



CENTRO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

INFORME FINAL
"IMPLEMENTACIÓN Y OPERACIÓN DIARIA DE MODELO
DE PRONÓSTICO DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA
POR MP10 Y MP2.5 EN TEMUCO 2013"

LICITACIÓN N° 608897-12-LE13

UMGCA-015-LMPCA-010-2013

VOLUMEN 1
EVALUACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE
PRONÓSTICO UTILIZADAS

PREPARADO PARA

SECRETARIA REGIONAL MINISTERIAL DEL MEDIO AMBIENTE
REGIÓN DE LA ARAUCANÍA

SANTIAGO, 25NOVIEMBRE DE 2013

Contenido

1	Antecedentes	1
2	Evaluación de las herramientas de pronóstico período 2013.....	1
2.1	Evaluación del Pronóstico de PMCA a 24 horas.....	3
2.1.1	Distribución de categorías de PMCA (Condición relevante)	3
2.1.2	Detalles evaluación del pronóstico de PMCA a 24 horas	6
2.1.3	Tablas de Contingencia Evaluación del PMCA	7
2.2	Evaluación del Modelo de Calidad del Aire	9
2.2.1	Evaluación Modelo MP10 Primer Ajuste	11
2.2.2	Evaluación Modelo MP10 Segundo Ajuste	11
2.2.3	Evaluación Modelo MP10 Promedio Móvil con sonda.....	12
2.2.4	Evaluación Modelo MP10 Promedio Móvil sin sonda	12
2.2.5	Evaluación Modelo MP10 Promedio Diario 0 a 23 horas	13
2.2.6	Evaluación Modelo MP2.5 Promedio Móvil	14
2.2.7	Evaluación Modelo MP2.5 Promedio Diario	14
2.2.8	Evaluación Modelo MP10 Considerando Episodio y No Episodio	15
2.2.9	Evaluación Modelo MP2.5 considerando Episodio y No Episodio	16
2.2.10	Evaluación Modelo MP10 Considerando Episodio, No Episodio y Opinión Experta	16
2.2.11	Evaluación Modelo MP2.5 Considerando Episodio, No Episodio y Opinión Experta	17
2.3	Comentarios y Conclusiones respecto a las herramientas de pronóstico	17
3	Anexos	20
3.1	PMCA y Características de los Episodios de Contaminación que afectan a Temuco.....	20

1 Antecedentes

En conformidad con los objetivos planteados y los productos esperados, el servicio se desarrolló en etapas, en las cuales se implementaron progresivamente las herramientas utilizadas en los pronósticos de calidad del aire que se evalúan en el presente Volumen.

Las principales herramientas utilizadas en el Sistema de Pronóstico de Calidad del Aire para Temuco fueron: la generación del Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica (PMCA), la operación del Modelo de Calidad del Aire que incluye ecuaciones de pronóstico, y la inclusión de la Opinión Experta.

Los resultados fueron informados diariamente a la contraparte utilizando adicionalmente herramientas de seguimiento y control mediante tablas de contingencia para evaluar el PMCA y el Modelo de Calidad del Aire.

2 Evaluación de las herramientas de pronóstico período 2013

Una de las herramientas de mayor peso en el sistema de pronóstico es el Índice PMCA, que integra las condiciones meteorológicas a diferentes escalas vinculadas a las condiciones de dispersión de contaminantes. El PMCA se define como una medida meteorológica inversamente proporcional al factor de ventilación (FV)¹.

Las condiciones meteorológicas asociadas a episodios de contaminación atmosférica pueden ser tipificadas². En efecto, la identificación de las principales configuraciones meteorológicas asociadas a episodios de contaminación atmosférica por MP10 en la Zona Central de Chile, fue realizada por investigadores del DGF de la Universidad de Chile³⁻⁴, y luego por otras instituciones, destacándose CENMA, que en 1998 desarrolló una tipificación de configuraciones meteorológicas asociadas a distintas categorías de PMCA para la RM de Santiago⁵, teniendo como base los estudios del DGF. Esta tipificación fue ajustada por CENMA para las condiciones meteorológicas y tipos de episodio que ocurren en la región de La Araucanía, identificándose también otras configuraciones de episodio como las denominadas Tipo A-NF⁶.

¹ FV: producto de la altura de la capa de mezcla por el viento medio dentro de la capa después del mediodía.

²Rutllant et al (1993). Revista Tralka DGF. U de Chile.

³ Rutllant J. (1994). On the generation of coastal lows in Central Chile

⁴Rutllant J. y Garreaud R. (1995) Meteorological Air Pollution Potential for Santiago, Chile: Towards an Objective Weather Forecasting

⁵ CENMA (1998) Tipificación de condiciones meteorológicas asociadas a distintas categorías de PMCA en Santiago

⁶ Estetipo de episodio se caracteriza por la presencia de un núcleo frío al norte de la zona y una dorsal en la zona sur

La otra herramienta esencial para el sistema de pronóstico, la constituye las ecuaciones de pronóstico de calidad del aire, las cuales cuantifican el nivel de calidad del aire que se espera para el día siguiente. Con estos fines, se han desarrollado ecuaciones de pronóstico, que en su conjunto definen un Modelo de Calidad del Aire. CENMA ha desarrollado estas herramientas de pronóstico para Temuco y Padre Las Casas⁷, consistente en ecuaciones de corte estadístico, que cuantifican el nivel previsto de MP10 respecto a:

- El máximo promedio de MP10 para el día siguiente utilizado como predictando el máximo promedio móvil de 24 horas
- El promedio fijo de MP10 considerado entre las 7AM del día 1 y las 6 AM del día 2, correspondiendo el día de emisión del pronóstico al día 0
- El promedio diario MP10 para el día siguiente utilizando como predictando el promedio 0 a 23 horas
- A partir de las ecuaciones para MP10, se pronosticó el MP2.5 (promedio diario y promedio móvil máximo de 24 horas), ambos para el día siguiente.

Durante el año 2011 se desarrollaron ecuaciones de pronóstico para MP2.5, y las que dieron mejores resultados fueron operadas durante el periodo 2012 en forma experimental. A su vez, con datos de 2012, se ajustaron las ecuaciones, probándolas en el periodo 2013.

En la operación diaria del sistema, los resultados de estas ecuaciones fueron sometidos a un juicio experto, para finalmente emitir un resultado final en base a porcentajes de probabilidades de ocurrencia de las categorías de MP2.5.

En resumen, los resultados que se presentan a continuación, cuantifican el nivel de acierto del pronóstico del PMCA, del Modelo de Calidad de Aire y la Opinión Experta durante la temporada 2013 para la estación de Las Encinas ubicada en la comuna de Temuco.

La definición de las distintas categorías de PMCA y las configuraciones meteorológicas asociadas a calidad del aire en la Región de la Araucanía⁸ se detallan en Anexos.

⁷CENMA (2006) Desarrollo y operación de un modelo de MP10 para Temuco y Padre Las Casas

⁸CENMA 2001 Tipificación de configuraciones meteorológicas asociadas a distintas categorías de PMCA en Temuco

2.1 Evaluación del Pronóstico de PMCA a 24 horas

La evaluación siguiente considera el acierto del PMCA pronosticado el día anterior al día de validez del pronóstico.

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 1 Valores asignados a las categorías de PMCA

Categoría de PMCA	Valor Asignado
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.

2.1.1 Distribución de categorías de PMCA (Condición relevante)

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

Tabla 2 Constatación de Categorías de PMCA

Categoría de PMCA	Nº Casos Temporada 2013
1	16
2	47
3	77
4	43
5	1
Total	184

El PMCA evaluado en la Tabla 2 corresponde al más alto registrado en el día de pronóstico (día 1, condición relevante), 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 2013 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, el PMCA1 correspondiente a óptimas condiciones de ventilación y el PMCA5 asociado a condiciones de ventilación críticas.

La Figura 1 muestra los porcentajes de ocurrencia de cada categoría de PMCA.

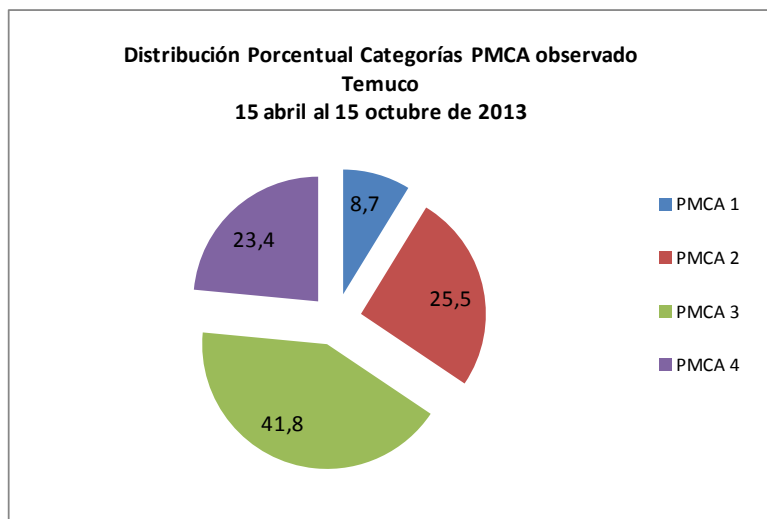


Figura 1 Distribución porcentual categorías PMCA observado durante la temporada de pronóstico 2011

La Figura 1 muestra que de acuerdo a este indicador, los PMCA atribuibles a ventilación óptima, buena y regular (PMCA 1, PMCA2 y PMCA3) totalizaron un 76.1% de los días durante la temporada 2013 (75.5% el 2012). El 23.9% restante (24.5 % el 2012), es decir 44 días de un total de 184 se observaron condiciones meteorológicas asociadas a condiciones de ventilación malas y críticas (PMCA 4 y PMCA 5, respectivamente).

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

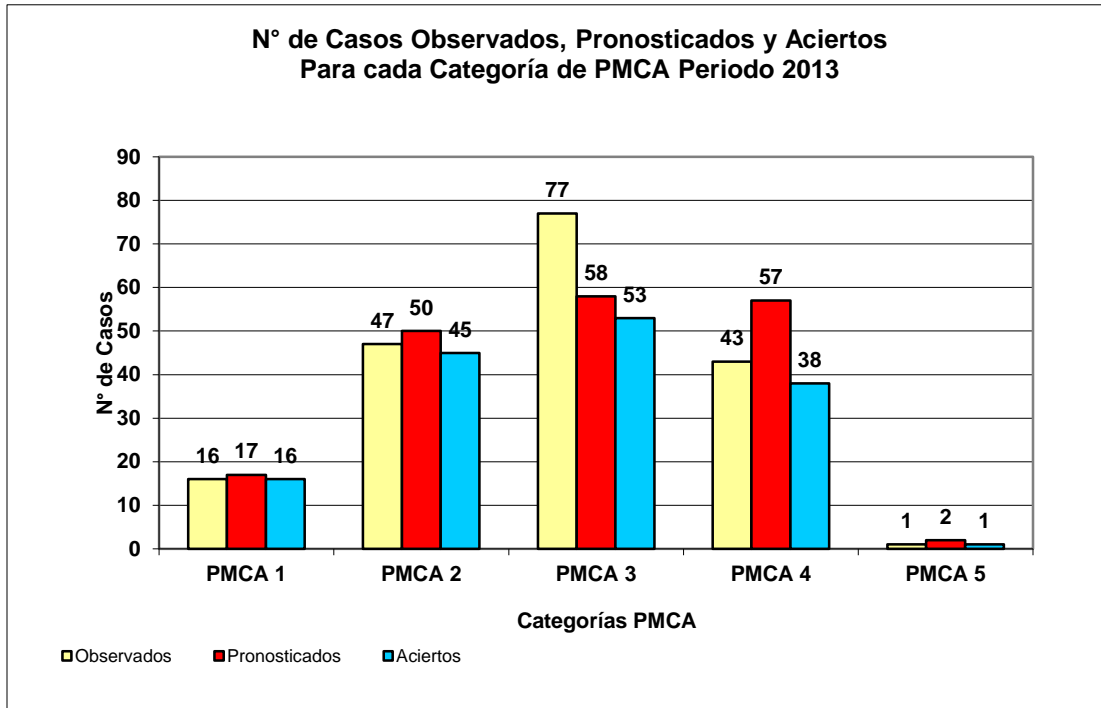


Figura 2 Distribución PMCA observado, pronosticado y acierto por categorías, temporada 2012

La Figura 2 muestra en términos generales buen acierto en la categoría PMCA1 y PMCA2, subpronóstico en las categorías PMCA3, y sobrepronóstico en los casos de PMCA4 y PMCA5.

La dificultad en el pronóstico y consecuente evaluación del PMCA en regiones ubicadas al sur de país y que presentan típicamente condiciones atmosféricas más dinámicas que en la zona central, radica en la rapidez de los cambios meteorológicos que se experimentan. Es frecuente que una condición meteorológica evolucione desde un PMCA1 durante la mañana (inestabilidad y precipitaciones) a un PMCA3 o PMCA4 en la noche debida a la incursión de una alta presión fría (rápida estabilización y malas condiciones de dispersión de contaminantes).

Típicamente el PMCA presenta una variabilidad diaria significativa, experimentándose un mejoramiento natural de las condiciones de ventilación durante el día, y un deterioro natural de la ventilación durante la noche, situaciones que se ven reforzadas con condiciones meteorológicas específicas a escala local, regional y sinóptica asociadas a configuraciones de episodio o no episodio.

Adicionalmente, el pronóstico de calidad del aire ha sufrido cambios que lo hacen más complejo. En efecto, debido a la entrada en vigencia de la norma MP2.5, que al ser más estricta que para el MP10, se pueden presentar eventos con PMCA3.

Como el PMCA está asociado a configuraciones meteorológicas tipo, el ajuste para pronosticar MP2.5 consistió en modificar los coeficientes de las ecuaciones y no el PMCA.

2.1.2 Detalles de la 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 la 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 (Aref) es la persistencia, y ésta se hace igual a 1 (100%), el Skill-Score queda indefinido ya que Aperf=1, y el denominador de la expresión (Aperf- Aref) se hace igual a 0. Sin embargo las variables condiciones meteorológicas características de latitudes medias, donde se encuentra Temuco, no da lugar a que se presente esta situación, menos aún considerando lo extenso del periodo de análisis.

2.1.3 Tablas de Contingencia Evaluación del PMCA

Las tablas que se presentan a continuación muestran la evaluación del PMCA por categorías, considerados el PMCA observado y pronosticado, para el periodo 15 de abril al 15 de octubre de 2013, 184 días en total.

Tabla 3 Evaluación PMCA pronosticado con 24 horas de anticipación

PMCA 24h 15 Abr-15 Oct 2013							
PMCA	Observado						
Pronos 24h	Bajo	Regular/Bajo	Regular	Regular/Alto	Alto	Total	% Acierto
Bajo	16	1	0	0	0	17	94,1
Regular/Bajo	0	45	5	0	0	50	90,0
Regular	0	1	53	4	0	58	91,4
Regular/Alto	0	0	19	38	0	57	66,7
Alto	0	0	0	1	1	2	50,0
Total	16	47	77	43	1	184	
%Acierto	100,0	95,7	68,8	88,4	100,0		
N° Aciertos	153						
%Acierto Total	83,2						
Skill-Score	63,7						

La Tabla 3 muestra un alto porcentaje de acierto total (83.2%) y también por categorías.

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

- PMCA 1 (Bajo): 94.1%
- PMCA 2 (Regular/Bajo): 90.0%
- PMCA 3 (Regular): 91.4%
- PMCA 4 (Regular/Alto): 66.7%
- PMCA 5 (Alto): 50%

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

- PMCA 1 (Bajo): 100%
- PMCA 2 (Regular/Bajo): 95.7%
- PMCA 3 (Regular): 68.8%
- PMCA 4 (Regular/Alto): 88.4%
- PMCA 5 (Alto): 100%

El Skill-Score relativo a la persistencia indica que el pronóstico de PMCA a 24 horas fue significativamente mejor que el de referencia, alcanzando un mejoramiento de 63.7%.

Tabla 4 Evaluación PMCA pronosticado con 48 horas de anticipación

PMCA 48h 15 Abr-15 Oct 2013							
PMCA	Observado					Total	% Acierto
Pronos 48h	Bajo	Regular/Bajo	Regular	Regular/Alto	Alto		
Bajo	12	1	0	0	0	13	92,3
Regular/Bajo	4	34	13	2	0	53	64,2
Regular	0	12	48	10	0	70	68,6
Regular/Alto	0	0	15	30	1	46	65,2
Alto	0	0	0	0	0	0	-----
Total	16	47	76	42	1	182	
%Acierto	75,0	72,3	63,2	71,4	0,0		
N° Aciertos	124						
%Acierto Total	68,1						
Skill-Score	49,1						

Se observa en la Tabla 4, como es esperable (dada la variabilidad meteorológica experimentada en esta zona y la mayor incertidumbre de los resultados de los modelos numéricos de pronóstico meteorológico conforme el horizonte de tiempo aumenta), que el acierto del pronóstico de PMCA con 48 horas de anticipación resulta más bajo (acierto total 68.1%) respecto al PMCA pronosticado con 24 horas de antelación.

El Skill-Score relativo a la persistencia indica que el pronóstico de PMCA a 48 horas fue mejor que el de referencia, alcanzando un mejoramiento de 49.1%.

Considerando el PMCA pronosticado, los porcentajes de acierto por categoría son:

- PMCA 1 (Bajo): 92.3%
- PMCA 2 (Regular/Bajo): 64.2%
- PMCA 3 (Regular): 68.6%
- PMCA 4 (Regular/Alto): 65.2%
- PMCA 5 (Alto): --

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

- PMCA 1 (Bajo): 75.0%
- PMCA 2 (Regular/Bajo): 72.3%
- PMCA 3 (Regular): 63.2%
- PMCA 4 (Regular/Alto): 71.4%
- PMCA 5 (Alto): 0%

2.2 Evaluación del Modelo de Calidad del Aire

Los indicadores que se utilizaron en la evaluación de los Modelos de calidad del aire 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 1, se observó un Nivel 2, 3 o 4; respecto del total de casos en que se observó Nivel 2, 3 o 4.
- El porcentaje de Falsas Alarmas (FA) que representa la razón entre el número de casos en que habiéndose observado el Nivel 1, se pronosticó Nivel 2, 3 o 4; respecto al total de casos en que se pronosticó Nivel 2, 3 o 4.

Las categorías fueron analizadas de acuerdo a rangos, considerando en algunas ecuaciones el máximo del promedio móvil de MP10 de 24 horas registrado al día siguiente, el promedio 7 a 6 y el promedio diario.

Tabla 5 Categorías Calidad del Aire por MP10 utilizadas en el Sistema de Pronóstico para la ciudad de Temuco

Nivel Calidad Aire ⁹	Promedio MP10
	Máximo Móvil 24h/Promedio 7-6/Promedio Diario
1 BUENO	Menor que 150µg/m ³
1 REGULAR	Mayor o igual a 150µg/m ³ y menor que 195µg/m ³
2 ALERTA	Mayor o igual a 195 µg/m ³ y menor que 240 µg/m ³
3 PREEMERGENCIA	Mayor o igual a 240 µg/m ³ y menor que 330 µg/m ³
4 EMERGENCIA	Mayor que 330 µg/m ³

Paralelamente, se operaron ecuaciones de pronóstico que contemplan promedio de 24 horas a periodos fijos. Los umbrales de las categorías de calidad del aire se mantienen como en la Tabla 5, con la diferencia de estar asociados a promedios fijos de de 07 am del día 1 a las 06 am del día 2.

Las ecuaciones de promedio diario fijo de 07 am del día 1 a las 06 am del día 2 permiten, 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,

⁹ DS 59 Minsegres 1998

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 otras regiones). El promedio móvil determina máximosmarcadamente 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^{10,11}

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 horarias de MP10, para asesorar eficientemente a la Autoridad Ambiental, de modo que ésta pueda difundir oportunamente las recomendaciones que apuntan a proteger la salud de la población cuando se prevea que se registrarán altos índices de MP10. Es por esto, que para adicionalmente no complejizar aún más el pronóstico, se desarrollaron ecuaciones para un promedio diario de 0 a 23 horas.

Finalmente, se contempla el acierto en la ecuación para MP2.5, con los umbrales de episodio basados en la normativa vigente (ver Tabla 6).

Tabla 6 Categorías Calidad del Aire por MP2.5 utilizadas en el Sistema de Pronóstico para la ciudad de Temuco

Nivel Calidad Aire	Promedio móvil máximo y diario MP2.5
1 BUENO	Menor que 50 µg/m ³
1 REGULAR	Mayor o igual a 50 µg/m ³ y menor que 80 µg/m ³
2 ALERTA	Mayor o igual a 80 µg/m ³ y menor que 110 µg/m ³
3 PREEMERGENCIA	Mayor o igual a 110 µg/m ³ y menor que 170 µg/m ³
4 EMERGENCIA	Mayor que 170 µg/m ³

Es importante señalar que en todas las tablas de contingencia siguientes, se integra el acierto total y por categorías según lo observado y pronosticado para todo el periodo 2013. El porcentaje de ENA y FA en cambio, y que se incorporan en la misma tabla, no corresponden a la diferencia respecto al acierto total, sino que se calculan en función de los episodios, definidos

¹⁰CENMA Análisis Crítico a la Gestión de Episodios. Informes Finales 2006 a 2010

¹¹DGF Universidad de Chile. Propuestas de mejoramiento al sistema de pronóstico de MP10 en la RM

como aquellos días en que se pronosticó u observó un nivel de alerta, preemergencia o emergencia ambiental.

2.2.1 Evaluación Modelo MP10 Primer Ajuste

La Tabla de contingencia siguiente muestra el resultado del pronóstico 7am del día 1 a 6 am del día 2, considerando la Ecuación del Primer Ajuste.

Tabla 7. Ecuación 1 Temuco Promedio Fijo 7-6hrs

TABLA DE CONTINGENCIA ACIERTO PRONÓSTICO FIJO 6-6 HRS PARA EL DÍA SIGUIENTE (PRIMER AJUSTE)

Desde 15-04-2013	Observado				Total	% Acierto
	Bueno-Regular	Alerta	Pre-emergencia	Emergencia		
Bueno-Regular	129	3	3	0	135	95,6
Alerta	7	0	1	0	8	0
Pre-emergencia	8	2	1	0	11	9
Emergencia	0	0	0	0	0	-----
Total	144	5	5	0	154	
% Acierto	89,6	0,0	20,0	-----		
Número aciertos	130					
% Acierto total	84,4					
% ENA	60,0					
% FA	10,4					

La Tabla 7 muestra un porcentaje de acierto total de 84,7%; alto porcentaje de Episodios No Alertados (ENA), y bajo porcentaje de Falsas Alarmas (FA), esto sin considerar la opinión experta. Se observan 5 días en el nivel Alerta, 5 en nivel Preemergencia y 0 en nivel Emergencia.

2.2.2 Evaluación Modelo MP10 Segundo Ajuste

La Tabla de Contingencia siguiente muestra el resultado del pronóstico 7am del día 1 a 6 am del día 2, considerando la Ecuación del Segundo Ajuste.

Tabla 8. Ecuación 2 Temuco Promedio Fijo 7-6hrs

TABLA DE CONTINGENCIA ACIERTO PRONÓSTICO FIJO 6-6 HRS PARA EL DÍA SIGUIENTE (SEGUNDO AJUSTE)

Desde 15-04-2013	Observado				Total	% Acierto
	Pronosticado día siguiente	Bueno-Regular	Alerta	Pre-emergencia		
Bueno-Regular	129	3	3	0	135	95,6
Alerta	7	0	1	0	8	0
Pre-emergencia	8	2	1	0	11	9
Emergencia	0	0	0	0	0	-----
Total	144	5	5	0	154	
% Acierto	89,6	0,0	20,0	-----		
Número aciertos	130					
% Acierto total	84,4					
% ENA	60,0					
% FA	10,4					

La Tabla 8 no muestra diferencias respecto a los resultados del Primer Ajuste.

2.2.3 Evaluación Modelo MP10 Promedio Móvil con sonda

La tabla siguiente muestra los resultados de la ecuación que contempla como predictando el promedio móvil máximo de MP10 esperado para el día siguiente en Las Encinas e integra el radiosondeo de Puerto Montt.

Tabla 9. Ecuación Temuco Promedio Móvil con sonda

TABLA DE CONTINGENCIA ACIERTO PRONÓSTICO CALIDAD DE AIRE TEMUCO PARA EL DÍA SIGUIENTE (CON SONDA)

Desde 15-04-2013	Observado				Total	% Acierto
Pronosticado día siguiente	Bueno-Regular	Alerta	Pre-emergencia	Emergencia		
Bueno-Regular	127	4	5	2	138	92,0
Alerta	1	3	1	0	5	60
Pre-emergencia	1	0	1	0	2	50
Emergencia	0	0	0	0	0	-----
Total	129	7	7	2	145	
% Acierto	98,4	42,9	14,3	0,0		
Número aciertos	131					
% Acierto total	90,3					
% ENA	68,8					
% FA	1,6					

La Tabla 9 muestra un acierto total de 90.3%; alto porcentaje de Episodios No Alertados (ENA) y bajo porcentaje de Falsas Alarmas (FA). Al igual que en el Modelo anterior, esta evaluación es rígida, por categorías y no integra la opinión experta.

2.2.4 Evaluación Modelo MP10 Promedio Móvil sin sonda

La Tabla de Contingencia que se muestra a continuación, contiene los resultados de la ecuación que pronostica promedios móviles máximos para MP10 del día siguiente en Las Encinas, sin integrar parámetros del radiosondeo de Puerto Montt, ni la opinión experta.

Tabla 10. Ecuación Temuco Promedio Móvil sin sonda

TABLA DE CONTINGENCIA ACIERTO PRONÓSTICO CALIDAD DE AIRE TEMUCO PARA EL DÍA SIGUIENTE (SIN SONDA)

Desde 15-04-2013 Pronosticado día siguiente	Observado				Total	% Acierto
	Bueno-Regular	Alerta	Pre-emergencia	Emergencia		
Bueno-Regular	127	8	5	1	141	90,1
Alerta	1	0	0	0	1	0
Pre-emergencia	1	0	0	1	2	0
Emergencia	0	0	0	0	0	-----
Total	129	8	5	2	144	
% Acierto	98,4	0,0	0,0	0,0		
Número aciertos	127					
% Acierto total	88,2					
% ENA	93,3					
% FA	1,6					

La Tabla 10 destaca que considerando este Modelo, se logra un alto porcentaje de acierto total (88.2%), alto porcentaje de Episodios No Alertados (ENA) y bajo porcentaje de Falsas Alarmas.

2.2.5 Evaluación Modelo MP10 Promedio Diario 0 a 23 horas

Tabla 11. Ecuación Temuco Promedio Diario MP10

TABLA DE CONTINGENCIA ACIERTO PRONÓSTICO PROMEDIO DÍA 0-23 HRS PARA EL DÍA SIGUIENTE

Desde 15-04-2013 Pronosticado día siguiente	Observado				Total	% Acierto
	Bueno-Regular	Alerta	Pre-emergencia	Emergencia		
Bueno-Regular	126	4	2	0	132	95,5
Alerta	7	1	1	0	9	11
Pre-emergencia	1	0	0	0	1	0
Emergencia	0	0	0	0	0	-----
Total	134	5	3	0	142	
% Acierto	94,0	20,0	0,0	-----		
Número aciertos	127					
% Acierto total	89,4					
% ENA	75,0					
% FA	6,0					

La Tabla 11 muestra que considerando este Modelo, se logra un alto porcentaje de acierto total (88.2%), alto porcentaje de Episodios No Alertados (ENA) y bajo porcentaje de Falsas Alarmas.

Resulta evidente considerando los resultados de estas ecuaciones de pronóstico, la subestimación para los niveles de episodios de contaminación finalmente observados.

Durante este periodo los resultados de estas ecuaciones fueron sometidas a un juicio experto, utilizando criterios basados en la experiencia y en la interpretación de los resultados de las ecuaciones de pronóstico.

2.2.6 Evaluación Modelo MP2.5 Promedio Móvil

Tabla 12. Ecuación Temuco Promedio Diario MP2.5

TABLA DE CONTINGENCIA ACIERTO PRONÓSTICO PARA MP2,5 MÁXIMO PROMEDIO MÓVIL

Desde 15-04-2013	Observado				Total	% Acierto
Pronosticado día siguiente	Bueno-Regular	Alerta	Pre-emergencia	Emergencia		
Bueno-Regular	75	11	3	4	93	80,6
Alerta	6	8	4	4	22	36
Pre-emergencia	4	6	10	6	26	38
Emergencia	0	1	2	5	8	62,5
Total	85	26	19	19	149	
% Acierto	88,2	30,8	52,6	26,3		
Número aciertos	98					
% Acierto total	65,8					
% ENA	28,1					
% FA	11,8					

Se observa en la Tabla 12 que considerando este Modelo , se logra un porcentaje de acierto total bajo (65.8%) para el pronóstico de MP2.5, pero mejora el porcentaje de Episodios No Alertados (ENA) y se mantiene bajo el porcentaje de Falsas Alarmas.

2.2.7 Evaluación Modelo MP2.5 Promedio Diario

Tabla 13. Ecuación Temuco Promedio Diario MP10

TABLA DE CONTINGENCIA ACIERTO PRONÓSTICO PARA MP2,5 PROMEDIO DÍA 0-23 HRS PARA EL DÍA SIGUIENTE

Desde 15-04-2013	Observado				Total	% Acierto
	Bueno-Regular	Alerta	Pre-emergencia	Emergencia		
Bueno-Regular	84	6	1	2	93	90,3
Alerta	9	6	3	0	18	33
Pre-emergencia	11	8	9	4	32	28
Emergencia	0	2	1	2	5	40,0
Total	104	22	14	8	148	
% Acierto	80,8	27,3	64,3	25,0		
Número aciertos	101					
% Acierto total	68,2					
% ENA	20,5					
% FA	19,2					

La Tabla 13 muestra que considerando el pronóstico de MP2.5 como promedio diario del día siguiente, se logra un acierto total de 68.2%, bajo porcentaje de Episodios No Alertados y sube ligeramente el porcentaje de Falsas Alarmas. Este resultado cumple con mayor eficiencia el pronóstico de carácter preventivo, en relación a las ecuaciones anteriores, pues aunque es menor el acierto total, disminuyen los ENA y las FA se mantienen en torno a un 20%.

2.2.8 Evaluación Modelo MP10 Considerando Episodio y No Episodio

Al considerar en el análisis si hubo o no episodio, el porcentaje de acierto aumenta ligeramente, y se mantienen los porcentajes de ENA y FA (ver Tabla 11). Los umbrales evaluados corresponden a $MP \geq 195 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los episodios y $MP10 < 195 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los no episodios.

Tabla 14. Ecuación Temuco Promedio Diario MP10 $\geq 195 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (episodio) y MP10 $< 195 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (no episodio)

MP10	OBSERVADO			
	No Episodio	Episodio	Total	% Acierto
NO Episodio	126	6	132	95,5
Episodio	8	2	10	20,0
Total	134	8	142	
% Acierto	94,0	25,0		
Nº Aciertos	128			
% Acierto Total	90,1			
Epi. No Alertado	75,0%			
Falsas Alarmas	6,0%			

La Tabla 11 destaca que considerando $MP10 \geq 195 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como episodio y $MP10 < 195 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como no episodio, se logra un acierto total de 90.1%. El porcentaje de ENA es alto, mientras que las FA son muy pocas (6%).

2.2.9 Evaluación Modelo MP2.5 considerando Episodio y No Episodio

Tabla 15 Ecuación Temuco Promedio Diario MP2.5 $\geq 80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (episodio) y MP2.5 $< 80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (no episodio)

MP2.5	OBSERVADO			
	No Episodio	Episodio	Total	% Acierto
Pronosticado				
NO Episodio	84	9	93	90,3
Episodio	20	35	55	63,6
Total	104	44	148	
% Acierto	80,8	79,5		
Nº Aciertos	119			
% Acierto Total	80,4			
Epi. No Alertado	20,5%			
Falsas Alarmas	19,2%			

La Tabla 14 muestra que considerando MP2.5 $\geq 80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como episodio y MP10 $< 80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como no episodio, se logra solo un mejoramiento del acierto total (respecto a la Tabla 13), manteniéndose el porcentaje de ENA y FA en torno a 20%.

2.2.10 Evaluación Modelo MP10 Considerando Episodio, No Episodio y Opinión Experta

Al integrar la opinión experta a los resultados anteriores por MP10, se logra reducir el porcentaje de ENA, lo cual es de suma importancia dado el carácter preventivo del sistema pronóstico de episodios.

Tabla 16. Ecuación Temuco Promedio Diario MP10 considerando Episodio-No Episodio y Opinión Experta

MP10	OBSERVADO			
	No Episodio	Episodio	Total	% Acierto
Pronosticado				
NO Episodio	125	4	129	96,9
Episodio	16	13	29	44,8
Total	141	17	158	
% Acierto	88,7	76,5		
Nº Aciertos	138			
% Acierto Total	87,3			
Epi. No Alertado	23,5%			
Falsas Alarmas	11,3%			

En la Tabla 16 se observa que el acierto global baja ligeramente debido al incremento de las FA, lo cual es consistente con la consideración del peor escenario de calidad del aire esperado para la definición del resultado final.

2.2.11 Evaluación Modelo MP2.5 Considerando Episodio, No Episodio y Opinión Experta

Tabla 17. Ecuación Temuco Promedio Diario MP2.5 considerando Episodio-No Episodio y Opinión Experta

MP2.5	OBSERVADO			
	No Episodio	Episodio	Total	% Acierto
Pronosticado				
NO Episodio	109	11	120	90,8
Episodio	22	39	61	63,9
Total	131	50	181	
% Acierto	83,2	78,0		
Nº Aciertos	148			
% Acierto Total	81,8			
Epi. No Alertado	22,0%			
Falsas Alarmas	16,8%			

La Tabla 17 muestra que el resultado del acierto total para la ecuación para MP2.5 como promedio diario, considerando la opinión experta, baja ligeramente, disminuyen los ENA, y aumentan las FA, cumpliéndose de esta forma el carácter preventivo del sistema de pronóstico.

2.3 Comentarios y Conclusiones respecto a las herramientas de pronóstico

- ✓ Se cumplieron los objetivos y actividades propuestas para el desarrollo e implementación de las herramientas de pronóstico por MP10 y MP2.5 contemplados en las Bases Técnicas del Servicio y en la Propuesta Técnica de Cenma.

Respecto al PMCA:

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 nuevamente una herramienta esencial para el pronóstico de calidad del aire en la Región.

- ✓ De acuerdo a este indicador, los PMCA atribuibles a ventilación muy buena, buena y regular (PMCA 1, PMCA2 y PMCA3) totalizaron un 76.1 % de los días durante la temporada 2013 (75.5% el 2012). El 23.9% restante (24.5 % el 2012), es decir 44 días de un total de 184 se observaron condiciones meteorológicas

asociadas a condiciones de ventilación malas y críticas (PMCA 4 y PMCA 5, respectivamente).

- ✓ Los resultados indican un buen desempeño del pronóstico de PMCA durante el periodo 15 de abril al 15 de octubre de 2013, alcanzando un acierto total de 83.2% para el pronóstico con 24 horas de anticipación, y 68.1% para el pronóstico a 48 horas.
- ✓ El alto valor del Skill-Score para el pronóstico a 24 horas de 63.7%, y a 48 horas, 49.1%, calculado en función de un pronóstico de persistencia, indica que el PMCA pronosticado fue significativamente superior al pronóstico de referencia.
- ✓ Aunque de momento el valor del PMCA se aplica al MP10 e indirectamente para el MP2.5, se evidencia que los niveles para los rangos de concentraciones de MP10 difieren respecto a los niveles alcanzados en los rangos de concentraciones de MP2.5. Por ejemplo, con PMCA 3 se observaron concentraciones en nivel Regular para MP10, pero en nivel superior para MP2.5.
- ✓ No fue necesario un ajuste del PMCA original para el MP2.5. Esto porque el Indicador está basado en configuraciones meteorológicas tipo, por lo tanto, se estimó conveniente continuar con las definiciones originales del PMCA, ajustando el peso de los coeficientes en las ecuaciones para MP2.5.

Respecto a las ecuaciones de pronóstico de calidad del aire:

Los resultados de los modelos de calidad de aire para MP10 aplicados a la zona fueron los siguientes:

- ✓ La ecuación para el periodo fijo de 07AM del día 1 a las 06 AM del día 2_Primer Ajuste, tuvo un porcentaje total de acierto de 84.4%, ENA 60.0% y FA 10.4%.
- ✓ La ecuación para el periodo fijo de 07AM del día 1 a las 06 AM del día 2_Segundo Ajuste, tuvo el mismo rendimiento que la ecuación que considera el primer ajuste.
- ✓ La ecuación que considera el promedio móvil y el sonda de Puerto Montt tuvo un porcentaje total de acierto de 90.3%, ENA 68.8% y FA 1.6%.
- ✓ La ecuación que considera el promedio móvil sin sonda de Puerto Montt tuvo un porcentaje total de acierto de 88.2%, ENA 93.3% y FA 1.6%.
- ✓ La ecuación que considera el promedio diario, registró un acierto total de 89.4%, 75% ENA y 6.0% FA.

- ✓ Considerando Episodio y No Episodio, se alcanza un acierto total de 90.1%, ENA 75% y FA 6%.
- ✓ Considerando Episodio y No Episodio más la Opinión Experta, el acierto total es 87.3%, ENA 23.5% y FA 11.3%

Los resultados de los modelos de calidad de aire para MP2.5 aplicados a la zona fueron los siguientes:

- ✓ Operativamente el pronóstico de este año, al igual que el 2012, fue orientado a MP2.5, siendo un desafío al considerar esta norma en las ecuaciones sumado a la declaración de alerta sanitaria por la autoridad, la cual incluyó medidas de prohibición de uso de leña domiciliaria a un polígono de la ciudad.
- ✓ Otro desafío fue la determinación con precisión de la categoría o nivel estimado para el día siguiente como promedio fijo de 0 a 23 de las concentraciones de MP2.5. Esto se debe principalmente a que los niveles para concentraciones de 24 horas de MP2.5 son más exigentes (niveles más bajos que para concentraciones de MP10), y además los rangos (intervalos) de dichos niveles son más acotados que los rangos de los niveles de MP10.
- ✓ Durante el periodo de pronóstico se consideró para efectos de pronóstico en la opinión experta, el peor escenario de calidad de aire que se pudiera presentar bajo un escenario meteorológico determinado, privilegiando el carácter preventivo del pronóstico en la gestión de episodios. Los resultados fueron entregados en base a probabilidades. 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 MP2.5.
- ✓ La Ecuación que pronostica el promedio móvil máximo del día siguiente, alcanzó un acierto total de 65.8%, ENA 28.1% y FA 11.8%
- ✓ La Ecuación que pronostica el promedio diario, alcanzó un acierto total de 68.2%, ENA 20.5% y FA 19.2%
- ✓ Considerando Episodio y No Episodio, se alcanza un acierto total de 80.4%, ENA 20.5% y FA 19.2%.
- ✓ Considerando Episodio y No Episodio más la Opinión Experta, el acierto total es 81.8%, ENA 22% y FA 16.8%

3 Anexos

3.1 PMCA y Características de los Episodios de Contaminación que afectan a Temuco

Definición

El PMCA es una medida netamente meteorológica, siendo su valor inversamente proporcional al factor de ventilación después del mediodía (Rutllant y Salinas, 1983), entendiéndose por factor de ventilación al producto del espesor de la capa de mezcla superficial por el viento medio dentro de la capa. La definición del PMCA para Temuco integra las condiciones meteorológicas a escalas sinóptica, regional y local, asociadas a diferentes factores de ventilación y condiciones de dispersión

Tipificación de condiciones sinópticas asociadas a distintos valores PMCA

Para efectos operacionales, y sobre la base de las condiciones observadas y analizadas entre 2002 y 2006, y en 2008, CENMA efectuó para Temuco una tipificación de distintas categorías de

PMCA sobre la base de configuraciones sinópticas y regionales; y de variables meteorológicas y de calidad de aire de escala local.

Se definieron cinco categorías de Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica. (PMCA), que se resumen como sigue:

1.- PMCA BAJO

Representa una situación muy favorable en términos de dispersión de contaminantes. Se asocia a presencia de sistemas frontales activos y de rápido desplazamiento, precipitación y/o vientos moderados a fuertes y ausencia de inversión térmica.

En el radiosondeo de Puerto Montt la presión de superficie es del orden de 1000 hPa y no se observa inversión de subsidencia. En el nivel de presión 925 hPa a una altura aproximada de 700 m, la temperatura está en el rango 5 a 8°C y la velocidad del viento entre 10 y 15 m/s. Altura de 500 hPa del orden de 5450 m.

En la estación de Las Encinas, se observa poca oscilación térmica diurna, las temperaturas mínimas se presentan del orden de 6°C a 9°C, y máximas del orden de 10°C; la humedad relativa presenta valores cercanos a la saturación (100%); la velocidad del viento medio del día es del orden 3 a 4 m/s. La presión atmosférica media del día es del orden de 990 a 1000 hPa, alcanzando valores equivalentes a los presentados por el radiosondeo.

Las concentraciones de MP10 presentan generalmente valores promedio del día entre 20 y 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con máximos horarios del orden de 50 a 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El máximo del promedio móvil de 24 horas muestra valores entre 25 y 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

2.- PMCA REGULAR/BAJO

En general, se observan buenas condiciones de ventilación y dispersión de contaminantes. Se asocia a sistemas frontales de actividad regular a débil, con precipitación acumulada durante el evento menor a 10 mm.

El radiosonda de Puerto Montt presenta una inversión térmica de subsidencia débil o elevada, con presión en superficie entre 1000 y 1005 hPa. A 925 hPa se observan alturas entre 710 a 770 m, temperaturas en el rango 5 a 8°C, intensidad del viento del orden de 10 m/s. En nivel de 500 hPa se observan valores del orden de 5500 m.

En la estación de Las Encinas, al igual que en PMCA BAJO, se observa poca oscilación térmica diurna, con valores similares a los observados en la Categoría 1; presión media del día del orden 1000 a 1003 hPa; humedad relativa con valores entre 70 y 90%; velocidad del viento promedio del día de 1 a 3 m/s.

Las concentraciones máximas horarias de MP10 presentan valores entre 80 y 130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, promedio del día entre 30 y 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El máximo promedio móvil de 24 horas muestra valores entre 30 y 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

3.- PMCA REGULAR

Esta categoría está caracterizada por la incursión de dorsales en altura débil o moderada, con altas presiones en superficie. Además de condiciones prefrontales de avance moderado a lento, que trae consigo nubosidad media.

En el radiosonda de Puerto Montt se aprecia una inversión de subsidencia de mediana intensidad, con presión en superficie en el rango 1003 a 1008 hPa. En el nivel de 925 hPa con altura de 800 metros, la temperatura fluctúa entre 3 y 6°C, velocidad del viento de 5 a 10 m/s. Alturas a 500 hPa del orden de 5600 m.

En Las Encinas la presión media del día del orden de 1003 a 1010 hPa, temperaturas máximas entre 12 y 14°C, y las mínimas entre 3 y 7°C. Velocidad del viento promedio del día entre 1 y 2 m/s.

Concentraciones de MP10 máximas horarias entre 200 a 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, valores promedio día entre 60 y 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Máximo promedio móvil de 24 horas diario entre 80 y 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

4.- PMCA REGULAR/ALTO

Se asocia a condiciones de ventilación malas, relacionada con las siguientes configuraciones:

- Tipo A (t), correspondiente a una dorsal en altura bien definida e irrupción de alta fría en superficie, y una vaguada costera ubicada en la zona central.
- Tipo BPF (t), caracterizado por la aproximación de un sistema frontal cálido de lento desplazamiento, acompañado de abundante nubosidad media, registrándose un estancamiento de contaminantes y baja dispersión atmosférica en Temuco.
- Tipo mixto A (t)-BPF (t), mezcla los efectos de ambos tipos de configuraciones sinópticas. Típicamente comienza como un Tipo A (t) y le sigue la configuración BPF (t).
- Tipo A(t)-N(t), asociado a núcleos fríos, que corresponden a perturbaciones del aire polar desprendido hacia latitudes medias, acompañado por un estrangulamiento provocado por una dorsal ubicada al sur que se desplaza al continente. Cuando los núcleos fríos se posicionan al norte de Temuco, la circulación asociada contribuye a un flujo de viento proveniente desde el continente (aire seco de componente Este), subsidencia, reducción de la capa de mezcla superficial, generando malas condiciones de ventilación.

Los episodios menos frecuentes son los de tipo BPF (t), ya que en general a la latitud de Temuco, los sistemas frontales tienden a ser más dinámicos.

El radiosondeo de Puerto Montt muestra una inversión térmica de subsidencia de marcada intensidad, con alta presión en superficie en el rango 1010 a 1015 hPa. El nivel de 925 hPa con alturas entre 800 y 850 m, se observa una temperatura en el rango 3 y 6°C, velocidad del viento 5 m/s. Al nivel 500 hPa entre 5650 y 5700 m.

En Las Encinas la presión media del día del orden de 1010 hPa, velocidad del viento cercana a la calma. Temperatura máxima entre 12 y 16°C, temperatura mínima cercana a 0°C. Humedad relativa entre 40 y 50%. Estas variables representan una masa de aire cálida y seca, condición típica de la Categoría 4.

Las concentraciones de MP10 máximas horarias presentan valores entre 300 y 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, promedio diario (de 0 a 23 horas) entre 120 y 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Máximo promedio móvil de 24 horas entre 150 y 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

5.- PMCA ALTO

Representa a la misma condición que en el PMCA Regular/Alto, pero en forma más acentuada tanto en condición sinóptica, como en la prolongación en el tiempo.