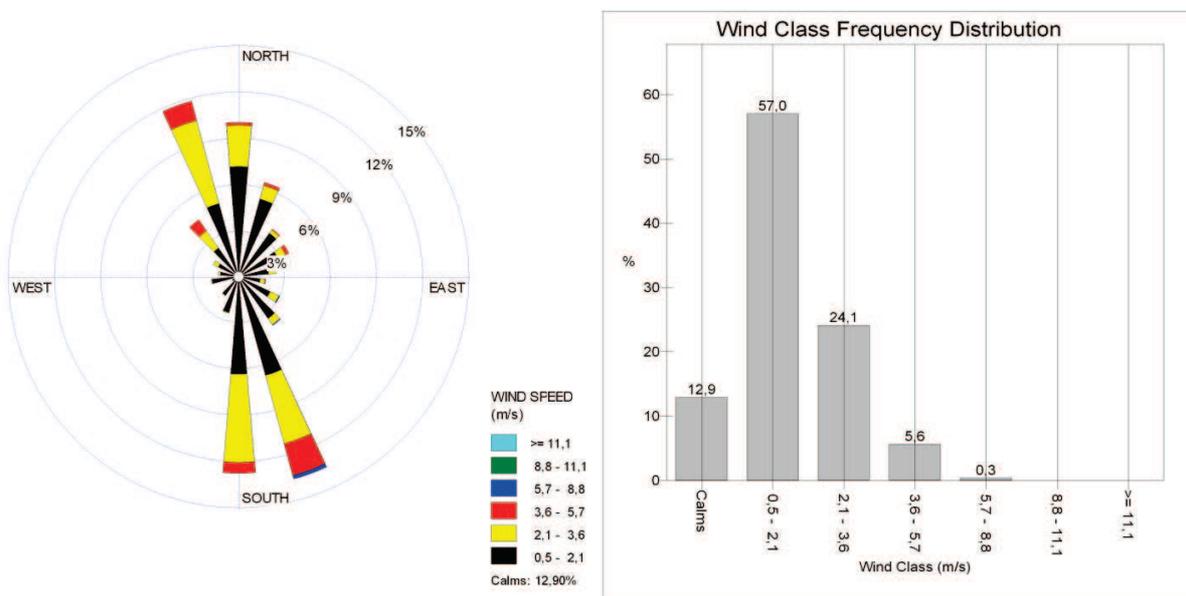


Figura 6. a) Rosa de los vientos período Marzo-Junio 2008 y b) gráfica de distribución de frecuencias.

La Figura 6a) muestra la rosa de los vientos para el período de Marzo –Junio de 2008. Se observa que en esta época, el viento sopla mayoritariamente en dirección Sur y Sur-Este, con velocidades máximas que alcanzan los 8,8 m/s. Los mayores rangos de velocidades registrados se encuentran en un rango de 0,5 – 2,1 m/s y entre los 2,1 – 3,6 m/s. Gran parte del período se observa además dirección Norte y Nor-Oeste con velocidades de hasta los 5,7 m/s. Menores frecuencias se observan en dirección Este y Oeste, sin alcanzar grandes velocidades.

Respecto a las frecuencias, la Figura 6b) muestra que predominan velocidades en el rango de 0,5-2,1 m/s en este período con un 57 %, por su parte, las velocidades de entre 2,1 y 3,6 m/s se producen un 24,1% y velocidades mayores de hasta los 5,7 m/s se producen un 5,6%. Altas velocidades de hasta 8,8 m/s se producen solo un 0,3%.

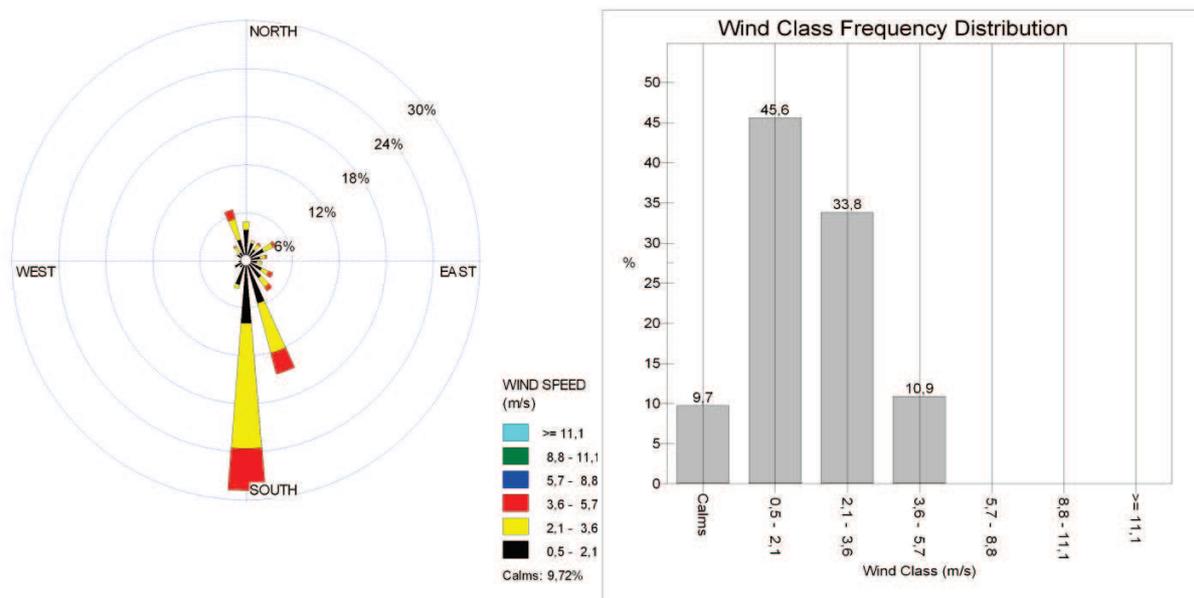


Figura 7. a) Rosa de los vientos período Junio – Septiembre 2008 y b) gráfica de distribución de frecuencias.

La Figura 7a) muestra la rosa de los vientos para el período de Junio - Septiembre de 2008. Se observa que en esta época, el viento sopla marcadamente en dirección Sur y Sur-Este, con velocidades máximas que alcanzan los 5,7 m/s. El rango con mayor frecuencia en esta dirección se registra entre 2,1 – 3,6 m/s y entre los 3,6 y 5,7 m/s. Una componente menor se registra en dirección Norte y Nor-Oeste, sin embargo, esta resulta muy inferior a la predominancia Sur.

Respecto a las frecuencias, la Figura 7b) muestra que predominan velocidades en el rango de 0,5-2,1 m/s en este período con un 45,6 %, por su parte, las velocidades de entre 2,1 y 3,6 m/s se producen un 33,6% y velocidades mayores de hasta los 5,7 m/s se producen un 10,9%.

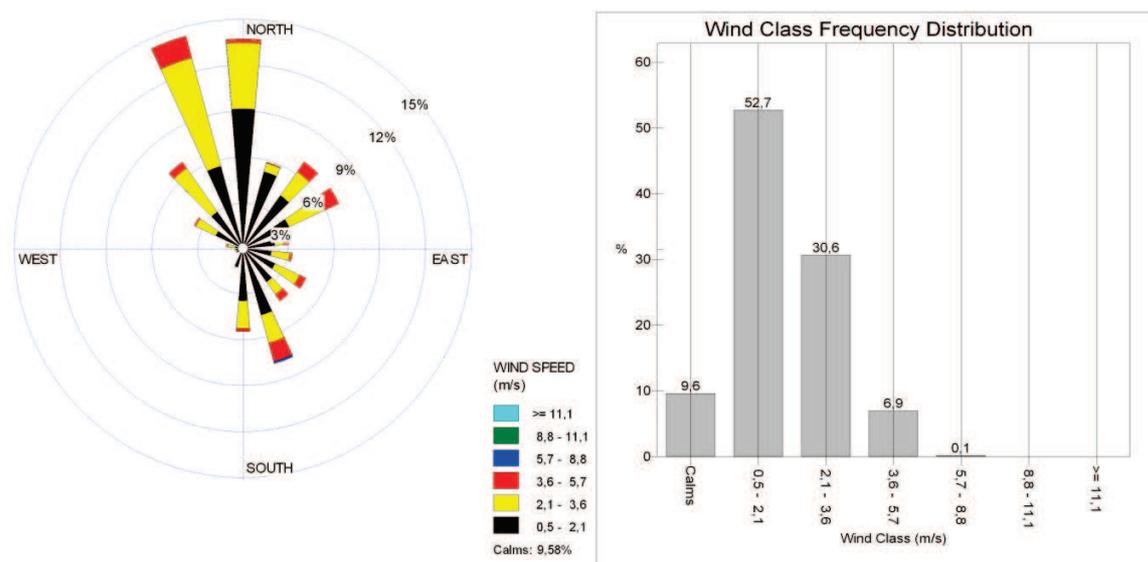


Figura 8. a) Rosa de los vientos período Septiembre Diciembre 2008 y b) gráfica de distribución de frecuencias.

La

Figura 8a) muestra la rosa de los vientos para el período de Septiembre - Diciembre 2008. Se observa que en esta época, el viento sopla marcadamente en dirección Norte y Nor-Oeste, con velocidades máximas que alcanzan los 5,7 m/s, seguida de 2,1 y 3,6 m/s. Respecto a la rosa de los vientos, esta no se muestra con una tendencia clara, dado que se produce una tendencia importante en dirección Sur, alcanzando máximos de hasta los 8,8 m/s. Esto muestra tendencias más caóticas en comparación al período considerado entre junio y septiembre de 2008.

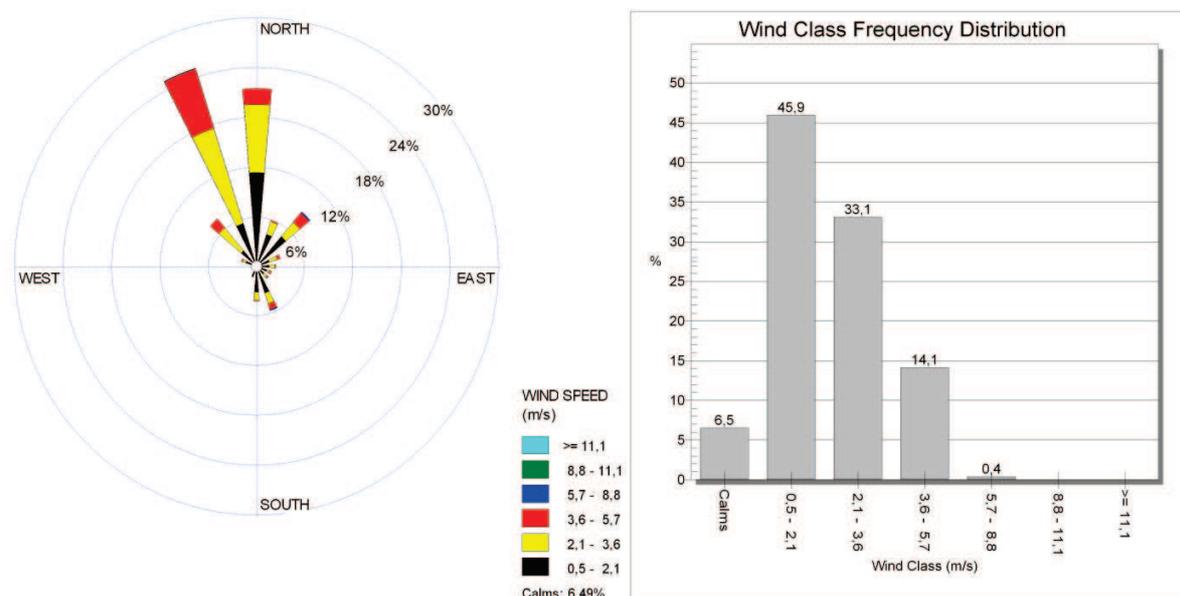
Respecto a las frecuencias, la

Figura 8 b) muestra predominancia de velocidades en el rango de 0,5-2,1 m/s en este período con un 52,7 %, por su parte, las velocidades de entre 2,1 y 3,6 m/s se producen un 30,6% y velocidades mayores de hasta los 5,7 m/s se producen un 6,9%.

Velocidades mayores de hasta los 8,8 m/s, solo se alcanzan un 0,1% del tiempo en este período.

#### 4.2.2. Análisis de rosa de los vientos año 2009

Considerando la data disponible, se realiza el análisis por períodos desde enero 2009 hasta Julio de 2009. Los resultados del análisis se muestran a continuación:



**Figura 9. a)** Rosa de los vientos período Enero – Febrero 2009 y **b)** gráfica de distribución de frecuencias.

La Figura 9a) muestra la rosa de los vientos para el período de Enero - Febrero 2009. Se observa que en esta época, el viento sopla marcadamente en dirección Norte y Nor-Oeste, con velocidades máximas que alcanzan los 5,7 m/s, seguida de 2,1 y 3,6 m/s. La dirección también se genera en menor frecuencia en dirección Nor-Este alcanzando velocidades máximas de hasta los 8,8 m/s.

Respecto a las frecuencias, la Figura 9b) muestra predominancia de velocidades en el rango de 0,5-2,1 m/s en este período con un 45,9 %, por su parte, las velocidades de entre 2,1 y 3,6 m/s se producen un 33,1% y velocidades mayores de hasta los 5,7 m/s

se producen un 14,1%. Velocidades mayores de hasta los 8,8 m/s, solo se alcanzan un 0,4% del tiempo en este período.

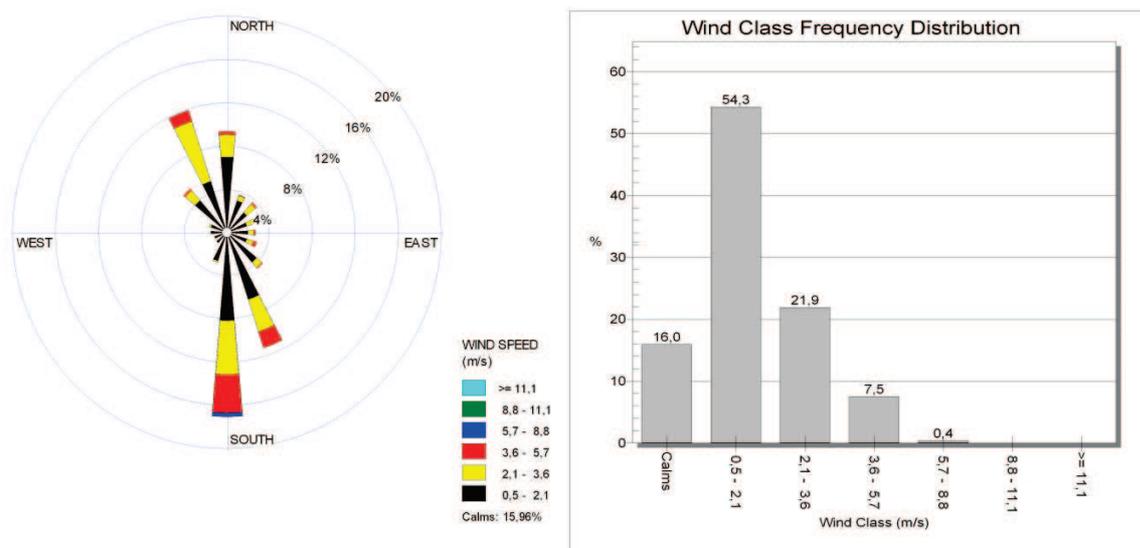


Figura 10. a) Rosa de los vientos período Marzo – Junio 2009 y b) gráfica de distribución de frecuencias.

La Figura 10a) muestra la rosa de los vientos para el período de Marzo - Junio 2009. Se observa que en esta época, el viento sopla marcadamente en dirección Sur y Sur-este, con velocidades máximas que alcanzan los 8,8 m/s. La velocidad más marcada en esta dirección se encuentra entre los 0,5 y 2,1 m/s, seguido de 2,1 a 3,6 m/s.

Respecto a las frecuencias, la Figura 10b) muestra predominancia de velocidades en el rango de 0,5-2,1 m/s en este período con un 54,3 %, por su parte, las velocidades de entre 2,1 y 3,6 m/s se producen un 21,9% y velocidades mayores de hasta los 5,7 m/s se producen un 7,5%. Velocidades mayores de hasta los 8,8 m/s, solo se alcanzan un 0,4% del tiempo en este período.

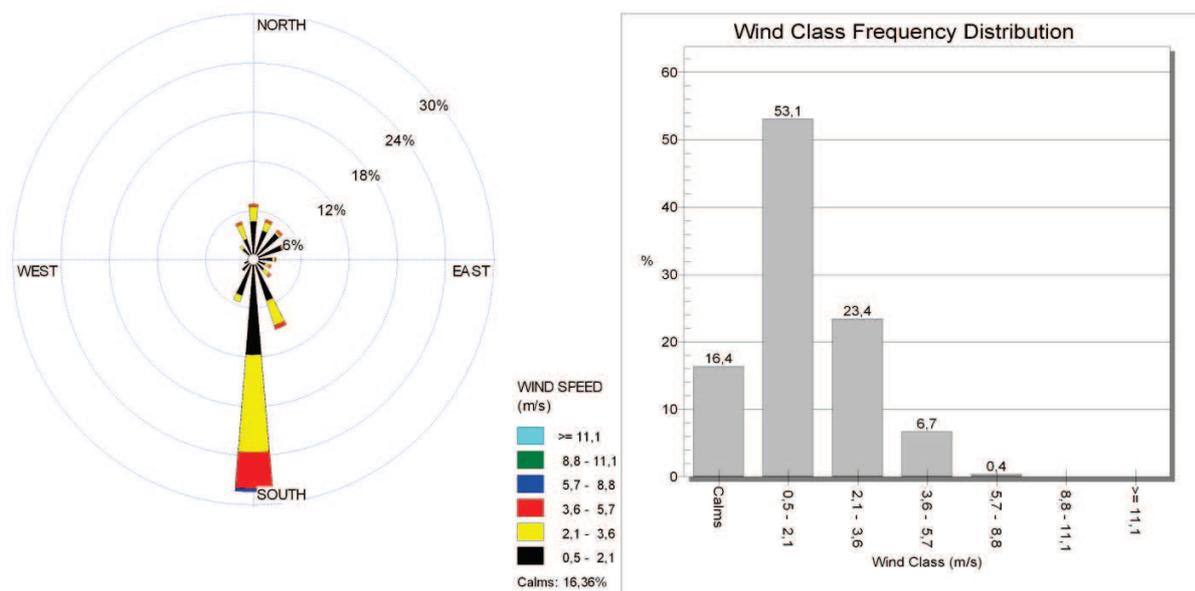


Figura 11. a) Rosa de los vientos período Junio – Agosto 2009 y b) gráfica de distribución de frecuencias.

La Figura 11a) muestra la rosa de los vientos para el período de Junio – Agosto de 2009. Se observa que en esta época, el viento sopla marcadamente en dirección Sur con velocidades máximas que alcanzan los 8,8 m/s como máxima. La velocidad más marcada en esta dirección se encuentra entre los 2,1 a 3,6 m/s.

Respecto a las frecuencias, la Figura 11 b) muestra predominancia de velocidades en el rango de 0,5-2,1 m/s en este período con un 53,1 %, por su parte, las velocidades de entre 2,1 y 3,6 m/s se producen un 23,4% y velocidades mayores de hasta los 5,7 m/s se producen un 6,7%. Velocidades mayores de hasta los 8,8 m/s, solo se alcanzan un 0,4% del tiempo en este período.

### 4.3. Análisis de Temperatura (°C), estadística descriptiva de la Estación El Alba, Enero 2008 – Julio 2009

En base a la información meteorológica horaria-anual obtenida de la estación de monitoreo El Alba, se obtuvieron los promedios de temperatura, además de sus máximos y mínimos alcanzados, para los años 2008 (Tabla 5) y 2009 (Tabla 6); esto subdividido en meses.

**Tabla 5.** Estadística descriptiva de temperatura año 2008 estación El Alba.

Estación	Año	Mes	°C		
			Promedio	Max	Min
		Enero	18,3	26,3	11,3
		Febrero	17,9	25,2	11,6
		Marzo	14,5	21,2	9,0
		Abril	10,6	15,0	6,9
		Mayo	8,4	13,2	4,4
El Alba	2008	Junio	7,5	11,0	4,9
		Julio	7,2	10,4	4,4
		Agosto	7,2	10,4	4,4
		Septiembre	8,8	14,8	3,4
		Octubre	10,4	15,5	5,8
		Noviembre	13,3	18,8	8,6
		Diciembre	17,1	23,7	10,6

Fuente: Elaboración Propia

De la Tabla 5, se observa que las temperaturas promedio fluctúan entre los 7,2 a 18,3 °C, el valor máximo registrado corresponde a 26,3 °C, el cual se registro en el mes de Enero, por el contrario, el valor mínimo registrado corresponde a 3,4 °C, el cual se registro el mes de Septiembre, seguido por 4,4 °C, registrado en los meses de Mayo, Julio y Agosto.

Cabe destacar que las temperaturas promedio para cada mes no superan los 20 grados °C, lo que implica un uso de calefacción, en este caso uso de leña, mayor que otras zonas del país.

A continuación en la Tabla 6, se presentan los resultados obtenidos para el año en curso (2009), en donde se realiza un análisis de los datos recopilados entre los meses de Enero y Julio.

**Tabla 6.** Temperatura en promedios, máximos y mínimos mensuales para el año 2009. (en °C).

Estación	Año	Mes	°C		
			Prom.	Max	Min
		Enero	16,5	23,3	10,0
		Febrero	15,8	21,9	10,1
		Marzo	14,4	20,0	9,4
El Alba	2009	Abril	12,6	17,4	8,8
		Mayo	9,0	12,6	6,1
		Junio	6,4	9,4	3,5
		Julio	5,7	10,0	2,0

Fuente: Elaboración Propia

De los meses registrados en la Tabla 6, se observa que el promedio de temperaturas para el año 2009 fluctúa entre 5,7 y 16,5, teniendo temperaturas más bajas que para el año 2008; se aprecia que el valor máximo corresponde a 23,3 °C y se presenta en el mes de Enero, en cambio el valor mínimo corresponde a 2,0°C, el cual se presentó en el mes de Julio.

En la Tabla 7, se presenta la estadística descriptiva de los datos de temperatura correspondientes a los años 2008 y 2009, en donde se muestra la cantidad de datos disponibles y el porcentaje de estos válidos; además de un promedio de Temperatura anual de los datos diarios, en °C, y las máxima y mínima anuales.

**Tabla 7.** Estadística de velocidad del viento Estación El Alba.

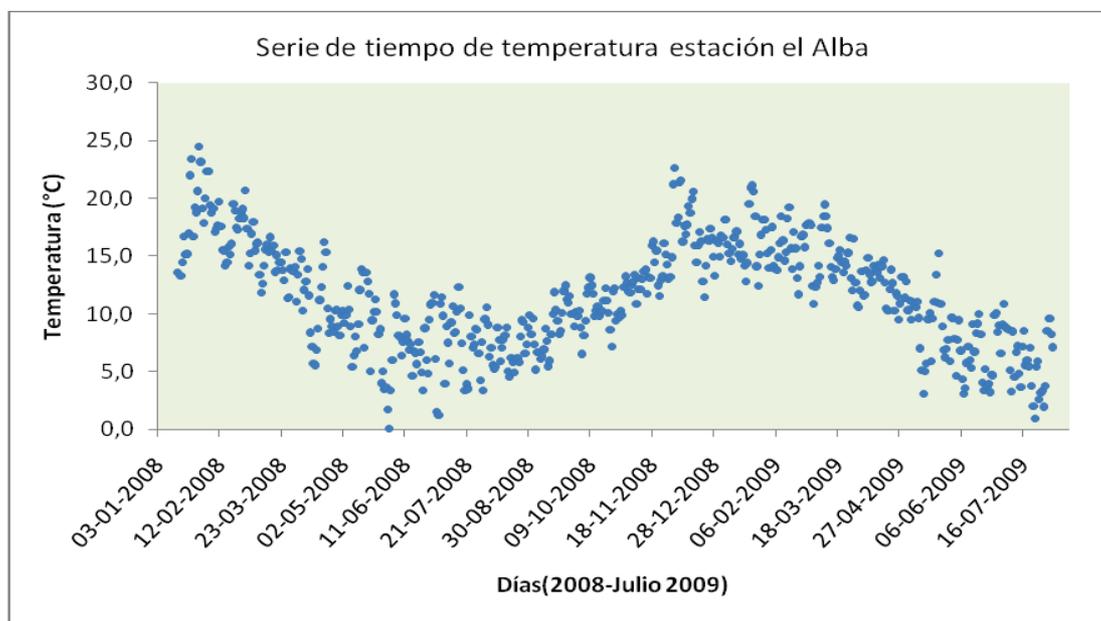
Estación	Año	Totales	Datos Disponibles N°	Datos Validos %	°C		
					Prom.	Max	Min
El Alba	2008	366	351	95,9	11,8	17,1	7,1
	2009	365	216	59,2	11,5	16,4	7,1

Fuente: Elaboración Propia

Se observa que el porcentaje de datos validos para el año 2008 alcanzan un valor cercano al 96 %, el cual es un porcentaje aceptable para el desarrollo de este análisis, y a su vez para el año 2009 el porcentaje de datos validos corresponde a un 59 %, lo cual básicamente se debe a que no se cuenta con una data anual completa, ya que el año se encuentra en curso.

En la Figura 12, se presenta gráficamente una serie de tiempo, representativa de la totalidad de datos diarios (promedios) de temperaturas en la ciudad de Osorno.

Se observa que la serie de tiempo de esta estación no es tan caótica, se aprecia claramente la estacionalidad.



**Figura 12.** Registros de temperaturas presentes en el área de estudio según estación El Alba.

## 5. Análisis Calidad del Aire

### 5.1. Normativa para (MP10) considerada en el Estudio

Dado que se considera el análisis de la norma primarias MP10, se muestra a continuación su definición, de acuerdo a lo establecido en el DS 59/98 y el D.S. 45 del 2001.

Al entrar en vigencia el D.S. 59/98 el 30 de Mayo de 1998, esta normativa fue redefinida, mientras que a su vez, el D.S. 45 del 2001 modifica el decreto anterior. Así desde el año 1999 en adelante es aplicable el límite diario mostrado en la Tabla 8.

El límite anual es sólo exigible para el año 2004 en adelante, debido a que se necesita el promedio de tres años calendario.

**Tabla 8.** Norma de Calidad de Aire para MP10 establecida por D.S. N°59/98 y D.S. N°45/01.

Tipo de Norma	Valor	Período de evaluación	Forma de verificación
Primaria	150 µg/m <sup>3</sup> N	Concentración de 24 h	Percentil 98 de valores de 1 año o más de 7 días en 1 año
Primaria	50 µg/m <sup>3</sup> N	Promedio Anual	Promedio de 3 años consecutivos

Fuente: Adaptado de los valores límites normativos

Se procesaron las bases de datos de calidad del aire de MP10, de la estación de monitoreo Cesar Ercilla (2001 al 2003), y la estación El Alba (2008 al 2009) presente hoy en la zona de estudio. Con estas bases se determinaron los diseños de las normas de cada contaminante. Es así como se calculó el percentil 98 de las concentraciones de 24 horas para el MP10. Además las medias anuales de MP10. Esta información permitió tener una línea base para el período desde el año 2008, a Agosto 2009.

## 5.2. Análisis del Monitoreo de Calidad del Aire

### 5.2.1. Episodios a modelar y dominio de modelación

Dentro de las actividades necesarias para la modelación y posterior delimitación de zona, en primer lugar se requiere del análisis y selección de episodios a modelar; es en este sentido que se ha definido como año base para la modelación, el año 2008. Los puntos que justifican la elección del año base se detallan a continuación, en base al análisis de la data de calidad del aire disponible, de la estación de monitoreo El Alba de la ciudad de Osorno.

### 5.2.2. Selección de Año base del estudio

El criterio para seleccionar el 2008 como año base, dice relación con los siguientes elementos:

Este año (2008) constituye el año más completo en términos de datos de calidad de aire, es el único año que posee un 88,8% de datos validos, seguido por el año 2003 que posee un 57,5%, sin embargo, para la evaluación de normativa de material particulado de 10 micrones de diámetro aerodinámico, se requiere que la data válida sobrepase el 80%.

En la Tabla 9 se resume la estadística de la validez de los registros por año para la estación monitora El Alba, así como los valores máximos, mínimos, desviación estándar y percentil 98 de cada año. En la estación se dispone de registros de MP10 desde el año 2001, hasta el año 2009 medidos todos los días, sin embargo existe un periodo de 4 años en los cuales no existe data de calidad de aire, desde el año 2004 al 2007. Se observa que la estación registró las más altas concentraciones durante los años 2008 y 2009.

**Tabla 9.** Estadística de MP10 años 2001-2009, estación El Alba.

Año	Total datos validos	Datos Válidos (%)	Concentración $\mu\text{g}/\text{m}^3$							
			Prom. anual $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Prom. Trianual $\mu\text{g}/\text{m}^3$	%Norma	P98	%Norma	Máx	Mín	Desv. Est.
2001	67	18,4%	38	*	*	158	106%	188	9	35
2002	134	36,7%	44	*	*	156	104%	170	5	42
2003	210	57,5%	56	41	82%	198	132%	235	2	55
2004	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
2005	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
2006	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
2007	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
2008	<b>324</b>	<b>88,8%</b>	<b>57</b>	*	*	<b>212</b>	<b>141%</b>	<b>487</b>	<b>12</b>	<b>53</b>
2009	133	36,4%	63	*	*	319	213%	395	10	71

Fuente: Elaboración Propia

\*sin información

Respecto a la normativa primaria anual, no es posible estimar si ésta es sobrepasada, ya que no se cumple con un mínimo de datos para su cálculo. En cambio para la norma diaria se aprecia que el límite de superación ocurre en todos los años de evaluación, sin embargo, solo se puede validar el año 2008.

La tendencia de las emisiones de material particulado de tamaño aerodinámico menor o igual a 10 micrones, registradas, muestran un aumento de las concentraciones desde el año 2001 hasta el 2009. Este cambio se puede atribuir a diversos factores entre los cuales se destaca el aumento en el consumo de leña, principal causa de los altos índices de contaminación en la macro-zona sur. En la ciudad de Osorno una de las principales actividades emisoras es la combustión residencial de leña. Para poder determinar con exactitud cuál es el aporte de este tipo de fuente en las emisiones de material particulado, es indispensable realizar un inventario de emisiones, para de esta forma precisar el aporte de las distintas fuentes y sus contaminantes. Este inventario de emisiones se puede complementar con una campaña de monitoreo de especiación química que permite caracterizar el material particulado, determinando su toxicidad y la exposición de la población.

### 5.2.3. Análisis por periodos de Superación de Norma de 24 hrs para MP10 durante el año 2008.

Dentro de los datos disponibles para el año 2008, se analizó y encontró que la superación de norma ocurrió en los meses de otoño e invierno, específicamente en los meses de mayo a septiembre. Estos se muestran a continuación en las siguientes figuras.

#### 5.2.3.1. Superación de Norma, mes de Mayo 2008

Del análisis de data diaria, para el periodo de Mayo de 2008, se identificó la existencia de 7 días con superación de valor de referencia de la Norma de 24 hrs (150  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ), (Ver Tabla 10), en la cual se muestra el porcentaje de excedencia de la norma de 24 horas. Se observa que el máximo valor en este mes alcanza un promedio de 278  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Los valores se encuentran graficados en la serie temporal de la Figura 13.

Tabla 10. Detalle de días de superación de valor de referencia de la Norma

N° de días 7			
Fecha	Valor Norma ( $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )	MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	% Excedencia Norma
01-05-2008	150	186,4	124,2
02-05-2008	150	193,2	128,8
03-05-2008	150	172,8	115,2
09-05-2008	150	200,4	133,6
10-05-2008	150	215,4	143,6
28-05-2008	150	247,9	165,3
29-05-2008	150	278,1	185,4

Fuente: Elaboración Propia

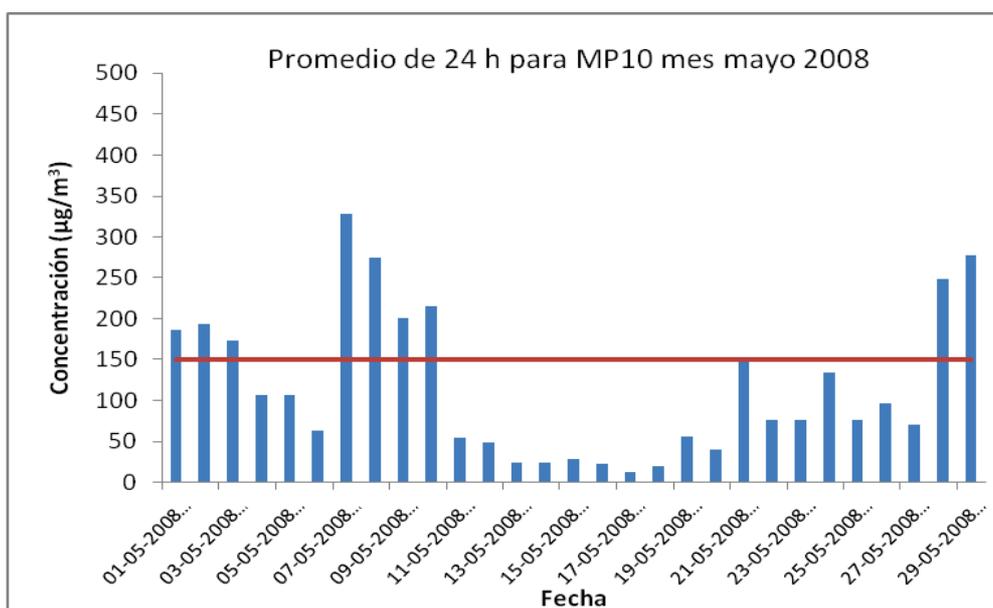


Figura 13. Gráfico de concentraciones Mayo 2008

### 5.2.3.2. Superación de norma, mes de Junio 2008

Del análisis de data diaria, para el periodo de Junio de 2008, se identificó la existencia de 5 días con superación de valor de referencia de la Norma de 24 hrs (150 ug/m<sup>3</sup>N). Estos valores son mostrados en la Tabla 11, en la cual se muestra además el porcentaje de excedencia de la norma de 24 horas. Se observa que el máximo valor en este mes alcanza un promedio de 326 ug/m<sup>3</sup> los cuales se han graficados en la serie temporal de la Figura 14. Se observa que en comparación a mayo, este episodio se produce en 4 días consecutivos a partir del día 19-22 de mayo.

Tabla 11. Detalle de días de superación de valor de referencia de la Norma

N° de días 5			
Fecha	Valor Norma (µg/m <sup>3</sup> N)	MP10 [µg/m <sup>3</sup> ]	%Excedencia Norma
15-06-2008	150	157,9	105,3
19-06-2008	150	150,0	100,0
20-06-2008	150	175,1	116,7
21-06-2008	150	326,1	217,4
22-06-2008	150	211,7	141,1

Fuente: Elaboración Propia

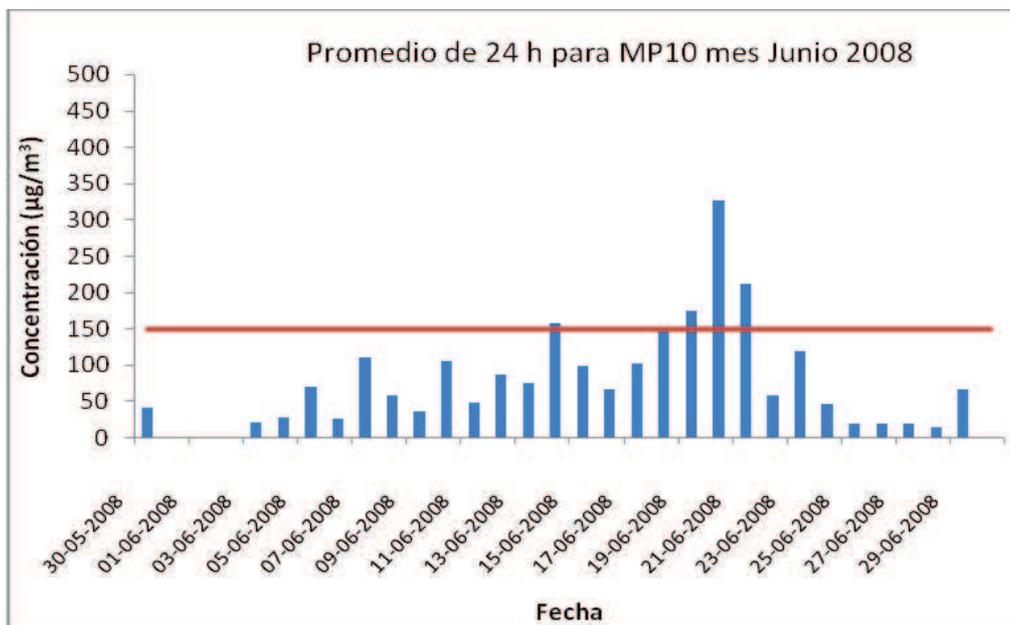


Figura 14. Gráfico de concentraciones Junio 2008

### 5.2.3.3. Superación de Norma, mes de Julio 2008

Del análisis de data diaria, para el periodo de Julio de 2008, se identificó la existencia de 4 días con superación de valor de referencia de la Norma de 24 hrs ( $150 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ). Estos valores son mostrados en la Tabla 12, en la cual se muestra además el porcentaje de excedencia de la norma de 24 horas. Se observa que el máximo valor en este mes alcanza un promedio de  $486,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Los datos son graficados en la serie temporal de la Figura 15. Se observa que en comparación a mayo no se observan días consecutivos de episodio.

Tabla 12. Detalle de días de superación de valor de referencia de la Norma

N° de días 4			
Fecha	Valor Norma (µg/m <sup>3</sup> N)	MP10 [µg/m <sup>3</sup> ]	%Excedencia Norma
01-07-2008	150	486,9	324,6
02-07-2008	150	246,2	164,1
20-07-2008	150	181,2	120,8
31-07-2008	150	167,7	111,8

Fuente: Elaboración Propia

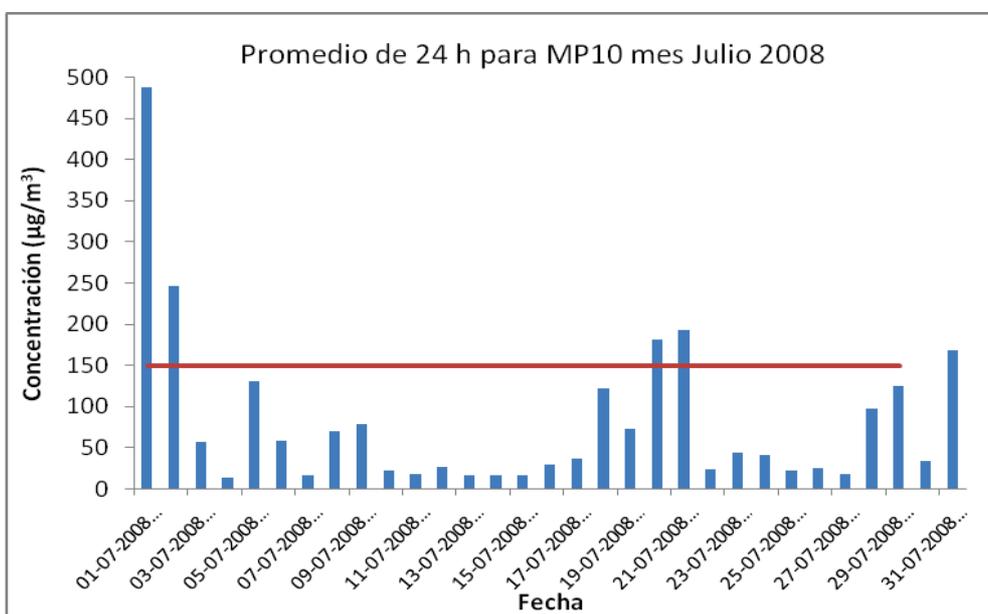


Figura 15. Gráfico de concentraciones Julio 2008

### 5.2.3.4. Superación de Norma, mes de Agosto 2008

Del análisis de data diaria, para el periodo de Agosto de 2008, se identifico la existencia de solo 1 día con superación de valor de referencia de la Norma de 24 hrs (150  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ). El valor es mostrado en la Tabla 13, en la cual se muestra además el porcentaje de excedencia de la norma de 24 horas. Se observa que el máximo valor en este mes alcanza un promedio de 181,5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Las concentraciones en agosto han sido graficados en la serie temporal de la Figura 16. Se observa que en comparación a mayo no se observan días consecutivos de episodio.

Tabla 13. Detalle de días de superación de valor de referencia de la Norma

N° de días 1			
Fecha	Valor Norma ( $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )	MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	%Excedencia Norma
07-08-2008	150,0	181,5	121,0

Fuente: Elaboración Propia

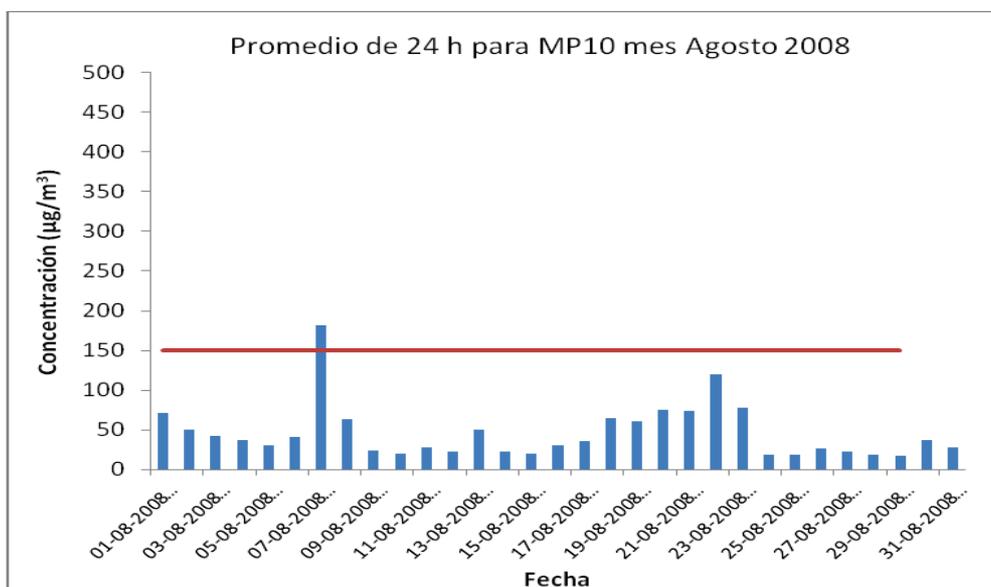


Figura 16. Gráfico de concentraciones Agosto 2008

### 5.2.3.5. Superación de Norma, mes de Septiembre 2008

Del análisis de data diaria, para el periodo de Septiembre de 2008, se identifico la existencia de 2 días con superación de valor de referencia de la Norma de 24 hrs (150 ug/m<sup>3</sup>N). Los valores son mostrados en la Tabla 14, en la cual se muestra además el porcentaje de excedencia de la norma de 24 horas. Se observa que los valores son muy similares en promedio 160 ug/m<sup>3</sup> y no consecutivos. Las concentraciones en agosto han sido graficados en la serie temporal de la Figura 17

**Tabla 14.** Detalle de días de superación de valor de referencia de la Norma

N° de días 2			
Fecha	Valor Norma (µg/m <sup>3</sup> N)	MP10 [µg/m <sup>3</sup> ]	%Excedencia Norma
03-09-2008	150	160,1	106,7
06-09-2008	150	160,6	107,1

Fuente: Elaboración Propia



**Figura 17.** Gráfico de concentraciones Septiembre 2008

#### 5.2.4. Serie de tiempo de concentraciones horarias año 2008

A continuación, se muestra la serie de tiempo (Figura 18) de concentraciones horarias para los períodos de mayores concentraciones de MP10 horaria y de 24 horas (Mayo a Septiembre de 2008). En los cuales se obtuvo un número de 19 días en los cuales se sobrepasó el valor de norma (150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), de acuerdo al percentil 98.

De la Figura se observa que las mayores concentraciones horarias registradas, se encuentran en los meses de junio, julio y agosto, con máximos horarios que superan los 1000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

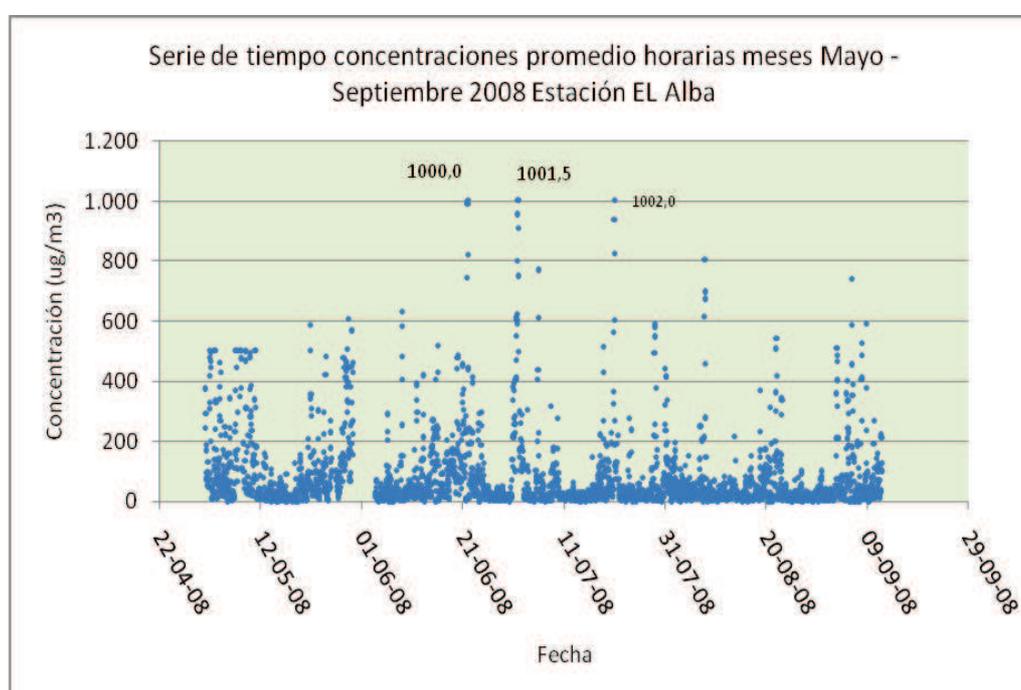


Figura 18. Serie de tiempo de concentraciones horarias meses mayo-septiembre 2008.

Cabe señalar que a comienzos del mes de Mayo (2008), específicamente el día 2, entro en actividad el volcán Chiten, ubicado al sur-este de la comuna de Osorno aproximadamente a unos 300 Km, dentro de la misma Región de los Lagos, y a unos 200 Km de la capital regional Puerto Montt, cuya erupción tuvo una prolongada duración, que se extendió por algunos meses. De acuerdo a estos antecedentes y en función de la trayectoria de masas de aire, se puede mencionar que este acontecimiento natural, pudo tener una directa relación con los peaks de contaminación alcanzados durante este periodo, contribuyendo en los altos episodios de contaminación registrados en los meses de junio y julio.

### 5.2.5. Análisis por periodos de Superación de Norma de 24 hrs para MP10 durante el año 2009.

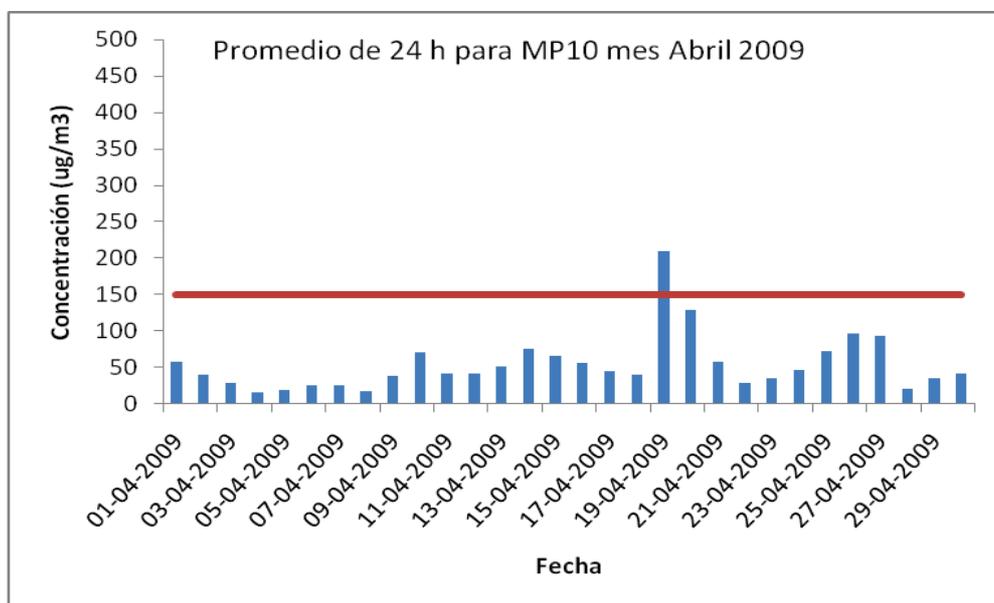
#### 5.2.5.1. Superación de Norma, mes de Abril 2009

Del análisis de data diaria, para el periodo de Abril de 2009, se identificó la existencia de 1 días con superación de valor de referencia de la Norma de 24 hrs (150  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ), (Ver Tabla 15), en la cual se muestra el porcentaje de excedencia de la norma de 24 horas. Se observa que el máximo valor en este mes alcanza un promedio de 209,8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Los valores se encuentran graficados en la serie temporal de la Figura 19.

**Tabla 15.**Detalle de días de superación de valor de referencia de la Norma

N° de días 1			
Fecha	Valor Norma ( $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )	MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	% Excedencia Norma
19-04-2009	150	209,8	139,8

Fuente: Elaboración Propia



**Figura 19:** Gráfico de concentraciones Abril 2009

### 5.2.5.2. Superación de Norma, mes de Mayo 2009

Del análisis de data diaria, para el periodo de Mayo de 2009, se identificó la existencia de 8 días con superación de valor de referencia de la Norma de 24 hrs ( $150 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ), (Ver Tabla 16), en la cual se muestra el porcentaje de excedencia de la norma de 24 horas. Se observa que el máximo valor en este mes alcanza un promedio de  $319,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Los valores se encuentran graficados en la serie temporal de la Figura 20.

**Tabla 16.** Detalle de días de superación de valor de referencia de la Norma

N° de días 8			
Fecha	Valor Norma ( $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )	MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	%Excedencia Norma
12-05-2009	150	229,5	153,0
13-05-2009	150	232,5	155,0
23-05-2009	150	183,3	122,2
24-05-2009	150	319,6	213,1
25-05-2009	150	288,3	192,2
26-05-2009	150	198,0	132,0
29-05-2009	150	169,3	112,8
31-05-2009	150	169,7	113,1

Fuente: Elaboración Propia

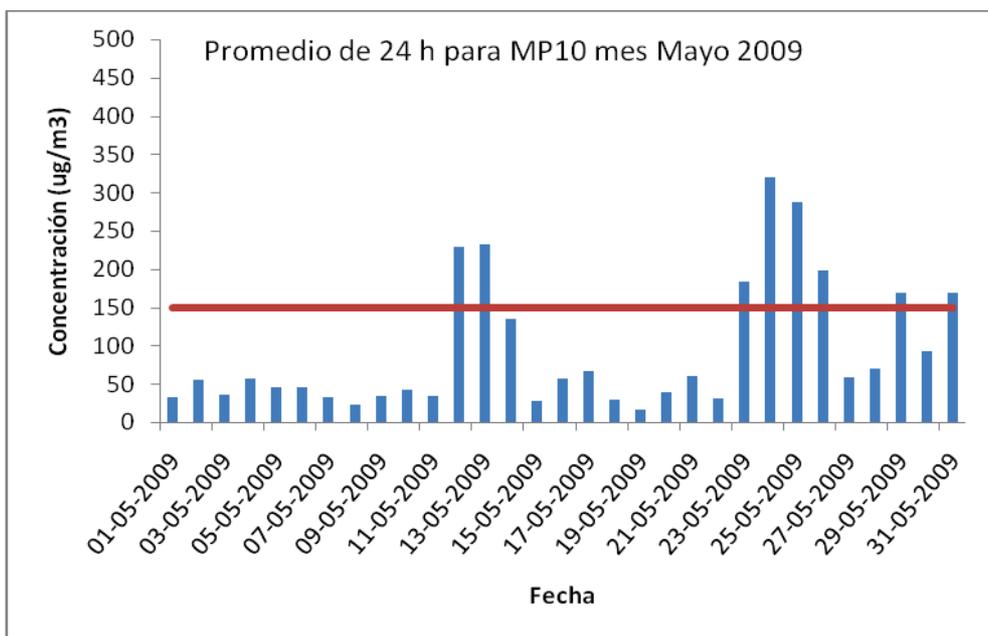


Figura 20. Gráfico de concentraciones Mayo 2009

### 5.2.5.3. Superación de Norma, mes de Junio 2009

Del análisis de data diaria, para el periodo de Junio de 2009, se identificó la existencia de 10 días con superación de valor de referencia de la Norma de 24 hrs (150  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ), (Ver Tabla 17 ), en la cual se muestra el porcentaje de excedencia de la norma de 24 horas. Se observa que el máximo valor en este mes alcanza un promedio de 395,1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Los valores se encuentran graficados en la serie temporal de la Figura 21.

Tabla 17. Detalle de días de superación de valor de referencia de la Norma

N° de días 10			
Fecha	Valor Norma ( $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )	MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	%Excedencia Norma
01-06-2009	150	218,3	145,5
02-06-2009	150	301,9	201,3
03-06-2009	150	153,4	102,3
09-06-2009	150	191,7	127,8
19-06-2009	150	214,5	143,0
22-06-2009	150	227,2	151,5
23-06-2009	150	380,6	253,7
24-06-2009	150	322,8	215,2
25-06-2009	150	249,6	166,4
26-06-2009	150	395,1	263,4

Fuente: Elaboración Propia

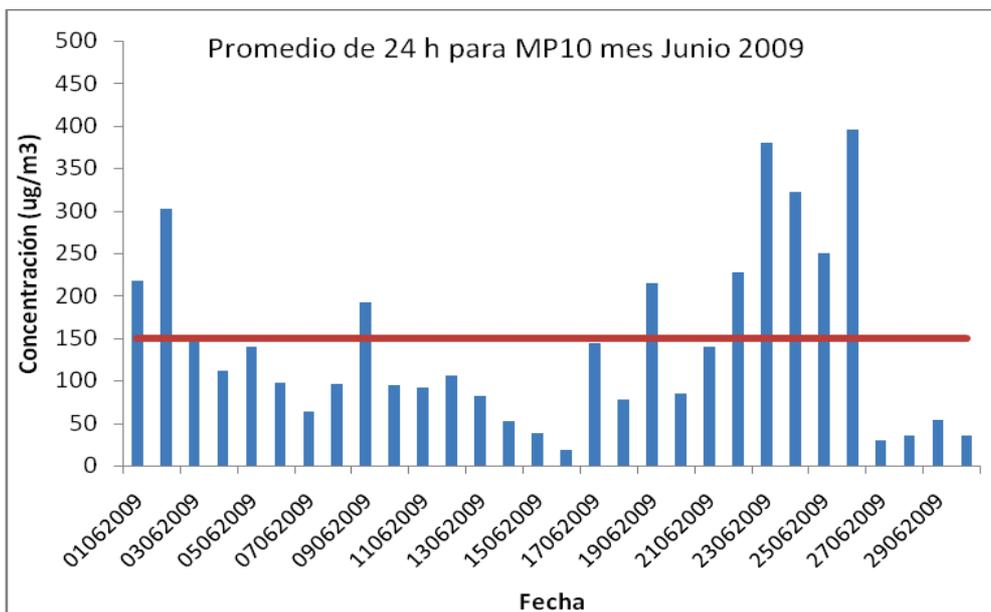


Figura 21. Gráfico de concentraciones Junio 2009.

En función de los antecedentes de monitoreo correspondientes, a lo que va de avanzado el año 2009, se aprecia la existencia de un total de 19 días de superación de norma de MP10, destacando el mes de junio con un total de 10 días de superación.

## 6. Análisis de temperatura diaria v/s concentraciones de MP10 en período episodio 19-22 Junio 2008

A continuación (Figura 22), se muestra la relación entre la temperatura y concentraciones horarias en el mes de junio de 2008 por la estación El Alba de la ciudad de Osorno. Como análisis preliminar, se puede asociar que los períodos con más bajas temperaturas, están relacionados a periodos de más altas concentraciones de MP10 (período 19-22 de Junio de 2008), mientras que registros de concentraciones menores son asociadas a más elevadas temperaturas, lo que se aprecia claramente en el período comprendido desde el 26 de Junio al 1° de Julio de 2008.

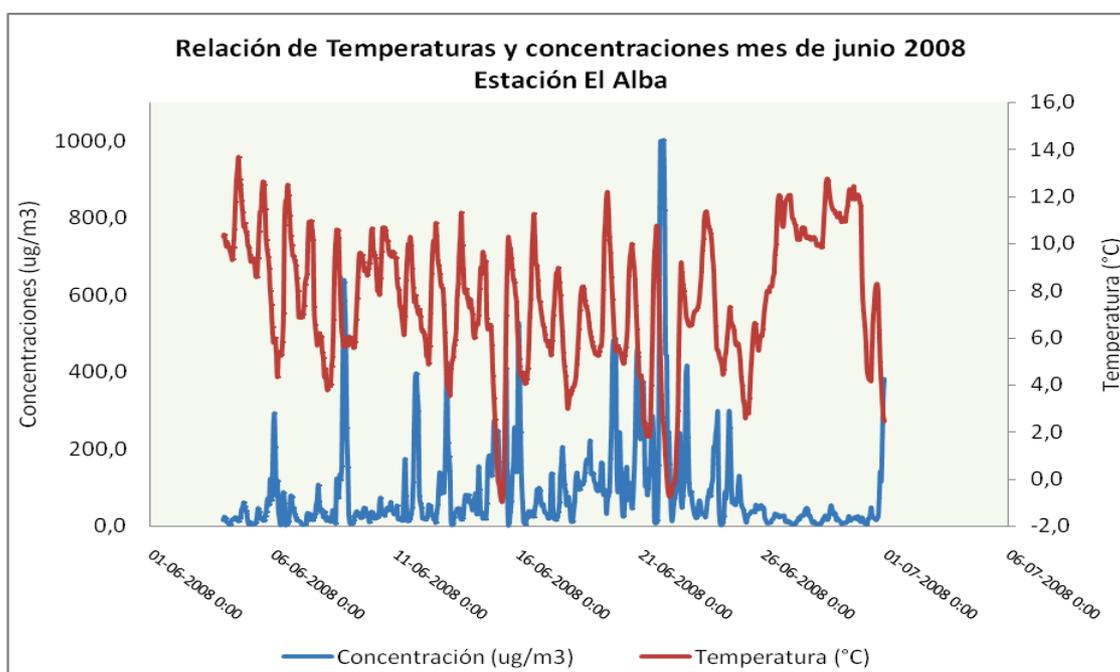
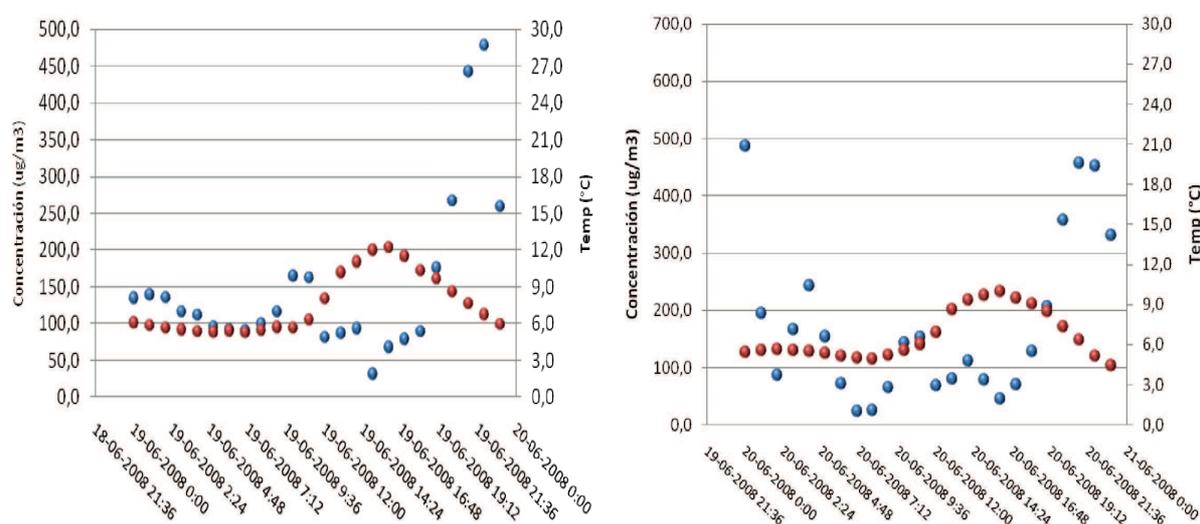


Figura 22. Relación entre temperatura y Concentraciones horarias, Junio 2008.

Con el fin de caracterizar el episodio seleccionado, se realiza a continuación una correlación entre los registros de la temperatura horaria registrada entre los días 19 y 22 de Junio de 2008. Los resultados se muestran en las Figura 23 a) y Figura 23 b).



**Figura 23. a).** Correlación de temperatura v/s Concentraciones día 19 Junio 2008. **b).** día 20 Junio 2008. (Con Rojo Temperaturas; azul: concentraciones MP10 horarias)

De la Figura 23a), es posible apreciar que los más altos peaks de concentración superan los 470 ug/m<sup>3</sup> registrándose a las 22:00 horas. Estas elevadas concentraciones se asocian a bajas temperaturas que se encuentran en los 5,9 °C. Por su parte, las más bajas concentraciones se observan en el período comprendido entre las 12:00 y 18 horas, lo cual se asocia a las temperaturas más elevadas del día que alcanzan hasta los 12°C.

De la Figura 23b), se observa que los más altos peaks de concentración superan los 486 ug/m<sup>3</sup> registrándose a las 24:00 horas. Al igual que el día 19, estas elevadas concentraciones se asocian a bajas temperaturas de 5,4 °C. Por su parte, las más bajas concentraciones se observan en el período comprendido entre las 12:00 y 19 horas, siendo la temperatura más elevada que alcanza los 10°C.

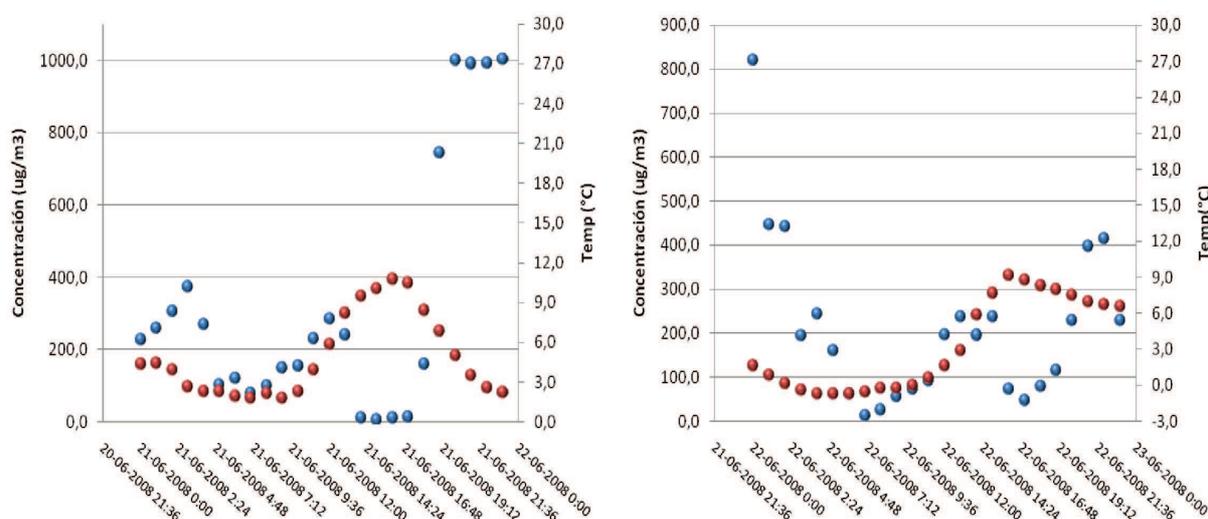


Figura 24 a). Correlación de temperatura v/s Concentraciones día 21 Junio 2008. b). día 22 Junio 2008. (Con Rojo Temperaturas; azul: concentraciones MP10 horarias)

De la Figura 24a), es posible apreciar que los más altos peaks de concentración superan de manera preocupante los 1.000 ug/m3 registrándose a las 20:00 hasta las 23:00 horas del día 21 de Junio. Estas elevadas concentraciones al igual que los días analizados anteriormente, se asocian a muy bajas temperaturas que se encuentran en los 5,0 y 2,2 °C. Por su parte, las más bajas concentraciones se observan en el período comprendido entre las 14:00 y 17 horas, lo cual se asocia a las temperaturas más elevadas del día que alcanzan hasta los 10,5°C.

De la Figura 24b), se observa que el más alto valor de concentración alcanza los 821 ug/m3 registrándose a las 24:00 horas. Esta concentración elevada se asocia a una baja temperatura de 1,7°C. Concentraciones más bajas de 440 ug/m3 se registran a las 1:00 y 2:00 AM, con registros de temperatura de 0,8 y 0,1 °C. Por su parte, las más bajas concentraciones se observan en el período comprendido entre las 16:00 y 18 horas, siendo la temperatura más elevada que alcanza los 9,2°C.

Cabe mencionar que los efectos del material particulado grueso (MP10) y fino (MP2.5) sobre la salud de las personas se producen a los niveles de exposición a los que gran parte de la población urbana y rural está sometida.

Un gran número de estudios epidemiológicos en la última década han reportado una relación entre la exposición a MP (grueso y fino), y el aumento en la morbilidad y mortalidad, principalmente porque la exposición crónica a estas partículas aumenta el riesgo de enfermedades cardiovasculares y respiratorias, así como de cáncer de pulmón. Por otro lado la exposición aguda a altas concentraciones de MP, pueden causar de igual forma significativos daños a la salud.

En los países en desarrollo, la exposición al MP10 y MP2.5 derivados de la combustión de biomasa en fuegos abiertos y cocinas tradicionales en espacios cerrados aumenta el riesgo de infección aguda en las vías respiratorias inferiores y la mortalidad por esta causa en los niños pequeños (menores de 5 años), y a su vez constituye también un importante factor de riesgo de enfermedad pulmonar obstructiva crónica y cáncer de pulmón entre los adultos (mayores de 65 años). Respecto a lo anterior, la mortalidad en ciudades con niveles elevados de contaminación atmosférica supera entre un 15% y un 20% la registrada en ciudades más limpias.

## 7. Modelación meteorológica

### 7.1. Metodología de Empleo del Modelo Meteorológico WRF-ARW

#### 7.1.1. Características del modelo WRF-ARW

Cabe destacar que los modelos Euleianos representan la clase más sofisticada de modelos atmosféricos. En ellos las ecuaciones que describen el movimiento y la transformación de los contaminantes en la atmósfera se resuelven considerando un sistema fijo de coordenadas y la región a modelar se puede dividir en celdas, tanto horizontales como verticales. Se hacen estimaciones en cada celda y en intervalos específicos de tiempo, tomando en cuenta la información sobre campos meteorológicos, fuentes de emisión y transformaciones químicas. Un modelo Euleiano permite conocer la distribución espacial y temporal de las especies en todo el dominio de modelación<sup>1</sup>.

Dentro de los modelos Euleianos de meteorología más desarrollados se encuentran Mesoscale Model 5th Generation (MM5) y Weather Research and Forecasting (WRF). El modelo MM5 por muchos años fue el más utilizado por la comunidad científica internacional por sus múltiples ventajas con respecto a otros modelos. En el año 2000 es liberado a la comunidad científica el primer prototipo del modelo mesoescalar WRF y en el año 2004 es liberada la versión 2 de WRF, con múltiples modificaciones y mejoras, con el propósito de sustituir al modelo MM5. Sin embargo, la sustitución definitiva de MM5 se logra con la liberación de la versión 3 de WRF en junio de 2008, con esta tercera versión, WRF logra posesionarse como el modelo más utilizado y con la mayor comunidad científica internacional como respaldo, la cual le aporta continuamente con mejoras al modelo<sup>1</sup>.

El modelo WRF exige un número menor de modificaciones en los archivos que deben ser preparados para su ejecución. Las principales aplicaciones de WRF 3.0 le permiten obtener:

---

<sup>1</sup> NCAR, ARW Version 3 Modeling System User's Guide - Weather Research & Forecasting 2008.

- Simulaciones ideales
- Investigación de parametrización
- Investigación en asimilación de datos
- Investigación en pronóstico
- Predicción numérica en tiempo real
- Acoplamiento con otros modelos como MEGAN, SMOKE, CMAQ, etc.

Para el desarrollo de la modelación meteorológica se utilizó el software Weather Research & Forecasting Model (WRF-v3-ARW) desarrollado por Mesoscale & Microscale Meteorology Division y el National Center for Atmospheric Research.

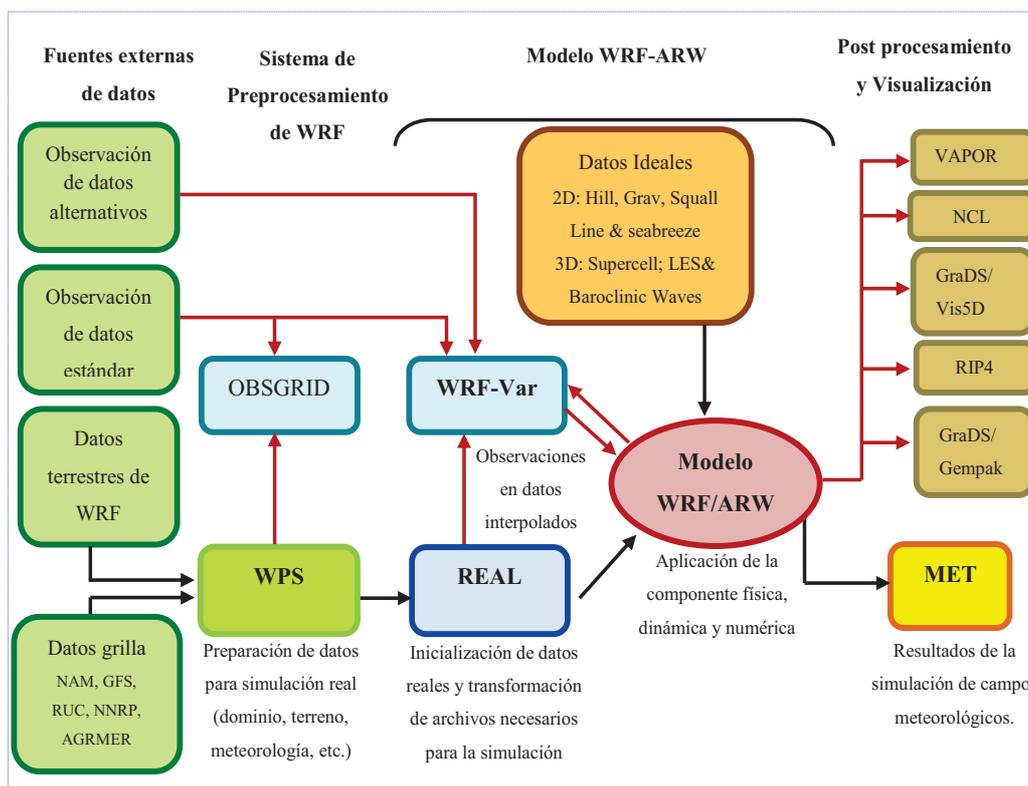


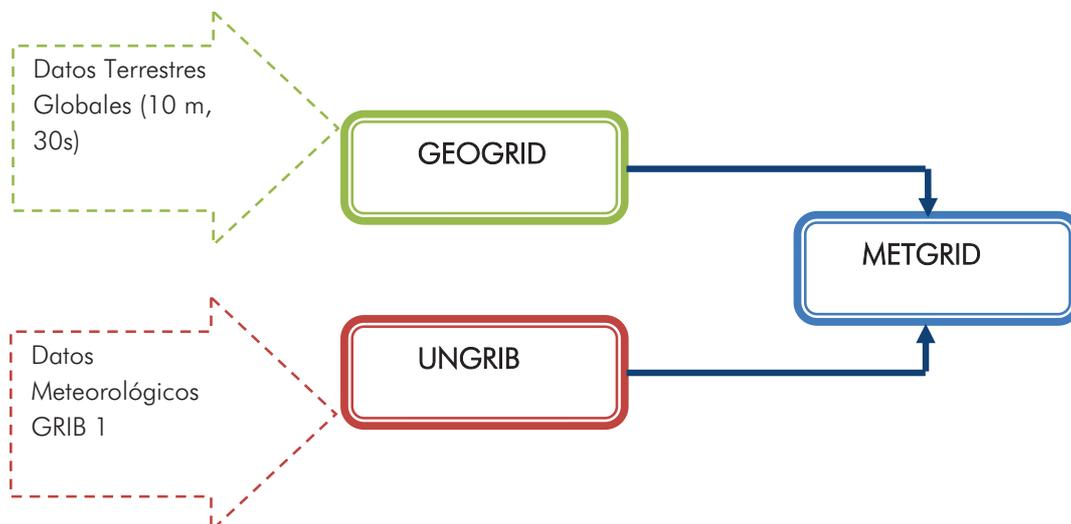
Figura 25. Esquema General de Funcionamiento de WRF-ARW.

El modelo WRF-ARW fue utilizado mediante los módulos WPS, REAL, y WRF para su posterior análisis mediante visualización con VERDI.

- WPS

Este modulo es utilizado para simulación de datos reales sus funciones incluyen:

- 1) Definición de los dominios de modelación.
- 2) Interpolación de datos terrestres
- 3) Formateo e Interpolación Meteorológica desde otros modelos para el dominio de modelación. Incluye formateo de datos meteorológicos GRIB 1/2 disponibles en varios centros alrededor del mundo.



**Figura 26.** Esquema de funcionamiento WPS

En el modulo Geogrid se realizó la interpolación de datos terrestres globales a los dominios de modelación (ver sección 7.2.1) considerando resoluciones espaciales de 10 minutos y 30 segundos, para cada dominio modelado, posteriormente se formateó la data GRIB para el periodo de modelación seleccionado y mediante el modulo Metgrid se integro dicha data a los dominios de modelación.

- WRF/ARW

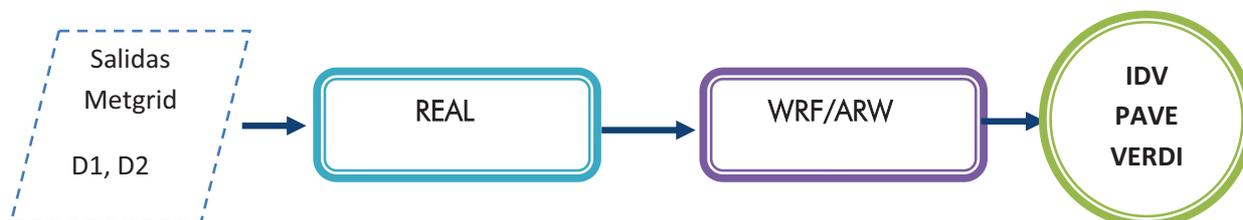


Figura 27. Esquema de funcionamiento WRF

Real toma los datos entregados por metgrid y realiza el cálculo para establecer las condiciones iniciales y de borde para la modelación, permitiendo el anidamiento y posterior cálculo por variable meteorológica en cada punto de grilla, nivel vertical y tiempo, realizado por el modelo WRF-ARW, el cual es ejecutado en un cluster para el procesamiento más rápido de las variables. Posteriormente los dominios son analizados con herramientas de visualización que permiten la entrega de esquemas y gráficos.

### 7.1.2. Selección de los periodos de Modelación

El criterio para establecer los periodos de modelación se basó en seleccionar periodos con configuraciones menos dinámicas, de menor complejidad y más frecuencia durante los periodos de otoño e invierno. Para fines de este estudio se establece modelar un periodo en el mes de Junio.

El número de días del periodo depende de la duración de cada episodio, pero se establece la necesidad de iniciar cada lapso de modelación con al menos 3 días previos para la estabilización (marcados con negrita en la Tabla 18), del sistema de modelación y minimizar las condiciones de borde.

De acuerdo a metodología propuesta, la modelación en WRF se realizó con 3 días de anticipación en el dominio, para evitar efectos de las condiciones iniciales; del mismo modo, se usaron dominios anidados de 9x9 km y 3x3 km para reducir el efecto de las condiciones de borde. El estudio se concentró en el dominio más pequeño, el cual considera toda la ciudad de Osorno.

Con base en el análisis de calidad del aire y considerando los períodos de superación de la norma de 24 horas, en los meses de Mayo a Septiembre de 2008, se determinó que el período a modelar corresponde a los días 11 a 23 de Junio de 2008. Se han escogido estos días con el fin de poder modelar las condiciones meteorológicas en el período de episodios consecutivos de MP10 y tomando 3 días previos sin episodio.

Los períodos definidos para el año 2008 se muestran a continuación en la Tabla 18.

**Tabla 18.** Resumen de concentraciones e identificación del períodos de modelación

Día	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
1	29,6	186,4	*	486,9	70,8	19,4
2	49,4	193,2	*	246,2	50,2	51,8
3	44,3	172,8	*	56,7	42,0	160,1
4	34,9	106,4	22,4	13,7	36,4	48,5
5	62,0	107,6	29,0	130,7	30,4	140,6
6	19,3	64,0	70,0	58,2	40,8	160,6
7	27,9	*	26,3	16,4	181,5	117,8
8	64,1	*	111,3	69,0	63,2	115,3
9	20,9	200,4	58,4	77,6	24,0	32,0
10	40,5	215,4	36,6	21,0	19,4	67,3
11	101,0	54,8	105,6	17,9	28,2	85,8
12	127,1	49,6	48,3	25,9	22,8	*
13	53,1	24,9	87,7	15,8	50,3	*
14	28,9	25,0	76,1	16,2	22,2	*
15	37,7	29,0	157,9	15,7	20,3	*
16	48,6	22,9	99,5	28,4	30,7	*
17	19,7	13,4	68,0	36,4	35,0	*
18	32,6	20,5	102,1	121,9	64,0	*
19	58,1	56,7	150,0	72,1	60,9	*
20	46,4	40,9	175,1	181,2	74,8	*
21	45,6	147,8	326,1	*	73,8	*
22	57,8	76,2	211,7	23,2	119,3	*
23	29,6	77,0	58,4	42,9	77,5	*
24	*	134,1	119,4	39,8	18,3	*
25	*	76,7	47,2	21,7	17,9	*
26	35,0	*	20,8	24,9	26,3	*
27	31,3	70,3	19,6	17,3	21,9	*
28	76,6	247,9	19,5	96,1	18,5	*
29	62,2	278,1	14,8	124,5	16,7	*
30	101,8	*	66,6	33,3	37,4	*
31		*		167,7	*	

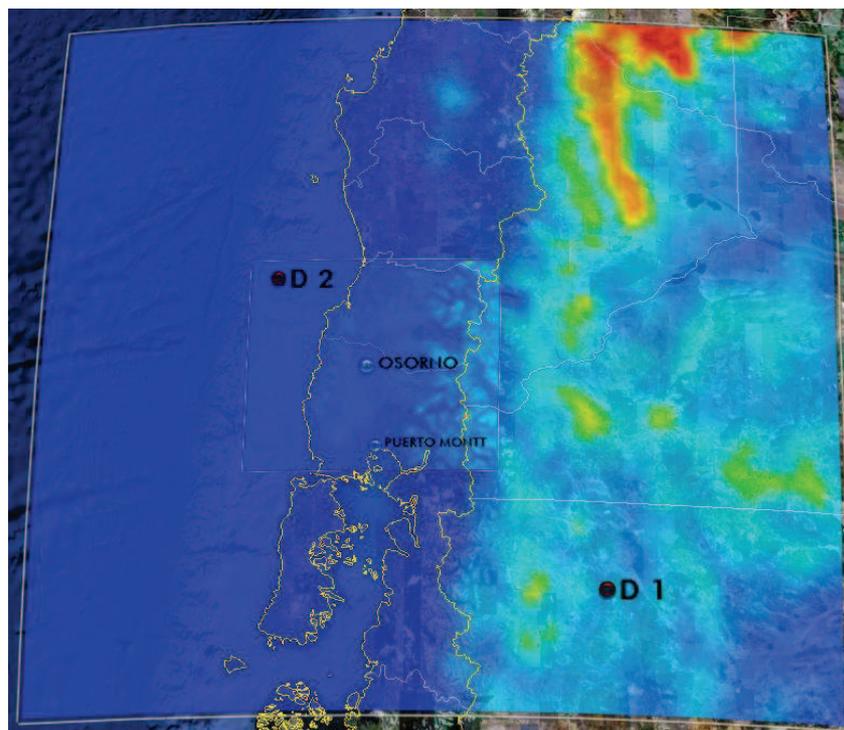
Fuente: Elaboración propia en base a los datos de la estación de monitoreo

\*Dato no válido

Así, las condiciones iniciales de modelación fueron fijadas para el día 11 de junio del 2008 a las 0:00 hrs (GMT), permitiendo de este modo 3 días para la estabilización del modelo antes del periodo de interés. El día de término de la modelación consideró la fecha del 23 de junio del 2008 a las 0:00 hrs (GMT) únicamente los días con superación.

### 7.1.3. Selección del Dominio de modelación.

Los dominios seleccionados para la modelación meteorológica fueron los que se muestra en la Figura 28 . Se consideró un dominio Madre (D1) que abarcó desde la región del Biobío a la región de Los Lagos de norte a sur, considerando parte del océano Pacífico y Argentina de Oeste a Este. El área circunscrita dentro del dominio anidado (D2) consideró la región de Los Ríos y la región de Los Lagos de norte a sur y el litoral de las regiones antes mencionadas y la cordillera de Los Andes de Oeste a Este.



**Figura 28.** Dominios de Modelación Madre y Anidado con las principales alturas demarcadas en color.

La Figura 29 a muestra la representación gráfica en tres dimensiones del dominio D1, se puede notar que el modulo Geogrid de WRF a través de su data global, construye un área de modelación con las principales características de la zona en estudio, tomando en consideración relieves, costas, usos de suelos y mascararas de agua, entre otras variables de interés. La Figura 29 b muestra la representación del área modelada con el D1, con su correspondiente demarcación mediante engrillado.

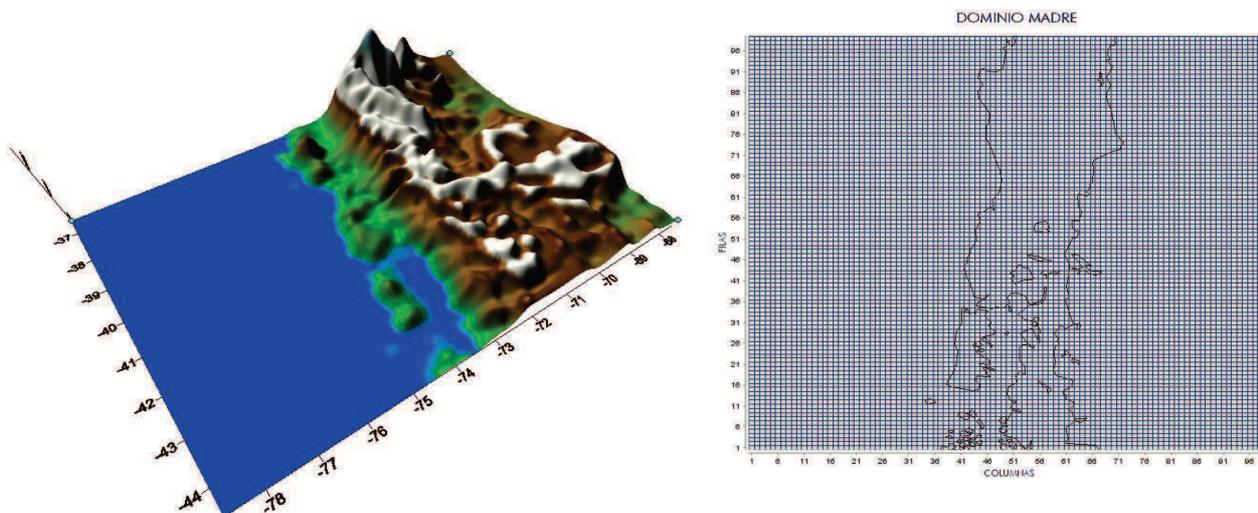


Figura 29 a). Representación en tres dimensiones del D1. b). Grilla de modelación del D1

Tabla 19. Características del D1

Número de Columnas	100
Número de Filas	100
Niveles Verticales	27
Tamaño de la celda (km)	9
Coordenadas Centrales (Lat-Lon)	-40,57 , -73,14

Fuente: Elaboración Propia.

La dimensión del D1 considera las interacciones de las variables meteorológicas en la escala sinóptica, para su derivación a la mesoescala del dominio anidado, con objetivo de obtener un mejor ajuste del modelo.

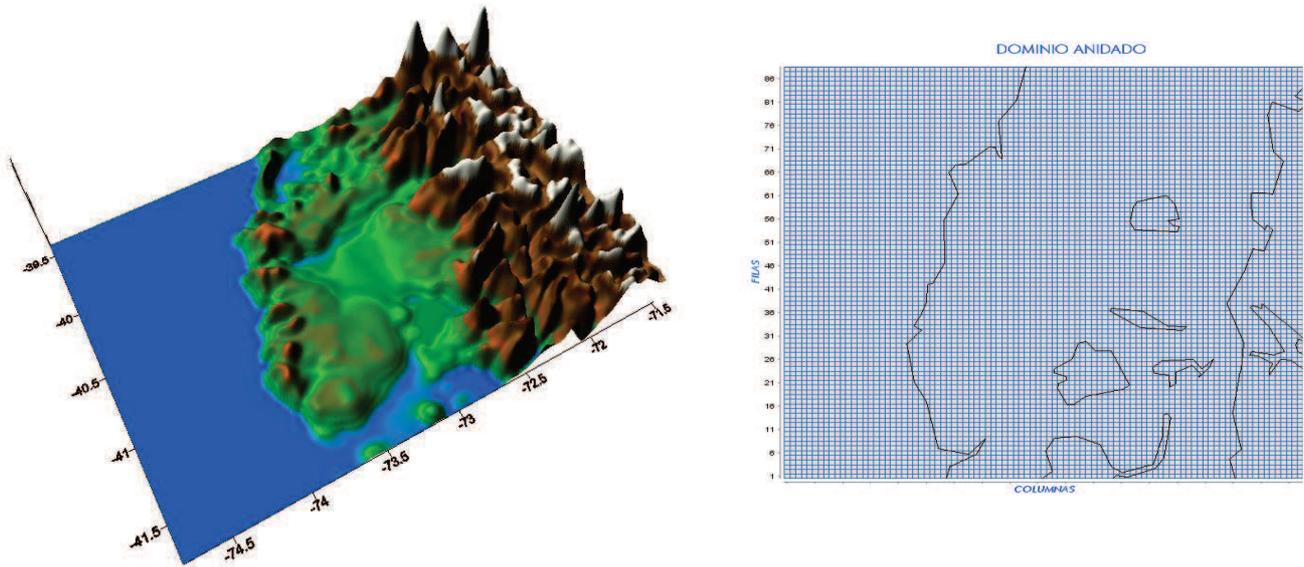


Figura 30 a). Representación en tres dimensiones del D2. b) Grilla de Modelación del D2.

El D2 fue diseñado para evitar las condiciones de borde comenzando desde la columna 35 y fila 36 respecto del D1, siendo centrado en la ciudad de Osorno cuyas coordenadas se muestran en la Tabla 20. Características del D2.

Tabla 20. Características del D2

Número de Columnas	94
Número de Filas	88
Niveles Verticales	27
Tamaño de la celda (km)	3
Coordenadas Centrales (Lat-Lon)	-40,47 , -73,03

Fuente: Elaboración Propia.

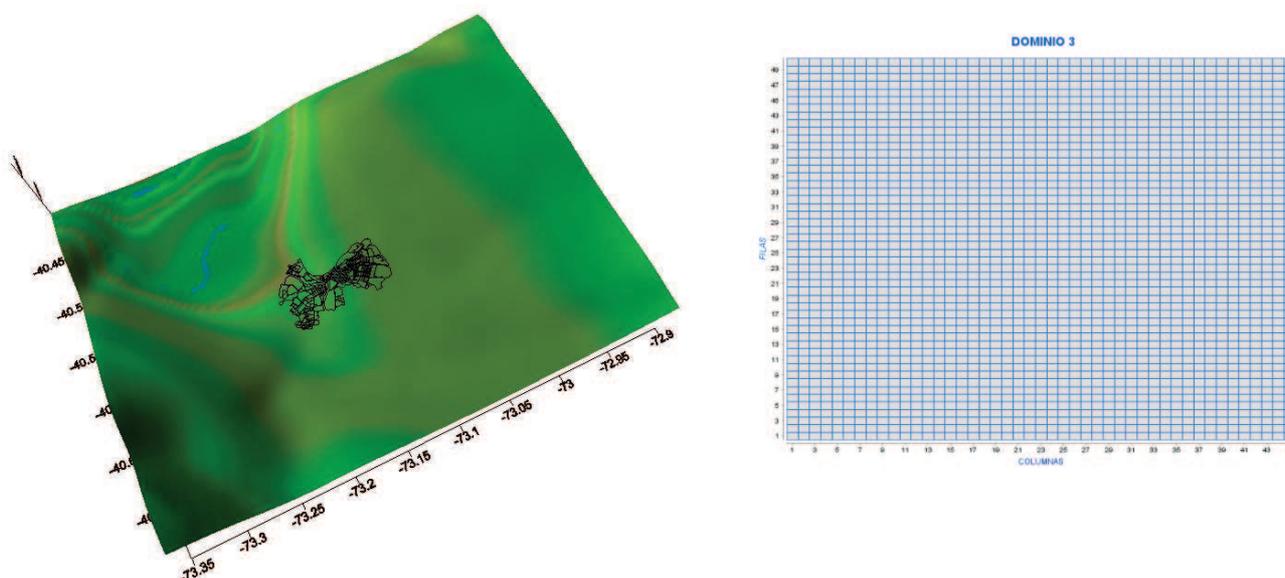


Figura 31. Representación en tres dimensiones del D3. b) Grilla de Modelación del D3.

El dominio 3 (D3) fue diseñado, con la finalidad de poder evitar las condiciones de borde, y así poder definir bajo menor incertidumbre, la zona geográfica que reúne las mayores condiciones de acumulación por material Particulado MP10, en función de factores meteorológicos.

Tabla 21. Características del D3

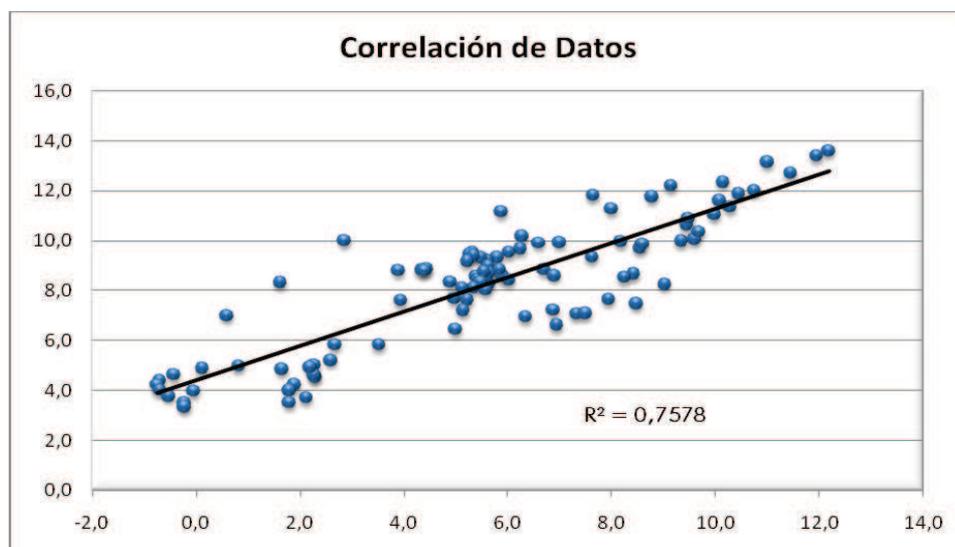
Número de Columnas	45
Número de Filas	50
Niveles Verticales	27
Tamaño de la celda (km)	1
Coordenadas Centrales (Lat-Lon)	-40,50 , -73,14

(\*) El propósito de utilizar dominios anidados (un dominio dentro de otro) es permitir utilizar las condiciones de frontera del dominio mayor en el dominio menor para así eliminar las incertidumbres asociadas a la modelación. Para el caso de Osorno, el dominio de estudio (D3) utiliza las condiciones de su dominio madre (D2).

#### 7.1.4. Validación del Modelo Meteorológico

Como se señaló en el punto 7.1.2, el episodio modelado consideró el periodo comprendido desde el 11 al 23 de Junio del 2008, puesto que dicho rango de tiempo fue el que presentó mayor cantidad de superaciones consecutivas, convirtiéndose en un periodo de interés para la caracterización de las variables meteorológicas asociadas a eventos de altas concentraciones de material particulado, sirviendo de base para el entendimiento de superaciones precedentes y subsecuentes a la elegida.

Se compararon los resultados obtenidos en todo el periodo, eliminando los primeros 3 días de la validación. Se observó en los días subsecuentes del 14 al 18 de junio dificultades en el ajuste, presumiblemente debido a configuraciones complejas de las variables meteorológicas (precipitaciones aisladas), obteniéndose para el periodo antes señalado un ajuste del 57%, sin embargo se optó por eliminar el escenario con el fin de favorecer la robustez de los análisis de calidad del aire, por consiguiente se centró el estudio entre los días 19 al 23 de junio, donde el comportamiento de las variables meteorológicas, en particular la temperatura mostraron un buen ajuste.



**Figura 32.** Correlación entre la temperatura observada y la modelada.

La correlación entre la temperatura modelada y observada presentó un coeficiente de correlación de 0,76 (Figura 32) el cual se considera como una buena aproximación a la realidad.

## 7.2. Resultados de la Modelación meteorológica

### 7.2.1. Descripción de los Episodios Modelados

A continuación, en las figuras 33, 34 y 35 se muestran los perfiles diarios de concentración de MP10 horario en el período seleccionado para la modelación, comprendido entre los días 19, 20, 21 y 22 de Junio 2008. De las figuras es posible identificar que las concentraciones horarias comienzan a superar la norma a partir de las 18:00 horas, alcanzando valores máximos (en rojo) que se encuentran en el rango de los 500  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en los episodios 1 y 2, y superando los 1000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en el episodio 3 registrado el día 21 de Junio entre las 20:00 y las 23:00 horas.

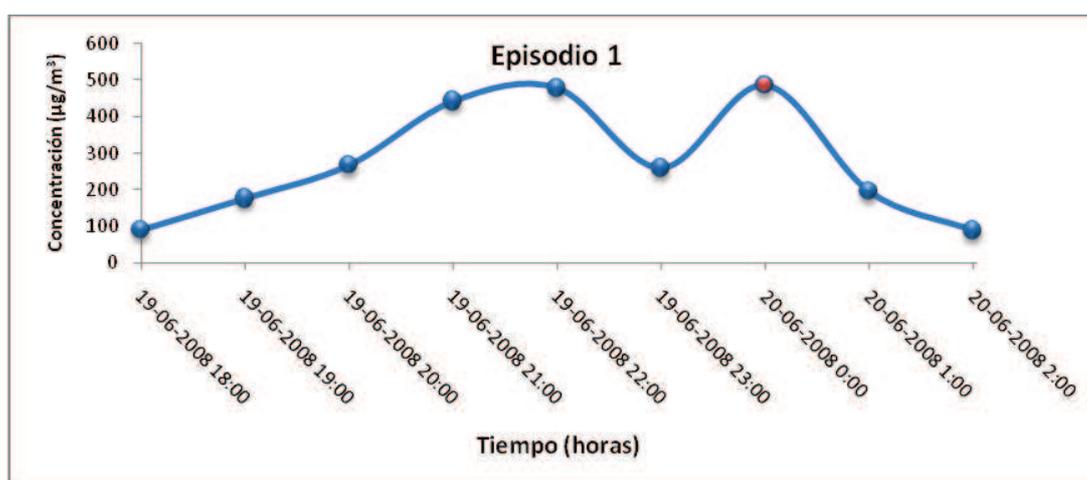


Figura 33. Perfil horario de concentraciones MP10 episodio 1.

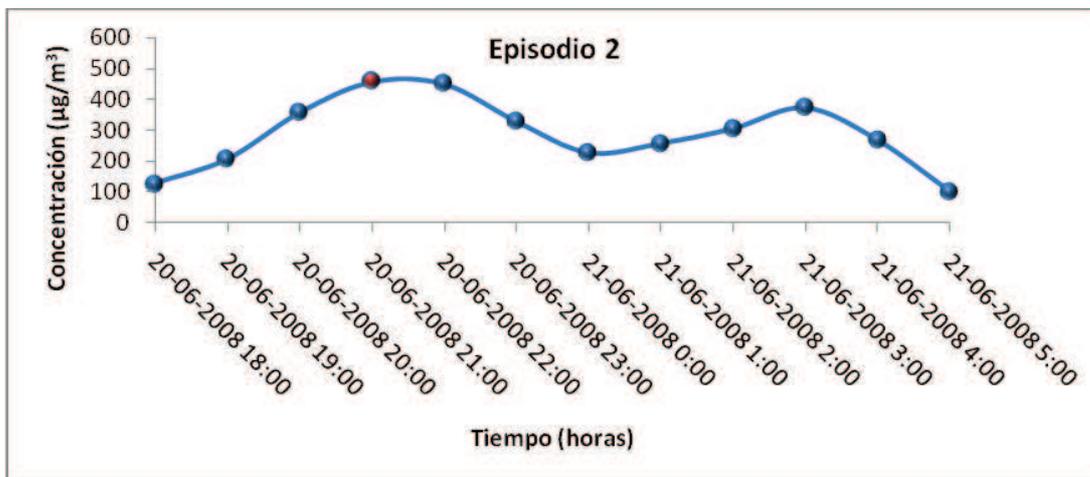


Figura 34. Perfil horario de concentraciones MP10 episodio 2.

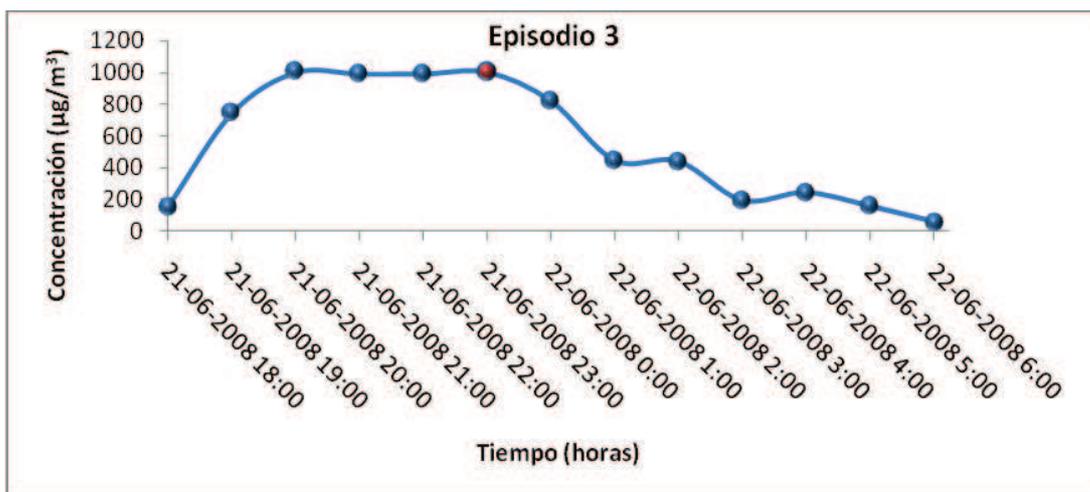


Figura 35. Perfil horario de concentraciones MP10 episodio 3.

### 7.2.2. Temperaturas

En las siguientes Figuras se muestran las variaciones de temperatura en los episodios seleccionados para la modelación. La ciudad de Osorno se puede observar de color blanco en el centro de la figura. Para cada episodio se muestran las temperaturas en el comienzo del episodio (figura de la izquierda) y luego en la figura de la derecha se muestra el mínimo de temperaturas registradas en la modelación.

#### Episodio 1

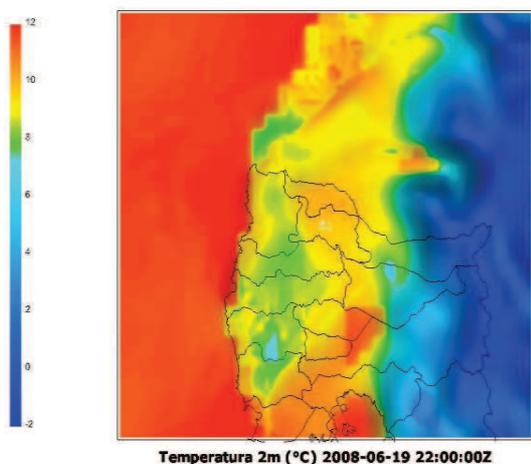


Figura 36. Temperatura, 2008-06-19 18:00 (GMT-4)

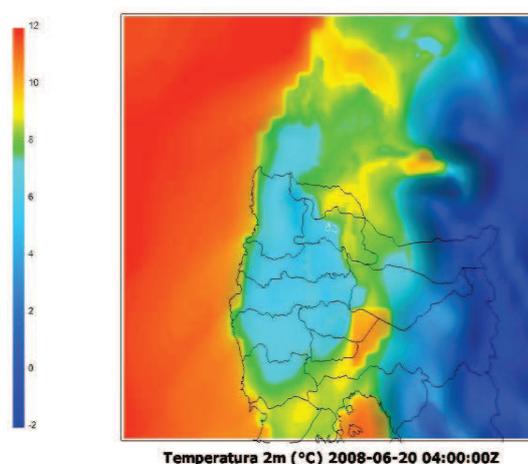


Figura 37. Temperatura, 2008-06-20 00:00 (GMT-4)

#### Episodio 2

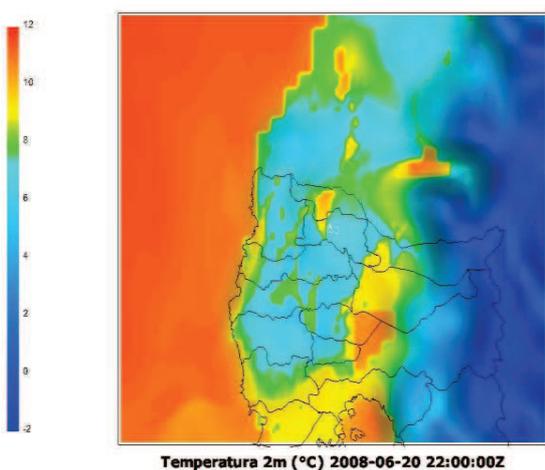


Figura 38. Temperatura, 2008-06-20 18:00 (GTM-4)

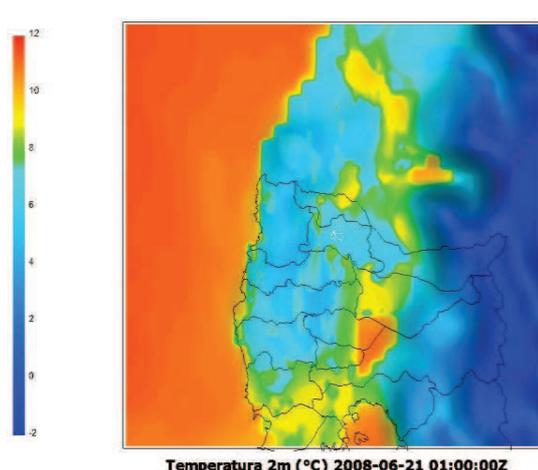


Figura 39. Temperatura, 2008-06-20 21:00 (GMT-4)

Episodio 3

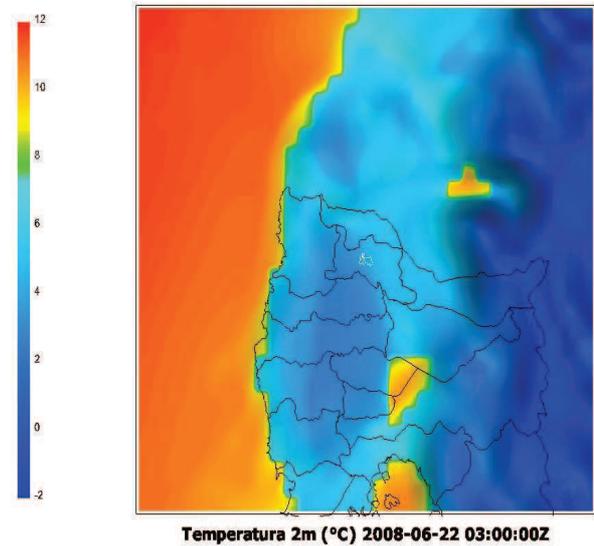
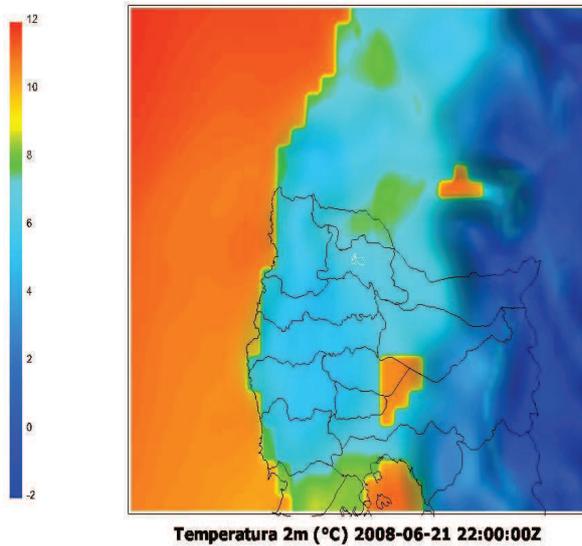


Figura 40. Temperatura, 2008-06-21 18:00 (GTM-4)

Figura 41. Temperatura, 2008-06-21 23:00 (GMT-4)

7.2.3. Dirección y Velocidad del Viento

En las Figuras siguientes se muestran las variaciones de las direcciones y velocidades del viento en los episodios seleccionados para la modelación. Para cada episodio se muestran los perfiles de velocidad en el comienzo del episodio, en la figura de la izquierda, y luego en la figura de la derecha se muestra el mínimo de velocidades del viento registradas en la modelación. Es posible notar que en condiciones de baja circulación de aire, son asociados a altos episodios de contaminación. Considerando el análisis de velocidad del viento en los episodios de máxima concentración (Figura 43, 45 y 47) se aprecia claramente las bajas velocidades del viento en las zonas circundantes a Osorno, estas bajas velocidades se asocian a malas condiciones de ventilación que caracterizan a los periodos de episodio.

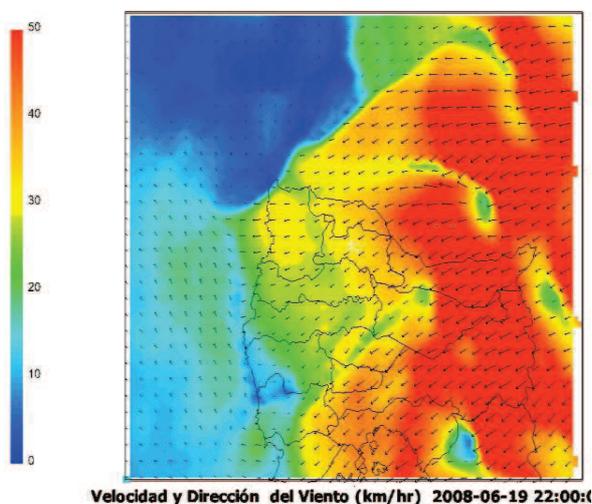


Figura 42. Vel. del Viento, 2008-06-19 18:00 (GMT-4)

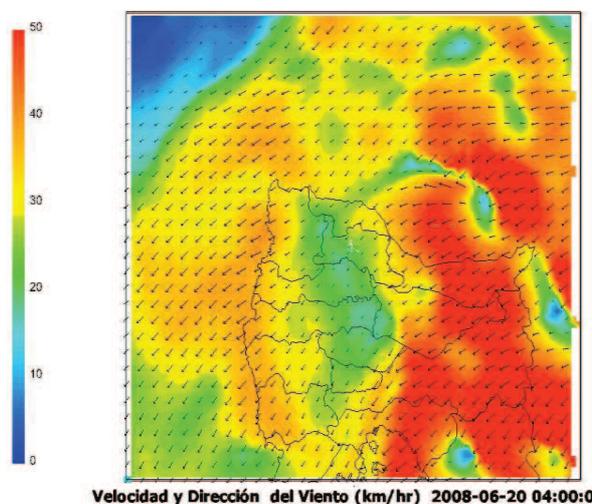


Figura 43. Vel. del viento, 2008-06-20 00:00 (GMT-4)

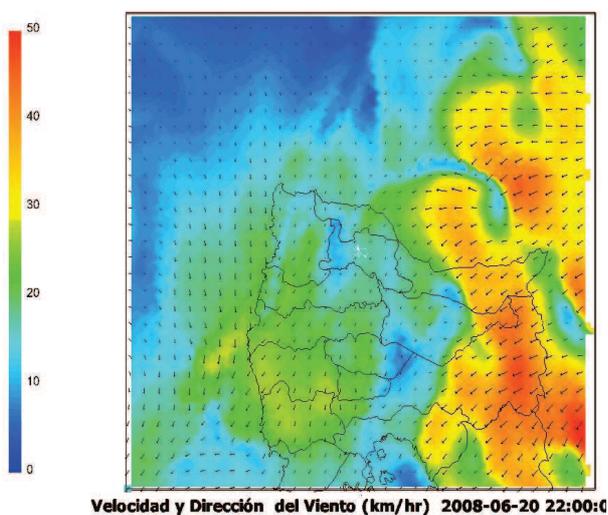


Figura 44. Vel. del Viento, 2008-06-20 18:00 (GTM-4)

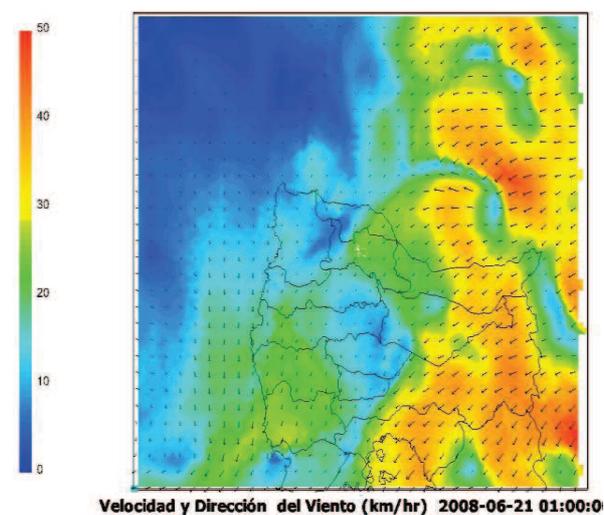


Figura 45. Vel. del viento, , 2008-06-20 21:00 (GMT-4)

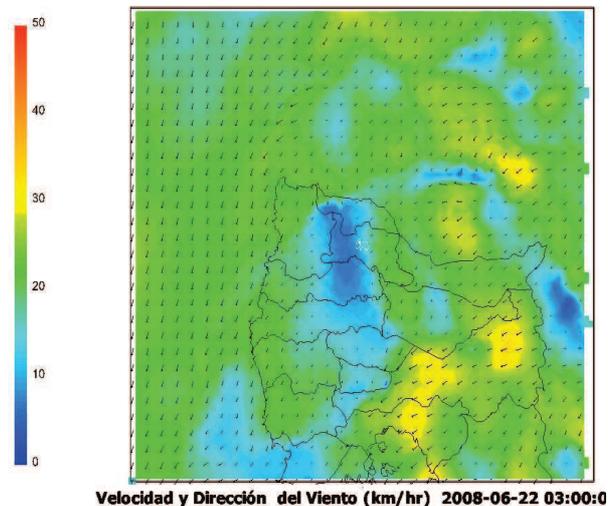
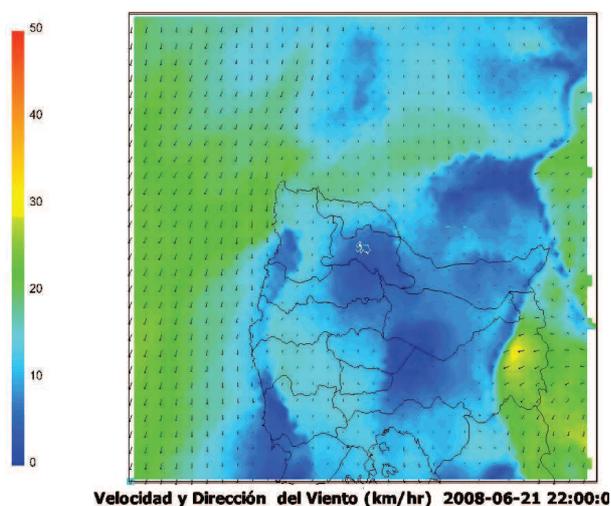


Figura 46. Vel. del Viento, 2008-06-21 18:00 (GTM-4)

Figura 47. Vel. del viento, 2008-06-21 23:00 (GMT-4)

A continuación, se presenta el comportamiento del viento, en cuanto a dirección y velocidad, dentro de la zona urbana de la ciudad de Osorno, esto. De las figuras 48 a 50 se puede observar una marcada dirección del viento de cordillera a mar, presentando solo una diferencia en el episodio 2 (figura 49F) donde la dirección cambia su trayectoria hacia el sur de Osorno. El comportamiento general de las magnitudes de velocidad tiende a encontrarse bajo los 20 km/hr en todos los días de modelación, favoreciendo condiciones de baja ventilación (registro horario es GMT-4).

Episodio 1

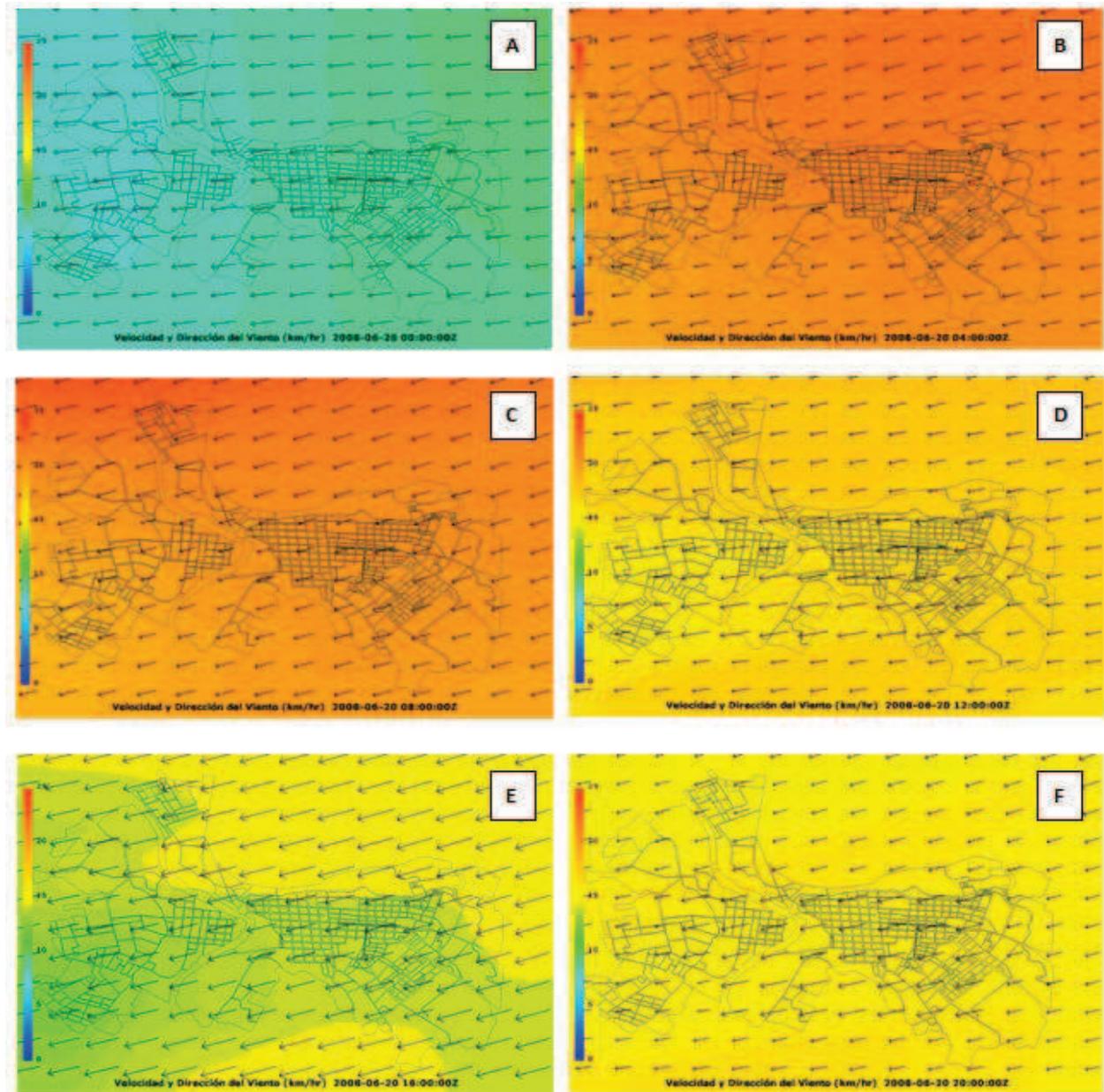


Figura 48. Dirección y velocidad (Km/hr) del viento, en el radio urbano de la ciudad de Osorno para el episodio 1.

Episodio 2

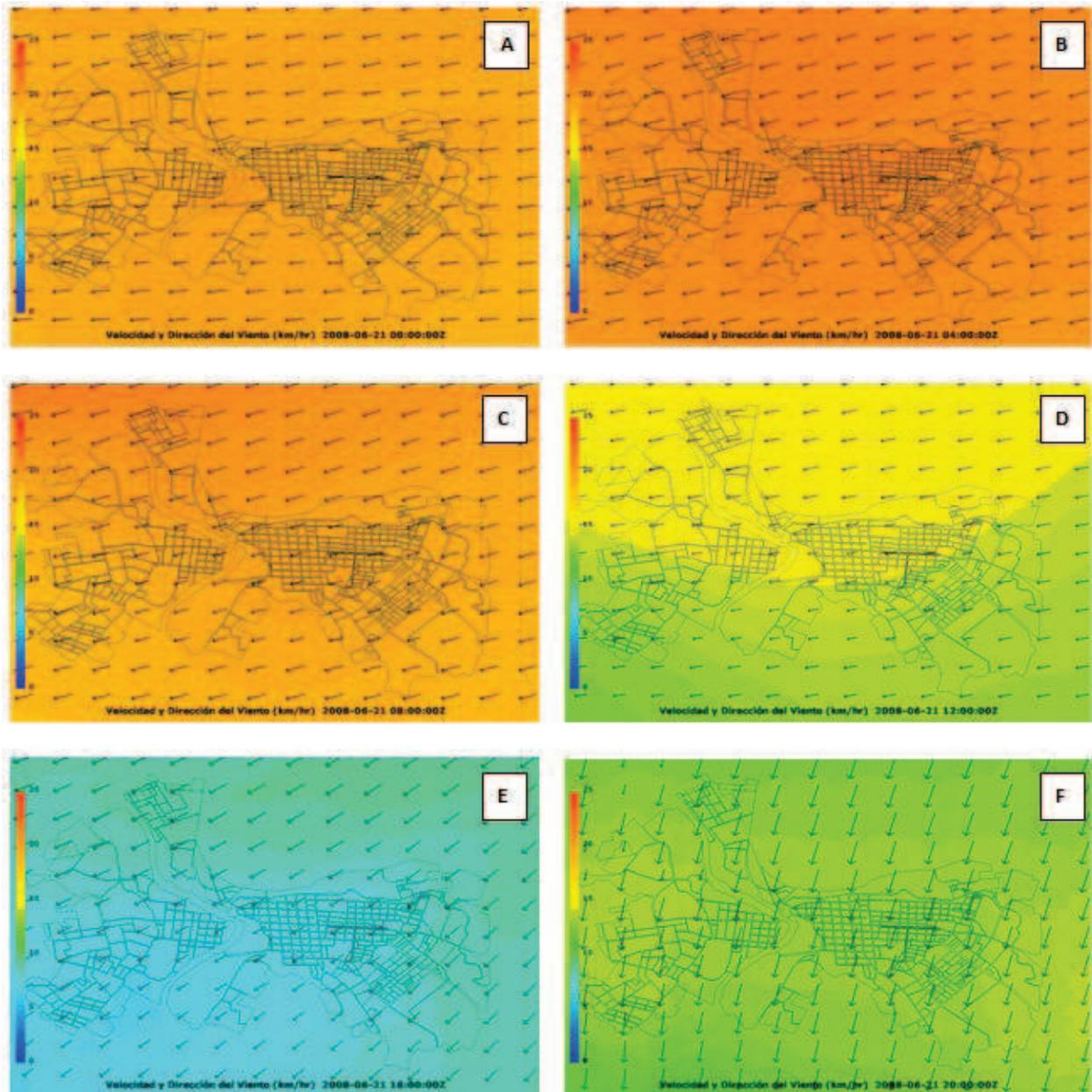


Figura 49. Dirección y velocidad (Km/hr) del viento, en el radio urbano de la ciudad de Osorno para el episodio 2.

Episodio 3

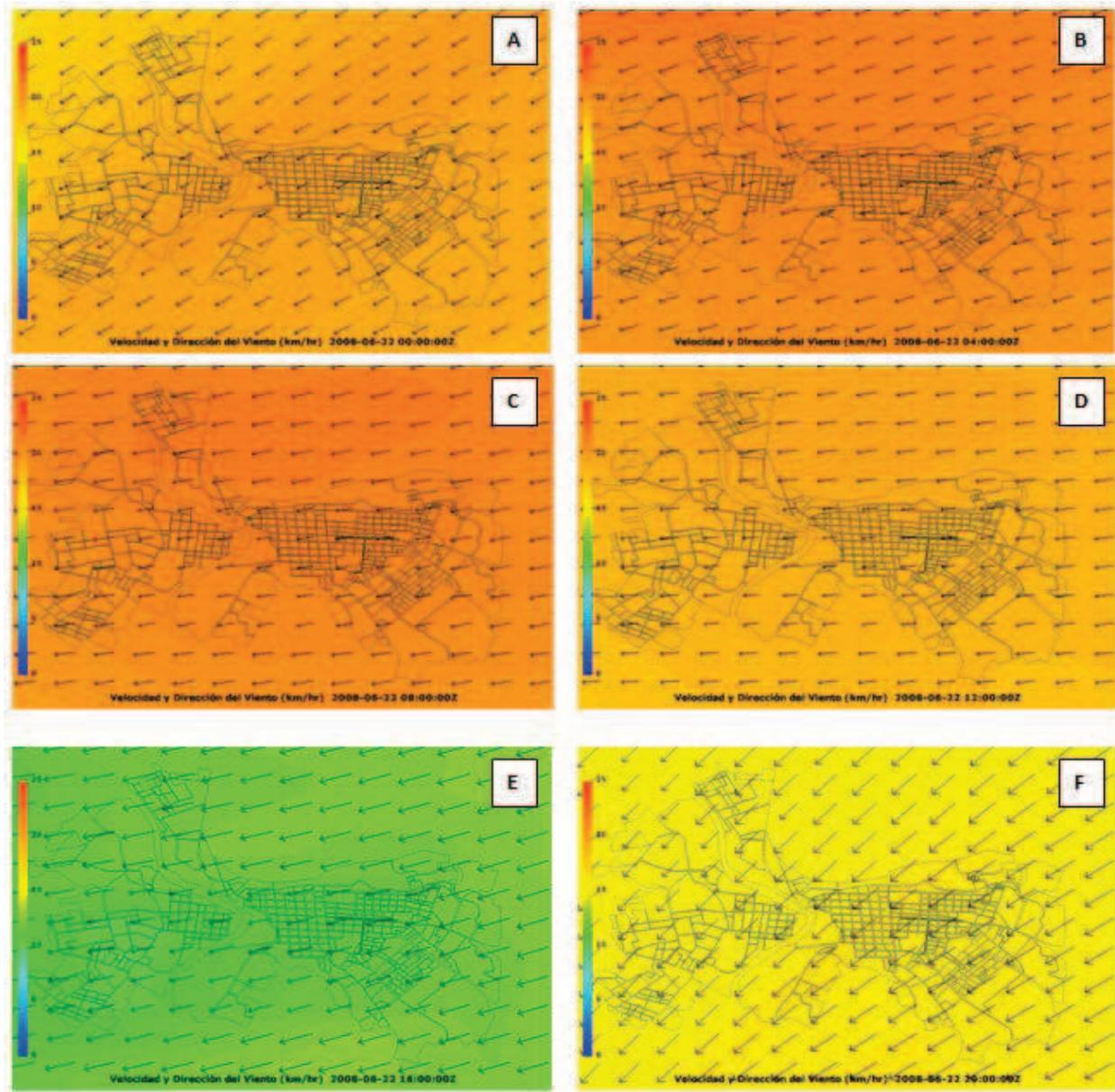


Figura 50. Dirección y velocidad (Km/hr) del viento, en el radio urbano de la ciudad de Osorno para el episodio 3.

#### 7.2.4. Relación entre Velocidad del Viento y la Temperatura

En la Figura 51 se muestra las isolíneas de velocidad del viento sobre el campo de temperatura en la hora de ocurrencia de la máxima concentración de material particulado ( $641.4 \text{ ug/m}^3$ ), episodio numero 3, a las 23:00 hrs en donde la zona de colores fríos en la imagen se puede asociar a una condición de estabilidad atmosférica caracterizada por bajas temperaturas y bajo flujo de las masas de aire. La ciudad de Osorno se encuentra circunscrita dentro del campo de alta estabilidad, pudiendo asociar esto a las altas concentraciones de material particulado registrado en la estación El Alba.

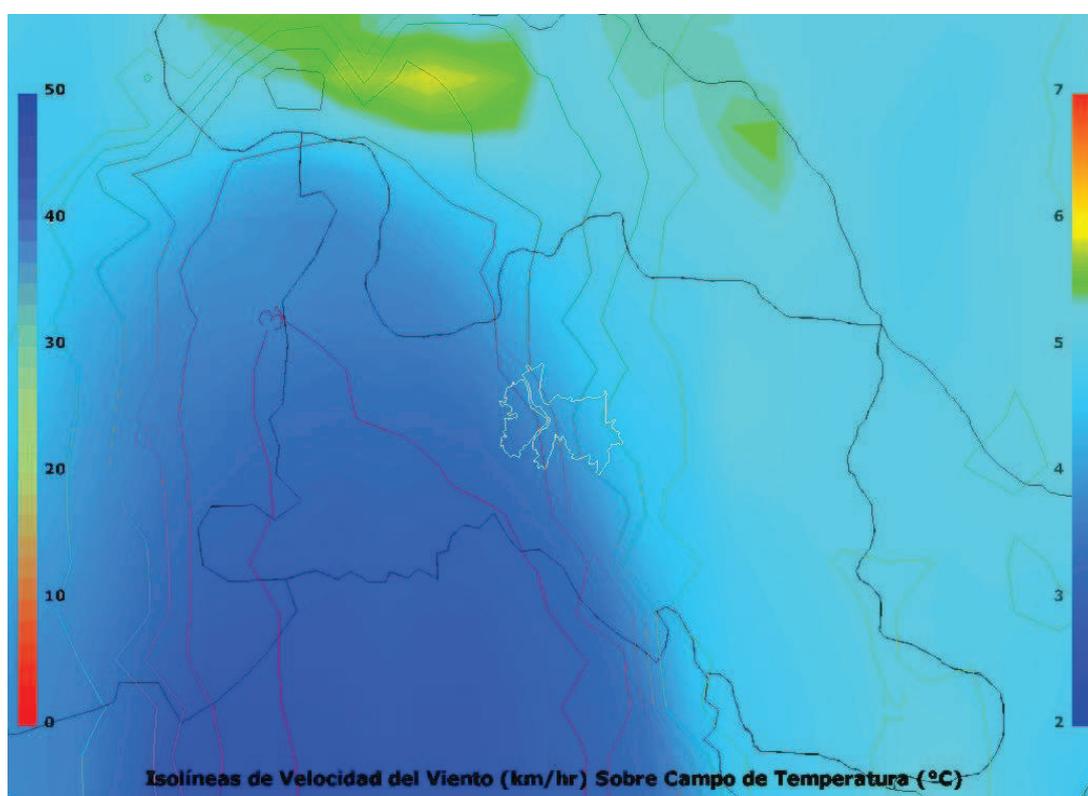


Figura 51. Grafico de velocidad del viendo y temperaturas.

### 7.2.5. Caracterización de los campos de vientos sobre el valle 3D.

La Figura 52 muestra el comportamiento de los vientos en el dominio modelado (D2), es posible apreciar que en el periodo de las 18:00 horas los movimientos se generan de mar a cordillera acentuándose en dirección noreste de la ciudad de Osorno, por el contrario, bajas velocidades de vientos se registran en dirección sur y sureste.

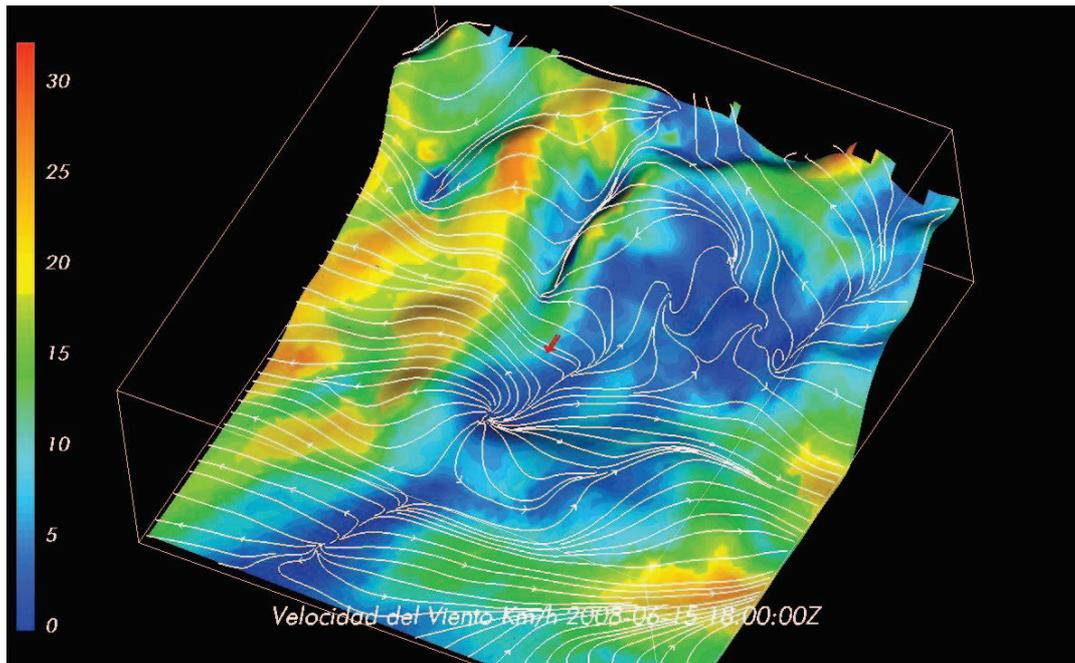


Figura 52. Campos de vientos a las 14:00 horas (GMT -4)

En el periodo nocturno mostrado en la Figura 53, se observa una tendencia más marcada hacia la dirección norte, alcanzando velocidades hasta los 15 Km/hr.

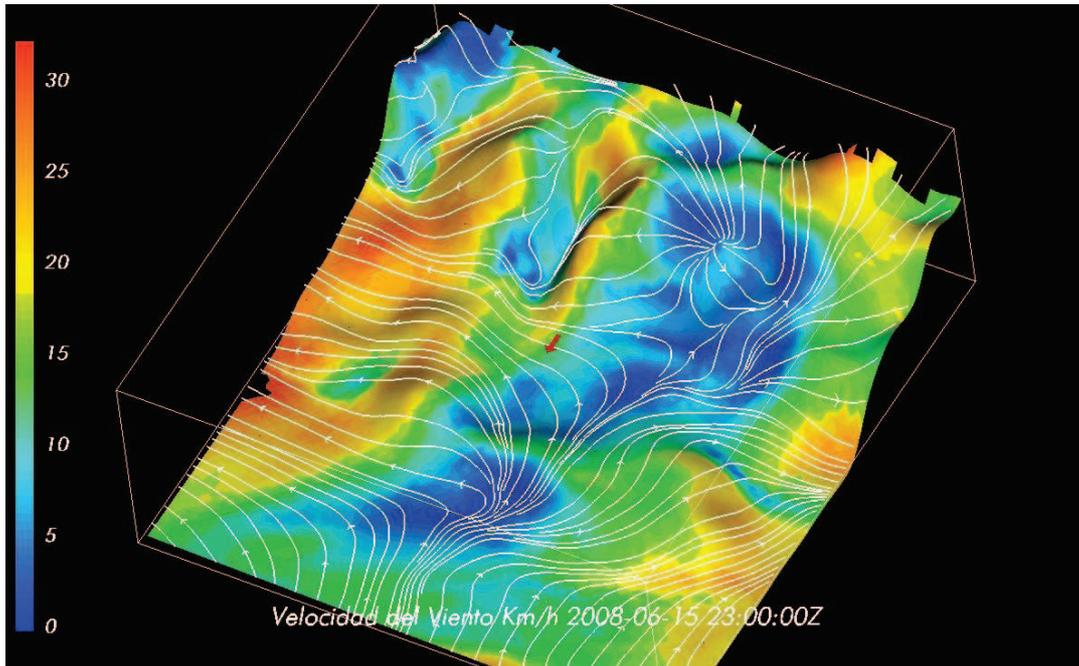


Figura 53. Campos de vientos a las 19:00 horas (GMT -4)

### 7.3. Aplicación de Modelo de Trayectorias de vientos

#### 7.3.1. Características del modelo de trayectorias HYSPLIT.

Los modelos de dispersión atmosférica son comúnmente diseñados, evaluados y probados utilizando datos de la concentración en aire de varios contaminantes. Para aplicaciones de dispersión de rangos cortos de tiempo, las concentraciones atmosféricas de los contaminantes pueden ser muy grandes y fácilmente atribuírsele a una fuente específica. Así mismo, a mayor distancia transportada, las concentraciones de varios contaminantes de diferentes fuentes se pueden llegar a mezclar y hacer más difícil atribuir una fuente acertada a un valor específico medido de al contaminante<sup>2</sup>.

El sistema HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model) fue desarrollado la Administración Nacional de Océanos y Atmósfera (NOAA) y mediante esta herramienta se puede observar el transporte y dispersión de los contaminantes que se originan en una amplia variedad de fuentes de emisión. Para crearlo se utilizaron marcos de referencia, tanto modelos Lagrangianos como Eulelianos, calculando a partir de los movimientos de difusión y advección del aire como de la concentración en el sistema, por esto se le da el nombre de híbrido<sup>2</sup>.

El modelo HYSPLIT es capaz de mostrar el transporte de masas de contaminantes de gases primarios y partículas a los límites del modelo CMAQ (Congestion Mitigation Air Quality) y de definir la situación espacial y temporal del flujo de las masas de aire a nivel mundial.

---

<sup>2</sup> Vivanco Moreno, Sonia Fabiola, Ramírez Lara Evangelina, Facultad de Ciencias Químicas, UANL., 2007, “Aplicación del modelo hysplit (hybrid single particle lagrangian integrated trajectories) para evaluar las trayectorias del aire y su impacto en la dispersión de contaminantes atmosféricos”.

### 7.3.2. Análisis trayectorias de masas de aire

A continuación se presenta un análisis de trayectorias de masas de aire con dirección a la ciudad de Osorno durante periodos en los que se observaron superaciones de norma diaria de MP10 en esta ciudad (ver Tabla 22). Este análisis se realiza para diferentes horas del día y permite identificar las zonas donde se ubican las fuentes que probablemente más contribuyeron en los niveles de concentración de MP10 de esta ciudad.

**Tabla 22.** Superaciones norma diaria de PM10 para el año 2008.

MES	Fecha	MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]
MAYO	01-05-2008	186,4
	02-05-2008	193,2
	03-05-2008	172,8
	09-05-2008	200,4
	10-05-2008	215,4
	<b>28-05-2008</b>	<b>247,9</b>
	29-05-2008	278,1
JUNIO	15-06-2008	157,9
	19-06-2008	150,0
	20-06-2008	175,1
	<b>21-06-2008</b>	<b>326,1</b>
	22-06-2008	211,7
JULIO	<b>01-07-2008</b>	<b>486,9</b>
	02-07-2008	246,2
	20-07-2008	181,2
	31-07-2008	167,7
AGOSTO	<b>07-08-2008</b>	<b>181,5</b>
SEPTIEMBRE	03-09-2008	160,1
	<b>06-09-2008</b>	<b>160,6</b>

Para el análisis de Trayectorias se seleccionaron tres días con niveles más altos de concentración de MP10, dentro de los meses de Mayo, Junio, Julio, Agosto y Septiembre del 2008. Luego a partir del perfil temporal (Figura 54) se seleccionaron los intervalos de tiempo para la posterior generación de trayectorias de viento.

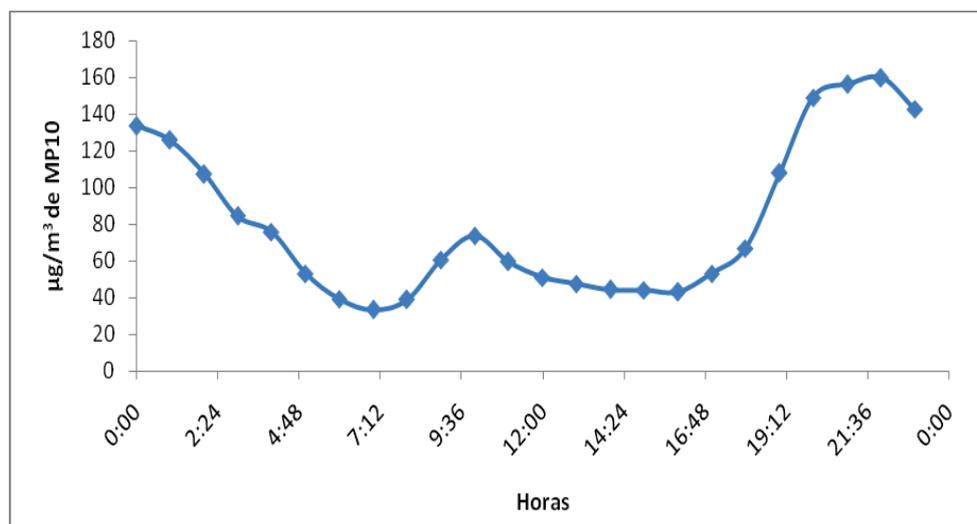


Figura 54 .Perfil temporal de contaminación por MP10 en la ciudad de Osorno

De acuerdo al grafico anterior se definieron los siguientes intervalos de tiempo:

- 23 – 19 hrs.
- 21 – 17 hrs.
- 19 – 15 hrs.

Los resultados obtenidos se presentan en Figuras 55 a 59 para los días 28 de Mayo, 21 de Junio, 01 de Julio, 07 de Agosto y 06 de Septiembre del 2008, respectivamente, en las cuales los periodos horarios se presentan en color azul (23:00 hrs), rojo (21:00 hrs) y verde (19:00 hrs.).

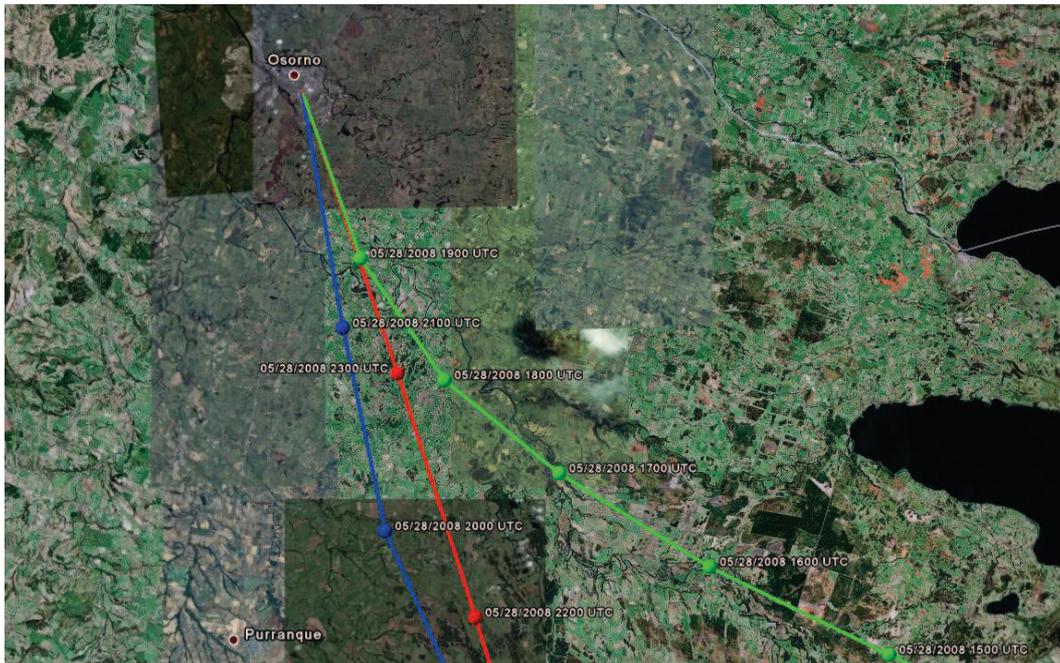


Figura 55. Trayectorias; 28 de Mayo de 2008 23:00 hrs (azul); 21:00hrs (rojo); 19:00hrs (verde)

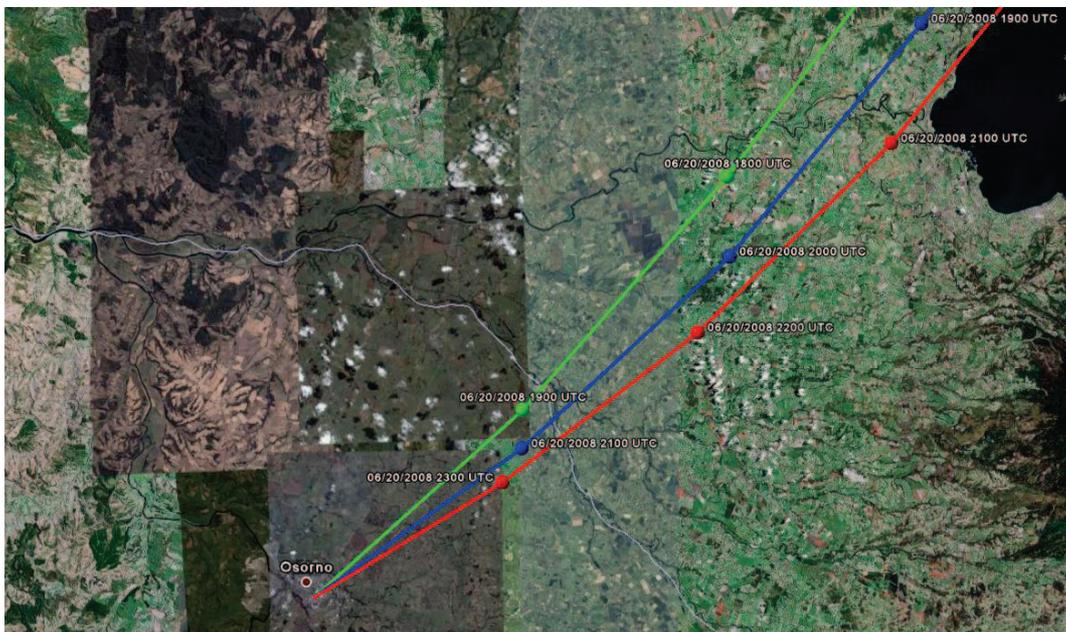


Figura 56. Trayectoria; 22 de Junio de 2008 23:00hrs (azul); 21:00 hrs (rojo); 19:00hrs (verde)

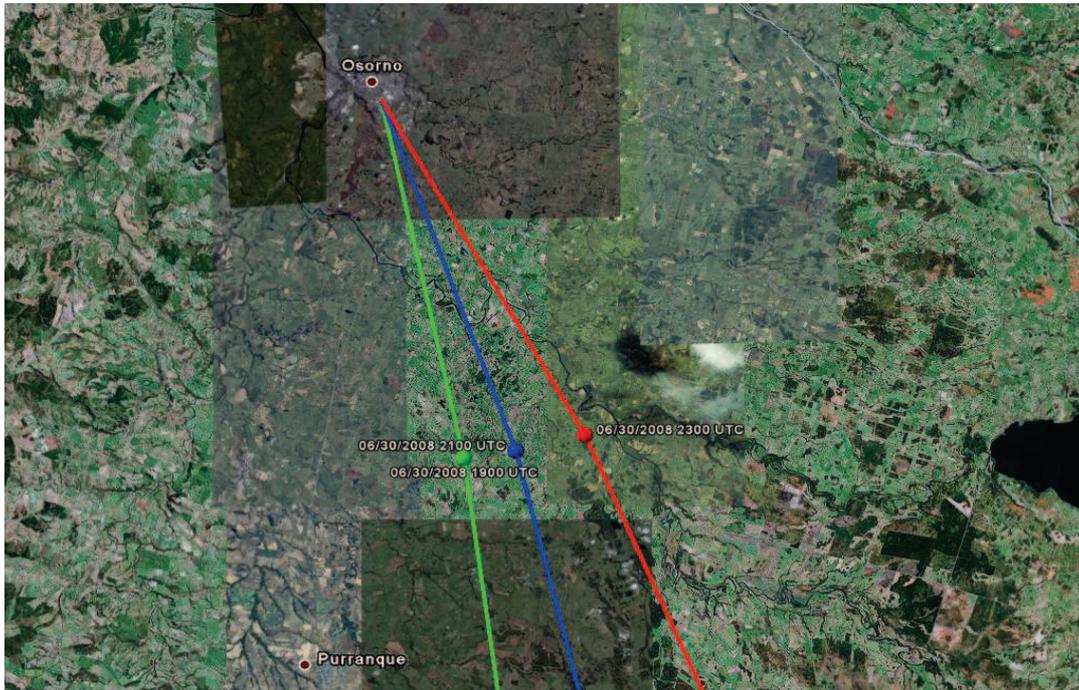


Figura 57. Trayectorias; 01 de Julio de 2008 23:00hrs (azul); 21:00hrs (rojo); 19:00hrs (verde)

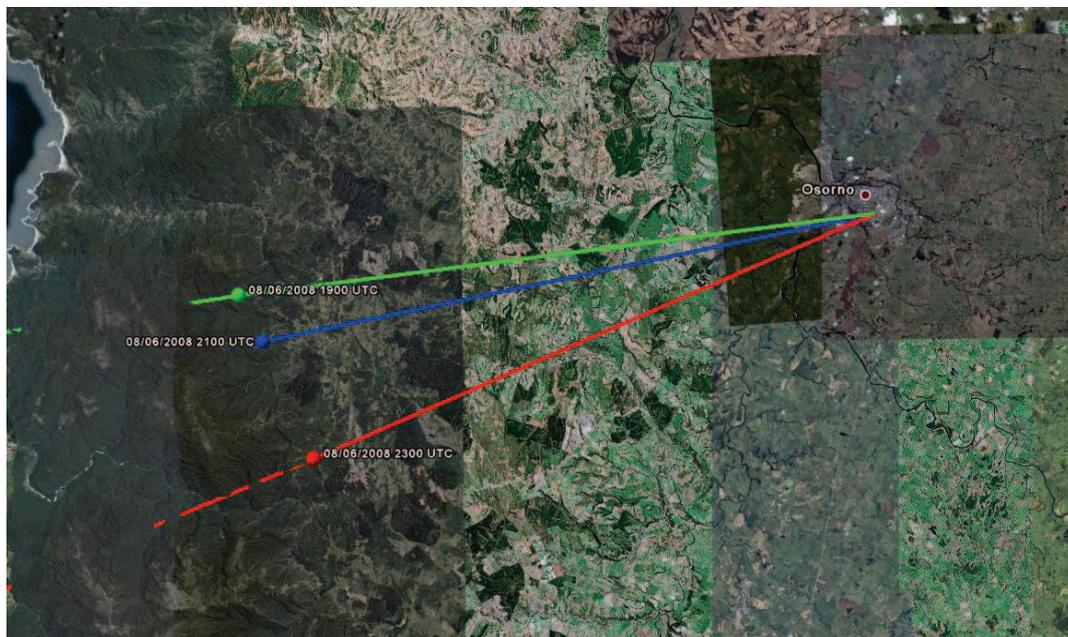
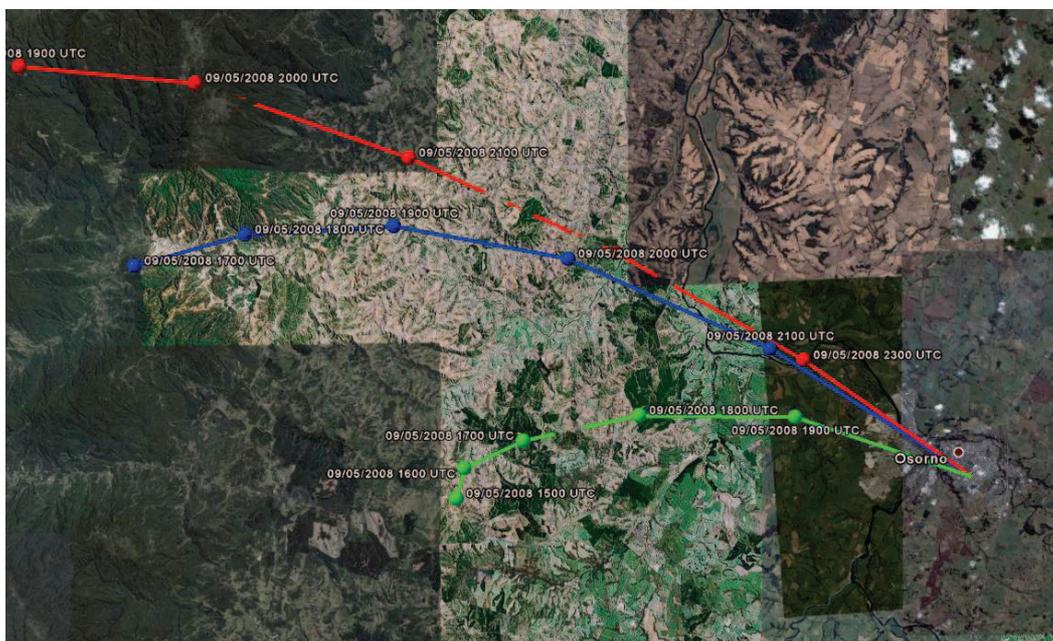


Figura 58. Trayectorias; 07 de Agosto de 2008 23:00hrs (azul); 21:00 (rojo); 19:00hrs (verde)



F.

Figura 59. Trayectorias; 06 de Septiembre de 2008 23:00hrs (azul); 21:00 hrs (rojo); 19:00 hrs(verde)

De las figuras antes expuestas es posible observar que para el mes de Mayo (Figura 55) las masas de aire que llegan a la ciudad de Osorno posee una componente Sur-este para las primeras horas de ocurrido el episodio, luego para las siguientes horas, estas declinan algunos grados en dirección sur. Para el mes de Junio (Figura 56) se aprecia que las masas de aire provienen de la dirección Noreste. Por el contrario, en el mes de Julio (Figura 57) se aprecia que las trayectorias de vientos provienen de la dirección Sur con una leve componente Este.

Durante los meses de Agosto y Septiembre se observa que las masas de aire que llegan a Osorno provienen tanto del sector Noroeste como del sector Suroeste de la ciudad, respectivamente (Figuras 58 y 59).

Al observar el comportamiento de las masas de aire, se puede decir que durante días con más altos niveles de MP10 la ciudad de Osorno recibe masas de aire que vienen predominantemente del sector Sureste. Sin embargo, se observa también la ocurrencia de masas de aire desde el sector Norte y Noreste en días de altos niveles de MP10 los cuales pueden ser atribuibles a fuentes emisoras dispuestas en esa dirección.

## 8. Determinación del área geográfica a declarar como zona saturada por material particulado respirable de Osorno

En función de los análisis anteriores, de temperaturas, velocidad y dirección de los vientos, se puede concluir que en periodo de episodios, es posible identificar una zona geográfica, en la cual predominan las bajas temperaturas, en conjunto con velocidades del viento que tienden a la calma en este episodio. La suma de estas condiciones deja en evidencia un área que favorece la acumulación de los contaminantes, en este caso MP10, el cual alcanzó una concentración horaria de 641,4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en el periodo analizado.

La Figura 60, muestra las distintas elevaciones de la capa de mezcla en el periodo de episodio. Se observa que las mínimas alturas bordean los 35 – 40 metros, y se localizan principalmente sobre el radio urbano de la ciudad de Osorno, acentuándose hacia la zona Sureste del dominio.

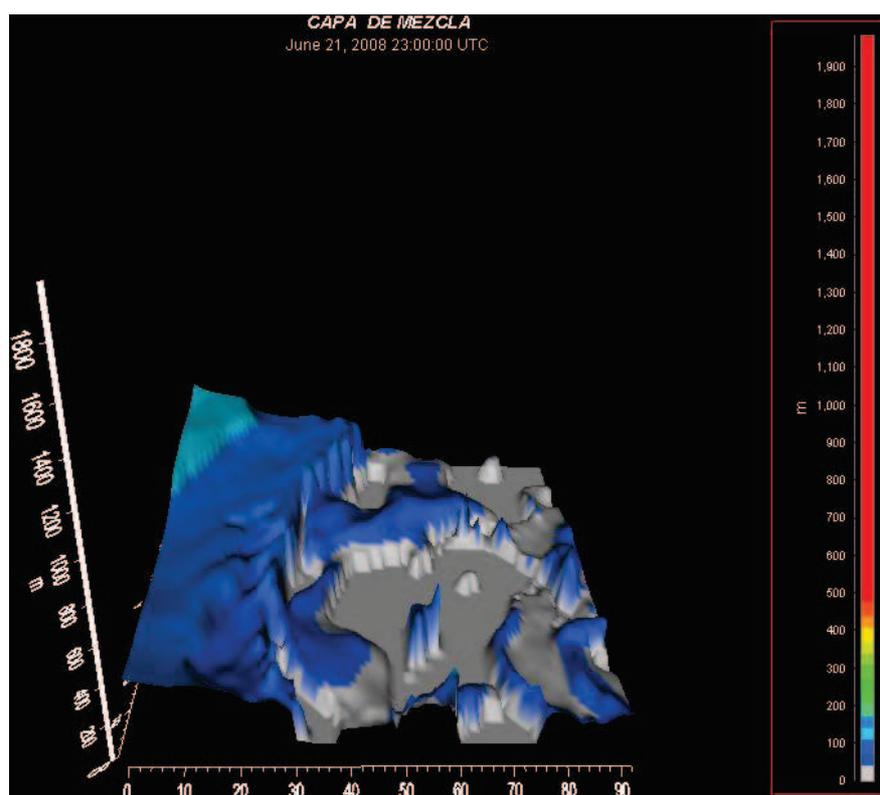


Figura 60. Vista 3D de Alturas de Mezcla, Dominio anidado 3

La imagen de radiosonda de la ciudad de Puerto Montt, muestra que el período de episodio (día 22 de junio de 2008) presenta una fuerte componente de inversión térmica localizada a una baja altura que bordea los 90 m y se asocia a una condición de extrema estabilidad atmosférica con bajas velocidades del viento (ver Figura 61). Esta condición de fuerte estabilidad atmosférica indica que en el período considerado se registra una mezcla homogénea de los contaminantes a baja altura, la cual favorece la acumulación y concentración de los contaminantes. La altura de mezcla a estas condiciones justifica la identificación de una zona geográfica que pudiese ser considerada de manera preliminar como saturada por MP10.

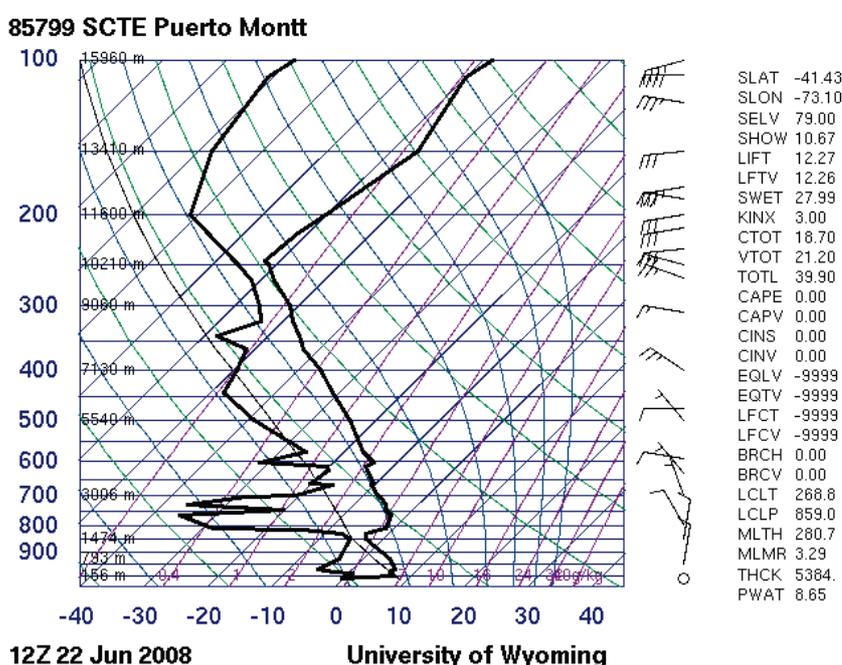


Figura 61. Imagen radiosonda Puerto Montt, 22 06 08.

Por otra parte, el análisis del movimiento de las masas de aire y de trayectoria de vientos, durante los episodios propuestos y estudiados, indican que estos son mayoritariamente predominantes desde el Noroeste, pero a bajas velocidades, como se indicó anteriormente. Es en base a lo discutido y a los límites del dominio, se recomienda delimitar como zona saturada por material particulado respirable el área geográfica correspondiente a todo el radio urbano de la ciudad de Osorno, más la zona suroeste de esta misma (Figura 63).

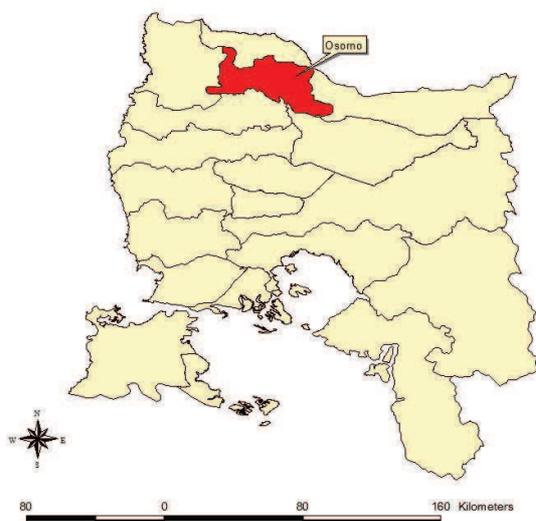


Figura 62. Ubicación regional de la Comuna de Osorno

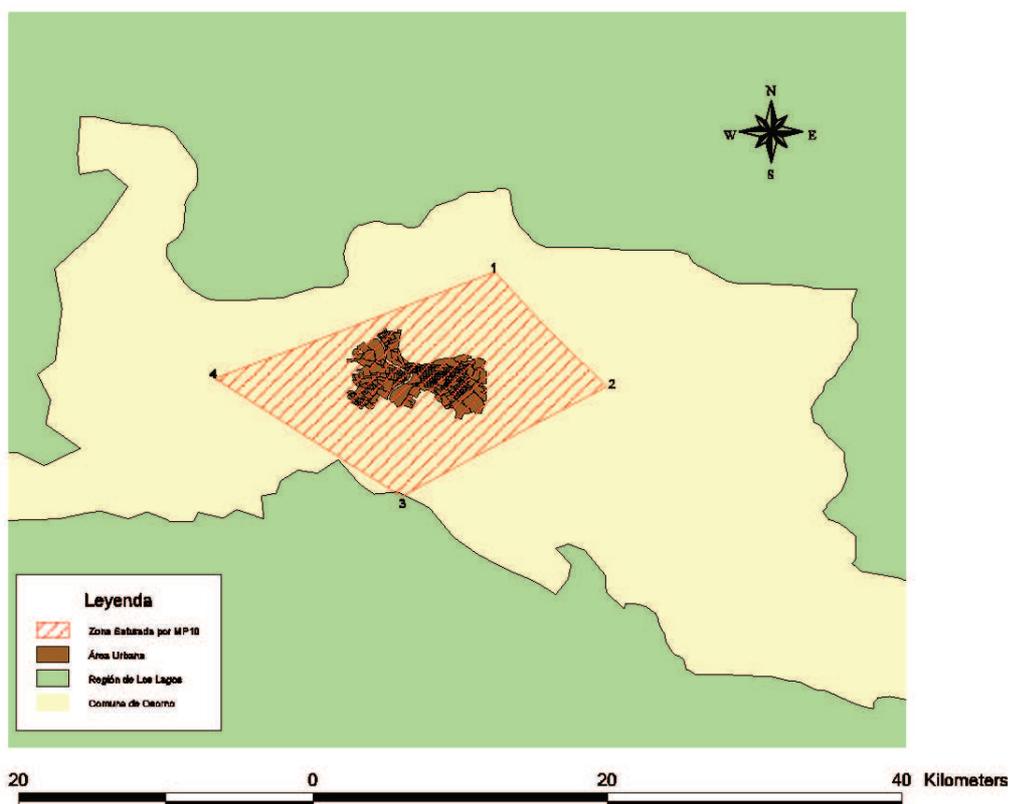


Figura 63. Polígono de delimitación de la zona saturada por MP10

La Tabla 23, muestra las coordenadas de los vértices, que definen la delimitación del área a ser declarada como saturada por MP10.

**Tabla 23.** Coordenadas del área declarada como saturada.

Vértice	Latitud	Longitud
1	-40,51	-73,09
2	-40,58	-73,02
3	-40,65	-73,15
4	-40,57	-73,27

Cabe señalar que la delimitación de zona satura por MP10 propuesta en este estudio ha sido realizada considerando solo el comportamiento de variables meteorológicas que propician condiciones favorables para la acumulación de los contaminantes. Sin embargo los límites considerados en esta zona pudiesen tener variaciones al considerar la incorporación de las distintas fuentes que aportan con emisiones de Material Particulado, en particular fuentes de combustión residencial, fuentes puntuales, fuentes móviles y fuentes biogénicas.

## 9. Conclusiones generales

### Análisis de la calidad del aire

Respecto al análisis de data de calidad del aire para la ciudad de Osorno, cabe señalar que se cuenta con información dispersa y escasa, a pesar de esto, se ha determinado que el año 2008 constituye el año más completo en términos de datos de calidad de aire, es el único año que posee un 88,8% de datos validos y un percentil 98 de  $212 \text{ ug/m}^3$ , seguido por el año 2003 que posee un 57,5%, sin embargo, para la evaluación de normativa de material particulado de 10 micrones de diámetro aerodinámico, se requiere que la data válida sobrepase el 80%.

- Los registros de la Estación El Alba, dan cuenta de registro horario de concentraciones de MP10 desde el año 2001 hasta el año 2009 medidos diariamente, sin embargo existe un periodo de 4 años en los cuales no existe data de calidad de aire, desde el año 2004 al 2007. Se observa que la estación registró las más altas concentraciones durante los años 2008 y 2009.
- Respecto a la normativa primaria anual, no es posible estimar si ésta es sobrepasada, ya que no se cumple con un mínimo de datos para su cálculo. En cambio para la norma diaria se aprecia que el límite de superación ocurre en todos los años de evaluación, sin embargo, solo se puede validar el año 2008.
- La evolución de la calidad del aire muestra un aumento paulatino de las emisiones de MP10 entre los años 2008 – 2009, el aumento paulatino de estas concentraciones se presume puedan provenir principalmente de la combustión residencial de leña, sin embargo no es posible afirmar cuál es la principal fuente de emisión de este contaminante, por lo cual se recomienda poder realizar un inventario de emisiones que permita analizar el aporte de cada fuente a las emisiones. Se recomienda además; que este inventario de emisiones pueda ser complementado con una campaña de monitoreo de especiación química que permita caracterizar el material particulado, determinando su toxicidad y la exposición de la población.
- Con base en el análisis de calidad del aire y considerando los períodos de superación de la norma de 24 horas en los meses de mayo a septiembre de 2008,

se determinó que el período a modelar corresponde a los días 11 a 23 de junio de 2008. Se ha escogido estos días con el fin de poder modelar las condiciones meteorológicas en el período de episodios consecutivos de MP10 y tomando 3 días previos sin episodio.

- Al analizar el período de episodios seleccionado para modelación meteorológica, es posible apreciar que los más altos peaks de concentración ocurren el período entre las 21:00 y 24:00 horas. Estos episodios se asocian a las bajas temperaturas ambientales registradas por la estación el Alba. Esta condición es muy similar a lo que sucede en ciudades como Temuco y Padre Las Casas. Por su parte, las más bajas concentraciones en este período se observan en el período comprendido en general entre las 12:00 y 18 horas, lo cual se asocia a las temperaturas más elevadas del día que alcanzan hasta los 12°C. Este perfil temporal sugiere que las mayores concentraciones se asociarían a los elevados niveles de combustión residencial de leña, lo cual es una característica común de la zona sur de País en época invernal.

#### Análisis de meteorología y campos de viento.

- Respecto al análisis de velocidades y dirección del viento, se determinó que en el período comprendido entre Marzo–Junio de 2008, el viento sopla mayoritariamente en dirección Sur y Sur-Este, con velocidades máximas que alcanzan los 8,8 m/s. Los mayores rangos de velocidades registrados se encuentran en un rango de 0,5 – 2,1 m/s y entre los 2,1 – 3,6 m/s. Gran parte del período se observa además dirección Norte y Nor-Oeste con velocidades de hasta los 5,7 m/s. Menores frecuencias se observan en dirección Este y Oeste, sin alcanzar grandes velocidades.
- Respecto a las frecuencias en este período, se muestra una predominancia de velocidades en el rango de 0,5-2,1 m/s en este período con un 57 %, por su parte, las velocidades de entre 2,1 y 3,6 m/s se producen un 24,1% y velocidades mayores de hasta los 5,7 m/s se producen un 5,6%. Altas velocidades de hasta 8,8 m/s se producen solo un 0,3%.
- Respecto a los resultados obtenidos para las isolíneas de velocidad del viento sobre el campo de temperatura en períodos de máxima concentración de material

particulado, se pudo determinar que la ciudad de Osorno se encuentra inserta en una condición de estabilidad atmosférica caracterizada por bajas temperaturas y bajo flujo de las masas de aire, estas características se pudieran estar asociadas a condiciones de baja ventilación y se asocian a las altas concentraciones de material particulado registrado en la estación El Alba.

- De acuerdo a los resultados obtenidos del análisis de monitoreo de calidad del aire y análisis meteorológico, fue posible determinar que los períodos de episodios se asocian principalmente a condiciones de alta estabilidad caracterizada por una condición de bajo flujo de masas de aire, junto a las más bajas temperaturas registradas por la estación El Alba. Los resultados de modelación mostraron que las temperaturas y velocidades del viento más bajas se pudieron concentrar dentro de una zona limitada recurrente en los episodios. Este patrón permite contar con antecedentes base para la determinación de una zona sensible a la contaminación.
- Es posible concluir que para los meses de Mayo y Julio las masas de aire que llegan a la ciudad de Osorno posee un desplazamiento hacia el Sur con una leve inclinación Este, respecto del eje; mientras que para el mes de Junio se aprecia que las masas de aire provienen de la dirección Noreste. Por tanto una potencial zona a ser considerada como saturada debería considerar gran parte del sector Noreste y Sureste de la comuna de Osorno.
- Respecto a la delimitación de zona saturada por MP10 se puede concluir que en base a la información recopilada y analizada, existen sectores con una potencial influencia meteorológica y topográfica que eventualmente permitiría la acumulación de contaminantes. Los resultados obtenidos del análisis de trayectorias, velocidades del viento, temperaturas y alturas de capa de mezcla tienden a apuntar que la zona urbana de Osorno debería ser considerada en su totalidad como saturada. Sin embargo, el equipo consultor ha propuesto un área que incorpore la zona sureste de la comuna por presentar una tendencia a mayores condiciones de acumulación de contaminantes.
- Los resultados obtenidos del presente informe señalan que las condiciones meteorológicas que propician la estabilidad atmosférica, se presentan en la zona urbana de Osorno y alrededores, pese a ello es necesario contar con información acabada de emisiones para definir con mayor exactitud el área de influencia del MP10.

## 10. Referencias

1. Sandoval, H., *Aire, In Informe País: Estado del Medio Ambiente en Chile*, Centro de Análisis de Políticas Públicas, Universidad de Chile, 1999 (LOM Ediciones Santiago, Chile): p. 35-73
2. Sánchez, J.M.J., *Una estimación de los beneficios en salud de reducir la contaminación en Santiago, In Economía del Medio Ambiente en América Latina*. 1995(Ediciones Universidad Católica, Santiago) p. 157-178
3. Querol, X., A. Alastuey, S. Rodriguez, F. Plana, E. Mantilla y C. Ruiz, *Monitoring of MP10 and PM2.5 around primary particulate anthropogenic emission sources*. Atmospheric Environment, 2001. **35**: p. 845-858
4. Barrios, S., Peña-Cortés F., and Osses S., *Efectos de la contaminación atmosférica por material particulado en las enfermedades respiratorias agudas en menores de 5 años*. Ciencia y enfermería. 2004: p. 21-29.
5. CONAMA, *Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana*. 1997.
6. O'Ryan, R., and Larraguibel L., *Contaminación del aire en Santiago: ¿qué es, qué se ha hecho, qué falta?* Revista Perspectivas. 2000: p. 153-191.
7. Celis, J., and Morales P., *Estudio de la contaminación del aire urbano en una ciudad intermedia: El caso de Chillán (Chile)* 2007. **495**: p. 165-182.
8. MINSEGPRES, *D.S. N°41. Declaración de zona latente por material particulado respirable MP10, como concentración de 24 horas, a las comunas de Concepción Metropolitano*. 2006.
9. DICTUC, *Actualización del inventario de emisiones atmosféricas en las comunas de Temuco y Padre Las Casas*. 1-221.
10. CONAMA, *Balance de Gestión Integral Año 2006*. 2006. 2006.
11. CONAMA, *Antecedentes para declarar a las comunas de Temuco y Padre Las Casas como Zona Saturada por MP10*. 2004.
12. INE, *Demografía y vitales proyecciones de población*. 2009.
13. USEPA, *Environmental Protection Agency. AP-42. Residential Wood Stoves*. 1996.
14. EnviroModeling, *Definición de un área de influencia de las emisiones que causan efecto de saturación por material particulado respirable en la ciudad de Chillán y sus alrededores, y su relación con las condiciones meteorológicas locales*. . 2008: p. 1-117.
15. Sanhueza, P., et al, *Diseño de escenario para apoyar la gestión del aire en Temuco y Padre las Casas*. 2004.
16. CENMA, *Mediciones meteorológicas y de calidad de aire en Temuco y Rancagua para la obtención de antecedentes técnico-científicos para la generación de la norma de calidad primaria para material particulado fino PM25*. 2000.

17. CENMA, *Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos en las regiones V, VI y IX de Chile*. 2001.
18. CONAMA, *Anteproyecto de norma de emisión para artefactos de uso residencial que combustionan leña u otros combustibles de biomasa*, Contaminación, 2007.
19. UDEC, *Universidad de Concepción. Priorización de medidas de reducción de emisiones por uso residencial de leña para la gestión de calidad del aire en Temuco y Padre las Casas*. 2002.
20. CENMA, *Mediciones de calidad de aire y análisis de la contaminación atmosférica en la ciudad de Osorno, X región*. 2003: p. 1-62.