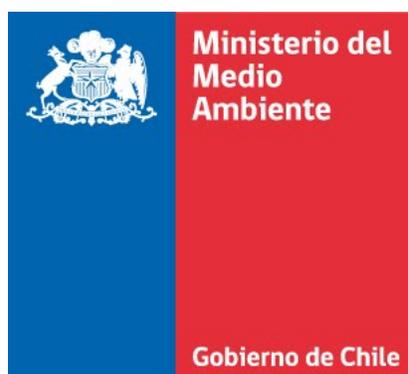


De acuerdo al:
Contrato ID 611136-1-L118
13 MAR 2018

Informe final

“Implementación y Operación Sistema de Pronóstico para Material Particulado (MP10 y MP2,5) para la ciudad de Coyhaique”



Preparado por:

meteodata
Especialistas en Meteorología y Calidad del Aire

29 de octubre de 2018

1. Introducción

El presente documento corresponde al *Informe final* elaborado por Ingeniería y Geofísica Limitada (Meteodata), en el marco de la licitación pública (611136-1-L118) del Ministerio de Medio Ambiente - Subsecretaría del Medio Ambiente, cuyas bases administrativas, técnicas y documentos anexos fueron aprobados mediante la Resolución Excenta 85, del 15 de febrero de 2018, y del contrato homónimo y de igual numeración, denominado “*Implementación y Operación Sistema de Pronóstico para Material Particulado (MP10 y MP2,5) para la ciudad de Coyhaique*”, firmado entre Ingeniería y Geofísica Limitada, representada por don Rainer Schmitz y el Ministerio de Medio Ambiente - Subsecretaría del Medio Ambiente, representada por la Secretaria Regional Ministerial (SEREMI) del Medio Ambiente de la Región de Aysén, doña Jimena Silva Huerta, con fecha 13 de marzo de 2018.

Según lo requerido en la Resolución excenta 85, del 15 de febrero de 2018, numeral 21.2 de las Bases Administrativas, este informe incluye lo siguiente:

- Los resultados de todas las actividades definidas en las Bases Técnicas.

A continuación se citan los numerales 3.1, 3.2 y 3.3 de las Bases Técnicas de la Resolución excenta 85, del 15 de febrero de 2018.

3.1 Desarrollar en base a modelación numérica y/o técnicas estadísticas un sistema de pronóstico diario de calidad del aire para la ciudad de Coyhaique.

- i) Implementar a partir de herramientas de modelación numérica y/o técnicas estadísticas “MOS” (Model Output Statistics), un sistema de pronóstico de calidad del aire para MP10 y MP2,5.
- ii) Disponer de un sistema de acceso a la información diaria del pronóstico implementado para uso de los profesionales de la SEREMI de Medio Ambiente de la Región de Aysén.

3.2 Implementar y operar el sistema de pronóstico de calidad del aire para MP10 y MP2,5 durante el periodo que comprende desde el 1 de abril al 30 de septiembre de 2018.

- i) Operar el Sistema de Pronóstico de Calidad del Aire implementado durante el periodo otoño invierno, tal que se cuente diariamente con resultados de pronóstico de calidad del aire esperada para MP10 y MP2,5 para al menos 3 días.
- ii) Generar reportes consolidados mensuales de pronóstico de Calidad del Aire en comparación con los datos observados en las estaciones de monitoreo, y un informe final del periodo de operación. Los informes podrán ser enviados a través de correo electrónico dirigido a la contraparte del estudio.

3.3 Desarrollar una evaluación de desempeño del sistema de pronóstico de calidad del aire implementado.

- i) A partir de los resultados de la actividad 3.1 y 3.2 desarrollar un informe de análisis de desempeño del sistema de pronóstico implementado.
- ii) Desarrollo de propuestas de mejoras para pronóstico de calidad del aire operado.

El plazo de entrega pactado para el informe, según el numeral 21.2 de las Bases Administrativas de la Resolución excenta 85, del 15 de febrero de 2018 es hasta 15 días antes de la fecha de término del contrato, lo cual establece como fecha límite el 29 de octubre de 2018.

Las secciones siguientes entregan el detalle de cada uno de los puntos requeridos para el presente **Informe Final**. La sección 2 entrega una descripción de las herramientas y técnicas utilizadas para la implementación del pronóstico. La sección 3 describe el tipo de sistema de acceso a la información, así como la información presentada en éste. La sección 4 describe la operación del sistema. La sección 5 describe los contenidos del reporte de comparación de los pronósticos y las observaciones entregados mensualmente a la SEREMI de Medio Ambiente de la Región de Aysén y el respectivo informe final consolidado de los resultados para todo el periodo de operación. La sección 6 entrega un análisis del desempeño del pronóstico implementado y operado entre abril y septiembre de 2018. Finalmente, la sección 7 entrega propuestas para mejorar los pronósticos de calidad del aire a partir de los resultados del análisis de desempeño entregado en la sección anterior. En los Anexos (sección 8) se presenta el reporte final para todo el periodo de operación, descrito en la sección 5.

2. Desarrollo de pronóstico

Ingeniería y Geofísica Limitada ha implementado un pronóstico de calidad del aire para MP10 y MP2.5 para la ciudad de Coyhaique. Este pronóstico corresponde a la implementación de un MOS ("Model Output Statistics"), el cual corresponde a la aplicación de técnicas estadísticas para mejorar un pronóstico numérico determinístico; a continuación se explica con mayor detalle en qué consiste este método.

Dentro de las distintos métodos de pronóstico, los más simples (basados principalmente en la estadística) poseen un alcance temporal limitado; por sobre 6-12 horas la variabilidad espacial de la atmósfera empieza a jugar un rol importante, lo que obliga el uso de modelos dinámicos en el sistema de pronóstico. Los modelos más usados son los "modelos globales", los cuales dividen su dominio computacional en una grilla 3-D que cubre toda la superficie de la Tierra (hasta 30km en la vertical) con resoluciones espaciales típicas de 25km en la horizontal y 50m en la vertical cerca de la superficie. El sistema de asimilación de datos y modelo dinámico global de mayor renombre es el modelo GFS ("Global Forecast System") de Estados Unidos. Este modelo cuenta, para su inicialización, con datos provenientes de todas las estaciones meteorológicas del planeta, radiosondeos y datos satelitales, y es ampliamente utilizado debido a que sus datos se encuentran libremente disponibles.

Los modelos globales presentan errores inevitables (como sesgos u otros errores sistemáticos) debido a la falta de datos para definir una condición inicial exacta, en cambio, los procesos físicos son representados a través de aproximaciones; además, sus resoluciones espaciales no son capaces de representar perfectamente rasgos topográficos de escala local. Para mejorar la calidad de estos modelos globales, en el contexto de la gestación de un pronóstico del tiempo atmosférico y/o calidad del aire operacional (como es el caso de interés), es posible (y se hace de manera común) establecer relaciones empíricas entre las variables observadas y el pronóstico numérico. La mejora se obtiene debido a que sólo las observaciones pueden dar a conocer la variabilidad inter e intradiaria de una variable que está dada por fenómenos locales determinados por la topografía y el tipo de suelo, luego, un modelo numérico global por si solo es insuficiente al momento de reproducir estos fenómenos y se requiere la utilización de un pronóstico más detallado. Cuando se cuenta con una larga serie de tiempo de datos observados, es posible “entrenar” un modelo estadístico con el fin de detectar conexiones entre las observaciones locales y los fenómenos de escala sinóptica (representadas por el modelo global), así como las correlaciones pasadas y con ello predecir su comportamiento futuro.

Como ya se ha mencionado, esta técnica se conoce como MOS. Un MOS busca relaciones empíricas entre un conjunto de predictores y la variable que se desea pronosticar (el predictando, que en este caso es el material particulado MP10 y MP2.5), para una cierta hora en el futuro ($t_0 + h$). Los MOS más tradicionales se basan en la técnica de regresión lineal múltiple paso a paso, con ellas las relaciones entre los predictores disponibles en el tiempo t_0 y el predictando en el tiempo $t_0 + h$ se representan a través de una ecuación lineal. La técnica de regresión lineal múltiple tiene la ventaja de ser eficiente y fácil de entender; no obstante, tiene la desventaja de ser capaz de encontrar sólo las relaciones empíricas lineales, por lo cual, en los casos necesarios, ésta es reemplazada por métodos estadísticos computacionales más sofisticados y generales.

Un factor a tener en cuenta en cualquier sistema de pronóstico es que existe incertidumbre asociada a los datos utilizados, lo que deriva en errores en los pronósticos que son mayores para las variables de contaminación atmosférica que para las meteorológicas; los errores pueden deberse a distintos factores como aproximaciones de los modelos usados, errores en las mediciones y falta de representatividad de la medición. Luego, es necesario que los pronósticos reflejen el grado de incertidumbre al que están asociados. Para cumplir este objetivo se ha implementado un proceso de pronóstico probabilístico a partir de los pronósticos MOS. Este proceso entrega una probabilidad de ocurrencia de eventos para cada una de las categorías de la norma primaria de calidad del aire para MP10 y MP2.5 (BUENO/REGULAR, ALERTA, PREEMERGENCIA y EMERGENCIA) dado un cierto pronóstico determinístico MOS. A continuación una breve descripción del proceso.

- Se genera un pronóstico MOS determinístico para la variable de interés.
- Se calculan los promedios diarios (no móviles) de los pronósticos determinísticos.
- Se aplica una función de transferencia empírica (calculada con todos los datos disponibles)

para ajustar el rango de los datos de pronóstico a las observaciones asegurando que los resultados del pronóstico entreguen valores en todo el rango de las observaciones (de este proceso deriva un pronóstico MOS determinístico diario ajustado).

- Se ajusta una distribución de probabilidad a los resultados del pronóstico respecto de las observaciones en distintos intervalos.
- Se obtiene una distribución de probabilidad de la ocurrencia de eventos de acuerdo a los distintos niveles establecidos en las normas primarias de calidad del aire.

En el marco de esta licitación pública, Ingeniería y Geofísica Limitada ha implementado de manera operacional el entrenamiento diario de un pronóstico MOS a partir de las observaciones actualizadas de las estaciones Coyhaique I y Coyhaique II (máximos horarios), de la red de monitoreo meteorológica y de calidad del aire del Ministerio de Medio Ambiente (disponibles en línea a través del sistema AirViro), y de los datos del modelo GFS. Ambos conjuntos de datos se actualizan de manera constante (varias veces al día) en los servidores de la empresa, con el fin de obtener un pronóstico que incluya las últimas variaciones en el comportamiento de la variable a pronosticar. Con lo anterior se obtiene de manera diaria un pronóstico a 3 días que, además, incluye la variable meteorológica Temperatura, la cual se relaciona estrechamente con el comportamiento de los contaminantes MP10 y MP2.5. Además, se implementó de manera operacional el cálculo del pronóstico MOS ajustado y la probabilidad de ocurrencia de eventos para las distintas categorías establecidas en la legislación vigente (proceso descrito arriba). Los resultados del pronóstico se actualizan y se publican de manera diaria a través de una página web especialmente diseñada e implementada para dicho propósito. La sección siguiente entrega detalles de la página web como sistema de acceso a la información según lo requerido en las bases técnicas de la licitación.

3. Sistema de acceso a la información

Los pronósticos emitidos se encuentran diariamente disponibles en el sitio web coyhaique.meteodata.cl, para dar cumplimiento con lo solicitado en las bases técnicas de la licitación pública respecto de proporcional acceso a la información diaria del pronóstico para el uso de los profesionales de la SEREMI de Medio Ambiente de la Región de Aysén. En el sitio, es posible encontrar dos paneles; el panel superior muestra el pronóstico determinístico ajustado y probabilístico para MP10 y MP2.5; el panel inferior muestra el desempeño histórico del pronóstico a nivel horario y/o diario.

La figura 1 muestra un ejemplo de los paneles disponibles en el sitio web del pronóstico de Material Particulado (MP) para Coyhaique. En el panel superior se presenta la fecha y hora de emisión del pronóstico, junto con los pronósticos respectivos de MP10 y MP2.5 para los siguientes 3 días, en forma de tabla; la primera columna muestra la fecha de pronóstico; la segunda columna presenta el pronóstico determinístico ajustado (descrito en la sección anterior) en $\mu g/m^3$; las columnas

tercera a sexta muestran el porcentaje de probabilidad de que, a partir del pronóstico MOS ajustado, el valor real se encuentre en las categorías de "Bueno/Regular", "Alerta", "Preemergencia" o "Emergencia", respectivamente (se destaca con color la máxima probabilidad). El panel inferior muestra las series de tiempo de las observaciones y pronósticos de MP (arriba) y temperatura (abajo) para una ventana de tiempo determinada a nivel horario o diario; con la opción *Zoom* de la esquina superior izquierda es posible elegir entre desplegar los datos de la última semana (*1s*) a nivel horario, el último mes (*1M*) a nivel horario, o la serie de tiempo completa (*todos*) a nivel diario; con las opciones *From - To* de la esquina superior derecha es posible escoger una ventana de tiempo específica a partir de una fecha en formato *Mes DD, AAAA*; en la parte inferior del panel (sobre la leyenda) es posible encontrar una barra que muestra la serie de MP10 completa a nivel diario (a modo de ejemplo), la cual permite seleccionar un intervalo de tiempo arrastrando los bordes de la ventana azul provista para dicho fin. Finalmente, cabe mencionar que pasando el cursor por sobre las series de tiempo, es posible visualizar los valores de las observaciones y los pronósticos MOS brutos.

4. Operación del sistema de pronóstico

Como se mencionó en la sección 2, diariamente (los 7 días de la semana) durante la mañana, automáticamente, tanto las observaciones como los pronósticos del modelo global GFS se actualizan en los servidores de Ingeniería y Geofísica Limitada; posteriormente se entrena un MOS con todos los datos históricos disponibles hasta la fecha, para finalmente emitir un pronóstico basado en la ecuación lineal obtenida del proceso de entrenamiento, que relaciona los predictores (pronósticos GFS para el tiempo futuro) y la variable de interés. También, automáticamente, los pronósticos son reprocesados para obtener el pronóstico probabilístico descrito anteriormente y éstos son desplegado en el sitio web del pronóstico. Cabe destacar que a pesar de que el proceso en sí no requiere de la intervención humana, los profesionales de Ingeniería y Geofísica Limitada se encuentran atentos a proporcionar las condiciones necesarias para el correcto funcionamiento del sistema (suministro de energía y conexión web disponible a toda hora y todos los días de la semana), así como de cualquier posible fallo de éste, además de realizar un trabajo constante en la mejora del funcionamiento del sistema.

5. Reportes mensuales/final de la comparación entre los pronósticos y las observaciones

Según lo requerido en las bases técnicas de la licitación pública, a finales de cada mes se genera y se entrega vía correo electrónico a la SEREMI de Medio Ambiente de la Región de Aysén, un reporte de una comparación cuantitativa y visual entre los pronósticos emitidos y las observaciones a 1 día para material particulado MP10 y MP2.5. Un reporte equivalente para todo el periodo de operación (abril a septiembre de 2018), se adjunta al presente informe. Esta comparación se realiza a nivel diario para material particulado; para lo cual se realizan promedios diarios (no

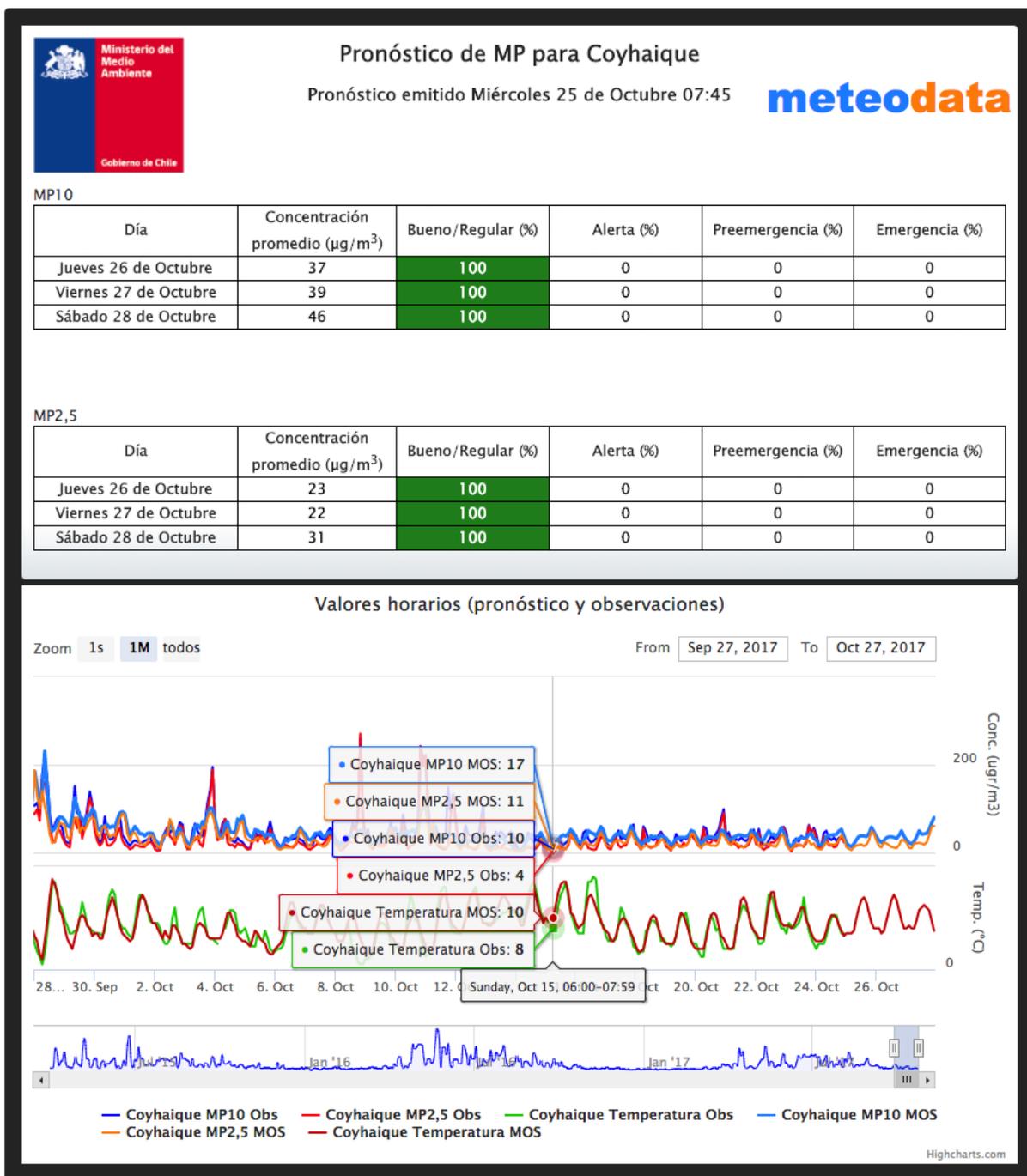


Figura 1: Ejemplo de paneles visibles dentro de la página web del pronóstico de MP para Coyhaique.

móviles) de los pronósticos emitidos y las observaciones registradas a nivel horario. En secciones separadas para cada una de las variables pronosticadas (Temperatura, Material Particulado MP10 y MP2.5) se entrega lo siguiente:

- Una tabla de estadística que incluye el promedio, la desviación estándar, el máximo y el mínimo, para los datos horarios, tanto de las observaciones como de los pronósticos, además de la desviación estándar del error, el sesgo, el coeficiente de correlación y la pendiente entre ambas series de datos horarios (sólo para Temperatura).

- Una tabla de estadística que incluye el promedio, la desviación estándar, el máximo y el mínimo, para los máximos diarios, tanto de las observaciones como de los pronósticos, además de la desviación estándar del error, el sesgo, el coeficiente de correlación y la pendiente entre ambas series de máximos diarios (sólo para Temperatura).
- Una tabla de estadística que incluye el promedio, la desviación estándar, el máximo y el mínimo, para los mínimos diarios, tanto de las observaciones como de los pronósticos, además de la desviación estándar del error, el sesgo, el coeficiente de correlación y la pendiente entre ambas series de mínimos diarios (sólo para Temperatura).
- Una tabla de estadística que incluye el promedio, la desviación estándar, el máximo y el mínimo, para los promedios diarios, tanto de las observaciones como de los pronósticos, además de la desviación estándar del error, el sesgo, el coeficiente de correlación y la pendiente entre ambas series de promedios diarios (sólo para Material Particulado).
- Las series de tiempo horarias de las observaciones y los pronósticos.
- Las series de tiempo diarias (máximos y mínimos diarios) de las observaciones y los pronósticos (sólo Temperatura).
- Las series de tiempo diarias (promedios diarios) de las observaciones y los pronósticos (sólo para Material Particulado).
- Diagrama de dispersión a nivel horario entre las observaciones y los pronósticos (sólo para Temperatura).
- Diagrama de dispersión a nivel diario (máximos y mínimos diarios) entre las observaciones y los pronósticos (sólo para Material Particulado).
- Diagrama de dispersión a nivel diario (promedios diarios) entre las observaciones y los pronósticos (sólo para Material Particulado).
- Tabla de contingencia según la norma primaria de calidad del aire para MP10 (*Decreto N°59, de 1998*) y la norma primaria de calidad del aire para MP2.5 (*Decreto N°12, del 2011*). Ésta nos entrega el porcentaje de pronósticos acertados, así como la cantidad de falsas alarmas y eventos no pronosticados.

En el Anexo (sección 8) se entrega una copia de los reportes mensuales de abril a septiembre de 2018 y del reporte final consolidado. Cabe mencionar que no existe manipulación de los datos (resultados del pronóstico MOS y observaciones) para la generación de las tablas y figuras incluidas en el reporte, de modo que lo presentado en el reporte es un reflejo fiel del desempeño del pronóstico MOS bruto (sin ajuste con función de transferencia empírica) a 1 día para Material Particulado MP10 y MP2.5, y Temperatura.

6. Análisis de desempeño del pronóstico

La presente sección presenta un resumen del desempeño del pronóstico emitido para Coyhaique durante el periodo de operación, es decir, entre abril y septiembre de 2018. El análisis se realiza principalmente de modo cuantitativo a través de tablas de estadística comparativas entre el pronóstico y las observaciones, tablas de estadísticos de verificación del desempeño del pronóstico, tablas de contingencia del pronóstico determinístico y tablas de promedios de los porcentajes de probabilidad pronosticados, que resumen las principales similitudes y diferencias entre las observaciones y los pronósticos; y una componente cualitativa a través de la presentación de diagramas de dispersión, los cuales muestran visualmente las características del pronóstico determinístico. Los resultados se corresponden con los pronósticos emitidos a través de la página web descrita en la sección 3, es decir, los pronósticos obtenidos de la aplicación de la función de transferencia empírica mencionada en la sección 2 sobre los pronósticos MOS originales.

En las subsecciones siguientes se puede encontrar cada uno de los elementos antes mencionados para los pronósticos a 1 día, 2 días y 3 días de anticipación, respectivamente.

Las tablas 1 y 2 resumen y detallan los “eventos” de calidad del aire para el periodo abril a septiembre de 2018. Durante este periodo se registraron 25 alertas, 25 preemergencias y 26 emergencia, todas por altos niveles de MP2.5 (10 donde también se observaron altos niveles de MP10).

A continuación, el detalle del análisis de desempeño del pronóstico a partir de cada elemento comparativo:

- **Coefficiente de correlación:** en primer lugar se muestra una tabla con el coeficiente de correlación de Pearson entre las series de tiempo de promedios diarios del pronóstico MOS de MP10 y MP2.5, y los respectivos promedios diarios observados. El coeficiente de correlación, es una medida de la relación lineal entre dos series de tiempo; su valor varía entre 0 y 1, donde 1 representa una relación perfecta, es decir, cuando una serie aumenta su valor, la otra también lo hace, y vice-versa. De las tablas se puede ver que, en todos los casos, la correlación se encuentra entre 0,82 y 0,84 (pronóstico MOS explica entre un 67 % y un 71 % de la variabilidad de las observaciones), lo cual es una alta correlación para un pronóstico de calidad del aire, siendo levemente mayor la correlación entre el pronóstico de MP10 que para los pronósticos de MP2.5.
- **Tabla de estadística:** luego, se puede encontrar una tabla que resume los principales estadísticos de los conjuntos de datos de pronóstico y de observaciones, para todo el periodo de operación (abril a septiembre de 2018), incluyendo el promedio (media aritmética, calculada como la suma de todos los elementos de un conjunto, dividida por el total de elementos de éste), la desviación estándar (que da cuenta de la dispersión de un conjunto de datos, calculada como la raíz cuadrada de la varianza; siendo la varianza la suma de las diferencias cuadráticas de cada elemento del conjunto respecto de la media aritmética, dividida por el total de elementos de éste), el valor mínimo y el valor máximo, tanto para la serie

de tiempo completa, como separada por los rangos de ocurrencia de eventos especificados en la normativa vigente (MP10; Bueno/Regular $< 195\mu\text{g}/\text{m}^3$; Alerta $\geq 195, < 240\mu\text{g}/\text{m}^3$; Preemergencia $\geq 240, < 330\mu\text{g}/\text{m}^3$; Emergencia $\geq 330\mu\text{g}/\text{m}^3$. MP2.5; Bueno/Regular $< 80\mu\text{g}/\text{m}^3$; Alerta $\geq 80, < 110\mu\text{g}/\text{m}^3$; Preemergencia $\geq 110, < 170\mu\text{g}/\text{m}^3$; Emergencia $\geq 170\mu\text{g}/\text{m}^3$). Para el cálculo de los estadísticos correspondientes a los pronósticos, se ha considerado el conjunto de pronósticos determinado por la ocurrencia de eventos según las observaciones; por ejemplo, para el cálculo de los estadísticos en la categoría BUENO/REGULAR, se han considerado los pronósticos emitidos cuando las observaciones se encontraron en dicha categoría, de modo que los pronósticos no necesariamente se encuentran en el rango $< 195\mu\text{g}/\text{m}^3$; lo anterior es así para mostrar la dispersión de los pronósticos en cada categoría. Se observa que el rango del pronóstico es, en general, más acotado que el de las observaciones, sobreestimando los mínimos y subestimando los máximos, así mismo, en general, su dispersión es menor, sin embargo, considerando cada categoría, se observa que la dispersión de los pronósticos es mayor que la de las observaciones y se extiende fuera de los límites de los rangos establecidos. Lo anterior se debe, en parte, a que los rangos establecidos para cada categoría son arbitrarios y no representan una discontinuidad física que el pronóstico pueda identificar; esta situación es válida para cualquier pronóstico de igual naturaleza, lo que hace difícil que un pronóstico determinístico como éste tenga un desempeño perfecto al ser utilizado como un pronóstico categórico, haciendo necesario considerar más bien un pronóstico probabilístico.

- Tabla de estadísticos de verificación:** a continuación de las tablas de estadísticas, se encuentran tablas de estadísticos de verificación del pronóstico, que incluyen el RMSE (por su nombre en inglés *Root Mean Square Error* o Raíz cuadrada del Error Cuadrático Medio), calculado como la raíz cuadrada de la suma de las diferencias cuadráticas entre las observaciones y el pronóstico, dividida por el total de diferencias; el MAE (por su nombre en inglés *Mean Absolute Error* o Error Absoluto Medio), calculado como la suma de las diferencias absolutas entre las observaciones y el pronóstico, dividida por el total de diferencias; y el BIAS (*Mean Error* o Error Medio), calculado como la suma de las diferencias entre las observaciones y el pronóstico, dividida por el total de diferencias. Cada uno de los estadísticos anteriores da cuenta del desempeño del pronóstico. El MAE nos entrega una medida de la *precisión* del pronóstico, así como el RMSE, sin embargo, éste último al ser cuadrático es más sensible a grandes errores y a los valores extremos; el BIAS por su parte, al ser el error medio da cuenta del sesgo entre el pronóstico y las observaciones, es decir un BIAS positivo indica una subestimación de las observaciones, mientras que uno negativo indica una sobrestimación. Se observan estadísticos similares para MP10 y MP2.5, con MAEs que llegan cerca de los $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ y RMSEs cercanos en torno a los $55\mu\text{g}/\text{m}^3$, por su parte el BIAS se encuentra entre -5 y $-12\mu\text{g}/\text{m}^3$; lo anterior es “en general”, sin embargo, se observa que los errores y el sesgo son menores en las categoría de BUENO/REGULAR y ALERTA y mayores en las categorías de PREEMERGENCIA y EMERGENCIA, y mayores también en estas categorías para MP10 que para MP2.5.

- **Diagrama de dispersión:** los diagramas de dispersión presentados a continuación, muestran de manera gráfica los aspectos resumidos en las tablas precedentes, tales como la dispersión de los datos, sobre todo en los valores más altos de la distribución y la evidente subestimación de los máximos.
- **Tabla de contingencia:** posteriormente, se presentan tablas de contingencia del pronóstico determinístico de acuerdo a las categorías antes mencionadas. De las tablas se observa que el pronóstico determinístico de MP10 falla en el acierto de las categorías de PREEMERGENCIA (en general se subestiman los valores en esta categoría). El pronóstico determinístico de MP2.5 tiene un mejor desempeño en esta categoría, sin embargo tiende a sobrestimar las ALERTAS. A pesar de estas fallas, tanto en MP10 como en MP2,5 el pronóstico logra un 50 % y un 65 % de acierto en la categoría de EMERGENCIA, respectivamente y otro gran porcentaje es pronosticado al menos como PREEMERGENCIA, lo que permite una buena tasa de anticipación de eventos extremos. Si bien esta alta pronosticabilidad de eventos extremos disminuye a medida que aumenta el horizonte de pronóstico en MP10, se mantiene alta para MP2,5, variable que en la mayoría de los casos determina las alertas ambientales en la ciudad de Coyhaique según la tabla 2.
- **Tabla de porcentaje de probabilidad promedio pronosticado:** finalmente, se muestran tablas que resumen los porcentajes promedio de probabilidad emitidos. La primera tabla, muestra el promedio de los porcentajes de probabilidad asignados por el pronóstico probabilístico a cada categoría dada la categoría en la que se encuentran las observaciones. De estas tablas se observa que al igual que para el pronóstico determinístico, el pronóstico probabilístico para MP10 es menos acertado en la anticipación de los episodios extremos que el pronóstico probabilístico de MP2,5, ya que a pesar de asignarles una probabilidad de ocurrencia a los eventos extremos, ésta es baja en comparación con las del resto de las categorías. Respecto de los pronósticos de MP2.5, se puede observar que el pronóstico probabilístico asigna una buena probabilidad a cada categoría, principalmente a los episodios extremos, donde la probabilidad, en general, es mayor que para el resto de las categorías, lo cual da cuenta de un buen desempeño del pronóstico. La segunda tabla, muestra nuevamente el promedio de los porcentajes de probabilidad asignados por el pronóstico probabilístico a la categoría en la que se encuentran las observaciones, además del porcentaje promedio pronosticado cuando el pronóstico determinístico fue un acierto, cuando se subpronosticó (por ejemplo; el porcentaje de probabilidad medio asignado a las categoría de PREEMERGENCIA cuando las observaciones se encuentran en esa categoría, pero el pronóstico determinístico se encuentra en la categoría de ALERTA o BUENO/REGULAR), y cuando se emitió una falsa alarma (por ejemplo; el porcentaje de probabilidad asignado a la categoría de ALERTA cuando las observaciones se encuentran en dicha categoría, pero el pronóstico determinístico se encuentra en la categoría de PREEMERGENCIA o EMERGENCIA). De las tablas se puede observar que en las ocasiones cuando el pronóstico determinístico falla, el pronóstico probabilístico asigna una buena probabilidad de ocurrencia a los eventos (lo anterior también es válido para MP10, pero en menor medida).

En general, los resultados a 1, 2 y 3 días difieren poco, lo cual es una característica positiva del pronóstico, dando cuenta de su estabilidad en el tiempo.

En conclusión, a pesar de que los pronósticos de MP10 tienen alta correlación, su desempeño en la anticipación de eventos extremos es media. A pesar de lo anterior, los pronósticos de MP2.5 son mucho más acertados en la anticipación de estos eventos, luego, considerando que los eventos extremos de MP10 por lo general son también eventos extremos de MP2.5 (tabla 2), es posible tener confianza en que éstos no quedarán completamente sub-pronosticados. Adicionalmente, cuando los pronósticos determinísticos fallan, los pronósticos probabilísticos le otorgan un alto porcentaje de ocurrencia a la categoría observada, dando cuenta de la importancia de contar con un pronóstico de éste tipo para la anticipación de eventos categóricos extremos.

Eventos entre abril a septiembre de 2017

						Observaciones
LUNES	MARTES	MIÉRCOLES	JUEVES	VIERNES	SÁBADO	DOMINGO
						01-04
02-04	03-04	04-04	05-04	06-04	07-04	08-04
09-04	10-04	11-04	12-04	13-04	14-04	15-04
16-04	17-04	18-04	19-04	20-04	21-04	22-04
23-04	24-04	25-04	26-04	27-04	28-04	29-04
30-04	01-05	02-05	03-05	04-05	05-05	06-05
07-05	08-05	09-05	10-05	11-05	12-05	13-05
14-05	15-05	16-05	17-05	18-05	19-05	20-05
21-05	22-05	23-05	24-05	25-05	26-05	27-05
28-05	29-05	30-05	31-05	01-06	02-06	03-06
04-06	05-06	06-06	07-06	08-06	09-06	10-06
11-06	12-06	13-06	14-06	15-06	16-06	17-06
18-06	19-06	20-06	21-06	22-06	23-06	24-06
25-06	26-06	27-06	28-06	29-06	30-06	01-07
02-07	03-07	04-07	05-07	06-07	07-07	08-07
09-07	10-07	11-07	12-07	13-07	14-07	15-07
16-07	17-07	18-07	19-07	20-07	21-07	22-07
23-07	24-07	25-07	26-07	27-07	28-07	29-07
30-07	31-07	01-08	02-08	03-08	04-08	05-08
06-08	07-08	08-08	09-08	10-08	11-08	12-08
13-08	14-08	15-08	16-08	17-08	18-08	19-08
20-08	21-08	22-08	23-08	24-08	25-08	26-08
27-08	28-08	29-08	30-08	31-08	01-09	02-09
03-09	04-09	05-09	06-09	07-09	08-09	09-09
10-09	11-09	12-09	13-09	14-09	15-09	16-09
17-09	18-09	19-09	20-09	21-09	22-09	23-09
24-09	25-09	26-09	27-09	28-09	29-09	30-09

Tabla 1: Resumen de eventos durante el periodo de abril a septiembre de 2018. Morado: EMERGENCIA. Rojo: PREEMERGENCIA. Naranja: ALERTA. Gris: sin información.

6 ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DEL PRONÓSTICO

Eventos entre abril a septiembre de 2018
Observaciones

Fecha	MP10	MP2.5	Evento	Nº
13 de abril	BUENO/REGULAR	ALERTA	ALERTA por MP2.5	1
25 de abril	BUENO/REGULAR	ALERTA	ALERTA por MP2.5	2
30 de abril	BUENO/REGULAR	PREEMERGENCIA	PREEMERGENCIA por MP2.5	1
02 de mayo	BUENO/REGULAR	ALERTA	ALERTA por MP2.5	3
04 de mayo	BUENO/REGULAR	ALERTA	ALERTA por MP2.5	4
05 de mayo	BUENO/REGULAR	EMERGENCIA	EMERGENCIA por MP2.5	1
06 de mayo	PREEMERGENCIA	EMERGENCIA	EMERGENCIA por MP2.5	2
07 de mayo	PREEMERGENCIA	EMERGENCIA	EMERGENCIA por MP2.5	3
12 de mayo	BUENO/REGULAR	PREEMERGENCIA	PREEMERGENCIA por MP2.5	2
13 de mayo	BUENO/REGULAR	PREEMERGENCIA	PREEMERGENCIA por MP2.5	3
14 de mayo	BUENO/REGULAR	ALERTA	ALERTA por MP2.5	5
15 de mayo	BUENO/REGULAR	PREEMERGENCIA	PREEMERGENCIA por MP2.5	4
16 de mayo	BUENO/REGULAR	ALERTA	ALERTA por MP2.5	6
17 de mayo	BUENO/REGULAR	PREEMERGENCIA	PREEMERGENCIA por MP2.5	5
18 de mayo	BUENO/REGULAR	PREEMERGENCIA	PREEMERGENCIA por MP2.5	6
25 de mayo	BUENO/REGULAR	ALERTA	ALERTA por MP2.5	7
27 de mayo	BUENO/REGULAR	PREEMERGENCIA	PREEMERGENCIA por MP2.5	7
01 de junio	PREEMERGENCIA	EMERGENCIA	EMERGENCIA por MP2.5	4
02 de junio	EMERGENCIA	EMERGENCIA	EMERGENCIA por MP10 y MP2.5	5
03 de junio	EMERGENCIA	EMERGENCIA	EMERGENCIA por MP10 y MP2.5	6
04 de junio	PREEMERGENCIA	EMERGENCIA	EMERGENCIA por MP2.5	7
05 de junio	BUENO/REGULAR	EMERGENCIA	EMERGENCIA por MP2.5	8
06 de junio	BUENO/REGULAR	ALERTA	ALERTA por MP2.5	8
07 de junio	BUENO/REGULAR	PREEMERGENCIA	PREEMERGENCIA por MP2.5	8
09 de junio	ALERTA	EMERGENCIA	EMERGENCIA por MP2.5	9
10 de junio	EMERGENCIA	EMERGENCIA	EMERGENCIA por MP10 y MP2.5	10
11 de junio	PREEMERGENCIA	EMERGENCIA	EMERGENCIA por MP2.5	11
12 de junio	EMERGENCIA	EMERGENCIA	EMERGENCIA por MP10 y MP2.5	12
13 de junio	EMERGENCIA	EMERGENCIA	EMERGENCIA por MP10 y MP2.5	13
14 de junio	PREEMERGENCIA	EMERGENCIA	EMERGENCIA por MP2.5	14
15 de junio	BUENO/REGULAR	PREEMERGENCIA	PREEMERGENCIA por MP2.5	9
16 de junio	BUENO/REGULAR	ALERTA	ALERTA por MP2.5	9
17 de junio	BUENO/REGULAR	PREEMERGENCIA	PREEMERGENCIA por MP2.5	10
18 de junio	BUENO/REGULAR	ALERTA	ALERTA por MP2.5	10
22 de junio	BUENO/REGULAR	ALERTA	ALERTA por MP2.5	11
23 de junio	BUENO/REGULAR	PREEMERGENCIA	PREEMERGENCIA por MP2.5	11
30 de junio	BUENO/REGULAR	PREEMERGENCIA	PREEMERGENCIA por MP2.5	12
01 de julio	BUENO/REGULAR	PREEMERGENCIA	PREEMERGENCIA por MP2.5	13
02 de julio	PREEMERGENCIA	EMERGENCIA	EMERGENCIA por MP2.5	15
03 de julio	EMERGENCIA	EMERGENCIA	EMERGENCIA por MP10 y MP2.5	16
04 de julio	EMERGENCIA	EMERGENCIA	EMERGENCIA por MP10 y MP2.5	17
05 de julio	BUENO/REGULAR	PREEMERGENCIA	PREEMERGENCIA por MP2.5	14
06 de julio	PREEMERGENCIA	EMERGENCIA	EMERGENCIA por MP2.5	18
07 de julio	EMERGENCIA	EMERGENCIA	EMERGENCIA por MP10 y MP2.5	19
08 de julio	EMERGENCIA	EMERGENCIA	EMERGENCIA por MP10 y MP2.5	20
09 de julio	EMERGENCIA	EMERGENCIA	EMERGENCIA por MP10 y MP2.5	21
10 de julio	ALERTA	PREEMERGENCIA	PREEMERGENCIA por MP2.5	15
11 de julio	BUENO/REGULAR	ALERTA	ALERTA por MP2.5	12
13 de julio	BUENO/REGULAR	ALERTA	ALERTA por MP2.5	13
14 de julio	BUENO/REGULAR	ALERTA	ALERTA por MP2.5	14
15 de julio	BUENO/REGULAR	PREEMERGENCIA	PREEMERGENCIA por MP2.5	16
17 de julio	BUENO/REGULAR	PREEMERGENCIA	PREEMERGENCIA por MP2.5	17
19 de julio	BUENO/REGULAR	ALERTA	ALERTA por MP2.5	15
20 de julio	BUENO/REGULAR	ALERTA	ALERTA por MP2.5	16
24 de julio	BUENO/REGULAR	ALERTA	ALERTA por MP2.5	17
25 de julio	BUENO/REGULAR	PREEMERGENCIA	PREEMERGENCIA por MP2.5	18
26 de julio	PREEMERGENCIA	EMERGENCIA	EMERGENCIA por MP2.5	22
27 de julio	ALERTA	PREEMERGENCIA	PREEMERGENCIA por MP2.5	19
01 de agosto	BUENO/REGULAR	ALERTA	ALERTA por MP2.5	18
02 de agosto	PREEMERGENCIA	EMERGENCIA	EMERGENCIA por MP2.5	23
06 de agosto	BUENO/REGULAR	ALERTA	ALERTA por MP2.5	19
07 de agosto	BUENO/REGULAR	ALERTA	ALERTA por MP2.5	20
08 de agosto	ALERTA	PREEMERGENCIA	PREEMERGENCIA por MP2.5	20
09 de agosto	ALERTA	PREEMERGENCIA	PREEMERGENCIA por MP2.5	21
10 de agosto	BUENO/REGULAR	PREEMERGENCIA	PREEMERGENCIA por MP2.5	22
11 de agosto	PREEMERGENCIA	EMERGENCIA	EMERGENCIA por MP2.5	24
12 de agosto	PREEMERGENCIA	EMERGENCIA	EMERGENCIA por MP2.5	25
13 de agosto	BUENO/REGULAR	ALERTA	ALERTA por MP2.5	21
20 de agosto	BUENO/REGULAR	PREEMERGENCIA	PREEMERGENCIA por MP2.5	23
21 de agosto	BUENO/REGULAR	ALERTA	ALERTA por MP2.5	22
22 de agosto	BUENO/REGULAR	PREEMERGENCIA	PREEMERGENCIA por MP2.5	24
30 de agosto	BUENO/REGULAR	PREEMERGENCIA	PREEMERGENCIA por MP2.5	25
31 de agosto	PREEMERGENCIA	EMERGENCIA	EMERGENCIA por MP2.5	26
01 de septiembre	BUENO/REGULAR	ALERTA	ALERTA por MP2.5	23
03 de septiembre	BUENO/REGULAR	ALERTA	ALERTA por MP2.5	24
05 de septiembre	BUENO/REGULAR	ALERTA	ALERTA por MP2.5	25

Tabla 2: Resumen de eventos de contaminación ambiental por Material Particulado MP10 y Material Particulado MP2.5 entre abril y septiembre de 2018 para la ciudad de Coyhaique

6.1. Pronóstico a 1 día

Coefficiente de Correlación a 1 día
Pronóstico MOS versus Observaciones

	MP10	MP2.5
Coefficiente de correlación	0.84	0.82

Tabla 3: Coeficiente de Correlación de Pearson, entre los Pronósticos MOS emitidos a 1 día y las Observaciones de Material Particulado MP10 (izquierda) y Material Particulado MP2.5 (derecha).

Tabla de Estadística de MP10 a 1 día

Pronóstico MOS y Observaciones

	Completa		Bueno/Regular		Alerta		Preemergencia		Emergencia	
	Obs.	MOS	Obs.	MOS	Obs.	MOS	Obs.	MOS	Obs.	MOS
Media	122	110	86	87	223	200	283	210	418	299
Desviación Estándar	99	82	45	52	14	38	25	94	41	97
Mínimo	26	29	26	29	200	136	245	64	358	156
Máximo	492	448	195	309	234	235	317	378	492	448

Tabla 4: Tabla de Estadística a 1 día del Pronóstico MOS y de las Observaciones de Material Particulado MP10.

Tabla de Estadística de MP2.5 a 1 día

Pronóstico MOS y Observaciones

	Completa		Bueno/Regular		Alerta		Preemergencia		Emergencia	
	Obs.	MOS	Obs.	MOS	Obs.	MOS	Obs.	MOS	Obs.	MOS
Media	99	94	44	51	93	97	137	141	294	220
Desviación Estándar	93	79	16	30	7	43	18	54	89	99
Mínimo	15	15	15	15	80	48	110	48	172	46
Máximo	512	441	78	199	109	207	168	297	512	441

Tabla 5: Tabla de Estadística a 1 día del Pronóstico MOS y de las Observaciones de Material Particulado MP2.5.

Tabla de Estadísticos de Verificación de MP10 a 1 día

Pronóstico MOS versus Observaciones

	Completa	Bueno/Regular	Alerta	Preemergencia	Emergencia
RMSE	55.31	33.42	31.79	114.10	145.74
MAE	33.31	22.98	22.79	93.72	120.16
BIAS	-12.11	0.18	-22.37	-72.64	-118.77

Tabla 6: Tabla de Estadísticos de Verificación de Pronóstico para Material Particulado MP10 a 1 día. El RMSE corresponde al *Root Mean Square Error*, es decir la raíz cuadrada del *Error Cuadrático Medio*; el MAE corresponde al *Mean Absolute Error*, es decir el *Error Aboluto Medio*; y el BIAS corresponde al *Mean Error*, es decir el *Error Medio*, que representa el sesgo entre el Pronóstico MOS y las Observaciones. Todos poseen unidades de $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tabla de Estadísticos de Verificación de MP2.5 a 1 día

	Pronóstico MOS versus Observaciones				
	Completa	Bueno/Regular	Alerta	Preemergencia	Emergencia
RMSE	53.28	25.42	41.78	52.59	113.95
MAE	32.48	16.00	33.63	42.07	89.80
BIAS	-4.96	7.42	4.28	4.25	-73.69

Tabla 7: Tabla de Estadísticos de Verificación de Pronóstico para Material Particulado MP2.5 a 1 día. El RMSE corresponde al *Root Mean Square Error*, es decir la raíz cuadrada del *Error Cuadrático Medio*; el MAE corresponde al *Mean Absolute Error*, es decir el *Error Absoluto Medio*; y el BIAS corresponde al *Mean Error*, es decir el *Error Medio*, que representa el sesgo entre el Pronóstico MOS y las Observaciones. Todos poseen unidades de $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

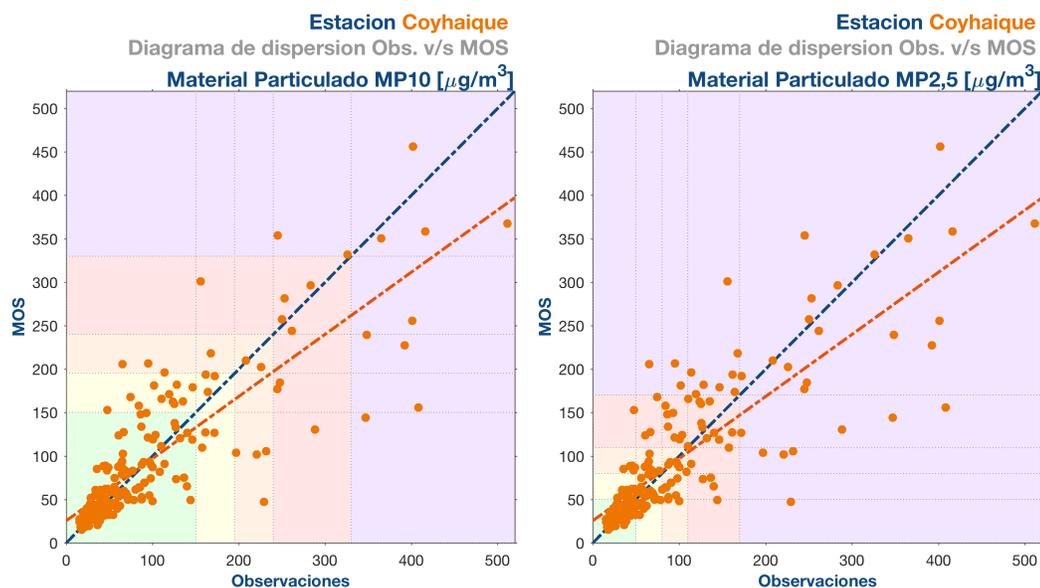


Figura 2: Diagramas de dispersión del Pronóstico MOS (promedios diarios) a 1 día versus las Observaciones para Material Particulado MP10 (izquierda) y Material Particulado MP2.5 (derecha) en la ciudad de Coyhaique.

Tabla de Contingencia MP10 - 1 día

		Pronóstico MOS v/s Observaciones				
		Bueno/Regular	Alerta	Preemergencia	Emergencia	Porcentaje
Observaciones	Bueno/Regular	146	8	1	0	94.19 %
	Alerta	1	4	0	0	80.00 %
	Preemergencia	5	3	4	1	30.77 %
	Emergencia	2	0	3	5	50.00 %
	Porcentaje	94.81 %	26.67 %	50.00 %	83.33 %	
		Pronóstico MOS				

Tabla 8: Tabla de Contingencia de los pronósticos MOS determinísticos a 1 día para Material Particulado MP10 en la ciudad de Coyhaique.

Porcentaje Promedio Pronosticado MP10 - 1 día

		Pronóstico MOS v/s Observaciones			
		Bueno/Regular	Alerta	Preemergencia	Emergencia
Observaciones	Bueno/Regular	94.13 %	3.53 %	2.04 %	0.31 %
	Alerta	57.18 %	21.47 %	18.78 %	2.57 %
	Preemergencia	60.73 %	15.98 %	17.44 %	5.85 %
	Emergencia	39.02 %	19.74 %	29.08 %	12.16 %
		Pronóstico MOS			

Tabla 9: Tabla de Porcentajes Promedio de los pronósticos MOS probabilísticos a 1 día para Material Particulado MP10 en la ciudad de Coyhaique.

Porcentaje Promedio Pronosticado MP10 - 1 día

		Pronóstico MOS v/s Observaciones			
		% Promedio	Aciertos	Sub-pronosticado	Falsas Alarmas
Observaciones	Bueno/Regular	94.13 %	97.61 %		48.51 %
	Alerta	21.47 %	24.03 %	12.75 %	22.50 %
	Preemergencia	17.44 %	28.90 %	5.46 %	36.43
	Emergencia	12.16 %	15.08 %	9.24 %	
		Pronóstico MOS			

Tabla 10: Tabla de Porcentajes Promedio de los pronósticos MOS probabilísticos a 1 día para Material Particulado MP10 en la ciudad de Coyhaique. Se muestra el % promedio pronosticado para dicha categoría y el % promedio pronosticado cuando el pronóstico determinístico fue un acierto, cuando se subpronosticó (por ejemplo; el porcentaje de probabilidad medio asignado a las categoría de PREEMERGENCIA cuando las observaciones se encuentran en esa categoría, pero el pronóstico determinístico se encuentra en la categoría de ALERTA o BUENO/REGULAR), y cuando se emitió una falsa alarma (por ejemplo; el porcentaje de probabilidad asignado a la categoría de ALERTA cuando las observaciones se encuentran en dicha categoría, pero el pronóstico determinístico se encuentra en la categoría de PREEMERGENCIA o EMERGENCIA).

Tabla de Contingencia MP2.5 - 1 día

		Pronóstico MOS v/s Observaciones				
		Bueno/Regular	Alerta	Preemergencia	Emergencia	Porcentaje
Observaciones	Bueno/Regular	90	12	4	1	84.11 %
	Alerta	11	5	7	2	20.00 %
	Preemergencia	4	3	11	7	44.00 %
	Emergencia	1	3	5	17	65.38 %
	Porcentaje	84.91 %	21.74 %	40.74 %	62.96 %	
		Pronóstico MOS				

Tabla 11: Tabla de Contingencia de los pronósticos MOS determinísticos a 1 día para Material Particulado MP2.5 en la ciudad de Coyhaique.

Porcentaje Promedio Pronosticado MP2.5 - 1 día

		Pronóstico MOS v/s Observaciones			
		Bueno/Regular	Alerta	Preemergencia	Emergencia
Observaciones	Bueno/Regular	81.51 %	10.61 %	6.26 %	1.61 %
	Alerta	40.57 %	23.93 %	26.27 %	9.23 %
	Preemergencia	20.39 %	16.41 %	36.16 %	27.04 %
	Emergencia	13.30 %	12.06 %	29.68 %	44.95 %
		Pronóstico MOS			

Tabla 12: Tabla de Porcentajes Promedio de los pronósticos MOS probabilísticos a 1 día para Material Particulado MP2.5 en la ciudad de Coyhaique.

Porcentaje Promedio Pronosticado MP2.5 - 1 día

		Pronóstico MOS v/s Observaciones			
		% Promedio	Aciertos	Sub-pronosticado	Falsas Alarmas
Observaciones	Bueno/Regular	81.51 %	91.52 %		28.53 %
	Alerta	23.93 %	33.08 %	24.62 %	17.07 %
	Preemergencia	36.16 %	48.09 %	19.01 %	32.62 %
	Emergencia	44.95 %	60.32 %	10.37 %	
		Pronóstico MOS			

Tabla 13: Tabla de Porcentajes Promedio de los pronósticos MOS probabilísticos a 1 día para Material Particulado MP2.5 en la ciudad de Coyhaique. Se muestra el % promedio pronosticado para dicha categoría y el % promedio pronosticado cuando el pronóstico determinístico fue un acierto, cuando se subpronosticó (por ejemplo; el porcentaje de probabilidad medio asignado a las categoría de PREEMERGENCIA cuando las observaciones se encuentran en esa categoría, pero el pronóstico determinístico se encuentra en la categoría de ALERTA o BUENO/REGULAR), y cuando se emitió una falsa alarma (por ejemplo; el porcentaje de probabilidad asignado a la categoría de ALERTA cuando las observaciones se encuentran en dicha categoría, pero el pronóstico determinístico se encuentra en la categoría de PREEMERGENCIA o EMERGENCIA).

6.2. Pronóstico a 2 días

Coefficiente de Correlación a 2 días
Pronóstico MOS versus Observaciones

	MP10	MP2.5
Coefficiente de correlación	0.84	0.83

Tabla 14: Coeficiente de Correlación de Pearson, entre los Pronósticos MOS emitidos a 2 días y las Observaciones de Material Particulado MP10 (izquierda) y Material Particulado MP2.5 (derecha).

Tabla de Estadística de MP10 a 2 días

Pronóstico MOS y Observaciones

	Completa		Bueno/Regular		Alerta		Preemergencia		Emergencia	
	Obs.	MOS	Obs.	MOS	Obs.	MOS	Obs.	MOS	Obs.	MOS
Media	122	113	86	89	223	224	283	216	418	293
Desviación Estándar	99	82	45	52	14	46	25	104	41	74
Mínimo	26	30	26	30	200	180	245	78	358	181
Máximo	492	435	195	273	234	293	317	416	492	435

Tabla 15: Tabla de Estadística a 2 días del Pronóstico MOS y de las Observaciones de Material Particulado MP10.

Tabla de Estadística de MP2.5 a 2 días

Pronóstico MOS y Observaciones

	Completa		Bueno/Regular		Alerta		Preemergencia		Emergencia	
	Obs.	MOS	Obs.	MOS	Obs.	MOS	Obs.	MOS	Obs.	MOS
Media	99	97	44	52	93	106	137	149	294	221
Desviación Estándar	93	77	16	30	7	44	18	52	89	89
Mínimo	15	16	12	16	80	41	110	56	172	64
Máximo	512	402	78	187	109	228	168	259	512	402

Tabla 16: Tabla de Estadística a 2 días del Pronóstico MOS y de las Observaciones de Material Particulado MP2.5.

Tabla de Estadísticos de Verificación de MP10 a 2 días

Pronóstico MOS versus Observaciones

	Completa	Bueno/Regular	Alerta	Preemergencia	Emergencia
RMSE	54.46	31.51	35.96	120.30	139.37
MAE	33.67	22.04	25.98	105.21	124.84
BIAS	-9.43	2.49	1.26	-66.81	-124.84

Tabla 17: Tabla de Estadísticos de Verificación de Pronóstico para Material Particulado MP10 a 2 días. El RMSE corresponde al *Root Mean Square Error*, es decir la raíz cuadrada del *Error Cuadrático Medio*; el MAE corresponde al *Mean Absolute Error*, es decir el *Error Absoluto Medio*; y el BIAS corresponde al *Mean Error*, es decir el *Error Medio*, que representa el sesgo entre el Pronóstico MOS y las Observaciones. Todos poseen unidades de $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tabla de Estadísticos de Verificación de MP2.5 a 2 días

Pronóstico MOS versus Observaciones

	Completa	Bueno/Regular	Alerta	Preemergencia	Emergencia
RMSE	52.81	25.97	45.16	50.58	111.51
MAE	33.06	16.86	34.54	40.82	90.82
BIAS	-1.96	8.35	13.46	12.83	-73.43

Tabla 18: Tabla de Estadísticos de Verificación de Pronóstico para Material Particulado MP2.5 a 2 días. El RMSE corresponde al *Root Mean Square Error*, es decir la raíz cuadrada del *Error Cuadrático Medio*; el MAE corresponde al *Mean Absolute Error*, es decir el *Error Absoluto Medio*; y el BIAS corresponde al *Mean Error*, es decir el *Error Medio*, que representa el sesgo entre el Pronóstico MOS y las Observaciones. Todos poseen unidades de $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

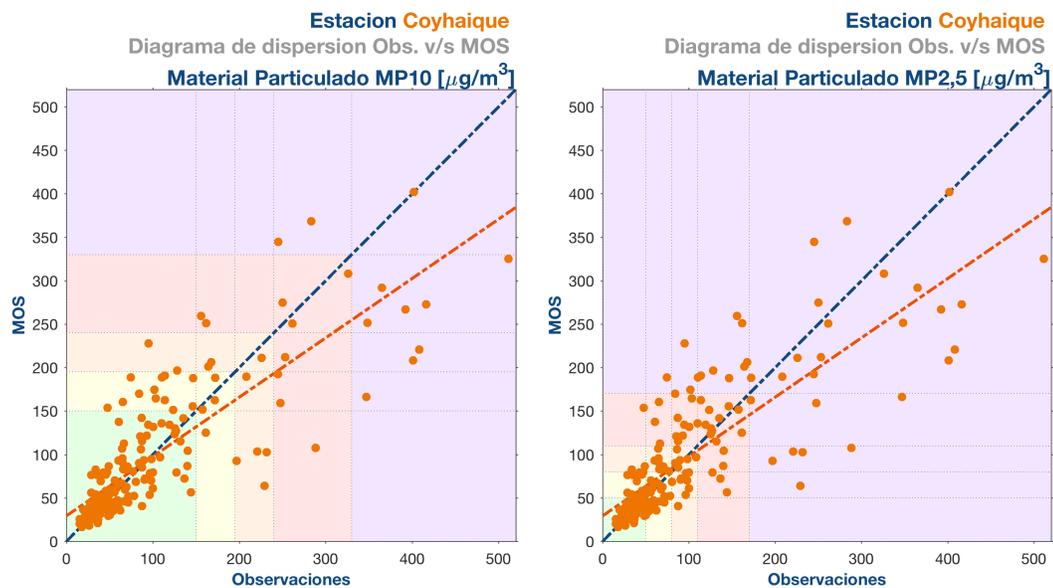


Figura 3: Diagramas de dispersión del Pronóstico MOS (promedios diarios) a 2 días versus las Observaciones para Material Particulado MP10 (izquierda) y Material Particulado MP2.5 (derecha) en la ciudad de Coyhaique.

Tabla de Contingencia MP10 - 2 días

		Pronóstico MOS v/s Observaciones				
		Bueno/Regular	Alerta	Preemergencia	Emergencia	Porcentaje
Observaciones	Bueno/Regular	145	8	2	0	93.55 %
	Alerta	2	2	1	0	40.00 %
	Preemergencia	5	3	3	2	23.08 %
	Emergencia	1	2	4	3	30.00 %
	Porcentaje	94.77 %	13.33 %	30.00 %	60.00 %	
		Pronóstico MOS				

Tabla 19: Tabla de Contingencia de los pronósticos MOS determinísticos a 2 días para Material Particulado MP10 en la ciudad de Coyhaique.

Porcentaje Promedio Pronosticado MP10 - 2 días

		Pronóstico MOS v/s Observaciones			
		Bueno/Regular	Alerta	Preemergencia	Emergencia
Observaciones	Bueno/Regular	93.86 %	3.80 %	2.07 %	0.28 %
	Alerta	48.14 %	21.92 %	23.65 %	6.29 %
	Preemergencia	61.03 %	16.08 %	17.63 %	5.26 %
	Emergencia	33.65 %	21.15 %	32.34 %	12.86 %
		Pronóstico MOS			

Tabla 20: Tabla de Porcentajes Promedio de los pronósticos MOS probabilísticos a 2 días para Material Particulado MP10 en la ciudad de Coyhaique.

Porcentaje Promedio Pronosticado MP10 - 2 días

		Pronóstico MOS v/s Observaciones			
		% Promedio	Aciertos	Sub-pronosticado	Falsas Alarmas
Observaciones	Bueno/Regular	93.86 %	96.92 %		49.43 %
	Alerta	21.92 %	23.47 %	21.79 %	19.08 %
	Preemergencia	17.63 %	31.60 %	7.07 %	38.91
	Emergencia	12.86 %	18.54 %	10.43 %	
		Pronóstico MOS			

Tabla 21: Tabla de Porcentajes Promedio de los pronósticos MOS probabilísticos a 2 días para Material Particulado MP10 en la ciudad de Coyhaique. Se muestra el % promedio pronosticado para dicha categoría y el % promedio pronosticado cuando el pronóstico determinístico fue un acierto, cuando se subpronosticó (por ejemplo; el porcentaje de probabilidad medio asignado a las categoría de PREEMERGENCIA cuando las observaciones se encuentran en esa categoría, pero el pronóstico determinístico se encuentra en la categoría de ALERTA o BUENO/REGULAR), y cuando se emitió una falsa alarma (por ejemplo; el porcentaje de probabilidad asignado a la categoría de ALERTA cuando las observaciones se encuentran en dicha categoría, pero el pronóstico determinístico se encuentra en la categoría de PREEMERGENCIA o EMERGENCIA).

Tabla de Contingencia MP2.5 - 2 días

		Pronóstico MOS v/s Observaciones				
		Bueno/Regular	Alerta	Preemergencia	Emergencia	Porcentaje
Observaciones	Bueno/Regular	92	10	4	1	85.98 %
	Alerta	9	6	8	2	24.00 %
	Preemergencia	3	2	12	8	48.00 %
	Emergencia	1	4	3	18	69.23 %
	Porcentaje	87.62 %	27.27 %	44.44 %	62.07 %	
		Pronóstico MOS				

Tabla 22: Tabla de Contingencia de los pronósticos MOS determinísticos a 2 días para Material Particulado MP2.5 en la ciudad de Coyhaique.

Porcentaje Promedio Pronosticado MP2.5 - 2 días

		Pronóstico MOS v/s Observaciones			
		Bueno/Regular	Alerta	Preemergencia	Emergencia
Observaciones	Bueno/Regular	79.59 %	12.36 %	6.52 %	1.54 %
	Alerta	33.32 %	24.24 %	30.41 %	12.03 %
	Preemergencia	17.06 %	17.10 %	36.68 %	29.17 %
	Emergencia	10.93 %	11.42 %	28.86 %	48.79 %
		Pronóstico MOS			

Tabla 23: Tabla de Porcentajes Promedio de los pronósticos MOS probabilísticos a 2 días para Material Particulado MP2.5 en la ciudad de Coyhaique.

Porcentaje Promedio Pronosticado MP2.5 - 2 días

		Pronóstico MOS v/s Observaciones			
		% Promedio	Aciertos	Sub-pronosticado	Falsas Alarmas
Observaciones	Bueno/Regular	79.59 %	88.04 %		27.76 %
	Alerta	24.24 %	31.45 %	26.96 %	17.46 %
	Preemergencia	36.68 %	48.49 %	23.60 %	21.13 %
	Emergencia	48.79 %	63.25 %	16.25 %	
		Pronóstico MOS			

Tabla 24: Tabla de Porcentajes Promedio de los pronósticos MOS probabilísticos a 2 días para Material Particulado MP2.5 en la ciudad de Coyhaique. Se muestra el % promedio pronosticado para dicha categoría y el % promedio pronosticado cuando el pronóstico determinístico fue un acierto, cuando se subpronosticó (por ejemplo; el porcentaje de probabilidad medio asignado a las categoría de PREEMERGENCIA cuando las observaciones se encuentran en esa categoría, pero el pronóstico determinístico se encuentra en la categoría de ALERTA o BUENO/REGULAR), y cuando se emitió una falsa alarma (por ejemplo; el porcentaje de probabilidad asignado a la categoría de ALERTA cuando las observaciones se encuentran en dicha categoría, pero el pronóstico determinístico se encuentra en la categoría de PREEMERGENCIA o EMERGENCIA).

6.3. Pronóstico a 3 días

Coefficiente de Correlación a 3 días
Pronóstico MOS versus Observaciones

	MP10	MP2.5
Coefficiente de correlación	0.83	0.82

Tabla 25: Coeficiente de Correlación de Pearson, entre los Pronósticos MOS emitidos a 3 días y las Observaciones de Material Particulado MP10 (izquierda) y Material Particulado MP2.5 (derecha).

Tabla de Estadística de MP10 a 3 días

Pronóstico MOS y Observaciones

	Completa		Bueno/Regular		Alerta		Preemergencia		Emergencia	
	Obs.	MOS	Obs.	MOS	Obs.	MOS	Obs.	MOS	Obs.	MOS
Media	122	114	86	90	223	238	283	212	418	298
Desviación Estándar	99	83	45	55	14	62	25	93	41	79
Mínimo	26	28	26	28	200	157	245	112	358	194
Máximo	492	444	195	292	234	319	317	387	492	444

Tabla 26: Tabla de Estadística a 3 días del Pronóstico MOS y de las Observaciones de Material Particulado MP10.

Tabla de Estadística de MP2.5 a 3 días

Pronóstico MOS y Observaciones

	Completa		Bueno/Regular		Alerta		Preemergencia		Emergencia	
	Obs.	MOS	Obs.	MOS	Obs.	MOS	Obs.	MOS	Obs.	MOS
Media	99	98	44	53	93	107	137	154	294	222
Desviación Estándar	93	79	16	30	7	49	18	62	89	88
Mínimo	15	12	15	12	80	43	110	52	172	86
Máximo	512	401	78	168	109	240	168	291	512	401

Tabla 27: Tabla de Estadística a 3 días del Pronóstico MOS y de las Observaciones de Material Particulado MP2.5.

Tabla de Estadísticos de Verificación de MP10 a 3 días

Pronóstico MOS versus Observaciones

	Completa	Bueno/Regular	Alerta	Preemergencia	Emergencia
RMSE	56.19	35.88	54.83	113.92	139.48
MAE	35.75	24.25	45.17	104.00	120.52
BIAS	-7.95	3.80	14.96	-70.83	-119.88

Tabla 28: Tabla de Estadísticos de Verificación de Pronóstico para Material Particulado MP10 a 3 días. El RMSE corresponde al *Root Mean Square Error*, es decir la raíz cuadrada del *Error Cuadrático Medio*; el MAE corresponde al *Mean Absolute Error*, es decir el *Error Absoluto Medio*; y el BIAS corresponde al *Mean Error*, es decir el *Error Medio*, que representa el sesgo entre el Pronóstico MOS y las Observaciones. Todos poseen unidades de $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tabla de Estadísticos de Verificación de MP2.5 a 3 días

Pronóstico MOS versus Observaciones

	Completa	Bueno/Regular	Alerta	Preemergencia	Emergencia
RMSE	53.32	26.25	50.88	62.39	104.62
MAE	34.84	17.20	36.34	52.51	88.99
BIAS	-0.47	9.37	14.23	17.10	-72.04

Tabla 29: Tabla de Estadísticos de Verificación de Pronóstico para Material Particulado MP2.5 a 3 días. El RMSE corresponde al *Root Mean Square Error*, es decir la raíz cuadrada del *Error Cuadrático Medio*; el MAE corresponde al *Mean Absolute Error*, es decir el *Error Absoluto Medio*; y el BIAS corresponde al *Mean Error*, es decir el *Error Medio*, que representa el sesgo entre el Pronóstico MOS y las Observaciones. Todos poseen unidades de $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

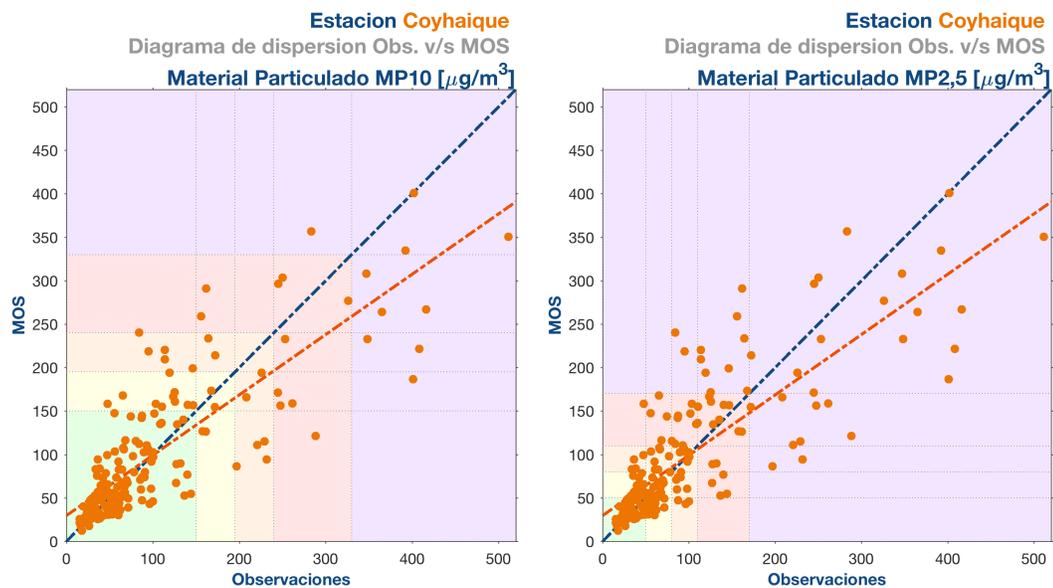


Figura 4: Diagramas de dispersión del Pronóstico MOS (promedios diarios) a 3 días versus las Observaciones para Material Particulado MP10 (izquierda) y Material Particulado MP2.5 (derecha) en la ciudad de Coyhaique.

Tabla de Contingencia MP10 - 3 días

		Pronóstico MOS v/s Observaciones				
		Bueno/Regular	Alerta	Preemergencia	Emergencia	Porcentaje
Observaciones	Bueno/Regular	145	5	5	0	93.55 %
	Alerta	1	2	2	0	40.00 %
	Preemergencia	6	2	3	2	23.08 %
	Emergencia	1	2	4	3	30.00 %
	Porcentaje	94.77 %	18.18 %	21.43 %	60.00 %	
		Pronóstico MOS				

Tabla 30: Tabla de Contingencia de los pronósticos MOS determinísticos a 3 días para Material Particulado MP10 en la ciudad de Coyhaique.

Porcentaje Promedio Pronosticado MP10 - 3 días

		Pronóstico MOS v/s Observaciones			
		Bueno/Regular	Alerta	Preemergencia	Emergencia
Observaciones	Bueno/Regular	93.75 %	3.73 %	2.15 %	0.37 %
	Alerta	48.12 %	22.12 %	23.82 %	5.94 %
	Preemergencia	65.41 %	15.66 %	14.68 %	4.25 %
	Emergencia	37.65 %	21.38 %	30.35 %	10.62 %
		Pronóstico MOS			

Tabla 31: Tabla de Porcentajes Promedio de los pronósticos MOS probabilísticos a 3 días para Material Particulado MP10 en la ciudad de Coyhaique.

Porcentaje Promedio Pronosticado MP10 - 3 días

		Pronóstico MOS v/s Observaciones			
		% Promedio	Aciertos	Sub-pronosticado	Falsas Alarmas
Observaciones	Bueno/Regular	93.75 %	96.85 %		48.74 %
	Alerta	22.12 %	23.43 %	20.85 %	21.45 %
	Preemergencia	14.68 %	24.56 %	4.96 %	38.73 %
	Emergencia	10.62 %	17.37 %	7.72 %	
		Pronóstico MOS			

Tabla 32: Tabla de Porcentajes Promedio de los pronósticos MOS probabilísticos a 3 días para Material Particulado MP10 en la ciudad de Coyhaique. Se muestra el % promedio pronosticado para dicha categoría y el % promedio pronosticado cuando el pronóstico determinístico fue un acierto, cuando se subpronosticó (por ejemplo; el porcentaje de probabilidad medio asignado a las categoría de PREEMERGENCIA cuando las observaciones se encuentran en esa categoría, pero el pronóstico determinístico se encuentra en la categoría de ALERTA o BUENO/REGULAR), y cuando se emitió una falsa alarma (por ejemplo; el porcentaje de probabilidad asignado a la categoría de ALERTA cuando las observaciones se encuentran en dicha categoría, pero el pronóstico determinístico se encuentra en la categoría de PREEMERGENCIA o EMERGENCIA).

Tabla de Contingencia MP2.5 - 3 días

		Pronóstico MOS v/s Observaciones				
		Bueno/Regular	Alerta	Preemergencia	Emergencia	Porcentaje
Observaciones	Bueno/Regular	91	11	5	0	85.05 %
	Alerta	9	6	8	2	24.00 %
	Preemergencia	4	2	10	9	40.00 %
	Emergencia	0	2	7	17	65.38 %
	Porcentaje	87.50 %	28.57 %	33.33 %	60.71 %	
		Pronóstico MOS				

Tabla 33: Tabla de Contingencia de los pronósticos MOS determinísticos a 3 días para Material Particulado MP2.5 en la ciudad de Coyhaique.

Porcentaje Promedio Pronosticado MP2.5 - 3 días

		Pronóstico MOS v/s Observaciones			
		Bueno/Regular	Alerta	Preemergencia	Emergencia
Observaciones	Bueno/Regular	78.57 %	12.16 %	7.78 %	1.50 %
	Alerta	35.54 %	21.94 %	31.10 %	11.43 %
	Preemergencia	19.86 %	15.62 %	33.42 %	31.10 %
	Emergencia	10.44 %	11.89 %	31.47 %	46.20 %
		Pronóstico MOS			

Tabla 34: Tabla de Porcentajes Promedio de los pronósticos MOS probabilísticos a 3 días para Material Particulado MP2.5 en la ciudad de Coyhaique.

Porcentaje Promedio Pronosticado MP2.5 - 3 días

		Pronóstico MOS v/s Observaciones			
		% Promedio	Aciertos	Sub-pronosticado	Falsas Alarmas
Observaciones	Bueno/Regular	78.57 %	87.83 %		25.87 %
	Alerta	21.94 %	29.73 %	20.90 %	18.20 %
	Preemergencia	33.42 %	46.56 %	18.66 %	28.65 %
	Emergencia	46.20 %	59.42 %	21.24 %	
		Pronóstico MOS			

Tabla 35: Tabla de Porcentajes Promedio de los pronósticos MOS probabilísticos a 3 días para Material Particulado MP2.5 en la ciudad de Coyhaique. Se muestra el % promedio pronosticado para dicha categoría y el % promedio pronosticado cuando el pronóstico determinístico fue un acierto, cuando se subpronosticó (por ejemplo; el porcentaje de probabilidad medio asignado a las categoría de PREEMERGENCIA cuando las observaciones se encuentran en esa categoría, pero el pronóstico determinístico se encuentra en la categoría de ALERTA o BUENO/REGULAR), y cuando se emitió una falsa alarma (por ejemplo; el porcentaje de probabilidad asignado a la categoría de ALERTA cuando las observaciones se encuentran en dicha categoría, pero el pronóstico determinístico se encuentra en la categoría de PREEMERGENCIA o EMERGENCIA).

7. Propuesta de mejora para el pronóstico

Como se mencionó en la sección anterior, existen algunas mejoras que se podrían estudiar y eventualmente introducir en el post proceso del pronóstico MOS, como la eliminación del sesgo de los resultados de la función de transferencia, además de evaluar un mejor ajuste de distribución de probabilidad para la determinación de los porcentajes de probabilidad asignados a cada categoría. Sin perjuicio de lo anterior, existen algunos aspectos más generales que influyen en la calidad del pronóstico y sobre los cuales podrían introducirse mejoras; éstos se detallan a continuación.

Cualquier pronóstico está asociado a errores, con errores menores para los pronósticos meteorológicos y mayores para la contaminación atmosférica. En ambos casos, las fuentes principales de esos errores son: a) aproximaciones de los modelos usados, b) errores en las mediciones y c) representatividad de la medición. En lo que sigue, se ahonda en cada una de ellas.

- Todos los modelos de pronóstico representan una aproximación matemática sobre fenómenos atmosféricos. Estas aproximaciones matemáticas pueden ser de tipo estadística o de tipo numérico describiendo procesos atmosféricos. En ambos casos, las simplificaciones que se hacen en esas aproximaciones (linealización de fenómenos no-lineales, discretización de espacio y tiempo, parametrizaciones de procesos de pequeña escala, entre otras) resultan en los errores asociados a los modelos.
- Con respecto a los errores de las mediciones, se relacionan a la precisión del sensor y mantenimiento. En el caso de una estación bien mantenida, esos errores deberían ser bastante bajos y los que menos contribuyen a la incertidumbre. En una estación mal mantenida, los errores asociados pueden llegar a ser los más relevantes.

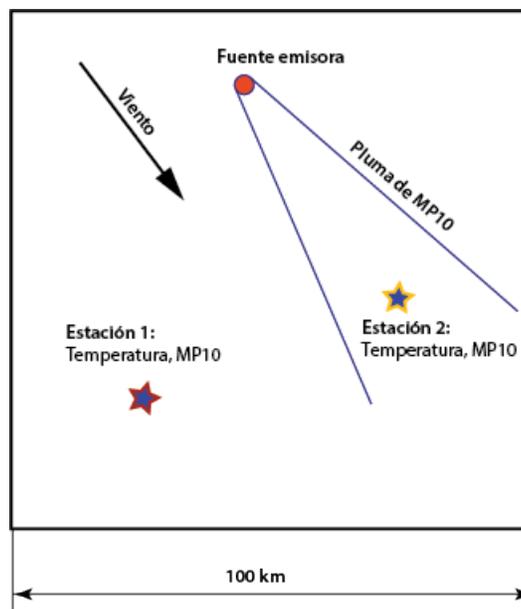


Figura 5: Red de monitoreo en una planicie hipotética de extensión de 100 km. La red consiste en dos estaciones de monitoreo (estrellas) que miden temperatura y MP10. Dentro de la planicie se encuentra una fuente (punto) que emite MP10 y la pluma se dirige según la dirección de viento.

- La representatividad de las mediciones tiene un rol mayor en los pronósticos de contaminación y menor en los pronósticos meteorológicos. Para ilustrar este rol y a modo de ejemplo, se puede imaginar una planicie según figura 5; esa planicie hipotética tiene una extensión de 100 km que representa la escala típica del fenómeno de contaminación urbana en Chile. La red consiste en dos estaciones de monitoreo (estrellas) que miden temperatura y MP10. Dentro de la planicie se encuentra una fuente (punto) que emite MP10 y la pluma se dirige según la dirección de viento. Además, se supone que la superficie dentro de esa planicie es uniforme. A través de este ejemplo, se puede ver ahora que la representatividad de las mediciones depende mucho de la variable medida. En el caso de la temperatura, se puede suponer que las temperaturas medidas en las estaciones 1 y 2 sean iguales ($T_1 = T_2$) y, además, que sean representativas para toda la planicie. También, la variabilidad a todas escalas (diaria,

sinóptica y estacional) deberían ser iguales, o sea que el coeficiente de correlación entre las series de tiempo de ambas temperaturas sea 1 (correlación perfecta). La temperatura ha sido usado sólo a modo de ejemplo y, de hecho, el comportamiento de otras variables meteorológicas debería ser equivalente. Con respecto a las estaciones de MP10, es evidente que las concentraciones medidas en las estaciones 1 y 2 no son iguales ya que la estación 1 se queda afuera de la pluma y la estación 2 adentro, por lo que $Conc_1^{MP10} \neq Conc_2^{MP10}$. En términos de la variabilidad temporal de las concentraciones en ambas estaciones, ella sólo depende de factores meteorológicas. En consecuencia y suponiendo una dirección de viento constante, también en este caso se debe suponer que el coeficiente de correlación entre las series de tiempo de ambas estaciones sea 1. Al contrario del ejemplo de la planicie hipotética, en un caso real no existe una sola fuente sino miles lo que hace que dentro de una misma ciudad las concentraciones sean similares al nivel promedio. En términos del coeficiente de correlación entre dos estaciones reales de MP10, se observan valores mucho menores que del valor 1 que se habría esperado para el caso hipotético. Es decir, la variabilidad en concentraciones de MP10 en una estación sólo explica la variabilidad en otra hasta un cierto nivel. En consecuencia y dado que una estación es meteorológicamente hablando similar a la otra, existen otros factores que no son meteorológicos que impactan a la variabilidad de la contaminación. Estos otros factores pueden ser fuentes locales (y probablemente temporales) que causen estas diferencias. Y es justamente por esta causa que una estación de calidad del aire en general tiene una mucho menor representatividad espacial que una estación meteorológica. Además y dado que todas las emisiones a las que están sujetas las estaciones de calidad del aire tienen un comportamiento con un cierto grado aleatorio, este grado aleatorio no se puede pronosticar.

Bajo las consideraciones de las posibles fuentes de error de un pronóstico, se puede notar que la más difícil de superar con los recursos disponibles, son las aproximaciones introducidas por los modelos, ya que dependen, entre otras cosas, del desarrollo tecnológico. Luego, es pertinente reconocer esta limitación y asumir que los pronósticos, por su naturaleza, poseen un límite de acertitud inferior al 100 %. Respecto de los errores en la medición, es necesario recordar que el pronóstico MOS utiliza variables de un modelo global como predictores para la variable de interés, a través de un proceso estadístico, luego, la calidad de los datos observacionales es de suma importancia para el buen desempeño de un pronóstico, de modo que se recomienda asegurarla a través de mantenciones periódicas de las estaciones, sin embargo, es necesario notar que para que esta medida sea efectiva debe mantenerse en el tiempo, dando al modelo una cantidad suficiente de observaciones de buena calidad a las cuales ajustarse estadísticamente. Finalmente, respecto de la representatividad espacial de las estaciones, es importante hacer incapié en que las diferencias entre registros de distintas estaciones en una misma ciudad dan cuenta de que existen fuentes locales (y posiblemente temporales) que afectan a las observaciones, así como las componentes aleatorias; luego, por las pequeñas escalas de éstas, no es posible pronosticarlas y nuevamente es necesario reconocer ésta limitación, asumiendo que inevitablemente habrán errores en los pronósticos introducidos por esta causa. Finalmente, en el caso de la ciudad de

Coyhaique, la ocurrencia de episodios de mala calidad del aire son determinados mediante las observaciones de una estación principalmente (Coyhaique II), sin embargo, según lo visto con anterioridad, puede darse el caso en que otros sectores de la ciudad presenten comportamientos distintos, luego, para un mejor diagnóstico de la situación, se hace necesaria la ampliación de los sectores de monitoreo. Una mejora en el diagnóstico de la calidad del aire de la ciudad en busca de una estación ampliamente representativa introduce luego una esperanza de mejora en los pronósticos de calidad del aire.

8. Anexo: Reportes mensuales/final

Se adjunta un reporte final que abarca todo el periodo de operación.

- Reporte de evaluación MOS, Ministerio de Medio Ambiente, Coyhaique, 01 de abril de 2018 - 30 de septiembre de 2018.