De acuerdo al:
Contrato ID 611136-2-2021
04 MAR 2021

Informe final

"Desarrollo y puesta en marcha de un sistema de pronóstico para material particulado (MP10 y MP2.5) para la ciudad de Coyhaique 2021"

Preparado por:

meteodata
Especialistas en Meteorología y Calidad del Aire

05 de octubre de 2021

Contenidos

1. Introducción **2**

2. Implementación de pronóstico **3**

3. Sistema de acceso a la información **5**

4. Operación del sistema de pronóstico **6**

5. Reportes mensuales/final de la comparación entre los pronósticos y las observaciones **6**

6. Análisis de desempeño del pronóstico **9**

6.1. Concentraciones de MP10 . . . 10

6.1.1. Pronóstico a 1 día . . . 10

6.1.2. Pronóstico a 2 días . . . 12

6.1.3. Pronóstico a 3 días . . . 13

6.2. Concentraciones de MP2.5 . . . 14

6.2.1. Pronóstico a 1 día . . . 14

6.2.2. Pronóstico a 2 días . . . 16

6.2.3. Pronóstico a 3 días . . . 17

6.3. Velocidad del viento . . . 18

6.3.1. Pronóstico a 1 día . . . 18

6.3.2. Pronóstico a 2 día . . . 20

6.3.3. Pronóstico a 3 día . . . 21

6.4. Temperatura . . . 22

6.4.1. Pronóstico a 1 día . . . 22

6.4.2. Pronóstico a 2 días . . . 24

6.4.3. Pronóstico a 3 días . . . 25

7. Propuesta de mejora para el pronóstico **26**

8. Anexo: Reporte final **29**

1. Introducción

El presente documento corresponde al ***Informe final*** elaborado por Ingeniería y Geofísica Limitada (Meteodata), en el marco de la licitación pública (611136-2-2021) del Ministerio de Medio Ambiente - Subsecretaría del Medio Ambiente, cuyas bases administrativas, técnicas y documentos anexos fueron aprobados mediante la Resolución Exenta N° 0016, del 4 de marzo de 2021, y del contrato homónimo, aprobado según Resolución Exenta N° 0024, denominado *"Desarrollo y puesta en marcha de un sistema de pronóstico para material particulado (MP10 y MP2.5) para la ciudad de Coyhaique 2021"*, 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 Mónica Saldías de la Guarda, con fecha 25 de marzo de 2021.

Según lo requerido en la Resolución Exenta N°0016, del 4 de marzo de 2021, numeral 4 de las Bases Técnicas, este informe incluye lo siguiente:

- Los resultados de todas las actividades definidas en las Bases Administrativas y Técnicas.
- Se adjunta copia digital de los informes previos y toda la información generada o recopilada en esta adquisición.

A continuación se citan las actividades, definidas en el numeral 3 de las Bases Técnicas de la Resolución Exenta N° 0016, del 4 de marzo de 2021.

3.1 **Implementar un Sistema de Pronóstico diario de calidad del aire para MP10 y MP2.5 en la ciudad de Coyhaique.**

i) Implementar a partir de herramientas de modelación numérica y/o técnicas estadísticas "MOS" (Model Ouput 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 región de Aysén.

En los objetivos generales y específicos, definidos en el numeral 2 de las Bases Técnicas de la Resolución Exenta N°0016 del 4 de marzo de 2021, se establece lo siguiente.

2.1 **Implementación y operación de un Sistema de Pronóstico para Material Particulado (MP10 y MP2.5) para la ciudad de Coyhaique como herramienta técnica de apoyo para enfrentar episodios críticos de contaminación atmosférica en la Región de Aysén 2021.**

i) Implementar un sistema de pronóstico diario de calidad del aire para MP10 y MP2.5 en la ciudad de Coyhaique.

ii) Operar el sistema de pronóstico de calidad del aire para MP10 y MP2.5 durante el periodo comprendido entre el 1 de abril al 30 de septiembre.

iii) Desarrollar análisis de resultados del sistema de pronóstico de calidad del aire implementado y operado.

El plazo de entrega pactado para el presente informe, es el 5 de octubre de 2021.

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, entre el 1 de abril y el 30 de septiembre de 2021. 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 la sección 8 se indican los informes mensuales que han sido entregados a la fecha y que se adjuntan como anexos.

2. Implementación de pronóstico

Ingeniería y Geofísica Limitada ha desarrollado un pronóstico de calidad del aire para MP10 y MP2.5 para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén. 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 los 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 solo 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 la estaciones Coyhaique I y Coyhaique II (se obtiene el máximo valor de concentraciones por hora, para generar una serie de tiempo), 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 las variables meteorológicas de temperatura y velocidad del viento, las cuales se relacionan 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 anteriormente). 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 https://mma.meteodata.cl/coyhaique_forecast/, para dar cumplimiento con lo solicitado en las bases técnicas de la licitación pública respecto de proporcionar 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 (también para ambas variables).

La figura 1 muestra un ejemplo de los paneles disponibles en el sitio web del pronóstico de Material Particulado MP10 y MP2.5 para Coyhaique. En el panel superior se presenta la fecha y hora de emisión del pronóstico, junto con los pronósticos 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 MP10 y MP2.5 (panel superior), temperatura (panel central) y velocidad del viento (panel inferior) 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, durante la mañana y de forma automática, 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, una vez al mes 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 material particulado MP2,5. Un reporte equivalente para todo el periodo de operación (1 de abril al 30 de septiembre de 2021), se adjunta al presente informe. Esta comparación se realiza a nivel diario para material particulado; para lo cual se realizan promedios diarios (no móviles) de los pronósticos emitidos y las observaciones registradas a nivel horario. En secciones separadas para cada una de las variables pronosticadas (Material Particulado MP10, Material Particulado MP2.5, Temperatura y Velocidad del Viento) se entrega lo siguiente:

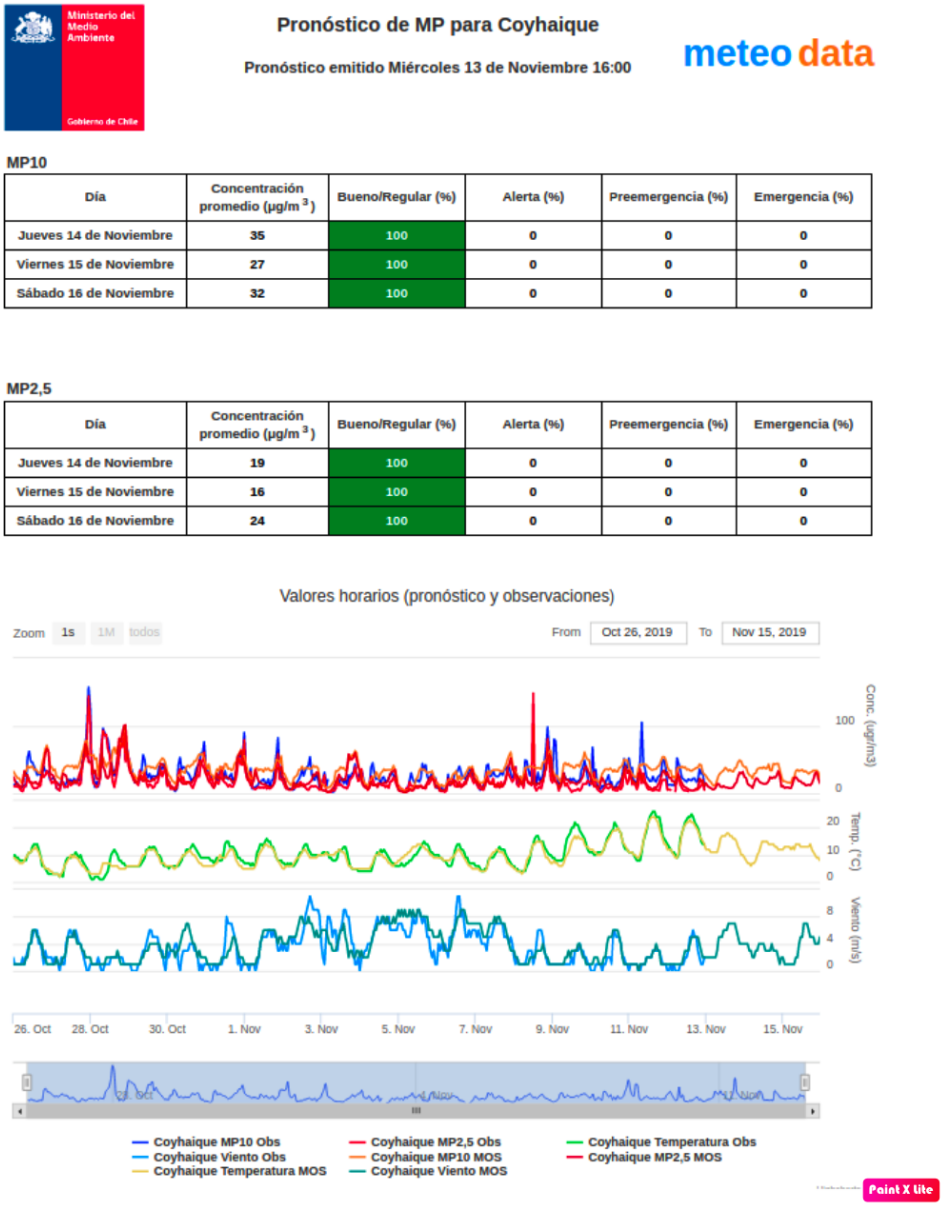

Figura 1: Ejemplo de paneles visibles dentro de la página web del pronóstico de MP10 para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén.

- Diagrama de dispersión a nivel horario entre las observaciones y los pronósticos (solo para Temperatura).
- 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 entre las observaciones y el pronóstico, el sesgo, el coeficiente de correlación y la pendiente entre ambas series de datos horarios (solo para Temperatura).
- Las series de tiempo horarias de las observaciones y los pronósticos.
- Diagrama de dispersión a nivel diario (promedios diarios) entre las observaciones y los

pronósticos (solo para Material Particulado).

- 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 entre los promedios diarios de las observaciones y los promedios diarios del pronóstico, el sesgo, el coeficiente de correlación y la pendiente entre ambas series de promedios diarios (solo para Material Particulado).
- Las series de tiempo diarias (promedios diarios) de las observaciones y los pronósticos (solo para Material Particulado).
- Diagrama de dispersión a nivel diario (máximos diarios) entre las observaciones y los pronósticos (solo 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 entre los máximos diarios de las observaciones y los máximos diarios del pronóstico, el sesgo, el coeficiente de correlación y la pendiente entre ambas series de promedios diarios (solo para temperatura).
- Series de tiempo de los máximos diarios de las observaciones y los pronósticos (sólo para temperatura).
- Diagrama de dispersión a nivel diario (mínimos diarios) entre las observaciones y los pronósticos (solo 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 entre los mínimos diarios de las observaciones y los mínimos diarios del pronóstico, el sesgo, el coeficiente de correlación y la pendiente entre ambas series de promedios diarios (solo para temperatura).
- Series de tiempo de los mínimos diarios de las observaciones y los pronósticos (solo para temperatura).
- Tabla de contingencia según la norma primaria de calidad del aire para MP10 (*Decreto N°59, de 1998*). 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 el reporte final consolidado entre el 1 de abril y el 30 de septiembre de 2021. 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, material particulado 2,5 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 el 1 de abril y el 30 de septiembre de 2021. El análisis se realiza principalmente de modo cuantitativo a través de tablas de estadística comparativas entre el pronóstico y las observaciones y tablas de estadísticos de verificación del desempeño del pronóstico, 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.

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

- **Coeficiente 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 viceversa. De la tabla se puede ver que en todos los casos la correlación para variables de calidad del aire se encuentra entre 0,8 y 0,9, lo cual es razonable para este tipo de pronósticos.

- **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, 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$< 195\mu g/m^3$; Alerta$>= 195, < 240\mu g/m^3$; Preemergencia$>= 240, < 330\mu g/m^3$; Emergencia$>= 330\mu g/m^3$. MP2.5; Bueno/Regular$< 80\mu g/m^3$; Alerta$>= 80, < 110\mu g/m^3$; Preemergencia$>= 110, < 170\mu g/m^3$; Emergencia$>= 170\mu g/m^3$). 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 considerando los pronósticos emitidos cuando las observaciones se encontraron en dicha categoría, de modo que los pronósticos no necesariamente se encuentran en el rango $< 195\mu g/m^3$; lo anterior es así para mostrar la dispersión de los pronósticos en cada categoría. De las tablas se observa que, en general, los valores medios del pronóstico son levemente inferiores, con una mayor desviación estandar y rango de variabilidad. Pese

a esta condición, los pronósticos aciertan la condición observada general, que corresponde a BUENO/REGULAR.

- **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. De las tablas se observa una tendencia a la sobrestimación del pronóstico respecto a las observaciones.

- **Diagrama de dispersión:** los diagramas de dispersión presentados a continuación, muestran de manera gráfica los aspectos resumidos en las tablas precedentes.

La dispersión existente entre pronósticos y observaciones es mayor a medida que aumenta el horizonte de pronóstico.

En conclusión, existe una buena correlación entre el pronóstico y las observaciones, no obstante, esta disminuye conforme crece el horizonte de anticipación. Adicionalmente, existe una sobrestimación por parte del pronóstico. No obstante, todos los pronósticos son acertados en cuanto a categoría.

6.1. Concentraciones de MP10

6.1.1. Pronóstico a 1 día

Coeficiente de Correlación a 1 día

Pronóstico MOS versus Observaciones

	MP10
Coeficiente de correlación	0.89

Tabla 1: Coeficiente de Correlación de Pearson, entre los Pronósticos MOS emitidos a 1 día y las Observaciones de Material Particulado MP10 para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén.

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	59,3	72,2	63,4	78,1	222,1	238,5	290,7	273,6	387,4	352,7
Desviación Estándar	73,9	70,9	35	38,3	7,4	50,9	13,8	113,4	55,5	90,7
Mínimo	16	28,4	16	28,4	214,3	195	278,7	174,7	330,2	210,2
Máximo	460,5	452,7	185,4	212,2	229,6	299,5	304,7	401,9	460,5	452,7

Tabla 2: Tabla de Estadística a 1 día del Pronóstico MOS y de las Observaciones de Material Particulado MP10 para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén.

Tabla de Estadísticos de Verificación de MP10 a 1 día

Pronóstico MOS versus Observaciones

	Completa	Bueno/Regular	Alerta	Preemergencia	Emergencia
RMSE	33,8	29,9	46,2	101,8	81,1
MAE	25,2	21,8	42,1	94,4	75,4
BIAS	12,7	14,7	16,5	-17,1	-34,8

Tabla 3: Tabla de Estadísticos de Verificación de Pronóstico para Material Particulado MP10 a 1 día para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén. El RMSE corresponde al *Root Mean Square Error*, es decir la raíz cuadrada del *Error Cuadrático Medio*; el MAE corresponde al *Mean Abolute 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 $\mu g/m^3$.

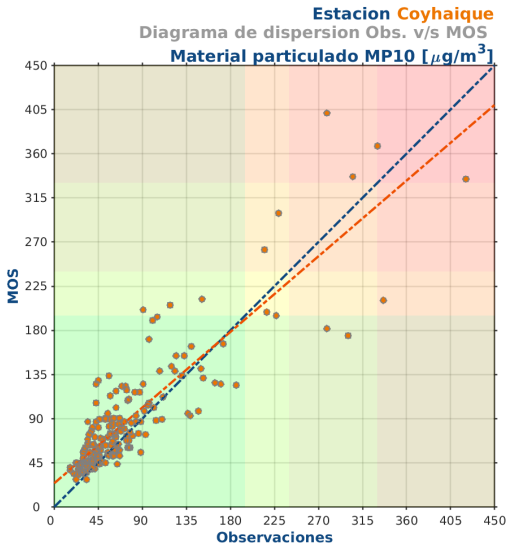

Figura 2: Diagrama de dispersión del Pronóstico MOS (promedios diarios) a 1 día versus las Observaciones para Material Particulado MP10 para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén.

6.1.2. Pronóstico a 2 días

Coeficiente de Correlación a 2 días

Pronóstico MOS versus Observaciones

	MP10
Coeficiente de correlación	0.87

Tabla 4: Coeficiente de Correlación de Pearson, entre los Pronósticos MOS emitidos a 2 días y las Observaciones de Material Particulado MP10 para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén.

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	59,5	72,8	63,6	80	222,1	252,7	290,7	273	387,4	346,8
Desviación Estándar	74	72,8	35	40,8	7,4	57	13,8	135,8	55,5	97,6
Mínimo	16	28,7	16	28,7	214,4	180	278,7	148,1	330,2	198,7
Máximo	460,5	468,1	185,4	273	229,6	305,3	304,7	417,6	460,5	468,1

Tabla 5: Tabla de Estadística a 2 días del Pronóstico MOS y de las Observaciones de Material Particulado MP10 para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén.

Tabla de Estadísticos de Verificación de MP10 a 2 días

Pronóstico MOS versus Observaciones

	Completa	Bueno/Regular	Alerta	Preemergencia	Emergencia
RMSE	39,9	32,8	59,2	120,5	84,7
MAE	26,8	22,8	54,1	114,6	72,4
BIAS	14,4	16,4	30,6	-17,7	-40,7

Tabla 6: Tabla de Estadísticos de Verificación de Pronóstico para Material Particulado MP10 a 2 días para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén. El RMSE corresponde al *Root Mean Square Error*, es decir la raíz cuadrada del *Error Cuadrático Medio*; el MAE corresponde al *Mean Abolute 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 $\mu g/m^3$.

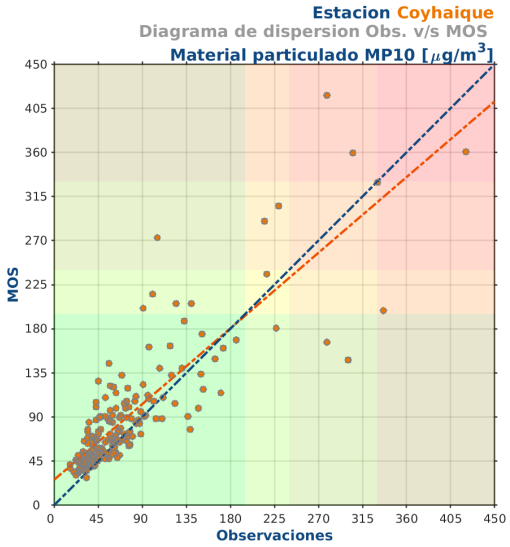

Figura 3: Diagrama de dispersión del Pronóstico MOS (promedios diarios) a 2 días versus las Observaciones para Material Particulado MP10 para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén.

6.1.3. Pronóstico a 3 días

Coeficiente de Correlación a 3 días

Pronóstico MOS versus Observaciones

	MP10
Coeficiente de correlación	0.86

Tabla 7: Coeficiente de Correlación de Pearson, entre los Pronósticos MOS emitidos a 3 días y las Observaciones de Material Particulado MP10 para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén.

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	59,6	74,8	63,4	82,8	222,1	255,2	290,7	265,6	387,4	346,7
Desviación Estándar	74,1	73,8	35	41,4	7,4	85,3	13,8	142,3	55,5	118,6
Mínimo	16	25,7	16	25,6	214,3	129,7	278,7	109,2	330,2	170,3
Máximo	460,5	463,4	185,4	256,8	229,6	315,2	304,7	434,1	460,5	463,4

Tabla 8: Tabla de Estadística a 3 días del Pronóstico MOS y de las Observaciones de Material Particulado MP10 para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén.

Tabla de Estadísticos de Verificación de MP10 a 3 días

Pronóstico MOS versus Observaciones

	Completa	Bueno/Regular	Alerta	Preemergencia	Emergencia
RMSE	43	34,7	83,1	130,1	86,9
MAE	30,4	26,1	81,8	111,5	70,6
BIAS	16,7	19	33,1	-25,1	-40,7

Tabla 9: Tabla de Estadísticos de Verificación de Pronóstico para Material Particulado MP10 a 3 días para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén. El RMSE corresponde al *Root Mean Square Error*, es decir la raíz cuadrada del *Error Cuadrático Medio*; el MAE corresponde al *Mean Abolute 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 $\mu g/m^3$.

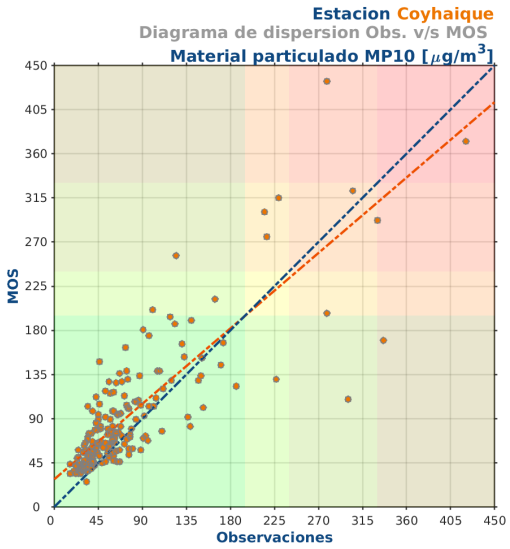

Figura 4: Diagrama de dispersión del Pronóstico MOS (promedios diarios) a 3 días versus las Observaciones para Material Particulado MP10 para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén.

6.2. Concentraciones de MP2.5

6.2.1. Pronóstico a 1 día

Coeficiente de Correlación a 1 día

Pronóstico MOS versus Observaciones

	MP2.5
Coeficiente de correlación	0.89

Tabla 10: Coeficiente de Correlación de Pearson, entre los Pronósticos MOS emitidos a 1 día y las Observaciones de Material Particulado MP2.5 para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén.

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	48,6	56,8	41,7	53,5	91	106,2	138,2	131,2	282	247,9
Desviación Estándar	71,5	64,2	17,1	25,2	8,9	38,8	17,6	30,3	82,1	91,5
Mínimo	10	16,7	10	16,6	82,1	57,6	113,7	82,4	172	110,6
Máximo	450,3	400,6	78,5	160,7	108,5	183	168,3	192,2	450,3	400,6

Tabla 11: Tabla de Estadística a 1 día del Pronóstico MOS y de las Observaciones de Material Particulado MP2.5 para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén.

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

Pronóstico MOS versus Observaciones

	Completa	Bueno/Regular	Alerta	Preemergencia	Emergencia
RMSE	33,1	22,8	41,9	37,6	78
MAE	22,2	16,4	31,4	32	65
BIAS	7,5	11,8	15,1	-7,1	-34,1

Tabla 12: Tabla de Estadísticos de Verificación de Pronóstico para Material Particulado MP2.5 a 1 día para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén. El RMSE corresponde al *Root Mean Square Error*, es decir la raíz cuadrada del *Error Cuadrático Medio*; el MAE corresponde al *Mean Abolute 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 $\mu g/m^3$.

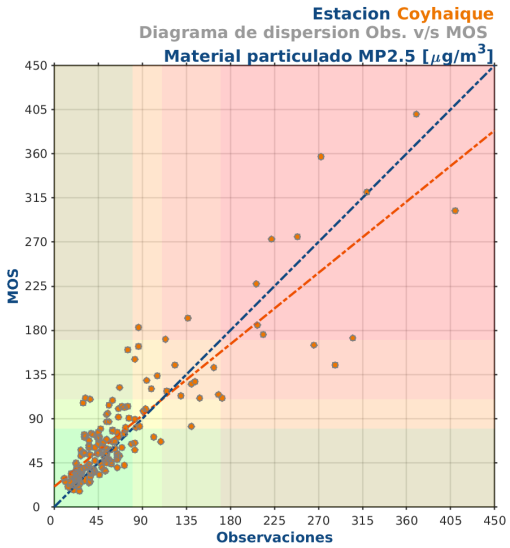

Figura 5: Diagrama de dispersión del Pronóstico MOS (promedios diarios) a 1 día versus las Observaciones para Material Particulado MP2.5 para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén.

6.2.2. Pronóstico a 2 días

Coeficiente de Correlación a 2 días

Pronóstico MOS versus Observaciones

	MP2.5
Coeficiente de correlación	0.87

Tabla 13: Coeficiente de Correlación de Pearson, entre los Pronósticos MOS emitidos a 2 días y las Observaciones de Material Particulado MP2.5 para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén.

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	48,8	60,6	41,7	54,1	91	108,1	138,2	131,7	282	243,6
Desviación Estándar	71,6	64,2	17,1	25,1	8,9	48,7	17,6	32,3	82,1	90,1
Mínimo	10	15,6	10	15,6	82,1	55,4	113,7	84,4	172	122,4
Máximo	450,3	405,6	78,5	159,7	108,5	236,6	168,3	191,8	450,3	405,6

Tabla 14: Tabla de Estadística a 2 días del Pronóstico MOS y de las Observaciones de Material Particulado MP2.5 para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén.

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

Pronóstico MOS versus Observaciones

	Completa	Bueno/Regular	Alerta	Preemergencia	Emergencia
RMSE	36,4	22,8	52,1	38,6	89,1
MAE	23,3	16,2	36,3	32,7	74
BIAS	7,7	12,3	17,1	-6,5	-38,4

Tabla 15: Tabla de Estadísticos de Verificación de Pronóstico para Material Particulado MP2.5 a 2 días para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén. El RMSE corresponde al *Root Mean Square Error*, es decir la raíz cuadrada del *Error Cuadrático Medio*; el MAE corresponde al *Mean Abolute 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 $\mu g/m^3$.

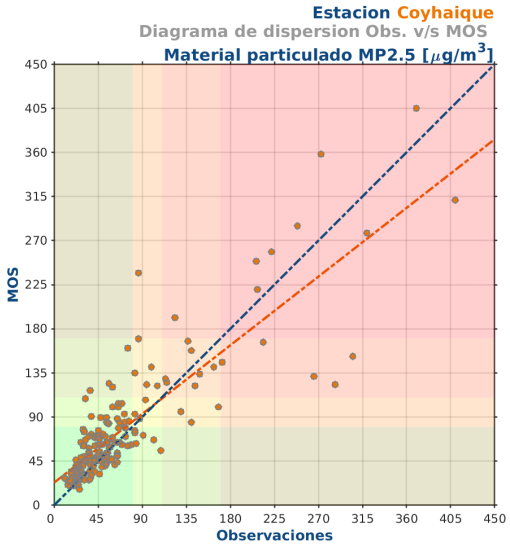

Figura 6: Diagrama de dispersión del Pronóstico MOS (promedios diarios) a 2 días versus las Observaciones para Material Particulado MP2.5 para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén.

6.2.3. Pronóstico a 3 días

Coeficiente de Correlación a 3 días

Pronóstico MOS versus Observaciones

	MP2.5
Coeficiente de correlación	0.85

Tabla 16: Coeficiente de Correlación de Pearson, entre los Pronósticos MOS emitidos a 3 días y las Observaciones de Material Particulado MP2.5 para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén.

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	49,3	61,2	41,7	57,9	91	98,9	138,2	143,7	282	235,1
Desviación Estándar	71,8	63,7	17,1	27,8	8,9	33,8	17,6	39,7	82,1	103,2
Mínimo	10	14	10	14	82,1	48,8	113,7	73,2	172	98,6
Máximo	450,3	408,9	78,5	167,5	108,5	157,4	168,3	230,1	450,3	408,9

Tabla 17: Tabla de Estadística a 3 días del Pronóstico MOS y de las Observaciones de Material Particulado MP2.5 para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén.

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

Pronóstico MOS versus Observaciones

	Completa	Bueno/Regular	Alerta	Preemergencia	Emergencia
RMSE	38,5	27	34,6	45	94,9
MAE	26	19,5	29,7	35,7	80
BIAS	9,8	15,9	7,8	5,5	-46,9

Tabla 18: Tabla de Estadísticos de Verificación de Pronóstico para Material Particulado MP2.5 a 3 días para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén. El RMSE corresponde al *Root Mean Square Error*, es decir la raíz cuadrada del *Error Cuadrático Medio*; el MAE corresponde al *Mean Abolute 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 $\mu g/m^3$.

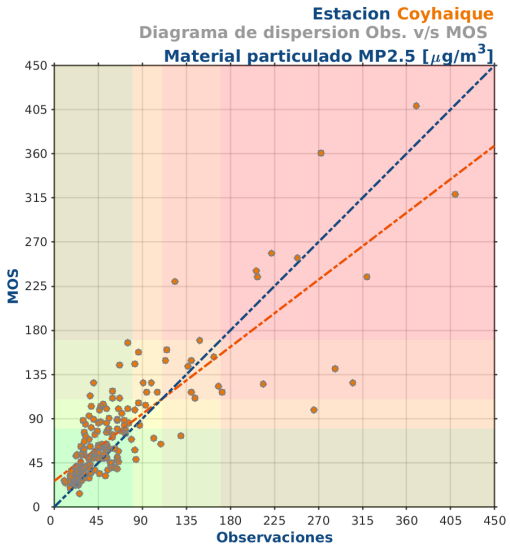

Figura 7: Diagrama de dispersión del Pronóstico MOS (promedios diarios) a 3 días versus las Observaciones para Material Particulado MP2.5 para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén.

6.3. Velocidad del viento

6.3.1. Pronóstico a 1 día

Coeficiente de Correlación a 1 día

Pronóstico MOS versus Observaciones

	V. del viento
Coeficiente de correlación	0,80

Tabla 19: Coeficiente de Correlación de Pearson, entre los Pronósticos MOS emitidos a 1 día y las Observaciones de velocidad del viento para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén.

Tabla de Estadística de velocidad del viento a 1 día

Pronóstico MOS y Observaciones

	Completa		Bueno/Regular		Alerta		Preemergencia		Emergencia	
	Obs.	MOS	Obs.	MOS	Obs.	MOS	Obs.	MOS	Obs.	MOS
Media	1,6	1,7	-	-	-	-	-	-	-	-
Desviación Estándar	1,2	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Mínimo	0,3	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-
Máximo	6,3	5,3	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 20: Tabla de Estadística a 1 día del Pronóstico MOS y de las Observaciones de velocidad del viento para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén.

Tabla de Estadísticos de Verificación de velocidad del viento a 1 días

Pronóstico MOS versus Observaciones

	Completa	Bueno/Regular	Alerta	Preemergencia	Emergencia
RMSE	0.7	-	-	-	-
MAE	0,5	-	-	-	-
BIAS	-0,1	-	-	-	-

Tabla 21: Tabla de Estadísticos de Verificación de Pronóstico para velocidad del viento a 1 día para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén. El RMSE corresponde al *Root Mean Square Error*, es decir la raíz cuadrada del *Error Cuadrático Medio*; el MAE corresponde al *Mean Abolute 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 $\mu g/m^3$.

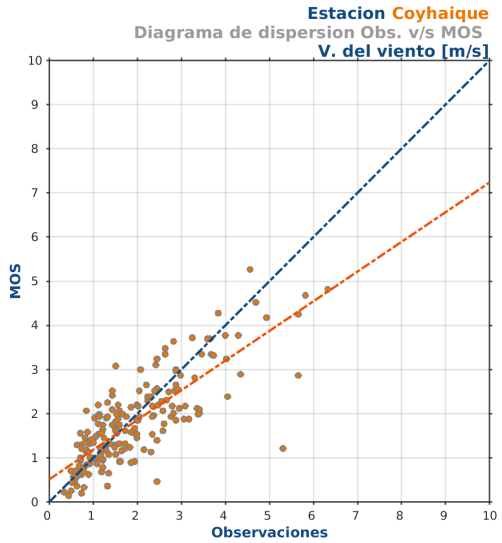

Figura 8: Diagrama de dispersión del Pronóstico MOS (promedios diarios) a 1 día versus las Observaciones para velocidad del viento para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén.

6.3.2. Pronóstico a 2 día

Coeficiente de Correlación a 2 días

Pronóstico MOS versus Observaciones

	V. del viento
Coeficiente de correlación	0,77

Tabla 22: Coeficiente de Correlación de Pearson, entre los Pronósticos MOS emitidos a 2 días y las Observaciones de velocidad del viento para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén.

Tabla de Estadística de velocidad del viento a 2 días

Pronóstico MOS y Observaciones

	Completa		Bueno/Regular		Alerta		Preemergencia		Emergencia	
	Obs.	MOS	Obs.	MOS	Obs.	MOS	Obs.	MOS	Obs.	MOS
Media	1,6	1,7	-	-	-	-	-	-	-	-
Desviación Estándar	1,2	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Mínimo	0,3	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-
Máximo	6,3	5,2	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 23: Tabla de Estadística a 2 días del Pronóstico MOS y de las Observaciones de velocidad del viento para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén.

Tabla de Estadísticos de Verificación de velocidad del viento a 2 días

Pronóstico MOS versus Observaciones

	Completa	Bueno/Regular	Alerta	Preemergencia	Emergencia
RMSE	0,8	-	-	-	-
MAE	0,5	-	-	-	-
BIAS	-0,1	-	-	-	-

Tabla 24: Tabla de Estadísticos de Verificación de Pronóstico para velocidad del viento a 2 días para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén. El RMSE corresponde al *Root Mean Square Error*, es decir la raíz cuadrada del *Error Cuadrático Medio*; el MAE corresponde al *Mean Abolute 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 $\mu g/m^3$.

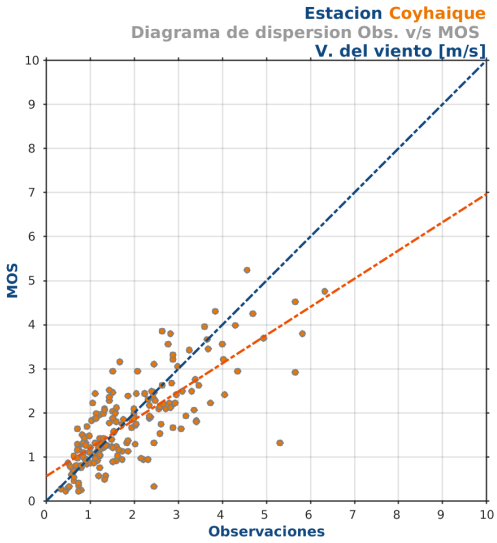

Figura 9: Diagrama de dispersión del Pronóstico MOS (promedios diarios) a 2 días versus las Observaciones para velocidad del viento para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén.

6.3.3. Pronóstico a 3 día

Coeficiente de Correlación a 3 días

Pronóstico MOS versus Observaciones

	V. del viento
Coeficiente de correlación	0,68

Tabla 25: Coeficiente de Correlación de Pearson, entre los Pronósticos MOS emitidos a 3 días y las Observaciones de velocidad del viento para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén.

Tabla de Estadística de velocidad del viento a 3 días

Pronóstico MOS y Observaciones

	Completa		Bueno/Regular		Alerta		Preemergencia		Emergencia	
	Obs.	MOS	Obs.	MOS	Obs.	MOS	Obs.	MOS	Obs.	MOS
Media	1,6	1,5	-	-	-	-	-	-	-	-
Desviación Estándar	1,2	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Mínimo	0,3	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-
Máximo	6,3	5	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 26: Tabla de Estadística a 3 días del Pronóstico MOS y de las Observaciones de velocidad del viento para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén.

Tabla de Estadísticos de Verificación de velocidad del viento a 3 días

Pronóstico MOS versus Observaciones

	Completa	Bueno/Regular	Alerta	Preemergencia	Emergencia
RMSE	0,9	-	-	-	-
MAE	0,6	-	-	-	-
BIAS	-0,2	-	-	-	-

Tabla 27: Tabla de Estadísticos de Verificación de Pronóstico para velocidad del viento a 3 días para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén. El RMSE corresponde al *Root Mean Square Error*, es decir la raíz cuadrada del *Error Cuadrático Medio*; el MAE corresponde al *Mean Abolute 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 $\mu g/m^3$.

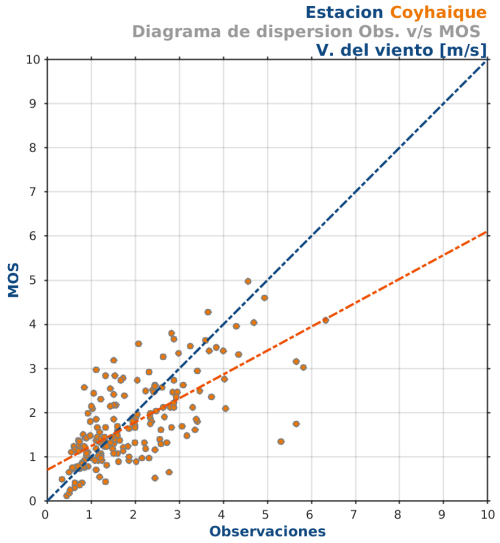

Figura 10: Diagrama de dispersión del Pronóstico MOS (promedios diarios) a 3 días versus las Observaciones para velocidad del viento para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén.

6.4. Temperatura

6.4.1. Pronóstico a 1 día

Coeficiente de Correlación a 1 días

Pronóstico MOS versus Observaciones

	Temperatura
Coeficiente de correlación	0,94

Tabla 28: Coeficiente de Correlación de Pearson, entre los Pronósticos MOS emitidos a 1 día y las Observaciones de temperatura para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén.

Tabla de Estadística de temperatura a 1 día

Pronóstico MOS y Observaciones

	Completa		Bueno/Regular		Alerta		Preemergencia		Emergencia	
	Obs.	MOS	Obs.	MOS	Obs.	MOS	Obs.	MOS	Obs.	MOS
Media	6	5,7	-	-	-	-	-	-	-	-
Desviación Estándar	3,3	3	-	-	-	-	-	-	-	-
Mínimo	-3,1	-2,3	-	-	-	-	-	-	-	-
Máximo	13,7	13,5	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 29: Tabla de Estadística a 1 día del Pronóstico MOS y de las Observaciones de temperatura para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén.

Tabla de Estadísticos de Verificación de temperatura a 1 día

Pronóstico MOS versus Observaciones

	Completa	Bueno/Regular	Alerta	Preemergencia	Emergencia
RMSE	1,2	-	-	-	-
MAE	0,9	-	-	-	-
BIAS	-0,3	-	-	-	-

Tabla 30: Tabla de Estadísticos de Verificación de Pronóstico para temperatura a 1 día para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén. El RMSE corresponde al *Root Mean Square Error*, es decir la raíz cuadrada del *Error Cuadrático Medio*; el MAE corresponde al *Mean Abolute 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 $\mu g/m^3$.

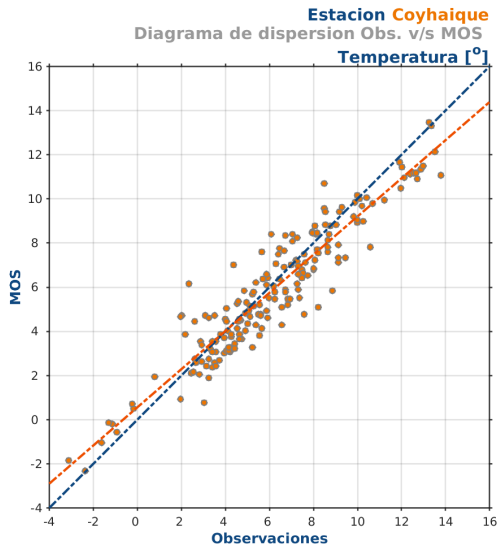

Figura 11: Diagrama de dispersión del Pronóstico MOS (promedios diarios) a 3 días versus las Observaciones para temperatura para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén.

6.4.2. Pronóstico a 2 días

Coeficiente de Correlación a 2 días

Pronóstico MOS versus Observaciones

	Temperatura
Coeficiente de correlación	0,93

Tabla 31: Coeficiente de Correlación de Pearson, entre los Pronósticos MOS emitidos a 2 días y las Observaciones de temperatura para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén.

Tabla de Estadística de temperatura a 2 días

Pronóstico MOS y Observaciones

	Completa		Bueno/Regular		Alerta		Preemergencia		Emergencia	
	Obs.	MOS	Obs.	MOS	Obs.	MOS	Obs.	MOS	Obs.	MOS
Media	5,9	5,6	-	-	-	-	-	-	-	-
Desviación Estándar	3,2	3	-	-	-	-	-	-	-	-
Mínimo	-3,1	-1,7	-	-	-	-	-	-	-	-
Máximo	13,8	13,8	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 32: Tabla de Estadística a 2 días del Pronóstico MOS y de las Observaciones de temperatura para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén.

Tabla de Estadísticos de Verificación de temperatura a 2 días

Pronóstico MOS versus Observaciones

	Completa	Bueno/Regular	Alerta	Preemergencia	Emergencia
RMSE	1,2	-	-	-	-
MAE	0,9	-	-	-	-
BIAS	-0,2	-	-	-	-

Tabla 33: Tabla de Estadísticos de Verificación de Pronóstico para temperatura a 2 días para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén. El RMSE corresponde al *Root Mean Square Error*, es decir la raíz cuadrada del *Error Cuadrático Medio*; el MAE corresponde al *Mean Abolute 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 $\mu g/m^3$.

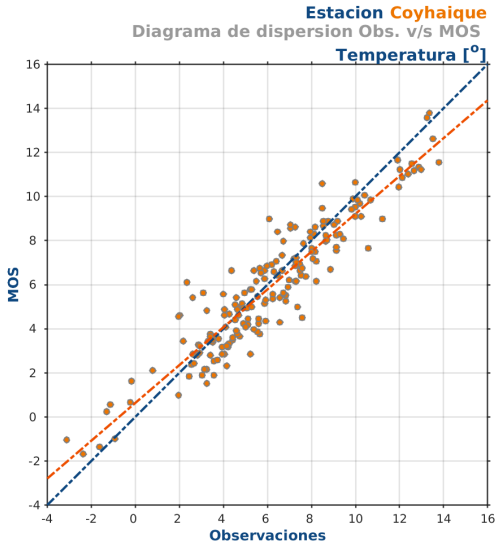

Figura 12: Diagrama de dispersión del Pronóstico MOS (promedios diarios) a 2 días versus las Observaciones para temperatura para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén.

6.4.3. Pronóstico a 3 días

Coeficiente de Correlación a 3 días

Pronóstico MOS versus Observaciones

	Temperatura
Coeficiente de correlación	0,91

Tabla 34: Coeficiente de Correlación de Pearson, entre los Pronósticos MOS emitidos a 3 días y las Observaciones de temperatura para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén.

Tabla de Estadística de temperatura a 3 días

Pronóstico MOS y Observaciones

	Completa		Bueno/Regular		Alerta		Preemergencia		Emergencia	
	Obs.	MOS	Obs.	MOS	Obs.	MOS	Obs.	MOS	Obs.	MOS
Media	5,9	5,8	-	-	-	-	-	-	-	-
Desviación Estándar	3.2	2.9	-	-	-	-	-	-	-	-
Mínimo	-3,1	-1,9	-	-	-	-	-	-	-	-
Máximo	13,8	13,7	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 35: Tabla de Estadística a 3 días del Pronóstico MOS y de las Observaciones de temperatura para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén.

Tabla de Estadísticos de Verificación de temperatura a 3 días

Pronóstico MOS versus Observaciones

	Completa	Bueno/Regular	Alerta	Preemergencia	Emergencia
RMSE	1,4	-	-	-	-
MAE	1,1	-	-	-	-
BIAS	-0,3	-	-	-	-

Tabla 36: Tabla de Estadísticos de Verificación de Pronóstico para temperatura a 3 días para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén. El RMSE corresponde al *Root Mean Square Error*, es decir la raíz cuadrada del *Error Cuadrático Medio*; el MAE corresponde al *Mean Abolute 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 $\mu g/m^3$.

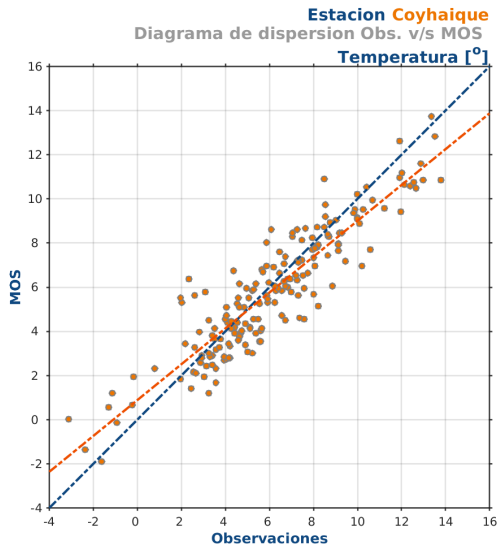

Figura 13: Diagrama de dispersión del Pronóstico MOS (promedios diarios) a 3 días versus las Observaciones para temperatura para la localidad de Coyhaique en la región de Aysén.

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 sujeto a la generación de errores, los que son 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 fenóme-

nos atmosféricos. Estas aproximaciones 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 mantención. 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.

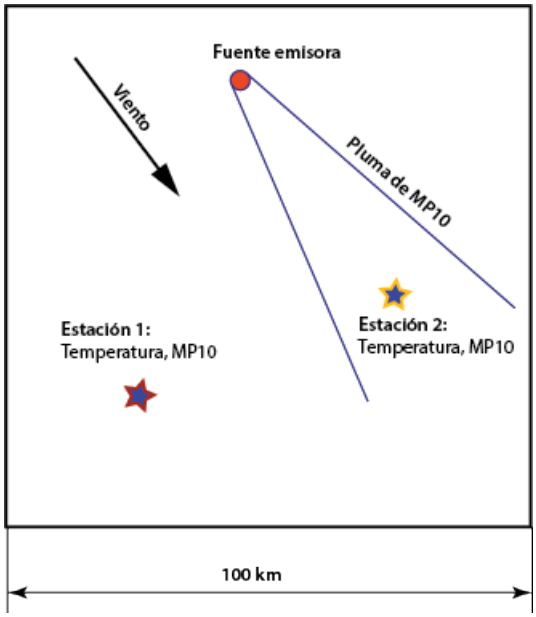

Figura 14: Red de monitoreo en una planicie hipotética de extensión de 100 km. La red consiste en dos estaciones de monitoreo (estrellas) que miden temperatura y MP10. Dentro de la planicie se encuentra una fuente (punto) que emite MP10 y la pluma se dirige según la dirección de viento.

- 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 14; 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 en todas las 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 usada solo 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 solo 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 esporádicas) 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 aciertos, el que por supuesto es 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 hincapié en que las diferencias entre registros de distintas estaciones en una misma ciudad dan cuenta de que existen fuentes locales (y posiblemente esporádicas) 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 esta limitación, asumiendo que inevitablemente habrán errores en los pronósticos introducidos por esta causa. Finalmente, en el caso de la localidad de Coyhaique, la ocurrencia de episodios de mala calidad del aire son determinados

mediante las observaciones de dos estación principalmente (Coyhaique I y Coyhaique II), a partir de las cuales se obtiene el máximo valor por hora, sin embargo, según lo visto con anterioridad, puede darse el caso en que otros sectores de la localidad 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: Reporte final

Se adjuntan los documentos de evaluaciones mensuales, entre abril y octubre de 2021. El detalle de los documentos es el siguiente:

- Reporte de evaluación MOS, Ministerio de Medio Ambiente, Coyhaique, 1 de abril de 2021 - 1 de mayo de 2021.
- Reporte de evaluación MOS, Ministerio de Medio Ambiente, Coyhaique, 1 de mayo de 2021 - 1 de junio de 2021.
- Reporte de evaluación MOS, Ministerio de Medio Ambiente, Coyhaique, 1 de junio de 2021 - 1 de julio de 2021.
- Reporte de evaluación MOS, Ministerio de Medio Ambiente, Coyhaique, 1 de julio de 2021 - 1 de agosto de 2021.
- Reporte de evaluación MOS, Ministerio de Medio Ambiente, Coyhaique, 1 de agosto de 2021 - 1 de septiembre de 2021.
- Reporte de evaluación MOS, Ministerio de Medio Ambiente, Coyhaique, 1 de septiembre de 2021 - 1 de octubre de 2021.