Capítulo 1

Pronóstico de Episodios Críticos de Contaminación Atmosférica en Santiago

Expositora: Roxana Sanguineti Castro

Resumen

Durante los meses de otoño – invierno se registran periódicamente eventos de altos índices de material particulado respirable en Santiago. Si bien algunos otros contaminantes también muestran alzas durante estos eventos, no alcanzan niveles considerados de episodio según la normativa vigente.

Las emisiones directas de contaminantes que se generan diariamente en la ciudad se mantienen aproximadamente estables durante todo el año. Sin embargo, las condiciones meteorológicas son sustancialmente diferentes entre verano e invierno. Durante el estío, el calentamiento solar induce una vigorosa brisa diurna y una buena mezcla de aire en la vertical, lo cual favorece que los contaminantes se difundan en un volumen considerablemente mayor dentro de la cuenca. En cambio en invierno, la disminución de la energía solar recibida incide en una moderación de la brisa diurna y de la mezcla de aire, de modo que los contaminantes tienden a permanecer estancados, hasta que una situación atmosférica inestable rompe este comportamiento (por ejemplo, el paso de un sistema frontal activo). Bajo ciertas configuraciones sinópticas la situación antes descrita se torna crítica para la dispersión de los contaminantes, conduciendo a la ocurrencia de episodios de alta contaminación (Rutllant, J. & Garreaud, R., 1995).

Por lo tanto, para una adecuada gestión de episodios invernales es preciso adelantarse a la ocurrencia de estas condiciones meteorológicas extremas, para reducir las emisiones durante el periodo en que éstas se registran, y evitar que las concentraciones de contaminantes sigan aumentando. Por esta razón se realiza una continua vigilancia de los fenómenos meteorológicos que afectan la región, y se han elaborado modelos de pronóstico de calidad de aire.

El modelo de pronóstico de calidad de aire vigente, llamado modelo *Cassmassi* (Cassmassi, 1999), corresponde a un conjunto de ecuaciones desarrolladas a partir de variados análisis regresionales de la información meteorológica y de calidad de aire de los años 1997, 1998 y 1999. El acierto general del modelo entre abril y junio de 2000 es del orden del 77%, destacándose una clara mejoría en el acierto a condiciones de episodio en relación con los métodos anteriormente usados en la declaración de eventos (entre el 56% y el 60%) (CENMA, 2000).

Capítulo 1
Pronóstico de Episodios de Contaminación Atmosférica en Santiago

1.1. Características climáticas de la zona central

El clima de la zona central de Chile se encuentra modulado por dos factores principales: la presencia del Anticiclón Subtropical del Pacífico Suroriental, y el paso de largas ondas atmosféricas, en cuyo seno se alternan los sistemas de altas y bajas presiones. A estos fenómenos de escala hemisférica, se suman otros de menor escala como las depresiones costeras, la brisa mar-continente, la brisa montaña-valle, etc., que determinan en gran parte las condiciones para la dispersión de los contaminantes en la cuenca.

El Anticiclón Subtropical del Pacífico Suroriental es un centro de altas presiones de carácter semi-permanente que afecta gran parte del país, con variaciones estacionales en su ubicación y su intensidad. Durante el verano, el anticiclón se encuentra desplazado hacia el sur, alcanzando latitudes de 40ºS, mientras en invierno se repliega al norte, ubicándose preferentemente en torno a los 30ºS.

En su interior se observa el descenso (subsidencia) de aire proveniente del Ecuador, el cual se calienta y se seca producto de la compresión que le impone dicho movimiento. Este flujo cálido se encuentra con el aire frío y húmedo subyacente, de origen marino, produciéndose una discontinuidad en las condiciones atmosféricas, de modo que el aire cálido se encuentra sobre el aire frío, lo cual constituye una situación termodinámica muy estable, que no induce a la mezcla vertical de las masas de aire.

Inversiones térmicas

Se entiende por inversión térmica una capa de aire en la cual la temperatura aumenta con la altura. La condición usual en una atmósfera estándar es que la temperatura baje con la altura, a razón de 7ºC/Km.

La situación de estabilidad atmosférica descrita en relación con el Anticiclón Subtropical, corresponde a una “inversión térmica de subsidencia”. También pueden existir inversiones térmicas de otro origen, como por ejemplo, debido a la superposición de masas de aire de distinto origen en un sistema frontal (inversiones frontales), o debido al enfriamiento radiativo de la superficie en comparación al aire sobreyacente (inversión radiativa). En el caso de Santiago, suelen superponerse las inversiones radiativa y de subsidencia, especialmente durante horas de la noche y la madrugada.

A través del día, el calentamiento solar de la superficie genera mezcla en el aire contiguo al suelo, propiedad que se va transmitiendo hacia niveles superiores en la medida que el calentamiento progresa, lo cual socava la inversión radiativa. Sin embargo, al ponerse el sol, comienza nuevamente el enfriamiento de la superficie, y con ello, comienza a cambiar el perfil de temperatura, generándose nuevamente la inversión radiativa y la estabilidad en el aire.

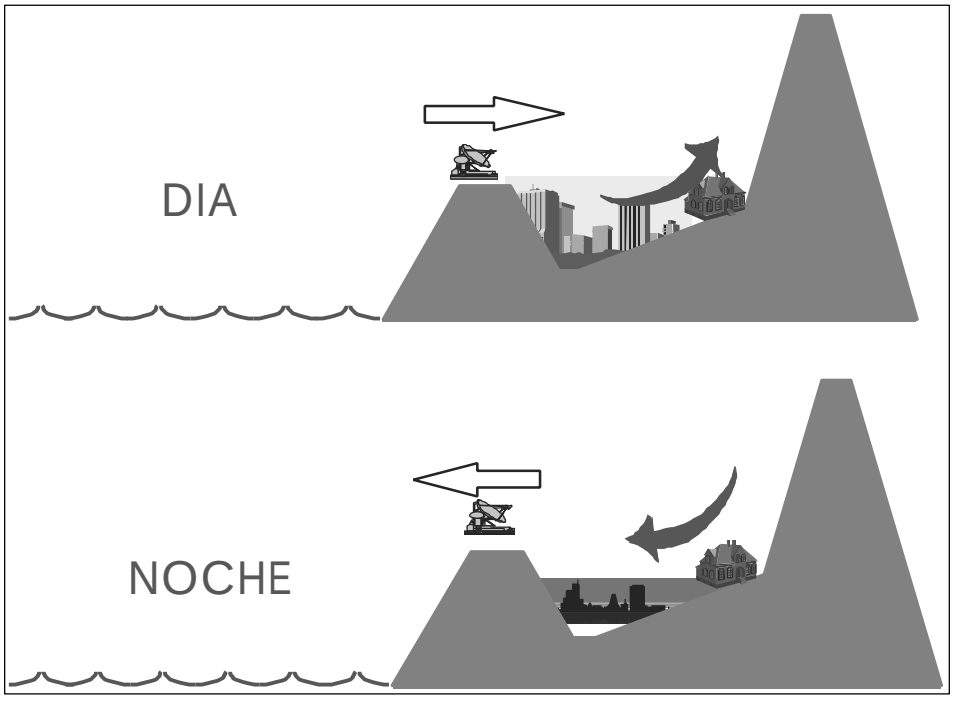
Sistema de brisas

El calentamiento diferencial de las superficies del mar y del continente genera la brisa mar-tierra. Durante el día, el calentamiento más rápido de la masa continental induce un ascenso de aire, el cual deja un vacío que viene a ser llenado por aire más frío marino. Durante la noche, la superficie continental se enfría más rápidamente que la superficie del mar, por lo cual el aire se dirige del continente al mar.

El mismo principio se aplica al calentamiento diferencial entre el valle y la ladera de los cerros circundantes, produciéndose una brisa desde el valle a la montaña durante el día, y de la montaña al valle durante la noche. Así, a través del día, en la cuenca de Santiago se observa una brisa que mueve la masa de aire hacia el sector oriente de la ciudad, encauzándose por los cajones de los ríos Maipo y Mapocho, mientras por la noche el sentido se invierte, y el aire se mueve hacia el poniente. Este comportamiento de los flujos de aire se muestra esquemáticamente en la figura 1.1.

Como se dijo anteriormente, la brisa diurna invernal es más moderada que la brisa diurna estival, por lo que el alcance de la masa de aire contaminada es mayor en verano que en invierno.

Figura 1.1. Presentación esquemática de brisas mar-continente y valle-montaña.



1.2. Episodios de contaminación invernal

Sin embargo, el patrón típico de circulación descrito anteriormente se ve alterado en algunos periodos por la ocurrencia de un fenómeno meteorológico de meso-escala (cientos de kilómetros) denominado vaguada costera. De acuerdo a las investigaciones desarrolladas por el Departamento

de Geofísica de la Universidad de Chile (Rutllant, J. & R. Garreaud, 1995), cerca del 90% de los episodios de contaminación invernal se relaciona con la ocurrencia de estos fenómenos. Las condiciones sinópticas asociadas son definidas por los investigadores como de tipo anticiclónico (A) o de baja pre-frontal (BPF), siendo sus rasgos distintivos los siguientes (CENMA, 1998):

Configuración tipo A

Aproximadamente un 60% de los episodios por MP10 responde a esta configuración sinóptica. Se caracteriza por la irrupción de una dorsal cálida (altas presiones) en la tropósfera media sobre la Zona Central, que reemplaza a una vaguada en altura cuyo eje presenta frecuentemente una orientación NW-SE. En sincronía a esta condición de altura se produce en niveles bajos la formación de una zona de baja presión entre la alta subtropical por el oeste y un centro de alta presión frío de carácter migratorio que se ubica al este de la cordillera de Los Andes. Bajo estas condiciones la cuenca presenta normalmente cielos despejados, viento del este a niveles bajos (tanto en el día como en la noche), una marcada oscilación térmica diaria y descenso en la humedad relativa.

La persistencia de una componente de viento del este, así como el reforzamiento de la inversión térmica, se traduce en una marcada estabilidad del aire en la cuenca y en un pronunciado empeoramiento de las condiciones de calidad por material particulado en el sector poniente de la ciudad, como se muestra en la figura 1.2, en la cual se observa el comportamiento de los índices de material particulado en 4 estaciones de monitoreo de calidad de aire, apreciándose los máximos en la estación de Pudahuel.

La etapa final de la vaguada costera se caracteriza por el ingreso de aire marino saturado a la cuenca, la ocurrencia de viento oeste y el debilitamiento de la inversión térmica, rasgos que permiten una mejor mezcla del aire y una disminución de los niveles de material particulado.

Configuración Tipo BPF

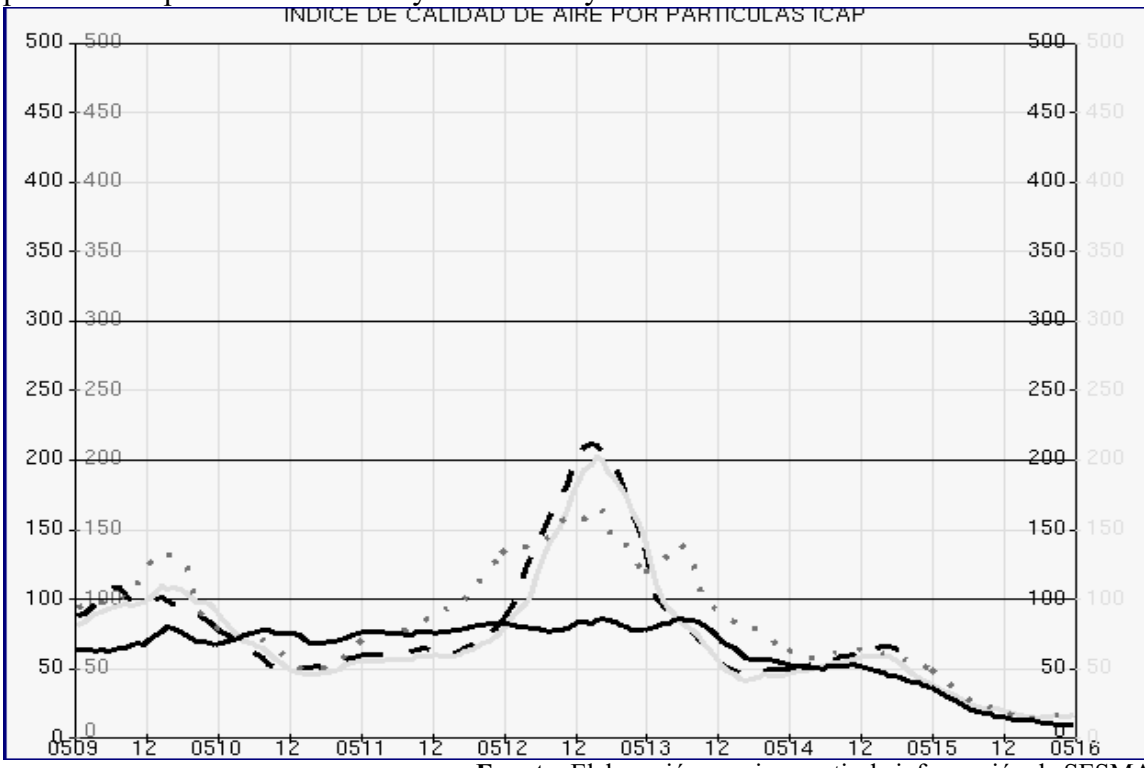
Aproximadamente un 30% de los episodios responde a esta configuración. Se caracteriza por la irrupción de una vaguada en la tropósfera media, acompañando a un sistema frontal débil u ocluido, que pierde energía a medida que se aproxima a la cuenca de Santiago. Se distingue un centro de baja presión al este de la cordillera de Los Andes, y frecuentemente, una alta fría migratoria desplazada sobre el Atlántico. Esta condición está normalmente asociada a cobertura nubosa prefrontal del tipo media y alta, y oscilación térmica diaria moderada o débil.

Durante este tipo de episodios los niveles de material particulado generalmente aumentan en forma homogénea en toda la cuenca, alcanzándose valores más moderados que en los episodios tipo A (ver Figura 1.3).

Figura 1.2. Indices de calidad de aire por partículas en las estaciones de Pudahuel (trazos), Parque O´Higgins (continua gris), La Florida (punteada) y Las Condes (continua negra), para el periodo comprendido entre el 3 y el 5 de mayo de 2000.

Fuente: Elaboración propia a partir de información de SESMA

Figura 1.3. Indices de calidad de aire por partículas en las estaciones de Pudahuel (trazos), Parque O´Higgins (continua gris), La Florida (punteada) y Las Condes (continua negra), para el periodo comprendido entre el 9 y el 15 de mayo de 2000.



Fuente: Elaboración propia a partir de información de SESMA

Es posible la ocurrencia de episodios múltiples o mixtos, en los cuales se produce alternancia de configuraciones A y BPF, con cortos períodos de remisión o relajación intermedios del orden de 24 horas. Normalmente estos episodios mixtos comienzan con una configuración sinóptica tipo A, seguida de una condición tipo BPF.

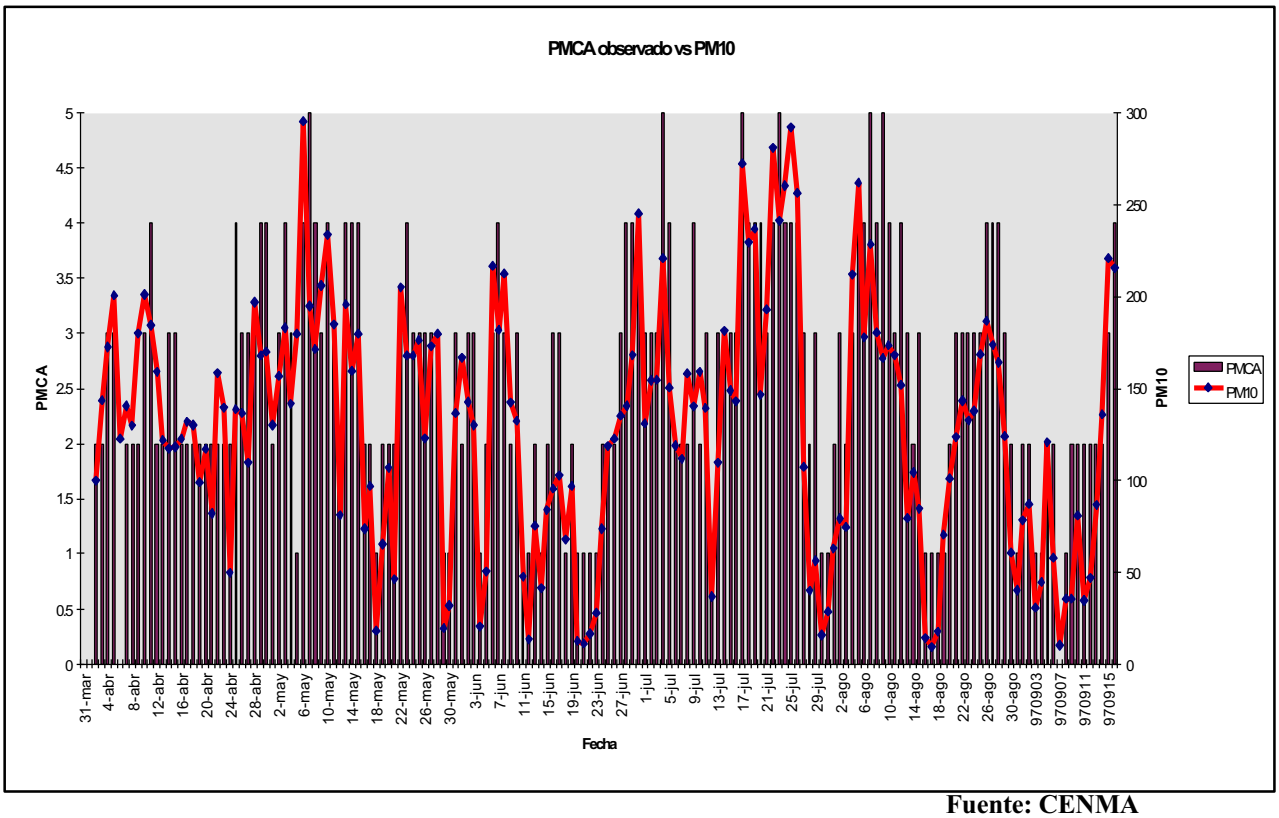
1.3. Pronóstico meteorológico

Por encargo de CONAMA, CENMA realiza diariamente el pronóstico de las condiciones meteorológicas de la Zona central, con orientación a la dispersión de contaminantes. La operación del sistema de pronósticos meteorológicos es realizada en forma ininterrumpida entre el 15 de marzo y el 17 de septiembre por un equipo de tres meteorólogos, quienes cuentan con el apoyo del equipo profesional a cargo de la mantención y operación de la red meteorológica y de profesionales a cargo de la recepción y procesamiento computacional de la información. La rutina operacional contempla los siguientes aspectos:

- Recepción en tiempo real y análisis de información de la red meteorológica local.
- Recepción en tiempo real y análisis de información de la red de monitoreo de calidad de aire.
- Análisis de productos numéricos meteorológicos disponibles en Internet.
- Recepción y análisis de la información meteorológica de carácter sinóptico enviada por la Dirección Meteorológica de Chile.
- Cálculo de parámetros de estabilidad atmosférica.
- Operación de modelo de pronóstico de advección costera.
- Discusión con meteorólogos de turno del Centro de Análisis y Pronósticos de la Dirección Meteorológica de Chile
- Elaboración de 3 Informes diarios: dos matinales y uno vespertino.

Con esta información, los meteorólogos generan además el pronóstico de un indicador denominado Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica (PMCA), el cual se determina a partir del análisis de las condiciones meteorológicas actuales y pronosticadas que afectan la región, según los procedimientos descritos en la descripción del modelo de predicción desarrollado por CONAMA (1998). Este indicador ha mostrado un nivel de asociación alto con la evolución de los promedios de material particulado en la cuenca, como se puede apreciar en la figura 1.4.

Figura 1.4. Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica observado versus promedio diario de material particulado respirable constatado en la cuenca de Santiago para el periodo invernal 1999.



Fuente: CENMA

1.4. Pronóstico de calidad de aire por material particulado

Durante 1998, CONAMA encargó un estudio para mejorar la metodología de pronóstico de calidad de aire en la Región Metropolitana. La descripción de la metodología con que se construyó el modelo se encuentra en el documento "Improvement of the Forecast of Air Quality and the Knowledge of the Local Meteorological Conditions in the Metropolitan Region", que fue desarrollado por el consultor Joseph Cassmassi, meteorólogo senior del Distrito de Calidad de Aire de la Costa Sur de California (Cassmassi, 1999), disponible al público en CONAMA.

El modelo desarrollado (de aquí en adelante modelo *Cassmassi*) pronostica el valor máximo de concentración promedio de 24 horas de material particulado respirable MP10, esperado para el día siguiente, en cada una de las estaciones de monitoreo de calidad de aire de la ciudad de Santiago, clasificadas como estaciones con representatividad poblacional.

La metodología desarrollada está basada en algoritmos de cálculo desarrollados mediante la aplicación de técnicas estadísticas de variables múltiples, enfocadas a encontrar relaciones entre posibles variables predictoras y la variable a predecir. La variable a predecir es la concentración máxima promedio de 24 horas del día siguiente. Los posibles predictores incluyen variables meteorológicas observadas, índices de condiciones meteorológicas observadas y pronosticadas,

concentraciones observadas, índices de variaciones esperadas de emisiones y otros, como se describe en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Variables predictoras utilizadas en el modelo de pronóstico de calidad de aire por material particulado.

Tipos de variables	**Especificaciones**
Variables relacionadas con emisiones	• Día de la semana • Indice de día feriado/no feriado • Factor de cambio de concentraciones según día de la semana usando el modelo CONAMA 98 • Factor de cambio de concentraciones según día de la semana específico para cada estación de monitoreo
Variables de calidad de aire (MP10) para cada estación de monitoreo	• Concentración máxima de 24 horas observada el día anterior • Concentración promedio 24 horas observada a las 10 horas del día actual • Cambios de Concentraciones medias de 24 horas, observados a las 10 horas (en la última hora, últimas 3 horas, últimas 6 horas)
Variables meteorológicas obtenidas del radiosondeo cercano a Santiago (Quintero, Santo Domingo), realizado a las 12 UTC del día actual	• Altura, temperatura, humedad, viento, observados a niveles estándar de presión (100 hPa, 925 hPa, 850 hPa, 500 hPa) • Altura, presión, temperatura de la base y del tope de la capa de inversión térmica cercana a la superficie. • Variables derivadas de las anteriores (espesores, diferencias con el día anterior)
Condiciones meteorológicas de escala sinóptica y regional	• Indice de potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica para el día actual • Indice de Potencial meteorológico de Contaminación Atmosférica pronosticado para el día siguiente
Variables a pronosticar (para cada una de las estaciones monitoras)	• Concentración máxima de 24 horas de MP10 esperada para el día siguiente

Los métodos estadísticos utilizados en la construcción del modelo fueron los siguientes:

- Regresión lineal múltiple usando las variables agregadas según modelo de pronóstico de CONAMA 1998 (concentraciones actuales multiplicadas por cambio esperado según día de la semana, tendencia de las concentraciones en la última hora, cambio pronosticado de condiciones meteorológicas).
- Regresiones lineales múltiples paso a paso, usando todas las variables primitivas del modelo de CONAMA 1998 o un subconjunto de ellas.
- Regresión lineal múltiple usando sólo variables observadas (meteorología de altura, concentraciones observadas, cambios esperados de concentraciones según día de la semana).
- Regresión lineal múltiple usando variables observadas y potencial meteorológico pronosticado.

- Estratificación previa por día de la semana (día laboral, fin de semana), regresión múltiple.
- Estratificación previa por temperatura y humedad en niveles bajos del sondeo (925, 850 hPa) y regresión múltiple.
- Estratificación previa por altura de capa de inversión térmica, regresión múltiple.
- Estratificación previa usando un índice objetivo de condición meteorológica, regresión lineal múltiple.

La aplicación de los diferentes métodos estadísticos da como resultado un gran número de ecuaciones predictivas para cada estación de monitoreo (27 ecuaciones por estación).

Las ecuaciones de pronóstico fueron desarrolladas con la información disponible para los años 1997 y 1998. El período correspondiente al año 1999 fue usado para validar dichas ecuaciones.

Evaluación de los algoritmos de predicción

De acuerdo a los requisitos planteados en la normativa, el pronóstico de calidad de aire debe ser confiable, en cada estación de monitoreo, en un 65% de los días del período válido de aplicación. El acierto del pronóstico se calcula usando los niveles de concentración que definen diferentes grados de emergencia.

La validación de las ecuaciones de pronóstico obtenidas mediante la aplicación de las diferentes técnicas estadísticas, cumple con el criterio anterior.

Debido al gran número de ecuaciones encontradas en cada estación de monitoreo, se aplicó un método para seleccionar las ecuaciones de pronóstico que entregan mejores resultados. Se utilizó un método de asignación de puntajes para calificar la bondad del ajuste del pronóstico, que incluye varios aspectos adicionales al 65% que exige la normativa:

- Porcentaje de exactitud de la predicción, basado en la comparación de niveles pronosticados con niveles observados.
- Error medio absoluto de la predicción (desviación con respecto a las observaciones).
- Porcentaje de pronósticos que están dentro de un rango de error prefijado.
- Porcentaje de pronósticos que están dentro de un rango de error prefijado, cuando ocurre un cambio significativo de concentraciones de un día a otro.
- Porcentaje de exactitud del pronóstico, para los niveles más altos (condiciones de pre-emergencia o emergencia).

La aplicación de esta metodología de evaluación permitió jerarquizar los algoritmos encontrados, ordenándolos de acuerdo al mayor puntaje obtenido al considerar diferentes formas de medir su comportamiento.

La evaluación independiente realizada por Fuenzalida (2000) utiliza la información del período que se extiende desde el 1º de abril al 17 de septiembre de 1999. La validación muestra que todos los modelos cumplen con el requisito legal de acierto y confirma los modelos sugeridos por el consultor.

Algoritmos de predicción propuestos para cada estación monitora
Se seleccionaron dos algoritmos de predicción para cada estación monitora.

Un primer algoritmo incluye el índice de potencial meteorológico pronosticado para el día siguiente; el segundo algoritmo está basado solamente en observaciones (del mismo día y del día anterior).

La tabla 1.2 muestra las ecuaciones correspondientes a los algoritmos de cada estación. Las variables incorporadas en los cálculos se explican más adelante.

Tabla 1.2. Ecuaciones de pronóstico para cada estación de monitoreo de material particulado MP10 con representatividad poblacional.

Estación F La Paz ***Ecuación 1: Regresión múltiple con variables originales del modelo CONAMA*** NC-B = 60.7+17.7*DIFF-17.8*EMIS2+16.5*FTND+0.73*FPM10 ***Ecuación 2: Estratificación según altura de la base de la capa de inversión térmica*** ***BASESANT =< 5000 m*** HSB24O = 87.0+0.53*DH500-0.29*DTHICK+0.59*FE1-0.46*AVGRH+14.1*FTND ***BASESANT > 5000 m*** HSB24O = 118.7-1.21*FPM10-0.79*FF925+1.66*FE1-0.72*RH925
Estación L La Florida ***Ecuación 1: Regresión múltiple con tendencias de concentraciones específicas por estación y potencial meteorológico pronosticado.*** MPP-A = 58.0+15.4*DIFF+0.31*LE1+24.2*LTND+0.32*LPM10 ***Ecuación 2: Estratificación según altura de la base de la capa de inversión térmica*** ***BASESANT =< 5000 m*** HSB24O = 62.1+2.65*T900+0.25*DH500+0.45*LE1 ***BASESANT > 5000 m*** HSB24O = 176.0+0.38*LE1-1.43*RH925+25.1*LTND
Estación M Las Condes ***Ecuación 1: Regresión múltiple con variables observadas y potencial pronosticado*** HNS24S = 4.6+6.9*MI1-4.34*T925-0.79*FF850+2.09*THICK -0.03*DDD925+0.48*ME1-0.45*RH925 ***Ecuación 2: Estratificación según altura de la base de la capa de inversión térmica*** ***BASESANT =< 5000 m*** HSB24O = 60.0+0.04*DDP925+0.62*ME1-0.23*AVGRH ***BASESANT > 5000 m*** HSB24O = 68.0-0.77*MPM10+3.44*T900-1.26*FF850+1.08*ME1-0.47*AVGRH

Continuación Tabla 1.2.

Estación N Parque O'Higgins

Ecuación 1: Modelo CONAMA
CONAMA = NPM10*EMIS2+45*DIFF+22.5*NTND

Ecuación 2: Estratificación según altura de la base de la capa de inversión térmica
BASESANT =< 5000 m
HSB24O = 109.9-1.25*FF850+1.85*DELTAT+0.23*DH500+0.45*NE1 -0.51*AVGRH+17.4*NTND
BASESANT > 5000 m
HSB24O = 125.9-1.25*NPM10+0.22*DH500+1.64*NE1-0.79*AVGRH

Estación O Pudahuel

Ecuación 1: Regresión múltiple con variables observadas y potencial pronosticado
HNS24S = -21.7+39.4*MI1+0.33*OPM10+2.06*T925+0.21*DH500

Ecuación 2: Estratificación según condición meteorológica
Configuración 1
YSI24O = 90.8-1.556*FF850+0.48*OE1
Configuración 2
YSI24O = 29.0+0.44*OPM10+6.32*T925+1.53*DH500-1.05*DTHICK
Configuración 3
YSI24O = 159.7+0.58*DH500+0.40*OE1-0.99*AVGRH

Estación P Cerrillos

Ecuación 1: Modelo CONAMA
CONAMA = PPM10*EMIS2+45*DIFF+22.5*PTND

Ecuación 2: Estratificación según altura de la base de la capa de inversión térmica
BASESANT =< 5000 m
HSB24O = 117.2+0.76*DH500-0.40*DTHICK+0.52*PE1-0.58*RH925
BASESANT > 5000 m
HSB24O = 150.1+0.58*DH500-0.56*DTHICK+0.40*PE1-1.23*AVGRH

Estación Q El Bosque

Ecuación 1: Regresión múltiple con tendencias de concentraciones específicas por estación y potencial meteorológico pronosticado.
MPP-A = 52.9+12.8*DIFF+0.66*QE1

Ecuación 2: Estratificación según altura de la base de la capa de inversión térmica
BASESANT =< 5000 m
HSB24O = 100+0.30*DH500+0.56*QE1-0.59*RH925+19.0*QTND
BASESANT > 5000 m
HSB24O = 197.9-1.42*AVGRH

Tabla 1.3. Descripción de las variables usadas en las ecuaciones de pronóstico

Variable	Unidades	Descripción
AVGRH	%	Humedad relativa promedio 850-925 hPa a las 12 UTC
BASESANT	metros	Altura de la base de la capa de inversión térmica sobre Santiago, a las 12 UTC
DDD925	grados	Cambio en 24 h de la Dirección del Viento del nivel 925 hPa, a las 12 h
DDP925	hPa	Cambio en 24 h de la Depresión del Punto de Rocío del nivel 925 hPa, a las 12 h
DELTAT	C	Diferencia de temperatura entre el tope y la base de la capa de inversión, a las 12 UTC
DH500	metros	Cambio en 24 h de la altura del nivel 500 hPa, a las 12 h
DTHICK	metros	Cambio en 24 h del espesor 500-1000 hPa, a las 12 UTC
FF850	nudos	Velocidad del viento del nivel 850 hPa a las 12 UTC
FF925	nudos	Velocidad del viento del nivel 925 hPa a las 12 UTC
RH925	%	Humedad relativa del nivel 925 hPa a las 12 UTC
T900	C	Temperatura del nivel 900 hPa a las 12 UTC
T925	C	Temperatura del nivel 925 hPa a las 12 UTC
THICK	metros	Espesor 500-1000 hPa a las 12 UTC
MI1		Indice de Potencial Meteorológico pronosticado para el día siguiente
DIFF		Diferencia entre el índice de potencial meteorológico pronosticado para el día siguiente y el índice del día actual
EMIS2		Factor de cambio de las concentraciones según día de la semana usado en el modelo CONAMA (1+[cambio de conc]/100)
FE1	µg/m3	Cambio esperado de concentraciones según día de la semana, estación La Paz
FPM10	µg/m3	Concentración promedio 24 h a las 10 h, estación La Paz
FTND	µg/m3	Cambio en 1 h de concentración promedio de 24 h, a las 10 h, estación La Paz
LE1	µg/m3	Cambio esperado de concentraciones según día de la semana, estación La Florida
LTND	µg/m3	Cambio en 1 h de concentración promedio de 24 h, a las 10 h, estación La Florida
ME1	µg/m3	Cambio esperado de concentraciones en 24 h según día de la semana, estación Las Condes
MPM10	µg/m3	Concentración promedio 24 h a las 10 h, estación Las Condes
NE1	µg/m3	Cambio esperado de concentraciones en 24 h según día de la semana, estación Parque O'Higgins
NPM10	µg/m3	Concentración promedio 24 h a las 10 h, estación Parque O'Higgins
NTND	µg/m3	Cambio en 1 h de concentración promedio de 24 h, a las 10 h, estación Parque O'Higgins
OE1	µg/m3	Cambio esperado de concentraciones en 24 h según día de la semana, estación Pudahuel
OPM10	µg/m3	Concentración de MP10 promedio 24 h a las 10 h, estación Pudahuel
PE1	µg/m3	Cambio esperado de concentraciones en 24 h según día de la semana, estación Cerrillos
PPM10	µg/m3	Concentración de MP10 promedio 24 h a las 10 h, estación Cerrillos
PTND	µg/m3	Cambio en 1 h de concentración promedio de 24 h, a las 10 h, estación Cerrillos
QE1	µg/m3	Cambio esperado de concentraciones en 24 h según día de la semana, estación El Bosque
QTND	µg/m3	Cambio en 1 h de concentración promedio de 24 h, a las 10 h, estación El Bosque

Todos los resultados obtenidos con las ecuaciones corresponden a concentraciones máximas promedio de 24 h de MP10, pronosticadas para el próximo día, expresadas en (µg/m3).

La nomenclatura empleada para la variable a calcular (lado izquierdo de las ecuaciones) está asociada al método estadístico usado por el consultor para obtener cada ecuación.

Aplicación operacional del modelo

La aplicación diaria de las ecuaciones de pronóstico de calidad de aire requiere disponer de información actualizada de concentraciones de material particulado respirable MP10, variables meteorológicas de altura y potencial meteorológico actual y pronosticado.

Concentraciones de material particulado respirable MP10

La información base corresponde a valores promedio para 1 h. A partir de esa información, se calculan los promedios para períodos de 24 h y las tendencias de las concentraciones promedio de 24 h.

Los promedios de 24 h se calculan cuando el número de horas con información es igual o superior a 18. En caso que el número de horas con información fuera menor a 18, no se calculan promedios de 24 h.

Variables meteorológicas de altura

La información base proviene del radiosondeo diario de las 12 UTC disponible para la zona central del país, realizado en el lugar más cercano a la cuenca de Santiago por la Dirección Meteorológica de Chile. Algunas variables usadas en las ecuaciones de pronóstico se calculan directamente de la información base.

En caso que la información del radiosondeo de las 12 UTC no esté disponible en el momento de preparar el pronóstico, se utilizará la información de la medición anterior, extrapolada a la hora 12 UTC, o la información de estaciones cercanas, de acuerdo a procedimientos usualmente aplicados en los servicios de pronóstico meteorológico.

Prioridad de las ecuaciones de pronóstico

De acuerdo a la jerarquización de las ecuaciones de pronóstico propuestas y las recomendaciones del consultor, el pronóstico de calidad de aire estará basado en la primera ecuación propuesta. En caso que no fuera posible aplicar esa ecuación por falta de información, se utilizará la segunda ecuación propuesta.

1.4. Referencias bibliográficas

1. Rutllant, J. & R. Garreaud, 1995: “Meteorological Air Pollution Potential for Santiago, Chile: Towards an Objetive Forecasting”, Environmental Monitoring and Assesment 34: 223-244.
2. Cassmassi, J.C., 1999: "Improvement of the Forecast of Air Quality and of the Knowledge of the Local Meteorological Conditions in the Metropolitan Region". Technical Reports No.1, 2, 3. Submitted to: National Commission of the Environment, Metropolitan Region, Santiago, Chile.
3. CENMA, 2000, Proyecto Meteorología y Calidad del Aire, Informe interno para CONAMA.
4. CENMA, 1998, Proyecto Meteorología y Calidad del Aire, Informe Final para CONAMA, Anexos Técnicos Vol. 1.
5. CONAMA 1998, "Modelo predictor de calidad de aire para Material Particulado Respirable MP10". Informe Técnico. Comisión Nacional del Medio Ambiente, Región Metropolitana.
6. Fuenzalida, H, 2000: "Evaluación de los Informes Técnicos No. 2 y 3, Mejoramiento del pronóstico de calidad del aire y del conocimiento de las condiciones meteorológicas locales de la Región Metropolitana". Informe Técnico. Preparado para Comisión Nacional del Medio Ambiente, Región Metropolitana, Santiago, Chile.