



**Fundación Centro Nacional del Medio Ambiente
CENMA - Universidad de Chile**



INFORME FINAL

**“Implementación y Operación Diaria de
Modelo de Pronóstico de Contaminación
Atmosférica por MP10 en Temuco”**

Volumen 3

**“Propuestas de mejoramiento al
Sistema de Pronóstico”**

Informe LMAA-033-UMET-020-2008

**Preparado por el
Centro Nacional del Medio Ambiente
de la Universidad de Chile**

Para

**COMISIÓN NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE
DIRECCIÓN REGIÓN DE LA ARAUCANÍA**

Cenma
Avenida Larraín 9975
F: 02-2994100
E-mail: comunicaciones@cenma.cl

Noviembre 2008

INFORME FINAL
Volumen 3

Propuestas de mejoramiento al Sistema de Pronóstico en Temuco

CONTENIDO

1	ANÁLISIS DEL SISTEMA DE PRONÓSTICO DE EPISODIOS	2
1.1	INTRODUCCIÓN	2
1.2	ANTECEDENTES	2
2	DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO METEOROLÓGICO Y CALIDAD DE AIRE EN TEMUCO.....	4
3	PRONÓSTICO DE EPISODIOS DE CONTAMINACIÓN EN TEMUCO.....	6
3.1	ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE PRONÓSTICO DE CALIDAD DE AIRE POR MP10 EN TEMUCO	6
3.2	OBJETIVOS DEL ESTUDIO	7
3.3	INFORMACIÓN DISPONIBLE	8
4	ECUACIONES DE PRONÓSTICO PARA CONCENTRACIONES DE MP10 DESARROLLADAS MEDIANTE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE	9
4.1	METODOLOGÍA UTILIZADA.....	9
4.2	RESULTADOS DEL AJUSTES DE ECUACIONES DE REGRESIÓN MÚLTIPLE.....	10
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	24

1 Análisis del sistema de Pronóstico de Episodios

1.1 Introducción

Sobre la base de la experiencia alcanzada por CENMA en el desarrollo y operación del sistema de pronósticos de MP10 para la Región de la Araucanía, se presenta la actualización de las ecuaciones desarrolladas y ejecutadas por CENMA en el presente año y las nuevas ecuaciones que consideran periodos fijos y nuevas variables.

1.2 Antecedentes

Durante el período Otoño-Invierno, se registran en Temuco episodios de contaminación atmosférica por Material Particulado (MP10) que en algunos días, además de superar la norma, alcanzan niveles de Alerta, Preemergencia y Emergencia con relación al promedio móvil de 24 horas.

Con el objetivo de proteger oportuna y eficientemente la salud de la población del efecto adverso causado en esta por episodios de alta contaminación atmosférica, por iniciativa de CONAMA IX se implementó un sistema de pronóstico de calidad de aire para MP10.

CENMA mediante sistemas estadísticos basados en Análisis de Regresión Múltiple, desarrolló las ecuaciones de pronóstico de Calidad de Aire. Como una de las variables a considerar, elaboró un Índice de Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica constituido por cinco Categorías asociadas a distintas condiciones meteorológicas y de dispersión de contaminantes.

El contar con un sistema de pronóstico de calidad de aire, no obstante el margen de error asociado a todo modelo de pronóstico, ha significado un importante avance para dar aviso y tomar medidas que apunten a proteger de forma eficiente y oportuna la salud de la población. Todo modelo y sistema de pronóstico es susceptible de ser mejorado, y se debe hacer periódicamente un análisis crítico a fin de detectar falencias y proponer soluciones.

Para efectos de prevenir episodios de calidad de aire, un equipo del Centro Nacional del Medioambiente emite dos pronósticos diarios asociados a la calidad del aire para Temuco, incluyendo las perspectivas esperadas en las condiciones de ventilación a partir de las condiciones meteorológicas (PMCA) para los días venideros, a partir del análisis sinóptico y de la meteorología local, con el seguimiento del comportamiento de las distintas variables que interactúan con el MP10, además de estaciones meteorológicas en línea, y toda la información disponible (meteogramas, información de aeropuertos, imágenes satelitales, etc.). Además, se emite el resultado del modelo desarrollado para el pronóstico del máximo valor móvil esperado para el día siguiente, que se desarrolló en octubre de 2006 en el estudio: "Desarrollo y aplicación de un modelo de pronóstico de calidad de aire (MP10) para Temuco y Padre Las Casas".

Además se cuenta con estaciones de monitoreo de MP10 en Temuco (Estación las Encinas) y en Padre Las Casas, que incluyen mediciones meteorológicas. Estas estaciones son administradas por la SEREMI de Salud Araucanía y operadas por el Centro Nacional del Medio Ambiente.

Se instaló una estación meteorológica en el cerro Oyama (a 574 metros sobre el nivel del mar), administrada por CONAMA, utilizada principalmente para estudiar el gradiente térmico vertical, variable a considerar en el perfeccionamiento de las ecuaciones de pronóstico.

A partir de la información entregada, CONAMA IX región decide e instruye recomendaciones a la población para reducir las emisiones, principalmente domiciliarias, para días en que se producirá un potencial empeoramiento de la calidad de aire en la zona.

Los esfuerzos desplegados para atacar el problema de la contaminación atmosférica en Temuco no han sido menores, y han permitido conocer en mayor detalle las condiciones que rigen el comportamiento MP10.

En el siguiente informe se describirá el trabajo realizado para actualizar los coeficientes de las ecuaciones operacionales (a partir de la información recopilada hasta el año 2005 y validada con el año 2006). Se suman los años 2006 y 2007 en el análisis, validándose con el año 2008. Se integró además, la información de la estación meteorológica de Oyama (operativa desde abril de 2007) en la generación de una nueva ecuación de pronóstico (capturando de alguna manera la estabilidad térmica vertical). Además se exploraron nuevas formas de abordar el problema del MP10 a partir del promedio día, buscando una mejor precisión para medir los episodios al apuntar al valor medio esperado para el día siguiente, tomando el promedio de 24 horas a partir de las 6 de la mañana del día siguiente hasta las 06 de la mañana del día sub siguiente.

2 Descripción del comportamiento meteorológico y calidad de aire en Temuco

Durante el período Otoño-Invierno la población de Temuco, se ve afectada por un aumento significativo en los niveles de contaminación del aire por MP10, sobrepasándose en algunos días no solamente la norma diaria, sino también el nivel de alerta, el de preemergencia y en un menor número de casos el de Emergencia. Estos días son conocidos como días de Episodios Críticos.

Los episodios se originan mayoritariamente en los meses fríos (entre Abril y Septiembre), coincidiendo con la presencia de factores meteorológicos que determinan condiciones de mala ventilación, y frecuentemente asociado a un incremento en las emisiones de calefacción domiciliaria (mayor utilización de leña como combustible en cocinas y calefactores domésticos debido a bajas temperaturas). En el resto del año las concentraciones de MP10 son bajas.

Es sabido que en general, la contaminación atmosférica se acentúa con la estabilidad del aire en niveles bajos. Estas condiciones están determinadas por sistemas de mayor escala de movimiento atmosférico, el problema ha sido determinar bajo qué condiciones sinópticas el área de Temuco presenta fuerte estabilidad.

Del análisis de los episodios en Temuco se verifica que un número importante de casos presenta similitudes respecto a las condiciones que, a escala sinóptica, conducen a condiciones de mala ventilación y dispersión de contaminantes en Santiago.

Durante los meses fríos, el clima de la IX región a nivel global, es gobernado principalmente por la zona del frente polar, a escala sinóptica por la sucesión de sistemas frontales y altas presiones en superficie, y por vaguadas, dorsales, además de núcleos fríos en altura.

El paso de altas frías al sector argentino, sincronizadas con la irrupción de una dorsal cálida en altura y el desarrollo de una baja costera es una condición recurrente en la zona central, y que en casos excepcionales se propaga hasta la IX Región. Por otra parte, excepcionalmente se observan condiciones de estancamiento atmosférico cerca de la superficie en condiciones prefrontales asociadas a frentes débiles (frente cálido), caracterizada por el desarrollo de nubosidad media y alta y sequedad en los niveles bajos.

Considerando como referencia la clasificación propuesta por J. Rutllant (1994), se verifica que parte importante de las configuraciones de episodios registradas en Temuco, cumplen con las características de episodios de Tipo A, aún cuando las características topoclimáticas de Temuco difieren de las de la cuenca de Santiago. En adelante llamada Tipo A(t).

Al irrumpir una dorsal cálida en altura, los procesos asociados a la misma, tales como movimientos de descenso de masas de aire, y generación de una inversión de temperatura cercana a la superficie, están presentes.

Además, el paso de altas frías migratorias al sector argentino, genera a niveles bajos circulación del Este, que encauzado por la topografía y reforzado por las brisas de montaña a valle da como resultante en Temuco, principalmente en horas de la noche, componentes del Noreste, Norte e inclusive Noroeste. Debido a que sólo en casos excepcionales la baja costera alcanza la zona de Temuco, y a las diferencias geográficas y climáticas de Temuco con respecto a Santiago, se clasificaron las condiciones asociadas a la irrupción de una dorsal en altura sincronizada con el paso de una alta fría migratoria hacia el Este-Noreste como A(t), y las condiciones prefrontales de empeoramiento de las condiciones de ventilación como BPF(t).

En la práctica se pueden observar configuraciones mixtas del tipo A(t)-BPF(t) en un mismo episodio. Se presentaron casos del Tipo A(t), que se asociaban con la formación de núcleos fríos sobre la Zona Central y determinaron episodios intensos en Temuco. En este caso se usará la nomenclatura A(t)-N(t).

Los datos de superficie que mejor se correlacionan con concentraciones de MP10 en Temuco, son temperatura mínima, presión atmosférica y velocidad media del viento. Esperable debido a que los episodios se asocian típicamente a la incursión de altas frías de origen polar, con vientos superficiales débiles, y cielos despejados con marcada pérdida radiactiva nocturna y una fuerte inversión térmica.

Si bien, en términos generales, los parámetros meteorológicos de rapidez del viento, temperatura y presión muestran una tendencia a correlacionarse con el MP10, en los meses más fríos, estas variables presentan una mayor o menor correspondencia respecto al curso del empeoramiento de la calidad de aire. En efecto, después del paso de un sistema frontal, la irrupción de una alta fría migratoria, la estabilización a niveles bajos y el fin posterior del episodio suele ser gradual, pudiendo el proceso de inicio, duración y término durar varios días, por lo que la presión atmosférica puede presentar una distorsión como variable predictora y no ser capturada por el modelo de regresión.

3 Pronóstico de episodios de contaminación en Temuco

El Centro Nacional del Medio Ambiente ha desarrollado un sistema operacional de pronóstico diario de episodios de contaminación por material particulado para Temuco, que incluye:

- a) La preparación de un pronóstico diario de condiciones meteorológicas asociadas a contaminación atmosférica en Temuco, entregando un índice denominado Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica (PMCA).
- b) El desarrollo de modelos de pronóstico de calidad de aire por material particulado respirable, capaz de pronosticar con 24 horas de anticipación los diferentes niveles de calidad de aire.

3.1 Estimación de ecuaciones de pronóstico de calidad de aire por MP10 en Temuco

La generación de ecuaciones de pronóstico de MP10 entrega una herramienta de ayuda para anticiparse a la ocurrencia de altas concentraciones de material particulado respirable, y así dar aviso oportuno a la población sobre episodios de contaminación. Por otra parte, basada en el pronóstico, la Autoridad Ambiental está en condiciones de tomar medidas de mitigación que reduzcan las emisiones en días de mala ventilación.

El modelo de pronóstico de calidad de aire desarrollado para Temuco, está basado en relaciones estadísticas encontradas mediante regresión lineal múltiple, entre las concentraciones de MP10 esperadas, respecto a variables meteorológicas observadas y pronosticadas, calidad de aire y PMCA pronosticado.

Para esta nueva etapa de mejoramiento de las ecuaciones de pronóstico para MP10 en Temuco se realizaron las siguientes actividades:

- Actualización de los coeficientes de las ecuaciones ya existentes.
- Desarrollo de un modelo de pronóstico de niveles de calidad de aire para MP10, tomando en cuenta las variables de pronóstico de la estación de Oyama.
- Desarrollo de un modelo de pronóstico para un promedio fijo de 24 horas, capturando el valor medio del ciclo diario, considerado el promedio fijo de 6 de la mañana del día siguiente a 6 de la mañana del día sub-siguiente.

3.2 Objetivos del estudio

El propósito de este estudio es mejorar y obtener nuevas ecuaciones de pronóstico para la zona de Temuco, para ser utilizadas operacionalmente en un terreno exploratorio.

Para ello se deben actualizar los actuales coeficientes de las ecuaciones, pretendiendo afinar el acierto en el pronóstico respecto a las ecuaciones generadas el año 2006.

Se deben establecer nuevas relaciones estadísticas, utilizando los datos de la estación de Oyama, debido a su alta representatividad en eventos de contaminación.

Además, se deben generar nuevas ecuaciones enfocadas a pronosticar el promedio diario de concentraciones de MP10, fijando estimaciones más precisas de las concentraciones medias de 24 horas para reflejar de mejor forma la evolución de los valores horarios en el ciclo diario de MP10.

Objetivo general

Mejorar el sistema de pronóstico por MP10 para Temuco actualizando las ecuaciones de pronóstico ya existentes y generando nuevas ecuaciones de pronóstico.

Objetivos específicos

Actualización de los coeficientes de las ecuaciones originales

- Actualizar la base de datos original extendiéndose hasta septiembre de 2008.
- Reajustar los coeficientes de las ecuaciones de pronóstico a 24 horas en la estación de Las Encinas, utilizando las variables originales contenidas en ellas.

Desarrollo de nuevas ecuaciones contemplando las variables de la estación de Oyama

- Incluir las variables de Oyama disponibles dentro de la base de datos original.
- Reducir el número de variables a ingresar en la nueva regresión.
- Obtener un modelo de pronóstico con las mejores variables encontradas.

Desarrollo de ecuaciones para promedios del día

- Crear una nueva base de datos contemplando promedios de 24 horas de 6 de la mañana del día siguiente hasta las de la mañana del día sub-siguiente.
- Identificar las relaciones existentes entre el promedio de 24 horas y las diversas variables de la base de datos original.
- Elegir variables que muestren una alta relación respecto al promedio día y tomar otras de relevancia en base a la experiencia empírica del pronóstico operacional, para ser extraídas de un modelo de pronóstico dinámico como variables de entrada en la generación del nuevo modelo de regresión del promedio de 24 horas.

3.3 Información disponible

La información utilizada en el mejoramiento de las ecuaciones de pronóstico para MP10 en Temuco son las siguientes:

- Índices diarios de PMCA, generados por CENMA para el período de interés del pronóstico de MP10, que comprende los meses de otoño-invierno de los años 2003 al 2008.
- Información meteorológica de altura para la zona sur de Chile, correspondiente al radiosondeo realizado en Puerto Montt actualizada al 2008.
- Información meteorológica de superficie y de calidad de aire de la estación Las Encinas.
- Información de modelos numéricos del tiempo.

3.3.1 Bases de datos utilizados

Las Bases de datos utilizados integra los años 2003 al 2008, período 01 abril a 30 de septiembre de cada año, y corresponden a las variables de:

Mediciones meteorológicas de altura

Variables obtenidas del radiosondeo de Puerto Montt (perfil de las 12 UTC de cada día, aproximadamente 08 h local):

- Variables de niveles mandatorios (1000, 925, 850, 700 y 500) hPa: altura, temperatura, depresión del punto de rocío, viento (dirección y rapidez).
- Inversión térmica de subsidencia, base y tope (altura, presión y temperatura).
- Índices de estabilidad.

Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica para MP10

- Categorías determinadas por CENMA, condición relevante para cada día.

Mediciones de estaciones meteorológicas

- Valores horarios en la estación de Las Encinas (aprox. 50msnm): temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad del viento.
- Valores horarios en la estación de Oyama (aprox. 600msnm): temperatura, presión, dirección y velocidad del viento.

Mediciones de calidad de aire MP10 (Estación Las Encinas)

- Concentraciones horarias de calidad de aire para MP10.

VARIABLES pronosticadas por el modelo regional ETA para variables meteorológicas de superficie

- Temperatura, presión atmosférica, humedad relativa y velocidad del viento pronosticadas con 24 y 48 horas de anticipación.

4 Ecuaciones de pronóstico para concentraciones de MP10 desarrolladas mediante regresión lineal múltiple

4.1 Metodología Utilizada

El proceso de Regresión Lineal Múltiple es un método estadístico que establece una relación matemática entre una variable de interés (promedios de MP10) y un conjunto de variable explicativas (promedios móviles a distintas escalas temporales, valores meteorológicas observadas y pronosticados, PMCA observado y pronosticado).

Las ecuaciones obtenidas son del tipo:

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

Donde Y_{ss} es el valor estimado de concentraciones para la estación ss , B_0 , B_1 , B_2 , son las constantes estimadas en la regresión para X_1 , X_2 , X_3 , variables explicativas seleccionadas en el método de regresión.

Existen varios tipos de selección de variable dentro de la regresión múltiple, pero en este trabajo se utiliza la regla de "stepwise o pasos sucesivos" para las ecuaciones nuevas, ya que ha resultado efectivo en este tipo de modelación. El proceso de "pasos sucesivos" consiste en que al incorporar una nueva variable en un paso, se puede eliminar otra variable seleccionada antes, si esta ha perdido significancia respecto a la nueva variable ingresada, y al conjunto de variables de la regresión elegidas hasta ese momento.

Para el ajuste de nuevos coeficientes en las ecuaciones originales se usa el método "introducir" que permite incorporar a la regresión lineal múltiple, variables predeterminadas sin que se elimine ninguna en la ecuación resultante.

4.2 Resultados del ajustes de ecuaciones de regresión múltiple

En esta sección se muestran los procedimientos y resultados realizados en los reajustes de los coeficientes de las ecuaciones originales y en las nuevas ecuaciones incluyendo la estación de Oyama y las de promedio de 24 horas fijadas de 6 a 6 de la mañana.

4.2.1 Resultados ecuaciones de pronóstico MP10 máximo móvil 24h para la estación de Las Encinas 2008

Se reajustaron las ecuaciones operativas de Las Encinas para el pronóstico del día siguiente, considerando en esta actualización una extensión del período abril a septiembre 2003 a 2005 con los años 2006 y 2007, poniendo al día los coeficientes de cada variable capturadas por los modelos originales. Las ecuaciones obtenidas se validan con el período abril a septiembre del año 2008. A continuación se presentan los resultados de las ecuaciones modificadas con y sin incluir el radiosondeo.

Ecuación predictiva para el día siguiente con sonda:

En esta ecuación se realiza un ajuste a los valores extremos, utilizando el denominado "error criterio" que corresponde a diferencia media absoluta entre el valor observado y pronosticado de MP10, para aquellos días en que la temperatura mínima pronosticada para el día siguiente sea menor que 4°C y PMCA esperado esté en una categoría alta; en estos casos al valor entregado por el Modelo se le adiciona el error "criterio" de 44 µg/m³.

$$\text{MPLE24D1} = 8,810 + 23,729 * \text{IMD1} - 3,641 * \text{TMND0LE} + 0,146 * \text{MPLE0606D0} + 0,964 * \text{Showalter} - 0,683 * \text{DECLIN} - 0,139 * \text{DDP8508L} + 0,115 * \text{MPLE1200DA} + 0,054 * \text{DH8508L}$$

ERROR CRITERIO: A los valores extremos (altos) se les suma 44 µg/m³.

MPLE24D1	Valor Máximo Móvil de 24 horas MP10 para mañana en la estación Las Encinas.
IMD1	PMCA pronosticado para mañana
TMND0LE	Temperatura Mínima del día de hoy en estación Las Encinas
MPLE0606D0	Valor Móvil de 06 horas MP10 a las 05 hora de mañana en la estación de Las Encinas
Showalter	Índice de estabilidad atmosférica a obtenido a partir del Radiosondeo de Puerto Montt
DECLIN	Declinación solar
DDP8508L	Diferencia de la depresión del punto de rocío entre el día actual y día anterior en el nivel de 850 hpa en el sonda de Puerto Montt
MPLE1200DA	Valor Móvil de 12 horas MP10 a las 23 horas del día anterior en la estación de Las Encinas
DH8508L	Diferencia de altura el día actual y día anterior en el nivel de 850 hpa en el sonda de Puerto Montt

Resultados de la ecuación ajustada MPPL24D1 para Las Encinas, que incluye el radiosondeo.

MP24LED1_cs	Observado				Total	% Acierto
Pronosticado	0	1	2	3		
0	102	8	8	0	118	86.4
1	1	2	3	0	6	33
2	1	2	4	2	9	44
3	0	0	0	0	0	-----
Total	104	12	15	2	133	
% Acierto	98.1	16.7	26.7	0.0		
Número aciertos	108					
% Acierto total	81.2					
ENA	55.2					
FA	13.3					

Tabla de Contingencia que sigue contiene los aciertos de los Modelos con sonda en Temuco considerando No Episodios ($200 \geq ICAP > 0$) y Episodios ($ICAP > 200$).

MP24LED1_cs	Observado		Total	% Acierto
Pronosticado	no episodio	episodio		
no episodio	85	11	96	88.5
episodio	6	31	37	84
Total	91	42	133	
% Acierto	93.4	73.8		
Número aciertos	116			
% Acierto total	87.2			
ENA	26.2			
FA	16.2			

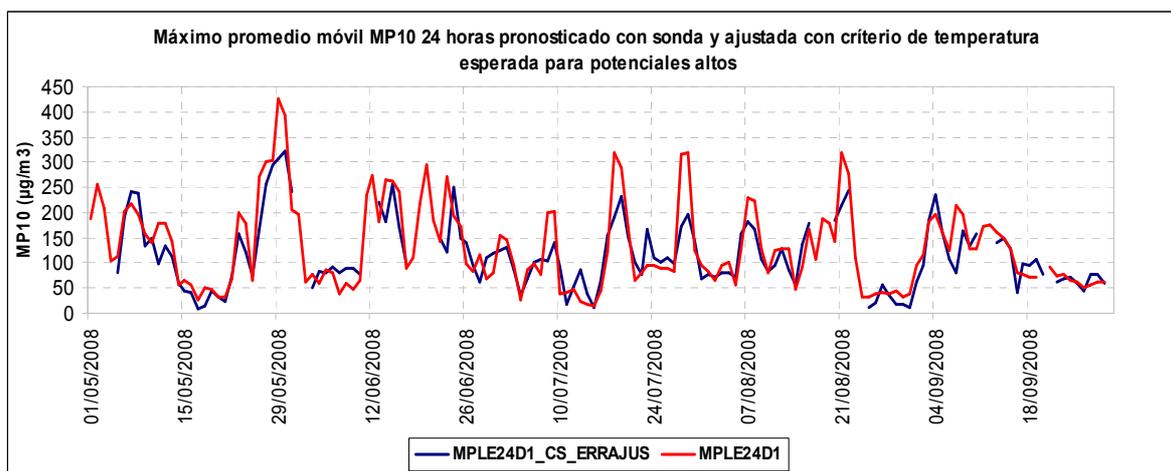


Figura 4.2.1-1 Verificación pronóstico MP10 máximo 24 h móvil día siguiente con sondeo, Las Encinas 2008.

A continuación se presentan los gráficos de dispersión y tabla con el porcentaje de acierto de la ecuación reajustada con sonda y la ecuación original, validadas con el año 2008.

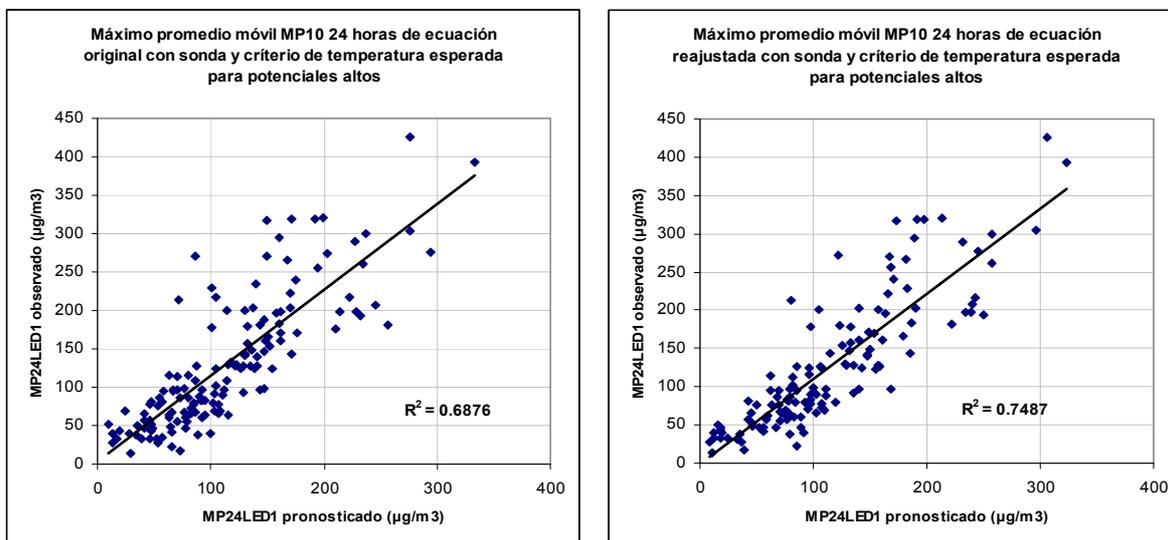


Figura 4.2.1-2 Dispersión MP24LED1 observado y pronosticado con sondeo para Las Encinas, ecuación Original y Ajuste 2008.

Tabla resumen de porcentaje de acierto para ecuación original y reajustada con sonda, que muestra el acierto por categorías, acierto total de los modelos, episodios no alertados (ENA) y falsas alarmas (FA).

(%)	CS_ORIGINAL	CS_REAJUSTADA
Bueno a Regular	97	98
Alerta	20	17
Pre-emergencia	13	27
Emergencia	50	0
Acuerdo Total	80	81
ENA	58	55
FA	18	13

Ecuación de pronóstico para el día siguiente sin sonda:

Ajuste consta de dos ecuaciones

Ecuación predictiva para el día siguiente (A) + Nueva ecuación ajustada para los valores extremos altos (B).

El funcionamiento de estas ecuaciones esta sujeto al pronóstico del PMCA para el día siguiente:

Con PMCA 1, PMCA 2 o PMCA 3, se utiliza la ecuación A.

Con PMCA 4 o PMCA 5, se utiliza la ecuación B.

$$(A) \text{MPLE24D1} = -5,684 + 23,127 * \text{IMD1} + 0,157 * \text{MPLE0806D0} - 3,927 * \text{TMND0LE} + 9,044 * \text{IMD0} + 2,459 * \text{TMND0LEDA} + 0,150 * \text{MPLE0612DA}$$

MPLE24D1	Valor Máximo Móvil de 24 horas MP10 para mañana en la estación Las Encinas
IMD1	PMCA pronosticado para mañana
MPLE0806D0	Valor Móvil de 8 horas MP-10 a la 5 hora local en la estación de Las Encinas del día actual.
TMND0LE	Temperatura Mínima del día de hoy en estación Las Encinas
IMD0	PMCA pronosticado para hoy
TMND0LEDA	Temperatura Mínima del día de ayer en estación Las Encinas
MPLE0612DA	Valor Móvil de 6 horas MP-10 a las 12 horas local en la estación de Las Encinas del día de ayer.

$$(B) \text{MPLE24D1} = 97,180 - 10,445 * \text{TMND0LE} - 3,924 * \text{DECLIN} + 0,112 * \text{MPLE0806DA} + 4,591 * \text{TMND0LEDA}$$

TMND0LE	Temperatura Mínima del día de hoy en estación Las Encinas.
DECLIN	Declinación solar del día actual.
MPLE0806DA	Valor Móvil de 8 horas MP-10 a la 5 hora local en la estación de Las Encinas del día de ayer.
TMND0LEDA	Temperatura Mínima del día de ayer en estación Las Encinas

Resultados de la ecuación ajustada MPPL24D1 para Las Encinas, sin incluir el radiosondeo.

MP24LED1_ss	Observado					Total	% Acierto
	Bueno a Regular	Alerta	Pre-emergencia	Emergencia			
Pronosticado							
Bueno a Regular	109	13	10	0	132	82.6	
Alerta	3	2	6	0	11	18.2	
Pre-emergencia	0	1	0	2	3	0	
Emergencia	0	0	0	0	0	-----	
Total	112	16	16	2	146		
% Acierto	97.3	12.5	0	0			
Número aciertos	111						
% Acierto total	76.0						

Tabla de Contingencia que sigue contiene los aciertos de los Modelos sin sonda en Temuco considerando No Episodios ($200 \geq \text{ICAP} > 0$) y Episodios ($\text{ICAP} > 200$).

MP24LED1_ss	Observado		Total	% Acierto
Pronosticado	no episodio	episodio		
no episodio	88	10	98	89.8
episodio	6	42	48	87.5
Total	94	52	146	
% Acierto	93.6	80.8		
Número aciertos	130			
% Acierto total	89.0			
ENA	19.2			
FA	12.5			

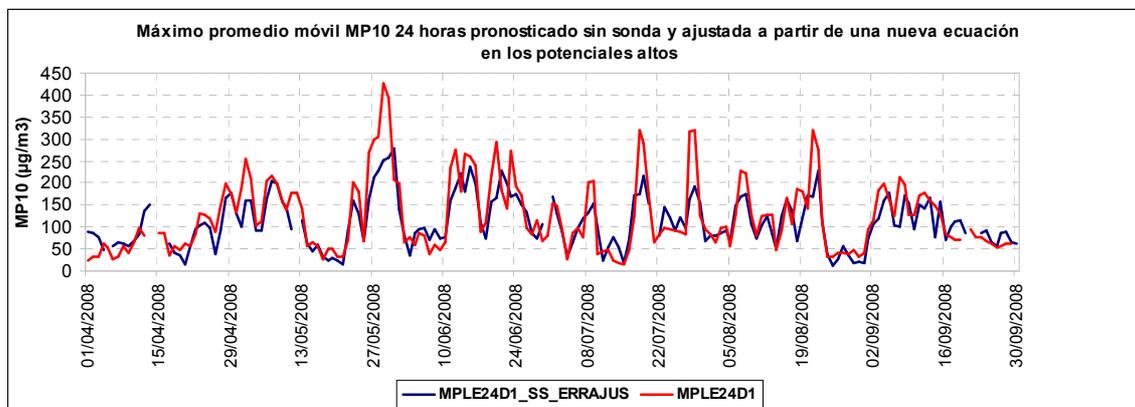


Figura 4.2.1-3 Verificación pronóstico MP10 máximo 24 h móvil día siguiente sin sondeo, Las Encinas 2008.

A continuación se presentan los gráficos de dispersión y tabla con el porcentaje de acierto de la ecuación reajustada sin sonda y la ecuación original, validadas con el año 2008.

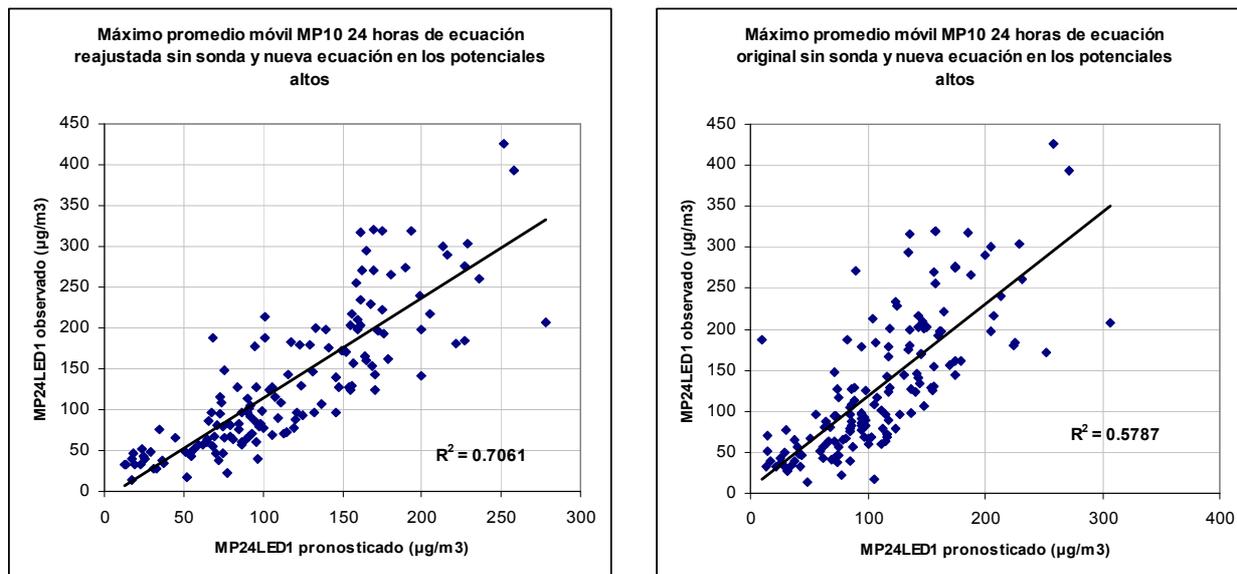


Figura 4.2.1-4 Dispersión MPLE24D1 observado y pronosticado sin sondeo para Las Encinas, ecuación Original y Ajuste 2008.

Tabla resumen de porcentaje de acierto para ecuación original y reajustada, que muestra el acierto por categorías sin sonda, acierto total de los modelos, episodios no alertados (ENA) y falsas alarmas (FA).

(%)	SS_ORIGINAL	SS_REAJUSTADA
Bueno a Regular	97	97
Alerta	13	13
Pre-emergencia	0	0
Emergencia	0	0
Acierto Total	77	76
ENA	71	68
FA	23	21

4.2.2 Resultados ecuaciones de pronóstico MP10 máximo móvil 24h para la estación de Las Encinas incluyendo la temperatura de la estación Oyama.

Para la generación de una nueva ecuación de pronóstico, se incorpora la estación de Oyama ubicada a mayor altura que la estación de Las Encinas, pudiendo perfilar la inversión térmica de subsidencia a niveles bajos, e inferir de cierta forma, la intensidad de la estabilidad atmosférica en el sector de Temuco, la que se refleja en un aumento de contaminantes cerca de la superficie.

En la base de datos original, se anexaron las variables disponibles en la estación de Oyama, específicamente la temperatura. Luego, debido a la gran cantidad de variables de pronóstico disponibles, fue necesario realizar una inspección previa y elegir sólo aquellas variables que mostraran una mejor afinidad con el valor a pronosticar, y que no presentaran problemas de "colinealidad" entre sí, es decir, un alto grado de asociación entre ellas.

Para esto se utilizó el método del análisis de componentes principales, realizando los siguientes pasos:

- Análisis de componentes principales entre el máximo promedio móvil de 24 horas del MP10 esperado para el día siguiente (MPLE24D1) y las variables del radiosondeo de Puerto Montt, considerando las tres primeras componentes, ya que explican de mejor forma el comportamiento de las variables en grupos (autovalores). Se extrajeron las variables del sonda con autovalores mayores a +/- 0.65.
- Análisis de componentes principales entre MPLE24D1 y variables de emisiones de MP10 a distintas horas del día y a distintas escalas temporales, tomando en cuenta las dos primeras componentes por manifestar un buen vínculo entre variables. De las componentes resultantes se eligieron aquellas que presentaron autovalores mayores a +/- 0.70.
- Análisis de componentes principales entre MPLE24D1 y variables meteorológicas locales, PMCA y declinación de la posición solar (DECLIN). Del análisis resultante, las dos primeras componentes revelan gran parte de la versatilidad del comportamiento grupal de las variables. De estas componentes se eligieron aquellas que presentaron valores mayores a +/-0.60.

La ecuación que finalmente se obtuvo es la siguiente:

$$\text{MPLE24D1} = 9.527 + 0.377 * \text{MP24LE06L} + 19.238 * \text{IMD1} - 6.580 * \text{TMND1LE} + 7.043 * \text{TMinOYD0} - 1.687 * \text{DECLIN} - 4.011 * \text{TMND0LE}$$

MPLE24D1	Valor Máximo Móvil de 24 horas MP10 para mañana en la estación Las Encinas
MP24LE06L	Valor Máximo Móvil de 24 horas MP10 obtenido a las 6 de la mañana en la estación de las Encinas
IMD1	Potencial meteorológico esperado para el día siguiente.
TMND1LE	Temperatura mínima pronosticada para el día siguiente en Temuco
TMinOYD0	Temperatura mínima observada en la estación de Oyama
DECLIN	Declinación solar
TMND0LE	Temperatura mínima observada en la estación de las Encinas

Resultados de la ecuación ajustada MPLE24D1 para Las Encinas Incluyendo variable de Oyama.

MP24LED1	Observado					
Pronosticado	Bueno a Regular	Alerta	Pre-emergencia	Emergencia	Total	% Acierto
Bueno a Regular	110	11	6	0	127	86.6
Alerta	2	3	6	0	11	27
Pre-emergencia	2	1	1	2	6	17
Emergencia	0	0	0	0	0	----
Total	114	15	13	2	144	
% Acierto	96.5	20.0	7.7	0.0		
Número aciertos	114					
% Acierto total	79.2					
ENA	56.7					
FA	23.5					

Tabla de Contingencia que sigue contiene los aciertos del Modelo que incluye la estación de Oyama en Temuco considerando No Episodios ($200 \geq \text{ICAP} > 0$) y Episodios ($\text{ICAP} > 200$).

MP24LED1	Observado			
Pronosticado	no episodio	episodio	Total	% Acierto
no episodio	88	11	99	88.9
episodio	7	38	45	84
Total	95	49	144	
% Acierto	92.6	77.6		
Número aciertos	126			
% Acierto total	87.5			
ENA	22.4			
FA	15.6			

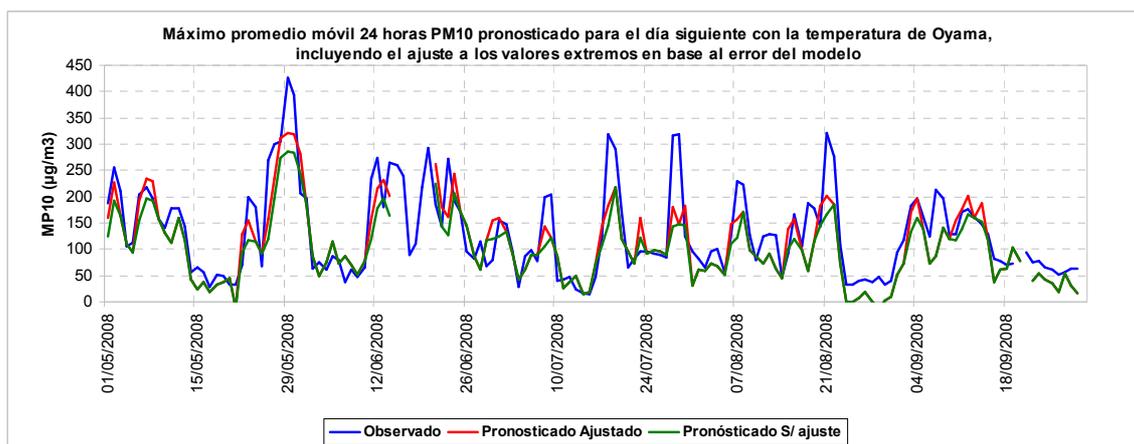


Figura 4.2.2-1 Verificación pronóstico MP10 máximo 24 h móvil día siguiente incluyendo variables obtenidas de la estación Oyama

El modelo obtenido tiene una correlación de ajuste lineal del orden de 0.69, que al incluir el error estándar del modelo de regresión ($37 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en días con potencial meteorológico esperado alto, alcanza una leve mejora ($r^2=0.7$).

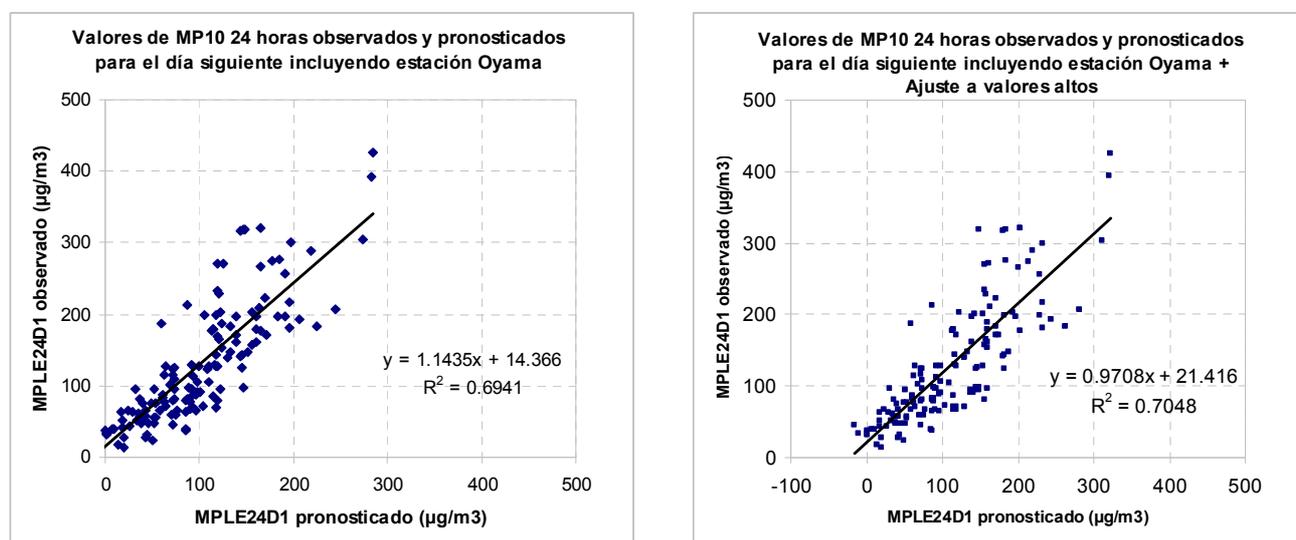


Figura 4.2.2-2 Dispersión MPLE24D1 observado y pronosticado con la estación de Oyama durante el año 2008, con y sin ajuste a los valores extremos altos

Tabla resumen de porcentaje de acierto para ecuación que incluye Oyama con y sin el ajuste a los valores extremos altos. Muestra el acierto por categorías, acierto total de los modelos, episodios no alertados (ENA) y falsas alarmas (FA).

(%)	Oyama	Oyama Ajustada
Bueno a Regular	97	96
Alerta	7	20
Pre-emergencia	8	8
Emergencia	0	0
Acierto Total	78	79
ENA	77	57
FA	30	24

4.2.3 Resultados de las nuevas ecuaciones de pronóstico para el promedio diario.

La idea de crear ecuaciones de promedio fijo de 24 horas, obedece al propósito de evitar la inercia del promedio móvil de 24 horas. Esta inercia determina un desfase al inicio y término de los episodios ocultando el real período de empeoramiento relacionado con los valores horarios de MP10. El máximo típicamente aparece al día siguiente, cuando el episodio ha terminado.

Para ejemplificar de mejor manera lo mencionado en el párrafo anterior, se analiza el episodio del día 9 y 10 de junio (Figura 4.2.3-1).

Si nos concentramos en los promedios móviles (línea rosada), se aprecia que el evento dura gran parte del día 9 (a partir de la madrugada) y mañana del día 10, con concentraciones de MP10 que alcanzan el nivel de episodios. Sin embargo, las verdaderas horas de empeoramiento en cuanto a las concentraciones son las manifestadas por los valores horarios (línea azul marino), las cuales se presentan primero en la noche del día 8 y madrugada del día 9, y después en la noche del día 9.

El desfase asociado al promedio móvil determina que no queden reflejados: el empeoramiento en la noche día 8, la transitoria mejoría durante la mañana y tarde del día 9, y tampoco el evidente mejoramiento registrado el día 10. De hecho la inercia de este indicador hace que el valor máximo del periodo se registre en la madrugada del día 10, quedando como día de episodio un día de evidentes buenas condiciones de calidad de aire. Si en lugar del promedio móvil de 24 horas se toma en cuenta el promedio fijo de 24 horas como la media observada entre 6 y 6 de la mañana (puntos azules), queda mejor representada la hora en que se desarrollan los episodios, considerando los pics diurno y nocturno, traducidos en un solo valor día.

Se evitan así el problema de arrastre por inercia y de doble conteo generado por el promedio móvil de 24 horas. Además, el promedio de 6 a 6 de la mañana tiene la particularidad de anticiparse en un mayor número de horas al período que se quiere pronosticar. En el sistema de pronóstico actual el esquema de proyección considera que durante el día actual (D0), se prevea el máximo valor del promedio móvil de 24 horas entre las 0 y las 23 horas del día siguiente (D1), promedio móvil que en sí, integra valores tanto del día D0 como del día D1. A diferencia de esto, el nuevo sistema formulado, propone que durante el día D0 se pronostique un solo valor para el día sub-siguiente (D2), que considere el valor promedio desde las 6 del día D1 a las 6 del día D2, como indicador.

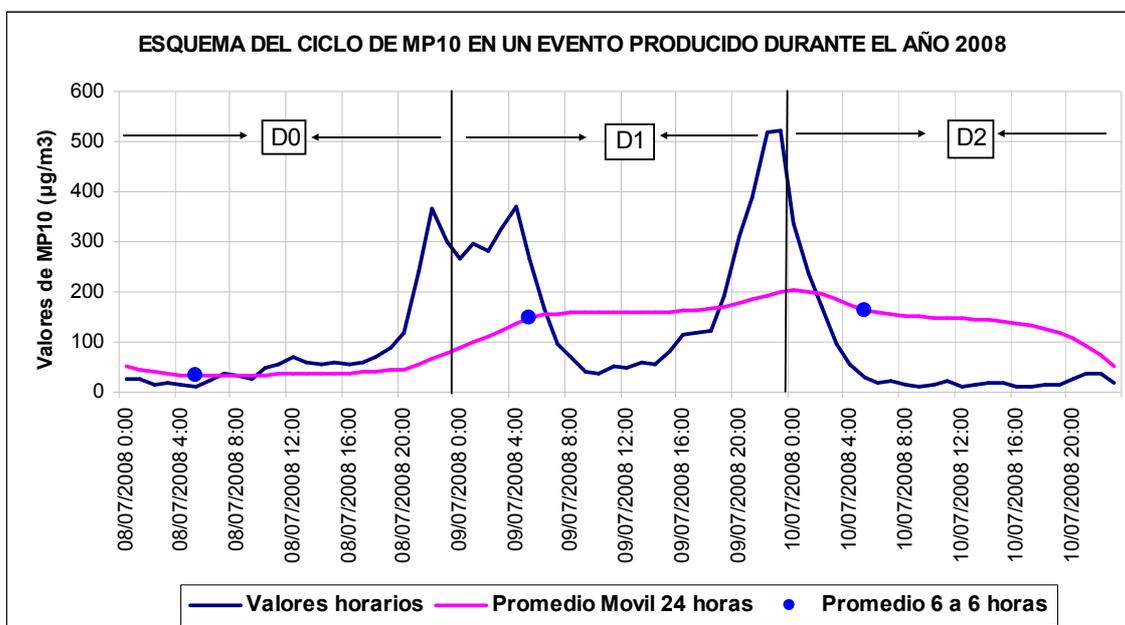


Figura 4.2.3-1 Comportamiento del MP10 durante uno de los episodio crítico ocurridos en el 2008.

Un problema a resolver es que al elaborar el pronóstico del valor medio del día fijado a la 6 de la mañana del día sub-siguiente (D2), es que las variables diagnósticas del día presente (D0) no tienen en general relación alguna con el promedio de MP10 entre las 6 del día siguiente (D1) y 6 del día sub-siguiente (D2).

Debido a esto, las variables de entrada a la ecuación de regresión utilizadas corresponden a variables de superficie pronosticadas con 24 y 48 horas de anticipación, disponibles del modelo regional ETA (punto de grilla coordenadas de Temuco (72.63W y 38.75 S a 63 m s.n.m.)) correspondiente a la temperatura, presión al nivel medio del mar, velocidad del viento, componentes zonal y meridional del viento. Otra variable integrada en la base de datos nueva, es el gradiente vertical máximo de temperatura pronosticado para el día siguiente, ya que es una variable que representa de muy buena forma las variaciones del MP10 en términos de la estabilidad atmosférica. Para ello, se toma en cuenta la temperatura mínima pronosticada por el modelo ETA, además de la temperatura mínima de Oyama pronosticada para el día siguiente.

Finalmente, la última variable predictora integrada en el nuevo modelo de MP10, es el PMCA pronosticado a 24 y 48 horas. Se debe tener en cuenta, que las ecuaciones generadas tienen el ajuste a los valores extremos altos sobre la base del error del modelo y ya que todas las variables ingresadas en el ajuste son variables a pronosticar, estas eventualmente asociarían nuevas incertezas asociadas al pronóstico.

Primer ajuste resultante para MP6D1-6D2:

$$MP6D1-6D2 = -10.5 + 43.1 * IMD2 - 2.3 * MINTPD1 - 1.8 * MWSPD1 + 7.1 * IMD1 - 0.99 * MWSPD2$$

Donde:

MP6D1-6D2	Promedio de 24 horas MP-10 entre 6 hora local del día de mañana y 5 hora local del día sub-siguiente en la estación de Las Encinas.
IMD2	PMCA pronosticado para el día sub-siguiente.
MINTPD1	Temperatura Mínima del día de mañana pronosticada por el modelo ETA.
MWSPD1	Velocidad del viento Mínima del día mañana pronosticada por el modelo ETA.
IMD1	PMCA pronosticado para mañana.
MWSPD2	Velocidad del viento Mínima del día sub-siguiente pronosticada por el modelo ETA.

Resultados de la primera ecuación ajustada para Las Encinas.

MP246D1-6D2+E	Observado					
P6D1-6D2 (1er)	Bueno a Regular	Alerta	Pre-emergencia	Emergencia	Total	% Acierto
Bueno a Regular	104	1	2	0	107	97.2
Alerta	5	3	5	0	13	23
Pre-emergencia	0	0	2	1	3	67
Emergencia	0	0	0	0	0	-----
Total	109	4	9	1	123	
% Acierto	95.4	75.0	22.2	0.0		
Número aciertos	109					
% Acierto total	88.6					

Tabla de Contingencia que sigue contiene los aciertos del primer ajuste promedio fijo de 6 a 6 horas en Temuco considerando No Episodios ($200 \geq ICAP > 0$) y Episodios ($ICAP > 200$).

MP246D1-6D2	Observado		Total	% Acierto
P6D1-6D2 (1er)	no episodio	episodio		
no episodio	89	3	92	96.7
episodio	5	26	31	84
Total	94	29	123	
% Acierto	94.7	89.7		
Número aciertos	115			
% Acierto total	93.5			

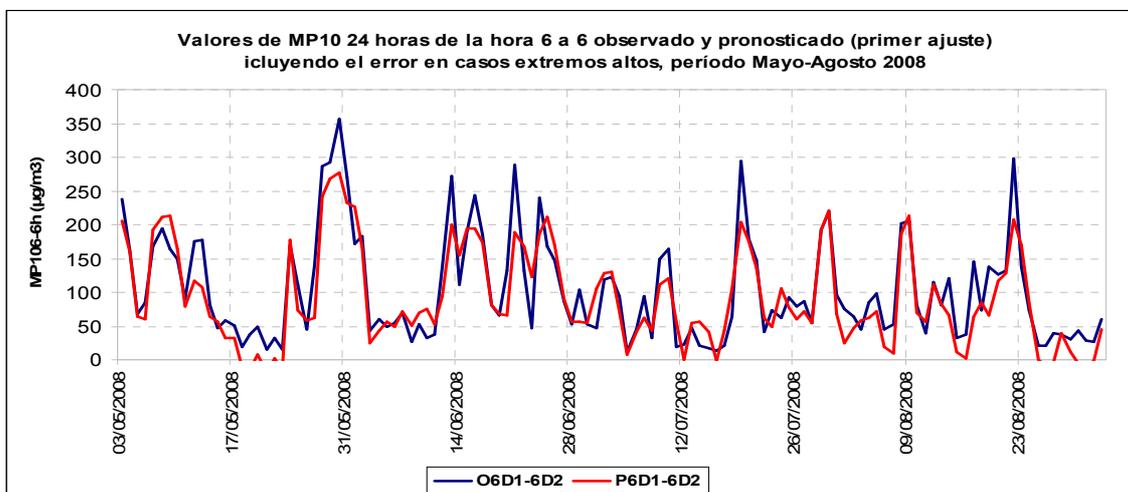


Figura 4.2.3-2 Verificación del primer ajuste del pronóstico del valor medio entre las 6 de la mañana del día siguiente y las 6 de la mañana del día sub-siguiente.

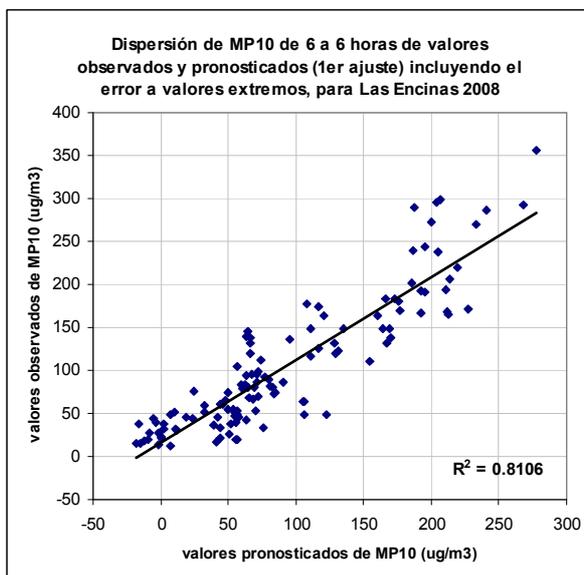


Figura 4.2.3-3 Ajuste lineal entre el valor observado y el primer ajuste pronosticado del promedio día de MP10.

Segundo ajuste resultante para MP6D1-6D2:

$$\text{MP6D1-6D2} = -14.1 + 44.6 * \text{IMD2} - 2.5 * \text{MINTPD1} - 2.0 * \text{MWSPD1} + 6.5 * \text{IMD1}$$

MP6D1-6D2	Promedio de 24 horas MP-10 entre 6 hora local del día de mañana y 5 hora local del día sub-siguiente en la estación de Las Encinas.
IMD2	PMCA pronosticado para el día sub-siguiente.
MINTPD1	Temperatura Mínima del día de mañana pronosticada por el modelo ETA.
MWSPD1	Velocidad del viento Mínima del día mañana pronosticada por el modelo ETA.
IMD1	PMCA pronosticado para mañana.

Resultados de la segunda ecuación ajustada para Las Encinas.

MP246D1-6D2	Observado					Total	% Acierto
	Bueno a Regular	Alerta	Pre-emergencia	Emergencia			
P6D1-6D2 (2do)							
Bueno a Regular	104	1	2	0	107	97.2	
Alerta	5	3	6	0	14	21	
Pre-emergencia	0	0	1	1	2	50	
Emergencia	0	0	0	0	0	----	
Total	109	4	9	1	123		
% Acierto	95.4	75.0	11.1	0.0			
Número aciertos	108						
% Acierto total	87.8						

Tabla de Contingencia que sigue contiene los aciertos del segundo ajuste promedio fijo de 6 a 6 horas en Temuco considerando No Episodios ($200 \geq \text{ICAP} > 0$) y Episodios ($\text{ICAP} > 200$).

MP246D1-6D2	Observado			
P6D1-6D2 (2do)	no episodio	episodio	Total	% Acierto
no episodio	89	3	92	96.7
episodio	5	26	31	84
Total	94	29	123	
% Acierto	94.7	89.7		
Número aciertos	115			
% Acierto total	93.5			

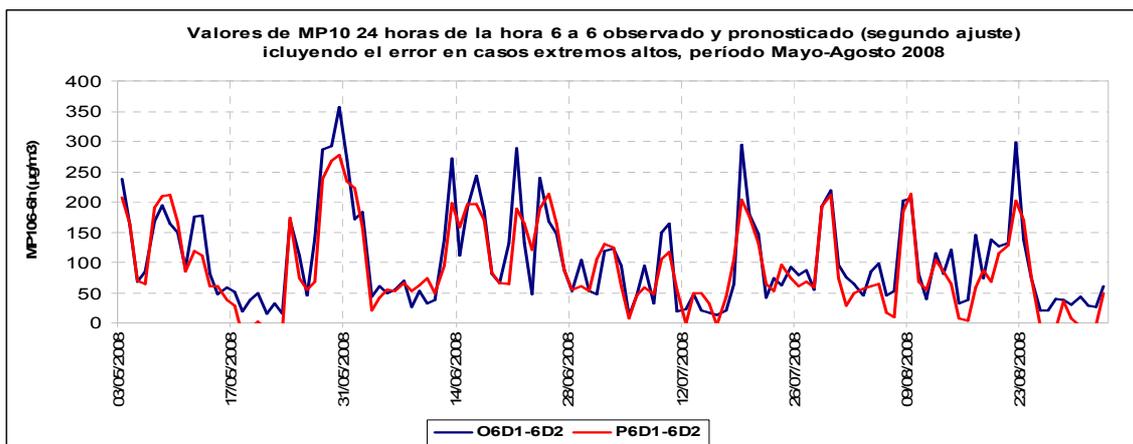


Figura 4.2.3-4 Verificación del segundo ajuste del pronóstico del valor medio entre las 6 de la mañana del día siguiente y las 6 de la mañana del día sub-siguiente.

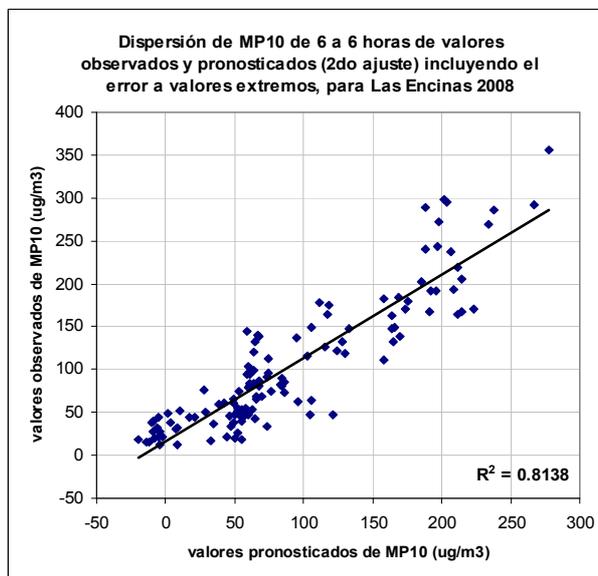


Figura 4.2.3-5 Ajuste lineal entre el valor observado y el segundo ajuste pronosticado del promedio día de MP10.

5 Conclusiones y Recomendaciones

Los resultados, conclusiones y recomendaciones más relevantes en esta etapa del estudio relacionada con el desarrollo de un modelo de pronóstico de calidad de aire para Temuco son:

- Se actualizaron los coeficientes de las ecuaciones de pronóstico de Las Encinas, observándose un mejor acierto general en la ecuación actualizada que en la ecuación original. Sin embargo, en cuanto al acierto de los episodios críticos la ecuación ajustada muestra una menor eficiencia en la captura de eventos de alta contaminación, si bien aumenta el acierto en Preemergencia, disminuye en Alerta, y no presenta aciertos en Emergencia. Para la ecuación sin variables del radiosondeo, el coeficiente actualizado presentó un acierto por categoría igual que el observado en la ecuación original, aunque con un leve descenso en el número de falsas alarmas y episodios no alertados.
- Se consideró la temperatura en la estación de Oyama ya que presenta una buena asociación con las variaciones del MP10 en la estación de Las Encinas. La ecuación obtenida selecciona variables relacionadas con las emisiones de MP10 al comienzo del periodo diurno (MP24LE06L), la variable astronómica DECLIN que en cierta forma representa la variación estacional, y el aspecto meteorológico previsto para el día siguiente con el PMCA y la temperatura mínima esperada. Finalmente, con la temperatura mínima al nivel de altura de Oyama, y la temperatura mínima superficial, pero con signos inversos, se establece el gradiente térmico coincidente con la máxima estabilidad atmosférica a niveles bajos, que producen el empeoramiento de las condiciones de ventilación. Aunque la ecuación de Oyama considera factores altamente relacionados con los procesos físicos involucrados en el MP10, la ecuación original con sonda para Las Encinas presenta un mejor acierto. Esto puede deberse a que la información utilizada en la generación de la ecuación, presenta una baja representatividad (tan solo dos años de medición, año 2007 para la creación y 2008 para la validación).
- Las ecuaciones para promedios del día presentan una mejor correlación que las realizadas para valores de máximo promedio móvil de 24 horas, con una correlación $R^2=0.81$ para ambos ajustes de 6 a 6 horas. En cuanto a los aciertos también se aprecia una mejoría respecto a las ecuaciones originales específicamente en el acierto de las categorías Alertas, Preemergencias y acierto total. El nuevo diseño del periodo de pronóstico del promedio de 6 a 6 de la mañana, no es absolutamente comparable al sistema de pronóstico de promedio móvil de 24 horas, ya que este último, debido a su inercia, en muchas ocasiones aumenta el número de episodios constatados.
- Una observación al modelo de pronóstico del promedio diario, es que se debe considerar que el periodo de pronóstico se aleja del día presente, o momento de

emisión del pronóstico. Esto obliga a que todas las variables incluidas en esta modelación correspondan a datos pronosticados obtenidos de modelos dinámicos de pronóstico. Se agrega de esta manera un grado de incerteza en las variables incluidas, el que podría amplificar el error propio del modelo. Así, el buen resultado de estos ajustes, dependerán, no solamente de una buena determinación del PMCA, sino que además de un buen acierto de los modelos dinámicos (en este caso de la calidad de los resultados arrojados por el modelo de pronóstico ETA).

Las recomendaciones específicas son las siguientes:

- Al no encontrarse mejorías sustanciales al acierto del pronóstico de MP10 ajustando coeficientes actualizados para las ecuaciones en uso operacional, se recomienda mantener los ajustes originales diseñados para la estación de Las Encinas, tanto en la ecuación que incluye variables del radiosondeo como en aquella que no las considera.
- Se recomienda utilizar operacionalmente la ecuación que incluye la temperatura de Oyama ya que representa bien el comportamiento de MP10 en Temuco. Eventualmente podría mejorar aún más, con un nuevo ajuste de los coeficientes, al incorporar en el análisis un mayor número de registros con más años de medición en Oyama.
- Se recomienda utilizar operacionalmente las ecuaciones de promedio diario, no sólo por su mayor grado de acierto, sino también porque no presenta los problemas asociados a la inercia del promedio móvil.
- Se recomienda cambiar el criterio de evaluación para las nuevas ecuaciones de promedio diario, ya que en muchas ocasiones los valores de este nuevo ajuste no son comparables con los máximos valores de promedios móviles de 24 horas alcanzados. El nuevo criterio de evaluación propuesto consiste en considerar el valor del promedio de MP10 en 24 horas, que se registra a las 06 de la mañana del día 2. Es decir se trata del valor constatado a una hora fija diferenciándose del método actual que considera el valor máximo de un promedio móvil de 24 horas, constatado entre las 00 y 23 horas. Como se mencionó en un párrafo anterior, este nuevo criterio disminuye significativamente por una parte el desfase entre los máximos horarios y el promedio móvil de 24 horas, y por otra elimina el "doble conteo" de días con episodios lo que aumentaba artificialmente el número de episodios constatados.
- Se recomienda mantener en funcionamiento la estación de Oyama, no tan solo por que se utiliza como una herramienta de modelación, sino que por si sola, es un buen indicador de la estabilidad térmica vertical, elemento relevante en la elaboración del PMCA.
- Se recomienda continuar explorando modelos dinámicos (ETA, MM5, etc.) para identificar nuevas variables de pronóstico que permitan un ajuste de regresión de mayor

calidad, entre ellas variables a niveles superiores de la atmósfera (no disponibles en este estudio).