

[Escribir texto]



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 6  
PROPUESTAS DE MEJORAMIENTO AL SISTEMA DE  
PRONÓSTICO EN TEMUCO

---

PREPARADO PARA

SECRETARIA REGIONAL MINISTERIAL DEL MEDIO AMBIENTE  
REGIÓN DE LA ARAUCANÍA

SANTIAGO, 25 NOVIEMBRE DE 2013

[Escribir texto]

## Contenido

1	Introducción .....	1
2	Antecedentes .....	2
3	Propuestas para Mejorar el Sistema de Pronóstico de Episodios por MP10 y MP2.5 en la Región de la Araucanía .....	3
3.1	Aseguramiento y control de la calidad de la información .....	3
3.2	Utilización de periodos fijo de 24 horas de MP2.5 para pronósticos de calidad de aire 5	5
3.3	Actualización de coeficientes de las ecuaciones y búsqueda de variables predictoras.....	6
3.4	Optimización de la determinación gradiente térmico vertical.....	7
3.5	Evaluación del pronóstico de Calidad de Aire considerando el impacto de la reducción de emisiones en episodios.....	8
3.6	Incorporación de nuevas metodologías de pronóstico de calidad de aire.....	8
3.7	Trabajo en equipo de especialistas de SEREMI del Medio Ambiente Región de la Araucanía y CENMA.....	9
3.8	Pronóstico para otras ciudades de la macro zona sur.....	10
3.9	Medida restrictiva de uso de leña en un perímetro de la ciudad de Temuco.....	10

## 1 Introducción

CENMA ha realizado estudios continuos y sistematizados relacionados con el pronóstico de la contaminación atmosférica por  $MP_{10}$  en la zona central y sur del país desde el año 1996, y específicamente para Temuco desde el año 2000<sup>1 2 3</sup>. Específicamente, a partir de 2006 CENMA ha realizado estudios y pronósticos de calidad de aire por  $MP_{10}$  para la SEREMI Medio Ambiente Región de la Araucanía en forma continua<sup>4 5</sup>.

En este Volumen, y sobre la base de la experiencia en el desarrollo, operación y mejoramiento de sistemas de pronósticos de calidad del aire por  $MP_{10}$  y recientemente por  $MP_{2.5}$ , se realizan propuestas de mejora al sistema de pronóstico que opera actualmente en la Región de La Araucanía.

En este sentido, las principales mejoras contempladas para el modelo de calidad del aire propiamente tal, para el periodo 2014, están incluidas en el Volumen 3 de este Informe "Ecuaciones de Pronóstico: Desarrollo de Ecuaciones para  $MP_{2.5}$ ".

---

<sup>1</sup> CENMA 2001. Análisis de episodios de contaminación atmosférica por  $MP_{10}$  en Temuco. (para CONAMA Nacional)

<sup>2</sup> CENMA 2002. Análisis Comparativo de Episodios de Contaminación Atmosférica por  $MP_{10}$  registrados en Temuco, IX Región Período Otoño-Invierno 2001-2002 para I. Municipalidad de Temuco

<sup>3</sup> CENMA 2002. Pronóstico de episodios de Contaminación atmosférica por  $MP_{10}$ . I. Municipalidad de Temuco

<sup>4</sup> CENMA 2007-2011. Implementación y Operación Diaria de Modelo de Pronóstico de Contaminación Atmosférica por  $MP_{10}$  en Temuco. CONAMA IX Región (Hoy MMA)

<sup>5</sup> CENMA 2012. Implementación y Operación Diaria de Modelo de Pronóstico de Contaminación Atmosférica por  $MP_{10}$  y  $MP_{2.5}$  en Temuco

## 2 Antecedentes

En 2005 Temuco y Padre Las Casas fueron declaradas Zonas Saturadas por MP10, lo que a su vez implicó formular un Plan de Descontaminación Atmosférica (PDA) que incorporara un plan operacional para enfrentar los episodios críticos de contaminación atmosférica por MP10<sup>6</sup>.

Como el propósito fundamental de la Gestión de Episodios Críticos es proteger la salud de la población, la Autoridad Ambiental requiere contar con información confiable y certera para mantener a la población informada de forma eficiente y oportuna cuando se prevean altos niveles de contaminación y realizar recomendaciones y acciones tendientes a mitigar los impactos en la salud. Con este objetivo, CENMA a requerimiento de la Autoridad ambiental, implementó un sistema de pronóstico de calidad de aire por MP10 para las comunas de Temuco y Padre Las Casas<sup>7</sup>, y durante los años 2012 y 2013 ejecutó un modelo para pronosticar concentraciones de MP2.5 en función de la nueva norma primaria para este contaminante<sup>8</sup>.

El sistema de pronóstico fue desarrollado mediante métodos estadísticos de pronóstico basados en Análisis de Regresión Multivariado. Una de las 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 IX Región<sup>9</sup>.

El sistema de pronóstico de calidad de aire operado en Temuco, no obstante tiene un margen de error asociado, ha permitido apoyar a la Autoridad Ambiental en la toma de decisiones tendientes a proteger la salud de la población. Tanto el sistema de pronóstico como la gestión de episodios críticos, son susceptibles de ser mejorados, y es por esto, que en este volumen se exponen propuestas de mejoramiento al sistema de pronóstico de episodios, sobre la base de la experiencia adquirida por CENMA.

---

<sup>6</sup> Ley 19.300. DS N° 94/95 de MINSEGPRES

<sup>7</sup> CENMA 2006-2007. Implementación y operación diaria de un modelo de pronóstico de MP10 para Temuco. CONAMA IX Región

<sup>8</sup> DS N° 12, 2011. Norma Primaria de Calidad del Aire para MP 2,5. MMA

<sup>9</sup> CENMA 2001. Análisis de episodios de contaminación atmosférica por MP10 en Temuco (Para CONAMA Nacional)

### 3 Propuestas para Mejorar el Sistema de Pronóstico de Episodios por MP10 y MP2.5 en la Región de la Araucanía

#### 3.1 Aseguramiento y control de la calidad de la información

Para el análisis, seguimiento continuo y elaboración de pronósticos de PMCA y de Calidad de Aire, es necesario contar con toda la información meteorológica y de calidad del aire en línea, con registros continuos y confiables, ya que de la oportunidad, continuidad y calidad de los registros reportados por las estaciones de monitoreo, dependen en gran medida los resultados obtenidos al operar el sistema de pronóstico.

Desde el punto de vista de la oportunidad de la información, la red SIVICA no permitió la visualización de datos horarios continuos, sino solo de promedio diarios. Esta falencia fue suplida con la información disponible en la página web de la consultora Algoritmos<sup>10</sup>, no obstante se presentaron igualmente algunos inconvenientes aislados. Así, se recurre a otras fuentes de información como la red meteorológica de Agroclima<sup>11</sup> y la red DMC<sup>12</sup> para complementar diariamente la información oficial.

Respecto al control de la calidad de la información, es importante contar con una base de datos validada con protocolos de validación.

Para asegurar una base de datos robusta y confiable se debe realizar un control de calidad de los datos de meteorología y calidad de aire. Si bien el control de calidad de los datos en rigor debiera partir con controles anteriores a los registros, con la selección calibración e instalación de los instrumentos, y verificación del sistema de almacenamiento de datos, se debe aplicar también una validación posterior. De modo general se debe contemplar:

- Despliegue y análisis visual de series de tiempo
- Chequeo de límites
- Conversión a tiempo solar de las horas de medición. Esto debido a que en las últimas décadas se efectúa dos veces al año el adelanto y atraso de una hora

---

<sup>10</sup> <http://200.73.31.51/vdv/index.html>

<sup>11</sup> [www.agroclima.cl](http://www.agroclima.cl)

<sup>12</sup> [www.meteochile.cl](http://www.meteochile.cl)

respecto a la hora local. En invierno la hora local de Chile continental corresponde a GMT<sup>13</sup> o UTC<sup>14</sup>-4 y en verano a GMT o UTC-3.

- Comprobar mínimos, máximos y desviación estándar.
- Validación de las series de tiempo considerando los criterios de consistencia interna, consistencia física y consistencia entre series cercanas.

Es importante considerar también los criterios contenidos en el DS 61, 2008, y cuando sea pertinente, técnicas de relleno de datos faltantes, principalmente de parámetros meteorológicos.<sup>15</sup>

Para el control de los datos meteorológicos, se utilizan frecuentemente tres fuentes de variabilidad:

- Interanual (variación del dato registrado en un momento del año en una serie anual, o sea en distintos años).
- Temporal (variación del dato respecto al valor precedente o sucesivo).
- Espacial (variación del dato medido en un momento en distintas estaciones).

El método de control de calidad tiende a verificar sustancialmente estas tres condiciones:

**Consistencia interna:** Para la verificación de la consistencia interna se puede asumir que un dato meteorológico determinado en cierto lugar y tiempo es función de las características ambientales y estacionales. Esto varía normalmente dentro de un rango de valores fuera del cual se puede decir que el dato es erróneo. Para un control significativo de la exactitud del dato es determinante la elección del valor límite con el cual confrontar cada dato.

**Consistencia temporal:** El control relativo de este tipo de verificación es para evidenciar eventuales anomalías entre datos temporalmente contiguos y se basa en la hipótesis que el cambio en el tiempo de las mediciones del parámetro meteorológico no puede superar determinados límites. Se puede proceder a la verificación de la consistencia temporal mediante diversos sistemas de control. La eficacia del control depende de todas formas

---

<sup>13</sup> Greenwich Meridian Time

<sup>14</sup> Universal Time Coordinated

<sup>15</sup> E.J. Alfaro; F.J. Soley (2008) Técnicas de relleno de datos ausentes en series de tiempo meteorológicas

del valor umbral elegido para confrontar la dispersión o alejamiento temporal de las mediciones; es decir su ajuste a la condición específica local.

Consistencia espacial: La comparación de datos relevantes en puntos diversos del dominio espacial representa uno de los métodos más usados para averiguar la eventual presencia de errores en los datos.

Uno de los problemas de estos métodos es la elección de la estación con la cual confrontar los datos a controlar. Aparte de pertenecer a una condición climática común es necesario individualizar el procedimiento concreto para seleccionar la más oportuna de las estaciones entre todas las disponibles en la red.

Un primer criterio es comparar con la más cercana, esto no es una garantía para ver la correspondencia en los datos pero se puede iniciar así. Un segundo criterio o método es correlacionar la estación a controlar con otras; la que tiene mayor correlación será la que se use para confrontarla.

Los análisis estadísticos que se utilizan para realizar las distintas verificaciones están ampliamente documentados. Se usará análisis de normalidad, verificación, determinación de outliers, análisis e independencia intramuestral y correlaciones<sup>16 17</sup>.

### **3.2 Utilización de periodos fijo de 24 horas de MP2.5 para pronósticos de calidad de aire**

En 2011, 2012 y 2013, CENMA operó un modelo de calidad del aire que pronostica un promedio fijo de 24 horas de MP10, contemplado desde las 07 am del día 1 a las 06 am del día 2, considerado el día 0 como el de emisión del pronóstico.

Estas ecuaciones si bien solucionan el problema original que presenta el máximo móvil de 24 horas (desfase temporal importante con los valores horarios), es comunicacionalmente confusa.

---

<sup>16</sup> WMO (1989) Proceedings of international workshop on precipitation measurements

<sup>17</sup> E. Colotti; J. Rodríguez; A. E. Alfaro: Propuesta metodológica para el análisis de la consistencia de los datos climáticos

Como el cálculo de la norma de calidad diaria del MP10 y el MP2.5 están basadas en promedios diarios, y considerando la alta correlación entre los promedios móviles y los promedios 0-23, se desarrollaron nuevas ecuaciones para las estaciones de Las Encinas y Padre Las Casas a partir de un nuevo predictando (promedio diario 0-23).

Durante la temporada 2013 CENMA operó un modelo de calidad del aire que pronostica las concentraciones diarias de MP2.5, y en presente informe se presenta una mejora a dicho modelo.

Dado que los niveles para decretar un episodio crítico por MP2.5 son más estrictos que los utilizados para el MP10, y como el propósito fundamental de la Gestión de Episodios Críticos es proteger la salud de la población, se sugiere utilizar durante la temporada 2014 el pronóstico del promedio fijo de 24 horas (promedio diario 0-23) para MP2.5 como pronóstico para la toma de decisiones.

### **3.3 Actualización de coeficientes de las ecuaciones y búsqueda de variables predictoras**

A partir del desarrollo de nuevas ecuaciones de pronóstico, se sugiere mantener una actualización periódica de los coeficientes de las ecuaciones, 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.

Para el caso de las ecuaciones desarrolladas para el pronóstico de MP2.5, se sugiere utilizar estas nuevas ecuaciones durante la temporada 2014.

Es importante también continuar con la búsqueda de nuevas variables predictoras que optimicen los resultados entregados por los modelos. A fin de conocer los procesos de estabilización a mayor altura, debido a efectos de la subsidencia atmosférica, y de poder analizar la inversión de tipo radiativa, todos fenómenos fuertemente relacionados con los episodios de contaminación atmosférica, se propone nuevamente considerar la instalación de sensores de viento y temperatura en lugares altos como torres, edificios o cerros, o bien disponer de un perfilador de viento y temperatura.



Con relación a la búsqueda de nuevas variables predictoras, durante la temporada 2013, se observó que el MP2.5 sube rápidamente aún en condiciones de moderada estabilidad atmosférica, y se hace necesario afinar el pronóstico de la noche a nivel más local, en términos de temperatura, nubosidad y precipitación. Estas variables pueden ser obtenidas de modelos de mesoescala como el WRF.

### 3.4 Optimización de la determinación gradiente térmico vertical

Un bajo factor de ventilación se correlaciona con condiciones de estabilidad a niveles bajos, y éstas a la ocurrencia de episodios por MP10 y MP2.5.

La actual SEREMI de MA de la Región de la Araucanía, instaló en el Cerro Oyama una estación meteorológica que permite determinar el gradiente vertical de temperatura a escala local, sobre la base de los registros de las estaciones Oyama<sup>18</sup> y Las Encinas, lo que significó un importante avance para el análisis a escala local.

Sin embargo para conocer con mayor detalle el gradiente vertical de temperatura, el contar con sólo estos dos puntos, bajo ciertas condiciones meteorológicas, resulta insuficiente. Esto debido a que hay 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, típicamente con cielos despejados debido a la presencia de una alta fría migratoria.

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.

La estación de Oyama está ubicada a una altura aproximada de 600 msnm, por lo que detecta muy bien la inversión térmica de subsidencia.

La inversión radiativa determinada por enfriamiento nocturno, parte desde la superficie y se extiende sólo en las primeras decenas de metros sobre el suelo, por lo que no es detectada por la estación Oyama.

---

<sup>18</sup> Resumen de actividades relacionadas con Estación Oyama en Volumen 7 de este Informe

Se sugiere por tanto, aumentar los puntos de medición en Las Encinas, instalando cerca de la estación una torre meteorológica que mida temperatura a diferentes niveles (2, 8 y 22 m).

Se recomienda además contar con otro punto de medición aproximadamente a 300msnm, que fortalezca el análisis de la inversión térmica de subsidencia.

### **3.5 Evaluación del pronóstico de Calidad de Aire considerando el impacto de la reducción de emisiones en episodios**

Una vez que se pueda evaluar la efectividad de las medidas de mitigación contempladas en el Plan de Descontaminación, y para efectos de ponderar el resultado de las ecuaciones de pronóstico, es necesario incorporar el efecto que estas medidas tendrían en las concentraciones resultantes. Este análisis podría realizarse durante la temporada 2014.

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

No existe una metodología única para pronosticar episodios de contaminación, y tampoco herramientas excluyentes entre sí, ya que cada una presenta fortalezas y debilidades.

Los pronósticos a corto plazo, aplicables a este servicio, se utilizan para diseñar estrategias contingentes, esencialmente de aviso y/o mitigación de episodios de alta contaminación, desastres naturales entre otros, y que usan los administradores o tomadores de decisiones para enfrentar las necesidades del futuro inmediato.

La herramienta seleccionada para elaborar los pronósticos de calidad del aire es de tipo estadístico. Específicamente, las ecuaciones de regresión lineal múltiple constituyen una de las herramientas más analizadas en la literatura y una de las más aplicadas, por su relativa simplicidad para su desarrollo e implementación y también por el bajo costo asociado. Se determina un predictando y en base a éste se analizan las variables que pueden influir de mayor manera en su comportamiento. Sus mayores fortalezas son que no requiere de herramientas estadísticas muy avanzadas, puede servir como herramienta de

pronóstico principal, como complemento, o para brindar condiciones de inicio para otras herramientas de pronóstico más complejas, es una herramienta objetiva, muy documentada y ampliamente utilizada en una variedad de disciplinas y existe una amplia variedad de software que se pueden utilizar para su desarrollo, operación y actualización. Sus debilidades son que requiere un cierto nivel de experiencia teórico/práctica para su desarrollo y actualización, no así para su operación, tiende a presentar mejor acierto en valores ubicados en torno a la media de la distribución. Esto quiere decir que, es esperable que las altas concentraciones sean subestimadas y que las bajas concentraciones sean sobreestimadas, y por tanto, para disminuir este sesgo, al resultado inicial suelen aplicarse algunas técnicas compensatorias de corte estadístico, y requieren de una actualización periódica de los coeficientes, para incorporar cambios en el patrón de las condiciones de entrada.

Conjuntamente con esta herramienta se utiliza como concepto general en el sistema de pronóstico la persistencia, el análisis de series de tiempo, de modo de incluir la climatología, la herramienta criterio "reglas de oro" y el análisis fenomenológico.

Sería beneficioso ahondar en otras herramientas como la modelación con métodos numéricos. Todas las metodologías debieran resumirse en un análisis fenomenológico, herramienta que se basa en la experiencia y en las capacidades del personal a cargo del pronóstico, y consiste en la síntesis de la información observada y pronosticada por otras herramientas, asignando un peso a cada resultado para finalmente entregar un resultado final.

### **3.7 Trabajo en equipo de especialistas de SEREMI del Medio Ambiente Región de la Araucanía y CENMA**

Durante los años que se ha mantenido este servicio, se logró una muy buena interacción con la contraparte técnica de la SEREMI de MA. Se recomienda mantener y fortalecer este trabajo en equipo, apuntando al mejoramiento continuo de la Gestión de Episodios Críticos (GEC). Durante este año, se realizó una capacitación a profesionales de otras regiones, fortaleciendo la GEC en su conjunto. También se realizó una jornada para presentar los resultados a la Contraparte y representantes de la Seremi de Salud, Región Araucanía.

Para el año 2014, se propone la realización de nuevos seminarios que apunten a fortalecer el trabajo de los equipos técnicos a cargo de la elaboración de los Planes de Descontaminación en el sur del país.

### 3.8 Pronóstico para otras ciudades de la macro zona sur

Cenma ha desarrollado ecuaciones de pronóstico por MP10 y más recientemente por MP2.5 para varias ciudades del país como Santiago, Rancagua, Rengo, San Fernando, Concepción, Chillán, Los Ángeles<sup>19</sup>, Temuco y Padre Las Casas. En la mayoría de los casos, los fenómenos meteorológicos que generan gran estabilidad atmosférica se presentan a una escala sinóptica del orden de cientos de kilómetros, impactando de sur a norte o de este a oeste, según sea su desplazamiento, diferenciándose en muchos casos las zonas costeras de los valles interiores.

Durante la temporada 2013, CENMA operó experimentalmente un sistema de pronóstico para la región del BioBío, comprobándose la conveniencia de integrar estas ciudades por macrozona climática, generando un pronóstico de ventilación por regiones, y un pronóstico de calidad del aire por ciudades, incluyendo nuevas zonas que pronto comenzarán a formular sus propios planes de descontaminación.

Tanto del punto de vista tanto técnico como económico, parece interesante dialogar de modo de optimizar los recursos y generar una única plataforma de pronóstico de calidad del aire durante el otoño invierno según macrozonas.

### 3.9 Medida restrictiva de uso de leña en un perímetro de la ciudad de Temuco

Durante la temporada 2013, la Autoridad de Salud implementó una medida restrictiva al uso de leña en un perímetro de la ciudad de Temuco, en aquellos días que fuesen pronosticadas Pre-Emergencia o Emergencia Ambiental según MP2.5 en Las Encinas. La efectividad de la medida fue evaluada en el Volumen 5 del presente informe.

---

<sup>19</sup> Las ecuaciones para la región del BioBío serán probadas durante la temporada 2013.

Desde el punto de vista meteorológico y de acuerdo al análisis de las concentraciones resultantes tras aplicar esta medida, se observó su efectividad, y por tanto se sugiere su continuidad para las próximas temporadas.

Esta recomendación técnica sin duda debe ir acompañada por acciones de la Autoridad, tendientes a mitigar el impacto económico y social que asocia esta medida, y paralelamente mantener las acciones contempladas en el PDA de la Región.