



CENTRO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

INFORME FINAL  
“OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE PRONÓSTICO DE  
CALIDAD DE AIRE POR MP10 PARA RANCAGUA  
PERIODO 2011”

UMGCA-014-LMPCA-007-2011

RESUMEN EJECUTIVO  
VERSIÓN FINAL

---

PREPARADO PARA

SECRETARIA REGIONAL MINISTERIAL DEL MEDIO AMBIENTE  
REGIÓN DEL LIBERTADOR BERNARDO O'HIGGINS

SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2011

## **Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA), Año 2011**

Obra protegida por la Ley 17.336 sobre Propiedad Intelectual  
Ninguna parte de este Informe puede ser reproducida, transmitida o almacenada, en cualquier forma o por cualquier medio, sin permiso expreso de CENMA, o de la Institución contratante del estudio.

### **Fundación Centro Nacional del Medio Ambiente CENMA**

**Prof. Víctor Pérez, Presidente**

**Prof. Ítalo Serey, Director Ejecutivo**

**Sr. Jaime Durán, Director de Desarrollo Estratégico y Coordinación de Proyectos**

Informe desarrollado por el Laboratorio de Meteorología y Pronóstico de la Calidad del Aire

Equipo de Meteorología:

**Manuel Merino**, Jefe del Laboratorio de Meteorología

**Eugenio Campos**, Meteorólogo Senior, Jefe de Turno

**Maureen Amín**, Meteoróloga Senior, Encargada de Proyecto

**Claudio Cortés**, Meteorólogo, Informática Ambiental

**Diego Campos**, Meteorólogo, Modelación Estadística

**Ricardo Abarca**, Meteorólogo

*Fundación Centro Nacional del Medio Ambiente*

*Av. Larraín 9975, La Reina, CP: 788-0096*

*Santiago, Chile*

*Tel: (56-2) 927 5500, Fax: (56-2) 275 1688*

## Contenido

1	Antecedentes Generales .....	i
2	Resumen de Resultados .....	ii
2.1	Comparación PMCA y MP10 .....	ii
2.2	Acierto PMCA.....	iii
2.3	Acierto Modelo Calidad del Aire .....	iii
2.3.1	Conclusiones del desempeño de las herramientas de pronóstico .....	iv
2.4	Episodios de MP10 en Rancagua .....	iv
2.5	Actualización de los Coeficientes de las Ecuaciones de Pronóstico para MP10....	vi
2.6	Diseño e Implementación del sistema WRF-CENMA y de un Web Service.....	vi
2.7	Funcionamiento de la Red SIVICA.....	vii
2.8	Análisis y Propuestas de Mejoramiento al Sistema de Pronóstico y Gestión de Episodios en Rancagua .....	viii
2.8.1	Contar con información meteorológica y de calidad de aire confiable y en línea	viii
2.8.2	Desarrollo de ecuaciones para un periodo fijo de 01 a 24 horas .....	viii
2.8.3	Pronóstico para otras ciudades como Rengo y San Fernando .....	ix
2.8.4	Difusión en línea de los valores horarios de MP10 .....	ix
2.8.5	Incorporación de nuevas metodologías de pronóstico de calidad de aire .....	ix
2.8.6	Aplicación de un sistema de pronóstico de calidad de aire para MP 2.5.....	ix
2.8.7	Realizar campañas de medición para determinar la composición química del MP2.5	x
2.8.8	Trabajo en equipo de especialistas de SEREMI del Medio Ambiente Región del Libertador Bernardo O'Higgins y CENMA .....	x
2.8.9	Evaluar la adquisición e instalación de un perfilador vertical de viento y temperatura .....	x
2.8.10	Realizar campañas de mediciones para conocer la distribución espacial y temporal de la contaminación por MP10 y MP2.5 en el valle central.....	xi
3	Anexos .....	xi
3.1	Características Episodios Tipo A y BPF que afectan a la Región de O'Higgins.....	xi
3.2	Categorías Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica .....	xiii



## 1 Antecedentes Generales

Desde abril a septiembre de 2011, CENMA desarrolló el Proyecto “Operación de un Sistema de Pronóstico de Calidad de Aire por MP10 para Rancagua”, para la SEREMI de MA de la Región del Libertador Bernardo O’Higgins.

Se efectuaron análisis y pronósticos diarios de condiciones meteorológicas que afectan los niveles de calidad de aire por MP10 en Rancagua, Rengo y San Fernando; y se operaron los Modelos de Calidad de Aire para la Región. El servicio fue realizado por un equipo de meteorólogos especializados en pronósticos meteorológicos orientados a calidad de aire, integrando roles de turnos en un trabajo ininterrumpido incluyendo fines de semana y festivos.

El sistema de pronóstico operado por CENMA se desarrolló para apoyar a la SEREMI del Medio Ambiente Región del Libertador Bernardo O’Higgins, en la toma de medidas asociadas a la Gestión de Episodios Críticos por MP10 en Rancagua.

La finalidad del Sistema de Pronóstico en la Gestión de Episodios, es entregar a la Autoridad Ambiental información certera y oportuna, que le permita tomar medidas eficientes al preverse altas concentraciones de MP10, y dar aviso difundiendo recomendaciones para proteger la salud de la población.

## 2 Resumen de Resultados

A continuación se resumen los resultados obtenidos en el desarrollo de este Servicio.

### 2.1 Comparación PMCA y MP10

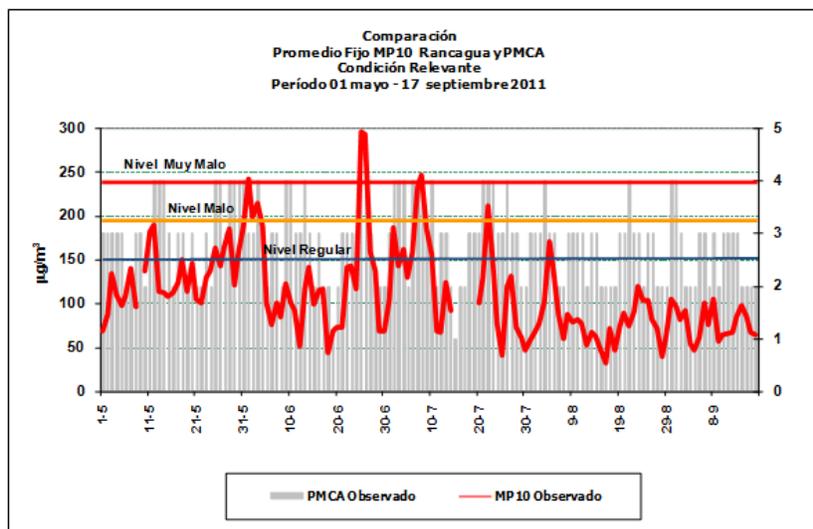


Figura 1 Comparación del PMCA observado y MP10, 01 mayo- 17 septiembre 2011

La Figura 1 muestra en general, buena correlación entre valores de PMCA<sup>1</sup> (barras verticales) y de MP10 (línea roja), particularmente considerando que el MP10 es una variable continua y el PMCA discreta.

<sup>1</sup> CENMA 1998 "Tipificación de condiciones meteorológicas asociadas a diferentes categorías de Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica PMCA" \_Se detallan en Anexos

## 2.2 Acierto PMCA

La Tabla de Contingencia siguiente muestra la evaluación del Índice PMCA durante el periodo de pronóstico 2011.

**Tabla 1 Evaluación PMCA pronosticado con 24 horas de anticipación**

01 mayo - 17septiembre 2011

PMCA	PMCA Observado						
Pronos 24	PMCA 1	PMCA 2	PMCA 3	PMCA 4	PMCA 5	Total	% Acierto
PMCA 1	2	0	0	0	0	2	100.0
PMCA 2	0	35	1	0	0	36	97.2
PMCA 3	0	7	60	4	0	71	84.5
PMCA 4	0	2	3	26	0	31	83.9
PMCA 5	0	0	0	0	0	0	-----
Total	2	44	64	30	0	140	
%Acierto	100.0	79.5	93.8	86.7	-----		
N° Aciertos	123						
%Acierto Total	87.9						
Skill-Score	77.3						

La Tabla 1 muestra un alto nivel de acierto total del pronóstico de PMCA (87.9%) y también en el acierto de cada una de las categorías. El Skill-Score muestra la significativa superioridad del pronóstico emitido respecto al pronóstico de referencia (en este caso persistencia).

## 2.3 Acierto Modelo Calidad del Aire

Considerando la ocurrencia o no de episodio y la opinión experta, se obtuvo el siguiente resultado.

**Tabla 2 Evaluación Modelo de Calidad de aire considerando episodio/no episodio y opinión experta**

Opinión Experta-Episodio/No Episodio	OBSERVADO			
	NO EPISODIO	EPISODIO	Total	% Acierto
PRONOSTICADO				
NO EPISODIO	93	5	98	94.9
EPISODIO	18	18	36	50.0
Total	111	23	134	
% Acierto	83.8	78.3		
Número aciertos	111			
% Acierto total	82.8			
% ENA	21.7			
%FA	50.0			

Se observa en La Tabla 2 el resultado de la evaluación del pronóstico de calidad de aire, considerando como episodio si el registro de MP10 fue  $\geq 150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; y como no episodio si

en el mismo periodo, el valor de MP10 fue  $<150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Incluyendo la opinión experta, se logra un acierto total de 82.8%. Los Episodios No Alertados (ENA) alcanzan un 21.7%, y las Falsas Alarmas (FA) un 50%.

### 2.3.1 Conclusiones del desempeño de las herramientas de pronóstico

- El PMCA es un indicador que integra la información meteorológica de escalas sinóptica, regional y local asociadas a calidad del aire; presenta un alto grado de acierto, y consecuentemente ha demostrado ser una herramienta de primera importancia para el pronóstico de calidad del aire en la Región.
- El pronóstico de calidad de aire considerado el promedio fijo de 07 a 06 horas, presentó buenos resultados particularmente al incorporar la opinión experta. El alto porcentaje de Falsas Alarmas, denota el criterio utilizado por CENMA respecto a optar por el peor escenario previsto.

## 2.4 Episodios de MP10 en Rancagua

En la Tabla 3 se indica el tipo de episodio constatado respecto al promedio diario 01 a 24 horas, contabilizándose un total de 15 días en nivel Regular, 4 días en nivel Malo y 4 días en nivel Muy Malo, de acuerdo a los registros de MP10 no validados de la estación de Rancagua de MP10 durante la temporada otoño invierno 2011<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> Mediciones en Rancagua, Red SIVICA

**Tabla 3 Episodios de MP10 en Rancagua**

Fecha	MP10 Registrado Promedio fijo 7-6	Nivel	Tipo Episodio
11/05/2011	181	Regular	A -BPF
12/05/2011	189	Regular	BPF
25/05/2011	163	Regular	A
27/05/2011	164	Regular	BPF
28/05/2011	184	Regular	BPF
30/05/2011	157	Regular	A
31/05/2011	188	Regular	A
01/06/2011	241	Muy Malo	BPF
02/06/2011	198	Malo	BPF
03/06/2011	213	Malo	A
04/06/2011	187	Regular	A
25/06/2011	295	Muy Malo	A
26/06/2011	292	Muy Malo	A
27/06/2011	159	Regular	A
02/07/2011	186	Regular	A (r) -NF
04/07/2011	161	Regular	A (r) -NF
06/07/2011	158	Regular	A (r) -NF
07/07/2011	233	Malo	A (r) -NF
08/07/2011	245	Muy Malo	A (r) -NF
09/07/2011	184	Regular	A (r) -NF
10/07/2011	156	Regular	A (r) -NF
22/07/2011	211	Malo	A
04/08/2011	170	Regular	BPF

Se desprende de la Tabla 3 que del total de episodios un 39% fueron Tipo A, un 31 % Tipo A-NF, un 26% BPF y un 4% (A-BPF).

## **2.5 Actualización de los Coeficientes de las Ecuaciones de Pronóstico para MP10**

Se actualizaron los coeficientes de las ecuaciones de MP10, y se logró mejorar los resultados en días de episodios al adicionar el valor correspondiente al error típico o error criterio, cuando se dieron conjuntamente las siguientes dos condiciones:

La humedad relativa mínima pronosticada para la Región por el modelo ETA fue inferior a 20 % y el PMCA pronosticado para el día siguiente correspondió a PMCA4 o PMCA5.

- La Ecuación N°1 actualizada más error criterio, logra reducir de manera considerable los Episodios No Alertados (ENA) a un 11.1%, sin aumentar mayormente el número de Falsas Alarmas (FA), lográndose una ecuación que apunta a la prevención.
- Las actualizaciones de todas las ecuaciones lograron el objetivo de conseguir un mayor acierto en episodios.
- Se debe contar con un sistema de aseguramiento de la calidad de los datos proporcionados por la red de monitoreo de calidad del aire y meteorología regional, condición que no se ha cumplido el año 2010 y 2011.
- El contar con una data confiable permitirá un mayor y mejor aprendizaje con las ecuaciones de pronóstico vigentes, y proporcionará mayor certeza en los procesos de actualización de los coeficientes de futuras ecuaciones de pronóstico.

## **2.6 Diseño e Implementación del sistema WRF-CENMA y de un Web Service**

- El modelo WRF-CENMA fue operado de forma experimental en 2011, y los buenos resultados alcanzados muestran que en 2012 podrá utilizarse como condición de inicio para modelos de calidad de aire. Será aplicable a MP10, MP2.5 u otro contaminante atmosféricos a nivel regional, pudiendo operarse por lo tanto en la Región del Libertador Bernardo O'Higgins.

- El desarrollo e implementación de un servicio web de difusión del pronóstico de calidad del aire, permitió informar oportunamente a la población, respecto a los niveles de contaminación esperados, entregando recomendaciones para enfrentar los episodios asociados a altos niveles de MP10.

## 2.7 Funcionamiento de la Red SIVICA

- A juicio de CENMA, la deficiente operación de la Red SIVICA en 2010 y 2011, en relación a las estaciones de monitoreo ubicadas en la Región de O'Higgins, debe ser urgentemente subsanada. Se hace imperativo asegurar para 2012 el correcto funcionamiento de la Red, condición necesaria si se quiere lograr un mejoramiento del sistema de pronóstico y una adecuada Gestión de Episodios Críticos.
- La información recopilada en los dos últimos años representa un serio retroceso para la gestión de calidad de aire en la Región, debido a que la información existente dista de ser confiable, y por lo tanto no se puede asegurar que las conclusiones que se obtengan a partir de dicha información sean válidas.
- Para lograr un buen seguimiento de las condiciones meteorológicas a escala local, CENMA debió buscar otras fuentes de información como las proporcionadas en línea por el aeródromo de Rancagua<sup>3</sup>, agrometeorológicas como Codegua, El Pangui y Punta Cortés.<sup>4</sup>
- Sobre la base de correlaciones efectuadas entre algunas estaciones de la Red MACAM de Santiago y la estación de monitoreo de Rancagua, se efectuaron estimaciones respecto a los niveles de calidad de aire en Rancagua.<sup>5</sup>
- No hubo mediciones de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y tampoco O<sub>3</sub>, aunque en la página web de SIVICA indica que la estación de Rancagua debiera medir estos contaminantes. El SO<sub>2</sub> y los NO<sub>x</sub> contribuyen a la formación de nitratos y sulfatos que pasan a formar parte del MP2.5.
  - ✓ Particular importancia reviste la medición continua de SO<sub>2</sub> en Rancagua, dada la cercanía de la División El Teniente de CODELCO

---

<sup>3</sup> DGAC\_DMC (<http://metaer.meteochile.gob.cl/>)

<sup>4</sup> FDF-INIA-DMC (<http://www.agroclima.cl>)

<sup>5</sup> CENMA 2008-Correlación de MP10 entre la estación de monitoreo de Rancagua y las estaciones de El Bosque y Pudahuel. (Documento interno)

Chile. Algunos peaks anómalos de MP2.5 respecto al ciclo diario típico, podrían explicarse por transporte de sulfatos. Se hace necesario asegurar el registro completo de calidad del aire durante el 2012 y estudiar estos impactos.

- ✓ Por otra parte, las concentraciones de O<sub>3</sub> troposférico podrían tener en el periodo estival un impacto negativo en algunos tipos de cultivos de La Región de O'Higgins.

## **2.8 Análisis y Propuestas de Mejoramiento al Sistema de Pronóstico y Gestión de Episodios en Rancagua**

### **2.8.1 Contar con información meteorológica y de calidad de aire confiable y en línea**

Sobre la base de la deficiente operación de la red SIVICA en 2010 y 2011 (que no ocurrió en los años anteriores que operó CENMA), y los serios problemas que ocasionó, se plantea la imperiosa necesidad de asegurar que la Institución que opere la Red SIVICA, a la que pertenecen las estaciones de monitoreo de la Región del Libertador Bernardo O'Higgins, tenga las capacidades, recursos materiales y humanos, conocimientos, competencia y experiencia requeridos. La Institución a cargo debe efectuar un permanente control de calidad a los datos, y hacer las mantenciones y calibraciones preventivas y correctivas que sean necesarias para mantener en buen funcionamiento y en línea los equipos de monitoreo.

### **2.8.2 Desarrollo de ecuaciones para un periodo fijo de 01 a 24 horas**

CENMA desarrolló y operó en 2011 para Rancagua un modelo de pronóstico para un periodo fijo de 24 horas, contemplado desde las 07 AM del día 1, a las 06 AM del día 2, considerando el día 0 como el de emisión del pronóstico. Esto solucionó el significativo desfase e inutilidad operacional que produce el usar el promedio móvil de 24 horas. Sin embargo el periodo fijo de 24 horas elegido, ha demostrado ser en ocasiones comunicacionalmente confuso. Dado que se constató la similitud de los valores entregados por la ecuación 07 am D1 a 06 am D2, y el resultado del pronóstico 01 a 24 horas, se propone desarrollar ecuaciones operacionales para este último predictando, las que podrían ser aplicadas a partir de 2012.

### **2.8.3 Pronóstico para otras ciudades como Rengo y San Fernando**

El comportamiento errático de los datos de San Fernando y Rengo durante el periodo de pronóstico experimental de MP10 2011, generaron dudas sobre la calidad de esta información. Los modelos de calidad del aire para Rengo y San Fernando solo tienen un año de utilización, por lo que realizar una actualización y/o modelos nuevos, es demasiado prematuro, más aún si los datos de calidad del aire aún son dudosos. Pero a la luz de lo observado en Rancagua, se hace necesario replantear a mediano plazo el predictando que considera el sistema de pronóstico (cambiar a promedios fijos de 1 a 24 horas).

### **2.8.4 Difusión en línea de los valores horarios de MP10**

Se recomienda la difusión en línea de los valores horarios de MP10 a través de sitios Web y otros medios masivos de difusión y comunicación, ya que es la exposición de la población a los altos peaks horarios de MP10 asociados a episodios, la que determina efectos agudos en salud, particularmente en la población más vulnerable, lactantes, ancianos, asmáticos y personas con problemas cardiovasculares.

### **2.8.5 Incorporación de nuevas metodologías de pronóstico de calidad de aire**

Se recomienda en paralelo a la operación del modelo oficial, desarrollar e implementar otras metodologías de pronóstico. Estas pueden ser del tipo estadístico MOS<sup>6</sup>, Neuronales<sup>7</sup> o numéricas con modelos acoplados físico-químicos como el WRF-Chem<sup>8</sup>. Estos modelos alternativos pueden ser desarrollados y/u operados por Instituciones y Universidades Regionales.

### **2.8.6 Aplicación de un sistema de pronóstico de calidad de aire para MP 2.5**

---

<sup>6</sup> Model Output Statistic

<sup>7</sup> Neuronal networks

<sup>8</sup> Modelo numérico acoplado físico-químico

En 2012 entra a regir la norma para el MP2.5,<sup>9</sup> y los niveles asociados a condiciones de excepción (superación de la norma, alerta, preemergencia y emergencia).

La fracción del material particulado respirable más agresiva para la salud corresponde al MP2.5 y se estima que en Rancagua la fracción fina, MP2.5 es del orden de un 70 % del MP10 total.

Se hace necesario entonces desarrollar ecuaciones para el MP2.5 a partir de las ecuaciones para MP10 existentes, y a futuro desarrollar ecuaciones específicas para MP2.5. CENMA con recursos propios se encuentra desarrollando esta iniciativa y espera aplicar el ajuste para pronosticar MP2.5 el 2012.

#### **2.8.7 Realizar campañas de medición para determinar la composición química del MP2.5**

Para conocer mejor los procesos de formación y distribución espacial y temporal del MP2.5 en la Región de O'Higgins, es necesario efectuar campañas de medición con filtros. Esto para determinar su composición química, y estimar la contribución de las diferentes fuentes de emisión de contaminantes.

#### **2.8.8 Trabajo en equipo de especialistas de SEREMI del Medio Ambiente Región del Libertador Bernardo O'Higgins y CENMA**

Durante el año 2011, en que CENMA operó el modelo de pronóstico de MP10 para la Región del Libertador Bernardo O'Higgins, se logró una muy buena interacción con las contrapartes técnicas de la SEREMI de MA. Se recomienda mantener y fortalecer este trabajo en equipo, ya que apunta al mejoramiento continuo de la Gestión de Episodios. Se propone efectuar reuniones y discusiones técnicas periódicas entre los especialistas del SEREMI MA Región del Libertador Bernardo O'Higgins, y la contraparte a cargo del Sistema de Pronóstico.

#### **2.8.9 Evaluar la adquisición e instalación de un perfilador vertical de viento y temperatura**

---

<sup>9</sup> DS N° 12/2001 Ministerio del Medio Ambiente

Se sugiere priorizar la adquisición e instalación de un perfilador vertical de viento y temperatura en Rancagua. Este equipamiento sería de gran utilidad en la detección, seguimiento y pronóstico de episodios de contaminación atmosférica. A través de este equipo se puede inferir y determinar la evolución de la capa de mezcla superficial y del factor de ventilación. Los perfiladores verticales de última generación son menos costosos que los equipos que se fabricaban años atrás.

#### **2.8.10 Realizar campañas de mediciones para conocer la distribución espacial y temporal de la contaminación por MP10 y MP2.5 en el valle central**

Se sugiere realizar campañas de mediciones mediante un vehículo instrumentado en el período otoño-invierno, realizando recorridos preestablecidos, en días asociados a altos registros de contaminación atmosférica por MP10 y MP2.5.

### **3 Anexos**

#### **3.1 Características Episodios Tipo A y BPF que afectan a la Región de O'Higgins**

La Región del Libertador Bernardo O'Higgins presenta patrones meteorológicos de transición entre las condiciones áridas de la zona norte y la alta pluviosidad de la zona sur, lo que se traduce en marcadas variaciones de temperatura y precipitación entre las estaciones de otoño-invierno y primavera-verano.

Es un hecho reconocido en la literatura científica, que las condiciones de ventilación y dispersión de los contaminantes dependen de las diferentes configuraciones meteorológicas que a escala sinóptica, regional y local evolucionan en la zona central, y que la topografía también desempeña un rol importante<sup>10 11</sup>.

Existe una definición de configuraciones meteorológicas clásicas asociadas a episodios de contaminación atmosférica<sup>12</sup> en otoño e invierno. Aunque estas fueron desarrolladas

---

<sup>10</sup> Rutllant J. y Garreaud R. (1995) Meteorological Air Pollution Potential for Santiago, Chile: Towards an Objective Weather Forecasting

<sup>11</sup> Garreaud R., Rutllant J. y Fuenzalida, H. (2001). Coastal Lows in the Subtropical West Coast of South America: Mean Structure and Evolution

<sup>12</sup> Rutllant J. (1994). On the generation of coastal lows in Central Chile

para la ciudad de Santiago, son absolutamente aplicables a Rancagua como se mencionó con anterioridad.

Las configuraciones meteorológicas asociadas a episodios de contaminación atmosférica se definen como Tipo A, BPF o Mixtas.

#### Configuración Tipo A

Está caracterizada por la irrupción de una dorsal en la troposfera media (flujo de aire descendente al nivel de 500 hPa) y la formación de un centro de baja presión costera a niveles bajos, que se propaga de norte a sur entre el sistema de alta presión subtropical por el oeste, y una alta presión fría migratoria que se desplaza al este de la cordillera de Los Andes.

La baja costera produce descenso de aire (subsistencia forzada) en la ladera andina occidental y vientos de dirección este, generados por aglomeración de aire (convergencia superficial) en el sector delantero de la baja presión.

A esta configuración se asocia la presencia de cielos despejados, anomalías negativas de la humedad relativa, y positivas de temperatura, intensificación de la inversión térmica debida a la subsidencia atmosférica, reducción de la capa de mezcla superficial y por tanto, bajo factor de ventilación.

#### Configuración Tipo BPF

A diferencia del episodio A, la configuración tipo BPF se genera por la irrupción de una vaguada en altura (flujo de aire ascendente en la troposfera media) que acompaña a una sistema frontal débil u ocluido, que pierde energía a medida que se aproxima al continente.

Esta condición está asociada a abundante cobertura nubosa prefrontal del tipo media y alta, y bajo factor de ventilación.

#### Episodios Mixtos

Ocurren cuando se alternan los episodios de tipo A y BPF con períodos intermedios del orden de 24 horas. Generalmente los episodios mixtos comienzan con una configuración del Tipo A seguida de una Tipo BPF.

Los episodios Tipo A representan como promedio un 61% del total de episodios y los BPF un 32%. (Rutllant J.-Garreaud R. 1994), en el 7% restante se encuentran otras configuraciones atípicas también conducentes a episodios.

### Configuración Tipo A-NF

Entre las condiciones atípicas, destaca una configuración, caracterizada en altura por la presencia de un núcleo frío o baja segregada frente al Norte Chico, y una dorsal sobre la Región de O'Higgins con orientación NE/SO.<sup>13</sup> La circulación de vientos en la troposfera media y baja es predominantemente de componente Noreste o Este, lo que generaría subsidencia forzada en la ladera andina occidental. En superficie se observa una vaguada en el sector costero con valores de presión relativamente altos, y que no presenta la evolución típica de la baja costera asociada a los episodios Tipo A.

Pese a la baja frecuencia con que se presenta, debido al significativo efecto en el empeoramiento de las condiciones de dispersión, ha sido tipificada por CENMA como A-NF.

Para efectos de clasificación y comparación estadística, la configuración A-NF, se ha asimilado al Tipo A de prevalecer la dorsal y cielos despejados, y al Tipo BPF cuando se presenta abundante nubosidad asociada al borde sur del núcleo frío.

## **3.2 Categorías Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica**

Para efectos operacionales, y sobre la base de las condiciones observadas y analizadas, CENMA efectuó una tipificación de condiciones sinópticas asociadas a distintos valores de Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica (PMCA).<sup>14</sup> Se ajusta para Rancagua y se resume como sigue:

### 1. - PMCA BAJO

Representa muy buenas condiciones de dispersión de contaminantes en el valle de Rancagua, y se asocia a las siguientes características observadas o previstas:

- Ausencia de inversión térmica de subsidencia debido a sistemas frontales activos o marcada inestabilidad.

---

<sup>13</sup> CENMA (2009) Tipificación de configuraciones meteorológicas asociadas a distintas categorías de PMCA en Rancagua

<sup>14</sup> CENMA (1998) Tipificación de condiciones meteorológicas asociadas a distintas categorías de PMCA

- Precipitaciones continuas o chubascos asociados a masas de aire inestable.

## 2. - PMCA REGULAR/BAJO

Se asocia en general a buenas condiciones de ventilación y se caracteriza por los siguientes rasgos:

- Inversión térmica de subsidencia débil y elevada.
- Sistemas frontales de regular actividad, precipitaciones aisladas o intermitentes, y condiciones de inestabilidad postfrontal.
- Advecciones de aire húmedo y nubosidad baja desde la costa central.
- Bajas segregadas en altura o núcleos fríos asociados a chubascos y a un marcado debilitamiento de la inversión térmica de subsidencia.

## 3. - PMCA REGULAR

Se asocia a condiciones de ventilación regulares y correspondería a:

- Predominio de altas presiones y normalmente ausencia de vaguadas costeras y precipitaciones.
- Base de la inversión térmica ubicada entre 500 y 800 msnm y tope ubicado entre 1000 y 1500 msnm.
- Advecciones débiles de aire húmedo y/o nubosidad baja desde la costa central.
- Condiciones prefrontales y paso de sistemas frontales débiles o en altura.

## 4. - PMCA REGULAR/ALTO

Se asocia a condiciones de ventilación mala o crítica, y se relaciona con las siguientes configuraciones:

- Presencia de vaguadas costeras asociadas a una configuración tipo A. (Rutllant et al. 1993; Rutllant 1994).
- Predominio de altas presiones en superficie y marcada subsidencia en la Zona Central, asociada o no a la propagación de vaguadas costeras, y caracterizada por marcados movimientos de descenso de masas de aire, intensificación y descenso de la inversión térmica de subsidencia.

- Condiciones prefrontales asociadas a un bajo factor de ventilación. Condición tipo BPF. (Rutllant et al. 1993; Rutllant 1994)
- Inversión térmica de subsidencia con base ubicada bajo 500 msnm, y tope entre 700 y 1200 msnm, con una diferencia térmica entre la base y el tope del orden de 10°C.
- Núcleo frío frente al norte chico sobre el Pacífico y dorsal en la troposfera media sobre la Región de O'Higgins con orientación NE/SO. (CENMA 2009)
- Índice de Circulación Zonal medio o alto.

## 5. - PMCA ALTO

Las configuraciones sinópticas asociadas son similares a las descritas en el punto anterior (PMCA Regular-Alto), pero representaría las condiciones más intensas, mejor definidas y más persistentes de las configuraciones descritas.

- Presencia de vaguada costera asociada a una configuración tipo A. (Rutllant et al. 1993; Rutllant 1994).
- Predominio de altas presiones y marcada subsidencia en la Zona Central, asociada o no al paso de vaguadas costeras; pero caracterizada por marcados movimientos de descenso de masas de aire, e intensificación y descenso de la inversión térmica de subsidencia.
- Condiciones prefrontales asociadas a un bajo coeficiente de ventilación. Condición tipo BPF. (Rutllant et al. 1993; Rutllant 1994).
- Inversión térmica de subsidencia con base normalmente ubicada bajo los 300 msnm, y tope entre 700 y 1000 msnm, con una diferencia térmica entre la base y el tope del orden de 15° C.
- Núcleo frío frente al norte chico sobre el Pacífico y dorsal en la troposfera media sobre la Región de O'Higgins con orientación NE/SO.(CENMA 2009)
- Índice de Circulación Zonal bajo, lo que determinaría una mayor profundización de la configuración, y el lento desplazamiento de la misma, pudiendo traer como consecuencia una mayor duración de las condiciones críticas sobre la Zona Central.

Se desprende de esta tipificación, que las configuraciones asociadas a las categorías 1, 2, y 3 (Bajo, Regular-Bajo, y Regular), corresponderían a condiciones de no-episodios, en tanto las configuraciones asociadas a las categorías 4 y 5 (Regular/Alto y Alto), estarían asociadas por lo general a condiciones de episodios de alta contaminación atmosférica por MP10.

El valor asignado al PMCA dependerá de la intensidad o grado de definición que presente la configuración sinóptica, siendo por lo tanto en ocasiones difícil determinar, en términos absolutos, una clasificación de PMCA para cada configuración.

El PMCA referenciado a Santiago, es aplicable a Rancagua, en la época comprendida entre Abril y Agosto, y se le asocia a concentraciones de material particulado MP10.



CENTRO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

INFORME FINAL  
“OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE PRONÓSTICO DE  
CALIDAD DE AIRE POR MP10 PARA RANCAGUA  
PERIODO 2011”  
UMGCA-014-LMPCA-007-2011

VOLUMEN 1  
INFORME RESUMEN  
VERSIÓN FINAL

---

PREPARADO PARA  
SECRETARIA REGIONAL MINISTERIAL DEL MEDIO AMBIENTE  
REGIÓN DEL LIB. BERNARDO O'HIGGINS

SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2011

## **Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA), Año 2011**

Obra protegida por la Ley 17.336 sobre Propiedad Intelectual

Ninguna parte de este Informe puede ser reproducida, transmitida o almacenada, en cualquier forma o por cualquier medio, sin permiso expreso de CENMA, o de la Institución contratante del estudio.

**Fundación Centro Nacional del Medio Ambiente CENMA**

**Prof. Víctor Pérez, Presidente**

**Prof. Ítalo Serey, Director Ejecutivo**

**Sr. Jaime Durán, Director de Desarrollo Estratégico y Coordinación de Proyectos**

Informe desarrollado por el Laboratorio de Meteorología y Pronóstico de la Calidad del Aire

Equipo de Meteorología:

**Manuel Merino**, Jefe del Laboratorio de Meteorología

**Eugenio Campos**, Meteorólogo Senior, Jefe de Turno

**Maureen Amín**, Meteoróloga Senior, Encargada de Proyecto

**Claudio Cortés**, Meteorólogo, Modelación Numérica

**Diego Campos**, Meteorólogo, Modelación Estadística

**Ricardo Abarca**, Meteorólogo

*Fundación Centro Nacional del Medio Ambiente*

*Av. Larrain 9975, La Reina, CP: 788-0096*

*Santiago, Chile*

*Tel: (56-2) 927 5500, Fax: (56-2) 275 1688*

## Contenido

1	Presentación.....	xx
2	Detalle de las Etapas del Servicio .....	xxi
2.1	Etapa 1: Diseño de Modelo de Pronóstico de Calidad del Aire .....	xxi
2.2	Etapa 2: Análisis de las Herramientas de Diagnóstico y Pronóstico .....	xxii
2.3	Etapa 3: Diseño de Sistema de Pronóstico de Calidad del Aire por MP10 .....	xxii
2.4	Etapa 4: Operación del Sistema de Pronóstico de Calidad del Aire .....	xxiv
2.4.1	Pronóstico Meteorológico Orientado a MP10 Rancagua .....	xxv
2.5	Etapa 5: Seguimiento y Control .....	xxvi
3	Actividades Realizadas .....	xxviii
4	Metodología empleada .....	xxxí
4.1.1	Levantamiento y análisis de la Información de altura .....	xxxí
4.1.2	Levantamiento y análisis de la Información de superficie .....	xxxí
4.1.3	Pronósticos de PMCA y Calidad de Aire .....	xxxii
4.1.4	Información que se utilizó en análisis y pronósticos .....	xxxiii
4.1.5	Horarios en que se entregó la información .....	xxxiv
4.1.6	Información que se incluyó en los reportes .....	xxxv
5	Productos Logrados .....	xxxv
6	Contenido Informe Final.....	xxxvii
7	Equipo de Trabajo y Responsabilidades.....	xxxviii

## 4 Presentación

En conformidad con los Términos de Referencia y la Propuesta Técnica del Servicio “Operación de un Sistema de Pronóstico de Calidad del Aire por MP10 para Rancagua, 2011”, el Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA), ha elaborado el presente Informe Final para la SEREMI de Medio Ambiente de la Región del Libertador Bernardo O’Higgins. El propósito del presente documento (Informe Resumen), es dar cuenta de las etapas, actividades y productos desarrollados durante el Servicio.

Tanto la planificación como la gestión del Servicio estuvieron enfocadas a cumplir el siguiente objetivo general: “Operación del sistema de pronóstico de calidad del aire por MP10 para la estación de Rancagua durante la temporada otoño-invierno 2011, a fin de que la Autoridad competente cuente con información relevante para la toma de decisiones enfocadas a alertar y prevenir los efectos de la contaminación atmosférica en la población”.

Específicamente los objetivos fueron:

- Operar el sistema de pronóstico de calidad del aire por MP10 para la estación de monitoreo de calidad de aire de Rancagua.
- Elaborar reportes diarios de pronósticos especializados de condiciones meteorológicas asociadas a contaminación atmosférica, y un pronóstico de calidad del aire por MP10 para Rancagua que incluya la categoría de calidad del aire esperada.
- Desarrollo del servicio Web Service que permita gestionar y entregar la información en forma oportuna a los Servicios competentes y a la población.
- Implementar el modelo meteorológico de características físicas de alta resolución WRF, para la Región del Libertador Bernardo O’Higgins.
- Operar el sistema de pronóstico incluyendo en forma experimental las estaciones de Rengo y San Fernando.

## 5 Detalle de las Etapas del Servicio

En conformidad a los objetivos y productos esperados, el trabajo se desarrolló en etapas, las que se enumeran y describen a continuación.

- Etapa 1: Diseño del Modelo de Pronóstico de Calidad del Aire
- Etapa 2: Análisis de las Herramientas de Diagnóstico y Pronóstico
- Etapa 3: Diseño del Sistema de Pronóstico de Calidad del Aire por MP10
- Etapa 4: Operación del Sistema de Pronóstico de Calidad del Aire
- Etapa 5: Seguimiento y Control

### 5.1 Etapa 1: Diseño de Modelo de Pronóstico de Calidad del Aire

CENMA a requerimiento de la SEREMI del Medio Ambiente Región del Libertador Bernardo O'Higgins, desarrolló ecuaciones de pronóstico de calidad del aire para Rancagua, considerando un pronóstico de MP10 para un periodo fijo, de 7 am del día siguiente (D1) al día de emisión del pronóstico (D0), hasta las 6 horas del día subsiguiente (D2). El desarrollo se hizo sobre la base de análisis de regresión lineal múltiple con variables meteorológicas pronosticadas por el modelo meteorológico ETA y el PMCA (Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica) desarrollado por CENMA.

El desarrollo de este tipo de ecuaciones que apunta a un promedio fijo de 24 horas, obedeció al propósito de evitar el conocido desfase que se produce al utilizar el promedio móvil de 24 horas como indicador en el sistema de pronóstico<sup>15</sup>.

Las ecuaciones desarrolladas son del tipo:

$$Y_{ss} = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_3 \cdot X_3 + \dots + B_n \cdot X_n$$

Donde,  $Y_{ss}$  es el valor pronosticado de concentraciones para el periodo fijo de 24 horas, para la estación  $ss$ ;  $B_0, B_1, B_2, B_3, \dots, B_n$  son las constantes determinadas en la regresión, mientras  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ , corresponden a las variables explicativas seleccionadas con en el método estadístico de regresión múltiple.

Adicionalmente CENMA, con recursos propios, desarrolló ecuaciones de pronóstico de MP10 para Rengo y San Fernando y propuso su operación de forma experimental en 2011 como producto adicional.

---

<sup>15</sup> CENMA (2000 a 2005) y (2007 a 2010). Análisis Crítico del Sistema de Pronóstico de Calidad de Aire por MP10 para la RM. Informes Finales para la SEREMI de MA de la Región Metropolitana de Santiago

Durante los meses de marzo y abril se chequeó el Modelo de Calidad del Aire y se ajustó su formato, como también el formato del Reporte de Ventilación PMCA.

## **5.2 Etapa 2: Análisis de las Herramientas de Diagnóstico y Pronóstico**

Se realizó un levantamiento y análisis de la Información relevante, que diera cuenta de las condiciones meteorológicas relacionadas con la calidad del aire en la Región, y de las condiciones meteorológicas previstas asociadas a episodios de contaminación atmosférica por MP10.

En la etapa de diagnóstico, se utilizó la información proveniente de las estaciones monitoras de Rancagua, (Rengo y San Fernando)<sup>16</sup>, Imágenes satelitales, cartas de análisis de Modelos Meteorológicos Globales y de Mesoescala, radiosondeo de Santo Domingo e información meteorológica de estaciones sinópticas proporcionada por la Dirección Meteorológica de Chile.

En la etapa de pronóstico se utilizó la información proporcionada por los Modelos Meteorológicos Globales y de Mesoescala a diferentes niveles y distintas variables, Meteogramas, Índice PMCA, Modelos de Calidad del Aire y la opinión experta del equipo de meteorología de CENMA a cargo del pronóstico.

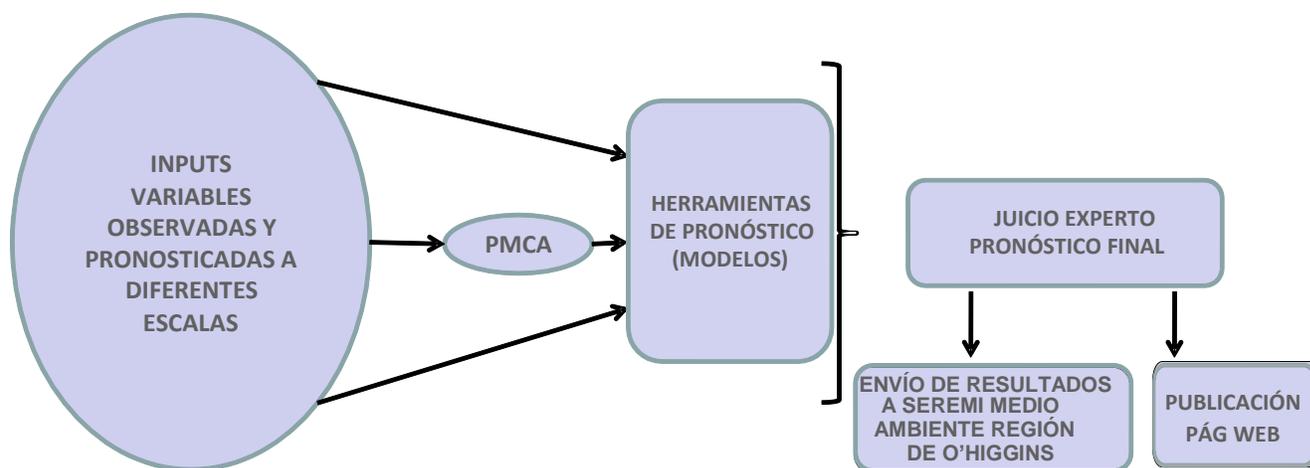
## **5.3 Etapa 3: Diseño de Sistema de Pronóstico de Calidad del Aire por MP10**

La Propuesta del Sistema de Pronóstico incluyó los procedimientos necesarios para lograr los resultados comprometidos. Se aseguraron y coordinaron los recursos humanos involucrados (técnicos y administrativos), se diseñó el rol de turnos requerido para cada día del pronóstico, se diseñaron los reportes y presentaron diariamente resultados.

---

<sup>16</sup> Información disponible y en línea para estas estaciones de monitoreo solo para algunos días durante el periodo de pronóstico

La Figura 1 esquematiza de modo general, el sistema de pronóstico implementado para Rancagua.



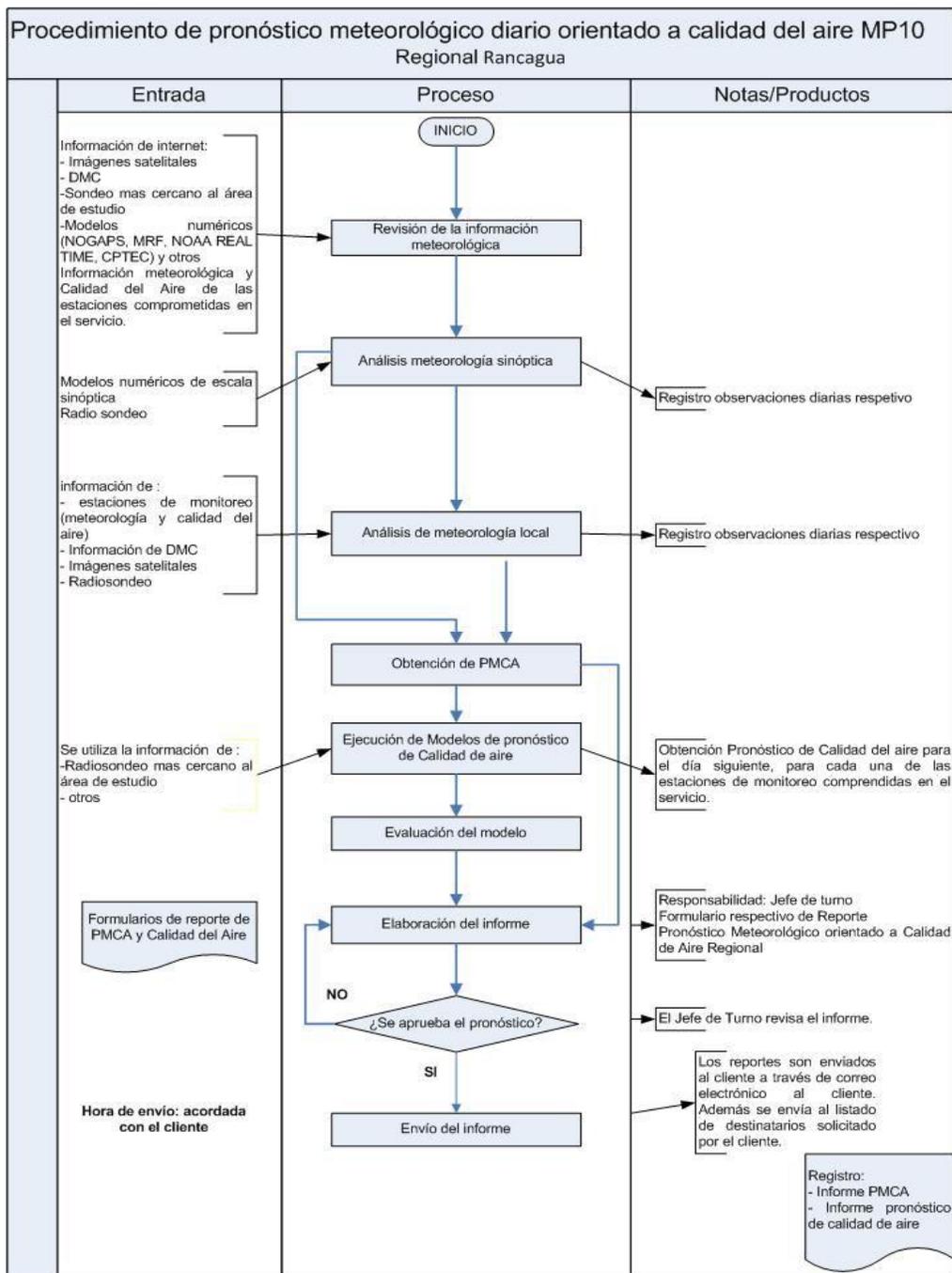
**Figura 1 Sistema de Pronóstico Calidad del Aire por MP10 para Rancagua**

Sobre la base de información observada, pronosticada, y del seguimiento a la condición meteorológica y de calidad del aire, se cuantificó el indicador de las condiciones de ventilación, el PMCA (Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica)<sup>17</sup>, el que junto a otras variables seleccionadas se ingresaron en las ecuaciones de pronóstico. Los resultados fueron analizados e interpretados por el equipo de pronóstico de CENMA, para posteriormente ser enviados a la SEREMI del MA Región del Libertador Bernardo O'Higgins vía email y publicados en el portal web desarrollado para difusión.

<sup>17</sup> CENMA (1998) "Tipificación de condiciones meteorológicas asociadas a diferentes categorías de PMCA"

## 5.4 Etapa 4: Operación del Sistema de Pronóstico de Calidad del Aire

El esquema de la Figura 2 grafica la operación del sistema de pronóstico de PMCA y de Calidad de Aire con las entradas, procesos involucrados y productos obtenidos.



**Figura 2 Procedimiento Operación Sistema de Pronóstico para Rancagua**

El Sistema de Pronóstico contempló la preparación y envío de un informe diario, en que la secuencia de actividades y contenidos fueron los siguientes:

### 5.4.1 Pronóstico Meteorológico Orientado a MP10 Rancagua

Las actividades asociadas al pronóstico se iniciaron diariamente a las 09:00 horas, y resumidamente contemplaron las siguientes etapas:

Etapa 1: Análisis y revisión de información meteorológica a escalas sinóptica, regional y local.

Análisis de la calidad de aire.

Etapa 2: Seguimiento de la evolución de las condiciones meteorológicas y de calidad de aire.

Etapa 3: Elaboración del pronóstico diario con el siguiente contenido:

- Fecha y hora del reporte
- Resumen de valores de MP10 registrados el día anterior (tabla y gráfico)
- Tabla de Contingencia con la evaluación del PMCA
- Condiciones observadas el día anterior, el día de emisión del informe y pronóstico para los 4 días siguientes
- Condición meteorológica
- PMCA a las 8h, PMCA a las 20h
- Temperaturas mínima y máxima, observadas y pronosticadas
- Probabilidad de precipitaciones
- Comentarios.
- Opinión Experta asociada a la calidad del aire para el día siguiente
- Resumen para difusión

Etapa 4: Revisión y envío del Informe

- Revisión del informe
- Aprobación del reporte por el Meteorólogo Jefe de Turno
- Envío del informe a las 16:30 horas

#### 5.4.1.1 Modelo de Calidad del Aire por MP10 para Rancagua

Contenido:

- Fecha y hora del reporte
- Resultados del pronóstico calidad del aire para Rancagua ecuación 1 y ecuación 2 (promedio fijo desde las 07 am del día siguiente a las 06 am del día subsiguiente)

- Resultados pronóstico experimental de calidad del aire para Rengo y San Fernando (promedio fijo desde las 07 am día siguiente a las 06 am del día subsiguiente)
- Tablas de Contingencia con el acierto de las distintas ecuaciones
- Revisión del informe
- Aprobación del reporte por el Meteorólogo Jefe de Turno
- Envío del Informe por correo electrónico a las 16:30 horas
- Publicación del pronóstico orientado a la comunidad en el portal web [www.cenma.cl/pdaohiggins](http://www.cenma.cl/pdaohiggins), en un lenguaje simple y resumido, dadas las características del público objetivo.
- Publicación del pronóstico orientado a la Autoridad (información de uso privado), en el portal web implementado específicamente para estos fines, Información que contiene los archivos originales enviados por correo electrónico (información técnica y resultados de los modelos de calidad del aire).

## 5.5 Etapa 5: Seguimiento y Control

- Diariamente se incluyeron en los reportes respectivos, los aciertos respecto al PMCA pronosticado con 24 horas de anticipación y del pronóstico de Calidad de Aire por MP10.
- Los indicadores de rendimiento correspondieron al acierto del PMCA y del Modelo de Calidad del Aire, cuyos porcentajes de acierto total en ambos casos, debían superar el 75%.
- Para efectos de comparar el acierto del PMCA respecto a un pronóstico de referencia, se incluyó un Skill-Score relativo a la persistencia, esto es, el porcentaje de mejoramiento del pronóstico, respecto a usar un pronóstico de referencia.
- En caso de los modelos de calidad de aire, además del Porcentaje de Acierto (PA) se incluyeron otros dos estimadores estadísticos, el porcentaje de Episodios No Alertados (ENA) y de Falsas Alarmas (FA).
  - ✓ El porcentaje de Episodios No Alertados (ENA) corresponde a la fracción de casos en que habiéndose pronosticado Nivel 0, se observó un Nivel 1, 2 o 3, respecto del total de casos en que se observó Nivel 1, 2 o 3.
  - ✓ El porcentaje de Falsas Alarmas (FA), corresponde al cociente entre el número de casos en que habiéndose observado el Nivel 0, se pronosticó Nivel 1, 2 o 3, y el total de casos en que se pronosticó Nivel 1, 2 o 3.

- Se elaboraron Informes Post Episodios al día siguiente de constatado un evento, tomando como categoría base para el análisis el Nivel Regular. El Informe incluyó el pronóstico de las condiciones meteorológicas y de calidad del aire, la opinión experta, la condición observada, el nivel de calidad del aire alcanzado, y las observaciones y conclusiones respecto a lo pronosticado y constatado.
- El control de calidad de la información utilizada en el sistema de pronóstico se asimiló al proceso de implementación del sistema ISO 9001:2008 en CENMA. A la fecha ya se han ingresado al sistema los procedimientos, formularios y registros relacionados con el pronóstico de calidad del aire para Rancagua.
- Se realizó un análisis periódico de la información proveniente de la Red SIVICA.
- Se diseñó e implementó un Sistema Web Service, quedando operativo desde el 20 de Mayo con ocasión del "Lanzamiento del sistema de Pronóstico" en Rancagua.

## 6 Actividades Realizadas

A fin de cumplir con los objetivos propuestos, se realizaron actividades asociadas a cada una de las etapas del servicio, las que se resumen a continuación en la Tabla 1.

**Tabla 4 Etapas del Servicio y Actividades Asociadas**

<b>DESARROLLO DE ETAPAS Y ACTIVIDADES DEL SERVICIO</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE LOS AVANCES</b>
Adjudicación del Servicio	El Servicio se adjudicó el 26 de abril de 2011.
Entrega Plan de Trabajo	Se envió el Plan de Trabajo el 17 de mayo de 2011, cuyo contenido se refirió a las actividades comprometidas en las Bases Técnicas.  CENMA incluyó como productos adicionales la implementación del Modelo meteorológico de Mesoescala WRF para la Región de O'Higgins; y el Pronóstico Experimental de Calidad del Aire para Rengo y San Fernando.  Se recibieron observaciones de la Contraparte y se reenvió la versión definitiva.
<b>ETAPA 1: Diseño del Modelo de Pronóstico</b>	
Actividad 1: Desarrollo de Ecuaciones para Rengo y San Fernando	Durante los meses de febrero y marzo de 2011, CENMA desarrolló ecuaciones de pronóstico de calidad del aire de tipo estadístico para las estaciones de Rengo y San Fernando.
Actividad 2: Revisión y Actualización Modelo de Calidad del Aire Rancagua y Reporte PMCA	Durante los meses de marzo y abril se chequeó el Modelo de Calidad del Aire y se ajustó su formato. También se ajustó el formato del Reporte de Ventilación PMCA. El ajuste de los formatos se basó en los requerimientos del Sistema de Calidad ISO 9001.  A fines del periodo de pronóstico 2011, se actualizaron los coeficientes de las ecuaciones. Los resultados están incluidos en el Volumen 4 de este Informe Final.
<b>ETAPA 2: Análisis de las Herramientas de Diagnóstico y Pronóstico</b>	
Actividad 1: Análisis y seguimiento variables meteorológicas y de calidad del aire a utilizar, e inicio de la marcha blanca	Se efectuó una Marcha Blanca del Servicio desde el 18 al 25 de abril de 2011, consistente en la elaboración del PMCA y la operación del Modelo de Calidad del Aire para Rancagua, Rengo y San Fernando.  A partir del 26 de abril de 2011 se inició en forma oficial al Sistema de Pronóstico, extendiéndose hasta el 17 de septiembre.
Actividad 2: Análisis y seguimiento de variables meteorológicas pronosticadas	Se efectuó una Marcha Blanca del Sistema de Pronóstico desde el 18 al 25 de abril de 2011, incluyendo pronósticos de PMCA y de Calidad de Aire.

	<p>Solo para algunos días pudo verificarse el acierto de los Pronósticos, debido a la falta de información de las estaciones de la Red SIVICA.</p> <p>Desde el 26 de abril se oficializó con la Contraparte Técnica el envío del Pronóstico, extendiéndose hasta el 17 de septiembre</p>
<b>ETAPA 3: Diseño Sistema de Pronóstico</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE LOS AVANCES</b>
Actividad 1: Diseño del Sistema de Pronóstico	<p>Tanto el Diseño como el Procedimiento del Sistema de Pronóstico fueron realizados en los meses de marzo y abril.</p> <p>Todos los procedimientos y formularios requeridos para la realización del Servicio fueron incluidos en el proceso de implementación de ISO 9001 que CENMA comenzó en Diciembre de 2010.</p>
Actividad 2: Diseño del Rol de Turnos de los Meteorólogos	Se elaboró el Rol de Turnos durante el mes de abril, a fin de asegurar el envío diario e ininterrumpido del Pronóstico. Se incluyeron turnos los fines de semana y festivos.
Actividad 3: Nuevas contrataciones	<p>Durante el mes de Enero se contrató a un Meteorólogo encargado del Desarrollo de Modelos de Calidad del Aire de Tipo Estadístico.</p> <p>Durante el mes de Mayo se procedió a la contratación de un Meteorólogo Senior de vasta experiencia en Pronósticos de Calidad del Aire, y de un Meteorólogo Previsionista.</p>
<b>ETAPA 4: Operación del Sistema de Pronóstico</b>	
Actividad 1: Elaboración de pronósticos de PMCA y envío de reportes diarios	Preparación y envío del pronóstico PMCA desde el 26 de abril hasta el 17 de septiembre de 2011.
Actividad 2: Elaboración de pronósticos de Calidad del Aire y envío de reportes diarios	Preparación y envío del pronóstico de Calidad del Aire desde el 26 de abril hasta el 17 de septiembre de 2011.
<b>ETAPA 5: Seguimiento y Control</b>	
Actividad 1: Evaluación del acierto del PMCA	<p>Mediante Tablas de Contingencia, se incluyó una evaluación del acierto del PMCA en los Reporte Diario a partir del 01 de mayo y hasta el 17 de septiembre de 2011</p> <p>La evaluación final del PMCA se incorpora en Volumen 2 de este Informe Final.</p>
Actividad 2: Evaluación del Acierto del Modelo Calidad del Aire	<p>Mediante Tablas de Contingencia, se incluyó la evaluación del acierto del Modelo de Calidad del Aire, diariamente a partir del 01 de mayo y hasta el 17 de septiembre de 2011</p> <p>La evaluación mensual y del periodo de los Modelos de Calidad del Aire se incorpora en el Volumen 2 de este Informe Final.</p>
Actividad 3: Diseño e Implementación de	A requerimiento de la SEREMI de Medio Ambiente de la Región del

Sistema Web Service	<p>Libertador Bernardo O'Higgins, se adelantó el Diseño e Implementación del Sistema Web Service, quedando operativo desde el 20 de Mayo con ocasión del Lanzamiento del sistema de Pronóstico.</p> <p>Los resultados de esta actividad se incorporaron en el Volumen 5 de este Informe Final.</p>
Actividad 4: Reuniones de Coordinación	Se realizaron 3 reuniones de coordinación en dependencias de la SEREMI de Medio Ambiente de la Región del Libertador Bernardo O'Higgins; el 29 de abril, 8 de julio y en octubre de 2011.
Actividad 5: Seminario	El 12 de agosto de 2011, se realizó en Rancagua el Seminario "Sistemas de Pronóstico de Calidad del Aire, Experiencias Internacionales y Nacionales", evento organizado por la SEREMI de Medio Ambiente de la Región de O'Higgins y CENMA.
Actividad 6: Informes de Avance	Se enviaron dos Informes de Avance, los días 14 de Julio y 12 de Septiembre de 2011. El contenido fue consensuado y aprobado con la contraparte técnica del estudio.
Actividad 7: Análisis del Sistema de Pronóstico	A la luz de los resultados obtenidos y los desafíos de la región, se elaboraron propuestas de mejoramiento para la gestión de episodios, incluidas en el Volumen 8 de este Informe Final.
Actividad 8: Informes Post Episodio	<p>A solicitud de la SEREMI de Medio Ambiente de la Región de O'Higgins, se enviaron Informes Post Episodio al día siguiente de su constatación, tomando como categoría base para el análisis el Nivel Regular.</p> <p>El Informe incluyó el pronóstico de las condiciones meteorológicas y de calidad del aire esperada, la opinión experta, la condición observada, el nivel de calidad del aire alcanzado, y las observaciones y conclusiones respecto a lo pronosticado respecto de lo constatado.</p> <p>Se incluyen los resultados de los análisis de episodios en el Volumen 3 de este Informe Final.</p>
<b>Productos Adicionales</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE LOS AVANCES</b>
Actividad 1: Diseño de ecuaciones de Pronóstico de Calidad del Aire para Rengo y San Fernando	Las ecuaciones de pronóstico fueron diseñadas para operar de forma experimental, paralelamente al Modelo de calidad del aire para Rancagua.
Actividad 2: Implementación Modelo WRF para la Región	Implementado a partir de mayo de 2011. Los resultados de la implementación están contenidos en el Volumen 6 de este Informe Final.
Actividad 3: Análisis Red SIVICA	En virtud de la importancia de contar con datos fidedignos de calidad de aire para el pronóstico e información a la población, se efectuó un análisis de los datos registrados en la estación de Rancagua perteneciente a la red SIVICA. (Volumen 7 de este Informe Final.)

## 7 Metodología empleada

### 7.1.1 Levantamiento y análisis de la Información de altura

A través de las mediciones efectuadas del perfil vertical de la atmósfera por el radiosondeo de Santo Domingo operado por la DMC<sup>18</sup>, se analizaron parámetros meteorológicos obtenidos de forma directa como temperatura, humedad y viento. Se analizaron además los índices de estabilidad, niveles de condensación, energía convectiva potencial disponible, y total de agua precipitable; todos éstos, índices calculados en forma indirecta y que se incluyen en la información tipo texto que se descarga de los radiosondeos de Santo Domingo. Estos índices fueron utilizados en la fase de diagnóstico, principalmente en la obtención del PMCA actual, ya que contienen información sobre la estabilidad atmosférica, y resumen de buena forma, el comportamiento general de la atmósfera a escala sinóptica. Los datos se obtuvieron vía internet<sup>19</sup>, y fueron procesados y respaldados digitalmente cada mes.

Respecto a la pertinencia del uso de la información del radiosonda, se indica que la distancia entre Santo Domingo y Rancagua es de aproximadamente 150 km, lo que determina que las mediciones efectuadas en Santo Domingo, sean representativas de modo general para Rancagua, con las diferencias esperables a niveles bajos de una estación costera y una estación ubicada al interior<sup>20</sup>.

### 7.1.2 Levantamiento y análisis de la Información de superficie

Todo el sistema de pronóstico de calidad del aire para la Región, está basado a nivel de superficie (escala local) en las estaciones de monitoreo de la red SIVICA (Rancagua, Rengo y San Fernando), información utilizada para confeccionar las ecuaciones de pronóstico, dar seguimiento a la condición de calidad del aire local y evaluar finalmente el pronóstico (estaciones de control).

Ahora bien, en ocasiones ante la poca certeza de la calidad de la información de estas estaciones, y en otros casos debido a la ausencia de información, CENMA tuvo que incorporar al análisis otras redes alternativas, a fin de cumplir con el Servicio.

---

<sup>18</sup> Dirección Meteorológica de Chile

<sup>19</sup> Universidad de Wyoming (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>)

<sup>20</sup> De acuerdo a la OMM, una estación de radiosondeo tiene un radio de representatividad de 200km.

<sup>7</sup> DGAC\_DMC (<http://metaer.meteochile.gob.cl/>)

Las estaciones alternativas utilizadas fueron el aeródromo de Rancagua<sup>21</sup> y las estaciones agroclimáticas de Codegua, Punta Cortés y El Pangui<sup>22</sup>.

De la estación del aeródromo de Rancagua, se analizó la información en línea disponible entre las 10 am y 6 pm aproximadamente: datos de tiempo presente, temperatura, humedad, dirección y velocidad del viento, y nubosidad.

Cuando se requirió, se analizó también información de temperatura y precipitación de las estaciones de Punta Cortés, El Pangui y Codegua, de la red Agroclima, como representativos de Rancagua.

De modo general, cuando no se contó con información de calidad del aire en línea, como no existen otras redes alternativas que midan MP10 en la región en tiempo real, se analizó la calidad del aire de la Región Metropolitana (Red MACAM).

El recurrir a información alternativa no es lo óptimo, ya que se utiliza normalmente para comparar situaciones y proporcionar más información al diagnóstico o constatación de un evento. Sin embargo CENMA, con el propósito de cumplir sus compromisos de un pronóstico diario, duplicó el esfuerzo levantando nueva información de superficie y utilizando herramientas alternativas. Una vez que la información de la página web SIVICA se actualizaba (normalmente una vez al día), los datos iban siendo incorporados a la evaluación del pronóstico y al análisis de los episodios.

### **7.1.3 Pronósticos de PMCA y Calidad de Aire**

Se utilizó el Sistema de Pronóstico desarrollado y operado por CENMA para el SEREMI de MA Región del Libertador Bernardo O'Higgins.

Se efectuó análisis y seguimiento continuo de la evolución de las condiciones meteorológicas asociadas a calidad de aire en Rancagua, desde la fecha de inicio de estudio, hasta el 17 de Septiembre de 2011. Esta tarea fue realizada diariamente y de forma ininterrumpida por meteorólogos con vasta experiencia en pronósticos de calidad de aire, integrando sistemas de turnos que incluyeron fines de semana y festivos.

---

<sup>8</sup> FDF-INIA-DMC (<http://www.agroclima.cl>)

Se preparó y envió un pronóstico de Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica (PMCA) y de Calidad de Aire por MP10 con los resultados de los modelos. Se operó el sistema pronóstico con la metodología desarrollada y validada a la fecha.

La entrega de los resultados de los Modelos fue acompañada por una opinión experta de los profesionales que operaron el sistema de pronóstico, una interpretación de los resultados, y un pronunciamiento respecto a las condiciones previstas de ventilación y calidad de aire por MP10.

Para evaluar las condiciones meteorológicas a escala local se utilizó la información de monitoreo de Rancagua, Rengo y San Fernando, (de contar con datos), y los registros del Aeródromo de Rancagua, y de las estaciones de Codegua, El Pangui y Punta Cortés.

Para el análisis de las condiciones a escalas regional y sinóptica se utilizaron imágenes satelitales, radiosondeos, mapas y meteogramas de diferentes modelos numéricos a diferentes escalas de tiempo.

#### **7.1.4 Información que se utilizó en análisis y pronósticos**

La información que se analizó y a la que se hizo un seguimiento continuo fue la siguiente:

##### Información de escala sinóptica o gran escala

- Cartas de análisis y pronóstico de modelos numéricos a una resolución espacial aproximada de 50 Km (Modelos NCEP, NOGAPS, GFS, ECMWF)
- Meteogramas obtenidos en sistema de despliegue GRADS desarrollado en CENMA, y de modelos ETA y NOAA
- Imágenes satelitales
- Cartas sinópticas de superficie
- Radiosondeos de Santo Domingo
- Información meteorológica de estaciones ubicadas en la Zona Central de la red sinóptica de la Dirección Meteorológica de Chile).

##### Información de mesoescala o escala Regional

Cartas de análisis y pronóstico de modelos numéricos a una resolución espacial aproximada de 4 Km.:

- Modelo WRF operado por CENMA y DGF<sup>23</sup>
- Modelo MM5 operado por el DGF y la DMC

#### Información de escala local

- Información meteorológica y de calidad de aire de las estaciones de monitoreo de Rancagua, Rengo y San Fernando
- Información meteorológica del Aeródromo de Rancagua.
- Información agroclimática de las estaciones de Punta Cortés, Codegua y El Pangui

#### **7.1.5 Horarios en que se entregó la información**

Los pronósticos estuvieron disponibles en horarios que permitieron apoyar a la SEREMI MA Región de O'Higgins para la oportuna toma de medidas, consistente en el aviso y recomendaciones a la población. El horario acordado con el SEREMI MMA Región de O'Higgins para el envío del informe diario fue a las 16:30 horas vía email.

En ocasiones se estableció comunicación telefónica desde CENMA con la finalidad de proporcionar a la contraparte técnica, la opinión experta respecto a las condiciones meteorológicas y de calidad de aire previstas y/o aclarar dudas referidas a la operación y resultados del modelo.

La publicación del pronóstico en el sitio web destinado a la difusión masiva se realizó alrededor de las 17 horas.

Respecto al portal web desarrollado para este Proyecto, se indica que se encuentra disponible y en línea. Contiene los reportes y pronósticos emitidos por CENMA durante el periodo 01 de Junio a 17 de Septiembre de 2011, los informes post-episodio y la versión de difusión orientada a la comunidad. También dispone de un archivo mensual y un cuadro de búsqueda, haciendo de fácil acceso toda la información histórica almacenada en la base de datos del sitio.

A la fecha, ya finalizada la temporada de pronósticos, el portal orientado a la comunidad muestra un mensaje indicando a los usuarios el cese de la temporada y las razones técnicas de ello.

CENMA posee las capacidades tecnológicas para asegurar su permanencia en la red, por lo que ambos portales permanecerán en línea y accesibles tanto por los usuarios

---

<sup>23</sup> Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile

como por la Autoridad, debido a que se encuentran operando en un servidor de alta disponibilidad considerado como una máquina de misión crítica, específicamente montado para proveer servicios web. Posee un sistema de conectividad ilimitada, políticas de respaldo de información y sistemas de respaldo de energía, máquina que también aloja el sitio web institucional de CENMA.

#### **7.1.6 Información que se incluyó en los reportes**

La información que se incluyó en los reportes diarios fue consensuada previamente con la SEREMI del MA Región del Libertador Bernardo O`Higgins, y se resume a continuación:

- Tabla resumen con los valores de MP10 observados en Rancagua el día anterior
- Gráfico de las concentraciones horarias y del promedio móvil de 24 horas de MP10 de los últimos dos días registrados en Rancagua.
- Tabla resumen con los valores de MP10 observados el mismo día en Rancagua (concentración horaria y promedio de 24 horas)
- Tabla de contingencia con la evaluación actualizada del pronóstico del PMCA
- Condiciones meteorológicas y categorías de PMCA esperados para el mismo día, y para los cuatro días siguientes.
- Temperaturas máximas y mínimas probables para el mismo día y cinco días siguientes.
- Probabilidad de precipitación para el mismo día y cinco días siguientes.
- Comentarios respecto a la estabilidad y/o condición sinóptica.
- Resultados de los modelos de calidad de aire para Rancagua
- Tabla de contingencia con la evaluación actualizada del pronóstico de calidad de aire.
- Opinión experta

## **8 Productos Logrados**

En resumen, las actividades realizadas permitieron generar los siguientes productos:

- ✓ 140 Reportes diarios: que dieron cuenta de la operación del sistema de pronóstico, traducido en un pronóstico de las condiciones meteorológicas de ventilación (PMCA), y un pronóstico de calidad del aire por MP10 para Rancagua, Rengo y San Fernando

- ✓ Tablas de Acierto del pronóstico: incorporadas diariamente en los Reportes indicando la evaluación de las herramientas de pronóstico utilizadas
- ✓ Informes post episodio: Informes enviados a la contraparte con el análisis de los episodios de MP10 constatados al día siguiente de producidos.
- ✓ Volumen de Informe Final con el Ajuste de las ecuaciones de MP10 para generar ecuaciones de pronóstico de MP2.5
- ✓ Volumen de Informe Final con los resultados de la Actualización de los coeficientes de las ecuaciones originales
- ✓ Una plataforma Web Service destinada a la difusión del pronóstico: Diseño e implementación de servicio web
- ✓ Salidas gráficas del modelo de mesoescala WRF para la región de O'Higgins: implementación y pruebas del Modelo
- ✓ Volumen de Informe Final con el Análisis de la información proporcionada por la Red SIVICA
- ✓ Volumen de Informe Final que da cuenta de la gestión de episodios y las propuestas de mejoramiento
- ✓ Base de datos en formato Excel con información meteorológica y calidad del aire sistematizada y utilizada durante el periodo de pronóstico

## 9 Contenido Informe Final

El Informe Final consta de los siguientes volúmenes:

- **Resumen Ejecutivo**
- **Informe de Difusión:** Con fines de divulgación.
- **Volumen 1\_Informe Resumen:** Resumen de etapas del servicio, actividades y productos.
- **Volumen 2\_Evaluación de las Herramientas de Pronóstico Utilizadas:** Evaluación del desempeño PMCA y Modelos de Calidad del Aire.
- **Volumen 3\_Análisis de los Episodios de Contaminación Constatados:** Análisis de eventos de contaminación por MP10 en Rancagua.
- **Volumen 4\_Actualización de los Coeficientes de las Ecuaciones de Pronóstico para MP10:** Actualización de las ecuaciones de pronóstico por MP10 originales.
- **Volumen 5\_Diseño e Implementación de Web Service:** Implementación de una página web para difusión del pronóstico.
- **Volumen 6\_Implementación Modelo WRF CENMA:** Implementación del modelo de mesoescala WRF para la región, y perspectivas de su uso.
- **Volumen 7\_Análisis del Funcionamiento de la Red SIVICA:** Análisis de las variables meteorológicas y calidad del aire de Rancagua.
- **Volumen 8\_Análisis y Propuestas de Mejoramiento al Sistema de Pronóstico y Gestión de Episodios en Rancagua:** Lineamientos de mejoramiento al actual sistema de pronóstico de episodios críticos y aporte a la gestión ambiental de la región.
- **Base de Datos del Pronóstico:** Data levantada a lo largo del Servicio.

## 10 Equipo de Trabajo y Responsabilidades

La tabla siguiente señala el equipo CENMA responsable del Servicio y sus responsabilidades

**Tabla2 Equipo de trabajo y responsabilidades**

<b>Responsable</b>	<b>Funciones</b>
Director Ejecutivo Italo Serey	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Asegurar las condiciones para el desarrollo de las actividades del sistema de pronóstico.</li> </ul>
Director de Desarrollo Estratégico y Coordinación de Proyectos Jaime Durán	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Establecer contacto con las autoridades medioambientales de la Región de O'Higgins y consensuar lineamientos de desarrollo estratégico.</li> <li>• Coordinar externa e internamente el Proyecto</li> <li>• Revisión y aprobación de informes</li> </ul>
Jefe del Laboratorio  Manuel Merino	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Supervisar el Sistema de Pronóstico</li> <li>• Análisis y Evaluación de la información técnica, administrativa y de gestión.</li> <li>• Organización del equipo profesional.</li> <li>• Asegurar el cumplimiento del procedimiento del sistema de pronóstico</li> <li>• Preparar, revisar y aprobar informes especializados</li> </ul>
Encargada de Proyecto Jefe de Turno Maureen Amín	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coordinar la realización del pronóstico</li> <li>• Establecer comunicación habitual con la SEREMI MA Región de O'Higgins</li> <li>• Proponer mejoras al Sistema</li> <li>• Servir de Contraparte Técnica de este Servicio</li> <li>• Participar en los Pronósticos de Calidad del Aire</li> <li>• Elaborar informes especializados</li> </ul>
Jefe de Turno Eugenio Campos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Analizar la información de la red SIVICA y de DMC</li> <li>• Obtener y analizar modelos numéricos</li> <li>• Realizar el seguimiento continuo de variables meteorológicas y de calidad del aire en la cuenca</li> <li>• Elaborar pronósticos especializados de meteorología aplicada</li> <li>• Revisar y aprobar los informes de pronóstico meteorológico orientado a calidad del aire</li> <li>• Enviar reportes al SEREMI de MA Región de O'Higgins y a quienes este estime conveniente, a través de correo electrónico, en un formato debidamente protegido</li> </ul>
Meteorólogo Diego Campos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desarrollar y Actualizar los Modelos de Calidad del Aire</li> <li>• Apoyo en el Diseño del Sistema Web Service</li> <li>• Recibir, ordenar y analizar la información de la red SIVICA regional y de la DMC</li> <li>• Obtener y analizar modelos numéricos</li> <li>• Obtener información de satélites (Meteorología)</li> <li>• Realizar el seguimiento continuo de variables meteorológicas y de calidad del aire en la Región de O'Higgins</li> <li>• Elaborar informes especializados</li> <li>• Respalda la información utilizada durante el día</li> </ul>

Responsable	Funciones
Meteorólogo Claudio Cortés	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseñar y operar el Sistema Web Service</li> <li>• Desarrollar y Operar el Modelo WRF</li> <li>• Proporcionar respaldo informático a la operación del pronóstico</li> </ul>
Meteorólogo Ricardo Abarca	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recibir, ordenar y analizar la información de la red SIVICA regional y de la DMC</li> <li>• Obtener y analizar modelos numéricos</li> <li>• Obtener información de satélites (Meteorología)</li> <li>• Realizar el seguimiento continuo de variables meteorológicas y de calidad del aire en la Región de O'Higgins</li> <li>• Respaldar la información utilizada durante el día</li> </ul>



CENTRO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

INFORME FINAL  
“OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE PRONÓSTICO DE  
CALIDAD DE AIRE POR MP10 PARA RANCAGUA  
PERIODO 2011”

UMGCA-014-LMPCA-007-2011

VOLUMEN 2  
EVALUACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE PRONÓSTICO  
VERSIÓN FINAL

---

PREPARADO PARA

SECRETARIA REGIONAL MINISTERIAL DEL MEDIO AMBIENTE  
REGIÓN DEL LIBERTADOR BERNARDO O'HIGGINS

SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2011

## Contenido

1	Antecedentes .....	i
2	Evaluación de las herramientas de pronóstico período 2011 .....	i
2.1	Evaluación del Pronóstico de PMCA a 24 horas .....	ii
2.1.1	Distribución de categorías de PMCA (Condición relevante) .....	ii
2.1.2	Detalles evaluación del pronóstico de PMCA a 24 horas .....	iv
2.1.3	Tablas de Contingencia Evaluación del PMCA .....	v
2.1.4	Resumen mensual .....	vii
2.1.5	Comparación PMCA y MP10.....	viii
2.2	Evaluación del Modelo de Calidad del Aire .....	ix
2.2.1	Evaluación del Modelo de MP10_ Ecuación 1 Rancagua.....	xi
2.2.2	Evaluación del Modelo de MP10_ Ecuación 2 Rancagua .....	xii
2.2.3	Evaluación del Modelo de MP10 Incluyendo Opinión Experta y Episodio/No Episodio-Ecuación 1 .....	xii
2.2.4	Evaluación Modelo MP10 Incluyendo Opinión Experta y Episodio/No Episodio-Ecuación 2 .....	xiii
2.3	Pronóstico Experimental para Rengo y San Fernando .....	xiii
2.4	Conclusiones del desempeño de las herramientas de pronóstico .....	xvi
3	Anexos .....	xx
3.1	Comparación estaciones de monitoreo Rancagua-El Bosque .....	xx
3.1.1	Comportamiento estaciones de Rancagua y El Bosque en 2006 y 2011 .....	xx
3.2	Tablas de Contingencia Mensuales PMCA.....	xxi
3.2.1	Evaluación mensual PMCA pronosticado con 24 horas de anticipación .....	xxi
3.2.2	Evaluación mensual PMCA pronosticado con 48 horas de anticipación .....	xxiv



## 11 Antecedentes

En conformidad con los objetivos planteados y los productos esperados, el servicio se desarrolló en etapas (ver Volumen1 de este Informe) las cuales sirvieron para generar y operar las herramientas de pronóstico que se evalúan en este Volumen.

Las principales herramientas utilizadas en el Sistema de Pronóstico de Calidad del Aire para Rancagua, Rengo y San Fernando fueron: la generación del Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica (PMCA), la operación del Modelo de Calidad del Aire, y la inclusión de la Opinión Experta. Los resultados fueron informados diariamente a la contraparte utilizando herramientas de seguimiento y control mediante tablas de contingencia con la evaluación de los pronósticos.

## 12 Evaluación de las herramientas de pronóstico período 2011

El PMCA, Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica, es un índice que integra los factores meteorológicos relacionados con la calidad del aire. Fue desarrollado por CENMA en 1998 considerando las investigaciones de Rutllant y Garreaud<sup>24</sup>. Es inversamente proporcional al factor de ventilación, siendo este factor el producto de la altura de la capa de mezcla por el viento medio dentro de ésta, después del mediodía<sup>25</sup>  
<sup>26</sup>.

CENMA desarrolló una tipificación de configuraciones meteorológicas asociadas a distintas categorías de PMCA<sup>27</sup>, las que fueron validadas para la región de O'Higgins.

El Modelo de Calidad del Aire utilizado en Rancagua<sup>28</sup> y experimentalmente en las estaciones de Rengo y San Fernando<sup>29</sup>, consisten en ecuaciones de corte estadístico, que cuantifican el nivel previsto de MP10 entre las 7AM del día 1 y las 6 AM del día 2, correspondiendo el día de emisión del pronóstico al día 0.

---

<sup>24</sup> Rutllant J. (1994). On the generation of coastal lows in Central Chile

<sup>25</sup> Rutllant et al (1993). Revista Tralka DGF. U de Chile

<sup>26</sup> Rutllant J. y Garreaud R. (1995) Meteorological Air Pollution Potential for Santiago, Chile: Towards an Objective Weather Forecasting.

<sup>27</sup> CENMA (1998) Tipificación de condiciones meteorológicas asociadas a distintas categorías de PMCA

<sup>28</sup> CENMA (2010) Desarrollo y operación de un modelo de MP10 para la ciudad de Rancagua

<sup>29</sup> CENMA (2011) Desarrollo de modelos de pronóstico de MP10 para Rengo y San Fernando

Los resultados que se presentan a continuación, cuantifican el nivel de acierto del pronóstico del PMCA y del Modelo de Calidad de Aire utilizado en el periodo 01 mayo al 17 de septiembre de 2011.

## 12.1 Evaluación del Pronóstico de PMCA a 24 horas

Se comparó el valor de PMCA pronosticado con el valor observado de acuerdo al análisis de las 5 categorías contenidas en la tabla siguiente:

**Tabla 5** Valores asignados a las categorías de PMCA

<b>Categoría de PMCA</b>	<b>Valor Asignado</b>
Bajo	1
Regular/Bajo	2
Regular	3
Regular/Alto	4
Alto	5

En términos generales, las categorías PMCA1 y PMCA2 están asociadas a buenas condiciones de ventilación. La categoría PMCA3 a condiciones de ventilación regulares, y las categorías PMCA4 y PMCA5 a mala ventilación y condiciones favorables para la ocurrencia de episodios de alta contaminación atmosférica por MP10.

### 12.1.1 Distribución de categorías de PMCA (Condición relevante)

La tabla siguiente muestra la distribución de las categorías de PMCA para los 140 días de pronóstico en 2011, considerando el PMCA relevante (categorías más alta) del día.

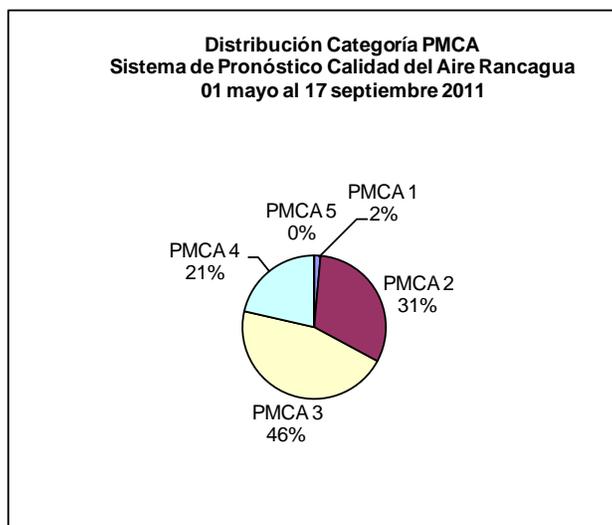
**Tabla 6** Constatación de Categorías de PMCA

<b>Categoría de PMCA</b>	<b>Nº Casos Temporada 2011</b>
1	2
2	44
3	64
4	30
5	0

Total	140
-------	-----

El PMCA considerado en la Tabla 2 corresponde al más alto registrado en el día de validez del pronóstico (día 1), considerando el PMCA de las 08 horas (representativo de la mañana) y el PMCA de las 20 horas (representativo de la noche).

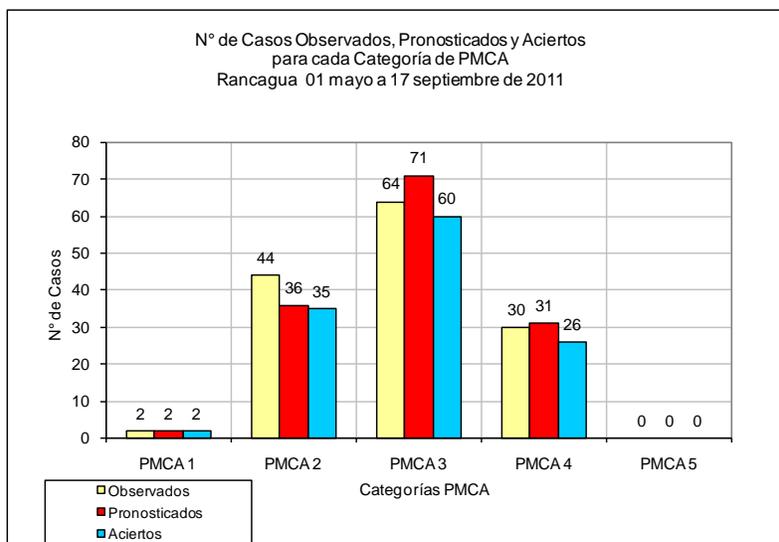
Se aprecia que las categorías más recurrentes durante el período 2011 correspondieron al PMCA3 y PMCA2, asociadas a condiciones de ventilación Regulares y Buenas, respectivamente. Les siguen en orden decreciente el PMCA4 correspondiente a Malas condiciones de ventilación y el PMCA1 correspondiente a Muy Buenas condiciones de ventilación. No se registraron casos del PMCA 5 asociado a Muy Malas condiciones de ventilación.



**Figura 1 Distribución porcentual categorías de PMCA observado durante la temporada de pronóstico 2011**

La Figura 1 muestra que la suma de los PMCA atribuibles a condiciones de ventilación muy buena, buena y regular (PMCA 1, PMCA2 y PMCA3) alcanzó a un 79%. De acuerdo a este indicador, en el 21% de los casos (30 días de un total de 140), se observaron condiciones meteorológicas asociadas a mala ventilación (PMCA 4).

En la Figura 2 se compara para cada categoría de PMCA, el número de casos observados, pronosticados y los aciertos durante la temporada.



**Figura 2 Distribución del PMCA observado, pronosticado y acierto por categorías, temporada 2011**

Respecto a la Figura 2, para el PMCA1 el acierto es pleno, en el PMCA2 se observa un subpronóstico, y en las categorías PMCA3 y PMCA4 un sobre pronóstico.

### 12.1.2 Detalles evaluación del pronóstico de PMCA a 24 horas

La evaluación de las condiciones pronosticadas y observadas se resume en las Tablas de contingencia que se presentan a continuación, incluyéndose un Skill-Score relativo a la persistencia. Este Score representa el mejoramiento del pronóstico emitido respecto a un pronóstico de referencia, por ejemplo pronóstico de persistencia, climatología u otro. En este informe se usará el pronóstico de persistencia, que consiste en considerar como pronóstico la persistencia de las condiciones observadas; esto es, se asume que las condiciones que se presentarán al día siguiente serán las mismas que las registradas el día de emisión del pronóstico.

$$SS (ref) = \frac{(A - A_{ref})}{(A_{perf} - A_{ref})} \times 100$$

Donde A es el acierto del pronóstico, Aref es el acierto del pronóstico de referencia, y Aperf corresponde al acierto de un pronóstico perfecto.

- SS (ref) >0, indica que el pronóstico evaluado es mejor que el pronóstico de referencia. El valor representa el porcentaje de mejoramiento.
- SS (ref) =0, indica que no hay mejoramiento respecto al pronóstico de referencia, esto es, el desempeño del pronóstico evaluado sería igual al de referencia.

- $SS (ref) < 0$ , indica que el pronóstico evaluado es inferior al pronóstico de referencia.

Cuando el pronóstico de referencia ( $A_{ref}$ ) se hace igual a 1 (100%), el Skill-Score queda indefinido ya que  $A_{perf} = 1$ , y el denominador de la expresión ( $A_{perf} - A_{ref}$ ) se hace igual a 0. Sin embargo las variables condiciones meteorológicas características de latitudes medias donde se encuentra Rancagua, no dan lugar a que se presente esta situación, menos aún considerando lo extenso del periodo de análisis (un mes).

### 12.1.3 Tablas de Contingencia Evaluación del PMCA

Las tablas que se presentan a continuación muestran la evaluación del PMCA por categorías, considerando el PMCA observado y pronosticado, para el periodo 01 de mayo al 17 de septiembre de 2011, 140 días en total.

**Tabla 3 Evaluación del PMCA pronosticado con 24 horas de anticipación**

01 mayo - 17septiembre 2011

PMCA	PMCA Observado					Total	% Acierto
	PMCA 1	PMCA 2	PMCA 3	PMCA 4	PMCA 5		
Pronos 24							
PMCA 1	2	0	0	0	0	2	100.0
PMCA 2	0	35	1	0	0	36	97.2
PMCA 3	0	7	60	4	0	71	84.5
PMCA 4	0	2	3	26	0	31	83.9
PMCA 5	0	0	0	0	0	0	-----
Total	2	44	64	30	0	140	
%Acierto	100.0	79.5	93.8	86.7	-----		
N° Aciertos	123						
%Acierto Total	87.9						
Skill-Score	77.3						

La Tabla 3 muestra un alto porcentaje respecto del acierto total (87.9%) y también por categorías.

Respecto al PMCA pronosticado (filas), los porcentajes de acierto por categoría son:

- PMCA 1 (Bajo): 100%
- PMCA 2 (Regular/Bajo): 97.2%
- PMCA 3 (Regular): 84.5%
- PMCA 4 (Regular/Alto): 83.9%

Respecto al PMCA observado (columnas), los porcentajes de acierto por categoría son:

- PMCA 1 (Bajo): 100%
- PMCA 2 (Regular/Bajo): 79.5%

- PMCA 3 (Regular): 93.8%
- PMCA 4 (Regular/Alto): 86.7%

El Skill-Score relativo a la persistencia indica que el pronóstico de PMCA a 24 horas fue significativamente mejor que el de referencia, alcanzando el mejoramiento a un 77.3%.

**Tabla 4 Evaluación del PMCA pronosticado con 48 horas de anticipación**

01 mayo - 17septiembre 2011

PMCA	PMCA Observado						
Pronos 48	PMCA 1	PMCA 2	PMCA 3	PMCA 4	PMCA 5	Total	% Acierto
PMCA 1	2	0	0	0	0	2	100.0
PMCA 2	0	31	4	0	0	35	88.6
PMCA 3	0	13	55	11	0	79	69.6
PMCA 4	0	0	5	19	0	24	79.2
PMCA 5	0	0	0	0	0	0	-----
Total	2	44	64	30	0	140	
%Acierto	100.0	70.5	85.9	63.3	-----		
N° Aciertos	107						
%Acierto Total	76.4						
Skill-Score	63.7						

Se observa en la Tabla 4, como es esperable, que el acierto del pronóstico de PMCA con 48 horas de anticipación resulta menor que con 24 horas de antelación, alcanzando un 63.7%.

Respecto al PMCA pronosticado (filas), los porcentajes de acierto por categoría son:

- PMCA 1 (Bajo): 100%
- PMCA 2 (Regular/Bajo): 88.6%
- PMCA 3 (Regular): 69.6%
- PMCA 4 (Regular/Alto): 79.2%

Respecto al PMCA observado (columnas), los porcentajes de acierto por categoría son:

- PMCA 1 (Bajo): 100%
- PMCA 2 (Regular/Bajo): 70.5%
- PMCA 3 (Regular): 85.9%
- PMCA 4 (Regular/Alto): 63.3%

En relación al Skill-Score, los resultados indican que el pronóstico de PMCA a 48 horas también fue significativamente mejor que el de referencia. El mejoramiento alcanzó un 63.7%.

#### 12.1.4 Resumen mensual

**Tabla 5 Porcentaje de Acierto PMCA pronosticado a 24 y 48 horas, y pronóstico por Persistencia**

Mes	% Acierto PMCA 24h	% Acierto PMCA 48h	% Acierto Persistencia 24h	% Acierto Persistencia 48h
Mayo	87.1	77.4	48.4	45.2
Junio	86.7	70.0	43.3	30.0
Julio	87.1	74.2	32.3	16.1
Agosto	83.9	71.0	35.5	51.6
Septiembre	100	100	41.2	41.2
Total	87.9	76.4	46.4	35.0

La Tabla 5 muestra una comparación entre los aciertos logrados mediante el sistema de pronóstico utilizado y el pronóstico de referencia, en este caso la persistencia. Se registran altos porcentajes de acierto en todos los meses y clara superioridad del pronóstico de PMCA a 24 y 48 horas respecto al pronóstico por persistencia, lo que demuestra la necesidad de contar con un sistema de pronóstico para la Región.

**Tabla 6 Skill-Score relativo a la Persistencia**

Mes	24 horas	48 horas
Mayo	75.0	58.8
Junio	76.5	57.1
Julio	81.0	69.2
Agosto	75.0	40.0
Septiembre	100	100
<b>Total</b>	<b>77.3</b>	<b>63.7</b>

En la

La Tabla 5 muestra una comparación entre los aciertos logrados mediante el sistema de pronóstico utilizado y el pronóstico de referencia, en este caso la persistencia. Se registran altos porcentajes de acierto en todos los meses y clara superioridad del pronóstico de

PMCA a 24 y 48 horas respecto al pronóstico por persistencia, lo que demuestra la necesidad de contar con un sistema de pronóstico para la Región.

Tabla 6 se observa el Skill-Score relativo al pronóstico de persistencia, representando el porcentaje de mejoramiento que introduce la metodología de pronóstico aplicada, respecto a usar el pronóstico de persistencia. Los resultados indican que el pronóstico de PMCA a 24 y 48 horas tiene un significativo mejor desempeño que el de referencia. El mejoramiento promedio del periodo de pronóstico alcanzó un 77.3 y 63.7%, respectivamente.

### 12.1.5 Comparación PMCA y MP10

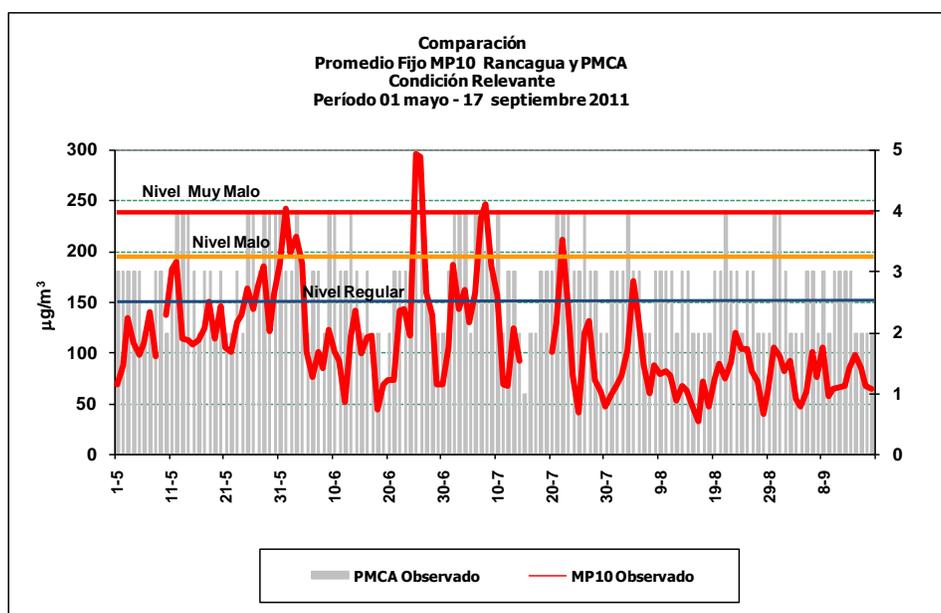


Figura 3 Comparación del PMCA observado y MP10, 01 mayo- 17 septiembre 2011

La Figura 3 muestra en general, buena correlación entre valores de PMCA (barras verticales) y de MP10 (línea roja), particularmente considerando que el MP10 es una variable continua y el PMCA discreta. Hacia el final del periodo, se observan menores niveles de calidad del aire respecto a los PMCA observados, atribuible en gran parte a los efectos propios de la estacionalidad.

Usualmente, para ajustar el pronóstico de PMCA en los meses de “entrada” y “salida” del periodo de más mala ventilación, se procede durante la primera quincena de Abril a restar una categoría al PMCA determinado por configuración meteorológica cuando el  $PMCA \neq 1$ , es decir el PMCA ajustado  $PMCA(a) = PMCA - 1$ . Este mismo procedimiento se utiliza en la segunda quincena de Agosto.

Este ajuste fue aplicado durante el periodo 2011, aunque con mucha cautela y no en todos los casos, ya que por una parte se optó por el peor escenario de ventilación esperado en términos de prevención, y por otro dado se requería primeramente el análisis del comportamiento de un año tipo antes de realizar la corrección.

## 12.2 Evaluación del Modelo de Calidad del Aire

Durante el periodo de pronóstico 2011, se operaron ecuaciones para las estaciones de Rancagua, Rengo y San Fernando. Para Rancagua en forma oficial, y para Rengo y San Fernando de forma experimental.

La evaluación que sigue, contempla los resultados preliminares obtenidos para la estación de monitoreo de Rancagua. Se usa el término preliminares, debido a que no se cuenta con información validada de calidad de aire. Los resultados deben tomarse con cautela ya que la información presenta periodos con registros faltantes o dudosos. No se incluye en este análisis los resultados para las estaciones de Rengo y San Fernando, debido a que la data está incompleta, no validada, presentándose periodos con registros dudosos y/o erróneos<sup>30</sup>.

Para el seguimiento de la condición meteorológica a escala local se utilizó permanentemente la información de las estación de monitoreo del Aeródromo de Rancagua<sup>31</sup>, y de las estaciones agroclimáticas de El Pangui, Punta Cortés y Codegua<sup>32</sup>.

Los indicadores que se utilizaron en la evaluación de los Modelos son los siguientes:

- Porcentaje de Acierto Total que corresponde al Acierto Pleno incluyendo cada categoría.
- Porcentaje de Episodios No Alertados (ENA) que corresponde a la fracción de casos en que habiéndose pronosticado Nivel 0, se observó un Nivel 1, 2 o 3; respecto del total de casos en que se observó Nivel 1, 2 o 3.

---

<sup>30</sup> Datos provenientes de la Red SIVICA

<sup>31</sup> Perteneciente a la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC). Disponible en <http://metaer.meteochile.gob.cl/>

<sup>32</sup> [www.agroclima.cl](http://www.agroclima.cl)

- El porcentaje de Falsas Alarmas (FA) que representa la razón entre el número de casos en que habiéndose observado el Nivel 0, se pronosticó Nivel 1, 2 o 3 ; respecto al total de casos en que se pronosticó Niveles 1, 2 o 3.

Los niveles de calidad de aire categorías están determinados de acuerdo a los rangos contenidos en la Tabla 6, considerando el promedio fijo de 07 am del día 1 a las 06 am de día 2. El pronóstico se emite el día 0, y el resultado es válido para el día 1.

**Tabla 7 Categorías Calidad del Aire utilizadas en la Región de O'Higgins**

Nivel Calidad Aire	Promedio fijo 07am-06am
0 BUENO	Menor que 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
1 REGULAR	Mayor o igual a 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y menor que 195 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
2 MALO	Mayor o igual a 195 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y menor que 240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
3 MUY MALO	Mayor o igual a 240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

En Rancagua se utilizan ecuaciones de pronóstico que contemplan como predictando un promedio diario fijo de 07 am del día 1 a las 06 am del día 2, ya que permiten de mejor forma, al considerar el ciclo diario típico que presenta el MP10, capturar el peak diurno y el nocturno asociados al día de validez del pronóstico. Desde las 00 a las 06 am de la madrugada del día 2, los valores son típicamente bajos debido a una marcada reducción de las emisiones, por lo que tienen una incidencia marginal en el resultado.

El uso de este periodo fijo, evita el significativo desfase que genera el indicador ICAP considerado como promedio móvil de 24 horas (metodología todavía usada en la Región Metropolitana). El promedio móvil determina máximos marcadamente discordante con el período real de empeoramiento asociado a los peaks máximos de valores horarios de MP10, haciendo que las medidas de mitigación y/o de aviso a la población no sean oportunas y tampoco eficientes.<sup>3334</sup>

La finalidad del pronóstico a un periodo fijo de 24 horas es anticiparse, con el mayor tiempo posible, al periodo en que típicamente se producen las mayores concentraciones

<sup>33</sup> CENMA Análisis Crítico a la Gestión de Episodios. Informes Finales 2006 a 2010

<sup>34</sup> DGF Universidad de Chile. Propuestas de mejoramiento al sistema de pronóstico de MP10 en la RM

horarias de MP10. Esto para asesorar eficientemente a la Autoridad Ambiental, de modo que pueda difundir oportunamente las recomendaciones que apuntan a proteger la salud de la población cuando se prevea que se registrarán altos valores de MP10.

### 12.2.1 Evaluación del Modelo de MP10\_ Ecuación 1 Rancagua

La Tabla de contingencia siguiente muestra el resultado del pronóstico desde las 07 am del día 1 a las 06 am del día 2, considerando la Ecuación 1.

**Tabla 8 Ecuación 1 Rancagua Promedio Fijo 07 am del día 1 a las 06 am de día 2**

ECUACION N°1 01 mayo - 17 septiembre 2011

MP246D1-6D2	OBSERVADO				Total	% Acierto
PRONOSTICADO	BUENO	REGULAR	MALO	MUY MALO		
BUENO	101	10	1	2	114	88.6
REGULAR	9	5	1	2	17	29.4
MALO	1	0	2	0	3	66.7
MUY MALO	0	0	0	0	0	-----
Total	111	15	4	4	134	
% Acierto	91.0	33.3	50.0	0.0		
Número aciertos	108					
% Acierto total	80.6					
% ENA	56.5					
%FA	50.0					

La Tabla 7 muestra un porcentaje de acierto total de 80.6%, un porcentaje de Episodios No Alertados (ENA) de 56.5% y de Falsas Alarmas (FA) 50.0%. Respecto al resultado deficiente de ENA, se indica que no incorpora la opinión experta y se propone el uso de nuevas ecuaciones de pronóstico con coeficientes actualizados (Ver Volumen 4 de este Informe).

Se observan 15 días en nivel Regular, 4 días en nivel Malo y 4 días en nivel Muy Malo.

### 12.2.2 Evaluación del Modelo de MP10\_Ecuación 2 Rancagua

La Tabla de contingencia siguiente muestra el resultado del pronóstico desde las 07 am del día 1 a las 06 am de día 2, considerando la Ecuación 2.

**Tabla 9 Ecuación 2 Rancagua\_ Promedio Fijo, 07 am del día 1 a las 06 am de día 2**

ECUACION N°2 01 mayo - 17 septiembre 2011

MP246D1-6D2	OBSERVADO				Total	% Acierto
PRONOSTICADO	BUENO	REGULAR	MALO	MUY MALO		
BUENO	106	12	2	3	123	86.2
REGULAR	5	3	2	1	11	27.3
MALO	0	0	0	0	0	-----
MUY MALO	0	0	0	0	0	-----
Total	111	15	4	4	134	
% Acierto	95.5	20.0	0.0	0.0		
Número aciertos	109					
% Acierto total	81.3					
% ENA	73.9					
%FA	45.5					

La Tabla de Contingencia si bien muestra un alto porcentaje de acierto total de 81.3%; presenta también un alto porcentaje de Episodios No Alertados (ENA) 73.9% y moderado porcentaje de Falsas Alarmas (FA) 45.5%. Nuevamente se menciona que respecto al resultado deficiente de ENA, se indica que no incorpora la opinión experta y se propone el uso de nuevas ecuaciones de pronóstico con coeficientes actualizados (Ver Volumen 4 de este Informe).

### 12.2.3 Evaluación del Modelo de MP10 Incluyendo Opinión Experta y Episodio/No Episodio-Ecuación 1

**Tabla 10 Evaluación que considera la opinión experta**

Opinión Experta	OBSERVADO					
PRONOSTICADO	BUENO	REGULAR	MALO	MUY MALO	Total	% Acierto
BUENO	85	4	0	0	89	0.0
REGULAR	18	8	1	4	31	26
MALO	8	3	3	0	14	21
MUY MALO	0	0	0	0	0	-----
Total	111	15	4	4	134	
% Acierto	76.6	53.3	75.0	0.0		
Número aciertos	96					
% Acierto total	71.6					
% ENA	17.4					
%FA	57.8					

Al incluir la opinión experta, se logró un significativo mejoramiento en los Episodios No Alertados (ENA), los que disminuyeron a 17.4%, mientras que las Falsas Alarmas (FA) aumentaron a 50%, haciendo descender el Acierto Total a 71.6%. (El resultado de esta ecuación corresponde a la información emitida en la página de difusión pública).

#### 12.2.4 Evaluación Modelo MP10 Incluyendo Opinión Experta y Episodio/No Episodio-Ecuación 2

Tabla 11 Evaluación que considera la opinión experta y episodio/no episodio

Opinión Experta-Episodio/No Episodio	OBSERVADO			
PRONOSTICADO	NO EPISODIO	EPISODIO	Total	% Acierto
NO EPISODIO	93	5	98	94.9
EPISODIO	18	18	36	50.0
Total	111	23	134	
% Acierto	83.8	78.3		
Número aciertos	111			
% Acierto total	82.8			
% ENA	21.7			
%FA	50.0			

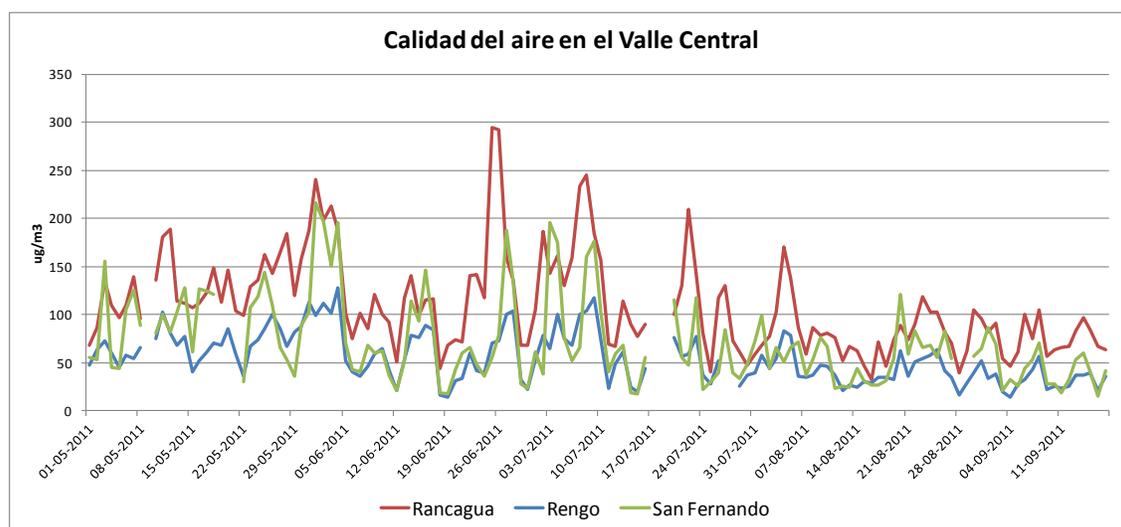
La Tabla 10 muestra que considerando  $MP10 \geq 150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como episodio y  $MP10 < 150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como no episodio, e incluyendo la opinión experta; se logra un acierto total de 82.8%. Los Episodios No Alertados (ENA) alcanzan un 21.7%, y las Falsas Alarmas (FA) un 50.0%.

### 12.3 Pronóstico Experimental para Rengo y San Fernando

Las ecuaciones de pronóstico de MP10 para Rengo y San Fernando se utilizaron de manera experimental durante la temporada 2011, con la finalidad de contribuir en el pronóstico para otras ciudades del Valle Central de la Región de O'Higgins.

El pronóstico de calidad del aire para el Valle Central se realizó en términos generales, considerando la condición sinóptica imperante, la condición de ventilación de la zona y por último el peor escenario posible pronosticado por el modelo de pronóstico y la opinión experta. Para esto se consideraron los pronósticos de Rancagua, Rengo y San Fernando.

La Figura 4 indica que las mayores concentraciones se presentaron en Rancagua, y por tanto, en una amplia mayoría de los casos, se consideró a Rancagua como condición relevante del pronóstico.



**Figura 4 MP10 observado 01 mayo- 17 septiembre 2011 red SIVICA región O'Higgins**

La Figura 4 muestra una comparación entre el MP10 observado y pronosticado en la estación Rengo.

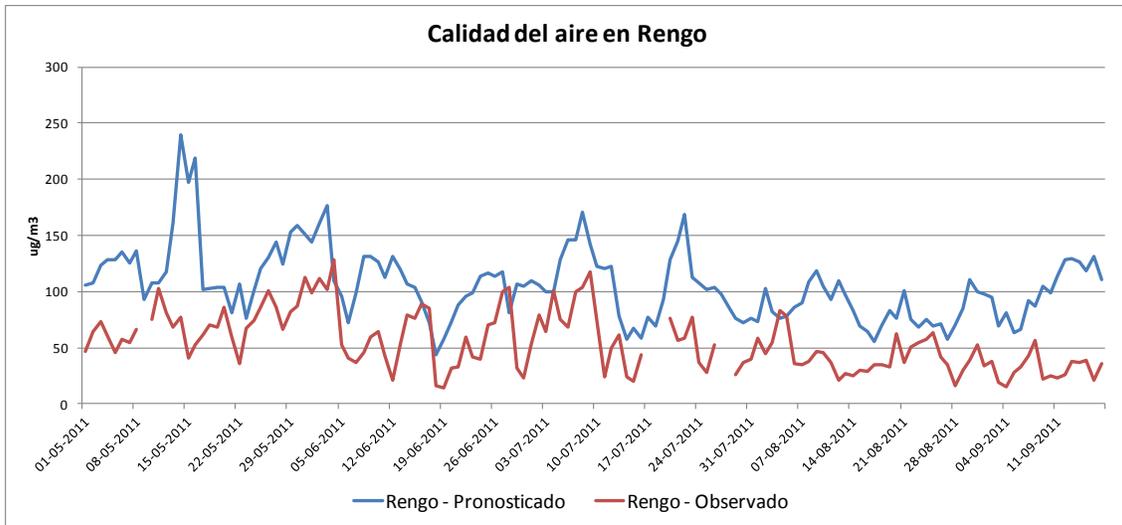


Figura 5 Serie tiempo MP10 observado y pronosticado 01 mayo- 17 septiembre 2011 estación Rengo

La Figura 5 muestra una comparación entre el MP10 observado y pronosticado en la estación Rengo.

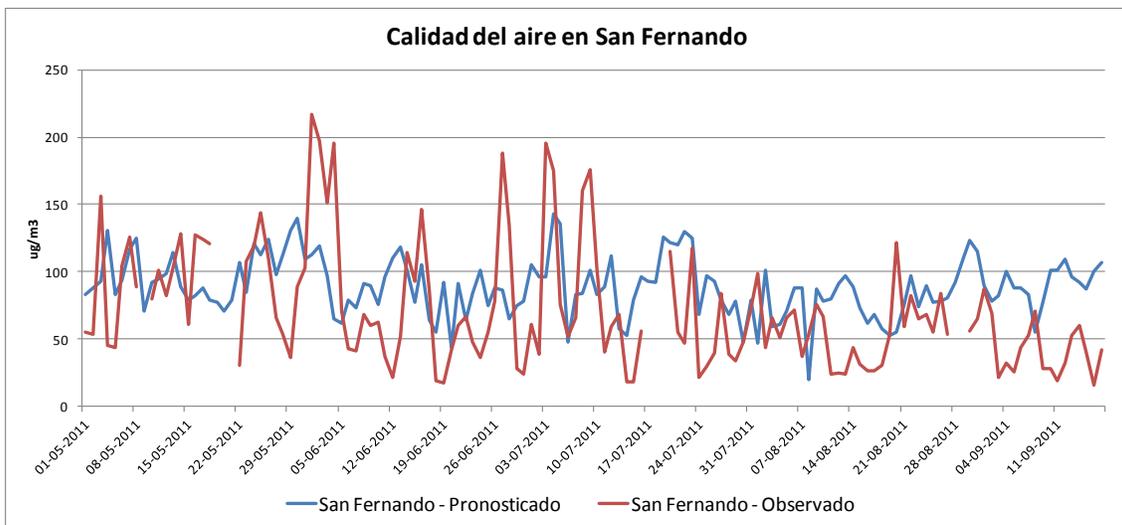
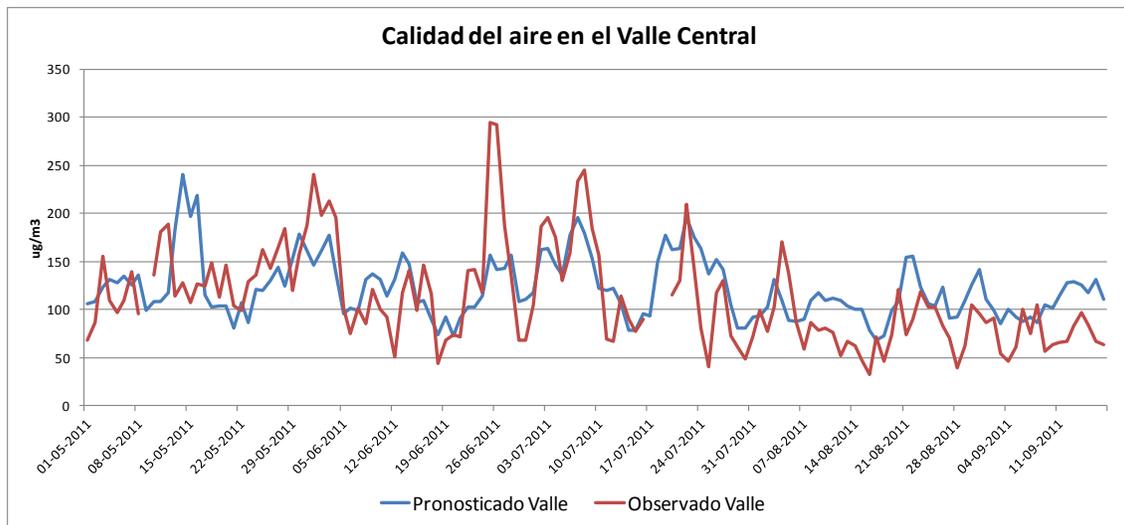


Figura 6 Serie tiempo MP10 observado y pronosticado 01 mayo- 17 septiembre 2011 estación San Fernando

El pronóstico para Rengo y San Fernando en la mayoría de los casos sobreestimó lo observado. Por otra parte, el comportamiento errático de los datos de estas estaciones, especialmente San Fernando, genera dudas sobre la calidad de esta información y por otra parte hace replantear la forma de crear un sistema de pronóstico para esa localidad.

La Figura 7 compara la condición pronosticada y observada de MP10 relevante del valle central:



**Figura 7 Serie tiempo MP10 observado y pronosticado 01 mayo- 17 septiembre 2011 Valle Central O'Higgins**

El pronóstico para el Valle Central, sin considerar la opinión experta, es decir, considerando solo lo entregado por el modelo de pronóstico tiende a subestimar en los episodios elevados de contaminación.

Es evidente también en la Figura 7, que a pesar de la sobreestimación en las condiciones de Rengo y San Fernando, la condición relevante en el Valle continúa subestimándose en un gran número de casos, esto sin considerar la opinión experta que logra mejorar este pronóstico en forma significativa.

Los modelos de Rengo y San Fernando solo tienen un año de utilización, por lo que realizar una actualización y/o modelos nuevos, es demasiado prematuro, más aún si los datos de calidad del aire aún son dudosos. Pero a mediano plazo, al igual que para la estación de Rancagua, se sugiere el desarrollo de ecuaciones en estas ciudades contemplando como predictando un promedio diario de 1 a 24 horas.

#### 12.4 Conclusiones del desempeño de las herramientas de pronóstico

- El PMCA es un indicador que integra la información meteorológica de escalas sinóptica, regional y local asociadas a calidad del aire, presenta un alto grado de acierto, y consecuentemente ha demostrado ser una herramienta esencial para el pronóstico de calidad del aire en la Región.

- Los resultados indican un buen desempeño del pronóstico de PMCA durante el periodo 01 mayo al 17 de septiembre de 2011, alcanzando un acierto de 87.9% en el pronóstico con 24 horas de anticipación; y 76.4% en el pronóstico a 48 horas.
- El alto valor del Skill-Score para el pronóstico a 24 horas, 77.3% en relación a la persistencia (porcentaje de mejoramiento del pronóstico respecto a un pronóstico de referencia), indica que el PMCA pronosticado, fue significativamente superior al pronóstico de persistencia.
- La información de calidad de aire proveniente de la red SIVICA, disponible en línea vía internet en el sitio web de SIVICA, no fue validada por los encargados de la red, y presentó periodos de datos faltantes y registros dudosos<sup>35</sup>. Ante este escenario, para el diagnóstico de la condición meteorológica y a fin de obtener una aproximación del comportamiento y evolución de la calidad del aire, se utilizó información alternativa proveniente de la red DMC y red Agroclima de la región. Respecto a los registros dudosos de la red SIVICA, entre otros casos, destacan los siguientes:
  - En días de buena ventilación y precipitaciones los valores promedios diarios generalmente no bajaron de 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , en circunstancia que para similares condiciones meteorológicas en las estaciones de monitoreo de la Red MACAM de Santiago los registros son típicamente inferiores a 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , y en algunos casos cercanos a 0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Esto podría apuntar a un problema de calibración de los equipos de monitoreo, que estarían midiendo por sobre las concentraciones reales. (Ver anexos 3.1.1)
  - Cuando hubo simultáneamente registros de MP10 y MP2.5, en un 20% de los casos el valor del MP2.5 fue superior al de MP10.
  - La información no estuvo en línea en un número importante de días, coincidiendo en algunos casos con episodios, a los que no se pudo hacer un adecuado seguimiento, ni contar con la información de calidad de aire requerida.
  - En relación a parámetros meteorológicos, no hubo registros de dirección del viento entre 320° y 360°, denotando un problema en la veleta, o en

---

<sup>35</sup> Informe Final Pronóstico Calidad del Aire Rancagua, periodos 2010. Volumen 7 de este Informe.

el sistema de registro. Los registros de precipitación fueron mayoritariamente dudosos o faltantes.

- No hubo registros de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>s, O<sub>3</sub>, y de CO solamente en un periodo limitado a algunas semanas. El SO<sub>2</sub> y los NO<sub>x</sub>s contribuyen a la formación de aerosoles secundarios, sulfatos y nitratos<sup>36</sup> que forman parte del MP2.5. La sinergia del efecto negativo en salud del O<sub>3</sub> con el MP10 y el MP2.5 ha sido comprobada a través de diferentes estudios. También es conocida la fuerte correlación entre el CO y el MP10 y MP2.5; lo que permite estimar concentraciones aplicando conversiones lineales, y efectuar pronósticos numéricos de MP10 y MP2.5 con modelos acoplados físico-químico, usando el CO como predictando<sup>37 38</sup>.
  - ✓ Particular importancia reviste la medición continua de SO<sub>2</sub> en Rancagua, dada la cercanía de la División El Teniente de Codelco Chile. Algunos peaks de anómalos de MP2.5 respecto al ciclo diario típico, podrían explicarse por transporte de sulfatos, situación que debiese monitorearse y estudiarse con profundidad. Se hace necesario entonces, volver a medir estos contaminantes en la estación de Rancagua.
  - ✓ Por otra parte las concentraciones de O<sub>3</sub> troposférico debiera ser un tema relevante en la Región, no solamente por la sinergia de la presencia simultánea del O<sub>3</sub> con el MP10 y el MP2.5 que determina efectos negativos en salud, sino también por el impacto que tendría este contaminante en el periodo estival en una Región eminentemente agrícola, en diferentes tipos de cultivos.
- Lo anteriormente expuesto, sumado al mal funcionamiento de la red SIVICA en 2010, obliga a considerar las mediciones de calidad de aire de 2011 con cautela, debido a la baja la confiabilidad de los registros. En Informe Final del periodo de pronóstico 2010, CENMA desarrolló un extenso análisis, en el que se resalta la importancia de la buena calidad de la información, tanto para el desarrollo de nuevas herramientas de pronóstico como para el pronóstico

---

<sup>36</sup> Gallardo L, et al; (2002) Coastal lows and air pollution in Central Chile

<sup>37</sup> Saide P, et al (2011) Forecasting urban MP10 and MP2.5 pollution episodes, in very stable conditions and complex terrain using WRF-Chem CO tracer model.

<sup>38</sup> Jorquera H; Catro J, (2010) Analysis of urban pollution episodes by inverse modelling

durante el periodo otoño-invierno y del mal funcionamiento de la red durante ese periodo.

- Considerando que no existe certeza en cuanto a la calidad de la información de la red SIVICA, los resultados de los modelos de calidad de aire aplicados a la zona también debieran tomarse con precaución:
  - La ecuación 1 tuvo un porcentaje total de acierto de de 80.6%, ENA 56.5% y FA 50%.
  - La ecuación 2, sin opinión experta tuvo un porcentaje total de acierto de 81.3%, ENA 73.9% y FA 45.5%. Esta misma ecuación incluyendo la opinión experta tuvo un porcentaje total de acierto de 71.6%, ENA 17.4% y FA 57.8%. Este resultado refleja la priorización de la opinión experta de considerar el peor escenario de calidad del aire que pudiera presentarse en condiciones meteorológicas de dispersión determinadas.
  - La evaluación del pronóstico considerados solamente días de episodios ( $\geq 150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y no episodios ( $< 150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), incorporando la opinión experta, tuvo un porcentaje total de acierto de 82.6%, ENA 21.7% y FA 50.0%.
- Durante el periodo de pronóstico se consideró en la opinión experta, el peor escenario de calidad de aire que se pudiera presentar bajo una condición meteorológica determinada, privilegiando el carácter preventivo del pronóstico en la gestión e episodios. Este criterio fue adoptado para apoyar a la Autoridad Ambiental en la entrega oportuna de información a la población, tendiente a proteger su salud, previniéndola de la exposición a altas concentraciones de MP10. La opinión experta se basó en mayor medida en el PMCA previsto que en el resultado entregado por los modelos de pronóstico de calidad de aire.
- Se ejecutaron las ecuaciones de pronóstico en forma experimental para Rengo y San Fernando. La información dudosa de calidad del aire y la data reciente de las estaciones no permite dar conclusiones sólidas del periodo de pronóstico 2011. Sin embargo, a la luz del análisis general, se hace necesario asegurar la calidad de la información de la red SIVICA y replantear a mediano plazo las ecuaciones para el resto del valle. Se sugiere seguir corriendo las ecuaciones para Rengo y San Fernando durante el periodo 2012, de modo de continuar con las pruebas requeridas para su mejoramiento.
- Los esfuerzos futuros deben apuntar a mejorar la calidad de los registros y la representatividad de sus estaciones, y a mejorar también el acierto de los modelos

de pronóstico para las categorías asociadas a episodio (ENA), incorporando también la duración y la intensidad del evento.

## **13 Anexos**

### **13.1 Comparación estaciones de monitoreo Rancagua-El Bosque**

La estación de monitoreo de la Red MACAM que muestra una mejor correspondencia histórica con la estación de monitoreo de Rancagua es la estación de El Bosque<sup>39</sup>.

A continuación, para efectos de comparación se muestran Figuras con series de tiempo para el periodo 01 de Mayo al 31 de Julio de 2006 y 2011.

---

<sup>39</sup> CENMA (2008). Análisis comparativo estaciones de la Red MACAM y estación de Rancagua

### 13.1.1 Comportamiento estaciones de Rancagua y El Bosque en 2006 y 2011

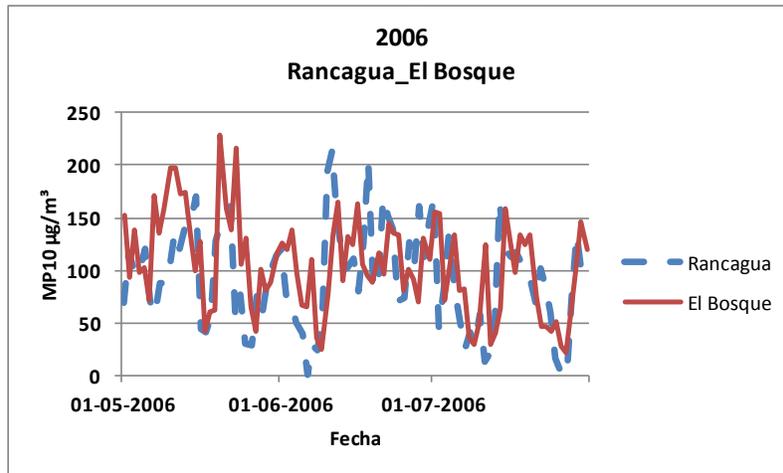


Figura 8 Comparación del MP10 promedio diario entre Rancagua y El Bosque 2006

Se observa en la Figura 8 en general una buena correspondencia entre los registros diarios de MP10 en El Bosque y Rancagua, particularmente en los valores bajos. En los valores altos se aprecia que en algunos casos El Bosque presenta los registros más altos y en otros casos Rancagua.

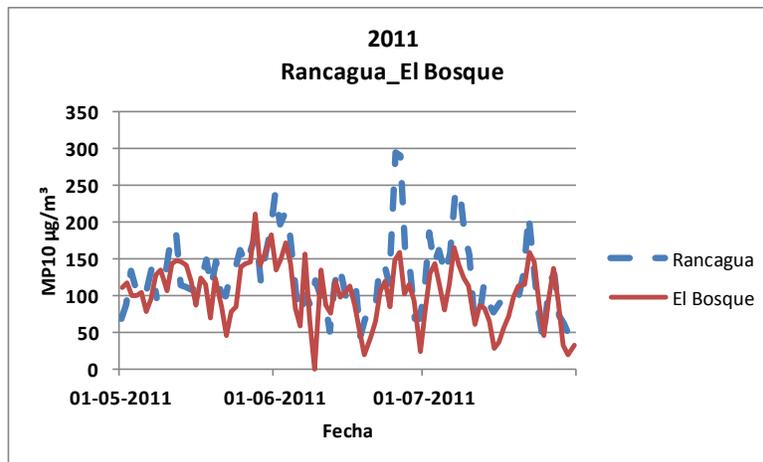


Figura 9 Comparación del MP10 promedio diario entre Rancagua y El Bosque 2011

La Figura 9 muestra en la mayoría de los casos valores más altos en Rancagua, en tanto los valores menores son notoriamente más bajos en El Bosque, mientras que en Rancagua no bajan de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

## 13.2 Tablas de Contingencia Mensuales PMCA

### 13.2.1 Evaluación mensual PMCA pronosticado con 24 horas de anticipación

Tabla 12 PMCA mayo 2011

mayo-2011

PMCA	PMCA Observado						
Pronos 24	PMCA 1	PMCA 2	PMCA 3	PMCA 4	PMCA 5	Total	% Acierto
PMCA 1	0	0	0	0	0	0	-----
PMCA 2	0	8	0	0	0	8	100.0
PMCA 3	0	0	14	4	0	18	77.8
PMCA 4	0	0	0	5	0	5	100.0
PMCA 5	0	0	0	0	0	0	-----
Total	0	8	14	9	0	31	
%Acierto	-----	100.0	100.0	55.6	-----		
N° Aciertos	27						
%Acierto Total	87.1						
Skill-Score	75.0						

Tabla 13 PMCA junio 2011

junio-2011

PMCA	PMCA Observado						
Pronos 24	PMCA 1	PMCA 2	PMCA 3	PMCA 4	PMCA 5	Total	% Acierto
PMCA 1	1	0	0	0	0	1	100.0
PMCA 2	0	5	0	0	0	5	100.0
PMCA 3	0	3	14	0	0	17	82.4
PMCA 4	0	1	0	6	0	7	85.7
PMCA 5	0	0	0	0	0	0	-----
Total	1	9	14	6	0	30	
%Acierto	100.0	55.6	100.0	100.0	-----		
N° Aciertos	26						
%Acierto Total	86.7						
Skill-Score	76.5						

Tabla 14 PMCA julio 2011

julio-2011

PMCA	PMCA Observado						
Pronos 24	PMCA 1	PMCA 2	PMCA 3	PMCA 4	PMCA 5	Total	% Acierto
PMCA 1	1	0	0	0	0	1	100.0
PMCA 2	0	5	0	0	0	5	100.0
PMCA 3	0	1	10	0	0	11	90.9
PMCA 4	0	1	2	11	0	14	78.6
PMCA 5	0	0	0	0	0	0	-----
Total	1	7	12	11	0	31	
%Acierto	100.0	71.4	83.3	100.0	-----		
N° Aciertos	27						
%Acierto Total	87.1						
Skill-Score	81.0						

Tabla 15 PMCA agosto 2011

agosto-2011

PMCA	PMCA Observado						
Pronos 24	PMCA 1	PMCA 2	PMCA 3	PMCA 4	PMCA 5	Total	% Acierto
PMCA 1	0	0	0	0	0	0	-----
PMCA 2	0	8	1	0	0	9	88.9
PMCA 3	0	3	14	0	0	17	82.4
PMCA 4	0	0	1	4	0	5	80.0
PMCA 5	0	0	0	0	0	0	-----
Total	0	11	16	4	0	31	
%Acierto	-----	72.7	87.5	100.0	-----		
N° Aciertos	26						
%Acierto Total	83.9						
Skill-Score	75.0						

Tabla 16 PMCA septiembre 2011

01-17 sep 2011

PMCA	PMCA Observado						
Pronos 24	PMCA 1	PMCA 2	PMCA 3	PMCA 4	PMCA 5	Total	% Acierto
PMCA 1	0	0	0	0	0	0	-----
PMCA 2	0	9	0	0	0	9	100.0
PMCA 3	0	0	8	0	0	8	100.0
PMCA 4	0	0	0	0	0	0	-----
PMCA 5	0	0	0	0	0	0	-----
Total	0	9	8	0	0	17	
%Acierto	-----	100.0	100.0	-----	-----		
N° Aciertos	17						
%Acierto Total	100.0						
Skill-Score	100.0						

### 13.2.2 Evaluación mensual PMCA pronosticado con 48 horas de anticipación

Tabla 17 PMCA mayo 2011

mayo-2011

PMCA	PMCA Observado					Total	% Acierto
Pronos 48	PMCA 1	PMCA 2	PMCA 3	PMCA 4	PMCA 5		
PMCA 1	0	0	0	0	0	0	-----
PMCA 2	0	8	0	0	0	8	100.0
PMCA 3	0	0	13	6	0	19	68.4
PMCA 4	0	0	1	3	0	4	75.0
PMCA 5	0	0	0	0	0	0	-----
Total	0	8	14	9	0	31	
%Acierto	-----	100.0	92.9	33.3	-----		
N° Aciertos	24						
%Acierto Total	77.4						
Skill-Score	58.8						

Tabla 18 PMCA junio 2011

junio-2011

PMCA	PMCA Observado					Total	% Acierto
Pronos 48	PMCA 1	PMCA 2	PMCA 3	PMCA 4	PMCA 5		
PMCA 1	1	0	0	0	0	1	100.0
PMCA 2	0	3	2	0	0	5	60.0
PMCA 3	0	6	12	1	0	19	63.2
PMCA 4	0	0	0	5	0	5	100.0
PMCA 5	0	0	0	0	0	0	-----
Total	1	9	14	6	0	30	
%Acierto	100.0	33.3	85.7	83.3	-----		
N° Aciertos	21						
%Acierto Total	70.0						
Skill-Score	57.1						

Tabla 19 PMCA julio 2011

julio-2011

PMCA	PMCA Observado					Total	% Acierto
Pronos 48	PMCA 1	PMCA 2	PMCA 3	PMCA 4	PMCA 5		
PMCA 1	1	0	0	0	0	1	100.0
PMCA 2	0	4	0	0	0	4	100.0
PMCA 3	0	3	9	2	0	14	64.3
PMCA 4	0	0	3	9	0	12	75.0
PMCA 5	0	0	0	0	0	0	-----
Total	1	7	12	11	0	31	
%Acierto	100.0	57.1	75.0	81.8	-----		
N° Aciertos	23						
%Acierto Total	74.2						
Skill-Score	69.2						

Tabla 20 PMCA agosto 2011

agosto-2011

PMCA	PMCA Observado					Total	% Acierto
Pronos 48	PMCA 1	PMCA 2	PMCA 3	PMCA 4	PMCA 5		
PMCA 1	0	0	0	0	0	0	-----
PMCA 2	0	7	2	0	0	9	77.8
PMCA 3	0	4	13	2	0	19	68.4
PMCA 4	0	0	1	2	0	3	66.7
PMCA 5	0	0	0	0	0	0	-----
Total	0	11	16	4	0	31	
%Acierto	-----	63.6	81.3	50.0	-----		
N° Aciertos	22						
%Acierto Total	71.0						
Skill-Score	40.0						

Tabla 21 PMCA septiembre 2011

01-17 sep 2011

PMCA	PMCA Observado					Total	% Acierto
Pronos 48	PMCA 1	PMCA 2	PMCA 3	PMCA 4	PMCA 5		
PMCA 1	0	0	0	0	0	0	-----
PMCA 2	0	9	0	0	0	9	100.0
PMCA 3	0	0	8	0	0	8	100.0
PMCA 4	0	0	0	0	0	0	-----
PMCA 5	0	0	0	0	0	0	-----
Total	0	9	8	0	0	17	
%Acierto	-----	100.0	100.0	-----	-----		
N° Aciertos	17						
%Acierto Total	100.0						
Skill-Score	100.0						



CENTRO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

INFORME FINAL  
“OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE PRONÓSTICO DE  
CALIDAD DE AIRE POR MP10 PARA RANCAGUA  
PERIODO 2011”

UMGCA-014-LMPCA-007-2011

VOLUMEN 3  
ANÁLISIS DE LOS EPISODIOS DE CONTAMINACIÓN  
CONSTATADOS  
VERSIÓN FINAL

---

PREPARADO PARA

SECRETARIA REGIONAL MINISTERIAL DEL MEDIO AMBIENTE  
REGIÓN DEL LIBERTADOR BERNARDO O'HIGGINS

SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2011

## Contenido

1	Antecedentes .....	i
2	EPISODIO 1: Días 11 y 12 de mayo_ Nivel 1 Regular .....	iv
2.1	Bitácora del Episodio .....	iv
2.2	Condiciones pronosticadas .....	v
2.3	Condiciones observadas .....	v
2.4	Conclusiones .....	vii
3	EPISODIO 2: Días 25, 27 y 28 de mayo_ Nivel 1 Regular .....	viii
3.1	Bitácora del Episodio .....	viii
3.2	Condiciones pronosticadas .....	ix
3.3	Condiciones observadas .....	x
3.4	Conclusiones .....	xiii
4	EPISODIO 3: 30 y 31 de mayo_ Nivel 1 Regular .....	xiv
4.1	Bitácora del Episodio .....	xiv
4.2	Condiciones pronosticadas .....	xv
4.3	Condiciones observadas .....	xv
4.4	Conclusiones .....	xvii
5	EPISODIO 4: Día 01 de junio Nivel 3 Muy Malo; Día 02 de junio Nivel 2 Malo .....	xvii
5.1	Bitácora del Episodio .....	xvii
5.2	Condiciones pronosticadas .....	xviii
5.3	Condiciones observadas .....	xviii
5.4	Conclusiones .....	xx
6	EPISODIO 5: Día 03 de junio Nivel 2 Malo, Día 04 de junio Nivel 1 Regular .....	xxi
6.1	Bitácora del Episodio .....	xxi
6.2	Condiciones pronosticadas .....	xxii
6.3	Condiciones observadas .....	xxii
6.4	Conclusiones .....	xxiv
7	EPISODIO 6: Días 25_26 Nivel 3 Muy Malo; Día 27 de junio Nivel 1 Regular .....	xxiv
7.1	Bitácora del Episodio .....	xxiv

7.2	Condiciones pronosticadas .....	xxv
7.3	Condiciones observadas .....	xxvi
7.4	Conclusiones .....	xxvii
8	EPISODIO 7: Días 02 y 04 de julio Nivel 1 Regular.....	xxviii
8.1	Bitácora del Episodio .....	xxviii
8.2	Condiciones pronosticadas .....	xxix
8.3	Condiciones observadas .....	xxix
8.4	Conclusiones .....	xxxi
9	EPISODIO 8: Día 06 Nivel 1 Regular; Día 07 Nivel 2 Malo; Día 08 Nivel 3 Muy Malo; Días 09 y 10 de julio Nivel 1 Regular .....	xxxii
9.1	Bitácora del Episodio .....	xxxii
9.2	Condiciones pronosticadas .....	xxxiii
9.3	Condiciones observadas .....	xxxiv
9.4	Conclusiones .....	xxxvi
10	EPISODIO 9: Día 22 de julio Nivel 2 Malo .....	xxxvii
10.1	Bitácora del Episodio.....	xxxvii
10.2	Condiciones pronosticadas.....	xxxvii
10.3	Condiciones observadas .....	xxxviii
10.4	Conclusiones.....	xxxix
11	EPISODIO 10: Día 04 de agosto Nivel 1 Regular .....	xl
11.1	Bitácora del Episodio.....	xl
11.2	Condiciones pronosticadas.....	xl
11.3	Condiciones observadas .....	xl
11.4	Conclusiones.....	xl
12	Anexos .....	xl
12.1	Características Episodios Tipo A y BPF que afectan a la Región de O'Higgins ...	xl
12.2	Categorías Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica .....	xl

## 14 Antecedentes

En el presente informe se analizan los episodios de MP10 registrados en Rancagua entre el 01 de mayo y el 17 de septiembre de 2011, abarcando desde el inicio de la configuración meteorológica<sup>40</sup> asociada a mala ventilación, hasta su finalización; por lo tanto, cada episodio puede tener uno o más días de duración.

La Tabla 1 muestra las categorías de calidad del aire considerando el promedio fijo de 07 am del día 1 hasta las 06 am del día 2. El día 0 corresponde al día de emisión del pronóstico.

**Tabla 22 Niveles de Calidad del Aire**

Nivel Calidad Aire	Promedio fijo 07am-06am
0 BUENO	Menor que 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
1 REGULAR	Mayor o igual a 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y menor que 195 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
2 MALO	Mayor o igual a 195 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y menor que 240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
3 MUY MALO	Mayor o igual a 240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Para efectos operacionales, y consensuado con la contraparte, se definió como días de episodios por MP10 a aquellos en que en la estación de Rancagua, respecto del promedio fijo de 7 am del día 1 a 6 am del día 2, registró un valor igual o superior a 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Esto es, no solamente fueron considerados días de episodios aquellos en que se alcanzaron los Niveles 2 y 3, correspondientes a Malo y Muy Malo, sino también el Nivel 1 equivalente al Nivel Regular.

El PMCA (índice que da cuenta de las condiciones de ventilación) fue asociado a las siguientes categorías:

**Tabla 23 Categorías de Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica (PMCA)<sup>41</sup>**

Categoría	Condiciones de ventilación y dispersión
1	Muy Buenas
2	Buenas

<sup>40</sup> CENMA (2009) Tipificación de configuraciones meteorológicas asociadas a distintas categorías de PMCA en Rancagua

<sup>41</sup> Las condiciones meteorológicas de dispersión asociadas a cada Categoría se detallan en Anexos

3	Regulares
4	Malas
5	Muy Malas

Sobre la base del criterio especial que se utiliza para considerar un episodio de MP10 en la región, en la Tabla 3 se indican los días en que se produjo un evento en Rancagua, los niveles pronosticados, el tipo de episodio y la opinión del equipo de pronóstico respecto al evento.

**Tabla 24 Episodios de Contaminación por MP10 en Rancagua**

Fecha	Tipo Episodio	MP10 Observado Prom 7-6	Nivel Observado Prom 7-6	Nivel Pronosticado Prom 7-6 (Publicado en el Portal Web)	Opinión del Equipo de Pronóstico Nivel Obs v/s Nivel Pronosticado
11/05/2011	A (r)-BPF (r)	181	Regular	Bueno	Subpronóstico. Posible impacto puntual en estación Rancagua o falla en la medición. Diferencia con ciclo MP10 Rengo y San Fernando (notoriamente más bajas).
12/05/2011	BPF (r)	189	Regular	Regular	Acierto aunque cerca de nivel Malo. Persistió diferencia con ciclo MP10 Rengo y San Fernando.
25/05/2011	A (r)	163	Regular	Bueno	Mayor estabilización que lo esperado. Faltó información en línea para seguimiento.
27/05/2011	BPF (r)	164	Regular	Bueno	Posible impacto puntual en estación Rancagua. Diferencia con ciclo MP10 Rengo y San Fernando. Faltó información en línea para seguimiento.
28/05/2011	BPF (r)	184	Regular	Regular	Acierto, aunque persistió diferencia con ciclo MP10 Rengo y San Fernando. Faltó información en línea para seguimiento.
30/05/2011	A (r)	157	Regular	Malo	Menor estabilización que lo esperado. Sobrepronóstico. Se opta por elegir el peor escenario esperado.
31/05/2011	A (r)	188	Regular	Malo	Ligero sobrepronóstico. A sólo 7 µg/m3 de nivel Malo.
01/06/2011	BPF (r)	241	Muy Malo	Bueno	Inconsistencia con la condición de escala sinóptica (sistema frontal inestabiliza la zona central). Falla en la medición o impacto local directo
02/06/2011	BPF (r)	198	Malo	Regular	Inconsistencia con la condición de escala sinóptica (sistema frontal inestabiliza la zona central). Falla en la medición o impacto local directo

03/06/2011	A (r)	213	Malo	Malo	Comportamiento clásico de Episodio
04/06/2011	A (r)	187	Regular	Regular	Comportamiento clásico de Episodio
Fecha Fecha	Tipo Episodio	MP10 Observado	Nivel Observado	Nivel Pronosticado (Resultado Publicado en el Portal Web)	Explicación del Equipo de Pronóstico Nivel Obs v/s Nivel Pronosticado
25/06/2011	A (r)	295	Muy Malo	Regular	Mayor estabilización a lo esperado. Gran diferencia con ciclo MP10 Rengo y San Fernando.
26/06/2011	A (r)	292	Muy Malo	Regular	Mayor estabilización a lo esperado. Gran diferencia con ciclo MP10 Rengo y San Fernando.
27/06/2011	A (r)	159	Regular	Regular	Acierto aunque persistió diferencia con ciclo MP10 Rengo y San Fernando.
02/07/2011	A (r) –NF (r)	186	Regular	Malo	A sólo 9 µg/m3 de nivel Malo.
04/07/2011	A (r) –NF (r)	161	Regular	Regular	Comportamiento clásico de Episodio
06/07/2011	A (r) –NF (r)	158	Regular	Regular	Comportamiento clásico de Episodio
07/07/2011	A (r) –NF (r)	233	Malo	Malo	Comportamiento clásico de Episodio
08/07/2011	A (r) –NF (r)	245	Muy Malo	Regular	Inconsistencia con la condición de escala sinóptica. Configuración meteorológica asociada a una mejora de la ventilación.
09/07/2011	A (r) –NF (r)	184	Regular	Regular	Comportamiento clásico de Episodio
10/07/2011	A (r) –NF (r)	156	Regular	Regular	Comportamiento clásico de Episodio
22/07/2011	A (r)	211	Malo	Malo	Acierto aunque persistió diferencia con ciclo MP10 Rengo y San Fernando.
04/08/2011	BPF (r)	170	Regular	Bueno	Inconsistencia con la condición de escala sinóptica (falla medición) o Estabilización local por cobertura nubosa.

De la Tabla 2:

- Se contabiliza un total de 15 días en nivel Regular, 4 días en nivel Malo y 4 días en nivel Muy Malo, de acuerdo a los registros de MP10 no validados<sup>42</sup> de la estación de Rancagua de MP10 durante la temporada otoño invierno 2011.
- Primaron las configuraciones de episodio tipo A (r) –NF (r), seguidas estrechamente por el tipo A (r).

<sup>42</sup> Mediciones en Rancagua, Rengo y San Fernando a cargo de la Red SIVICA

- Durante el periodo, en general se observaron diferencias entre los registros de Rancagua (mucho más altos) respecto a los de Rengo y San Fernando.
- En algunas oportunidades el registro de calidad del aire fue inconsistente respecto a las condiciones de ventilación observadas.
- Para obtener la evaluación final del pronóstico de calidad del aire considerando las ecuaciones originales, la opinión experta y episodios/no episodios Ver Volumen 2 de este Informe.

## 15 EPISODIO 1: Días 11 y 12 de mayo\_ Nivel 1 Regular

### 15.1 Bitácora del Episodio

Pronóstico de PMCA (Condición Relevante, PMCA mayor pronosticado)

Día	PMCA Pronosticado	PMCA Observado	Diferencia Categoría
11	3	3	0
12	4	4	0

Pronóstico de Calidad de Aire ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) Ecuación N°1

Día	Pronóstico $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Observado $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Diferencia $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Pronóstico Nivel	Observado Nivel	Diferencia
11	77	181	-104	0	1	-1
12	100	189	-89	0	1	-1

Pronóstico de Calidad de Aire ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) Ecuación N°2

Día	Pronóstico $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Observado $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Diferencia $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Pronóstico Nivel	Observado Nivel	Diferencia
11	108	181	-73	0	1	-1
12	105	189	-84	0	1	-1

## 15.2 Condiciones pronosticadas

### **Miércoles 11**

Desarrollo de una dorsal en altura a fines del día, y aumento de la estabilidad atmosférica. De acuerdo a esta condición sinóptica, se determinó un PMCA 2 para la mañana y un PMCA 3 para la noche. El modelo oficial de calidad de aire entregó un resultado de  $77 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Bueno) como promedio fijo 7 am del día 1 a 6 am del día 2. La opinión experta indicó que se produciría un moderado empeoramiento de las condiciones de ventilación durante la noche, con un incremento de las concentraciones, pero que la calidad del aire se presentaría en el Nivel 0 Bueno.

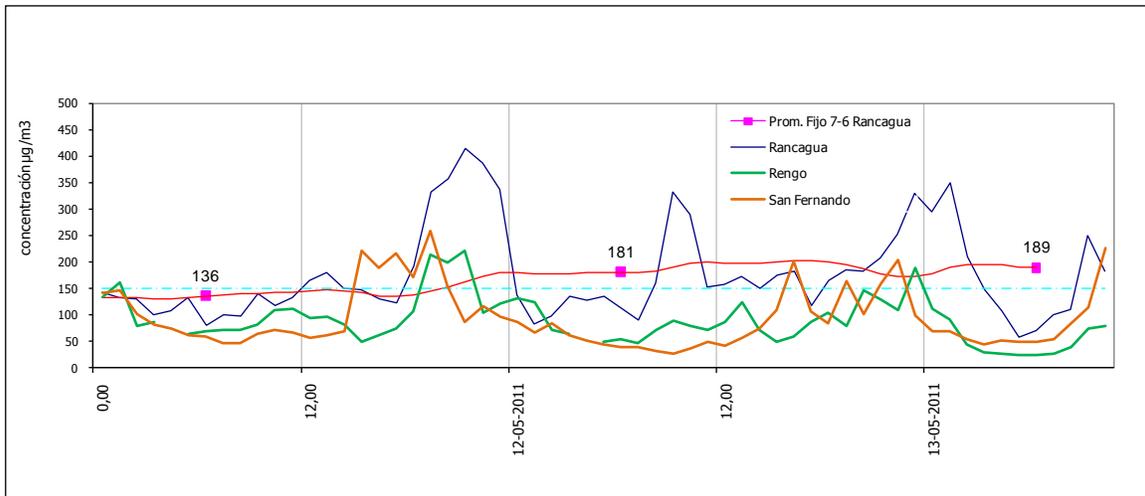
### **Jueves 12**

Paso de la dorsal y la posterior aproximación de una vaguada en altura. Se determinó un PMCA4 para la mañana y un PMCA3 para la noche. Si bien el modelo entregó como promedio fijo de 7 AM a 6 AM un valor de  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Nivel0 Bueno), la opinión experta indicó que la calidad del aire se encontraría en valores cercanos al Nivel1 Regular.

## 15.3 Condiciones observadas

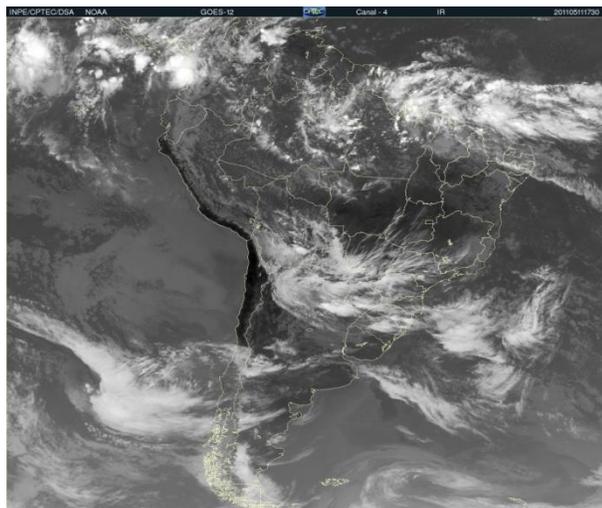
### **Miércoles 11**

Desarrollo de una dorsal en altura, asociando un ligero deterioro de las condiciones de ventilación; verificándose un PMCA2 en la mañana y PMCA3 en la noche. A escala local se registró viento débil a niveles bajos, niebla matinal y una capa compacta de nubosidad media. El hecho que la información de calidad del aire no fuera actualizada en la página web de SIVICA hasta el 13 de mayo, impidió el seguimiento del evento en desarrollo. El promedio fijo de 7 AM a 6 AM alcanzó un valor de  $181 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , Nivel1 Regular (ver Figura 1).



**Figura 2 Concentraciones horarias de MP10 en Rancagua, Rengo y San Fernando 11 al 13 de mayo de 2011**

La Figura 1 muestra notorias diferencias entre el comportamiento de las series de tiempo de Rancagua, respecto a Rengo y San Fernando, especialmente en el peak diurno del día 12.



**Figura 3 Imagen espectro IR, 11 de mayo de 2011 13:30 hora local**

La Figura 2 muestra un sistema frontal débil aproximando a la zona centro-sur del país generando un efecto BPF (r), es decir, presencia de nubosidad alta y media asociada a un bajo factor de ventilación.

## **Jueves 12**

Paso de la dorsal y aproximación de una vaguada débil en altura, asociando un deterioro importante de las condiciones de ventilación, verificándose un PMCA4 en la mañana y un PMCA3 en la noche. A nivel local se registró viento débil y abundante nubosidad media y alta asociada a un efecto BPF (r). El promedio fijo alcanzó un valor de 189  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , nivel Regular.

### **15.4 Conclusiones**

- Para el día 11 el pronóstico de calidad del aire indicaba Nivel0 Bueno constatándose Nivel1 Regular, esto es se subpronosticó un nivel respecto al observado.
- Al comparar las mediciones de Rancagua respecto a Rengo y San Fernando (las que estadísticamente muestran una buena correlación), se observaron diferencias significativas, especialmente notorias en el peak nocturno del día 11 y el peak diurno del 12. Tal situación podría deberse al impacto de fuentes puntuales cercanas a la estación de monitoreo de Rancagua o a datos erróneos entregados por la red de monitoreo de calidad de aire<sup>43</sup>.
- La nubosidad desprendida de un sistema frontal que cruzaba la zona sur, habría potenciado una transitoria estabilización en la zona, efecto BPF(r), sin embargo esta condición debiera haberse presentado también en Rengo y San Fernando, situación que de acuerdo a los registros de calidad de aire no habría ocurrido.
- Para el día 12, el modelo de calidad del aire entregó un valor pronosticado en el Nivel0 Bueno. Este resultado no concordaba con el PMCA4 asociado a mala ventilación, por lo que la opinión experta indicó que la calidad del aire presentaría valores cercanos al Nivel1 Regular.
- Los registros de calidad del aire no fuera actualizados en la página web de SIVICA hasta el 13 de mayo. Este hecho no permitió el análisis y seguimiento integrado de las condiciones meteorológicas de dispersión y la calidad del aire por MP10. Por otra parte cuando una vez terminado el episodio se contó con información de MP10, se constató que los registros de Rengo y San Fernando no eran concordantes con la condición meteorológica observada (Efecto BPF (r)), y tampoco con los registros de la estación de monitoreo de Rancagua.

---

<sup>43</sup> Red SIVICA

## 16 EPISODIO 2: Días 25, 27 y 28 de mayo\_ Nivel 1 Regular

### 16.1 Bitácora del Episodio

Pronóstico de PMCA (Condición Relevante, PMCA mayor pronosticado)

Día	PMCA Pronosticado	PMCA Observado	Diferencia Categoría
25	3	4	-1
26	3	4	-1
27	3	3	0
28	3	4	-1

Pronóstico de Calidad de Aire ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) Ecuación N°1

Día	Pronóstico $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Observado $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Diferencia $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Pronóstico Nivel	Observado Nivel	Diferencia
25	69	163	-94	0	1	-1
26	124	143	-19	0	0	0
27	118	164 (*)	-46	0	1	-1
28	103	184 (*)	-81	0	1	-1

Pronóstico de Calidad de Aire ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) Ecuación N°2

Día	Pronóstico $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Observado $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Diferencia $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Pronóstico Nivel	Observado Nivel	Diferencia
25	100	163	-63	0	1	-1
26	136	143	-7	0	0	0
27	116	164 (*)	-48	0	1	-1
28	116	184 (*)	-68	0	1	-1

(\*) Sin información al momento de la realización de los pronósticos.

## 16.2 Condiciones pronosticadas

### **Miércoles 25**

Presencia de una dorsal débil en altura a fines del día, e incremento de la estabilidad atmosférica. De acuerdo a esto, se pronosticó un PMCA3 tanto para la mañana como para la noche. El modelo oficial de calidad de aire entregó un resultado de  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , equivalente al Nivel0 Bueno, como promedio fijo de 7 AM (Día1) a 6 AM (Día2). La opinión experta indicó que se observaría una rápida estabilización, asociada a un ligero empeoramiento de las condiciones de ventilación, especialmente durante la noche. Si bien se preveía un incremento en las concentraciones de MP10, la calidad del aire se mantendría en el Nivel0 Bueno.

### **Jueves 26**

Presencia y paso de la dorsal en altura y margen anticiclónico en superficie. Condiciones de ventilación regulares y calidad de aire en el Nivel0 Bueno. El PMCA se subestimó en un nivel, sin embargo el nivel de calidad de aire se mantuvo en el Nivel0 Bueno, tal como se había pronosticado.

### **Viernes 27**

Lenta aproximación de una vaguada en altura, moderada estabilización atmosférica a niveles bajos. Se determinó un PMCA3 para la mañana y para la noche. El modelo oficial de calidad de aire entregó un resultado de  $118 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , correspondiente al Nivel0 Bueno, como promedio fijo de 7 AM (Día1) a 6 AM (Día2). La opinión experta indicó que se observaría sólo una moderada estabilización y por tanto la calidad del aire se mantendría en el Nivel0 Bueno.

### **Sábado 28**

Aproximación de una vaguada en altura, y una moderada estabilización atmosférica a niveles bajos. Se definió un PMCA3 para la mañana y para la noche. El modelo oficial de calidad de aire dio como resultado  $116 \mu\text{g}/\text{m}^3$  correspondiente al Nivel0 Bueno como promedio fijo de 7 AM (Día1) a 6 AM (Día2). La opinión experta indicó que se observaría una moderada estabilización y que la calidad del aire se presentaría cercana al Nivel1

Regular. Sobre esta base para efectos de difusión a la población, se advirtió que se presentarían condiciones Regulares de ventilación y Calidad del Aire

### 16.3 Condiciones observadas

#### **Miércoles 25**

Rápida estabilización debido a la presencia de una dorsal en altura, estabilización a niveles bajos, y deterioro de las condiciones de ventilación, verificándose un PMCA3 en la mañana y PMCA4 en la noche. El promedio fijo de 7 AM (Día1) a 6 AM (Día2) alcanzó un valor de  $163 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , correspondiente al Nivel1 Regular. (Umbral inferior de este Nivel)

#### **Jueves 26**

Paso de la dorsal y lenta aproximación de una vaguada, en altura, verificándose un PMCA4 durante la mañana y un PMCA3 en la noche, evidenciándose una transitoria mejoría en las condiciones de ventilación. Se alcanzó un registro correspondiente al Nivel0 Bueno con  $143 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , cercano al Nivel1 Regular.

#### **Viernes 27**

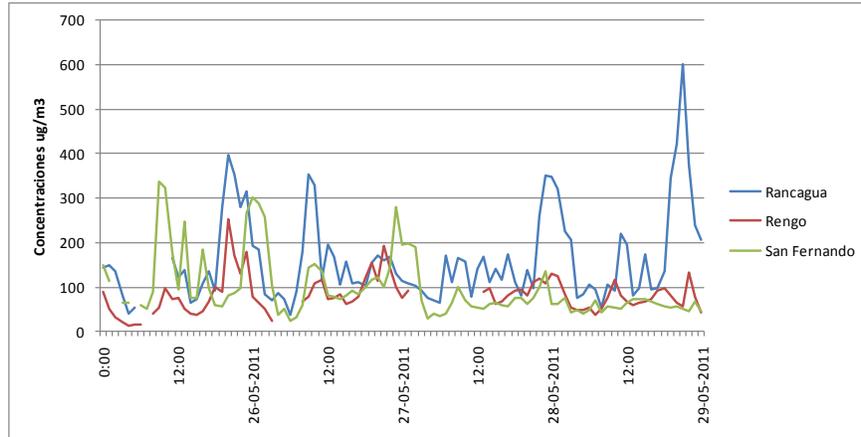
Deterioro moderado de las condiciones de dispersión, verificándose un PMCA3 tanto en la mañana como en la noche, configurándose un efecto Tipo BPF (r) de intensidad débil. A escala local, se registraron bajas temperaturas matinales<sup>44</sup>, viento débil y aumento de la nubosidad durante el día. El promedio fijo de MP10 alcanzó un valor de  $164 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , correspondiente al Nivel1 Regular.

#### **Sábado 28**

Deterioro más marcado de las condiciones de ventilación, asociado a un PMCA3 en la mañana y PMCA4 en la noche. Se observó abundante nubosidad alta y media durante el día, configurándose un efecto Tipo BPF (r) de intensidad moderada. El promedio fijo de MP10 alcanzó un valor de  $184 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , correspondiente al Nivel1 Regular.

---

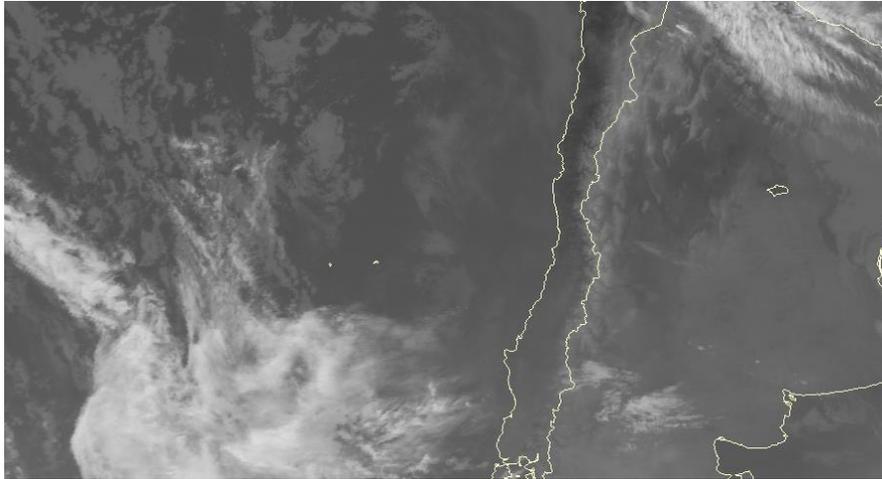
<sup>44</sup> Fuente DMC



**Figura 4 Concentraciones horarias de MP10 en Rancagua, Rengo y San Fernando 25 al 28 de mayo de 2011**

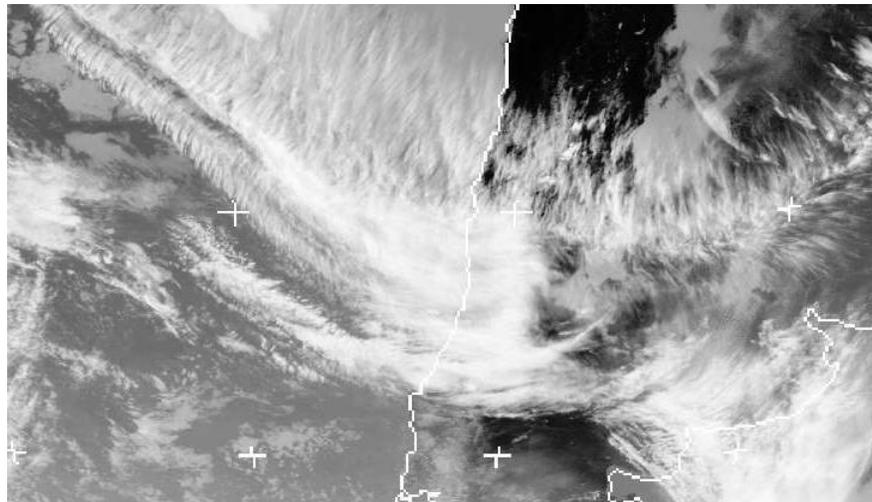
En la Figura 3 se aprecia las concentraciones horarias de MP10 entre los días 25 y 28 de mayo. Se observa durante los días 25 y 26 en general una buena correspondencia en el comportamiento del MP10 en las tres estaciones. Los días 27 y 28, los valores de MP10 de la estación de Rancagua muestra una evolución marcadamente diferente respecto a Rengo y San Fernando; mientras en Rancagua se registran altos valores de MP10, en las otras dos estaciones estos disminuyen. El comportamiento disímil del MP10 entre las estaciones no tiene una justificación en las condiciones meteorológicas de dispersión, pudiendo tratarse de registros erróneos de la red SÍVICA en Rengo y San Fernando, o de emisiones locales de MP10 en las cercanías de la estación de monitoreo de Rancagua. Se constata por otra parte periodos sin datos en las tres estaciones de la red de monitoreo.<sup>45</sup>

<sup>45</sup> Red SÍVICA



**Figura 5 Imagen espectro IR, 25 de mayo de 2011 17:15 hora local**

En la Figura 4 correspondiente al 25 de mayo se observan cielos despejados en la zona centro-sur, determinados por la presencia de una dorsal asociada a un episodio tipo A(r). Al oeste sobre el Pacífico se aprecia nubosidad disgregada correspondiente a la aproximación de un sistema frontal débil.



**Figura 6 Imagen espectro IR, 28 de mayo de 2011 14:00 hora local**

En la Figura 5, la imagen satelital del 28 de mayo en la tarde (14:00 local), muestra sobre la zona central abundante nubosidad del tipo media y alta asociada a un sistema frontal y fuertes vientos en altura (corriente en chorro), lo que determinó un empeoramiento de las condiciones de dispersión debido a un episodio tipo BPF(r).

## 16.4 Conclusiones

- Para el día 25 el pronóstico de calidad del aire indicaba Nivel0 Bueno, constatándose Nivel1 Regular, lo que implica que se subpronosticó en un nivel respecto a lo observado.
- Los registros de Rancagua respecto a Rengo y San Fernando muestran una buena correspondencia los días 25 y 26; y diferencias significativas los días 27 y 28. Esto último podría deberse al impacto de fuentes puntuales cercanas a la estación de monitoreo de Rancagua o a datos erróneos entregados por la red de monitoreo. Las tres estaciones muestran además periodos con falta de datos de MP10.<sup>46</sup>
- El episodio correspondió a un episodio mixto que comenzó con una condición A (r), y culminó con un episodio tipo BPF(r).
- Para el día 26, el modelo de calidad del aire entregó un valor pronosticado en el Nivel0 Bueno. Las condiciones meteorológicas de dispersión se preveían regulares, con un ligero empeoramiento en la calidad de aire pero manteniéndose en el Nivel0 Bueno, nivel que se constató, por lo tanto el pronóstico fue acertado.
- Para el día 27, la configuración sinóptica, efecto BPF (r) de intensidad débil, asoció moderada estabilización y, de acuerdo a lo previsto, el PMCA fue evaluado como condición de ventilación Regular. La calidad del aire, correspondió al Nivel1 Regular.
- El día 28, la configuración sinóptica, efecto BPF (r), asoció un incremento en la estabilización a niveles bajos y, no obstante el modelo de Calidad de Aire dio un resultado de Nivel0 Bueno, mediante la opinión experta se recomendó el Nivel1 Regular, tomado por la Autoridad Ambiental y siendo el que se constató.
- Hubo periodos con datos faltantes en las tres estaciones de monitoreo, y días con datos dudosos en las tres estaciones de monitoreo, Rancagua, Rengo y San Fernando.<sup>47</sup>

---

<sup>46</sup> Fuente [www.sivica.cl](http://www.sivica.cl)

<sup>47</sup> Fuente [www.sivica.cl](http://www.sivica.cl)

## 17 EPISODIO 3: 30 y 31 de mayo\_ Nivel 1 Regular

### 17.1 Bitácora del Episodio

Pronóstico de PMCA (Condición Relevante, PMCA mayor pronosticado)

Día	PMCA Pronosticado	PMCA Observado	Diferencia	Categoría
30	4	4	0	
31	4	4	0	

Pronóstico de Calidad de Aire ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) Ecuación N°1

Día	Pronóstico $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Observado $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Diferencia $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Pronóstico Nivel	Observado Nivel	Diferencia
30	178	157 (*)	21	1	1	0
31	151	188	-37	1	1	0

Pronóstico de Calidad de Aire ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) Ecuación N°2

Día	Pronóstico $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Observado $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Diferencia $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Pronóstico Nivel	Observado Nivel	Diferencia
30	138	157 (*)	-19	0	1	-1
31	161	188	-27	1	1	0

(\*) Sin información al momento de la realización de los pronósticos.

## 17.2 Condiciones pronosticadas

### **Lunes 30**

Empeoramiento de las condiciones de ventilación, con un PMCA3 en la mañana, y PMCA4 en la tarde. De acuerdo a esto, se preveía una calidad de aire regular a mala, especialmente en la noche.

### **Martes 31**

Continuarían las malas condiciones de ventilación, con un PMCA4 todo el día. Con esta categoría de PMCA, el modelo de 7 AM (Día1) a 6 AM (Día2) dio como resultado Nivel1 Regular ( $161 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ecuación 2), y la opinión experta indicó que se preveía calidad del aire en Nivel1 Regular, pudiendo alcanzarse el Nivel2 Malo.

## 17.3 Condiciones observadas

### **Lunes 30**

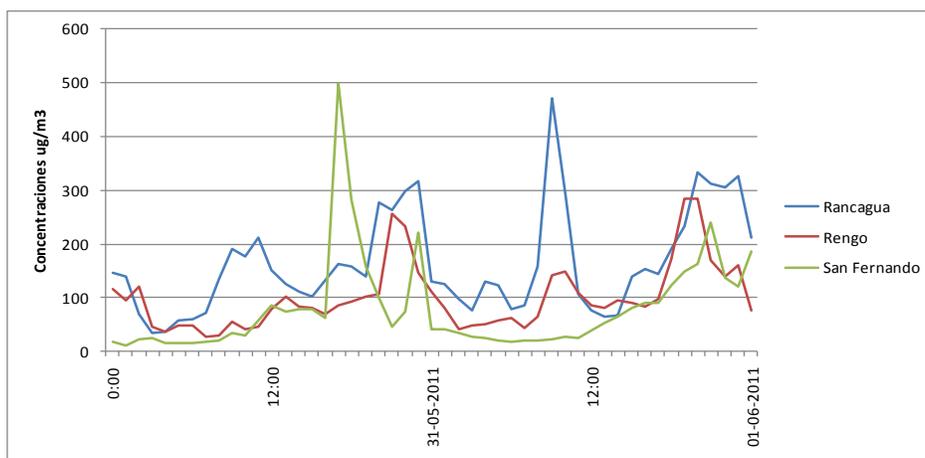
En Rancagua se constató un PMCA4, debido a la presencia de una dorsal en altura en proceso de intensificación, y un margen de altas presiones en superficie, condiciones típicamente asociadas a mala ventilación y altas concentraciones de material particulado. De acuerdo a los datos disponibles, el promedio fijo de 24 hrs a las 6 horas del día 30, alcanzó a  $157 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , correspondiente al Nivel1 Regular (Figura 6).

### **Martes 31**

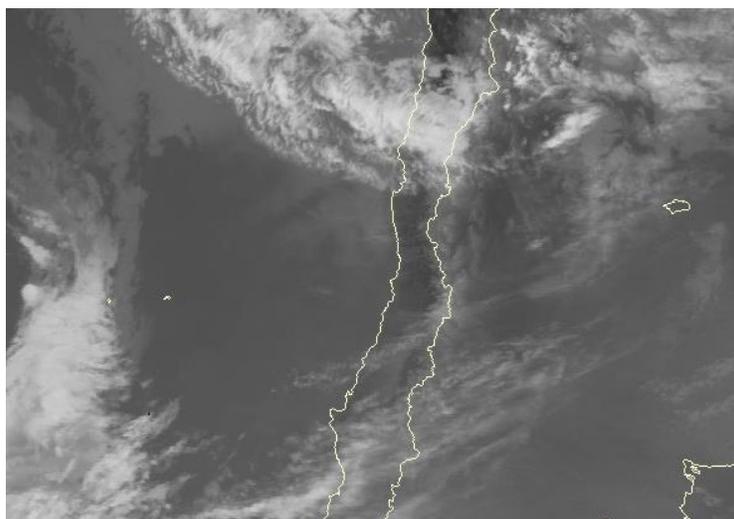
Se mantuvo la presencia de una dorsal en altura y un margen de altas presiones en superficie (ver Figura 7), y consecuentemente las malas condiciones de dispersión. De acuerdo a la información disponible, el promedio fijo de 7 AM (Día1) a 6 AM (Día2) alcanzó  $188 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , correspondiente al Nivel1 Regular, a solo  $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  del Nivel2 Malo.

El episodio Tipo A(r) provocó incrementos en los valores horarios de MP10 en las tres estaciones del valle (Figura 6) principalmente durante las noches. Cabe destacar el comportamiento anómalo de los registros en la estación de San Fernando. En la serie de tiempo se puede apreciar un marcado incremento en las concentraciones de MP10 durante la tarde del día 30, a un horario atípico y muy por sobre lo observado en las

estaciones de Rancagua y Rengo. El día 31 sucede lo inverso, mientras Rancagua y Rengo muestran valores horarios elevados durante la mañana, la estación de San Fernando se mantiene muy por debajo de las otras dos estaciones. Esto sugiere datos erróneos probablemente debidos a un mal funcionamiento de los sensores de la estación de monitoreo.<sup>48</sup>



**Figura 7 Concentraciones horarias de MP10 en Rancagua, Rengo y San Fernando 30 al 31 de mayo de 2011**



**Figura 8 Imagen espectro IR, 31 de mayo de 2011 16:00 hora local**

En la Figura 7 se puede apreciar sobre la zona centro-sur nubosidad alta dispersa con orientación SO-NE, asociada a la presencia de la dorsal en altura, si bien predominan cielos mayormente despejados.

<sup>48</sup> Red SIVICA

## 17.4 Conclusiones

La condición meteorológica observada correspondiente a un episodio Tipo A(r) fue correctamente pronosticada. Se previó en la opinión experta que la calidad de Aire se presentaría en un Nivel Regular1, pudiendo alcanzar el Nivel2 Malo, lo que aconteció, constatándose el Nivel 1, a sólo 7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  del Nivel2.

## 18 EPISODIO 4: Día 01 de junio Nivel 3 Muy Malo; Día 02 de junio Nivel 2 Malo

### 18.1 Bitácora del Episodio

Pronóstico de PMCA (Condición Relevante, PMCA mayor pronosticado)

Día	PMCA Pronosticado	PMCA Observado	Diferencia Categoría
01	3	3	0
02	3	3	0

Pronóstico de Calidad de Aire ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) Ecuación N°1

Día	Pronóstico $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Observado $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Diferencia $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Pronóstico Nivel	Observado Nivel	Diferencia
01	146	241	-95	0	3	-3
02	115	198	-83	0	2	-2

Pronóstico de Calidad de Aire ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) Ecuación N°2

Día	Pronóstico $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Observado $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Diferencia $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Pronóstico Nivel	Observado Nivel	Diferencia
01	130	241	-111	0	3	-3
02	128	198	-70	0	2	-2

## 18.2 Condiciones pronosticadas

### **Miércoles 01**

Aproximación de un sistema frontal débil; se pronosticó un PMCA3 y calidad del aire en Nivel0\_Bueno, cercano a Nivel1 Regular. El modelo de calidad del aire pronosticó Nivel0 Bueno.

### **Jueves 02 Junio**

Aproximación y presencia de un sistema de bajas presiones en altura. Las condiciones de ventilación se preveían buenas en las primeras horas, variando a regulares hacia la noche, y la calidad del aire en un Nivel0 Bueno, cercano a Nivel1 Regular. El modelo de calidad del aire pronosticó Nivel0 Bueno.

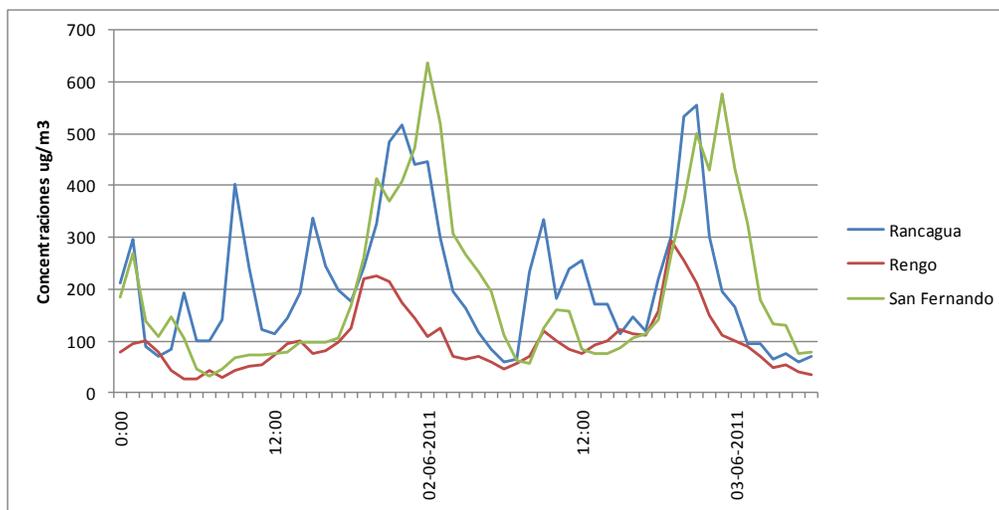
## 18.3 Condiciones observadas

### **Miércoles 1**

Aproximación de una vaguada en altura, acompañando a un sistema frontal, configuración típicamente asociada a una mejoría de las condiciones de ventilación, PMCA3 como relevante observado. Esta situación de mejoramiento de las condiciones de ventilación fue constatada en las diversas localidades de la zona central del país donde hay mediciones, de hecho, Rancagua registró vientos de hasta 10 nudos en la tarde<sup>49</sup>.

---

<sup>49</sup> Fuente: Dirección Meteorológica de Chile

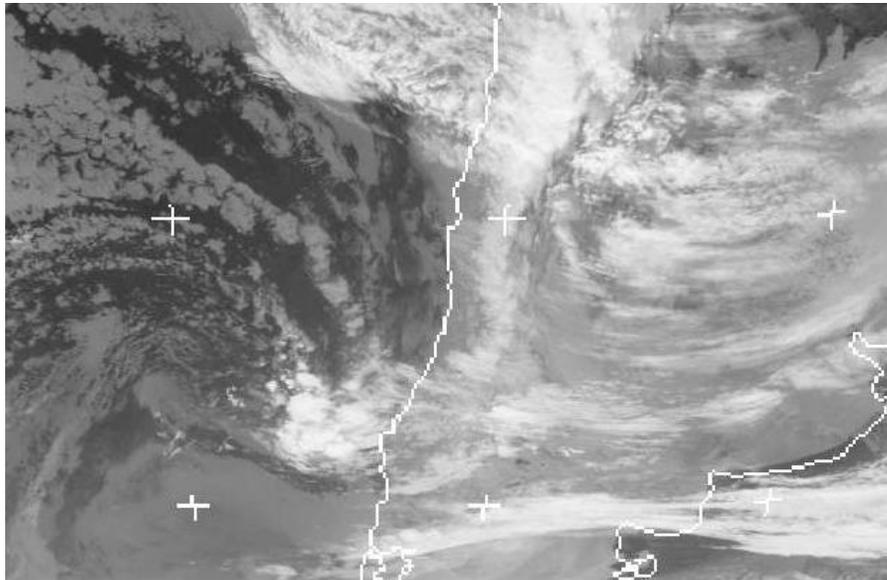


**Figura 9 Concentraciones horarias de MP10 en Rancagua, Rengo y San Fernando 01 al 03 de junio de 2011**

En la Figura 8 se aprecia que los datos disponibles de calidad de aire por MP10 de la red SIVICA, mostraron registros diferentes, alcanzándose un Nivel3 Muy Malo en el promedio de 7 AM (Día1) a 6 AM (Día2) ( $241 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), con un peak vespertino atípico. San Fernando mostró un registro máximo nocturno aún mayor que Rancagua.

### **Jueves 02**

Presencia de sistema de bajas presiones en altura, y condiciones de ventilación de buenas a regulares, PMCA2 a PMCA3. La calidad de aire registrada en el promedio de 7 AM (Día1) a 6 AM (Día2) llegó a  $198 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , correspondiente Nivel2 Malo, a sólo  $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  del Nivel 1 Regular.



**Figura 10 Imagen espectro IR, 02 de junio de 2011 05:00 hora local**

En la Figura 9 se puede apreciar la presencia de diferentes tipos de nubosidad, asociados a una vaguada en altura y a un sistema de bajas presiones en superficie, típicamente correspondientes a condiciones de ventilación Regulares o Buenas.

Esto no se vio reflejado en la calidad del aire, como se pudo observar en la Figura 8. Tanto Rancagua, Rengo como San Fernando mostraron un incremento en sus valores horarios de MP10; inusuales para la configuración meteorológica y las condiciones de ventilación previstas y registradas. Si bien se aprecia una buena concordancia en las tendencias de las tres estaciones, Rancagua muestra el día 01 un comportamiento irregular, con dos peaks fuera del ciclo diurno típico; uno en la madrugada y el segundo en la tarde, a la hora de mayor crecimiento de la capa de mezcla.

#### **18.4 Conclusiones**

Las condiciones meteorológicas que se presentaron el 01 de junio fueron correctamente pronosticadas, pero no se observó concordancia respecto a los registros de calidad del aire. Al respecto cabe señalar, que en Santiago, después de las malas condiciones de ventilación y de calidad de aire registradas el 31 de mayo, el 01 de Junio experimentaron una mejoría significativa, alcanzándose el Nivel0 Bueno, en todas las estaciones. La condición meteorológica a escala sinóptica registrada en Santiago fue la misma que la registrada en la Región de O'Higgins. Esta situación anómala podría deberse a alguna de las siguientes causas o a una conjunción de estas:

- Un marcado aumento regional en las emisiones los días 01 y 02 que pudiera haber contrarrestado la mejoría en las condiciones de ventilación.
- Significativo aporte de fuentes emisoras puntuales ubicadas viento arriba de las estaciones.
- Incendios generados viento arriba de las estaciones de monitoreo.
- Un fenómeno de estabilización a escala local independiente de la configuración a escala sinóptica y del entorno, del cual no se tendría referencias en las mediciones previas a 2010.
- Registros de MP10 anormalmente altos, debido a problemas de calibración instrumental de los equipos de monitoreo.

El día 02 de junio, nuevamente se constató inconsistencias entre las condiciones meteorológicas de dispersión y la calidad de aire observada. Si bien los niveles de MP10 mostraron un ligero descenso respecto al día anterior, continuaron elevados en relación a las condiciones meteorológicas de dispersión observadas. Se ha trabajado con series de tiempo que muestran la buena correlación entre las estaciones de monitoreo de Pudahuel y Rancagua, con valores superiores en Pudahuel.<sup>50</sup> Al respecto cabe señalar que este día en Santiago con excepción de una estación, que sobrepasó ligeramente el nivel regular, las restantes se mantuvieron en nivel Bueno durante todo ese día.

## 19 EPISODIO 5: Día 03 de junio Nivel 2 Malo, Día 04 de junio Nivel 1 Regular

### 19.1 Bitácora del Episodio

Pronóstico de PMCA (Condición Relevante, PMCA mayor pronosticado)

Día	PMCA Pronosticado	PMCA Observado	Diferencia Categoría
03	4	4	0
04	3	3	0

Pronóstico de Calidad de Aire ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) Ecuación N°1

Día	Pronóstico	Observado	Diferencia	Pronóstico	Observado	Diferencia

<sup>50</sup> CENMA 2009 Desarrollo de un sistema de pronóstico para Rancagua. Análisis de series de tiempo Santiago-Rancagua

	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Nivel	Nivel	
03	156	213	-57	1	2	-1
04	138	187	-49	0	1	-1

Pronóstico de Calidad de Aire ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) Ecuación N°2

Día	Pronóstico $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Observado $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Diferencia $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Pronóstico Nivel	Observado Nivel	Diferencia
03	132	213	-81	0	2	-2
04	106	187	-81	0	1	-1

## 19.2 Condiciones pronosticadas

### **Viernes 03**

Rápida aproximación y presencia de una dorsal o sistema de altas presiones en altura. De acuerdo a esta situación meteorológica, se pronosticó malas condiciones de ventilación, PMCA4 y mala calidad de aire, especialmente en la noche, cuando se preveía que el sistema alcanzaría su mayor intensidad.

### **Sábado 04**

Aproximación de un área de bajas presiones asociada a un sistema frontal y gradual mejoramiento de las condiciones de ventilación, a partir de las primeras horas del día, PMCA3 pasando a PMCA2. Calidad del aire en Nivel1 Regular con tendencia a mejorar. El modelo de calidad del aire pronosticó Nivel0 Bueno.

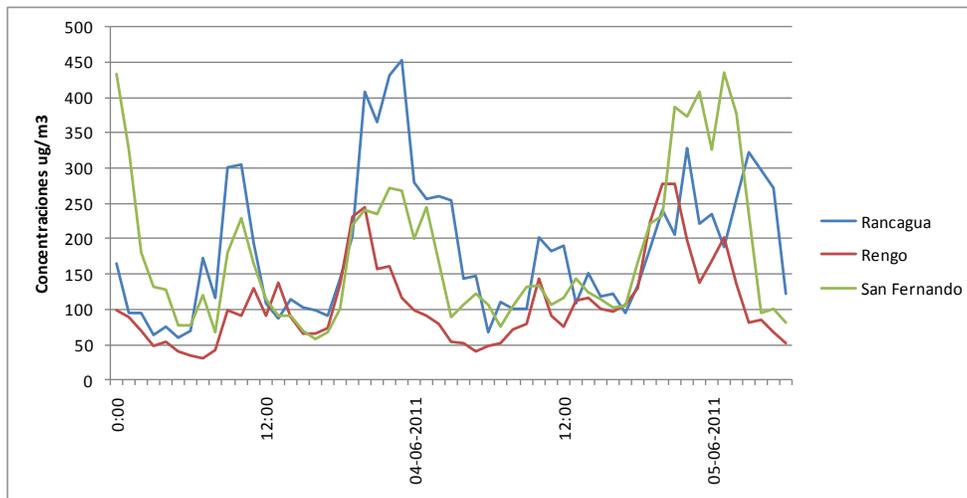
## 19.3 Condiciones observadas

### **Viernes 03**

Presencia de sistema de altas presiones en altura, ocasionando malas condiciones de ventilación (PMCA4) y mala calidad del aire. El promedio de 7 AM (Día1) a 6 AM (Día2), de acuerdo a los datos disponibles, fue de  $213 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , correspondiente al Nivel2 Malo (ver Figura 10).

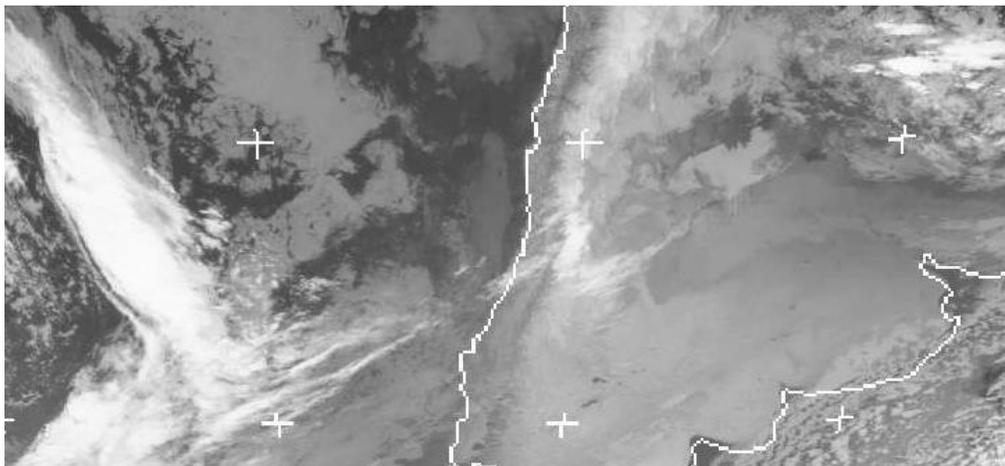
## **Sábado 04**

Gradual mejoría de la condición de ventilación tras el paso de las altas presiones y la posterior aproximación de un sistema frontal a la zona. Con esto, la calidad del aire se presentó en el Nivel Regular, según el promedio de 7 AM (Día1) a 6 AM (Día2) con  $187 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .



**Figura 11 Concentraciones horarias de MP10 en Rancagua, Rengo y San Fernando 03 al 05 de junio de 2011**

La Figura 10 muestra las concentraciones horarias y el comportamiento típico de un episodio Tipo A(r), con peaks de MP10 nocturnos importantes en las tres estaciones y peaks matutinos asociado a la estabilidad asociada a bajas temperaturas matinales, y a las emisiones derivadas del inicio de las actividades diarias en la ciudad.



**Figura 12 Imagen espectro IR, 03 de junio de 2011 08:00 hora local**

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Figura 11 se aprecia la zona central con escasa nubosidad, mientras hacia el oeste sobre el Pacífico se observa un sistema frontal, que ingresaría en la tarde del día 04 mejorando las condiciones de ventilación.

## 19.4 Conclusiones

En este episodio, los registros de calidad del aire estuvieron en concordancia con las condiciones meteorológicas de dispersión, las que afectaron al resto de la Zona Central, incluido Santiago donde se alcanzó el Nivel 2 Malo.

## 20 EPISODIO 6: Días 25\_26 Nivel 3 Muy Malo; Día 27 de junio Nivel 1 Regular

### 20.1 Bitácora del Episodio

Pronóstico de PMCA (Condición Relevante, PMCA mayor pronosticado)

Día	PMCA Pronosticado	PMCA Observado	Diferencia Categoría
25	4	4	0
26	4	4	0
27	3	3	0

Pronóstico de Calidad de Aire ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) Ecuación N°1

Día	Pronóstico $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Observado $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Diferencia $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Pronóstico Nivel	Observado Nivel	Diferencia
25	156	295	-139	1	3	-2
26	125	292	-167	0	3	-3
27	143	159	-16	0	1	-1

## Pronóstico de Calidad de Aire ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) Ecuación N°2

Día	Pronóstico $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Observado $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Diferencia $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Pronóstico Nivel	Observado Nivel	Diferencia
25	142	295	-153	0	3	-3
26	142	292	-150	0	3	-3
27	127	159	-32	0	1	-1

### 20.2 Condiciones pronosticadas

#### **Sábado 25**

Desarrollo de una vaguada costera en superficie, asociada a una dorsal o sistema de las altas presiones en altura (Episodio Tipo A(r)), Las condiciones de ventilación se pronosticaron Regulares en el día y Malas en noche. La calidad del aire por MP10 en Nivel 1 Regular.

#### **Domingo 26**

Presencia de dorsal o sistema de altas presiones en altura, y permanencia de vaguada costera en superficie. Malas condiciones de ventilación durante la mayor parte del día, PMCA4, Calidad del aire en el Nivel1 Regular. El modelo de calidad del aire pronosticó Nivel 0 Bueno, cercano a Regular.

#### **Lunes 27**

Mejoría de las condiciones de ventilación y dispersión de contaminantes, asociada a la resolución de la baja costera, PMCA3; calidad del aire en el Nivel1 Regular.

## 20.3 Condiciones observadas

### Sábado 25

Aproximación de una dorsal en altura y proyección de una vaguada costera en superficie, en concordancia con lo pronosticado. Por otra parte, las condiciones de ventilación pasaron de Regulares durante la primera parte del día, a Malas durante la noche, PMCA4. Se observó un rápido y marcado empeoramiento en la calidad del aire. El nivel alcanzado, según el promedio de 7 AM (Día1) a 6 AM (Día2), fue Nivel3 Muy Malo con  $295 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (ver Figura 12).

### Domingo 26

Se observó una dorsal en altura y la permanencia de la vaguada costera en superficie. Esta configuración Tipo A(r), mantuvo el marcado deterioro de las condiciones de ventilación, PMCA4 y los altos índices de calidad del aire. El promedio fijo de 7 AM (Día1) a 6 AM (Día2) nuevamente registró el Nivel3 Muy Malo con  $292 \mu\text{g}/\text{m}^3$  mayor a lo pronosticado.

### Lunes 27

Resolución de baja costera en superficie, asociada a una mejoría de las condiciones de ventilación, PMCA3. La calidad del aire, varió del Nivel3 Muy Malo registrado en los dos días previos, al Nivel1 Regular, con  $159 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como promedio de 7 AM (Día1) a 6 AM (Día2).

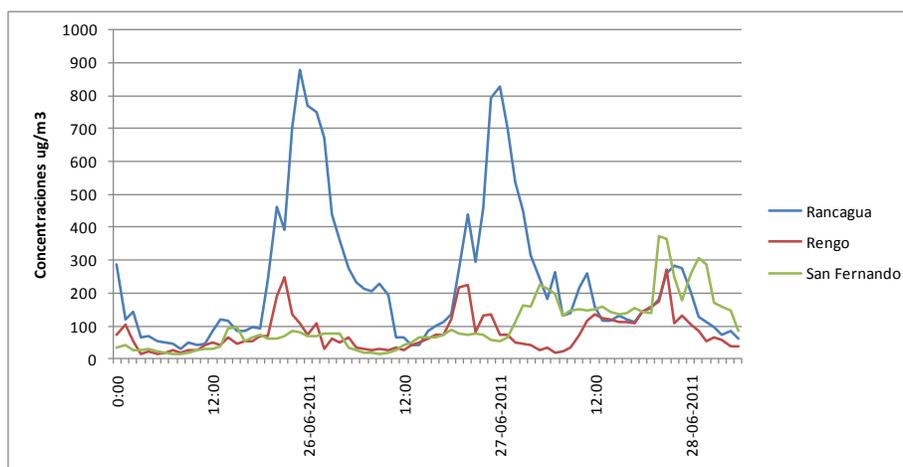
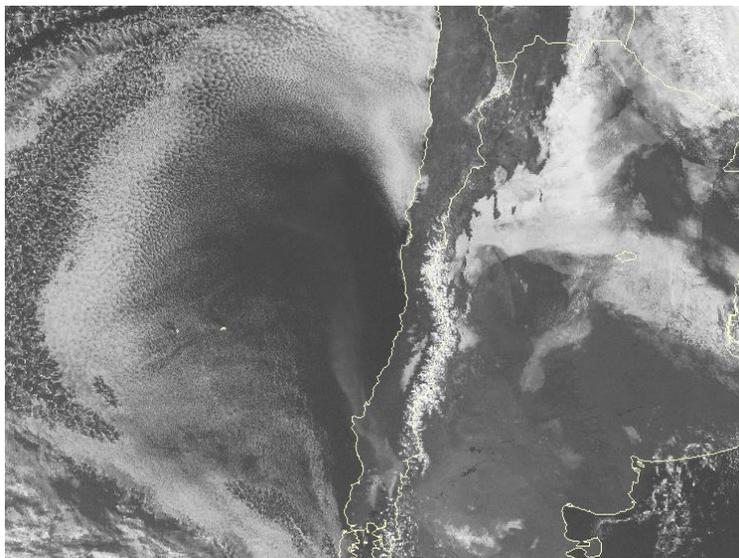


Figura 13 Concentraciones horarias de MP10 en Rancagua, Rengo y San Fernando 25 al 28 de junio de 2011

La Figura 12 muestra la tendencia de un comportamiento típico de las concentraciones horarias de MP10 para un episodio Tipo A(r), con los peaks más importantes durante las noches. Sin embargo, Rancagua presenta concentraciones horarias muy por sobre los registros de Rengo y San Fernando, estaciones que no acusaron la presencia del episodio.



**Figura 14** Imagen espectro IR, 25 de junio de 2011 10:30 hora local

Se aprecia en la Figura 13 una amplia zona despejada sobre el Pacífico frente a la zona central correspondiente a un episodio Tipo A(r). Más al sur se observa la pluma de las cenizas del volcán Caullle arrastrada por el viento Sur-sureste hacia el Nor-noroeste sobre el Pacífico.

## 20.4 Conclusiones

El empeoramiento de las condiciones de ventilación para los días 25 y 26 fue correctamente pronosticado, no obstante de acuerdo a los registros, la intensidad del episodio en Rancagua fue mayor de lo previsto, alcanzándose el Nivel3 Muy Malo, en ambos días.

El pronóstico meteorológico para el día 27 de junio también fue acertado, registrándose un mejoramiento de las condiciones de dispersión debido a la fase de resolución de la baja costera.

Comparados los registros de MP10 en Rancagua, Rengo y San Fernando, se constató valores excesivamente altos en Rancagua respecto a las otras dos estaciones que

presentan valores muy bajos que no detectan el episodio. Estas diferencias podrían deberse a la ubicación de las estaciones respecto a las fuentes emisoras, flujos locales de viento, o a mediciones erróneas de la red SIVICA de monitoreo de calidad de aire.

## 21 EPISODIO 7: Días 02 y 04 de julio Nivel 1 Regular

### 21.1 Bitácora del Episodio

Pronóstico de PMCA (Condición Relevante, PMCA mayor pronosticado)

Día	PMCA Pronosticado	PMCA Observado	Diferencia Categoría
02	4	4	0
03	4	4	0
04	4	4	0

Pronóstico de Calidad de Aire ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) Ecuación N°1

Día	Pronóstico $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Observado $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Diferencia $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Pronóstico Nivel	Observado Nivel	Diferencia
02	162	186	-24	1	1	0
03	164	143	21	1	0	1
04	146	161	-15	0	1	-1

Pronóstico de Calidad de Aire ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) Ecuación N°2

Día	Pronóstico $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Observado $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Diferencia $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Pronóstico Nivel	Observado Nivel	Diferencia
02	144	186	-42	0	1	-1
03	150	143	7	1	0	1
04	138	161	-23	0	1	-1

## 21.2 Condiciones pronosticadas

### **Sábado 02**

Desarrollo de una vaguada costera en superficie, la formación de un núcleo frío en altura al norte de la región, y la aproximación de una dorsal en altura (configuración de episodio Tipo A(r)-N(r)), provocarían un gradual empeoramiento de las condiciones de ventilación a partir de la tarde/noche del sábado 02.

El PMCA estimado fue PMCA 3 (ventilación regular) para la primera parte del día y PMCA 4 (mala ventilación) para la noche.

De acuerdo a esto, el modelo dio como resultado calidad del aire en Nivel1 Regular ( $162 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ); y la opinión experta consideró que la calidad del aire podría alcanzar el Nivel2 Malo.

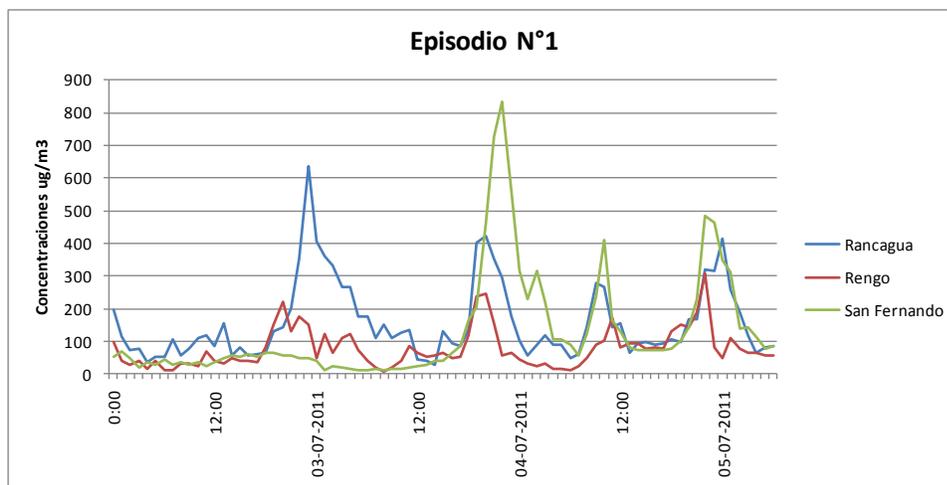
### **Lunes 04**

Persistencia del núcleo frío en altura y resolución en superficie, de la de vaguada costera. Las condiciones de ventilación variarían de malas en la mañana a regulares en la tarde, PMCA4 pasando a PMCA3, estimándose que la calidad del aire se mantendría en Nivel1 Regular, tal como lo pronosticó el modelo de calidad de aire.

## 21.3 Condiciones observadas

### **Sábado 02**

Se observó el desarrollo de una vaguada costera, la formación de un núcleo frío al norte de la zona y la aproximación de una dorsal desde el oeste. A escala local se registraron bajas temperaturas matinales ( $-4^{\circ}\text{C}$ ) y viento débil en superficie, condiciones que en su conjunto asociaron ventilación regular en la mañana y mala durante la noche. PMCA 3 durante la primera mitad del día y PMCA4 durante la segunda mitad. Se registró un peak máximo horario de  $635 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en Rancagua durante la noche del sábado, alcanzándose finalmente un valor de  $186 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como promedio de 7 am del día 1 a 6 am del día 2 hrs (Nivel1 Regular). De acuerdo a la data obtenida, Rengo registró valores considerablemente menores (ver Figura 14).

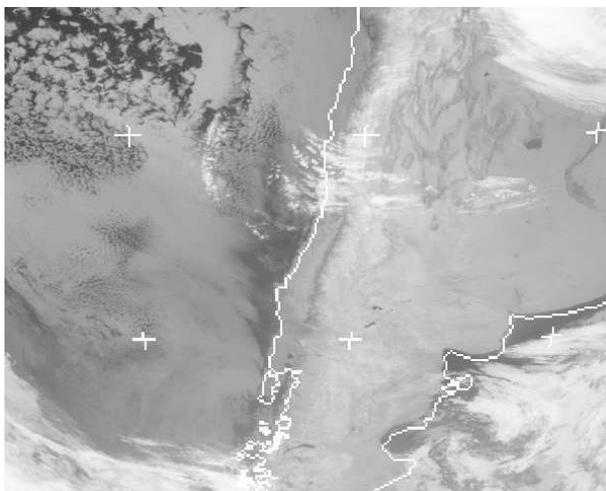


**Figura 14 Concentraciones horarias de MP10 en Rancagua, Rengo y San Fernando 02 al 05 de julio de 2011**

La serie de tiempo de las 3 estaciones de la Red SIVICA muestra un comportamiento razonable de los datos de Rancagua. Los registros de San Fernando muestran una fuerte contraposición entre valores cercanos a cero en la noche del día 02, y el registro máximo sobre 800  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en la noche del día 03, muy superior al registro de las otras estaciones.

**Lunes 04**

Se constató la permanencia del núcleo frío en altura al noroeste, y la disipación de la vaguada costera en superficie. Este último proceso determinó una mejoraría gradual de las condiciones de ventilación y dispersión, alcanzándose un valor de 161  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  como promedio de 7 am del día 1 a 6 am del día 2 correspondiente al Nivel1 Regular.



### Figura 15 Imagen espectro IR, 04 de julio de 2011 08:00 hora local.

En la Figura 15 se observa sobre la zona central nubosidad alta asociada a la presencia de un núcleo frío.

## 21.4 Conclusiones

Tanto el pronóstico meteorológico asociado a calidad del aire (configuración meteorológica y PMCA) para el día 02 de julio, como también el nivel estimado de calidad de aire: Nivel1 estuvieron acertados

En cuanto al pronóstico meteorológico para el día 04 de julio se constató que tanto la configuración sinóptica como las condiciones de ventilación a escala local se presentaron de acuerdo a lo previsto. Al igual que el Nivel de calidad de aire. Cabe hacer notar, que los pronósticos que incorporan núcleos fríos, son de alta complejidad, ya que generalmente persisten varios días, suelen tener desplazamientos erráticos, difíciles de predecir y la posición del núcleo respecto a la zona de interés es fundamental en su relación con la ventilación esperada, es decir, que un pequeño desplazamiento de este sistema puede marcar la diferencia entre una calidad del aire buena o mala.

Por otra parte, en la Figura 14 se puede apreciar que el comportamiento del MP10 en la estación San Fernando, no tiene relación con las condiciones meteorológicas y tampoco con las estaciones de Rengo y Rancagua. Esto se puede deber a factores locales (emisiones cercanas) o a un mal funcionamiento del equipo de medición en San Fernando.

## 22 EPISODIO 8: Día 06 Nivel 1 Regular; Día 07 Nivel 2 Malo; Día 08 Nivel 3 Muy Malo; Días 09 y 10 de julio Nivel 1 Regular

### 22.1 Bitácora del Episodio

Pronóstico de PMCA (Condición Relevante, PMCA mayor pronosticado)

Día	PMCA Pronosticado	PMCA Observado	Diferencia	Categoría
06	4	4	0	
07	4	4	0	
08	4	4	0	
09	3	3	0	
10	4	4	0	

Pronóstico de Calidad de Aire ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) Ecuación N°1

Día	Pronóstico $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Observado $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Diferencia $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Pronóstico Nivel	Observado Nivel	Diferencia
06	177	158	19	1	1	0
07	196	233	-37	2	2	0
08	179	245	-66	1	3	-2
09	153	184	-31	1	1	0
10	109	156	-47	0	1	-1

Pronóstico de Calidad de Aire ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) Ecuación N°2

Día	Pronóstico $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Observado $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Diferencia $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Pronóstico Nivel	Observado Nivel	Diferencia
06	150	158	-8	1	1	0
07	170	233	-63	1	2	-1
08	161	245	-84	1	3	-2

09	150	184	-34	1	1	0
10	119	156	-37	0	1	-1

## 22.2 Condiciones pronosticadas

### **Miércoles 06**

Núcleo frío en altura ubicado al noroeste de la zona y la aproximación de una dorsal en altura (sistema de altas presiones). Condiciones de ventilación regulares en el día variando a malas en la noche, y calidad del aire en Nivel1 Regular.

### **Jueves 07**

Persistencia del núcleo frío en altura, con un leve desplazamiento hacia el norte e intensificación de la dorsal (altas presiones en altura) que aproxima desde el oeste. Empeoramiento tanto de las condiciones de ventilación, las que debían presentarse malas todo el día, como de la calidad del aire, llegando al Nivel2 Malo.

### **Viernes 08**

Aproximación del núcleo frío en altura, hacia la zona central, y debilitamiento de la dorsal en altura. Se preveía también la disipación de una vaguada costera débil ubicada frente a la zona central. Condiciones de ventilación malas en la mañana, variando a regulares en la tarde y madrugada siguiente. Calidad del aire en Nivel2 Malo mejorando a Nivel1 Regular.

### **Sábado 09 de Julio**

Paso del núcleo frío hacia territorio argentino, aproximación y presencia de un sistema de altas presiones en altura de carácter débil. Las condiciones de ventilación se estimaron regulares, y la calidad del Aire Nivel1 Regular.

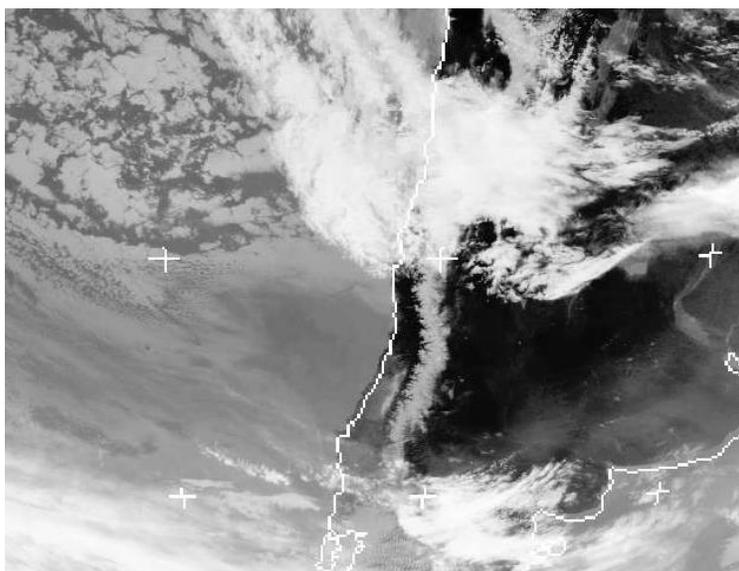
### **Domingo 10 de Julio**

Paso de una dorsal débil y posterior aproximación de una vaguada en altura. Las condiciones de ventilación se previeron malas a regulares, con estabilidad a niveles bajos, principalmente en la mañana. El Modelo entregó un resultado de calidad del aire en Nivel0\_Bueno, pero a través de la opinión experta se previó Nivel1 Regular.

### 22.3 Condiciones observadas

El día 06 de julio se constató el acierto de la condición meteorológica pronosticada, con la presencia de un núcleo frío en altura al noroeste de la Región del Libertador, y la lenta aproximación de un sistema de altas presiones en altura. La calidad del aire, de acuerdo al promedio de 7 am del día 1 a 6 am del día 2., de acuerdo a lo previsto alcanzó el Nivel 1 Regular, con un valor de 158  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

El día 07, nuevamente, se constató la situación meteorológica prevista, con el leve desplazamiento del núcleo frío hacia el norte, y la intensificación del sistema de altas presiones que aproximaba, lo que determinó un marcado aumento de la estabilidad atmosférica y malas condiciones de ventilación. Se observó además el desarrollo de una vaguada costera débil. La calidad del aire, medida como promedio de 7 am del día 1 a 6 am del día 2 alcanzó, de acuerdo a lo previsto, el Nivel 2 Malo con 233  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .



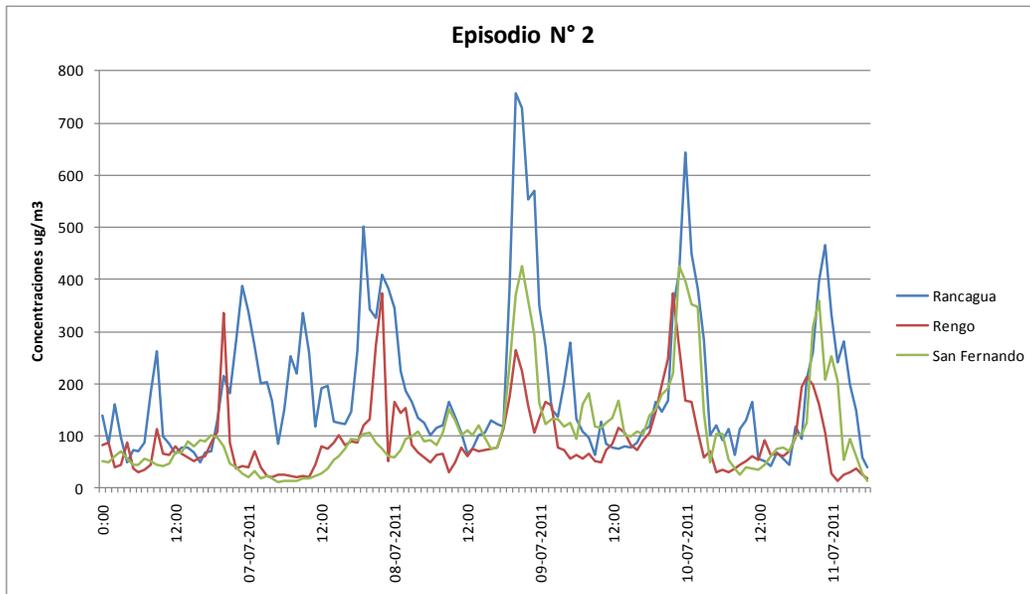
**Figura 16 Imagen espectro IR, 07 de julio de 2011 14:00 hora local**

La Figura 16 muestra un núcleo frío frente al Norte Chico, al noroeste de la zona de Rancagua y un área despejada en el pacífico frente a la zona central del país.

El día 08, si bien se constató la condición meteorológica prevista, debilitamiento tanto del sistema de altas presiones en altura como de la inversión térmica, y disipación de la vaguada costera. En la tarde, Rancagua<sup>51</sup> reportó viento de 15 km/h. Sin embargo, la calidad del aire no solo se mantuvo Mala, sino que registró los mayores valores horarios de MP10 en la noche, alcanzando el Nivel3 Muy Malo, con 245 µg/m<sup>3</sup> en el promedio de 7 am del día 1 a 6 am del día 2.

El 09 de julio se constató el paso del núcleo frío hacia Argentina y la presencia de un sistema de altas presiones en altura, de poca intensidad. El nivel de calidad de aire, medido como promedio de 7 am del día 1 a 6 am del día 2 alcanzó un valor de 184 µg/m<sup>3</sup>, correspondiente a la categoría Regular.

Por último, el día 10 de julio se registró el paso de la dorsal y posterior aproximación de una vaguada en altura, condición que determinó que continuara una gradual mejoría de las condiciones de ventilación. El nivel de calidad de aire medido como promedio de 7 am del día 1 a 6 am del día 2 alcanzó un valor de 156 µg/m<sup>3</sup>, correspondiente a la categoría Regular.



**Figura 17 Concentraciones horarias de MP10 en Rancagua, Rengo y San Fernando 06 al 10 de julio de 2011**

<sup>51</sup> Fuente: Dirección Meteorológica de Chile

La Figura 17 muestra los valores horarios de MP10 durante el episodio. Se aprecia que a pesar de la mejoría en las condiciones de ventilación, durante el día 08, se registraron los mayores peaks nocturnos de concentraciones de MP10.

Por otra parte, la estación de San Fernando no registra peaks durante los días 06 y 07, mientras que Rancagua y Rengo muestran elevadas concentraciones.

## 22.4 Conclusiones

El pronóstico de las condiciones meteorológicas de dispersión y de la calidad del aire para los días 06 y 07, estuvieron acertados. Se trató de una configuración meteorológica que había presentado poco cambio en los días previos, pero se preveía a partir del día 06 una intensificación del sistema de altas presiones en altura, y un gradual empeoramiento de las condiciones de ventilación y de dispersión de contaminantes.

No parecen claras las causas de la persistencia de la mala calidad del aire registrada durante el día 08, considerando que las condiciones meteorológicas tanto pronosticadas como observadas indicaban una mejoría. Cabe señalar que en Santiago, donde predominaron las mismas condiciones meteorológicas a escala sinóptica y donde también el día anterior se había registrado un episodio de mala calidad de aire, se observó una marcada mejoría al llegar la noche, bajado significativamente los índices en las estaciones afectadas. Al parecer se hace necesario investigar más sobre lo que ocurre a nivel local.

El pronóstico meteorológico y la estimación del nivel de calidad del aire, del día 09, resultaron acertados. Sin embargo, llama la atención lo poco que bajaron las concentraciones de MP10 en Rancagua después de la mejoría en las condiciones de ventilación, ya que el valor del día 09 sigue siendo relativamente alto en comparación con lo observado en otros puntos de la zona central.

Para el día 10, tanto el pronóstico meteorológico como la estimación del nivel de calidad del aire, resultaron acertados. La opinión experta determinó un ajuste al resultado del Modelo de Calidad del Aire.

Durante este episodio nuevamente aparecen registros de MP10<sup>52</sup> dudosos lo que impide determinar con certeza la real evolución que tuvo la calidad del aire.

---

<sup>52</sup> Red SIVICA

## 23 EPISODIO 9: Día 22 de julio Nivel 2 Malo

### 23.1 Bitácora del Episodio

Pronóstico de PMCA (Condición Relevante, PMCA mayor pronosticado)

Día	PMCA Pronosticado	PMCA Observado	Diferencia	Categoría
22	4	4	0	

Pronóstico de Calidad de Aire ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) Ecuación N°1

Día	Pronóstico $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Observado $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Diferencia $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Pronóstico Nivel	Observado Nivel	Diferencia
22	196	211	-15	2	2	0

Pronóstico de Calidad de Aire ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) Ecuación N°2

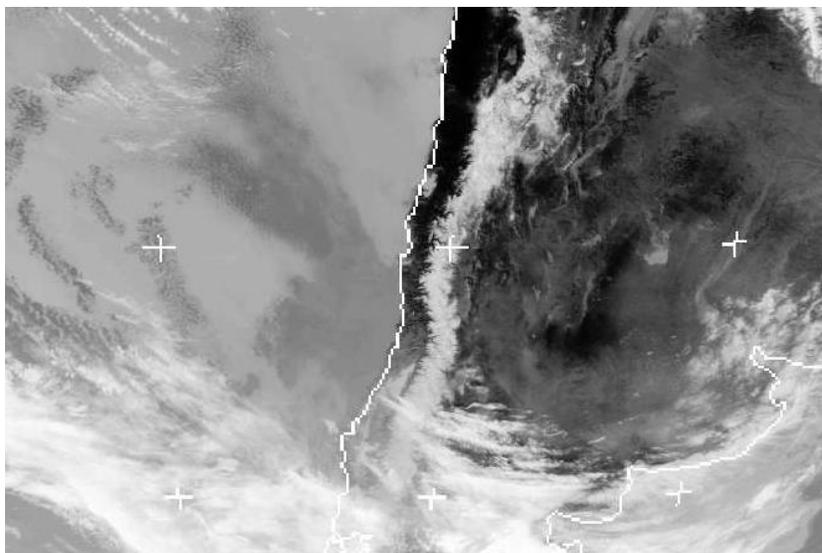
Día	Pronóstico $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Observado $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Diferencia $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Pronóstico Nivel	Observado Nivel	Diferencia
22	172	211	-39	1	2	-1

### 23.2 Condiciones pronosticadas

Presencia de dorsal en altura y desarrollo de vaguada costera en superficie. Condiciones de ventilación malas, con atmósfera mayormente estable durante todo el día. El modelo entregó un resultado de calidad del aire en Nivel2 Malo, coincidiendo con la opinión experta.

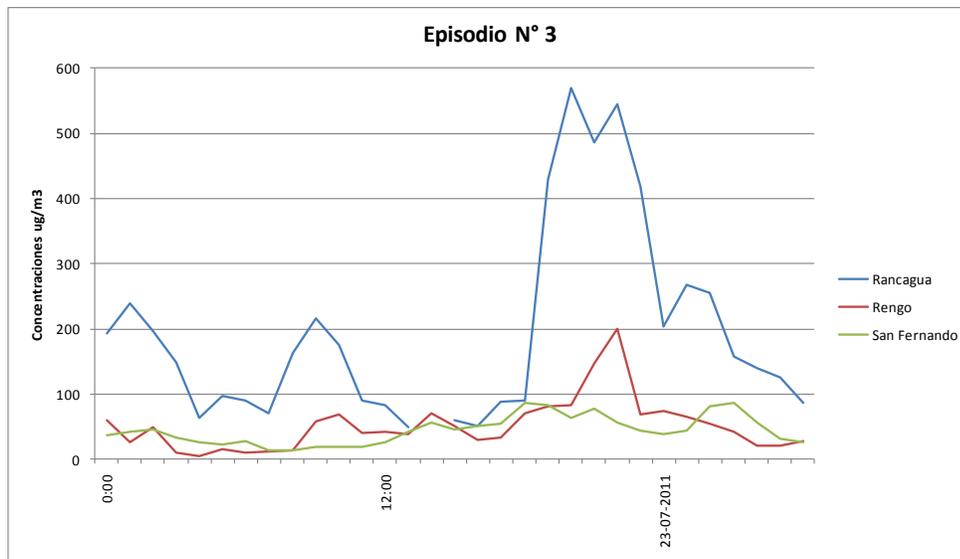
### 23.3 Condiciones observadas

Se constató la con presencia de dorsal en altura y desarrollo de vaguada costera en superficie, condición que asoció mala ventilación, especialmente desde fines de la tarde del 22 y hasta pasada la media noche. El nivel de calidad de aire medido como promedio de 7 am del día 1 a 6 am del día 2, alcanzó un valor de  $211 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , correspondiente al Nivel 2 Malo (Figura 19).



**Figura 18 Imagen espectro IR, 22 de julio de 2011 11:00 hora local**

La Figura 18 muestra frente al norte chico sobre el Pacífico y litoral, una extensa área de estratos, indicativo de la presencia de una vaguada costera, que tiene un típico desplazamiento meridional hacia la zona central. El área despejada en la zona central del país se asocia al proceso de subsidencia atmosférica.



**Figura 19 Concentraciones horarias de MP10 en Rancagua, Rengo y San Fernando 22 de julio de 2011**

La Figura 19 muestra un peak de 569  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a las 19 horas en la estación de Rancagua. Las otras dos estaciones no muestran empeoramiento de la calidad del aire, situación que hace dudar de la calidad de los registros<sup>53</sup>.

### 23.4 Conclusiones

Tanto el pronóstico meteorológico PMCA, como el de nivel de calidad del aire, fueron acertados. La opinión experta coincidió con el resultado del Modelo de Calidad del Aire.

Es dudoso que frente a las mismas condiciones de estabilidad atmosférica, Rengo y San Fernando no hayan registrado<sup>54</sup> un empeoramiento en la calidad del aire.

<sup>53</sup> Red SIVICA

<sup>54</sup> Red SIVICA

## 24 EPISODIO 10: Día 04 de agosto Nivel 1 Regular

### 24.1 Bitácora del Episodio

Pronóstico de PMCA (Condición Relevante, PMCA mayor pronosticado)

Día	PMCA Pronosticado	PMCA Observado	Diferencia	Categoría
04	3	3	0	

Pronóstico de Calidad de Aire ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) Ecuación N°1

Día	Pronóstico $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Observado $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Diferencia $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Pronóstico Nivel	Observado Nivel	Diferencia
04	109	170	-61	0	1	-1

Pronóstico de Calidad de Aire ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) Ecuación N°2

Día	Pronóstico $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Observado $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Diferencia $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Pronóstico Nivel	Observado Nivel	Diferencia
04	94	170	-76	0	1	-1

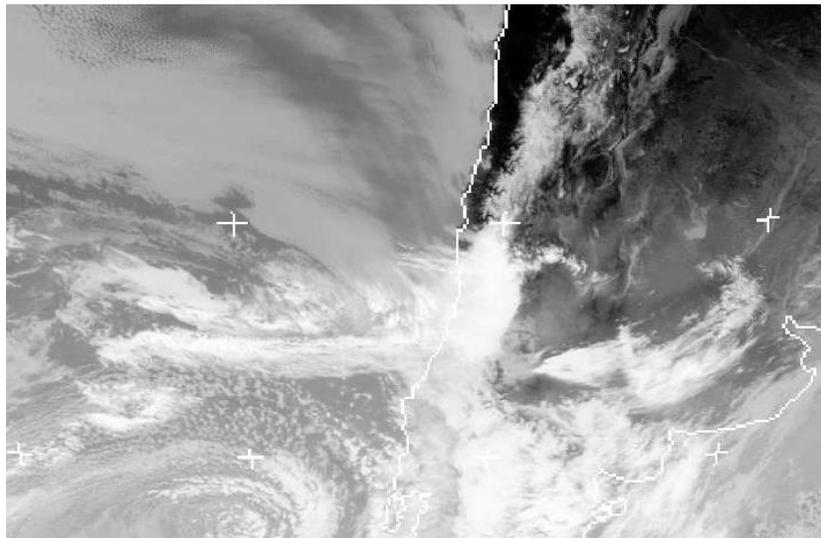
### 24.2 Condiciones pronosticadas

Aproximación de un sistema frontal débil a la zona, con lo cual las condiciones de ventilación mejorarían gradualmente, variando de regulares en la mañana a buenas en la tarde. Se estimó que la calidad del aire se mantendría en Nivel 0 Bueno.

### 24.3 Condiciones observadas

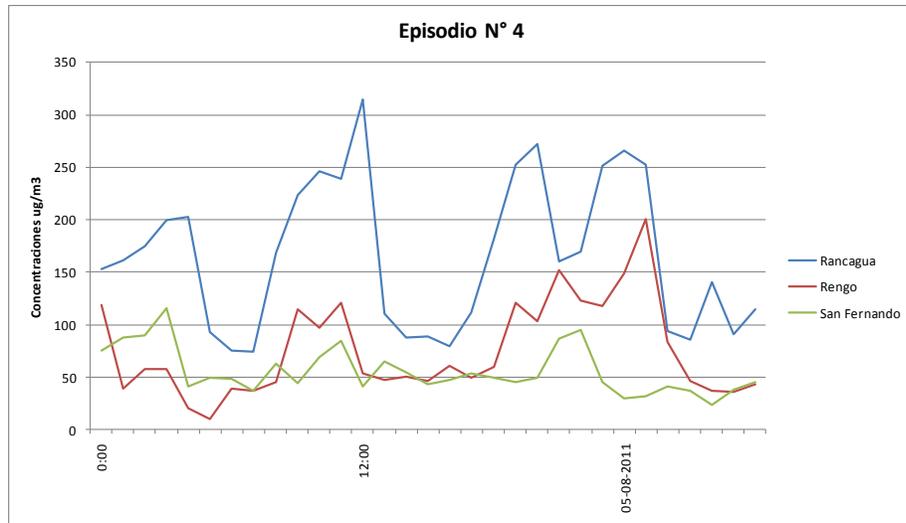
Se constató la condición meteorológica pronosticada, consistente en una aproximación frontal débil (Figura 20), la cual produjo cielo nublado y algunas

precipitaciones débiles solamente en cordillera. El radiosonda de Santo Domingo, si bien mostró ligera estabilidad en la mañana; en la noche no presentó inversión térmica en niveles bajos, condición asociada normalmente a buena ventilación. Las condiciones de dispersión mejoraron en la zona central, y en Santiago los índices de PM10 bajaron. . En Rancagua por el contrario, mostraron un aumento, alcanzando el nivel Regular, con  $170 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el promedio de 7 am del día 1 a 6 am del día 2. Rengo y San Fernando mostraron variaciones menores, subiendo la primera y bajando la segunda, como se aprecia en la Figura 21, aunque su comparación no reviste gran interés, pues variaron dentro de valores bajos.



**Figura 20 Imagen espectro IR, 04 de agosto de 2011 11:00 hora local**

La Figura 20 muestra abundante nubosidad asociada al ingreso de un sistema frontal a la zona, el cual aportó precipitaciones en sectores cordilleranos.



**Figura 21 Concentraciones horarias de MP10 en Rancagua, Rengo y San Fernando 04 de agosto de 2011**

La Figura 21 muestra que aunque en general, los valores observados de MP10 en Rancagua fueron moderados, se registraron peaks superiores a 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  durante el día 04, alcanzándose el Nivel Regular de calidad del aire.

## 24.4 Conclusiones

En este episodio, se presentó una situación donde es difícil explicar desde el punto de vista meteorológico, el empeoramiento de la calidad del aire constatado. Las condiciones meteorológicas se presentaron en general de acuerdo a lo esperado, pero no así el nivel de calidad de aire. Entre otros factores, probablemente la cubierta de nubosidad media, pudo provocar estabilidad local en la cuenca de Rancagua, situación que no se reflejó claramente en el resto del valle.

## 25 Anexos

### 25.1 Características Episodios Tipo A y BPF que afectan a la Región de O'Higgins

La Región del Libertador Bernardo O'Higgins presenta patrones meteorológicos de transición entre las condiciones áridas de la zona norte y la alta pluviosidad de la zona sur, lo que se traduce en marcadas variaciones de temperatura y precipitación entre las estaciones de otoño-invierno y primavera-verano.

Es un hecho reconocido en la literatura científica, que las condiciones de ventilación y dispersión de los contaminantes dependen de las diferentes configuraciones meteorológicas que a escala sinóptica, regional y local evolucionan en la zona central, y que la topografía también desempeña un rol importante<sup>55 56</sup>.

Existe una definición de configuraciones meteorológicas clásicas asociadas a episodios de contaminación atmosférica<sup>57</sup> en otoño e invierno. Aunque estas fueron desarrolladas para la ciudad de Santiago, son absolutamente aplicables a Rancagua como se mencionó con anterioridad.

Las configuraciones meteorológicas asociadas a episodios de contaminación atmosférica se definen como Tipo A, BPF o Mixtas.

#### Configuración Tipo A

Está caracterizada por la irrupción de una dorsal en la troposfera media (flujo de aire descendente al nivel de 500 hPa) y la formación de un centro de baja presión costera a niveles bajos, que se propaga de norte a sur entre el sistema de alta presión subtropical por el oeste, y una alta presión fría migratoria que se desplaza al este de la cordillera de Los Andes.

---

<sup>55</sup> Rutllant J. y Garreaud R. (1995) Meteorological Air Pollution Potential for Santiago, Chile: Towards an Objective Weather Forecasting

<sup>56</sup> Garreaud R., Rutllant J. y Fuenzalida, H. (2001). Coastal Lows in the Subtropical West Coast of South America: Mean Structure and Evolution

<sup>57</sup> Rutllant J. (1994). On the generation of coastal lows in Central Chile

La baja costera produce descenso de aire (subsistencia forzada) en la ladera andina occidental y vientos de dirección este, generados por aglomeración de aire (convergencia superficial) en el sector delantero de la baja presión.

A esta configuración se asocia la presencia de cielos despejados, anomalías negativas de la humedad relativa, y positivas de temperatura, intensificación de la inversión térmica debida a la subsistencia atmosférica, reducción de la capa de mezcla superficial y por tanto, bajo factor de ventilación.

#### Configuración Tipo BPF

A diferencia del episodio A, la configuración tipo BPF se genera por la irrupción de una vaguada en altura (flujo de aire ascendente en la troposfera media) que acompaña a una sistema frontal débil u ocluido, que pierde energía a medida que se aproxima al continente.

Esta condición está asociada a abundante cobertura nubosa prefrontal del tipo media y alta, y bajo factor de ventilación.

#### Episodios Mixtos

Ocurren cuando se alternan los episodios de tipo A y BPF con períodos intermedios del orden de 24 horas. Generalmente los episodios mixtos comienzan con una configuración del Tipo A seguida de una Tipo BPF.

Los episodios Tipo A representan como promedio un 61% del total de episodios y los BPF un 32%. (Rutllant J.-Garreaud R. 1994), en el 7% restante se encuentran otras configuraciones atípicas también conducentes a episodios.

#### Configuración Tipo A-NF

Entre las condiciones atípicas, destaca una configuración, caracterizada en altura por la presencia de un núcleo frío o baja segregada frente al Norte Chico, y una dorsal sobre la Región de O'Higgins con orientación NE/SO.<sup>58</sup> La circulación de vientos en la troposfera media y baja es predominantemente de componente Noreste o Este, lo que generaría subsistencia forzada en la ladera andina occidental. En superficie se observa una

---

<sup>58</sup> CENMA (2009) Tipificación de configuraciones meteorológicas asociadas a distintas categorías de PMCA en Rancagua

vaguada en el sector costero con valores de presión relativamente altos, y que no presenta la evolución típica de la baja costera asociada a los episodios Tipo A.

Pese a la baja frecuencia con que se presenta, debido al significativo efecto en el empeoramiento de las condiciones de dispersión, ha sido tipificada por CENMA como A-NF.

Para efectos de clasificación y comparación estadística, la configuración A-NF, se ha asimilado al Tipo A de prevalecer la dorsal y cielos despejados, y al Tipo BPF cuando se presenta abundante nubosidad asociada al borde sur del núcleo frío.

## 25.2 Categorías Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica

Para efectos operacionales, y sobre la base de las condiciones observadas y analizadas, CENMA efectuó una tipificación de condiciones sinópticas asociadas a distintos valores de Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica (PMCA).<sup>59</sup> Se ajusta para Rancagua y se resume como sigue:

### 1. - PMCA BAJO

Representa muy buenas condiciones de dispersión de contaminantes en el valle de Rancagua, y se asocia a las siguientes características observadas o previstas:

- Ausencia de inversión térmica de subsidencia debido a sistemas frontales activos o marcada inestabilidad.
- Precipitaciones continuas o chubascos asociados a masas de aire inestable.

### 2. - PMCA REGULAR/BAJO

Se asocia en general a buenas condiciones de ventilación y se caracteriza por los siguientes rasgos:

- Inversión térmica de subsidencia débil y elevada.
- Sistemas frontales de regular actividad, precipitaciones aisladas o intermitentes, y condiciones de inestabilidad postfrontal.
- Advecciones de aire húmedo y nubosidad baja desde la costa central.

---

<sup>59</sup> CENMA (1998) Tipificación de condiciones meteorológicas asociadas a distintas categorías de PMCA

- Bajas segregadas en altura o núcleos fríos asociados a chubascos y a un marcado debilitamiento de la inversión térmica de subsidencia.

### 3. - PMCA REGULAR

Se asocia a condiciones de ventilación regulares y correspondería a:

- Predominio de altas presiones y normalmente ausencia de vaguadas costeras y precipitaciones.
- Base de la inversión térmica ubicada entre 500 y 800 msnm y tope ubicado entre 1000 y 1500 msnm.
- Advecciones débiles de aire húmedo y/o nubosidad baja desde la costa central.
- Condiciones prefrontales y paso de sistemas frontales débiles o en altura.

### 4. - PMCA REGULAR/ALTO

Se asocia a condiciones de ventilación mala o crítica, y se relaciona con las siguientes configuraciones:

- Presencia de vaguadas costeras asociadas a una configuración tipo A. (Rutllant et al. 1993; Rutllant 1994).
- Predominio de altas presiones en superficie y marcada subsidencia en la Zona Central, asociada o no a la propagación de vaguadas costeras, y caracterizada por marcados movimientos de descenso de masas de aire, intensificación y descenso de la inversión térmica de subsidencia.
- Condiciones prefrontales asociadas a un bajo factor de ventilación. Condición tipo BPF. (Rutllant et al. 1993; Rutllant 1994)
- Inversión térmica de subsidencia con base ubicada bajo 500 msnm, y tope entre 700 y 1200 msnm, con una diferencia térmica entre la base y el tope del orden de 10°C.
- Núcleo frío frente al norte chico sobre el Pacífico y dorsal en la troposfera media sobre la Región de O'Higgins con orientación NE/SO. (CENMA 2009)
- Índice de Circulación Zonal medio o alto.

## 5. - PMCA ALTO

Las configuraciones sinópticas asociadas son similares a las descritas en el punto anterior (PMCA Regular-Alto), pero representaría las condiciones más intensas, mejor definidas y más persistentes de las configuraciones descritas.

- Presencia de vaguada costera asociada a una configuración tipo A. (Rutllant et al. 1993; Rutllant 1994).
- Predominio de altas presiones y marcada subsidencia en la Zona Central, asociada o no al paso de vaguadas costeras; pero caracterizada por marcados movimientos de descenso de masas de aire, e intensificación y descenso de la inversión térmica de subsidencia.
- Condiciones prefrontales asociadas a un bajo coeficiente de ventilación. Condición tipo BPF. (Rutllant et al. 1993; Rutllant 1994).
- Inversión térmica de subsidencia con base normalmente ubicada bajo los 300 msnm, y tope entre 700 y 1000 msnm, con una diferencia térmica entre la base y el tope del orden de 15° C.
- Núcleo frío frente al norte chico sobre el Pacífico y dorsal en la troposfera media sobre la Región de O'Higgins con orientación NE/SO.(CENMA 2009)
- Índice de Circulación Zonal bajo, lo que determinaría una mayor profundización de la configuración, y el lento desplazamiento de la misma, pudiendo traer como consecuencia una mayor duración de las condiciones críticas sobre la Zona Central.

Se desprende de esta tipificación, que las configuraciones asociadas a las categorías 1, 2, y 3 (Bajo, Regular-Bajo, y Regular), corresponderían a condiciones de no-episodios, en tanto las configuraciones asociadas a las categorías 4 y 5 (Regular/Alto y Alto), estarían asociadas por lo general a condiciones de episodios de alta contaminación atmosférica por MP10.

El valor asignado al PMCA dependerá de la intensidad o grado de definición que presente la configuración sinóptica, siendo por lo tanto en ocasiones difícil determinar, en términos absolutos, una clasificación de PMCA para cada configuración.

El PMCA referenciado a Santiago, es aplicable a Rancagua, en la época comprendida entre Abril y Agosto, y se le asocia a concentraciones de material particulado MP10.



CENTRO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

INFORME FINAL  
“OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE PRONÓSTICO DE  
CALIDAD DE AIRE POR MP10 PARA RANCAGUA  
PERIODO 2011”

UMGCA-014-LMPCA-007-2011

VOLUMEN 4  
ACTUALIZACIÓN COEFICIENTES ECUACIONES DE  
PRONÓSTICO  
VERSIÓN FINAL

---

PREPARADO PARA

SECRETARIA REGIONAL MINISTERIAL DEL MEDIO AMBIENTE  
REGIÓN DEL LIBERTADOR BERNARDO O'HIGGINS

SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2011

## Contenido

1	Antecedentes .....	i
2	Resultados de la actualización.....	ii
2.1	Evaluación realizada con el año 2008.....	ii
2.1.1	Ecuación predictiva N° 1 .....	ii
2.1.2	Ecuación predictiva N°1 (actualizada) .....	iv
2.1.3	Ecuación predictiva N°2 .....	vii
2.1.4	Ecuación predictiva N°2 (actualizada) .....	ix
2.1.5	Ecuación N°1 (original) + Error Criterio .....	x
2.1.6	Ecuación N°1 (actualizada)+ Error Criterio .....	xiii
2.2	Evaluación exploratoria con el año 2011 .....	xv
2.2.1	Ecuación N°1 actualizada evaluada con 2011 .....	xv
2.2.2	Ecuación N°1 actualizada más error criterio, evaluada con 2011 .....	xvi
3	Conclusiones .....	xviii
4	Comentarios y sugerencias .....	xix



## 26 Antecedentes

A continuación se presentan los resultados de la actualización realizada a las ecuaciones de pronóstico de MP10 con promedio fijo de 7 am día1 a 6 am día 2 en Rancagua, considerando el día 0 como el de emisión del pronóstico.

La metodología utilizada consistió en una ampliación de la base de datos original incluyendo los años 2009 y 2011. El año 2010 quedó fuera del análisis debido a la poca confiabilidad de los datos<sup>60</sup>.

Se debió tomar la data de 2011 en el proceso de actualización de coeficientes por no haber otra opción, sin embargo los resultados obtenidos deben ser tomados con cautela, debido a que la información entregada por el equipo de monitoreo de Rancagua <sup>61</sup> mostró algunos periodos con datos dudosos y otros con datos faltantes.

La actualización se realizó con el método del análisis de regresión lineal múltiple utilizando los años 2006, 2007, 2009 y 2011; validando los resultados con el año 2008. Con este método se permite:

- Una comparación real entre los resultados de los dos modelos (original y actualizado), al validar ambos resultados con un mismo periodo (año 2008).
- Ingresar a su "aprendizaje" los valores inusualmente altos observados durante el año 2011 y con eso anticiparse de mejor manera a los probables escenarios del año 2012.

Adicionalmente se actualizaron los coeficientes para el cálculo de la variable DS16D1 (variación diaria), actualizando el ciclo semanal entre los años 2005 y 2009.

---

<sup>60</sup> CENMA, Informe Final Pronóstico Rancagua 2010. Análisis Crítico Información Red SIVICA

<sup>61</sup> Red SIVICA

## 27 Resultados de la actualización

### 27.1 Evaluación realizada con el año 2008

Se consideró la validación de los resultados con la información generada por la estación de Rancagua el 2008, debido al incremento que se registró ese año en el número de episodios de alta contaminación.

#### 27.1.1 Ecuación predictiva N° 1

- Ecuación predictiva N°1 (original)

Las variables y los coeficientes utilizados fueron los siguientes

Ecuación N°1			
variables	coeficientes		R <sup>2</sup>
constante	13,143		0,699
PMCA22D1	19,273		
DS16D1	0,384		
TMXD1	-3,09		
T8500D1	4,778		
T85012D2	-3,309		
PMCA10D2	8,922		

En donde las variables de la ecuación corresponden a :

**Tabla 25 Nomenclatura y descripción de las variables contenidas en la ecuación 1(original)**

MP6D1-6D2	Promedio diario de concentraciones de MP10 entre las 7am del día siguiente y las 6am del día subsiguiente.
PMCA22D1	Potencial meteorológico de calidad de aire a las 22 horas, representativo de la segunda parte del día siguiente.
DS16D1	Variación diaria, basada en el ciclo semanal, utilizando promedio diario de MP10 entre las 7am del día siguiente y las 6am del día actual.
TMXD1	Temperatura máxima en estación Rancagua del día siguiente.
T8500D1	Temperatura en 850hPa a las 00UTC del día siguiente.
T85012D2	Temperatura en 850hPa a las 12UTC del día subsiguiente.
PMCA10D2	Potencial meteorológico de contaminación atmosférica a las 10 horas, representativo de la primera parte del día subsiguiente.

### 27.1.1.1 Serie de tiempo para el MP10 observado y pronosticado

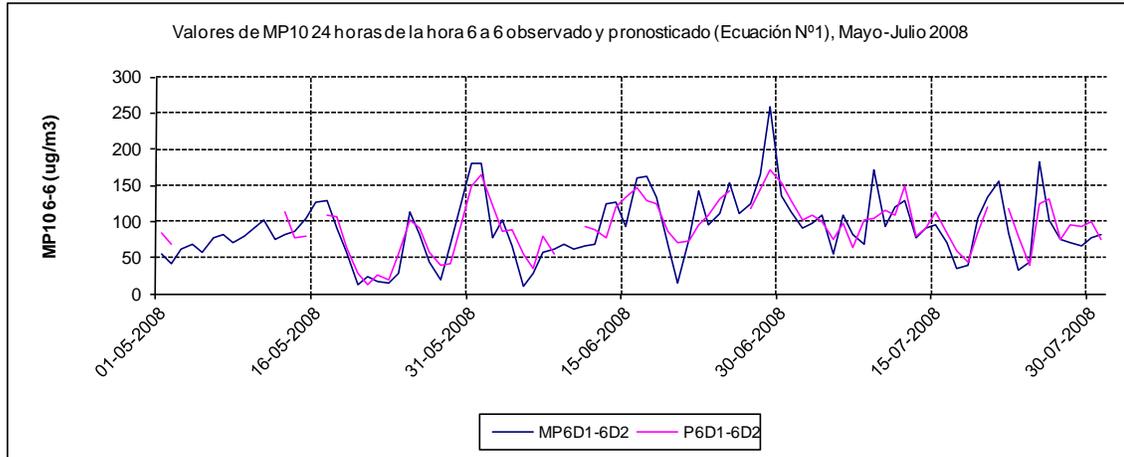


Figura 10 Verificación pronóstico MP10, Ecuación N°1 original

Se observa en la Figura 1, una buena correspondencia entre valores observados y pronosticados, aunque subpronostica los valores máximos.

### 27.1.1.2 Gráfico de dispersión valores observados y pronosticados

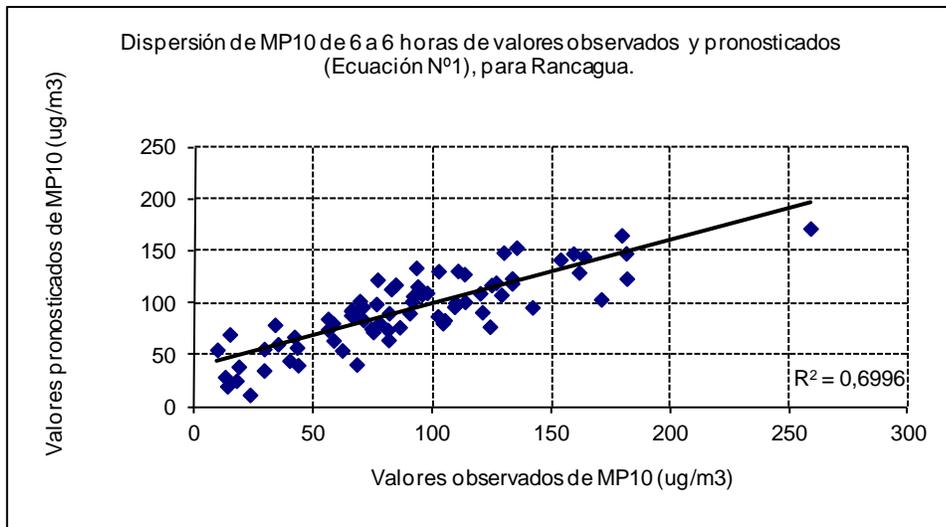


Figura 11 Dispersión MP10 observado y pronosticado, Ecuación N°1 original

La Figura 2 muestra un  $R^2$  de 0,6996 para los valores observados y pronosticados de MP10. A partir de la recta se constata que para valores observados menores a  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  hay tendencia a un sobrepronóstico, en tanto para valores superiores la tendencia se revierte hacia un subpronóstico.

**Tabla 26 Tabla de Contingencia Acierto Ecuación 1 original**

MP246D1-6D2	Observado					
Ecuación N°1	Bueno	Regular	Malo	Muy malo	Total	% Acierto
Bueno	67	4	0	0	70	90,5
Regular	1	4	0	1	7	33,3
Malo	0	0	0	0	0	-----
Muy malo	0	0	0	0	0	-----
Total	68	8	0	1	77	
%Acierto	98,5	50,0	-----	0,0		
N° Aciertos	68					
%Acierto Total	88.3					
ENA	77.8					
FA	33.3					

La Tabla 2 indica un resumen de acierto para la Ecuación N°1 original. Muestra el acierto por categorías, acierto total del modelo, episodios no alertados (ENA) y falsas alarmas (FA).

La Ecuación N°1 original presenta un 88.3% de acierto total, 77,7% de ENA y 33,3% de FA.

### 27.1.2 Ecuación predictiva N°1 (actualizada)

En la Ecuación N°1 actualizada la variable T8500D1 es reemplazada por la variable T8500D2, y los nuevos coeficientes son los siguientes:

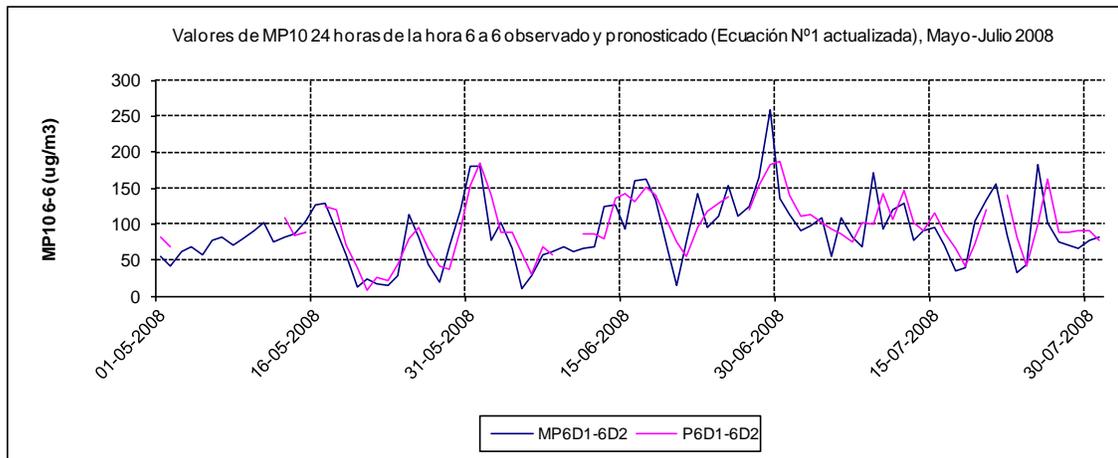
Ecuación N°1 actualizada			
variables	coeficientes		R <sup>2</sup>
constante	0,695		0,705
PMCA22D1	11,197		
DS16D1	0,637		
TMXD1	-2,003		
T8500D2	3,303		
T85012D2	-2,249		
PMCA10D2	10,205		

En donde,

**Tabla 27 Nomenclatura y descripción de las variables contenidas en la ecuación 1(actualizada)**

MP6D1-6D2	Promedio diario de concentraciones de MP10 entre las 7am del día siguiente y las 6am del día subsiguiente.
PMCA22D1	Potencial meteorológico de calidad de aire a las 22 horas, representativo de la segunda parte del día siguiente.
DS16D1	Variación diaria, basada en el ciclo semanal, utilizando promedio diario de MP10 entre las 7am del día siguiente y las 6am del día actual.
TMXD1	Temperatura máxima en estación Rancagua del día siguiente.
T8500D2	Temperatura en 850hPa a las 00UTC del día subsiguiente
T85012D2	Temperatura en 850hPa a las 12UTC del día subsiguiente.
PMCA10D2	Potencial meteorológico de calidad de aire a las 10 horas, representativo de la primera parte del día subsiguiente.

**27.1.2.1 Serie de tiempo para el MP10 observado y pronosticado**



**Figura 12 Verificación pronóstico MP10, Ecuación N°1 actualizada**

En la Figura 3 se grafica la serie de tiempo para el MP10 observado y pronosticado, y muestra un mejor ajuste en valores altos respecto a la ecuación original.

### 27.1.2.2 Gráfico de dispersión valores observados y pronosticados

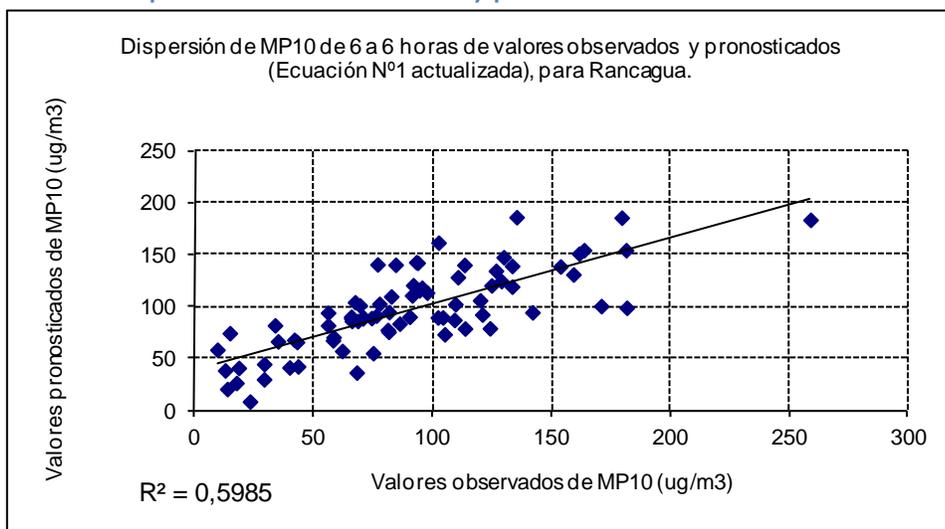


Figura 13 Dispersión MP10 observado y pronosticado, Ecuación N°1 actualizada

En la Figura 4 se aprecia que el  $R^2$  de la ecuación actualizada disminuye respecto a la ecuación original, presentando una mayor dispersión de la serie de puntos.

Tabla 28 Tabla de Contingencia Acierto Ecuación 1 actualizada

MP246D1-6D2 Ecuación N°1 actualizada	Observado				Total	% Acierto
	Bueno	Regular	Malo	Muy malo		
Bueno	66	4	0	0	70	94.3
Regular	2	4	0	1	7	57.1
Malo	0	0	0	0	0	-----
Muy malo	0	0	0	0	0	-----
Total	68	8	0	1	77	
%Acierto	97.1	50.0	-----	0,0		
N° Aciertos	70					
%Acierto Total	90.9					
ENA	44.4					
FA	28.6					

La Tabla 4 muestra que la ecuación 1 actualizada presenta respecto a la ecuación original, una disminución tanto de los ENA alcanzando un 44,4%, como en las FA con un 28,6%, el acierto total aumenta también a 90.9%.

### 27.1.3 Ecuación predictiva N°2

- Ecuación predictiva N°2 (original)

La Ecuación N°2 original, creada como complemento y apoyo a la Ecuación N°1, presenta las siguientes variables y coeficientes:

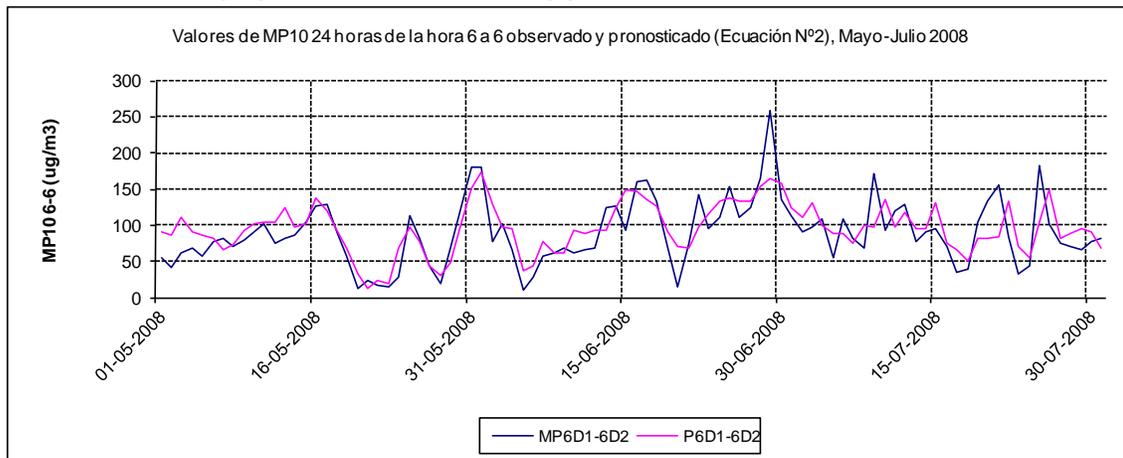
Ecuación N°2		
variables	coeficientes	R <sup>2</sup>
constante	-21,46	0,567
PMCA22D1	22,03	
DS16D1	0,45	
PMCA10D2	5,63	

En donde,

**Tabla 29 Nomenclatura y descripción de las variables contenidas en la ecuación 2(original)**

MP6D1-6D2	Promedio diario de concentraciones de MP10 entre las 7 am del día siguiente y las 6am del día subsiguiente.
PMCA22D1	Potencial meteorológico de calidad de aire a las 22 horas, representativo de la segunda parte del día siguiente.
DS16D1	Variación diaria, basada en ciclos semanales, utilizando promedio de MP10 entre las 7am del día siguiente y las 6am del día actual.
PMCA10D2	Potencial meteorológico de contaminación atmosférica a las 10 horas, representativo de la primera parte del día subsiguiente.

#### 27.1.3.1 Serie de tiempo para el MP10 observado y pronosticado



**Figura 14 Verificación pronóstico MP10, Ecuación N°2 original**

La Figura 5 muestra que la serie de tiempo presenta un cierto desfase entre los valores observados y pronosticados de MP10.

### 27.1.3.2 Gráfico de dispersión valores observados y pronosticados

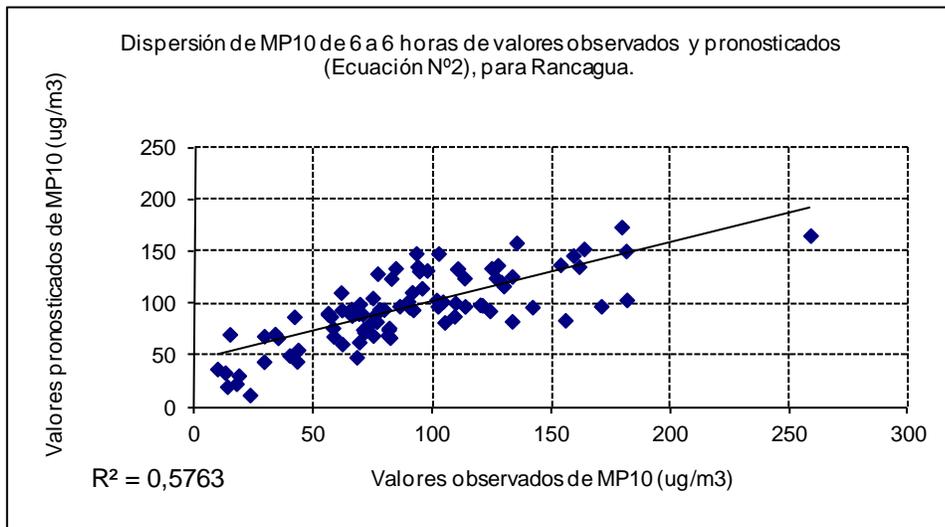


Figura 15 Dispersión MP10 observado y pronosticado, Ecuación N°2 original

Se desprende de la Figura 6, que la Ecuación N°2 original presenta una mayor dispersión que la Ecuación N°1.

Tabla 30 Tabla de Contingencia Acierto Ecuación 2 original

MP246D1-6D2 Ecuación N°2	Observado				Total	% Acierto
	Bueno	Regular	Malo	Muy malo		
Bueno	81	6	0	0	87	93,1
Regular	1	3	0	1	5	60,0
Malo	0	0	0	0	0	-----
Muy malo	0	0	0	0	0	-----
Total	82	9	0	1	92	
%Acierto	98,8	33,3	-----	0,0		
N° Aciertos	84					
%Acierto Total	91,3					
ENA	60,0					
FA	20,0					

La Tabla 6 correspondiente a la Ecuación N°2 original, si bien muestra un alto acierto total (91,3%) presenta un elevado porcentaje de ENA (60%), y un bajo porcentaje (20%) de FA, en relación a la Ecuación N°1.

### 27.1.4 Ecuación predictiva N°2 (actualizada)

La Ecuación N°2 actualizada presenta las mismas variables que la original, modificándose los coeficientes:

Ecuación N°2 actualizada		
variables	coeficientes	R <sup>2</sup>
constante	-14,888	0,694
PMCA22D1	12,419	
DS16D1	0,68	
PMCA10D2	5,583	

#### 27.1.4.1 Serie de tiempo para el MP10 observado y pronosticado

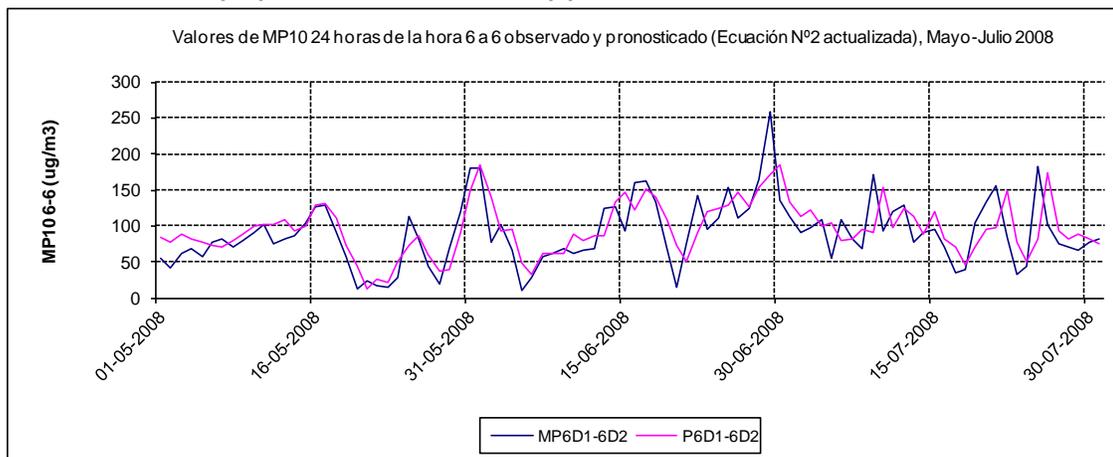


Figura 16 Verificación pronóstico MP10, Ecuación N°2 actualizada

En la Figura 7 se observa un mejor ajuste y menor desfase de las curvas en relación a la ecuación original.

#### 27.1.4.2 Gráfico de dispersión valores observados y pronosticados

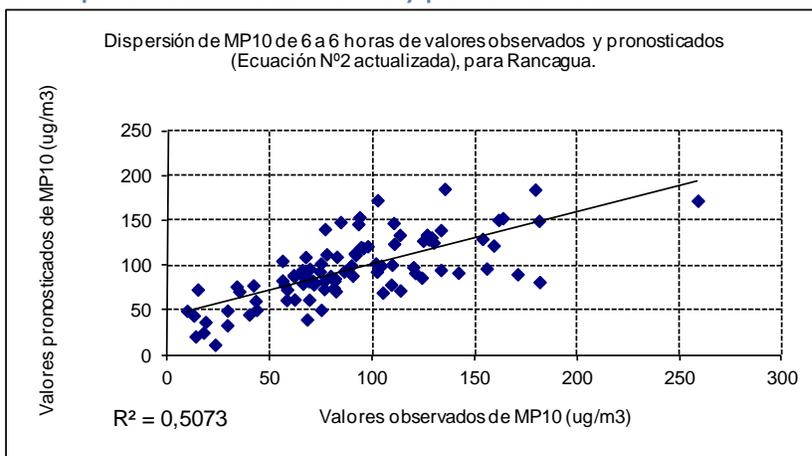


Figura 17 Dispersión MP10 observado y pronosticado, Ecuación N°2 actualizada

La Figura 8 muestra que se logra un ligero mejoramiento en el R2 respecto a la ecuación original.

**Tabla 31 Tabla de Contingencia Acierto Ecuación 2 actualizada**

MP246D1-6D2 Ecuación N°2 actualizada	Observado					% Acierto
	Bueno	Regular	Malo	Muy malo	Total	
Bueno	79	5	0	0	84	94,0
Regular	3	4	0	1	8	50.0
Malo	0	0	0	0	0	-----
Muy malo	0	0	0	0	0	-----
Total	82	9	0	1	92	
%Acierto	96.3	44.4	-----	0,0		
N° Aciertos	83					
%Acierto Total	90.2					
ENA	50.0					
FA	37.5					

En la Tabla 7 se aprecia que la ecuación 2 actualizada presenta respecto a la ecuación original una disminución de los ENA, asociado a un incremento de las FA. Esta ecuación se construyó como una ecuación de respaldo, posee solamente 3 variables en su construcción, para prevenir el caso de que las demás variables sean imposibles de obtener.

### 27.1.5 Ecuación N°1 (original) + Error Criterio

A continuación se muestran los ajustes realizados al adicionar el error criterio obtenido para la Ecuación N°1.

- Ecuación N°1 (original)+ Error Criterio

La Ecuación N°1 original presenta un error criterio de 48.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Este error se suma a lo entregado por la ecuación, cuando se cumplen dos condiciones:

- El valor de la humedad relativa mínima en superficie para el día 1 del modelo ETA es menor a 20%
- La categoría de PMCA prevista para la mañana del día subsiguiente es PMCA4 o PMCA5.

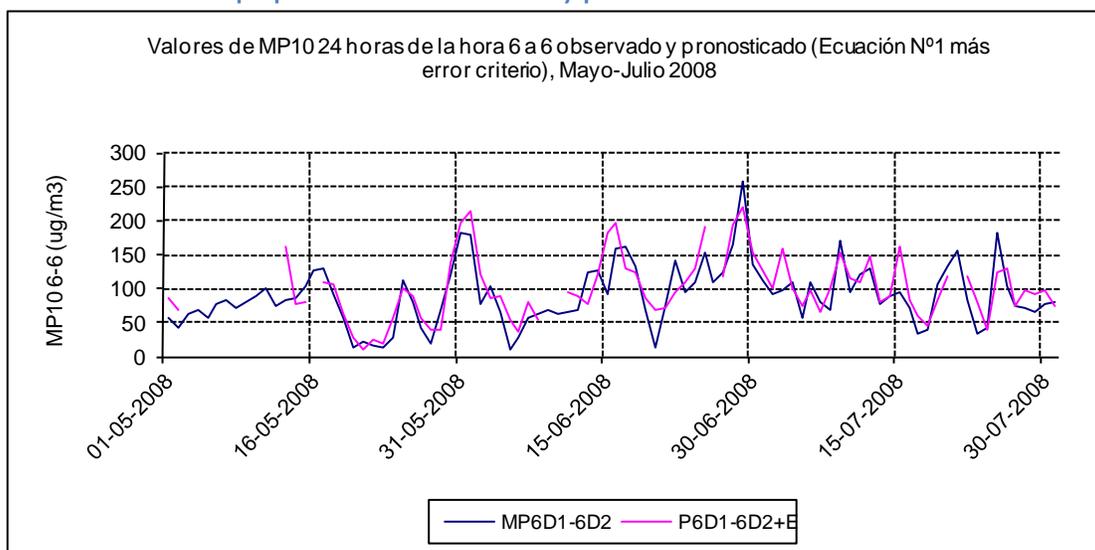
**Error criterio: Si  $\text{HRMNE}1 < 20\%$  y  $\text{PMCA}10\text{D}2 \geq 4$ , entonces adicione al valor pronosticado 48,7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$**

**Tabla 32 Nomenclatura y descripción de las variables contenidas en la ecuación 1 mas error criterio**

MP6D1-6D2	Promedio diario de concentraciones de MP10 entre las 7am del día siguiente y las 6am del día subsiguiente.
PMCA22D1	Potencial meteorológico de calidad de aire a las 22 horas, representativo de la segunda parte del día siguiente.
DS16D1	Variación diaria, basada en ciclos semanales, utilizando promedio diario de MP10 entre las 7am del día siguiente y las 6am del día actual.
TMXD1	Temperatura máxima en estación Rancagua del día siguiente.
T8500D1	Temperatura en 850hPa a las 00UTC del día siguiente.
T85012D2	Temperatura en 850hPa a las 12UTC del día subsiguiente.
PMCA10D2	Potencial meteorológico de calidad de aire a las 10 horas representativo de la primera parte del día del día subsiguiente.
HRMNED1	Humedad relativa mínima pronosticada por modelo ETA para el día siguiente.
PMCA10D2	Potencial meteorológico de contaminación atmosférica a las 10 horas representativo de la primera parte del día del día subsiguiente.

La Tabla 8 detalla las variables de la ecuación 1 original, a la que de darse las condiciones preestablecidas se suma el error criterio.

#### 27.1.5.1 Serie de tiempo para el MP10 observado y pronosticado



**Figura 18 Verificación pronóstico MP10, Ecuación N°1 original más error criterio**

Se depende la Figura 9, que al sumar el error criterio se observa en general, un ligero sobrepronóstico de los máximos de MP10.

### 27.1.5.2 Gráfico de dispersión valores observados y pronosticados

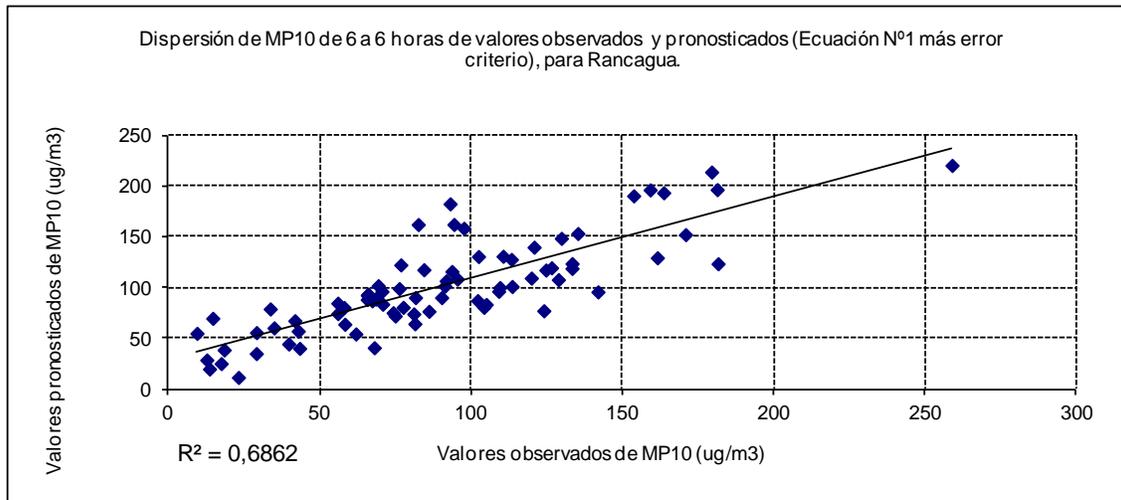


Figura 19 Dispersión MP10 observado y pronosticado, Ecuación N°1 original más error criterio

La Figura 10 muestra que el valor de R2 de la Ecuación N°1 original más error criterio es ligeramente inferior al de la Ecuación N°1 original, sin embargo captura significativamente mejor los episodios.

Tabla 33 Tabla de Contingencia Acierto Ecuación 1 (original) más error criterio

MP246D1-6D2 Ecuación N°1+E	Observado				Total	% Acierto
	Bueno	Regular	Malo	Muy malo		
Bueno	63	2	0	0	65	96.9
Regular	5	3	0	0	8	37.5
Malo	0	3	0	1	4	0.0
Muy malo	0	0	0	0	0	-----
Total	68	8	0	1	77	
%Acierto	92.6	37.5	-----	0,0		
N° Aciertos	66					
%Acierto Total	85.7					
ENA	22.2					
FA	41.7					

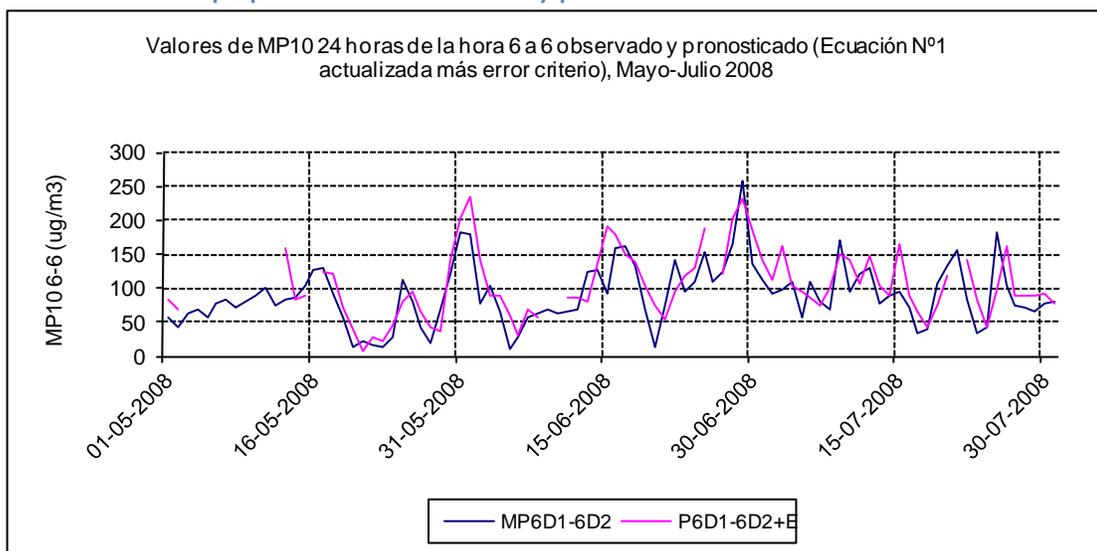
En la Tabla 9 se aprecia que al incorporar el error criterio se logra disminuir significativamente los ENA desde un 77,7% a un 22,2%, aumentando levemente las FA de un 33,3% a un 41,7%.

### 27.1.6 Ecuación N°1 (actualizada)+ Error Criterio

La Ecuación N°1 actualizada presenta en promedio un error criterio de  $18,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en episodios (días con valor promedio mayor a  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Sin embargo la desviación estándar es  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , lo que sugiere la conveniencia de mantener el error criterio calculado para la Ecuación N°1 original de modo de reducir al máximo las subestimaciones de la ecuación. Las condiciones para la utilización del error criterio son las mismas que en la ecuación original.

**Error criterio: Si  $\text{HRMNED1} < 20\%$  y  $\text{PMCA10D} \geq 4$ , entonces adicione al valor pronosticado  $48,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$**

#### 27.1.6.1 Serie de tiempo para el MP10 observado y pronosticado



**Figura 20 Verificación pronóstico MP10, Ecuación N°1 actualizada más error criterio**

Se observa en la Figura 11 que de acuerdo a la serie de tiempo, los resultados de la ecuación muestran una leve tendencia a sobrepronosticar.

### 27.1.6.2 Gráfico de dispersión valores observados y pronosticados

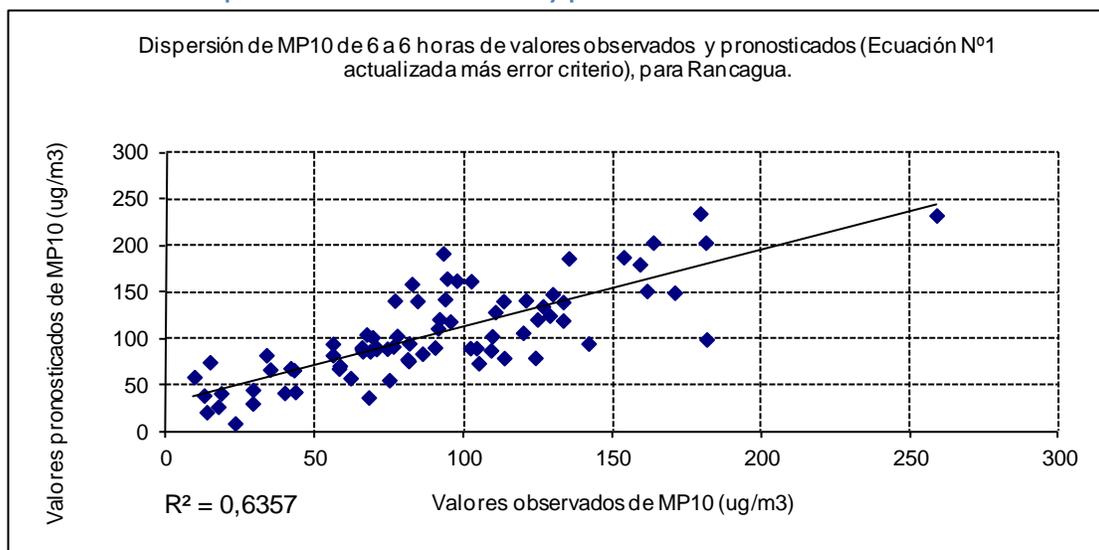


Figura 21 Dispersión MP10 observado y pronosticado, Ecuación N°1 actualizada más error criterio

De la Figura 12 se desprende que adicionado el error criterio a la ecuación N° 1 actualizada el  $R^2$  aumenta de 0.598 a 0.635.

Tabla 34 Tabla de Contingencia Acierto Ecuación 1 actualizada más error criterio

MP246D1-6D2 Ecuación N°1+E actualizada	Observado				Total	% Acierto
	Bueno	Regular	Malo	Muy malo		
Bueno	62	1	0	0	63	98.4
Regular	6	4	0	0	10	40.0
Malo	0	3	0	1	4	0.0
Muy malo	0	0	0	0	0	----
Total	68	8	0	1	77	
%Acierto	91.2	50.0	----	0,0		
N° Aciertos	66					
%Acierto Total	85.7					
ENA	11.1					
FA	42.9					

La Tabla 10 muestra el acierto de la Ecuación N°1 actualizada más error criterio, apreciándose que se logra reducir de manera significativa los ENA, sin empeorar mayormente el número de FA.

## 27.2 Evaluación exploratoria con el año 2011

Aunque no se cuenta con la información validada del periodo 2011, y existen dudas respecto a la calidad de la información, considerando los resultados con la cautela necesaria, se realizó una evaluación de carácter exploratorio. Se utilizaron los datos disponibles a la fecha, lo que incluye información agregada por la red SIVICA de forma posterior a las fechas de elaboración de los pronósticos, obteniéndose lo siguiente:

### 27.2.1 Ecuación N°1 actualizada evaluada con 2011

#### 27.2.1.1 Serie de tiempo para el MP10 observado y pronosticado

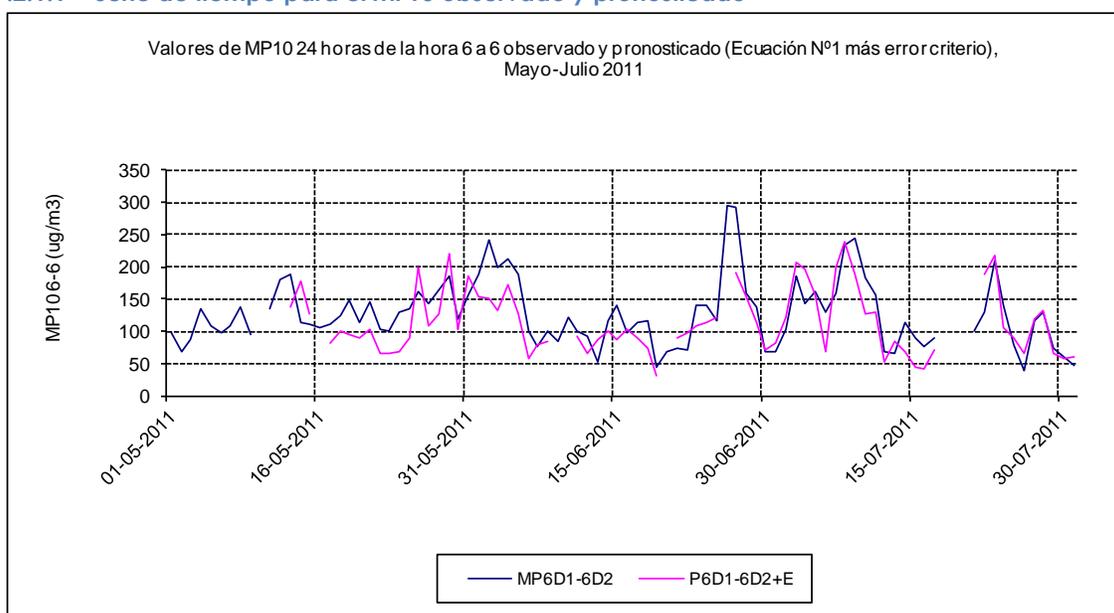


Figura 22 Verificación pronóstico MP10, Ecuación N°1 actualizada evaluada con 2011

En la Figura 13 se observa en general un subpronóstico de los valores máximos, y una menor correspondencia en entre las curvas respecto a la validación realizada con el año 2008.

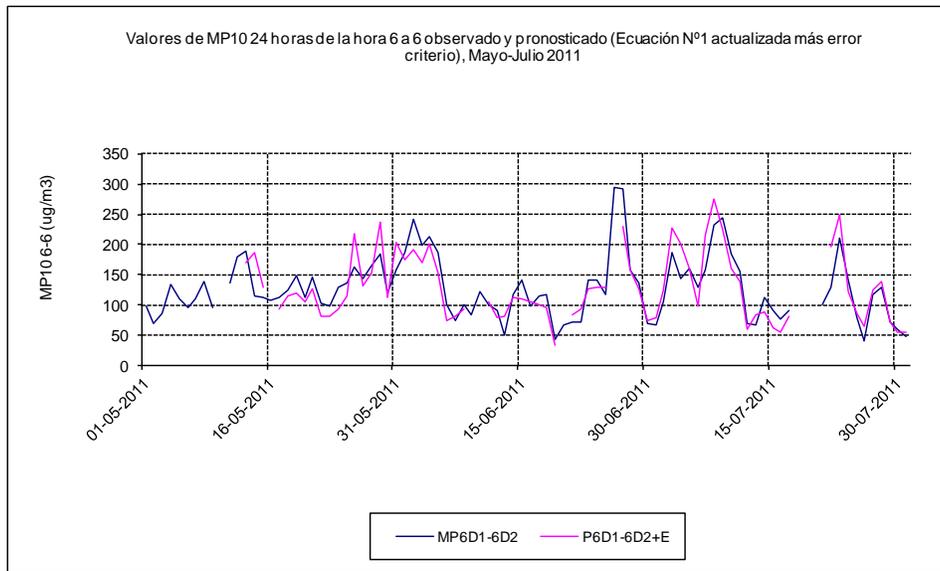
**Tabla 35 Tabla de Contingencia Acierto Ecuación 1 actualizada evaluada con 2011**

MP246D1-6D2	Observado					
	Bueno	Regular	Malo	Muy malo	Total	% Acierto
Ecuación N°1+E						
Bueno	48	5	1	0	54	88.9
Regular	2	4	1	3	10	40.0
Malo	1	4	1	0	6	16.7
Muy malo	0	0	1	0	1	0.0
Total	51	13	4	3	71	
%Acierto	94.1	30.8	25.0	0,0		
N° Aciertos	53					
%Acierto Total	74.6					
ENA	30.0					
FA	17.6					

La Tabla 11 muestra que la Ecuación N°1, actualizada evaluada con 2011 alcanzó un 74.6% de acierto total, con un 30.0% de ENA y un 17.6% de FA.

## 27.2.2 Ecuación N°1 actualizada más error criterio, evaluada con 2011

### 27.2.2.1 Serie de tiempo para el MP10 observado y pronosticado



**Figura 23 Verificación pronóstico MP10, Ecuación N°1 actualizada más error criterio. Año 2011**

La Figura 14 muestra un mejoramiento significativo respecto a lo observado en la Figura 13.

**Tabla 36 Tabla de Contingencia Acierto Ecuación 1 actualizada más error criterio, año 2011**

MP246D1-6D2 Ecuación N°1+E actualizada	Observado					% Acierto
	Bueno	Regular	Malo	Muy malo	Total	
Bueno	48	1	0	0	49	98.0
Regular	1	7	1	1	10	70.0
Malo	2	5	1	2	10	10.0
Muy malo	0	0	2	0	2	0.0
Total	51	13	4	3	71	
%Acierto	94.1	53.8	25.0	0,0		
N° Aciertos	56					
%Acierto Total	78.9					
ENA	5.0					
FA	13.6					

La Tabla 12 muestra que la Ecuación 1 actualizada sumado el error criterio y evaluada con 2011, aumenta el acierto total a un 78.9%. Se constata solo un 5% de ENA, es decir, el 95% de los episodios son alertados, considerando como episodios todos los días en que el promedio fijo de 07 am del día 1 a las 06 am del día 2 es mayor o igual a 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . El porcentaje de FA disminuye a un 13.6%.

## 28 Conclusiones

Considerando la actualización de los coeficientes de las ecuaciones evaluadas con información validada 2008 se tiene que:

- La Ecuación N°1 fue actualizada cambiando la variable T8500D1 (temperatura en 850hPa para el día siguiente a las 00 UTC) por T8500D2 (temperatura en 850hPa para el día subsiguiente a las 00UTC). Se actualizaron además la constante y coeficientes de las variables.
- La Ecuación N°1 actualizada aumentó el acierto total desde un 88.3% a un 90.9%; disminuyendo el porcentaje de Episodios No Alertados (ENA) de 77.8% a 44.4%, y las Falsas Alarmas FA de 33.3 % a un 28,6%.
- Para la Ecuación N°2 se actualizaron la constante y los coeficientes, sin cambios en las variables, disminuyendo levemente el número de ENA (de un 60% a un 50%).
- La actualización de las ecuaciones logran en general el objetivo de conseguir un mayor acierto en episodios, sin aumentar mayormente el número de falsas alarmas.
- El valor asociado al error criterio se mantuvo en 48,7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y las condiciones para su utilización también, es decir, se aplica si  $\text{HRMNE}1 < 20\%$  y  $\text{PMCA10D} \geq 4$ .
- La ecuación N°1 original + error criterio logra reducir significativamente los ENA a un 22%, en tanto las Falsas Alarmas suben a 41.7%. Por las características preventivas de esta ecuación se propone utilizarla como una de las ecuaciones de pronóstico en 2012.
- La Ecuación N°1 actualizada más error criterio, logra reducir aún más los ENA a 11.1%, sin empeorar mayormente el número de FA, 42.9 % lográndose la ecuación que apunta mas significativamente a la prevención. Por lo anteriormente expuesto, para la gestión de episodios 2012 se propone esta ecuación como la ecuación principal.

## 29 Comentarios y sugerencias

- Se debe contar con un sistema de aseguramiento de la calidad de los datos proporcionados por la red de monitoreo de calidad del aire y meteorología regional, condición que no se ha cumplido los años 2010 y 2011.
- El contar con una data confiable permitirá un mayor y mejor aprendizaje y acierto con las ecuaciones de pronóstico vigentes, y proporcionará mayor certeza en los procesos de actualización de los coeficientes de futuras ecuaciones de pronóstico.



CENTRO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

INFORME FINAL  
“OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE PRONÓSTICO DE  
CALIDAD DE AIRE POR MP10 PARA RANCAGUA  
PERIODO 2011”  
UMGCA-014-LMPCA-007-2011

VOLUMEN 5  
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN WEB SERVICE  
VERSIÓN FINAL

---

PREPARADO PARA  
SECRETARIA REGIONAL MINISTERIAL DEL MEDIO AMBIENTE  
REGIÓN DEL LIBERTADOR BERNARDO O'HIGGINS

SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2011

## Contenido

- 1 Antecedentes i
- 2 Implementación de servidor de misión crítica dedicado exclusivamente al alojamiento de sitios web i
- 3 Implementación del servicio web dedicado a la presentación de los Pronósticos, Servicio Web Público y Servicio Web Privado ii
- 4 Publicación de los Pronósticos iii
- 5 Estado actual y perspectivas futuras v



## 30 Antecedentes

El Diseño e Implementación del Web Service para Rancagua, fue realizada con anticipación a lo programado, a pedido del SEREMI de Medio Ambiente de la Región de O'Higgins, quedando operativo desde el 20 de Mayo de 2011, en ocasión del Lanzamiento del Sistema de Pronóstico a la prensa Regional.

El detalle del diseño e implementación del servicio web, ya fueron incluidos en los Informes de Avance 1 y 2, y se detalla nuevamente en este Volumen5 que forma parte del Informe Final.

## 31 Implementación de servidor de misión crítica dedicado exclusivamente al alojamiento de sitios web

Etapa concluida. Dadas las características que debe cumplir un Servidor Web público, éste no puede ser instalado en un computador personal. El sistema requiere de una máquina cuya potencia esté por encima de los computadores personales de escritorio, además de un sistema operativo robusto y eficiente. Es por esto que, esta actividad contempló las siguientes tareas:

- Implementación de servidor de alto rendimiento con dedicación exclusiva a la publicación web, adquirido según especificaciones del experto de CENMA encargado de la implementación del sistema web.
- Instalación de sistema operativo Linux en la máquina destinado a realizar las funciones requeridas. El sistema operativo es esencial para la instalación del sistema, debido a que no está desarrollado para ser instalado sobre sistemas Microsoft Windows, debido a su inseguridad, problemas de estabilidad e ineficiente administración de los recursos del sistema.
- Configuración de sistema operativo Linux destinado a brindar el servicio web y configuración de servicios destinados a ello.

## 32 Implementación del servicio web dedicado a la presentación de los Pronósticos, Servicio Web Público y Servicio Web Privado

Etapas concluidas. Esta actividad se planificó en 2 etapas, un servicio web dedicado a la población, con acceso sin restricción y otro servicio web con acceso restringido mediante contraseña, donde se publicaron y almacenaron los informes técnicos preparados por el Centro Nacional del Medio Ambiente para la Seremi de Medio Ambiente.

Ambas etapas son similares, la diferencia consiste en la implementación de un sistema de seguridad previo al ingreso al sitio restringido.

Se mencionarán a continuación rasgos generales de la implementación, no entrando en detalles debido a que la "seguridad por oscuridad" es la mejor defensa contra supuestos atacantes de sitios web.

- Implementación de plataforma web escrita en HTML+Php+Javascript, con sistema de almacenamiento de información basada en una base de datos MySQL.
- Diseño y maquetación de la plataforma web. En este punto fue crucial la interacción con la contraparte técnica de la SEREMI del MA Región de O'Higgins, quien sugirió el diseño y la disposición de los distintos módulos que componen el sitio. El diseño de sitio web fue elaborado siguiendo las especificaciones que el Gobierno de Chile ha establecido para este tipo de productos, mediante la Guía Web 2.0 publicada en <http://www.guiaweb.gob.cl>.
- Configuración de plataforma web, creación de los usuarios destinados a publicar los pronósticos y subir la documentación pertinente. La configuración contempló además la conexión del portal con las principales redes sociales de modo de difundir la información mediante los usuarios que visiten la página.
- Configuración de plataforma web, creación de platillas de contenido para los distintos niveles de calidad de aire contemplados, (BUENO, REGULAR, MALO, MUY MALO). Automatización de las herramientas encargadas de interpretar la documentación en formato PDF para ser presentada e incluida en el sitio web.

### 33 Publicación de los Pronósticos

Etapa concluida. Se publicaron diariamente los pronósticos de calidad del aire y los informes post-episodio para la Región de O'Higgins, tanto en el sitio web público como en la versión del sitio web privado.



Figura 1. Portada del Sitio Web con acceso público

La Figura 1 muestra un ejemplo de publicación a todo público del pronóstico de Calidad del Aire elaborado por el Centro Nacional del Medio Ambiente para Rancagua y una apreciación para el resto del valle central de la Región de O'Higgins. Se indica la categoría de calidad del aire esperada y un resumen de las condiciones meteorológicas orientadas a calidad de aire que determinaron ese pronóstico.



Figura 2. Acceso mediante contraseña al portal privado

La Figura 2 muestra el acceso privado del sitio web de difusión. El administrador del sitio, previo requerimiento de la contraparte, fue el encargado de asignar los nombres de usuario y contraseña para acceder al sitio web.

 A screenshot of the 'Pronóstico de Calidad del Aire por Material Particulado' web page. The page displays the following information:
 

- Monitoring station: Rancagua.
- Report date: 14 de Julio de 2011.
- Report time: 17:00 horas.
- Category: **BUENO** (highlighted in a green bar).
- Category table for MP10:
 

Categoría	Límites (µg/m³)
Buena	Menor a 150
Regular	150 a 194
Mala	195 a 239
Muy Mala	Mayor a 240
- Navigation links: Informe, Pronóstico, Páginas, and a link to 'Súmate por un aire limpio'.
- Footer: 'ACERCA DE' section with text about air quality measurements in Chile and a logo.

Figura 3. Portada del Sitio Web con acceso privado

La Figura 3 muestra un ejemplo del contenido del portal con acceso privado. Fue posible contar diariamente con toda la información técnica del pronóstico de Calidad del Aire elaborado por el Centro Nacional del Medio Ambiente, incluyendo el pronóstico de

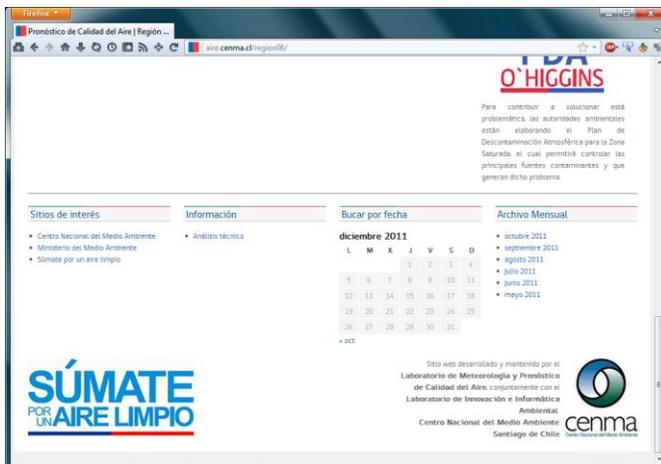
PMCA, pronóstico de calidad del aire e informes post episodio. En esta sección se incluyó un buscador integrado y una búsqueda por fechas mediante un calendario.

El desarrollo e implementación de este servicio web de difusión del pronóstico de calidad del aire, permitió informar oportunamente respecto a los niveles de contaminación esperados, entregando recomendaciones a la población para enfrentar los episodios asociados a altos niveles de MP10. Los reportes técnicos que dan cuenta de los pronósticos realizados fueron ingresados diariamente en el acceso privado, facilitando la comprensión del resultado entregado y la verificación del pronóstico.

### **34 Estado actual y perspectivas futuras**

Actualmente, el portal web orientado a la comunidad se encuentra operativo y en línea, contiene los pronósticos diarios emitidos por CENMA desde el 01 de Mayo al 17 de Septiembre de 2011, los cuales son accesibles desde el archivo mensual. Este archivo está organizado por meses del año y está ubicado en forma de menú, al costado inferior derecho del portal.

Además del archivo mensual, mostrado en la Figura 4, es posible también utilizar el cuadro de búsqueda, ubicado al costado superior derecho, de modo de consultar en el archivo histórico almacenado en la base de datos del portal.



## Archivo Mensual

- octubre 2011
- septiembre 2011
- agosto 2011
- julio 2011
- junio 2011
- mayo 2011

**Figura 4. Ubicación y del archivo mensual, ordenado según en meses del año de los pronósticos publicados por CENMA para la temporada 2011. Este menú está disponible también en el portal orientado a la Autoridad, al igual que el cuadro de búsqueda.**

El portal web orientado a la Autoridad se encuentra también disponible y en línea. Contiene los reportes y pronósticos emitidos por CENMA correspondientes al periodo 2011, además de los informes post-episodio enviados por CENMA, al igual que los reportes con la versión orientada a la comunidad. También dispone de un archivo mensual y un cuadro de búsqueda, haciendo fácil el acceso a la información histórica almacenada en la base de datos del sitio.

En estos momentos, ya finalizada la temporada de pronósticos, el portal orientado a la comunidad muestra un mensaje comunicando a los usuarios el cese de la temporada y las razones técnicas de ello.

Ambos portales permanecerán en línea, debido a que se encuentran operando en un servidor de alta disponibilidad considerado como una máquina de misión crítica, específicamente montado para proveer servicios web, con sistema de conectividad

ilimitada, respaldo de información y sistemas de respaldo de energía, máquina que también aloja el sitio web institucional de CENMA.

A futuro, ambos portales seguirán estando en línea y accesibles tanto por los usuarios como por la Autoridad, debido a que CENMA posee las capacidades tecnológicas para asegurar su permanencia en la red.



CENTRO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

INFORME FINAL  
“OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE PRONÓSTICO DE  
CALIDAD DE AIRE POR MP10 PARA RANCAGUA  
PERIODO 2011”

UMGCA-014-LMPCA-007-2011

VOLUMEN 6  
IMPLEMENTACIÓN MODELO WRF CENMA  
VERSIÓN FINAL

---

PREPARADO PARA

SECRETARIA REGIONAL MINISTERIAL DEL MEDIO AMBIENTE  
REGIÓN DEL LIBERTADOR BERNARDO O'HIGGINS

SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2011

## Contenido

1	Implementación Modelo WRF .....	i
2	Utilización del WRF en el Pronóstico de Calidad del Aire .....	v
3	Estado actual y proyecciones del WRF-CENMA .....	vi
4	Conclusiones y discusión .....	vii



## 35 Implementación Modelo WRF

El modelo WRF<sup>62</sup>-CENMA finalizó su fase operacional de pruebas en 2011 de manera satisfactoria, operando de manera continua en el servidor de modelación que el Laboratorio de Meteorología y Pronóstico de la Calidad del Aire dispuso para estos fines.

La máquina para ejecutar el modelo consiste en un Servidor DELL PowerEdge 2950, equipado con 4 procesadores de doble núcleo Intel Xeon E5430 a 2,66 gigahertz, con 8 gigabytes de memoria RAM y 1 terabyte de capacidad en un arreglo RAID1 de 6 discos duros SAS. Esta configuración de hardware brinda rapidez y estabilidad para la ejecución operacional del modelo.

EL WRF-CENMA operó diariamente de manera automática, con corridas cada 6 horas a partir de las 00 horas UTC, para la macrozona centro-sur, a una resolución espacial de 4x4 kilómetros, y con una resolución temporal de una hora.

Contempla 27 niveles en la vertical y entrega pronósticos hasta con 72 horas de antelación, resultando la duración de una corrida de aproximadamente 3 horas. Este tiempo comprende: La descarga de las condiciones de inicio desde el NCEP<sup>63</sup> a 0,5° de resolución (50 kilómetros aproximadamente), la integración de esta información con la información topográfica de 30 segundos de resolución (1 kilómetro aproximadamente); y la modelación en sí. Esta consiste en resolver las ecuaciones que describen los movimientos de la atmósfera, mediante la integración numérica de toda la información asimilada, aplicando las parametrizaciones predefinidas en su configuración.

Al término de cada modelación, los resultados fueron postprocesados y utilizados para generar información operacional y de investigación relevantes. Por ahora esta información ha sido utilizada de manera operacional en el Servicio de Meteorología y Nivología que presta CENMA a Codelco Chile, División Andina. Se aplica al pronóstico y alerta temprana de condiciones meteorológicas asociadas a tiempo severo, con la finalidad de proteger al personal e instalaciones de dicha División.

---

<sup>62</sup> Weather Research and Forecast

<sup>63</sup> National Center for Environment Prediction

Se optó por utilizar las condiciones meteorológicas de cordillera como referencia de calibración, debido principalmente a que estas ofrecen la mayor dificultad de pronóstico, tanto a nivel de terreno, por su complejidad, como a nivel de parametrizaciones meteorológicas de microescala.

El WRF-CENMA mostró resultados satisfactorios durante la temporada de invierno 2011, capturando de forma correcta eventos de precipitación líquida, precipitación sólida, vientos máximos y temperaturas extremas, máximas y mínimas. Todas variables que son de especial interés en cordillera debido al impacto que revisten para el personal que opera en terreno.

**Tabla1 Ejemplo de información meteorológica obtenida por el modelo WRF-CENMA**

WRF-CENMA, Lagunitas. 18Z29AUG2011													
Hora Z	t(C)	h(%)	v(ms)	d(gr)	p(mm)	na(%)	nm(%)	nb(%)	p(hPa)	cape	nv(mm)	cp(mm)	gr(mm)
18Z29AUG	-5.1	20.7	5.6	275.1	0.0	0.0	0.0	0.0	652.6	-0.1	0.0	0.0	0.0
19Z29AUG	-11.3	45.2	8.3	302.1	0.0	0.0	0.0	0.0	652.3	-0.1	0.0	0.0	0.0
20Z29AUG	-12.1	64.0	7.9	295.5	0.0	0.0	24.5	24.5	653.1	-0.1	0.0	0.0	0.0
21Z29AUG	-12.8	79.4	7.2	321.4	0.4	0.0	46.5	46.5	653.2	-0.1	0.4	0.0	0.0
22Z29AUG	-12.5	89.4	6.5	302.4	0.1	0.0	72.1	72.1	653.4	-0.1	0.1	0.0	0.0
23Z29AUG	-14.2	95.1	0.7	319.3	0.0	0.0	58.0	58.0	653.7	-0.1	0.0	0.0	0.0
00Z30AUG	-16.0	91.5	1.5	104.5	0.0	0.0	34.9	34.9	654.0	-0.1	0.0	0.0	0.0
01Z30AUG	-16.8	82.7	2.2	100.1	0.0	0.0	0.0	0.0	654.0	-0.1	0.0	0.0	0.0
02Z30AUG	-17.7	57.0	2.3	100.7	0.0	0.0	0.0	0.0	654.2	-0.1	0.0	0.0	0.0
03Z30AUG	-18.3	45.7	2.1	104.8	0.0	0.0	0.0	0.0	654.3	-0.1	0.0	0.0	0.0
04Z30AUG	-18.7	42.5	1.9	112.7	0.0	0.0	0.0	0.0	654.3	-0.1	0.0	0.0	0.0
05Z30AUG	-19.1	41.0	2.1	127.8	0.0	0.0	0.0	0.0	654.3	-0.1	0.0	0.0	0.0
06Z30AUG	-19.2	40.0	2.2	150.8	0.0	0.0	0.0	0.0	654.2	-0.1	0.0	0.0	0.0
07Z30AUG	-19.2	39.4	2.9	167.5	0.0	0.0	0.0	0.0	654.1	-0.1	0.0	0.0	0.0
08Z30AUG	-18.7	40.3	3.9	177.8	0.0	0.0	0.0	0.0	654.1	-0.1	0.0	0.0	0.0
09Z30AUG	-18.2	40.2	4.5	179.3	0.0	0.0	0.0	0.0	654.0	-0.1	0.0	0.0	0.0
10Z30AUG	-17.6	40.0	5.1	178.0	0.0	0.0	0.0	0.0	654.2	-0.1	0.0	0.0	0.0
11Z30AUG	-16.9	40.4	5.7	180.3	0.0	0.0	0.0	0.0	654.3	-0.1	0.0	0.0	0.0
12Z30AUG	-13.1	35.4	6.3	183.1	0.0	0.0	0.0	0.0	654.4	-0.1	0.0	0.0	0.0
13Z30AUG	-7.6	24.3	6.9	191.8	0.0	0.0	0.0	0.0	654.8	-0.1	0.0	0.0	0.0

14Z30AUG	-5.7	18.6	6.4	201.8	0.0	0.0	0.0	0.0	655.3	-0.1	0.0	0.0	0.0
15Z30AUG	-4.7	17.9	6.0	209.6	0.0	0.0	0.0	0.0	655.5	-0.1	0.0	0.0	0.0
16Z30AUG	-4.2	18.0	5.6	217.1	0.0	0.0	0.0	0.0	655.8	-0.1	0.0	0.0	0.0
17Z30AUG	-3.7	17.4	5.0	222.1	0.0	0.0	0.0	0.0	656.0	-0.1	0.0	0.0	0.0
18Z30AUG	-3.2	17.3	4.6	232.1	0.0	0.0	0.0	0.0	656.2	-0.1	0.0	0.0	0.0
19Z30AUG	-2.9	16.8	3.4	258.0	0.0	0.0	0.0	0.0	656.3	-0.1	0.0	0.0	0.0
20Z30AUG	-3.1	18.0	3.9	345.4	0.0	0.0	0.0	0.0	656.4	-0.1	0.0	0.0	0.0
21Z30AUG	-4.1	16.1	2.5	17.6	0.0	0.0	0.0	0.0	656.7	-0.1	0.0	0.0	0.0
22Z30AUG	-5.4	57.8	1.8	67.5	0.0	0.0	0.0	0.0	657.2	-0.1	0.0	0.0	0.0
23Z30AUG	-7.7	53.3	2.6	90.9	0.0	0.0	0.0	0.0	657.7	-0.1	0.0	0.0	0.0
00Z31AUG	-8.6	52.3	2.6	100.3	0.0	0.0	0.0	0.0	658.1	-0.1	0.0	0.0	0.0
01Z31AUG	-9.1	51.5	2.5	117.9	0.0	6.2	0.0	0.0	658.3	-0.1	0.0	0.0	0.0
02Z31AUG	-9.4	51.8	2.7	115.1	0.0	6.4	0.0	0.0	658.5	-0.1	0.0	0.0	0.0
03Z31AUG	-9.7	52.6	2.6	108.1	0.0	4.0	0.0	0.0	658.8	-0.1	0.0	0.0	0.0
04Z31AUG	-9.7	52.5	3.6	83.6	0.0	2.0	0.0	0.0	658.8	-0.1	0.0	0.0	0.0
05Z31AUG	-9.4	52.7	3.6	70.5	0.0	23.4	0.0	0.0	658.9	-0.1	0.0	0.0	0.0
06Z31AUG	-9.4	51.9	3.2	72.1	0.0	23.6	0.0	0.0	658.9	-0.1	0.0	0.0	0.0
07Z31AUG	-9.5	51.4	2.7	75.8	0.0	24.0	0.0	0.0	658.7	-0.1	0.0	0.0	0.0
08Z31AUG	-9.5	50.9	2.8	78.4	0.0	17.5	0.0	0.0	658.5	-0.1	0.0	0.0	0.0
09Z31AUG	-9.5	50.6	2.9	81.5	0.0	9.7	0.0	0.0	658.2	-0.1	0.0	0.0	0.0
10Z31AUG	-9.4	50.6	3.0	81.4	0.0	1.1	0.0	0.0	658.4	-0.1	0.0	0.0	0.0
11Z31AUG	-9.1	50.6	3.4	79.1	0.0	13.3	0.0	0.0	658.6	-0.1	0.0	0.0	0.0
12Z31AUG	-8.4	50.7	3.5	76.1	0.0	13.6	0.0	0.0	658.8	-0.1	0.0	0.0	0.0
13Z31AUG	-5.2	52.7	3.6	73.2	0.0	13.7	0.0	0.0	659.0	-0.1	0.0	0.0	0.0
14Z31AUG	-0.2	54.4	3.4	64.4	0.0	14.0	0.0	0.0	659.3	-0.1	0.0	0.0	0.0
15Z31AUG	3.0	26.0	4.4	40.7	0.0	14.1	0.0	0.0	659.6	-0.1	0.0	0.0	0.0
16Z31AUG	3.6	23.9	4.5	18.1	0.0	14.0	0.0	0.0	659.4	-0.1	0.0	0.0	0.0
17Z31AUG	4.1	24.1	5.3	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	659.2	-0.1	0.0	0.0	0.0
18Z31AUG	4.7	25.5	6.7	352.2	0.0	0.8	0.0	0.0	659.0	-0.1	0.0	0.0	0.0
19Z31AUG	4.5	27.3	7.1	348.8	0.0	2.3	0.0	0.0	658.8	-0.1	0.0	0.0	0.0
20Z31AUG	4.0	29.5	6.7	350.1	0.0	3.2	0.0	0.0	658.7	-0.1	0.0	0.0	0.0
21Z31AUG	3.1	35.3	4.7	1.7	0.0	1.7	0.0	0.0	658.5	-0.1	0.0	0.0	0.0
22Z31AUG	-0.8	58.4	3.3	32.4	0.0	1.0	0.0	0.0	658.5	-0.1	0.0	0.0	0.0

23Z31AUG	-1.4	47.4	6.0	37.2	0.0	1.5	0.0	0.0	658.6	-0.1	0.0	0.0	0.0
00Z01SEP	-3.8	56.5	4.8	41.7	0.0	3.3	0.0	0.0	658.7	-0.1	0.0	0.0	0.0
01Z01SEP	-4.6	54.3	4.5	37.6	0.0	2.7	0.0	0.0	658.7	-0.1	0.0	0.0	0.0
02Z01SEP	-5.3	52.1	4.5	37.0	0.0	0.0	0.0	0.0	658.7	-0.1	0.0	0.0	0.0
03Z01SEP	-5.8	49.9	4.6	36.0	0.0	0.0	0.0	0.0	658.8	-0.1	0.0	0.0	0.0
04Z01SEP	-6.3	48.5	4.5	36.8	0.0	0.0	0.0	0.0	658.4	-0.1	0.0	0.0	0.0
05Z01SEP	-6.7	47.9	4.3	37.7	0.0	0.0	0.0	0.0	658.0	-0.1	0.0	0.0	0.0
06Z01SEP	-7.1	47.7	4.2	36.7	0.0	0.0	0.0	0.0	657.6	-0.1	0.0	0.0	0.0
07Z01SEP	-7.4	47.5	4.1	35.0	0.0	0.0	0.0	0.0	657.1	-0.1	0.0	0.0	0.0
08Z01SEP	-7.6	47.3	4.1	34.3	0.0	0.0	0.0	0.0	656.7	-0.1	0.0	0.0	0.0
09Z01SEP	-7.7	47.2	4.4	30.9	0.0	0.0	0.0	0.0	656.2	-0.1	0.0	0.0	0.0
10Z01SEP	-7.8	47.3	4.8	30.0	0.0	0.0	0.0	0.0	656.3	-0.1	0.0	0.0	0.0
11Z01SEP	-7.8	47.6	5.0	30.7	0.0	0.0	0.0	0.0	656.4	-0.1	0.0	0.0	0.0
12Z01SEP	-6.4	49.4	5.0	28.6	0.0	0.0	0.0	0.0	656.6	-0.1	0.0	0.0	0.0
13Z01SEP	-0.0	34.0	6.6	23.3	0.0	0.0	0.0	0.0	656.8	-0.1	0.0	0.0	0.0
14Z01SEP	2.1	27.1	7.9	21.6	0.0	0.0	0.0	0.0	656.9	-0.1	0.0	0.0	0.0
15Z01SEP	2.8	26.3	8.3	355.9	0.0	0.0	0.0	0.0	657.2	-0.1	0.0	0.0	0.0
16Z01SEP	3.3	28.4	10.6	340.8	0.0	0.0	0.0	0.0	656.8	-0.1	0.0	0.0	0.0

La Tabla1 muestra la información con que pudo contar regularmente el equipo de meteorólogos de CENMA que elabora el pronóstico nivometeorológico para Codelco Chile, División Andina. Esta información puede desplegarse gráficamente como meteogramas u otras formas de presentación. La data es válida para la estación de Lagunitas (2850 m s.n.m.) y el pronóstico emitido a las 18 Z<sup>64</sup> del día 29 de Agosto de 2011 válido para las próximas 72 horas, con una resolución horaria. Se observan las variables de temperatura a 2 metros, viento a 10 metros, precipitación líquida, cantidad de nubosidad alta, media y baja, presión en superficie energía convectiva potencial disponible y precipitación sólida en forma de nieve, o granizo.

<sup>64</sup> La Hora Z equivale a hora GMT (Greenwich Meridian Time) u hora UTC (Universal Time Coordinated). En el invierno del hemisferio sur la Hora Local en Chile continental es la Hora UTC-4

### 36 Utilización del WRF en el Pronóstico de Calidad del Aire

El WRF-CENMA no se utilizó en 2011 como herramienta primaria de pronóstico debido a que se encontraba en fase de pruebas. Se implementará como herramienta de pronóstico durante la temporada 2012, donde además se trabajará en el desarrollo e implementación de nuevas herramientas, donde WRF-CENMA se utilizará para generar las condiciones de inicio para los modelos de pronóstico de calidad del aire, MP10, MP2.5 u otro contaminante que se requiera pronosticar.

Actualmente para algunos modelos de calidad de aire, se está utilizando como condición de entrada el modelo ETA-CPTEC desarrollado en Brasil por el CPTEC<sup>65</sup>. Sin embargo presenta limitaciones respecto al WRF-CENMA, ya que tiene una resolución horizontal de 20x20 kilómetros y sólo se puede acceder a información pronosticada para el nivel de superficie.

Para incorporar el WRF-CENMA en las herramientas de pronóstico utilizadas actualmente, se ha detenido la ejecución operacional del modelo en tiempo real, y se está ejecutando en modo simulación con los recursos computacionales disponibles. La finalidad es crear una base de datos histórica de modelación meteorológica a mesoescala para la región, que comprenderá los años 2008 a 2011; esta tarea demorará alrededor de 3 meses de procesamiento computacional durante las 24 horas del día. Esta base de datos meteorológica considerará toda la región a una resolución de 4x4 kilómetros, con una resolución temporal de una hora para 27 niveles en la vertical, obteniéndose el máximo de información posible.

Una vez obtenidos los resultados de la simulación, la información meteorológica, permitirá desarrollar herramientas de pronóstico de calidad del aire que permitan capturar fenómenos meteorológicos de escala reducida que pueden influir en la dispersión de contaminantes.

---

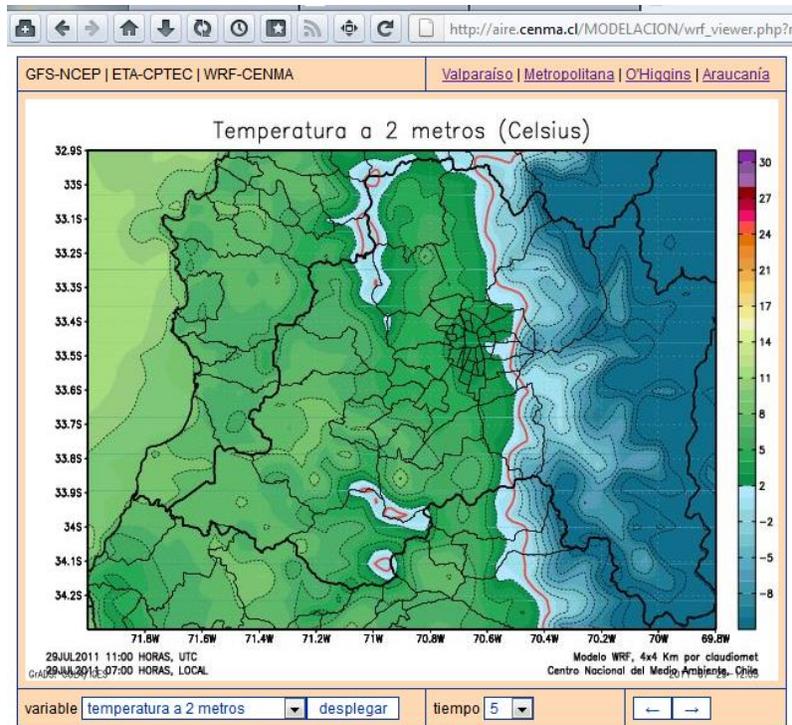
<sup>65</sup> Centro de Previsión de Tiempo y Estudios Climáticos

Además se incorporarán otras variables de interés como parámetros meteorológicos pronosticados en altura, lo que debiera contribuir al mejoramiento continuo del sistema de pronóstico, aumentando el nivel de acierto. Será posible evaluar trayectorias y realizar simulaciones con la finalidad de definir zonas de impacto de la contaminación, y determinar el emplazamiento más conveniente de las estaciones de monitoreo mediante análisis de trayectorias, además de poder simular variables meteorológicas en zonas donde no se tienen mediciones.

### **37 Estado actual y proyecciones del WRF-CENMA**

Actualmente se encuentra en fase de instalación una nueva versión del WRF, más específicamente la versión 3.3.1, lanzada el 22 de Septiembre de 2011.

Se trabaja en la compilación y optimización de los ejecutables a fin de lograr el mejor rendimiento posible. Una vez terminada esta etapa, se procederán a migrar los actuales archivos de configuración de modo de mantener las mismas parametrizaciones. Se espera además, que para mediados de 2012 sea lanzada una nueva versión denominada "major release", esta denominación es aplicada a las versiones que incorporan mejoras considerables, nuevas implementaciones y cambios sustanciales en el funcionamiento del sistema.



**Figura 1 Mapa centrado en la Región Metropolitana**

La Figura 1 muestra un ejemplo de la implementación de las salidas gráficas de WRF-CENMA. En la imagen se observa un mapa de temperaturas pronosticadas para la Región Metropolitana de Santiago donde la isoterma cero que alcanza a ser interceptada por el relieve, está representada en color rojo. Fuera del mapa, en la parte inferior, se observan los selectores de variables y los controles de movimiento para la generación de animaciones.

### 38 Conclusiones y discusión

El modelo WRF-CENMA fue operado de forma experimental y calibrado durante 2011, utilizando como referencia el pronóstico en cordillera debido a las exigencias que conlleva efectuar parametrizaciones meteorológicas de microescala en terreno complejo.

Los satisfactorios resultados alcanzados, apuntan a que el modelo podrá ser una herramienta confiable en 2012, por lo que será integrada en el proceso fenomenológico de pronóstico y paralelamente a ello se podrá comenzar el desarrollo e implementación

de herramientas adicionales basadas en WRF-CENMA. Los modelos de pronóstico de calidad del aire podrán utilizar sus condiciones de inicio, aplicables tanto para MP10, MP2.5 u otros contaminantes atmosféricos a nivel regional, pudiendo aplicarse por lo tanto a la Región de O'Higgins.

La resolución espacial y temporal del modelo WRF-CENMA presenta un mejoramiento significativo de la resolución espacial y temporal, respecto de los modelos ocupados actualmente como condiciones de inicio en algunos pronósticos de calidad de aire.

Presenta también ventajas respecto al modelo de mesoescala MM5<sup>66</sup> ya que el desarrollo de este fue discontinuado, por lo que diversas entidades que lo operaban están migrando al WRF.

Se encuentra en fase de instalación una nueva versión del WRF la que optimizará el funcionamiento del Modelo. El programa de trabajo en modelación contempla necesariamente una permanente actualización de conocimientos y equipamiento, integrando nuevos desarrollos, mejoras e implementaciones, por lo que CENMA mantiene un contacto directo y permanente con la comunidad que desarrolla este tipo de modelación.

---

<sup>66</sup> Mesoscale Model version 5



CENTRO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

INFORME FINAL  
“OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE PRONÓSTICO DE  
CALIDAD DE AIRE POR MP10 PARA RANCAGUA  
PERIODO 2011”

UMGCA-014-LMPCA-007-2011

VOLUMEN 7  
ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE LA RED SIVICA  
VERSIÓN FINAL

---

PREPARADO PARA

SECRETARIA REGIONAL MINISTERIAL DEL MEDIO AMBIENTE  
REGIÓN DEL LIBERTADOR BERNARDO O'HIGGINS

SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2011

## Contenido

1	Introducción .....	i
2	Objetivo del Informe .....	ii
3	Antecedentes .....	ii
3.1	Procedimiento del Pronóstico Meteorológico asociado a la Calidad del Aire .....	ii
4	Disponibilidad de Información Red SIVICA .....	v
4.1	Número de días sin información en línea de la Red SIVICA .....	v
4.2	Porcentaje de datos faltantes en la Red SIVICA .....	vii
5	Calidad de la Información de la Red SIVICA .....	viii
5.1	Calidad de los registros de calidad del aire en Rancagua .....	viii
5.2	Calidad de los registros de meteorología en Rancagua .....	xi
5.2.1	Dirección y velocidad del viento.....	xi
5.2.2	Humedad Relativa .....	xiii
5.2.3	Temperatura .....	xiii
5.3	Calidad de los registros de calidad del aire en Rengo y San Fernando .....	xiv
5.4	Calidad de los registros de meteorología en Rengo y San Fernando .....	xviii
5.4.1	Dirección del viento.....	xviii
5.4.2	Humedad Relativa .....	xx
6	Comentarios: Consecuencias para el pronóstico, evaluación y seguimiento .....	xxi
6.1	Acceso en línea de la información meteorológica y de calidad de aire .....	xxi
6.2	Aseguramiento de la certeza y confiabilidad de la información.....	xxii
7	Conclusiones .....	xxii
8	ANEXOS.....	xxiii
8.1	Series de tiempo de variables meteorológicas en Rengo y San Fernando .....	xxiii

## 39 Introducción

El Centro Nacional del Medio Ambiente CENMA, se adjudicó la realización del proyecto Pronóstico Meteorológico asociado a Calidad de Aire en Rancagua para el periodo otoño-invierno 2011. Este sistema de pronóstico de calidad del aire consideró adicionalmente ecuaciones de pronóstico para las ciudades de Rengo y San Fernando.

En el proceso de postulación, CENMA indicó que la confiabilidad y utilidad de los resultados de 2011, dependían fuertemente de la oportunidad y calidad de la información entregada por la red de monitoreo SIVICA.

La red SIVICA corresponde a una Red de Vigilancia de Calidad del Aire a nivel nacional, encargada de operar y mantener las estaciones de monitoreo, y de tener en línea en el sitio Web de SIVICA la información de parámetros de calidad de aire y meteorología que registra cada estación.

Si bien CENMA cumplió con las tareas comprometidas en la ejecución del proyecto con la SEREMI del Medio Ambiente Región de O'Higgins, nuestra Institución encontró serias dificultades en la adquisición, registro y disponibilidad de los datos de las estaciones de monitoreo de la región, provenientes de la red SIVICA.

## 40 Objetivo del Informe

- Entregar información al SEREMI de Medio Ambiente de O'Higgins del funcionamiento de la red SIVICA durante el periodo otoño e invierno de 2011, y sus implicancias en el pronóstico, seguimiento de calidad de aire en la región y apoyo a la Gestión de Episodios.

## 41 Antecedentes

### 41.1 Procedimiento del Pronóstico Meteorológico asociado a la Calidad del Aire

El Modelo actual de Pronóstico de la Calidad del Aire para la Región es de tipo estadístico, y fue desarrollado para las estaciones de monitoreo de Rancagua, y experimentalmente para Rengo y San Fernando.<sup>67</sup> El Modelo determina el promedio de MP10 entre las 07 am del día 1 y las 06 am del día 2, siendo el día 0 el de emisión del pronóstico. La filosofía para su diseño se fundamenta en el ciclo diario del MP10 y su comportamiento durante episodios, y apunta a la prevención, permitiendo a la Autoridad Ambiental difundir con la debida anticipación, las medidas y recomendaciones de protección de la salud de la población.

Las ecuaciones de pronóstico se construyeron integrando datos meteorológicos y de calidad de aire de las estaciones de monitoreo de la Región (Red SIVICA), por esto, la calidad, confiabilidad y oportunidad de la información recibida de estas estaciones, constituyen elementos centrales para el éxito del sistema de pronóstico de episodios críticos en la región, y la Gestión de episodio por parte de la Autoridad Ambiental.

El Modelo incorpora además como una de las variables de mayor peso e importancia, el índice PMCA (Potencial Meteorológico de Calidad del Aire) observado y pronosticado generado por CENMA<sup>68</sup>. Este índice integra condiciones meteorológicas de diferentes escalas, sinóptica, regional y local asociadas a la dispersión de contaminantes. Incluye

---

<sup>67</sup> CENMA (2009, 2010) Desarrollo y operación de un sistema de pronóstico de MP10 para Rancagua. CENMA (2011) Informe de Avance 1 Operación de un Sistema de Pronóstico para Rancagua

<sup>68</sup> CENMA (1998) Tipificación de configuraciones meteorológicas asociadas a distintas categorías de PMCA. CENMA (2009) Desarrollo y operación de un sistema de pronóstico de MP10 para Rancagua. Tipificación de episodios de contaminación en Rancagua.

por otra parte variables meteorológicas pronosticadas que inciden en la calidad del aire prevista.

En el diagrama que se muestra en la Figura 1, se ilustran los pasos a seguir en el Sistema de Pronóstico, las entradas requeridas y los productos generados. Queda de manifiesto la importancia de la oportunidad de contar con la información local de las estaciones comprometidas en el pronóstico, ya que la información en línea de las estaciones de la red SIVICA es utilizada en el proceso de revisión y seguimiento de la información de calidad del aire y meteorológica de escala local, en la confirmación de la categoría de PMCA observada y prevista, y finalmente en la evaluación del pronóstico de calidad del aire.

Es así como a lo largo del proceso diario de pronóstico, el monitoreo en línea es de suma relevancia para el seguimiento de la evolución de distintos parámetros meteorológicos y de calidad de aire a escala local, de la condición pronosticada, y para determinar la intensidad o magnitud de los fenómenos que se están produciendo.

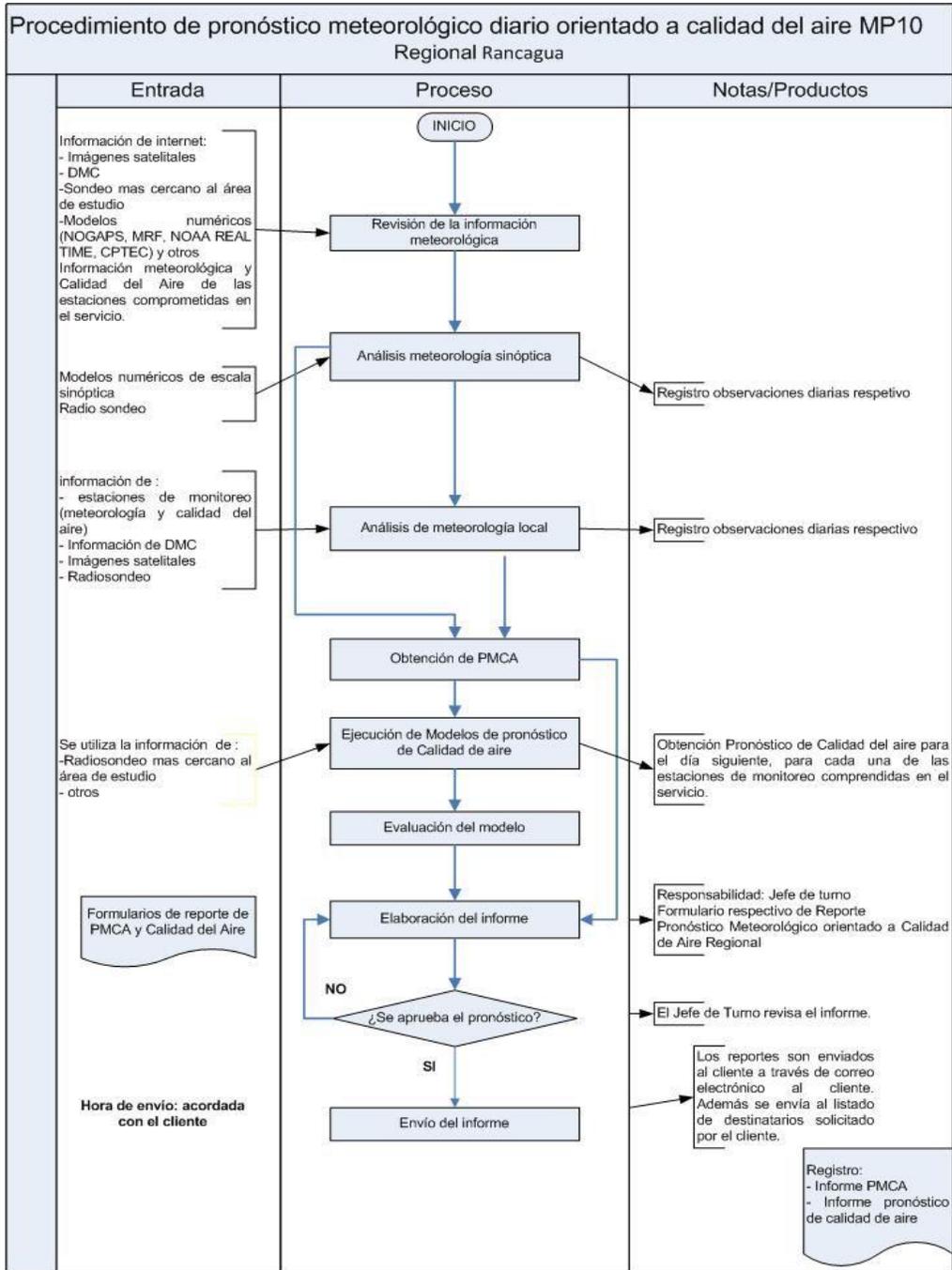


Figura 24 Procedimiento del Sistema de Pronóstico Aplicado a la Región de O'Higgins

## 42 Disponibilidad de Información Red SIVICA

Como se ha mencionado, la información de la red SIVICA dentro del Sistema de Pronóstico es utilizada en:

- Diagnóstico de la situación meteorológica local y calidad del aire
- Seguimiento de la condición meteorológica local y evolución de la calidad del aire
- Confirmación y evaluación del pronóstico realizado

La Tabla que sigue muestra la cantidad de días por mes en que se dispuso de información proporcionada por la Red SIVICA, en términos de la periodicidad de la actualización, y si estuvo disponible para fines de seguimiento y confirmación del procedimiento de pronóstico.

### 42.1 Número de días sin información en línea de la Red SIVICA

Mes	Días sin información para pronóstico operativo	%	Días sin información actualizada para evaluación	%	Total de días del periodo oficial*
Abril	4	3	4	3	4
Mayo	16	11	14	10	31
Junio	10	7	3	2	30
Julio	7	5	6	4	31
Agosto	0	0	0	0	31
Septiembre	0	0	0	0	17
<b>Total</b>	<b>37</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>19</b>	<b>144</b>

**Tabla 37 Días sin información MP10 en Red SIVICA (Rancagua) en las distintas etapas del Sistema de Pronóstico Diario para Rancagua**

\*El periodo oficial corresponde a los días asociados al pronóstico de MP10 2011, que va desde el 26 de abril (adjudicación del Servicio) hasta el 17 de septiembre. Antes del 01 de abril y después del 17 de septiembre, las condiciones de ventilación y de calidad de aire por MP10 son buenas.

La Tabla 37 muestra el resumen mensual de la información de la estación monitorea de Rancagua que no estuvo disponible para el pronóstico operativo (diagnóstico) y para la confirmación del pronóstico (evaluación del modelo de calidad del aire). Este conteo se realizó utilizando los registros diarios de pronóstico, específicamente los gráficos de la calidad del aire y las tablas de contingencia del pronóstico de calidad del aire. Si la información no estaba en línea en el día de pronóstico, no era posible incluirla en el gráfico diario, y por tanto se contabilizó como día no disponible para el pronóstico operativo. Si no se contaba con información para evaluar el pronóstico del día anterior, entonces se contabilizó como día sin información para evaluación. Usualmente, cuando la información de calidad del aire no estaba, tampoco estaban actualizados los otros parámetros de la estación.

La Tabla 1 también indica un porcentaje mayor de información no disponible en los días donde se realizó el pronóstico operativo (26%), que en los días en donde se realizó su evaluación (19%).

En cuanto al aseguramiento del sistema de pronóstico, se señala que la información de la red SIVICA se utilizó con 2 fines: diagnóstico y constatación o evaluación del pronóstico.

Para el caso del diagnóstico (condición del momento) si la información no estaba disponible, el personal de turno analizó los datos provenientes de la red DMC (en código METAR) del aeródromo de Rancagua y de la red Agroclima, ambas redes de uso público y en línea. La información utilizada de la estación Aeródromo Rancagua de la DMC fue temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad del viento, nubosidad y tiempo presente, datos obtenidos vía web cada una hora (excepto durante la noche). Para el caso de la red de agroclimática Agroclima, se utilizaron las estaciones El Pangui, Codegua y Punta Cortés, como representativas de Rancagua, y se utilizó la información de temperatura y precipitación. El mayor efecto en el sistema de pronóstico entonces fue no contar con información meteorológica de la estación propiamente tal e información de calidad del aire de una red alternativa (no se dispone de otro monitoreo en línea de parámetros de calidad del aire en la Región), y por tanto no se podía realizar un seguimiento al MP10.

Para el caso del pronóstico, diariamente pudo ejecutarse el modelo de calidad del aire para Rancagua, pues las ecuaciones no requieren datos de MP10 como información de entrada, ya que según la metodología utilizada se pronostica el promedio fijo desde las 06 am del día siguiente a las 07 am del día subsiguiente, y por tanto la calidad del aire del momento no tiene ninguna relevancia en la calidad del aire futuro. Otros son los

parámetros de mayor peso en las ecuaciones que tienen que ver con información meteorológica pronosticada y el PMCA. Claro está que el efecto de no contar con la información actualizada durante el pronóstico no permitió ponderar adecuadamente las condiciones locales del momento, y para su confirmación se esperó el registro del MP10 en la siguiente actualización de la página web de SIVICA.

## 42.2 Porcentaje de datos faltantes en la Red SIVICA

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra el porcentaje de datos faltantes en la Red SIVICA actualizada a mediados de octubre en [www.sivica.cl](http://www.sivica.cl). Se observa un porcentaje de datos faltantes inferior al mostrado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Sin embargo, este mayor número de datos al momento del pronóstico no estaban disponibles, por lo tanto para efectos del pronóstico operativo, no existió un seguimiento del todo oportuno de las condiciones meteorológicas y calidad del aire, dado que la actualización de la información no fue en tiempo real.

Porcentaje mensual de datos faltantes variables meteorológicas y MP estación Rancagua periodo mayo-septiembre 2011									
Meses	T	HR	VV	DV	RS	P	RA	MP10	MP2.5
Abril	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100	6.7	42.5
Mayo	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	100	3.4	11.8
Junio	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100	0.0	1.4
Julio	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100	6.0	17.2
Agosto	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100	0.3	2.8
Septiembre	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100	0.0	0.2
Total	0.5%	0.5%	0.5%	0.5%	0.5%	0.5%	100%	2.7%	12.7%

**Tabla 38 Porcentaje de datos faltantes en la Red SIVICA**

Temperatura (T), Humedad Relativa (HR), velocidad del viento (VV), dirección del viento (DV), radiación solar (RS), presión atmosférica (P), precipitación (RA), MP10 y MP2.5.

### 43 Calidad de la Información de la Red SIVICA

Además de la necesidad de contar con información en línea para su utilización en el diagnóstico y seguimiento de la condición en evolución, y posterior evaluación, es de vital importancia el aseguramiento de la calidad de los datos.

Existe un protocolo de validación, calibración y mantención de los equipos de una estación de monitoreo<sup>69</sup>, que permite asegurar la calidad de sus registros.

A continuación se analiza la calidad de los registros obtenidos de la estación de monitoreo de Rancagua, Rengo y San Fernando.

#### 43.1 Calidad de los registros de calidad del aire en Rancagua

Para el caso de Rancagua, el MP10 en general presentó datos de al menos dudosa calidad, debido a que en algunas ocasiones no se relacionaron con las condiciones meteorológicas de dispersión (ciclos atípicos y valores inconsistentes). En la Figura 25. Promedio diario 1-24 h MP10 y MP2.5 en Rancagua, periodo abril - septiembre 2011 se presenta la serie de tiempo de los promedios diarios de MP10 y MP2.5 para el periodo 2011 en la estación de Rancagua.

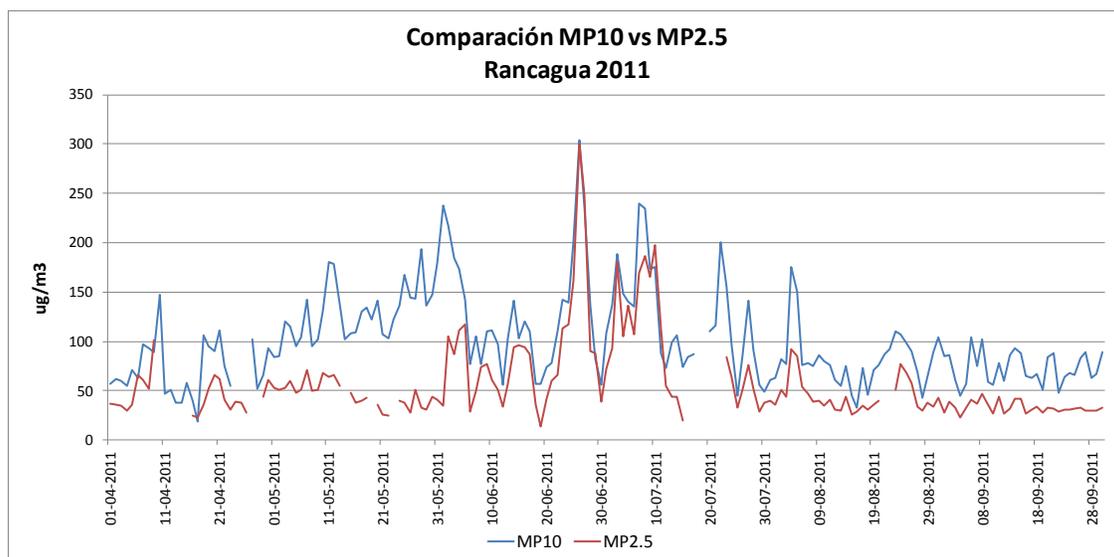


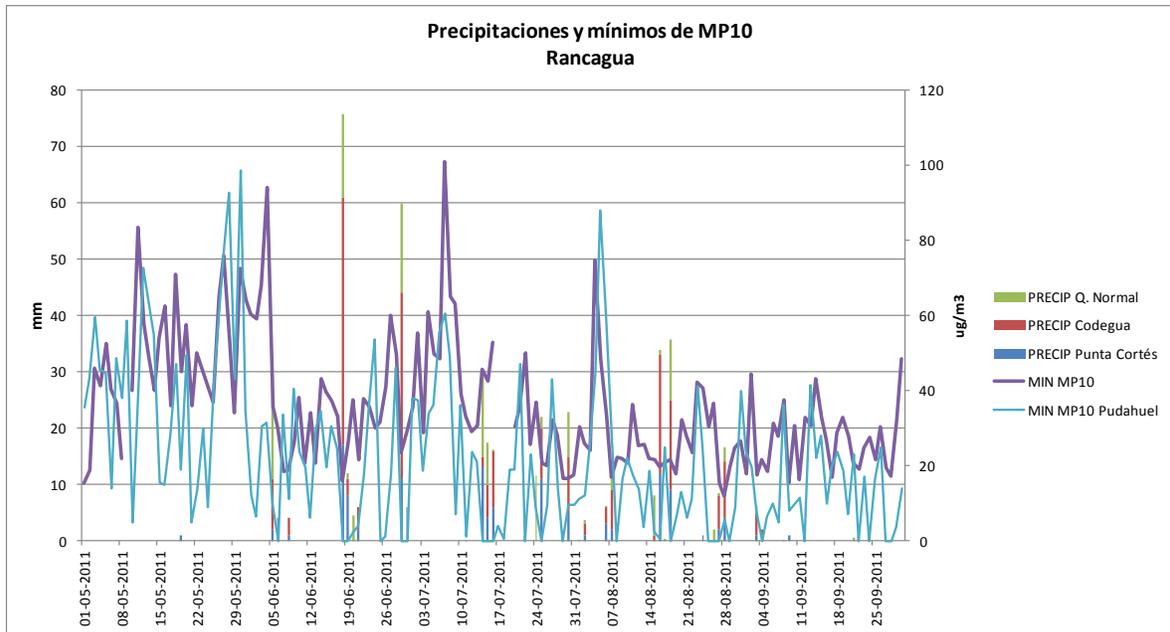
Figura 25. Promedio diario 1-24 h MP10 y MP2.5 en Rancagua, periodo abril - septiembre 2011

<sup>69</sup> DS 61 Reglamento de estaciones de medición de contaminantes atmosféricos

En la Figura 25. Promedio diario 1-24 h MP10 y MP2.5 en Rancagua, periodo abril - septiembre 2011 se observa en ambas variables periodos de intermitencia en los datos, presentándose mayor discontinuidad en la serie de MP2,5. La cantidad de días sin información en base al mínimo de 75% de los datos, es mayor en MP2,5 que en MP10, donde la información faltante alcanza el 12,7% y 2,7% respectivamente (según información actualizada en el mes de octubre – ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Por otra parte, se aprecia una débil relación entre ambas variables durante los primeros meses (abril, mayo y principios de junio), en donde el MP2, 5 es significativamente inferior al MP10. A mediados del periodo se observa una mayor relación entre ambas variables, y hacia el término, como es esperable, una disminución del MP en forma general.

Otra forma de analizar la calidad de los datos de MP10, es comparando el comportamiento de los valores horarios diarios mínimos de MP10 con respecto a los días con precipitaciones en las estaciones cercanas a la estación de Rancagua. Además de esto, se hace una comparación con la estación de Pudahuel, cuya data está validada y sirve como una aproximación para verificar la calidad de los datos en Rancagua. En estaciones con data validada y confiable como la de Pudahuel es común observar que los valores horarios mínimos bajan cercanos a 0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en los días que se registran precipitaciones. Esto se debe a que las precipitaciones provocan un efecto de disolución y arrastre de los contaminantes hacia el suelo (deposición húmeda).

La Figura 26 3 muestra el comportamiento de los valores mínimos de MP10 con los registros de agua caída en estaciones aledañas a la estación de Rancagua (Codegua, El Pangui y Punta Cortés), además del comportamiento de los valores mínimos horarios de MP10 en Pudahuel en relación a los registros de agua caída en la estación meteorológica de Quinta Normal.

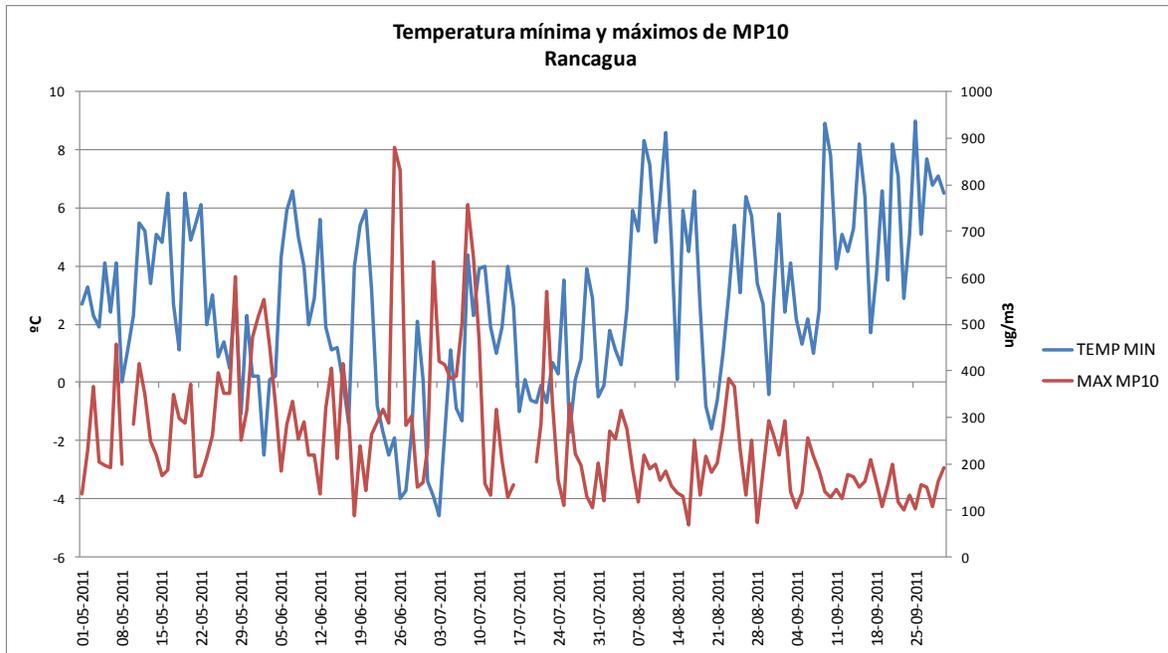


**Figura 26. Mínimos de MP10 y precipitaciones en Rancagua en comparación con Pudahuel y Quinta Normal respectivamente. Periodo mayo-septiembre 2011**

En la Figura 26. Mínimos de MP10 y precipitaciones en Rancagua en comparación con Pudahuel y Quinta Normal respectivamente. Las barras representan la cantidad de agua caída para las diferentes estaciones meteorológicas (Quinta Normal, Codegua y Punta Cortés), la línea continua gruesa la concentración horaria mínima diaria de MP10 en Rancagua y la línea continua delgada la concentración horaria mínima diaria de MP10 en Pudahuel.

Se observa que las concentraciones horarias mínimas de MP10 en Pudahuel son considerablemente bajas (0 o cercanas a 0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en los días que se registran precipitaciones en la estación de Quinta Normal. Sin embargo, en la estación de Rancagua los datos de concentraciones mínimas no bajan de 15 – 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  cuando las estaciones aledañas están registrando precipitaciones, resultando datos no confiables.

Al comparar el comportamiento de los valores horarios diarios máximos de MP10 con la temperatura mínima registrada en la estación de Rancagua, se debe esperar una relación inversa. La Figura 4 muestra esta relación.



**Figura 27. Máximos de MP10 y temperaturas mínimas en Rancagua. Periodo mayo-septiembre 2011**

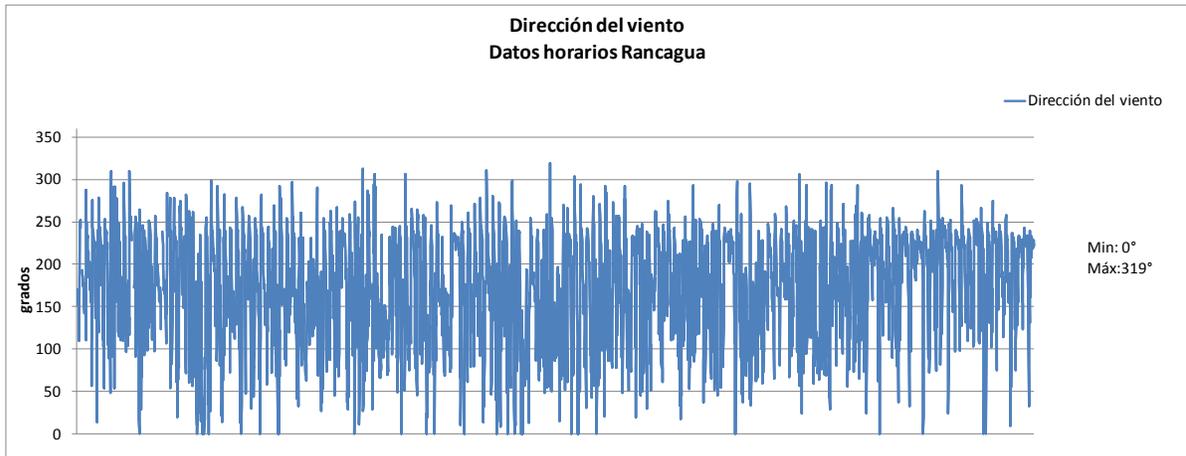
La Figura 4 representa la temperatura mínima y el máximo valor horario de MP10 registrado en el día, verificándose, en general, una relación inversa entre ambas variables. Las bajas temperaturas se asocian por una parte a la presencia de un anticiclón frío, cielos despejados y estabilidad a niveles bajos; y por otra a un mayor consumo de leña para calefacción domiciliaria, registrándose altos registros horarios de MP10.

### 43.2 Calidad de los registros de meteorología en Rancagua

En cuanto a los datos meteorológicos, el registro entre 26 de abril al 30 de septiembre presentó periodos faltantes, se actualizaron tardíamente (una vez al día en la mayoría de los casos), observándose algunos registros erróneos o dudosos al no ser físicamente consistentes. Ver series de tiempo de Figuras 5 a 8.

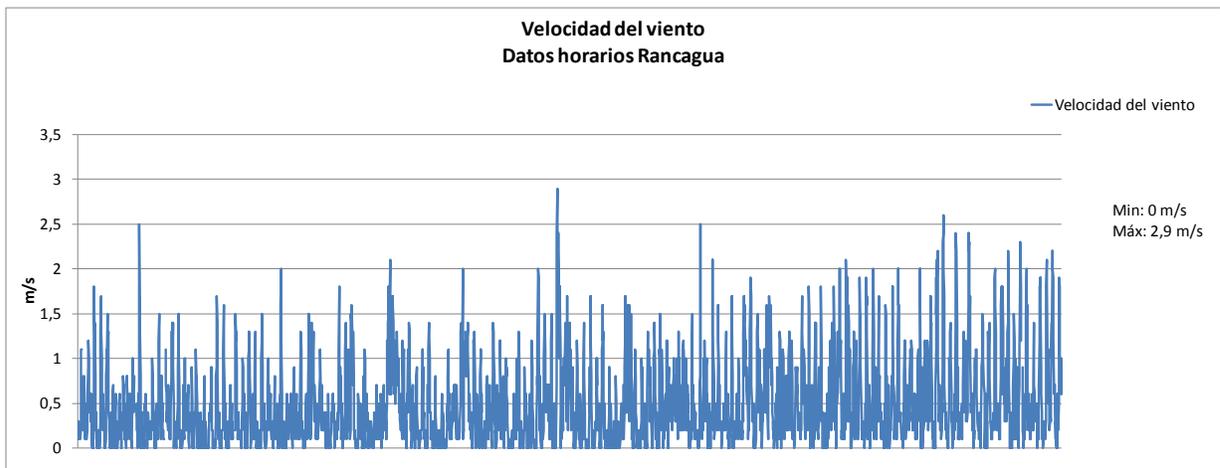
#### 43.2.1 Dirección y velocidad del viento

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra el comportamiento de la dirección del viento durante el periodo otoño-invierno 2011.



**Figura 28. Dirección del Viento. Datos horarios Rancagua. Periodo mayo-septiembre 2011**

En la Figura 28 se aprecian datos dudosos en general para todo el período, principalmente debido a que el registro fluctúa sólo entre 0° y 319°, y lo esperable es la obtención de registros de viento que abarquen todas las direcciones, esto es los 360°.



**Figura 29. Velocidad del viento. Datos horarios Rancagua. Periodo mayo-septiembre 2011**

La Figura 29 muestra que las velocidades del viento oscilan entre 0 y 2.9 m/s. En general los datos son consistentes, aunque no se observan valores altos de intensidad del viento. Como son promedios horarios, se puede asumir que podrían estar correctos, dado que las rachas no duran más de unos pocos minutos, sin embargo no puede descartarse que estén erróneos.

### 43.2.2 Humedad Relativa

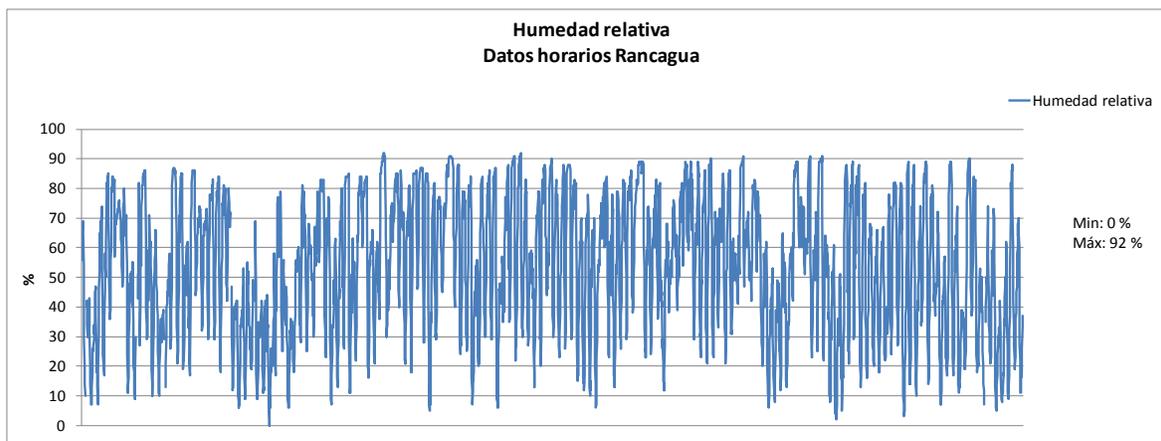


Figura 30. Humedad relativa. Datos horarios Rancagua. . Periodo mayo-septiembre 2011

En la Figura 30 7 se muestran valores de humedad relativa entre 0% y 92%. Estos datos son, en general, dudosos, ya que nieblas y pasos de sistemas frontales se asocian comúnmente a valores de saturación (HR=100%).

### 43.2.3 Temperatura

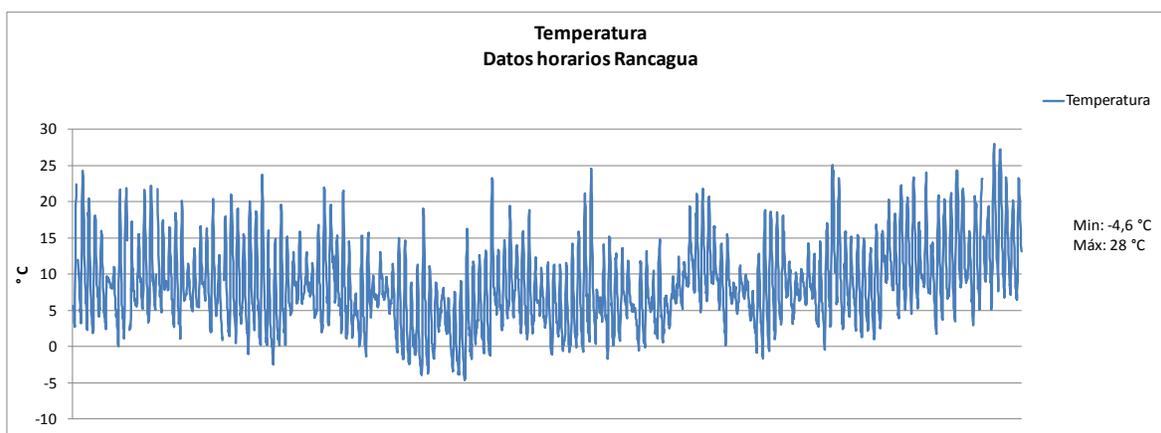


Figura 31. Temperatura del aire. Datos horarios Rancagua. . Periodo mayo-septiembre 2011

La serie de las temperaturas (Figura 8) muestra un comportamiento razonable durante el periodo otoño-invierno.

### 43.3 Calidad de los registros de calidad del aire en Rengo y San Fernando

Las estaciones de Rengo y San Fernando presentaron las mismas dificultades que la estación de Rancagua, registros dudosos, actualización tardía, imposibilidad de seguimiento y verificación del pronóstico.

Al igual que para Rancagua, las ecuaciones de pronóstico para estas estaciones no contemplan el dato actual de MP10, y por tanto, al menos fue posible pronosticar para cada día la calidad del aire esperada.

En la Figura 32 se presenta la serie de tiempo comparativa de los datos máximos horarios de MP10 para el periodo 2011 en las estaciones de Rengo y San Fernando.

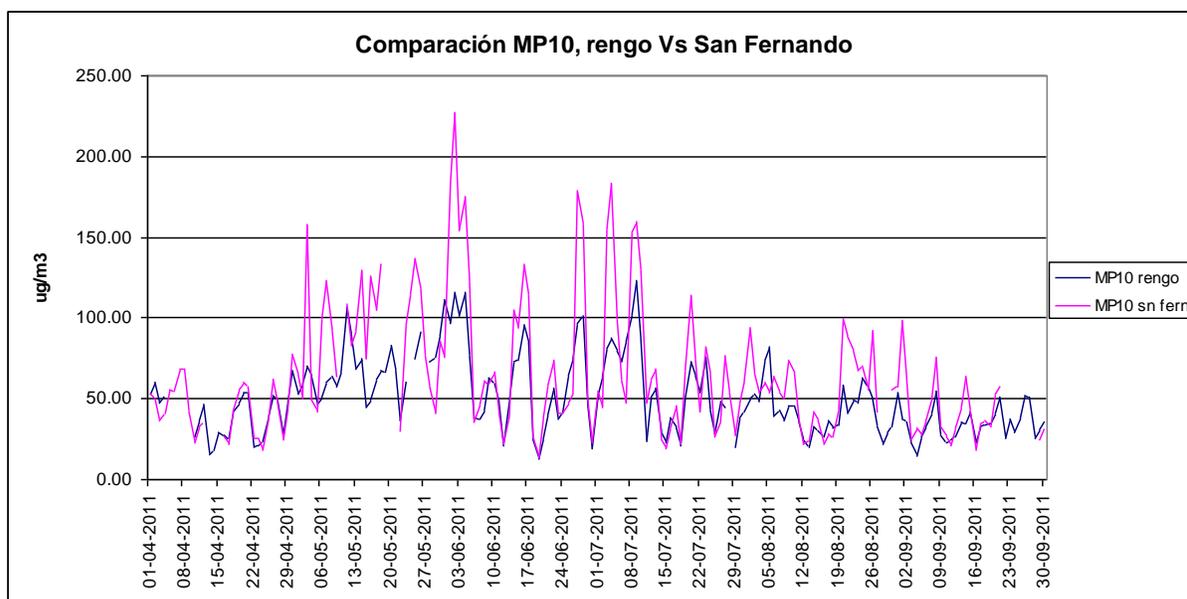


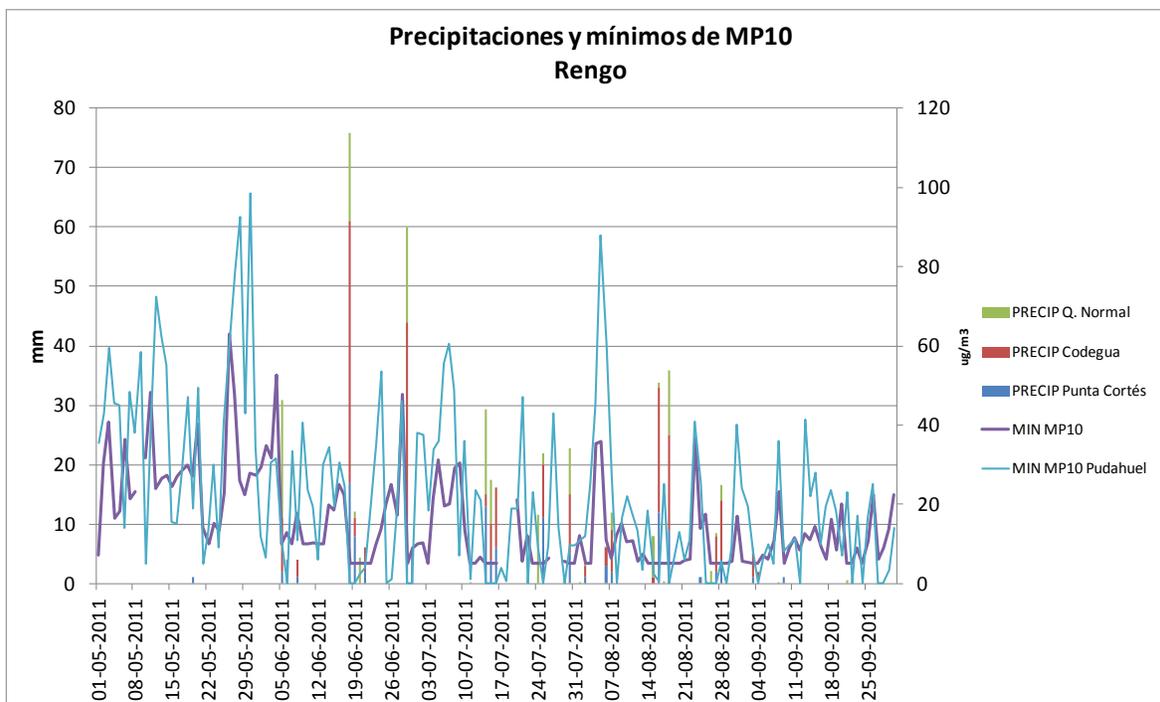
Figura 32. Datos horarios de MP10 en Rengo y San Fernando. Periodo abril-septiembre 2011

De la Figura 9: En Rengo se aprecia mayor cantidad de datos disponibles respecto a San Fernando. Los valores siguen las tendencias de los datos de Rancagua, aunque sin registrar superación de norma, situación que no se compadece con la declaración de zona saturada de esta comuna. En el episodio del 28 al 31 de mayo, los valores no representan las malas condiciones de dispersión.

San Fernando no presenta el ciclo típico de MP10 y en general existen valores inusualmente altos.

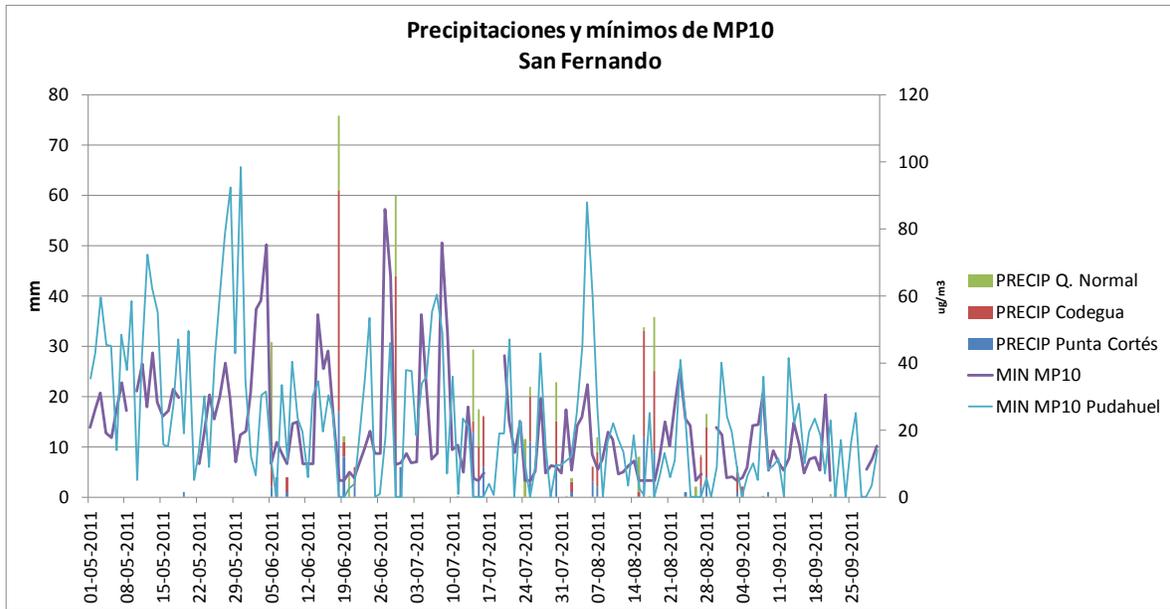
Se realiza el mismo ejercicio que en Rancagua para comprobar la calidad de los datos, comparando el comportamiento de los valores horarios diarios mínimos de MP10 con

respecto a los días en que hubo registro de precipitaciones en las estaciones cercanas a la estación de Rancagua, Rengo y San Fernando. Además de esto, se hace una comparación con la estación de Pudahuel. Las Figura 33 y Figura 34 muestran el comportamiento de los valores mínimos de MP10 con los registros de agua caída en las estaciones agrometeorológicas de Codegua, Punta Cortés y El Pangui. También se grafica el comportamiento de los valores mínimos horarios de MP10 en Pudahuel y los registros de agua caída en la estación meteorológica de Quinta Normal.



**Figura 33. Comportamiento de los valores mínimos horarios de MP10 en la estación de Rengo, incluyendo comportamiento modelo de las concentraciones mínimas de MP10 en la estación de Pudahuel, con respecto a la precipitación registrada. Periodo mayo-septiembre 2011**

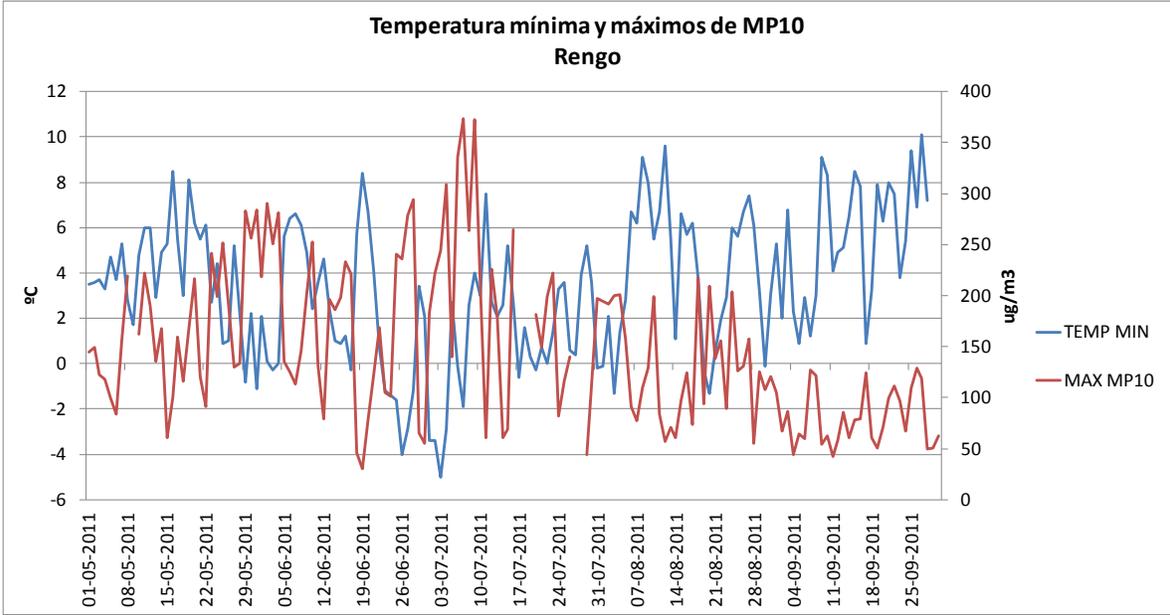
En la Figura 33 se observa en la estación de Rengo que los datos de concentraciones mínimas no bajan a valores cercanos a 0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  cuando las estaciones aledañas están registrando precipitaciones, resultando datos no confiables. El valor mínimo que se registra es 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en todo el periodo y en repetidas ocasiones, lo que hace presumir que el instrumento está mal calibrado.



**Figura 34. Comportamiento de los valores mínimos horarios de MP10 en la estación de San Fernando, incluyendo comportamiento modelo de las concentraciones mínimas de MP10 en la estación de Pudahuel, con respecto a la precipitación registrada. . Periodo mayo-septiembre 2011**

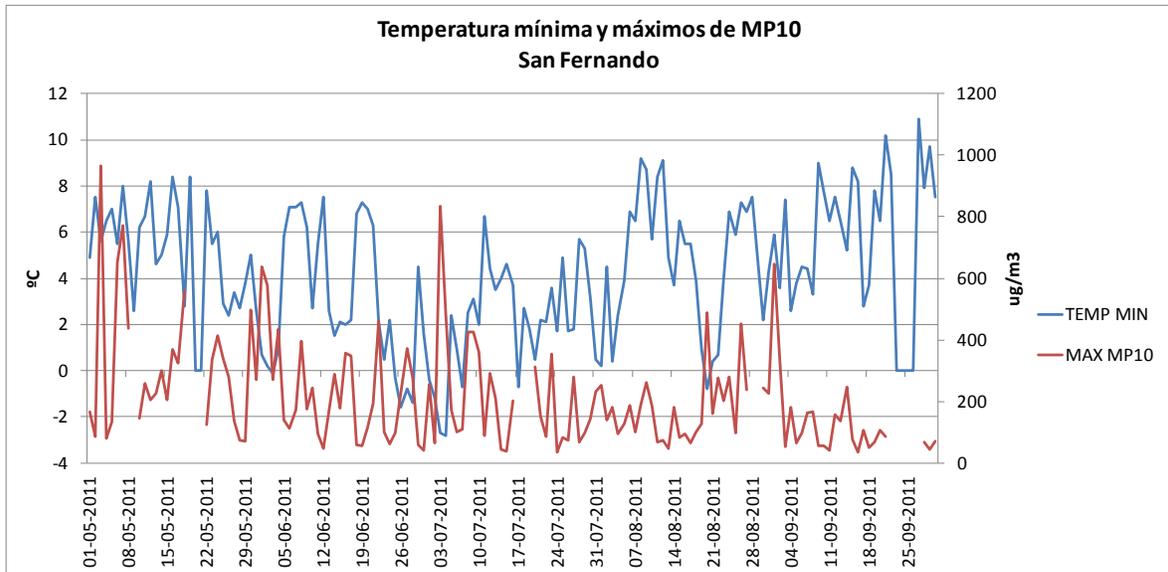
En la Figura 34 se observa para la estación de San Fernando, que los datos de concentraciones mínimas no bajan a cero, o valores cercanos a cero cuando las estaciones aledañas están registrando precipitaciones. El valor mínimo registrado es 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , el que parece ser el umbral inferior del registro.

Se compara a continuación el comportamiento de los valores horarios diarios máximos de MP10 con la temperatura mínima registrada en la estaciones de Rengo y San Fernando, en donde la relación debiera ser inversamente proporcional.



**Figura 35. Comportamiento de los valores máximos horarios de MP10 en la estación de Rengo en relación a las temperaturas mínimas registradas en la misma estación. Periodo mayo-septiembre 2011**

En la Figura 35 se distingue en general, la relación inversa esperada entre las temperaturas mínimas y los máximos de MP10. La disminución en las temperaturas mínimas asocia un aumento en los máximos valores horarios de MP10, salvo un periodo a mediados de junio y julio en que esta relación se ve distorsionada.



**Figura 36. Comportamiento de los valores máximos horarios de MP10 en la estación de San Fernando en relación a las temperaturas mínimas registradas en la misma estación. Período mayo-septiembre 2011**

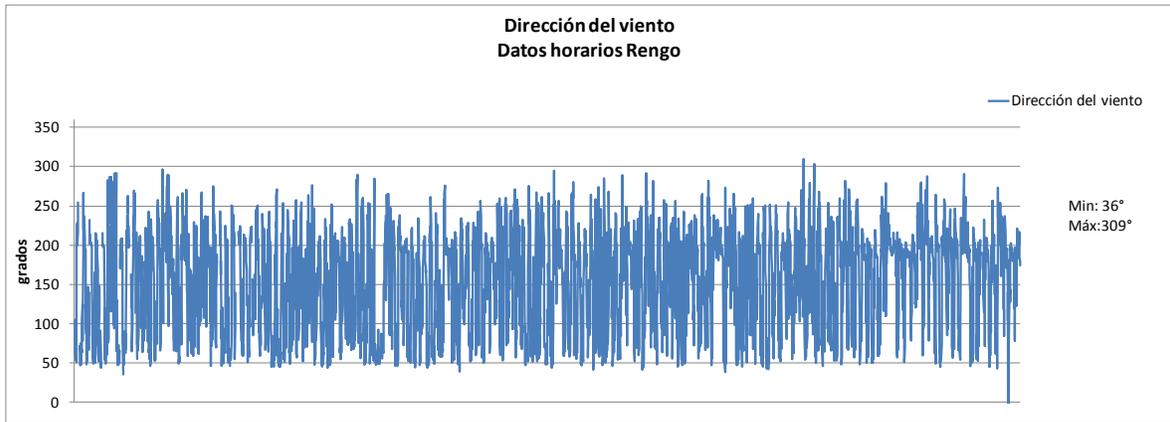
La Figura 36 muestra una relación inversa entre ambas variables, ocurriendo el mismo fenómeno que en los gráficos de Rancagua y Rengo, donde en algunos días la relación no es clara o se invierte. Además en San Fernando se pueden observar días donde la temperatura mínima es bajo 0°C, pero las concentraciones no aumentan. Esto sugiere un probable problema de medición.

#### 43.4 Calidad de los registros de meteorología en Rengo y San Fernando

En general, la calidad de los datos meteorológicos en las estaciones de Rengo y San Fernando es deficiente y en varias ocasiones contraria a lo físicamente esperado.

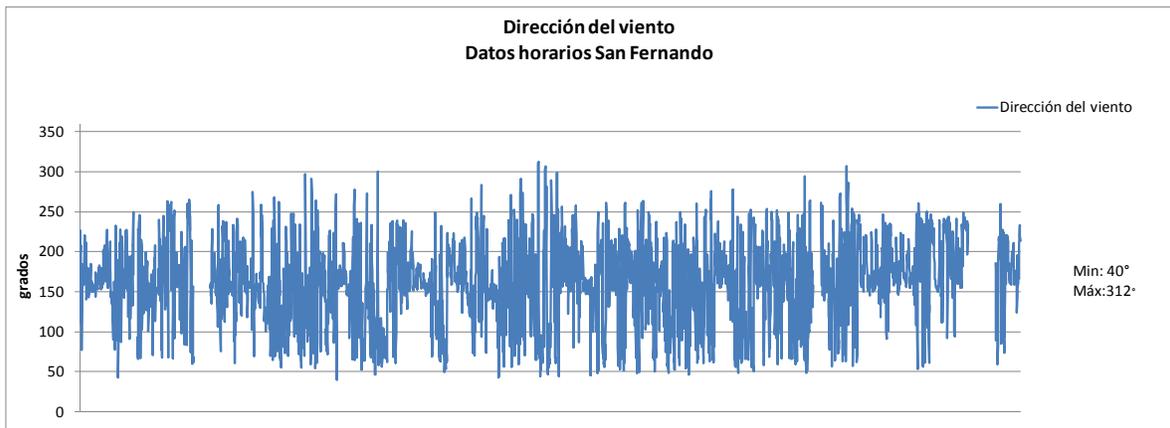
##### 43.4.1 Dirección del viento

Entre lo más relevante, destaca el vacío de información de dirección del viento entre los 310° y 35° de dirección en Rengo (Ver Figura 14), y entre 313° y 40° en San Fernando (Ver Figura 15). Esta condición meteorológicamente no puede darse, debido a que la región presenta sucesivos ingresos de sistemas frontales, los que en su momento de aproximación y presencia, por lo general asocian vientos de dirección norte. Cabe destacar, que este error en las mediciones también se encontró en Rancagua y en la estación de Las Encinas (Temuco).



**Figura 37 Dirección del Viento. Datos horarios Rengo mayo-septiembre 2011**

La Figura 14 muestra la serie temporal de dirección del viento en la estación de Rengo. Se observan periodos con datos faltantes. Por otra parte no hay registros de mediciones entre 035° y 310°, lo que refleja un serio problema de calibración y mantenimiento del sensor de dirección de viento.

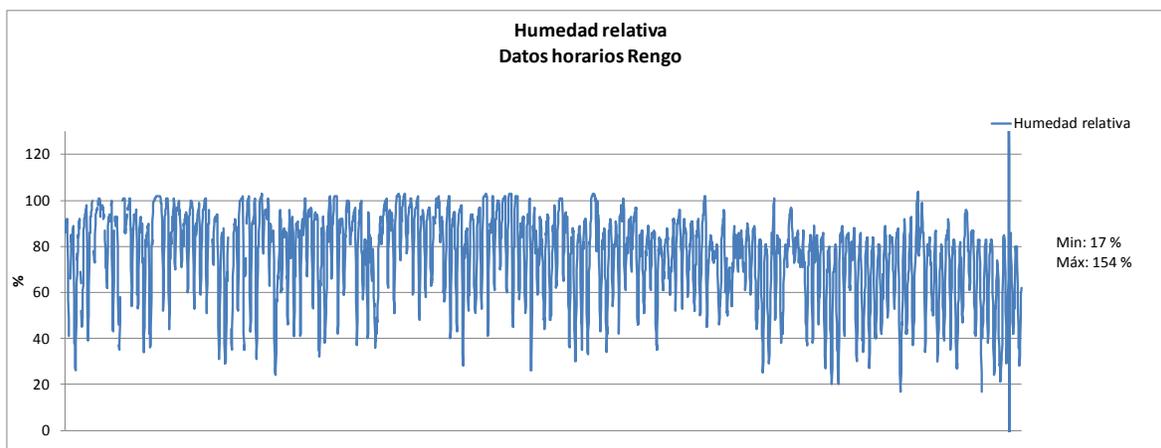


**Figura 38 Dirección del Viento. Datos horarios San Fernando mayo-septiembre 2011**

La Figura 15 muestra la serie temporal de dirección del viento en la estación de San Fernando. Se observan periodos con datos faltantes, y por otra parte no hay registros de mediciones entre 040° y 313°, esto refleja un serio problema de calibración y mantenimiento del sensor de dirección de viento.

### 43.4.2 Humedad Relativa

Otro de los errores notorios en las mediciones es la gran cantidad de datos de humedad relativa superiores a 100% en la estación de Rengo.



**Figura 39 Humedad relativa. Datos horarios Rengo mayo-septiembre 2011**

En la Figura 39 se aprecia que en oportunidades los datos máximos de HR superan el 100%, denotando falta de calibración del sensor.

## 44 Comentarios: Consecuencias para el pronóstico, evaluación y seguimiento

### 44.1 Acceso en línea de la información meteorológica y de calidad de aire

El acceso oportuno y en línea de la información de las estaciones de monitoreo, es una condición esencial para lograr un mejor desempeño en el pronóstico para la Región, y realizar una buena Gestión de Episodios, pues permite el seguimiento de la condición y la evaluación de lo pronosticado día a día.

Durante el periodo otoño-invierno de 2011 la información de la estaciones de monitoreo de Rancagua, Rengo y San Fernando no estuvieron en línea hora a hora en gran parte del periodo de pronósticos, afectando directamente el proceso de diagnóstico y seguimiento de la condición en estudio.

Cuando no se dispuso de información en línea, CENMA a fin de cumplir con el pronóstico de calidad del aire comprometido, tuvo que basar su análisis y seguimiento de las condiciones meteorológicas de escala local en las estaciones de monitoreo en línea del aeródromo de Rancagua<sup>70</sup>, y de las estaciones agroclimáticas de Codegua, Punta Cortés y El Panguí<sup>71</sup>. De modo general, la calidad del aire del momento, se tuvo que estimar sobre la base de correlaciones efectuadas entre algunas estaciones de monitoreo de la red MACAM de Santiago, y la estación de Rancagua<sup>72</sup>.

De modo general entonces, debido a la falta de información en línea de calidad de aire, en algunas ocasiones no fue posible confirmar y/o evaluar oportunamente el pronóstico emitido e impidió efectuar el adecuado seguimiento de la evolución de las concentraciones de MP10 a escala local.

Permanentemente se esperó una nueva actualización de la página web de SIVICA, a fin de incorporarla inmediatamente al análisis y a las tablas de evaluación diaria del pronóstico.

---

<sup>70</sup> Estación DGA-DMC (<http://metaer.meteochile.gob.cl/>)

<sup>71</sup> Estaciones de FDF, INIA y DMC (<http://www.agroclima.cl>)

<sup>72</sup> CENMA 2008-Correlación de MP10 entre la estación de monitoreo de Rancagua y las estaciones de El Bosque y Pudahuel. (Documento interno)

## 44.2 Aseguramiento de la certeza y confiabilidad de la información

Durante 2011 se constató en ocasiones inconsistencias y registros dudosos en las mediciones de MP10 en las estaciones de la Red SIVICA de la región de O'Higgins. Los registros de parámetros meteorológicos mostraron valores no esperados en algunos casos, y erróneos en otros. Ante esto, se utilizó paralelamente información de redes públicas para el caso de los datos meteorológicos, mientras que para el caso de la calidad del aire se comparó con las mediciones de la red MACAM.

La falta de confiabilidad de la información de la red SIVICA generó en el equipo de trabajo mayor incertidumbre en el pronóstico que por definición contempla ya un grado de incerteza.

El mal aseguramiento de la calidad de la información impacta directamente también en el cálculo de normas de calidad del aire, en la calidad de las actualizaciones de los coeficientes de las ecuaciones de pronóstico utilizados actualmente y en cualquier uso que se quiera dar a esta información con fines de investigación o estudio.

## 45 Conclusiones

A juicio de CENMA, la deficiente operación de la Red SIVICA en 2010 y 2011, en relación a la calidad y disponibilidad de la información de las estaciones de monitoreo ubicadas en la Región de O'Higgins, debe ser subsanada. Se señala que tal situación no se dio durante el periodo en que CENMA operó esta red.

Se hace imperativo asegurar para 2012 el correcto funcionamiento de la Red, condición necesaria si se quiere lograr un mejoramiento del sistema de pronóstico y una adecuada Gestión de Episodios Críticos.

La información recopilada en los dos últimos años representa un serio retroceso para la gestión de calidad de aire en la Región, debido a que la información existente dista de ser confiable, y por lo tanto no se puede aseverar que las conclusiones que se obtengan a partir de dicha información sean correctas.

Las principales consecuencias de la deficiente operación de la red SIVICA en el sistema de pronóstico 2011 estuvieron relacionadas con la fase de diagnóstico y seguimiento,

cuando no se contó con la información meteorológica y de calidad del aire en línea, y de pronóstico al no poder evaluar oportunamente la calidad del aire pronosticada, generando además mayor incertidumbre al pronóstico.

Cuando se dio este escenario, CENMA debió buscar herramientas alternativas de análisis mediante el seguimiento a otras redes públicas, que solo contemplaban información meteorológica y esperar la actualización de la información de calidad del aire para evaluar el pronóstico.

Una vez que la información se actualizaba en la página web de SIVICA, se incorporaba el análisis, requiriendo mayor tiempo de dedicación para la interpretación de los datos, para su inserción en el análisis de los episodios (ya pasados) y para realizar la evaluación de los modelos de calidad del aire.

## 46 ANEXOS

### 46.1 Series de tiempo de variables meteorológicas en Rengo y San Fernando

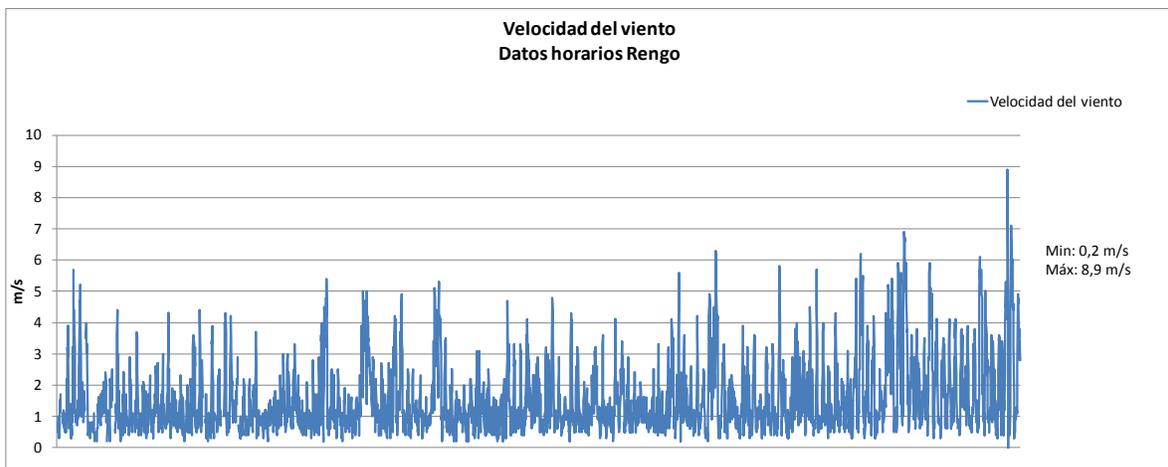


Figura 40 Velocidad del viento. Datos horarios Rengo mayo-septiembre 2011

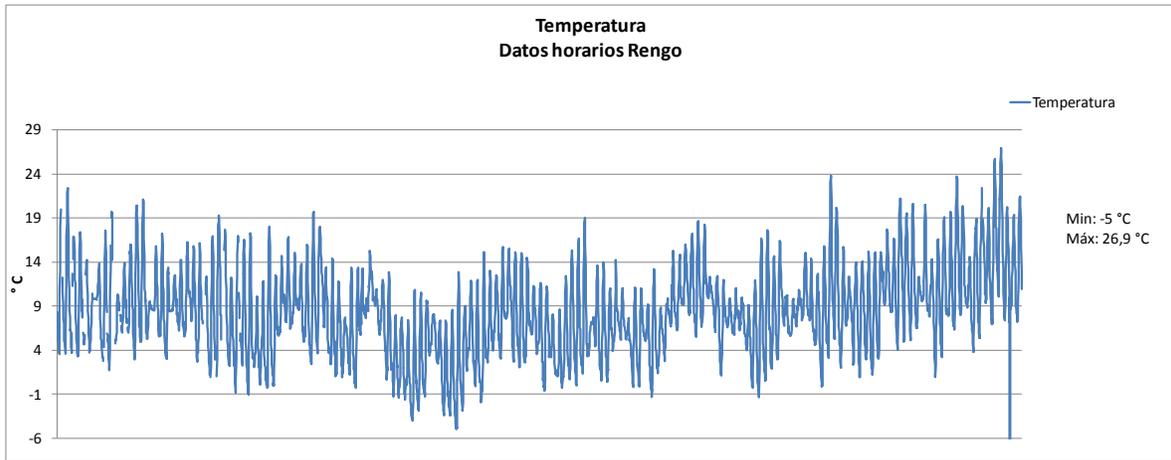


Figura 41 Temperatura. Datos horarios Rengo mayo-septiembre 2011

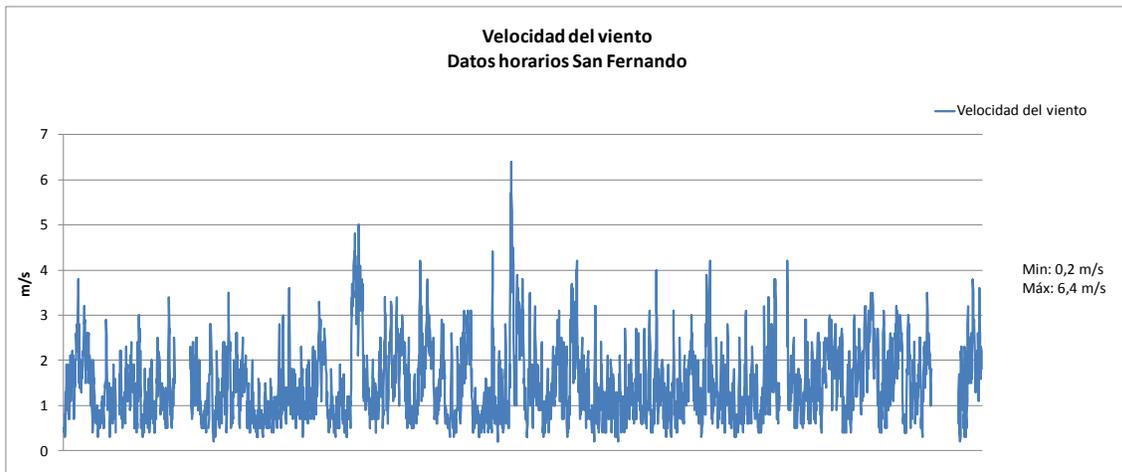


Figura 42 Velocidad del viento. Datos horarios San Fernando mayo-septiembre 2011

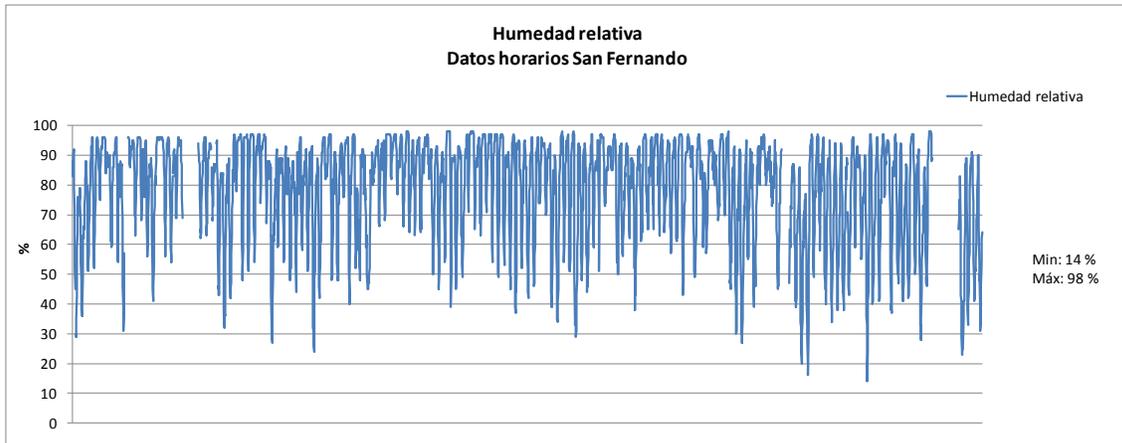


Figura 43 Humedad relativa. Datos horarios San Fernando mayo-septiembre 2011

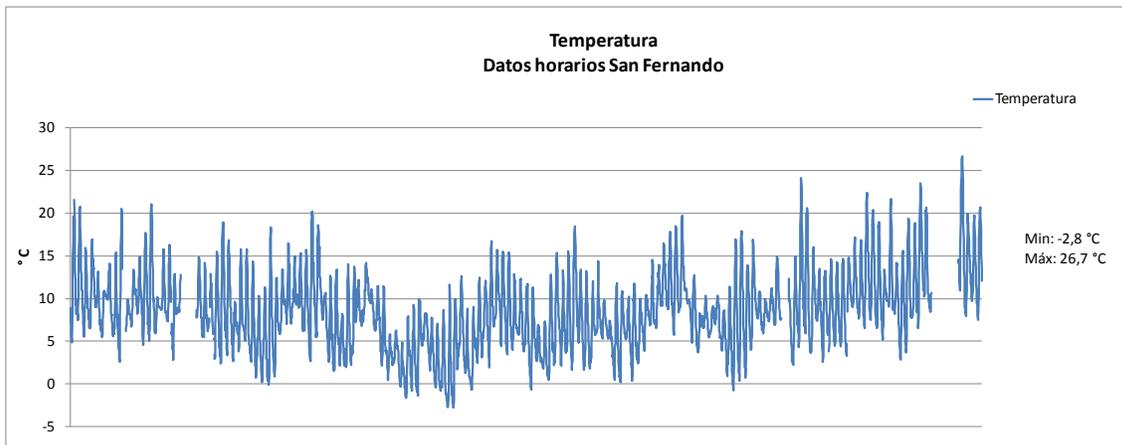


Figura 44 Temperatura. Datos horarios San Fernando mayo-septiembre 2011



CENTRO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

INFORME FINAL  
“OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE PRONÓSTICO DE  
CALIDAD DE AIRE POR MP10 PARA RANCAGUA  
PERIODO 2011”

UMGCA-014-LMPCA-007-2011

VOLUMEN 8  
ANÁLISIS Y PROPUESTAS DE MEJORAMIENTO AL SISTEMA DE  
PRONÓSTICO Y GESTIÓN DE EPISODIOS EN RANCAGUA  
VERSIÓN FINAL

---

PREPARADO PARA

SECRETARIA REGIONAL MINISTERIAL DEL MEDIO AMBIENTE  
REGIÓN DEL LIBERTADOR BERNARDO O'HIGGINS

SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2011

## Contenido

1	Introducción .....	1
2	Antecedentes .....	1
3	Propuestas para mejorar el sistema de pronóstico y gestión de episodios por de MP10 en la Región del Libertador Bernardo O'Higgins .....	2
3.1	Contar con información meteorológica y de calidad de aire confiable y en línea y representativa.....	2
3.2	Utilización de periodos fijo de 24 horas para pronósticos de calidad de aire .....	3
3.3	Actualización de coeficientes de las ecuaciones y búsqueda de variables predictoras.....	4
3.4	Pronóstico para otras ciudades como Rengo y San Fernando .....	5
3.5	Considerar el error típico del modelo, en la entrega de los resultados del Pronóstico de Calidad de Aire en términos de probabilidades.....	5
3.6	Difusión en línea de los valores horarios de MP10 .....	5
3.7	Evaluación del pronóstico de Calidad de Aire considerando el impacto de la reducción de emisiones.....	6
3.8	Actualización periódica del Inventario de Emisiones .....	6
3.9	Incorporación de nuevas metodologías de pronóstico de calidad de aire.....	6
3.10	Aplicación de un sistema de pronóstico de calidad de aire para MP 2.5 .....	7
3.11	Realizar campañas para determinar la composición química del MP2.5 .....	7
3.12	Trabajo en equipo de especialistas de SEREMI del Medio Ambiente Región del Libertador Bernardo O'Higgins y CENMA.....	7
3.13	Optimización de la determinación gradiente térmico vertical.....	7
3.14	Considerar la compra e instalación de un perfilador vertical de viento y temperatura .....	8
3.15	Realizar auditorías y fiscalización permanentes a las principales fuentes emisoras.8	
3.16	Realizar campañas de mediciones para conocer la distribución espacial y temporal de la contaminación por MP10 y MP2.5 en el Valle Central .....	9



## 47 Introducción

CENMA ha efectuado estudios continuos y sistematizados relacionados con la contaminación atmosférica por MP10 en Rancagua desde de 2008.

Sobre la base de la experiencia alcanzada en el desarrollo y operación del sistema de pronóstico de MP10 para la Región del Libertador Bernardo O'Higgins, se efectúa un análisis y propuestas de mejoramiento.

## 48 Antecedentes

En 2009 Rancagua y otras localidades ubicadas en la Región del Libertador Bernardo O'Higgins, fueron declaradas zonas saturadas por MP10. El Plan de Descontaminación Atmosférica (PDA) asociado debe contar un plan operacional para enfrentar los episodios críticos<sup>73</sup>.

El propósito fundamental de la Gestión de Episodios es proteger la salud de la población. La Autoridad Ambiental requiere por lo tanto contar con información confiable y certera para mantener a la población informada de forma eficiente y oportuna cuando se prevean altos niveles de MP10, hacer recomendaciones y tomar acciones para mitigar los impactos en la salud.

Con el objetivo de alertar oportuna y eficientemente a la población de los efectos adversos en salud que causan los episodios de MP10, a requerimiento del SEREMI del MA Región del Libertador Bernardo O'Higgins, CENMA implementó y operó en 2011 un sistema de pronóstico de calidad de aire por MP10 para la comuna de Rancagua, y de forma experimental para las comunas de Rengo y San Fernando.

El sistema de pronóstico fue desarrollado por CENMA mediante métodos estadísticos de pronóstico basados en Análisis de Regresión Multivariado. Una de las principales variables a considerar fue un índice de Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica (PMCA), constituido por cinco Categorías asociadas a distintas condiciones meteorológicas de ventilación y dispersión de contaminantes en la Región de O'Higgins.<sup>74</sup>

El sistema de pronóstico de calidad de aire para MP10 operado en Rancagua, no obstante tener un margen de error inherente a todo modelo de pronóstico, permitió apoyar a la Autoridad Ambiental en la toma de decisiones, dar aviso y recomendar medidas para proteger de forma eficiente y oportuna la salud de la población. Tanto el sistema de pronóstico como la

---

<sup>73</sup> Ley 19.300\_ DS N° 94/95 de Minsegres

<sup>74</sup> CENMA (2009) Tipificación de condiciones meteorológicas asociadas a distintas categorías de PMCA en Rancagua

gestión de episodios son susceptibles de ser mejorados, y para esto deben hacerse revisiones periódicas a fin de detectar falencias y proponer acciones de mejoramiento.

En este volumen, se exponen propuestas de mejoramiento sobre la base del funcionamiento del Sistema de Pronósticos y Gestión de Episodios en 2011 en Rancagua.

## **49 Propuestas para mejorar el sistema de pronóstico y gestión de episodios por de MP10 en la Región del Libertador Bernardo O'Higgins**

### **49.1 Contar con información meteorológica y de calidad de aire confiable y en línea y representativa**

Para el análisis, seguimiento continuo y elaboración de pronósticos de PMCA y de Calidad de Aire, es necesario contar con la información requerida en línea hora a hora, con registros continuos y confiables, ya que de la oportunidad, continuidad y calidad de los registros reportados por las estaciones de monitoreo dependen los resultados obtenidos.

La información es utilizada en el análisis y seguimiento de la evolución de las condiciones meteorológicas y de calidad de aire a escala local, y se requiere para desarrollar pronósticos certeros, de manera de apoyar a la Autoridad Ambiental en la realización de una adecuada Gestión de Episodios.

En 2011 hubo serios y reiterados problemas con la información proveniente de la red SIVICA, similar a lo ocurrido en 2010 (Ver Volumen 7, Análisis de la Red SIVICA), situación que no se observó cuando CENMA operaba esta red.

Un número significativo de parámetros meteorológicos y de calidad de aire de las estaciones de monitoreo de Rancagua, Rengo y San Fernando, presentaron registros dudosos o erróneos, en extensos periodos no estuvieron en línea hora a hora, o no hubo mediciones. Ante ese escenario, CENMA a fin de cumplir con los compromisos del servicio, en algunos casos utilizó la información alternativa de otras redes regionales enfocadas al pronóstico del tiempo y la agrometeorología para la etapa de diagnóstico, con la imprecisión que esto conlleva, ya que el sistema de pronóstico está basado en la información de la red SIVICA.

Se plantea por tanto la imperiosa necesidad de asegurar que la Institución que opere la Red SIVICA, a la que pertenecen las estaciones de monitoreo de la Región del Libertador Bernardo O'Higgins, tenga las capacidades, recursos materiales y humanos, conocimientos, competencia y experiencia requeridos para esta función. La Institución a cargo debe efectuar un permanente control de calidad a los datos, y hacer las mantenciones y calibraciones

preventivas y correctivas que sean necesarias para mantener en buen funcionamiento los equipos de monitoreo. Se requiere además de estudios que den cuenta de la representatividad de las mediciones actuales y la necesidad de ampliar o no la red existente.

## 49.2 Utilización de periodos fijo de 24 horas para pronósticos de calidad de aire

Los máximos valores horarios de MP10, y el máximo valor del promedio móvil de 24 horas que define el predictando de algunos sistemas de pronóstico, muestran un significativo desfase temporal. Este desfase determina que los avisos a la población y las eventuales medidas de mitigación en episodios, sean aplicados tardíamente cuando el episodio ha finalizado, haciendo que las medidas sean ineficientes. Esto resulta particularmente notorio en episodios de un día de duración; y en los días de inicio y término de episodios que se extienden por un mayor periodo de tiempo.

Por otra parte esta práctica induce a otras situaciones negativas como:

- Doble conteo de episodios, debido a que los valores máximos horarios se registran en horas de la noche, antes de la medianoche y después de esta se registran valores asociados a episodios.
- Pronósticos de MP10 que no son tales, ya que se efectúan sobre la base de la constatación de un episodio que ya comenzó a la hora de emisión del informe, típicamente a las 20 horas. El desfase del promedio móvil de 24 horas hace que ese pronóstico aparezca como acertado, pero las concentraciones reales de 24 horas del día siguiente pueden diferir significativamente de un día de pronóstico, y por lo tanto de aplicarse medidas estas son tardías e ineficientes.

Lo anterior no se aplica al Sistema de Pronóstico diseñado para Rancagua, pues CENMA consensuó con la contraparte de la SEREMI de Medio Ambiente de la región, desarrollar y operar un modelo pronóstico que considerara un predictando distinto al ICAP (promedio móvil). Es así que el Modelo considera para el pronóstico un periodo fijo de 24 horas, contemplado desde las 06 AM del día 1, a las 07 AM del día 2, considerando el día 0 como el de emisión del pronóstico. Se constató que el pronóstico para el día siguiente, se ajustó significativamente mejor a la evolución de la calidad del aire y a los valores de MP10 registrados en comparación a un modelo que considera el máximo registro móvil de 24 horas.

La ecuación de 07 am del día 1 a 06 am del día 2, si bien soluciona los problemas que presenta el máximo promedio móvil de 24 horas, ha demostrado ser en ocasiones comunicacionalmente confuso. En efecto, la superación de la norma primaria de MP10 está definida como un valor

promedio fijo de 24 horas  $\geq 150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , considerado el periodo que va desde las 01 a 24 horas de un día calendario<sup>75</sup> <sup>76</sup>. La superación del valor de  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el periodo 07 am del día 1 a 06 am del día 2, no implica necesariamente entonces que se haya superado la norma primaria de MP10 en el periodo 01 a 24 del día 1. Por otra parte, un valor menor pero cercano a  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , en el periodo 06 am del día 1 a 07 am del día 2, no descarta necesariamente que el día 1 se pudiera haber superado la norma.

Particular importancia adquiere este hecho en la Región del Libertador Bernardo O'Higgins, ya que para efectos preventivos y de protección de la salud de la población, la SEREMI de MA ha determinado como episodio de contaminación por MP10 la superación del valor de  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como promedio fijo de 24 horas.

Dado que los valores entregados por las ecuaciones actualmente operativas son generalmente muy similares al registro de 01 a 24 horas, se propone desarrollar ecuaciones para un predictando que considere el promedio 01 a 24 horas, las que podrían aplicarse a partir de 2012.

### **49.3 Actualización de coeficientes de las ecuaciones y búsqueda de variables predictoras**

Para el mejoramiento de los métodos estadísticos de pronóstico de calidad de aire, se recomienda:

- Efectuar una actualización periódica de los coeficientes de las ecuaciones de pronóstico, de modo de intentar capturar las variaciones que se producen de año en año en las emisiones y concentraciones resultantes. En este proceso es necesario incluir en el análisis las condiciones meteorológicas de dispersión registradas en los años considerados, de modo de hacerlos comparables. Los resultados dependerán de la calidad de la información meteorológica y de calidad de aire.
- Continuar en la búsqueda de nuevas variables predictoras, que optimicen los resultados entregados por los modelos.

La dudosa calidad de la información meteorológica y principalmente de calidad de aire registrada en la estación de monitoreo de Rancagua principalmente en 2010 y también en 2011, representa un serio impedimento para realizar actualizaciones de coeficientes que resulten confiables.

---

<sup>75</sup> DS59/1988

<sup>76</sup> MINSAL

Se propone por lo tanto, concentrar los esfuerzos en la búsqueda de nuevas variables predictoras, utilizando registros de MP10 y MP2.5 anteriores a 2010.

#### **49.4 Pronóstico para otras ciudades como Rengo y San Fernando**

El comportamiento errático de los datos de San Fernando y Rengo durante el periodo de pronóstico experimental de MP10 2011, generaron dudas sobre la calidad de esta información. Los modelos de calidad del aire para Rengo y San Fernando solo tienen un año de utilización, por lo que realizar una actualización y/o modelos nuevos, es demasiado prematuro, más aún si los datos de calidad del aire aún son dudosos. Pero a la luz de lo observado en Rancagua, se hace necesario replantear a mediano plazo la forma del sistema de pronóstico para estas localidades utilizando el predictando de promedios diarios.

Los esfuerzos futuros para estas estaciones apuntan a cambiar el predictando y a mejorar el acierto en los episodios de contaminación, integrando variables de duración e intensidad del evento.

#### **49.5 Considerar el error típico del modelo, en la entrega de los resultados del Pronóstico de Calidad de Aire en términos de probabilidades**

Un pronóstico está definido como la probabilidad de ocurrencia de un evento determinado, y tiene asociado un error medio o error típico.

Sobre esta base se propone considerar la entrega del resultado del pronóstico de calidad de aire en términos de probabilidades, asociada a rangos esperados de MP10 que incorporen la incerteza inherente al error típico del modelo; o privilegiando el carácter preventivo del pronóstico, al considerar el peor escenario esperado.

#### **49.6 Difusión en línea de los valores horarios de MP10**

Se recomienda la difusión en línea de los valores horarios de MP10 a través de sitios Web y otros medios de comunicación. Si bien inicialmente puede prestarse para confusiones los valores horarios respecto a los promedios de 24 horas que definen los episodios, mediante adecuadas campañas de información y difusión esta confusión se superará.

Tal recomendación está basada en que la exposición de la población a los altos peaks horarios asociados a episodios es lo que determina efectos agudos en salud, particularmente en la población más vulnerable compuesta por lactantes, ancianos, asmáticos y personas con problemas cardiovasculares. Los efectos crónicos en la salud en tanto, están asociados a la exposición a la contaminación atmosférica durante largos periodos de tiempo del orden años.

#### **49.7 Evaluación del pronóstico de Calidad de Aire considerando el impacto de la reducción de emisiones**

Aunque la región no aplica medidas de contingencia obligatorias, es importante considerar que en la evaluación de los pronósticos se comparan los valores pronosticados con los registrados, y al preverse un episodio y de aplicarse medidas de mitigación de emisiones, para una evaluación rigurosa, es necesario incorporar el efecto que estas medidas tendrían en las concentraciones resultantes. Esto requeriría de mediciones confiables y una actualización permanente del inventario de emisiones atmosféricas.

#### **49.8 Actualización periódica del Inventario de Emisiones**

Se sugiere determinar el impacto real de la reducción de emisiones en episodios, y del aumento o disminución de fuentes emisoras a través de modelos de simulación o dispersión, que incluyan inventarios de emisiones dinámicos, periódicamente actualizados. El modelo de simulación debe considerar el comportamiento de las principales variables meteorológicas de dispersión.

#### **49.9 Incorporación de nuevas metodologías de pronóstico de calidad de aire**

Se recomienda en paralelo a la operación del modelo oficial, desarrollar e implementar otras metodologías de pronóstico. Estas pueden ser del tipo estadístico MOS<sup>77</sup>, Neuronales<sup>78</sup> o del tipo numérico con modelos acoplados físico-químicos como el WRF-Chem<sup>79</sup>. Estos modelos alternativos pueden ser también desarrollados y/u operados por Instituciones y Universidades Regionales.

---

<sup>77</sup> Model Output Statistic

<sup>78</sup> Neuronal networks

<sup>79</sup> Modelo numérico acoplado físico-químico

#### **49.10 Aplicación de un sistema de pronóstico de calidad de aire para MP 2.5**

En 2012 entra a regir la norma para el MP2.5,<sup>80</sup> y los niveles asociados a condiciones de excepción (superación de la norma, alerta, preemergencia y emergencia)

La fracción del material particulado respirable más agresiva para la salud corresponde al MP2.5 y se estima que en Rancagua la fracción fina, MP2.5 es del orden de un 70 % del MP10 total.

Inicialmente, se propone el ajuste de las ecuaciones utilizadas para el pronóstico de MP10, de modo de estimar proporcionalmente las concentraciones esperadas de MP2.5. Al respecto CENMA, con recursos propios, se encuentra desarrollando estos ajustes para las ecuaciones utilizadas en Rancagua, a fin de operarlas el 2012.

#### **49.11 Realizar campañas para determinar la composición química del MP2.5**

Para conocer mejor los procesos de formación y distribución espacial y temporal del MP2.5 en la Región de O'Higgins, es necesario efectuar campañas de medición a través de filtros. Al analizarlos y determinar su composición química se puede estimar la contribución de las diferentes fuentes de emisión de contaminantes.

#### **49.12 Trabajo en equipo de especialistas de SEREMI del Medio Ambiente Región del Libertador Bernardo O'Higgins y CENMA**

Durante el año 2011 en que CENMA operó el modelo de pronóstico de MP10 para la Región del Libertador Bernardo O'Higgins, se logró una muy buena interacción con las contrapartes técnicas de la SEREMI de MA.

Se recomienda mantener y fortalecer este trabajo en equipo, ya que apunta al mejoramiento continuo de la Gestión de Episodios. Se propone efectuar reuniones y discusiones técnicas periódicas entre los especialistas del SEREMI MA Región del Libertador Bernardo O'Higgins, y la contraparte a cargo del Sistema de Pronóstico.

#### **49.13 Optimización de la determinación gradiente térmico vertical**

Un bajo factor de ventilación se correlaciona con condiciones de marcada estabilidad a niveles bajos, y ocurrencia de episodios por MP10.

---

<sup>80</sup> DS N° 12/2001 Ministerio del Medio Ambiente

Existen dos tipos de inversiones térmicas que inciden en la estabilidad a niveles bajos:

- La inversión térmica de subsidencia asociada a los movimientos de descenso del Anticiclón Semipermanente del Pacífico Sur, y
- La inversión térmica superficial determinada por enfriamiento radiativo nocturno

Dependiendo de la condición sinóptica pueden presentarse perfiles térmicos verticales, sin inversión, con solo una las inversiones mencionadas, o las dos simultáneamente pudiendo llegar a acoplarse.

Se sugiere aumentar los puntos de medición de temperatura en la vertical en Rancagua, instalando cerca de la estación de monitoreo de la Red SIVICA, una torre meteorológica que mida temperatura a diferentes niveles (2, 8 y 22 m). En esta misma torre se podrían instalar equipos Topas para medición de MP10 y MP2.5, a fin de conocer la distribución y comportamiento de la contaminación en la vertical.

Se recomienda además contar con otro punto de medición aproximadamente a 1000 msnm, de manera de tener un perfil térmico vertical lo más completo posible.

El contar con mediciones integradas, continuas y en línea de temperatura a diferentes niveles en la vertical, entregaría información relevante para el análisis, seguimiento y pronóstico de episodios de MP10 y MP2.5.

#### **49.14 Considerar la compra e instalación de un perfilador vertical de viento y temperatura**

Se sugiere priorizar la adquisición e instalación de un perfilador vertical de viento y temperatura en Rancagua. Este equipamiento sería de gran utilidad en la detección, seguimiento y pronóstico de contaminación atmosférica. A través de este equipo se puede inferir y determinar la evolución de la capa de mezcla superficial y del factor de ventilación. Los perfiladores verticales de última generación son más baratos que los que se fabricaban años atrás y algunos fácilmente transportables.

#### **49.15 Realizar auditorías y fiscalización permanentes a las principales fuentes emisoras**

Esta actividad a juicio de CENMA debiera tener carácter permanente a fin de contar con un inventario de emisiones confiable, que respalde los estudios de impacto ambiental y las medidas de mediano y largo plazo a tomar por la Autoridad.

#### **49.16 Realizar campañas de mediciones para conocer la distribución espacial y temporal de la contaminación por MP10 y MP2.5 en el Valle Central**

Se sugiere realizar campañas de mediciones en el valle central de la región, mediante un vehículo instrumentado en el período otoño-invierno, realizando recorridos preestablecidos, en días asociados a altos registros de contaminación atmosférica por MP10 y MP2.5.