

Informe Final.

VII Región del Maule. Ciudad de Curicó.

“Caracterización del factor meteorológico asociado a contaminación atmosférica y propuesta de diseño de redes meteorológicas para el seguimiento y pronóstico de calidad del aire en cuatro regiones del sur de Chile”.

Preparado por:
Fundación para la Transferencia Tecnológica.

UNTEC

Para:
Ministerio de Medio Ambiente.



25 de marzo de 2015

Contenidos

1. Introducción	3
2. Recopilación y revisión de datos.	4
2.1. Curicó	7
2.2. Teno Cementos BIO BIO	7
2.3. Teno Enlasa	7
3. Caracterización del problema de material particulado.	8
3.1. Curicó	9
4. Relación entre variables meteorológicas y calidad del aire.	10
5. Objetivos de la red meteorológica	13
6. Propuesta de red meteorológica	14
6.1. Torre micrometeorológica	15
6.2. Estaciones de superficie	16
6.3. Estación en altura	16
6.4. Calidad de los equipos	16
7. Cronograma de plazos	18
8. Procesos de validación y almacenamiento	19
8.1. Validación	21
8.1.1. Objetivo	21
8.1.2. Subjetivo	22
8.2. Almacenamiento	23
8.2.1. Servidor de series de tiempo (BackEnd)	23
8.2.2. Explorador web (FrontEnd)	24
9. Evaluación, capacidad de pronóstico	24
9.1. Metodología	25
9.2. Método de Pronóstico	25
9.3. Incertidumbre de los datos	27
9.4. Coeficiente de correlación	31
9.4.1. Temuco	33
9.4.2. Rancagua	33
9.4.3. Curicó	34
9.4.4. Talca	34
9.4.5. Chillán	34
9.4.6. Concepción	35
9.4.7. Coronel - Lota	36

9.4.8. Los Ángeles	36
9.5. Coeficiente de correlación - Meteorología	37
9.6. Tabla de contingencia	41
9.6.1. Temuco	41
9.6.2. Rancagua	43
9.6.3. Talca	44
9.6.4. Chillán	45
9.6.5. Concepción	46
9.6.6. Coronel-Lota	47
9.6.7. Los Ángeles	48
9.7. Pronóstico probabilístico	49
9.7.1. Temuco	50
9.7.2. Rancagua	56
9.7.3. Curicó	60
9.7.4. Talca	61
9.7.5. Chillán	64
9.7.6. Concepción	68
9.7.7. Coronel - Lota	71
9.7.8. Los Ángeles	74
10. Implementación de técnicas de pronóstico	76
11. Conclusiones	77
12. Anexos	78
12.1. Series de tiempo	78
12.1.1. Curicó	78
12.1.2. Teno Cementos BIO BIO	80
12.1.3. Teno Enlasa	81
12.2. Ciclos estacionales Meteorología	83
12.2.1. Curicó	83
12.3. Ciclos estacionales Material Particulado	84
12.3.1. Curicó	84
12.4. Análisis sinóptico	85
12.4.1. Resumen ejecutivo	85
12.4.2. Introducción	85
12.4.3. Climatología de la zona centro - sur de Chile	86
12.4.4. Concentraciones de MP10	87
12.4.5. Eventos de concentraciones de MP10 elevadas	89
12.4.6. Coincidencia de eventos	90
12.4.7. Evolución sinóptica de eventos	92
12.4.8. Conclusiones	109

1. Introducción

En el siguiente informe final dentro del marco del concurso público del Ministerio de Medio Ambiente de la República de Chile, denominado “*Caracterización del factor meteorológico asociado a contaminación atmosférica y propuesta de diseño de redes meteorológicas para el seguimiento y pronóstico de calidad del aire en cuatro regiones del sur de Chile*”, entregado por la Fundación para la Transferencia Tecnológica (UNTEC) al Ministerio de Medio Ambiente, para la ciudad de Curicó, capital de la Provincia de Curicó, ubicada en la VII Región del Maule, se incluye lo siguiente:

- Los resultados de las actividades de los literales I), II), III) y IV) de la Actividad 1.
- Los resultados de las actividades de los literales I), II), III) y IV) de la Actividad 2.
- Los resultados de las actividades de los literales I) y II) de la Actividad 3.
- Se adjunta además copia magnética del informe y de los datos meteorológicos y de calidad del aire procesados a la fecha.

Actividad 1. Análisis de la información meteorológica y de calidad del aire disponible.

- I) Recopilación y revisión de la información de variables meteorológicas disponibles de fuentes oficiales, tales como la administrada por sistema SINCA del Ministerio de Medio Ambiente u otras fuentes tales como la Dirección Meteorológica de Chile.
- II) Revisión y recopilación de la información de calidad del aire para MP10 y MP2,5 disponible de fuentes oficiales, tales como la administrada por el sistema SINCA del Ministerio de Medio Ambiente.
- III) Análisis de relación entre las variables meteorológicas y la Calidad del Aire, en especial durante el periodo de ocurrencia de episodios de contaminación atmosférica.
- IV) Caracterización de los episodios críticos de calidad del aire para MP10 y MP2,5 en las regiones de interés.

Actividad 2. Propuesta de Diseño de Redes Meteorológicas para Calidad del Aire.

- I) A partir de los resultados de la actividad 1, elaborar una propuesta de red de monitoreo meteorológico para cada región de interés, definiendo el tipo y calidad de instrumental según los objetivos de observación.
- II) Definir los objetivos primarios y/o secundarios para cada red de monitoreo propuesta, estableciendo su vinculación con la información complementaria de otras redes de monitoreo existentes en cada región.
- III) Realizar un cronograma de plazos de instalación de equipamiento a partir de la identificación de prioridades de observación, dimensionando en cada caso los aspectos técnicos de mantención y de operación de las redes propuestas.
- IV) Elaborar una identificación de los procesos de validación y almacenamiento de la información que se generará en dichas redes en función del instrumental propuesto.

Actividad 3. Análisis de Predictibilidad Meteorológica y de Calidad del Aire.

- I) Evaluación, a partir de los resultados de la actividad 2, de las capacidades de pronóstico de variables o índices meteorológicos y de calidad del aire en las regiones de interés.
- II) Evaluación de fortalezas, debilidades, costos y plazos en la implementación de técnicas de pronóstico meteorológico y de calidad del aire existentes, y que son potencialmente aplicables en las regiones de interés.

En la Sección 2 se describen las estaciones y sus variables, tanto meteorológicas como de calidad del aire, disponibles para la ciudad en estudio, además de los procesos aplicados para obtener las series de tiempo de las variables de interés con las que se trabaja más adelante. En la Sección 3 se caracteriza el problema de material particulado para la ciudad en estudio en términos temporales (a lo largo de las horas del día y los meses del año). En la Sección 4 se identifican las relaciones entre las variables meteorológicas, temperatura y velocidad del viento, con las concentraciones de material particulado en general y para los episodios de mayores concentraciones diarias promedio. En la Sección 5 se describen los objetivos primarios y secundarios que la nueva red meteorológica en apoyo a la gestión ambiental debe cumplir. En la Sección 6 se entrega una propuesta de red meteorológica en apoyo a la gestión ambiental, incluyendo una descripción de los tipos de estaciones propuestas y una recomendación de la calidad con la que los equipos deben contar. La Sección 7 entrega un cronograma de plazos de instalación de la red y recomendaciones para su mantención y operación. En la Sección 8 se entregan recomendaciones del proceso de validación por el que los datos de la nueva red meteorológica deben pasar y cómo éstos deben ser almacenados. La Sección 9 desarrolla la evaluación de pronosticabilidad de las distintas variables, tanto meteorológicas como de calidad del aire, en distintos términos, y además entrega una propuesta de pronóstico probabilístico que permita generar criterios más objetivos respecto del manejo de episodios de emergencia ambiental. La Sección 10 se entrega una evaluación de las fortalezas y debilidades, los costos y plazos de implementación de un pronóstico meteorológico y de calidad del aire para la ciudad en estudio. La Sección 11 entrega breves conclusiones acerca de la pronosticabilidad de las variables meteorológicas y de calidad del aire. En los Anexos (Sección 12) se entregan las series de tiempo y ciclos estacionales de las variables de interés, tanto meteorológicas como de calidad del aire, además un detallado análisis sinóptico de todas las ciudades en estudio, como complemento de la información.

2. Recopilación y revisión de datos.

Dentro del sistema SINCA se encuentran tres estaciones seleccionadas para representar a la ciudad de Curicó; dos estaciones que miden tanto variables meteorológicas como de calidad del aire y una estación que mide sólo variables meteorológicas (Figura 1, Tabla 1) de las cuales se han obtenido las variables de interés (Material Particulado MP10, Material Particulado MP2.5, Velocidad VELS y Dirección del viento DIRV, Temperatura TEMP y Humedad Relativa HREL) vía descarga web del sistema AIRVIRO.

Estación		Ubicación		Calidad del aire		Meteorología			
COD	Nombre	LAT [°]	LON [°]	MP10	MP2.5	VELS	DIRV	TEMP	HREL
709	Curicó	-34.97	-71.23	✓	✓	✓	✓	✓	✓
704	Teno Cementos BIO BIO	-34.87	-71.16	✓	–	✓	✓	✓	✓
705	Teno Enlasa	-34.86	-71.13	–	–	✓	✓	✓	✓

Tabla 1: Resumen estaciones y variables disponibles para la ciudad de Curicó. COD: código SINCA.

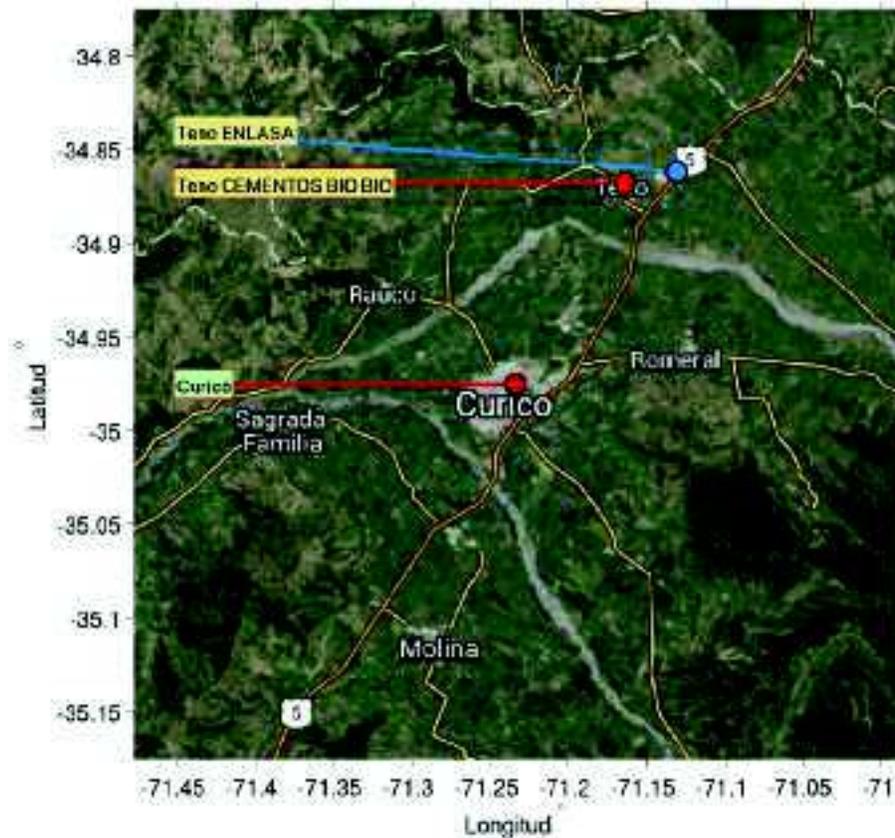


Figura 1: Ubicación de las estaciones meteorológicas y de calidad del aire para la ciudad de Curicó. Círculos rojos: estaciones de calidad del aire (pueden o no incluir variables meteorológicas). Círculos azules: estaciones meteorológicas. Etiquetas verdes: estaciones públicas. Etiquetas amarillas: estaciones privadas.

El set de datos meteorológicos obtenido incluye diferentes series de tiempo para una única variable. El primer proceso de los datos correspondió a la obtención de una serie única para cada variable, a través de la combinación de las distintas series de tiempo, privilegiando las con mayor cantidad de datos por sobre las demás.

El set de datos de calidad del aire obtenido incluye dos tipos de series de tiempo, denominadas LIN y VAL, refiriéndose a datos “en línea” y “validados”, respectivamente. El primer proceso de los datos correspondió a la obtención de una serie única para cada variable, a través de la combinación de ambas series, privilegiando los datos VAL por sobre los LIN.

El siguiente proceso, tanto para los datos meteorológicos como de calidad del aire, correspondió a la limpieza de los datos, que contempló la eliminación de los datos claramente erróneos, como fuera de rango, periodos de datos constantes y saltos esporádicos en los datos. Particularmente, el caso de los datos de calidad del aire se eliminaron los periodos de las series de tiempo de datos LIN con variabilidad y rangos diferentes a los datos VAL, las series de datos LIN para las estaciones donde no existen datos VAL y que están mal correlacionadas con las series de tiempo de estaciones cercanas, y las series de tiempo de datos LIN y/o VAL con escasa cantidad de datos. En todos los casos se procuró el no sobre eliminar datos.

Las series de tiempo obtenidas, tanto para material particulado como para las variables meteorológicas, pueden verse en el Anexo 12.1. El Anexo 12.2 muestra, además, los ciclos estacionales de las variables meteorológicas. En general las series de tiempo de las variables meteorológicas presentan poca cantidad de datos y algunas de ellas se encuentran fragmentadas lo que disminuye la confiabilidad de los datos en dichos casos.

Un resumen de las principales características de las series de tiempo obtenidas para las diferentes variables se encuentra en las tablas 2-4, donde: *Inicio*: Fecha de inicio del registro en formato dd-mmm-aaaa; *Final*: Fecha final del registro en formato dd-mmm-aaaa ; *Largo*: Largo del registro en años proporcionales; *Aus.*: Datos ausentes dentro del periodo de tiempo en años proporcionales; *Elim.*: Cantidad de datos eliminados en porcentaje del largo del registro y, entre paréntesis, en cantidad o número de datos horarios; *Disp.*: Cantidad de datos disponibles en años proporcionales y, entre paréntesis, el porcentaje de los datos disponibles que corresponde a datos de tipo VAL para las series de tiempo de material particulado.

2.1. Curicó

Tabla 2: Resumen variables. Estación Curico .

Variable	Inicio [dd- mmm-aaaa]	Final [dd- mmm-aaaa]	Largo [años]	Aus. [años]	Elim. [%] (Elim. [n°])	Disp. [años] (VAL [%])
MP10	07-Jul-2012	17-Jun-2014	1.94	0.52	2.97 (371)	1.38 (28.82)
MP2.5	07-Jul-2012	17-Jun-2014	1.94	0.51	3.23 (406)	1.39 (27.92)
DIRV	07-Jul-2012	17-Jun-2014	1.94	1.13	0.00 (0)	0.82
VELS	07-Jul-2012	17-Jun-2014	1.94	1.13	0.00 (0)	0.82
HREL	07-Jul-2012	17-Jun-2014	1.94	1.13	0.00 (0)	0.82
TEMP	07-Jul-2012	17-Jun-2014	1.94	1.13	0.00 (0)	0.82

2.2. Teno Cementos BIO BIO

Tabla 3: Resumen variables. Estación Teno, CEMENTOS BIO BIO .

Variable	Inicio [dd- mmm-aaaa]	Final [dd- mmm-aaaa]	Largo [años]	Aus. [años]	Elim. [%] (Elim. [n°])	Disp. [años] (VAL [%])
MP10	01-Feb-2009	31-Mar-2009	0.33	0.08	33.87 (721)	0.16 (0.00)
DIRV	01-Feb-2009	31-Mar-2009	0.33	0.08	34.52 (745)	0.16
VELS	01-Feb-2009	31-Mar-2009	0.33	0.08	34.28 (737)	0.16
HREL	01-Feb-2009	31-Mar-2009	0.33	0.08	34.52 (745)	0.16
TEMP	01-Feb-2009	31-Mar-2009	0.33	0.08	34.52 (745)	0.16

2.3. Teno Enlasa

Tabla 4: Resumen variables. Estación Teno, ENLASA .

Variable	Inicio [dd- mmm-aaaa]	Final [dd- mmm-aaaa]	Largo [años]	Aus. [años]	Elim. [%] (Elim. [n°])	Disp. [años] (VAL [%])
DIRV	01-Jun-2009	01-Jul-2009	0.08	0.02	0.00 (0)	0.07
VELS	01-Jun-2009	01-Jul-2009	0.08	0.02	0.00 (0)	0.07
HREL	01-Jun-2009	01-Jul-2009	0.08	0.00	0.00 (0)	0.08
TEMP	01-Jun-2009	01-Jul-2009	0.08	0.00	0.00 (0)	0.08

3. Caracterización del problema de material particulado.

Las tablas 5-6 muestran los promedios de concentraciones diarias y anuales según las normas establecidas en la legislación vigente. El sufijo *CON* en los nombres de las variables indica que para el cálculo de las concentraciones se consideraron tanto los valores de tipo VAL como LIN. Los cálculos hechos con al menos 75 % de datos registrados para cada periodo se marcan en negro, mientras que el resto se marca en rojo y se consideran no representativos. El destacado amarillo indica los valores que superan la norma establecida.

Considerando sólo los valores definidos como representativos, podemos observar que existe una superación de la norma anual de MP10 y de la norma diaria y anual de MP2.5 en la estación Curicó en 2013, lo que (a pesar de ser poco concluyente por corresponder a el único periodo representativo para dicha estación) indica un problema de concentraciones de material particulado en la ciudad de Curicó. La serie de tiempo de MP10 de la estación Teno Cementos BIO BIO no ha sido considerada para el análisis debido a que no se dispone de datos VAL y la cantidad de datos LIN de cada año no es representativa para el periodo.

Las figuras 2-3 muestran los ciclos diarios y estacionales de las concentraciones de MP10 y MP2.5 para las estación Curicó, la cual caracteriza la evolución temporal del problema de material particulado en la ciudad de Curicó. Los ciclos diarios muestran las concentraciones de material particulado promedio para cada hora del día considerando todos los años de datos (línea roja punteada) junto con el rango del 5 % y 95 % de los datos (sombra verde). Los ciclos estacionales, por su parte, muestran los ciclos diarios promedio a través de los distintos meses del año considerando todos los años de datos. En Curicó se puede apreciar que el problema de material particulado se concentra en las horas de la noche principalmente (19:00 - 04:00 horas aprox.) y en menor medida en la mañana (cercano a las 10:00). También es posible apreciar que el problema de material particulado se concentra en los meses de otoño-invierno (abril-agosto aprox.). Durante el mes de junio las concentraciones de MP10 y MP2.5 durante la noche se ven disminuidas respecto de los otros meses de otoño-invierno, sin embargo, de momento, no se cuenta con una explicación para dicho fenómeno.

Los ciclos estacionales de material particulado a lo largo de los años se pueden apreciar en el Anexo 12.3.

Tabla 5: Resumen concentraciones de material particulado diarias y anuales. Estación Curico .

Var.	N. Primaria [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		Años		
			12	13	14
MP10CON	150 _{24H}	$P_{98}(c - \text{diaria})$	154	135	132
	50 _A	$c - A$	-	52	54
MP25CON	50	$P_{98}(c - \text{diaria})$	140	115	85
	20 _A	$c - A$	-	35	27

Tabla 6: Resumen concentraciones de material particulado diarias y anuales. Estación Teno, CEMENTOS BIO BIO .

Var.	N. Primaria [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		Años
			09
MP10LIN	150 _{24H}	$P_{98}(c - \text{diaria})$	68
	50 _A	$c - A$	-

3.1. Curicó

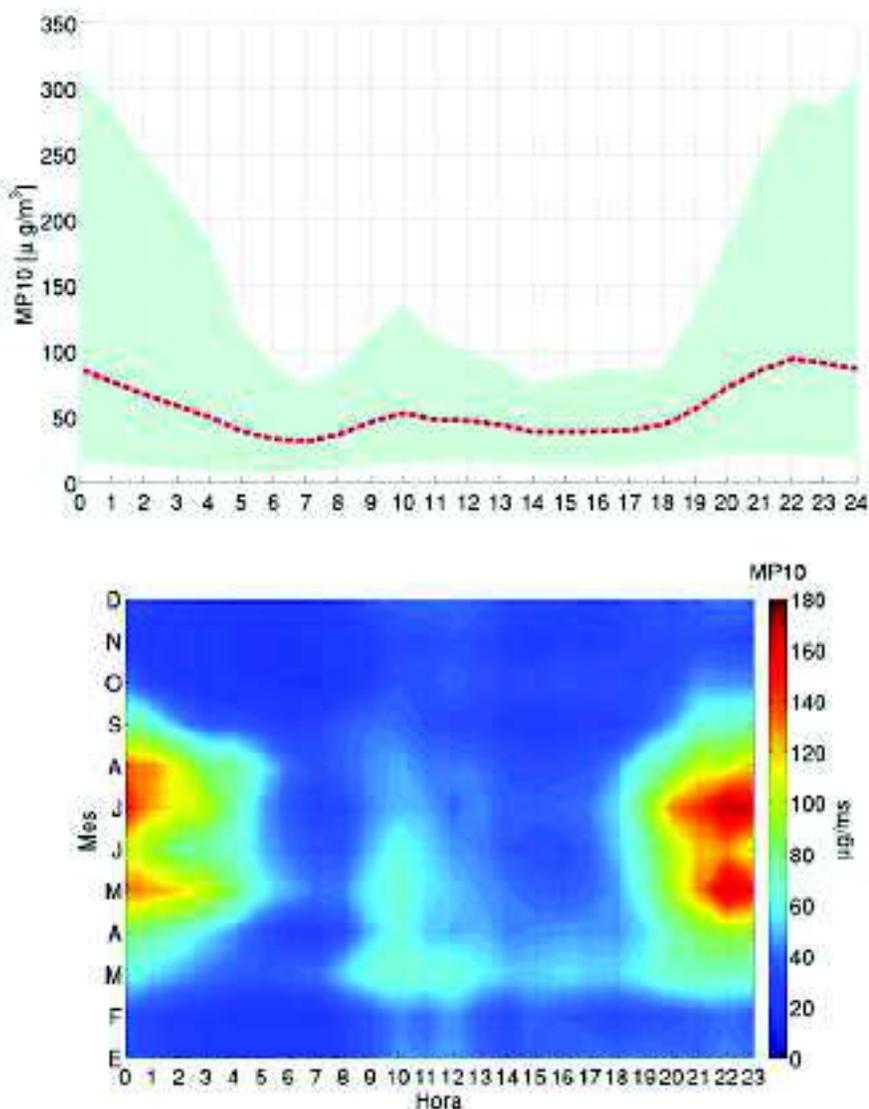


Figura 2: **Arriba:** ciclo diario MP10 (línea roja). En verde: rango de los percentiles 5% y 95%. **Abajo:** ciclo estacional MP10.

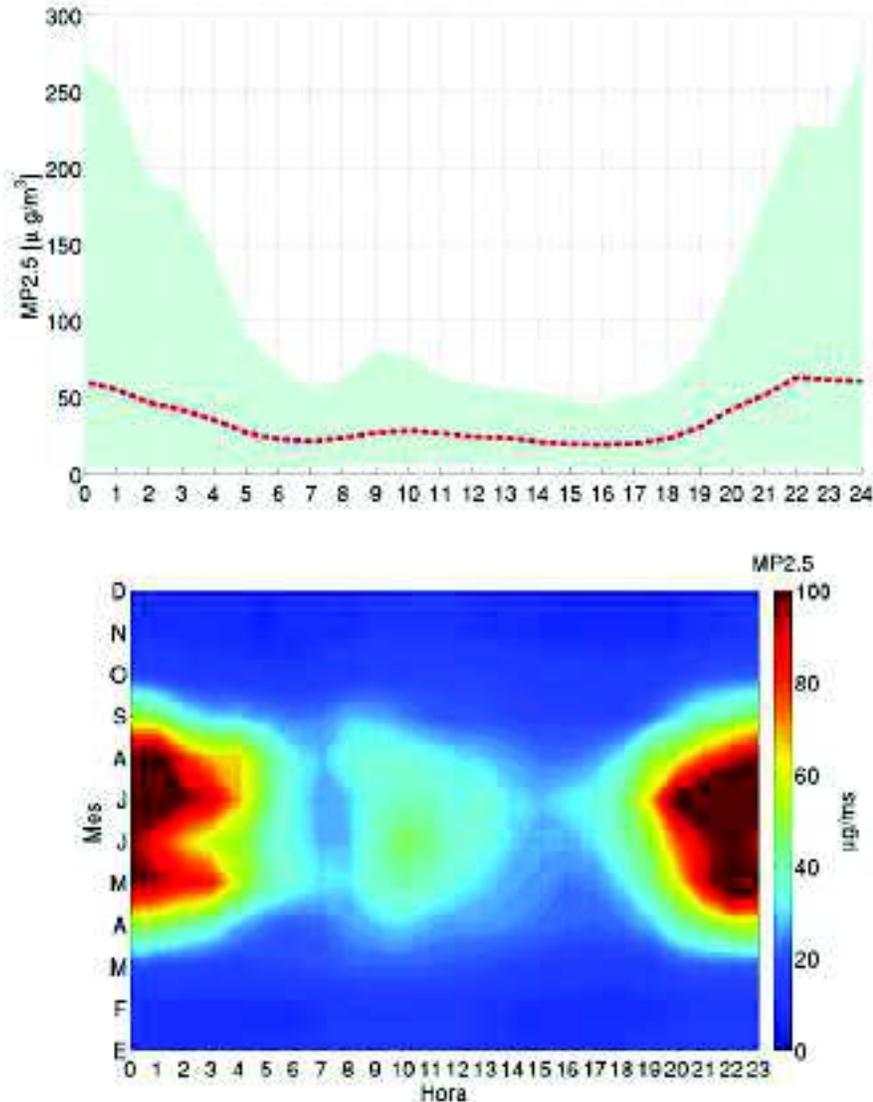


Figura 3: **Arriba:** ciclo diario MP2.5 (línea roja). En verde: rango de los percentiles 5% y 95%. **Abajo:** ciclo estacional MP2.5.

4. Relación entre variables meteorológicas y calidad del aire.

Tal como se pudo observar en la sección anterior, las concentraciones de material particulado más bien suben durante invierno y la noche. En este sentido, parece razonable suponer que estas alzas se deben a quema de leña durante noches frías y en una atmósfera estable con bajas velocidades de viento. Es decir, las bajas temperaturas conducen a mayores emisiones por quema de leña. Además, resultan en una mayor estabilidad atmosférica con vientos débiles y, por lo tanto, en condiciones de mala ventilación. En este sentido y en lo que sigue, se apunta a relacionar justamente las concentraciones de material particulado con las variables meteorológicas de temperatura y de la velocidad del viento. La figura 4 muestra la relación de las concentraciones diarias de los contaminantes MP10 y MP2.5 respecto de los mínimos diarios de temperatura y la velocidad del viento. Para MP10 (izquierda) se muestra en verde las concentraciones

diarias menores a $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en rojo las concentraciones mayores o iguales a $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y menores a $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y en negro las concentraciones mayores o iguales a $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Para MP2.5 (derecha) se muestra en verde las concentraciones diarias menores a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en rojo las concentraciones mayores o iguales a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y menores a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y en negro las concentraciones mayores o iguales a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Además se muestra el ciclo diario de las concentraciones de MP10 y MP2.5 para los días donde la norma diaria es superada (línea negra punteada) en contraste con las concentraciones de MP10 y MP2.5 para los días donde no se supera la norma diaria (en rojo línea continua) junto con los ciclos diarios de la temperatura y velocidad del viento para ambos casos.

Los diagramas de dispersión confirman la hipótesis de una relación de temperaturas y velocidades de vientos bajas y altas concentraciones de material particulado. Particularmente en el caso de MP2,5 se puede observar que es una condición necesaria una temperatura y una velocidad de viento baja para que se produzcan altas concentraciones de MP2,5. No existen casos de altas temperaturas y velocidades de viento en que también se observan concentraciones altas.

También se observa que los ciclos diarios de MP10 y MP2.5 para los días cuando se supera la norma en comparación con los días cuando no se supera, siguen igual tendencia, presentando mayores concentraciones en la noche y algunas horas de la mañana (en menor medida que la noche) respecto del resto del día. En contraste entre ambos ciclos diarios, los aumentos de concentraciones durante los días cuando se supera la norma son mucho más pronunciados que los días en que no se supera, lo que da como resultado que la diferencia entre las concentraciones a las horas críticas de contaminación entre ambos escenarios (días cuando se supera la norma y cuando no) sean mucho mayores que el resto de las horas del día, donde los valores promedio llegan a ser comparables (cerca de las 17:00 por ejemplo).

Finalmente, es posible apreciar que los episodios de contaminación (días cuando se supera la norma) se producen en días cuando el promedio de temperaturas y velocidad del viento es menor que el de los días cuando no se supera la norma, con una diferencia de temperatura y velocidad del viento relativamente constante a lo largo del día entre ambos escenarios. En ese sentido, se confirma la hipótesis planteada al inicio de esta sección respecto del aumento de las concentraciones de material particulado y días con bajas temperaturas y velocidad del viento.

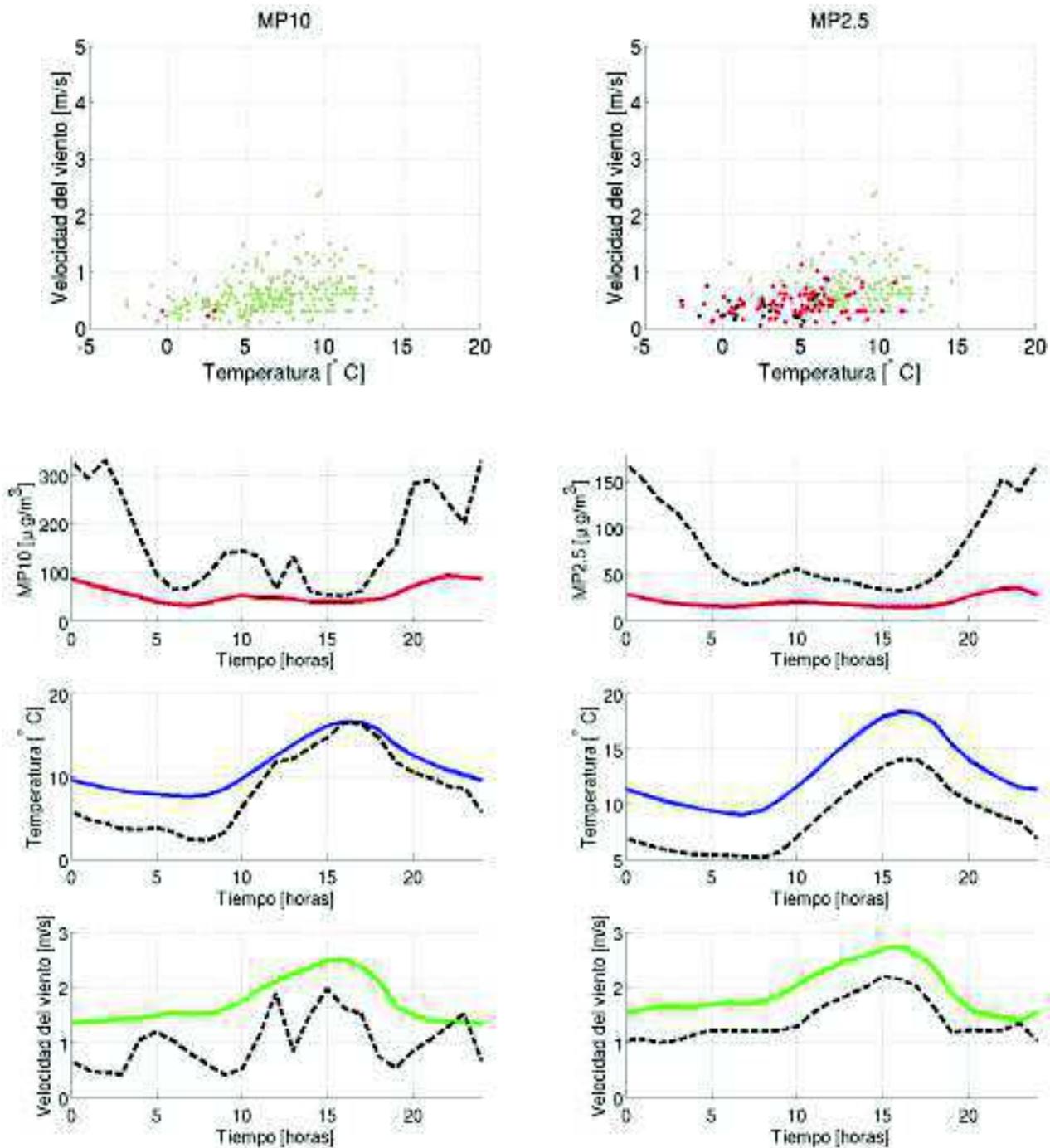


Figura 4: Estación *Curicó*. **Izquierda:** MP10; **Derecha:** MP2.5. **Arriba:** dispersión del Material Particulado respecto de la Temperatura y la Velocidad del Viento. **Abajo:** ciclo diario de las concentraciones de Material Particulado, Temperatura y Velocidad del Viento. En línea negra punteada, los ciclos diarios (de MP10/MP2.5, TEMP y VELs) para los días cuando se supera la norma de Material Particulado. En líneas continuas los ciclos diarios (de MP10/MP2.5, TEMP y VELs) para los días cuando no se supera la norma de Material Particulado.

5. Objetivos de la red meteorológica

Los resultados de las actividades anteriores han dado cuenta de que, de acuerdo a la legislación vigente, existe un problema de material particulado para la ciudad de Curicó. Dicho problema se materializa como un claro aumento de los niveles de material particulado durante las noches de los meses de otoño-invierno. Al respecto, se planteó la hipótesis de que dicha situación se relaciona a la quema de leña durante noches frías en presencia de ciertas condiciones meteorológicas, tales como, bajas temperaturas y baja velocidad del viento, lo cual se ha podido comprobar a través de los datos existentes hasta el momento. Luego, se hace necesario contar con una red meteorológica de apoyo al monitoreo de calidad del aire que entregue información de dichas variables meteorológicas, así como de las condiciones generales de transporte y dispersión de los contaminantes atmosféricos en la zona.

A continuación, como primer paso en el diseño de la nueva red meteorológica de apoyo al monitoreo de la calidad del aire, se definen sus objetivos primarios y secundarios.

- **Objetivos primarios**
 - Diagnóstico de las condiciones atmosféricas relacionadas a los aumentos de niveles de concentraciones de material particulado. Si bien, a través de este proyecto se ha logrado establecer la relación entre aumentos en las concentraciones de material particulado y las condiciones meteorológicas de temperatura y velocidad del viento, aún existe trabajo por realizar respecto al origen de dicha relación y otras posibles condiciones meteorológicas que pudieran incidir en el desarrollo de episodios de contaminación atmosférica.
 - Seguimiento en tiempo real de las condiciones de ventilación de la zona (determinadas por las condiciones de viento y las características de estabilidad de su masa de aire). Como se ha visto en las secciones anteriores, ambas características (viento y estabilidad) se encuentran relacionadas con los aumentos de los niveles de material particulado, lo que hace necesario hacer un seguimiento de su comportamiento.
 - Validación de modelos meteorológicos numéricos de mesoescala. La validación de modelos numéricos constituye un objetivo general válido para todas las redes meteorológicas.
- **Objetivos secundarios**
 - Asimilación de datos en modelos de pronóstico numérico de mesoescala.
 - Análisis de trayectorias para identificación de áreas de influencia de emisiones urbanas.
 - Aplicación de modelos numéricos en la planificación de largo plazo de las emisiones urbanas.
 - Apoyo en el manejo de emergencias por emisiones accidentales.
 - Corrección (normalización) de tendencias de la contaminación atmosférica por factores meteorológicos.

La red meteorológica, de acuerdo a sus objetivos, buscará caracterizar los siguientes fenómenos meteorológicos.

- Condiciones de estabilidad cerca de superficie, a través de mediciones de temperatura en distintos niveles cerca del suelo, por relacionarse a los máximos de concentraciones de material particulado.
- Condiciones de viento en superficial, a través de mediciones de viento a nivel de la zona urbana a una altura de 10m, por relacionarse a las condiciones de transporte de los contaminantes durante la noche y las condiciones de ventilación de la zona durante el día. Dicho objetivo se verá complementado con el reacondicionamiento de las estaciones de calidad del aire preexistentes que cuenten a lo menos con mediciones de viento (velocidad y dirección) y/o temperatura.
- Estabilidad vertical de la columna de aire, a través de mediciones de las condiciones meteorológicas en altura, por relacionarse a las condiciones generales de calidad del aire.

6. Propuesta de red meteorológica

Dentro de la red SINCA se encuentran tres estaciones que miden las variables meteorológicas VELS,DIRV y/o TEMP, una públicas y dos privadas. De ellas, con seguridad, se sabe que sólo una estación pública (709, Curicó, estación de monitoreo de calidad del aire) se encuentra operativa. Las otras dos estaciones poseen el último registro de datos hace a lo menos cinco años atrás y por lo tanto no serán consideradas en el diseño de la propuesta de red meteorológica para la ciudad de Curicó (Tabla 7).

Estación		Altura	Material Particulado	Meteorología hasta año (altura)	
COD	Nombre			VELS-DIRV	TEMP
709	Curicó	215m	√	(10m)	(10m)
704	Teno Cementos BIO BIO	295m	√	2009	2009
705	Teno ENLASA	300m	–	2009	2009

Tabla 7: Resumen de estaciones que miden variables meteorológicas disponibles para la ciudad de Curicó. COD: código SINCA.

Siguiendo con los objetivos propuestos que la red meteorológica en apoyo al monitoreo de la calidad del aire debe cumplir (Sección 5) se propone la instalación de las siguientes estaciones:

- Torre micrometeorológica: para mediciones de turbulencia y estabilidad superficial, y los factores que las determinan.
- Estaciones de superficie: para caracterización de las condiciones de viento y temperatura en superficie.
- Estación en altura: para, junto con las mediciones de las estaciones de superficie, obtener un indicador de la estabilidad vertical de la columna de aire.

La figura 6 muestra la ubicación tentativa de las estaciones de la nueva red meteorológica en apoyo al monitoreo de la calidad del aire. La tabla 8 muestra un resumen del tipo de estaciones recomendadas y las variables a medir. Los tipos de estaciones meteorológicas propuestas se describen más ampliamente en las subsecciones siguientes.

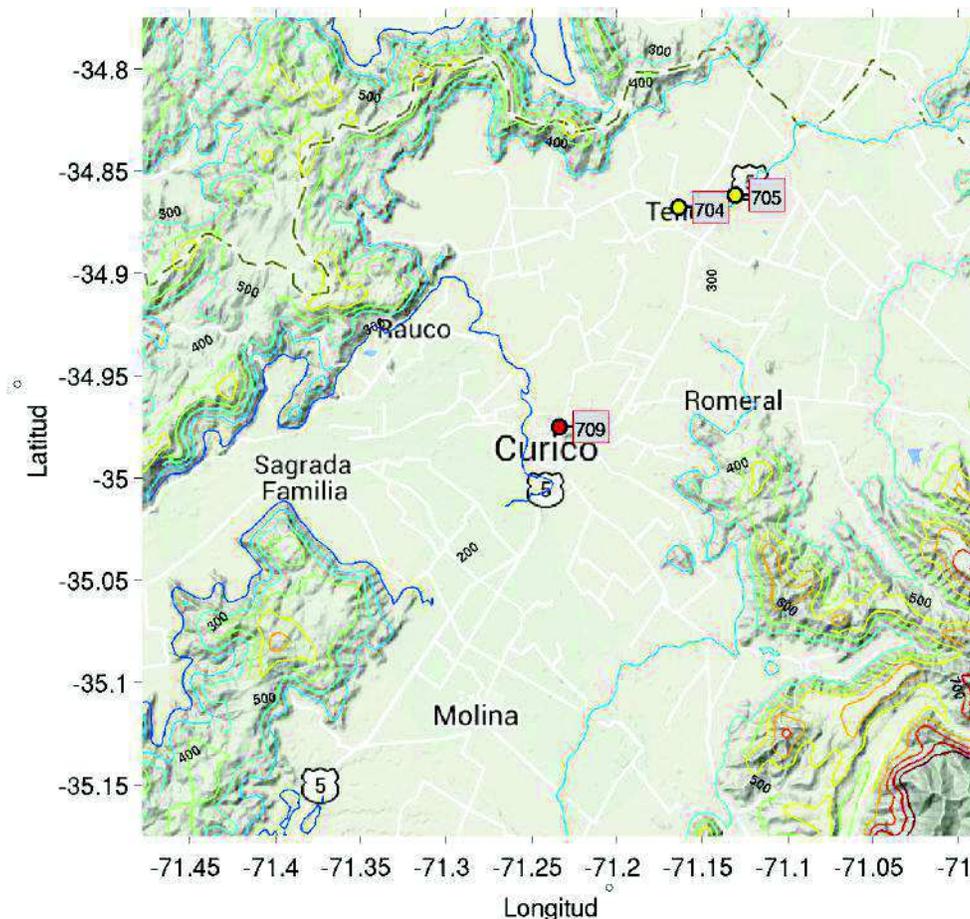


Figura 5: Distribución de las estaciones de la red SINCA que miden variables meteorológicas para la ciudad de Curicó. Círculos rojos: estaciones públicas operativas. Círculos amarillos: estaciones privadas aparentemente no operativas*. La etiqueta indica: Código SINCA. Se incluyen curvas de nivel (cada 50m) desde 50m. *: *sin seguridad si se mantienen operativas actualmente*.

6.1. Torre micrometeorológica

El objetivo de la torre micrometeorológica será medir los niveles de turbulencia cerca del suelo y los factores que la determinan, por relacionarse en gran medida con la capacidad de dispersión vertical de los contaminantes atmosféricos.

De acuerdo a lo anterior, se recomienda realizar las siguientes mediciones.

- Turbulencia cerca de superficie: datos tridimensionales de turbulencia ($\sim 10\text{m}$) de alta resolución a través de anemómetro ultrasónico.

Además, de acuerdo a los resultados obtenidos y las hipótesis planteadas hasta el momento, y siguiendo los objetivos establecidos para la red meteorológica, se recomienda incluir la caracterización de los principales factores que determinan la turbulencia, a través de las siguientes mediciones.

- Perfil vertical de temperatura: estabilidad superficial, a través de las diferencias de temperatura entre dos o tres niveles cerca del suelo (e.g. 2m, 8m y 22m).

- Viento: mediciones de viento a dos niveles (e.g. 10m y 24m).

Finalmente y siguiendo con el objetivo de caracterizar otros posibles factores meteorológicos determinantes de los episodios de contaminación atmosférica, también se recomienda incluir lo siguiente.

- Humedad relativa: formación de niebla, a través de mediciones de humedad relativa en un nivel (e.g. 2m).
- Flujos radiativos: Presencia de nubosidad durante día y/o noche, a través de mediciones de radiación neta y global.

6.2. Estaciones de superficie

El objetivo de las estaciones de superficie será entregar información, principalmente, acerca del viento a nivel superficial. Se recomienda que las estaciones cuenten con las siguientes características.

- Estación de superficie: viento superficial, a través de mediciones de velocidad y dirección a 10m y temperatura y humedad relativa a 2m sobre el suelo.

Ya que en la actualidad se cuenta con estaciones que miden viento y/o temperatura dentro de la zona urbana, y debido a las condiciones del terreno (relativamente plano en toda la zona) no se recomienda incluir nuevas estaciones meteorológicas de superficie (al interior de la ciudad) por el momento (para no caer en redundancia de información) sino aprovechar la existente en la red SINCA para dicho propósito. Para ello se recomienda adecuar la estación preexistente a los requerimientos propuestos, añadiendo sensores y/o modificando la altura de las mediciones cuando corresponda.

Se recomienda la instalación de una estación en superficie entre la ciudad y una estación en altura, para en conjunto lograr una mejor caracterización de la estabilidad vertical de la zona.

6.3. Estación en altura

El objetivo de la estación en altura (zona elevada) junto con las mediciones de las estaciones de superficie, será obtener un indicador de las condiciones de estabilidad vertical. Para ello se recomienda la instalación de una estación con las siguientes características.

- Estación en altura: condiciones meteorológicas en altura, a través de mediciones de viento (velocidad y dirección), temperatura, humedad relativa y radiación neta, medidas lo más alejadas posible de la influencia superficial directa (pudiendo corresponder a una torre de 10m al igual que para las estaciones de superficie).

6.4. Calidad de los equipos

La calidad de los equipos es fundamental para el correcto funcionamiento de cualquier red meteorológica, por ello se recomienda la utilización de equipos de marcas de prestigio. A continuación se entrega una breve guía de equipos recomendados a los se debiese optar o asemejar.

- Datalogger Campbell SCI, CR1000
- Para variables micro-meteorológicas anemómetro R.M. Young 81000
- Para mediciones de viento convencionales R.M. Young, Wind Setry 03002
- Caja impermeable NEMA ENC14/16 distribuida por campbellsci
- Sensor de humedad relativa y temperatura marca Vaisala tipo HMP-60
- Sensor de presión barométrica marca Setra o Vaisala tipo CS100 o CS106
- Shield de radiación marca R.M. Young
- Sensores de radiación solar marca Kipp & Zonen

Tipo de estación	VARIABLES A MEDIR	Cantidad
Torre micrometeorológica	VELS y DIRV (10m, 24m), TEMP y HREL (2m), perfil TEMP (2m, 8m, 22m), RS y RN (2m), T', w', QH (10m)	1
Estación de superficie	VELS y DIRV (10m), TEMP y HREL (2m)	1
Estación en altura	VELS, DIRV, TEMP, HREL y RN alejados del suelo	1

Tabla 8: Resumen de estaciones de la nueva red meteorológica en apoyo al monitoreo de la calidad del aire para la ciudad de Curicó. VELS: velocidad del viento; DIRV: dirección del viento; TEMP: temperatura; HREL: humedad relativa; RS: radiación solar; RN: radiación neta; T': componente turbulenta de la temperatura (mediante anemómetro ultrasónico); w': turbulencia vertical (mediante anemómetro ultrasónico); QH: flujo de calor sensible (mediante anemómetro ultrasónico).

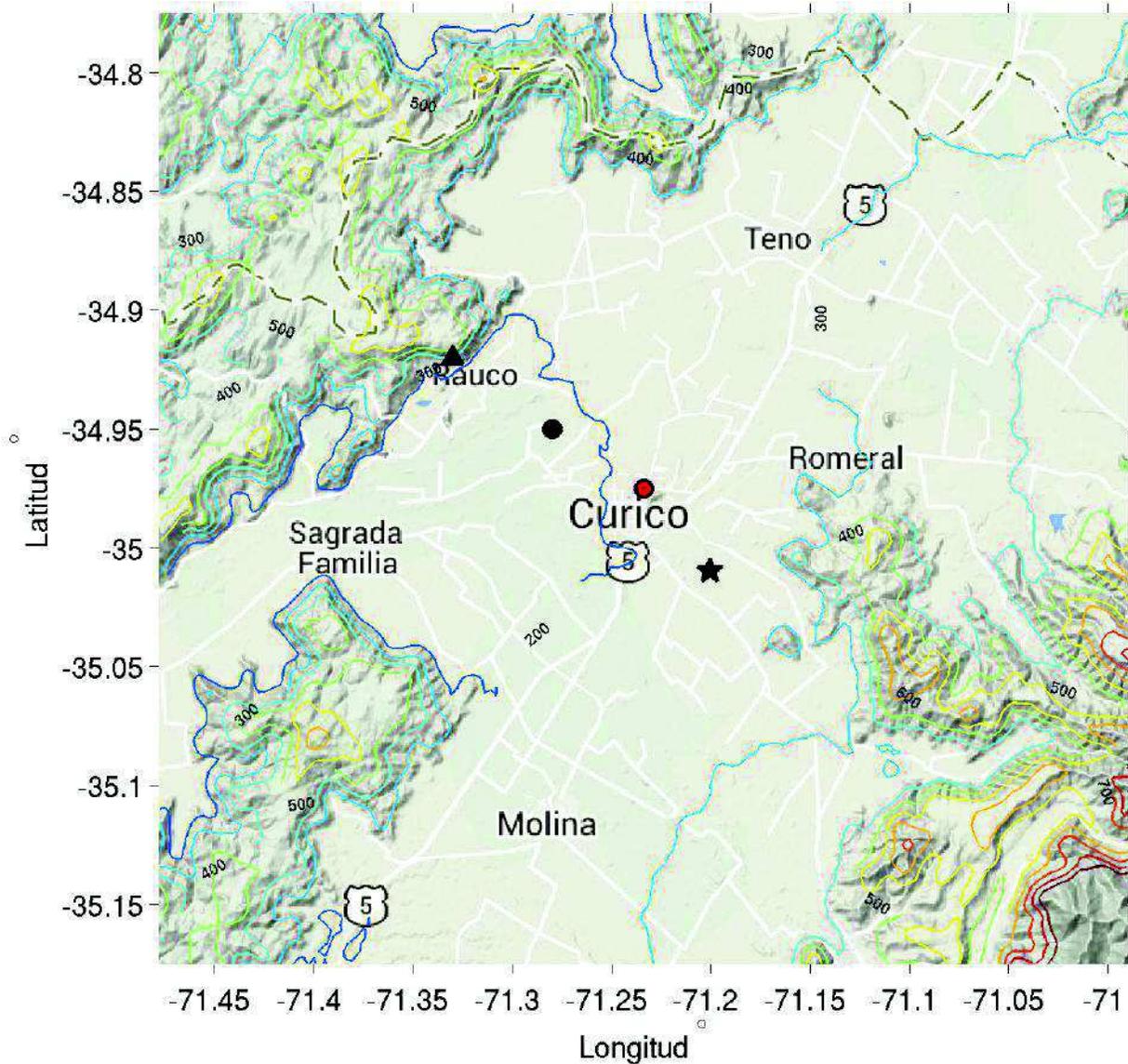


Figura 6: Distribución tentativa de nueva red meteorológica en apoyo al monitoreo de la calidad del aire. Círculo rojo: estación pública preexistente de calidad del aire que además mide viento en superficie. Círculo negro: estación en superficie. Triángulo negro: estación en altura. Estrella negra: torre micrometeorológica.

7. Cronograma de plazos

Según la configuración de red meteorológica en apoyo a la gestión ambiental propuesta, se ha dispuesto un cronograma de plazos de intalación de equipamiento. Dicho cronograma entrega un plazo general de instalación de todo el equipamiento propuesto, el cual a su vez resulta válido para la instalación de estaciones individuales.

Bajo el supuesto de que los terrenos de instalación de las estaciones poseen fácil acceso y que se cuenta con todos los permisos necesarios, se recomienda considerar las siguientes cinco etapas de implementación para la red:

1. **Evaluación de los equipos a adquirir:** estudio de los equipos y la integración de ellos a sistemas de comunicación. Dimensionado de sistemas fotovoltaicos teniendo en cuenta la frecuencia de actualización requerida en el rescate de datos. *Tiempo estimado : 3-5 semanas.*
2. **Adquisición de equipos:** adquisición de equipos teniendo en cuenta el tiempo que demoran en llegar a Chile y considerando además el supuesto de que el proveedor no cuente con disponibilidad en bodegas. *Tiempo estimado : 5-9 semanas.*
3. **Fabricación de cierres perimetrales y adquisición de torres.** *Tiempo estimado : 5-9 semanas, en paralelo a las etapas 1,2 y 4.*
4. **Integración de equipos y pruebas en condiciones controladas.** *Tiempo estimado : 2-4 semanas.*
5. **Instalación y pruebas en terreno:** instalación de cierres perimetrales, torres, equipos. Realización de pruebas en terreno. *Tiempo estimado : 2-6 semanas.*

Considerando las cinco etapas propuestas, se establece un plazo de instalación de equipamiento de entre 3 y 6 meses.

La tabla 9 muestra un resumen de los plazos y etapas definidas arriba.

Mantenimiento y operación

Para la correcta operación de las estaciones se recomienda realizar mantenciones preventivas cada 1-2 meses, acentuando la preocupación en el correcto alineamiento y nivelación de los sensores de radiación solar y viento (en caso de haberlos) así como cambios de disecante y sellante de la caja NEMA.

También es importante que se lleve un registro de los números de serie e historial de cada sensor, teniendo en cuenta los plazos en los que se debe cambiar o calibrar cada unidad.

Se espera que la empresa que ejecute el mantenimiento cuente con equipos calibrados que funcionen como material de referencia en terreno, y que cada 6 meses se realicen revisiones con respecto a equipos recientemente calibrados a modo de un control de calidad de primer orden.

En caso de algún problema de medición en algún sensor o sistema de comunicación se espera que se ejecute la medida correctiva en el plazo de 6 días hábiles.

8. Procesos de validación y almacenamiento

Para que los objetivos planteados para la nueva red meteorológica en apoyo al monitoreo de la calidad del aire sean cumplidos a plenitud, todas las estaciones deberán contar con sistemas de adquisición, almacenamiento y transmisión de datos en línea y actualizados. Por otra parte, se deberá asegurar que los datos producidos sean públicos. Además, los datos deberán pasar por distintos procesos de validación que

Tabla 9: Resumen de plazos máximos de intalación de equipamiento de nueva red meteorológica en apoyo a la gestión ambiental. Fondo amarillo: tiempo mínimo requerido para el desarrollo de la etapa. *: sin perjuicio de los plazos establecidos, los tres puntos verticales indican que la Etapa 3 puede desarrollarse en paralelo a las etapas 1, 2 y 4.

Etapa	Semana																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	X	X	X	X	X																			
2						X	X	X	X	X	X	X	X											
3*	∴					X	X	X	X	X	X	X	X					∴						
4															X	X	X	X						
5																			X	X	X	X	X	X

aseguren su calidad y den cuenta del funcionamiento de las estaciones. Sin embargo, independientemente de los procesos de validación aplicados a los datos, éstos en su estado crudo deberán estar disponibles, al igual que los datos en los distintos niveles de validación, tanto en línea (utilizando un sistema en línea que permita el acceso a los datos de manera simple y rápida) como en registros históricos disponibles para descarga de los usuarios.

8.1. Validación

Una de las observaciones entregadas por este proyecto respecto de los datos meteorológicos producidos por las estaciones que actualmente se encuentran dentro de la red SINCA es que en muchos casos la calidad de los datos es deficiente, presentando saltos temporales, datos fuera de rango, periodos de datos constantes, cambios de nivel y tendencias anómalas. Luego, un aspecto fundamental a considerar en la operación de la nueva red meteorológica es el asegurar la calidad de los datos producidos, a través de un proceso de control y validación.

Se propone contar con tres niveles de validación de los datos dentro de dos procesos principales. Dichos procesos y los distintos niveles de validación que ellos entregarán como resultado se describen a continuación.

8.1.1. Objetivo

Se propone el contar con un sistema de validación automático (objetivo) de datos, que permita generar una serie de tiempo de datos de primer nivel de validación.

El sistema deberá establecer un intervalo temporal de validación de los datos, cada cual deberá evaluar los datos producidos por la red no sólo durante el último intervalo de tiempo sino también en el anterior a éste (*intervalo prevalidado*) asegurando así la continuidad de la serie de tiempo. El sistema deberá determinar cuales datos cumplen con los requerimientos establecidos, descartar los que no y finalmente generar un intervalo de datos validados que se añadirá a la serie de tiempo de datos de primer nivel de validación. Este proceso de validación entregará un intervalo de datos validados de primer nivel de validación y otro en calidad de prevalidado de primer nivel de validación.

Los requerimientos establecidos para el primer nivel de validación se describen a continuación.

- Rango de datos válidos: para cada variable se deberá establecer un rango de datos válidos. El sistema deberá evaluar cada dato producido y determinar si éste califica o no para pasar a la serie de tiempo de datos de primer nivel de validación.
- Periodos de datos constantes: para cada variable se deberá establecer un largo de intervalo temporal de tolerancia de datos constantes (entiéndase como el máximo largo de intervalo permitido con datos constantes) . El sistema deberá identificar los periodos de datos constantes y evaluar, de acuerdo al largo de intervalo de tolerancia establecido, si los datos califican o no para pasar a la serie de tiempo de datos de primer nivel de validación.

- Datos escapados: para cada variable se deberá establecer un rango de variabilidad permitido entre intervalos de tiempo. El sistema deberá evaluar cada dato producido y determinar si éste califica o no para pasar a la serie de tiempo de datos de primer nivel de validación.

También se deberá contar con un sistema de control, que permita alertar al operador respecto de la pérdida de información y éste pueda evaluar si el caso amerita o no tomar medidas al respecto. Las alertas propuestas se describen a continuación.

- Primera alerta de control: en primer lugar y antes de iniciar el proceso de validación automática, el sistema deberá evaluar si dentro del intervalo de tiempo analizado se ha producido una pérdida de información (es decir si la estación ha dejado de transmitir datos). Se deberá establecer un nivel de tolerancia de pérdida de información y generar una alerta al operador en caso de que el nivel de tolerancia sea superado.
- Segunda alerta de control: se deberá establecer un nivel de tolerancia de datos descartados por intervalo de validación para una vez finalizado el proceso de validación automática, de modo que al ser superado se emita una alerta al operador de la red.

En esta etapa se recomienda tener cuidado en los rangos de variabilidad e intervalos de tolerancia establecidos para evitar la sobre eliminación de datos.

8.1.2. Subjetivo

A pesar de que el primer proceso de validación debería ser capaz de prevenir y corregir la mayoría de los errores presentes en los datos, existen algunos problemas comunes que no pueden ser detectados a través de dicho método y necesitan un análisis subjetivo. Para ello se recomienda contar con un equipo humano asesor (ya sea interno o externo) que se encargue de llevar a cabo dicho proceso.

El proceso de validación subjetiva deberá realizarse periódicamente, tanto a nivel mensual como anual, generando series de tiempo de datos de segundo y tercer nivel de validación. Las tareas específicas a realizar se describen a continuación.

- Validación mensual (segundo nivel de validación): mensualmente se deberán evaluar los datos generados por la red en busca de errores tales como saltos de nivel u otros comportamientos inusuales. El proceso no sólo deberá evaluar los datos del periodo precedente sino también del anterior a éste (*periodo prevalidado*) asegurando así la continuidad de la serie de tiempo. Mensualmente el proceso aportará con un mes de datos validados de segundo nivel y con un mes de datos prevalidados de segundo nivel.
- Validación anual (tercer nivel de validación): anualmente se deberán evaluar los datos generados por la red en busca de errores tales como tendencias a largo plazo u otros comportamientos inusuales. El proceso no sólo deberá evaluar los datos del periodo precedente sino también el anterior a éste (*periodo prevalidado*), asegurando así la continuidad de la serie de tiempo. Anualmente el proceso

aportará con un año de datos validados de tercer nivel y con otro año de datos prevalidados de tercer nivel.

Si durante el proceso de validación subjetivo se realizan correcciones a los datos se recomienda incluir una etiqueta para identificarlos.

A través de los tres niveles de validación de datos descritos arriba se podrá contar con series de tiempo de excelente calidad. El acceso público a los datos asegurará contar con un control de calidad constante de ellos. Para garantizar que se cumpla con dicho objetivo se hará necesario contar con un sistema que permita a los usuarios incluir comentarios y recomendaciones que el organismo asesor (ya se el operador u otro) pueda tener en cuenta durante el proceso de validación subjetiva de los datos a nivel mensual y anual.

La tabla 10 resumen los distintos niveles de validación propuestos para los datos.

Nivel de validación	Etiqueta	Descripción
0	0	Datos NO validados (datos crudos)
1	0	Datos validados de primer nivel
2	0	Datos validados de segundo nivel
	1	Datos validados de segundo nivel con correcciones
3	0	Datos validados de tercer nivel
	1	Datos validados de tercer nivel con correcciones

Tabla 10: Resumen de los diferentes niveles de validación propuestos.

8.2. Almacenamiento

En cuanto al almacenamiento de los datos y su distribución a los usuarios finales, se recomienda, por un lado, contar con un servidor de datos (backend) especializado en el manejo de series de tiempo, y por otra parte, proveer de un explorador web (frontend) que permita visualizar y solicitar los datos de una manera dinámica y rápida.

En las subsecciones siguientes se entregan las recomendaciones acerca de las características con que el *backend* y *frontend* deben contar.

8.2.1. Servidor de series de tiempo (BackEnd)

- Almacenamiento.

Se recomienda el uso de alguno de los sistemas a nivel software existentes en la actualidad, especializados en el almacenamiento de series de tiempo como OpenTSDB, RRDTool o InfluxDB, que se pueden pensar como alternativas más ad-hoc al tradicional administrador de base de datos SQL o equivalentes. Lo cual permitirá el empleo de operaciones típicas aplicadas a las series de tiempo y un acceso más rápido a los datos. También se recomienda que los resultados de los procesamientos puedan, a su vez, ser exportados a los formatos tradicionalmente ocupados como CSV o planilla EXCEL.

- Servidor.

Se recomienda contar con un servidor al cual consultar los datos, especificando las operaciones necesarias, así como el formato de salida de las mismas, donde la consulta pueda ser realizada a través de procesos automatizados, pre-procesando los datos en el servidor, y entregando sólo la información relevante al usuario.

8.2.2. Explorador web (FrontEnd)

- Se recomienda el uso de un explorador web donde los datos puedan presentarse de manera consolidada, tomando en cuenta las validaciones sugeridas y que ponga a la disposición del usuario una interfaz más rica y dinámica que la actualmente disponible a través de la web de SINCA, para la visualización y consulta de los mismos.
- Suponiendo que se contará con el servidor descrito arriba, se recomienda que éste facilite la definición de parámetros para realizar un remuestreo arbitrario, así como, las operaciones estadísticas básicas que suelen ser de interés.
- Se recomienda que los datos procesados sean graficados mediante herramientas utilizadas actualmente para la visualización de series de tiempo como la librería HighStocks, que provee de gráficos de alta calidad y dinamismo en la exploración.
- Finalmente, se recomienda que los resultados puedan, a su vez, ser exportados según los formatos de salida disponibles en el servidor.

9. Evaluación, capacidad de pronóstico

Esta sección entrega el análisis sobre la pronosticabilidad de las variables de calidad del aire y meteorológicas para todas las ciudades consideradas en este proyecto. Dado que este análisis sigue la misma metodología para todas las ciudades se entrega los detalles para la ciudad de Temuco (por sus altos niveles de concentraciones de los contaminantes MP10 y MP2.5) a modo de ejemplo. Para las demás ciudades en estudio se entregan después los respectivos resultados.

La subsección 9.1 describe la metodología utilizada para el análisis de la pronosticabilidad de las variables de interés. La subsección 9.2 da una reseña del método de pronóstico MOS, utilizado en este proyecto. La subsección 9.3 analiza la incertidumbre de los datos y su rol en los resultados del pronóstico. La subsección 9.4 desarrolla el análisis de pronosticabilidad de las variables de calidad del aire a través del uso del coeficiente de correlación lineal entre los resultados del pronóstico y las observaciones. La subsección 9.5 desarrolla el análisis de pronosticabilidad de las variables meteorológicas, de manera análoga a las variables de calidad del aire. La subsección 9.6 entrega los resultados en términos de tablas de contingencia y analiza la efectividad de las mismas para el análisis de la pronosticabilidad de las variables. Finalmente, la subsección 9.7 muestra una propuesta de método de pronóstico probabilístico que entregue mejores criterios para la toma de decisiones respecto de las distintas situaciones de contaminación ambiental.

9.1. Metodología

Para poder cuantificar la pronosticabilidad siempre se hace uso de alguna métrica estadística. Existe un gran número de esas métricas que dependen entre otras cosas de los modelos usados para el pronóstico y las variables pronosticadas. Un análisis de todos los modelos y todas las métricas está fuera del marco del proyecto. El modelo de pronóstico usado se explica en la sección siguiente. En términos de la evaluación de la pronosticabilidad este proyecto se limita a:

- El cálculo del coeficiente de correlación entre la serie de tiempo de las observaciones y el pronóstico, a través del cual es posible cuantificar la pronosticabilidad de las distintas variables. El coeficiente de correlación lineal da cuenta de la relación lineal entre dos series de tiempo y tiene valores entre -1 y 1 , los valores negativos dan cuenta de una relación inversa, mientras que los valores positivos dan cuenta de una relación directa, mientras más cercano a la unidad sea el coeficiente, más fuerte será la relación entre las variables.
- La construcción de tablas de contingencia, las cuales dan cuenta del porcentaje de acierto del pronóstico a cada uno de los niveles de concentración que determinan situaciones de emergencia ambiental de acuerdo a la legislación vigente.

9.2. Método de Pronóstico

Actualmente existen múltiples métodos de pronóstico, los cuales varían en complejidad. Uno de los métodos más simples de pronóstico, es el método climatológico. Este método involucra el uso de promedios estadísticos de las variables, acumulados de muchos años. En este caso y para el pronóstico de una hora en particular de un día cualquiera de un mes en particular (por ejemplo 15:00 hrs. de un junio) se utiliza el promedio de todos los registros de la serie de tiempo disponibles para esa hora del día y ese mes del año (siguiendo con el ejemplo, todos las horas 15:00 de todos los días de junio de todos los años disponibles). Este método tiene la particularidad que el pronóstico a $1, 2, \dots, n$ días permanece invariable. El método climatológico funciona bien cuando los patrones climatológicos son similares a lo largo de los años; no obstante, en caso de un comportamiento anómalo durante un día a pronosticar, el pronóstico climatológico falla. Por ejemplo, el uso de la climatología como método de pronóstico para la serie de tiempo de MP10 de la estación Las Encinas da un coeficiente de correlación de 0.49 respecto de las observaciones. Es decir, el coeficiente de correlación es estadísticamente significativo, al mismo tiempo es limitado en explicar buena parte de la varianza observada. Otro método sencillo de pronóstico, es el método de la persistencia. Este método supone que las condiciones atmosféricas no cambien a lo largo del tiempo, es decir “mañana será igual que hoy” (por ejemplo, si hoy a las 15:00 horas se registran $20^{\circ}C$, el pronóstico para todos los siguientes días a las 15:00 horas indica que habrá también una temperatura de $20^{\circ}C$). El método de la persistencia funciona bien cuando los patrones atmosféricos son muy similares entre un día y otro, pero falla si éstos cambian significativamente. En términos del coeficiente de correlación, el uso de la persistencia como método de pronóstico para la serie de tiempo de MP10 de la estación Las Encinas da como resultado un valor de 0,68 respecto de las observaciones. Es decir, explica mejor la varianza que la climatología.

Para un pronóstico de alcance mayor que 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 dinámicos más usados son los llamados “modelos globales”; estos modelos dividen su dominio computacional en una grilla 3D que cubre toda la superficie de la tierra y se extiende hasta unos 30 km de altura. Sus resoluciones horizontales hoy en día son típicamente de 25 km y verticales de unos 50m cerca de la superficie. En la actualidad, existen varias instituciones internacionales que mantienen sistemas de pronóstico basados en la asimilación de datos y modelos dinámicos globales. Entre ellos, uno de los más renombrados es el modelo GFS (*Global Forecast System*) de Estados Unidos. Para su inicialización cuenta con datos provenientes de todas las estaciones meteorológicas oficiales en el planeta, los radio sondeos y datos satelitales. El GFS es ampliamente utilizado debido a que es posible acceder sus datos de forma gratuita.

Debido a la falta de datos para definir una condición inicial exacta, la representación de los procesos físicos a través de aproximaciones y la resolución espacial que nunca representa perfectamente rasgos topográficos de escala local, los pronósticos de los modelos globales inevitablemente contienen errores (por ejemplo sesgos u otros errores no sistemáticos). Una práctica común en la gestación de un pronóstico del tiempo y/o calidad del aire operacional es intentar mejorar la calidad del modelo a través de la definición de relaciones empíricas entre las variables observadas y el pronóstico numérico. (Sólo las observaciones de las variables meteorológicas pueden dar a conocer la variabilidad inter e intradiaria, que está dada por fenómenos locales determinados por la topografía y el tipo de suelo de modo tal que si se requiere un pronóstico detallado, los modelos numéricos globales por si solos no son suficientes. Cuando se cuenta con una larga serie de tiempo de datos observados, es posible entrenar un modelo estadístico para detectar las conexiones entre las observaciones locales y los fenómenos de escala sinóptica, así como las correlaciones entre las observaciones pasadas y futuras).

En general, la aplicación de técnicas estadísticas para mejorar un pronóstico numérico determinístico se refiere como “MOS” (Model Output Statistics). Un MOS busca relaciones empíricas entre un conjunto de predictores y la variable de interés (el predictando) que se desea pronosticar para una cierta hora en el futuro ($t_0 + h$). Usualmente, el predictando es una variable observada, como por ejemplo la temperatura o la magnitud del viento, o cualquier variable que se espera tuviera alguna relación con el estado de la atmósfera, como es el caso de la contaminación atmosférica urbana.

Los MOS más tradicionales se basan en la técnica de regresión lineal múltiple paso a paso. Esta técnica ha sido aplicada extensivamente en pronósticos operacionales y es usada por instituciones importantes como el NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration - Estados Unidos) en su pronóstico meteorológico. Usando esta técnica, la relación entre los predictores disponibles en tiempo t_0 y el predictando observado en el tiempo $t_0 + h$, se representa 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. Frecuentemente, ésta es reemplazada por métodos estadísticos computacionales más sofisticados y generales.

En el marco de este proyecto y con el fin de evaluar la pronosticabilidad de las variables de calidad del aire MP10 y MP2.5, se ha realizado un ejercicio de entrenamiento de MOS a 1 día (de regresión lineal múltiple) basado en el pronóstico numérico GFS entre 2009/08/13 y 2014/09/30. Además se ha añadido como predictor la persistencia de las observaciones.

Un aspecto importante en la evaluación de la pronosticabilidad de los datos es la confiabilidad de las observaciones con las que se cuenta para validar el mismo. La subsección siguiente ahonda en ese tema y propone una manera de mejorar los pronósticos a través de una disminución de la incertidumbre de los datos.

9.3. Incertidumbre de los datos

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.

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 7; 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.

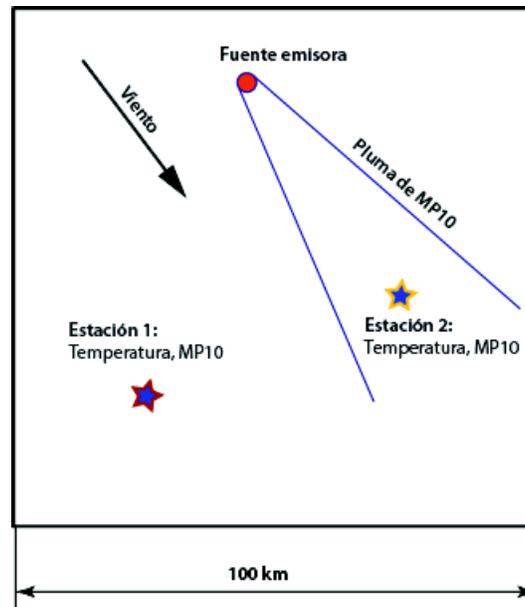


Figura 7: Red de monitoreo en una planicie hipotética de extensión de 100 km. La red consiste en dos estaciones de monitoreo (estrellas) que miden temperatura y MP10. Dentro de la planicie se encuentra una fuente (punto) que emite MP10 y la pluma se dirige según la dirección de viento.

El ejemplo anterior ha representado un caso hipotético. Como caso real, se podría considerar la ciudad de Temuco y sus dos estaciones Las Encinas y Museo Ferroviario. En ambas estaciones se miden temperatura y MP10. En términos de temperatura, Temuco se aproxima bastante bien al caso de la planicie hipotética con temperaturas promedio $\bar{T}_{LasEncinas} = 10,8^\circ\text{C} \approx \bar{T}_{MuseoFerroviario} = 11,5^\circ\text{C}$ y un coeficiente de correlación entre ambas temperaturas de 0,99. En el caso de MP10, las concentraciones promedio son $\overline{Conc}_{LasEncinas} = 63\mu\text{g}/\text{m}^3 \approx \overline{Conc}_{MuseoFerroviario} = 55\mu\text{g}/\text{m}^3$. Al contrario del ejemplo de la planicie hipotética, en este caso real no existe una sola fuente sino miles lo que hace que dentro de la ciudad de Temuco las concentraciones sean similares al nivel promedio. En términos del coeficiente de correlación entre las dos estaciones y MP10, se observa un valor de 0,73 entre ambas estaciones que es mucho menos 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.

Para ilustrar estos “otros factores” un poco más, se muestra en las figuras 8 y 9 los diagramas de dispersión entre las estaciones Museo Ferroviario y Las Encinas de datos horarios de temperatura y MP10, respectivamente. En el caso de la temperatura se presenta muy poca dispersión en los datos lo que nuevamente indica que es suficiente saber la temperatura en una estación para saber la de la otra. Por otra parte, existe mucha dispersión en los datos y, por lo contrario de la temperatura, el valor medido en una estación no necesariamente es indicativo para el valor en la otra. De hecho, existen extremos en los datos en que, por ejemplo, el valor horario en la estación Museo Ferroviario fue aproximadamente $1500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y en la estación Las Encinas en la misma hora $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En otras oportunidades, las concentraciones en Las Encinas pueden ser mucho mayores que en la estación Museo Ferroviario. Es evidente que esta diferencia no tiene su origen en la meteorología sino que debe haber 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.

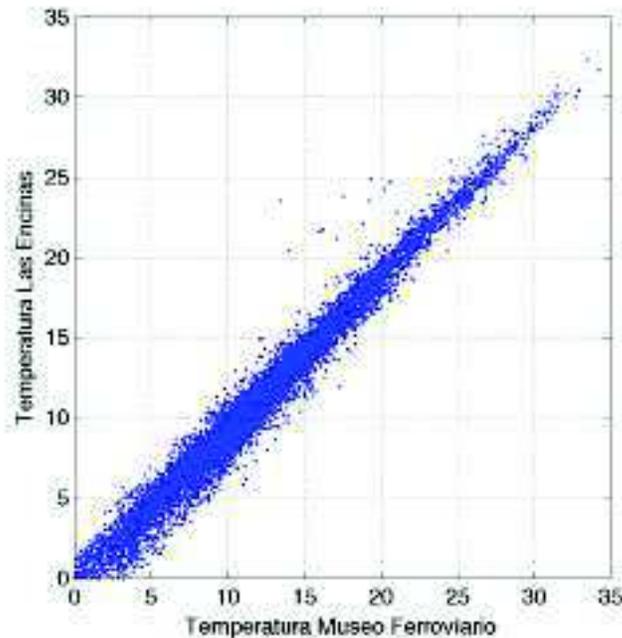


Figura 8: Diagrama de dispersión de los datos horarios de temperatura en las estaciones Museo Ferroviario y Las Encinas. El coeficiente de correlación para los datos graficados es 0,99.

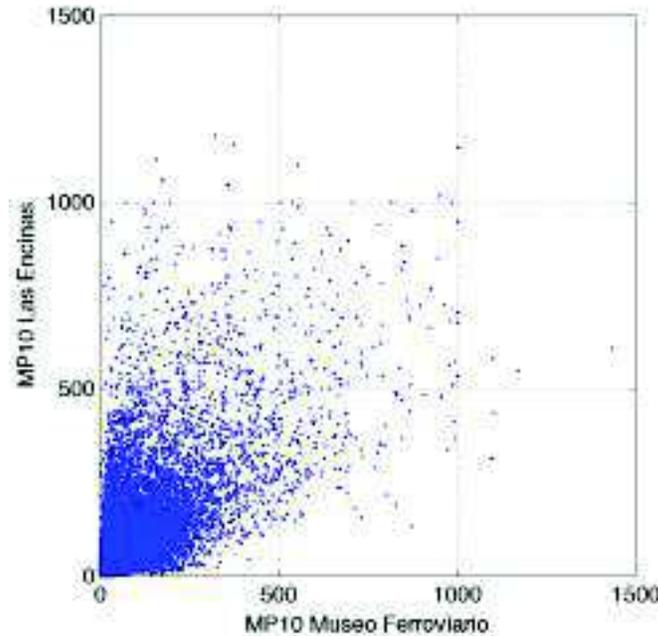


Figura 9: Diagrama de dispersión de los datos horarios de temperatura en las estaciones Museo Ferroviario y Las Encinas. El coeficiente de correlación para los datos graficados es 0,75.

La poca representatividad espacial de las estaciones de monitoreo de calidad del aire también representa un problema justamente en términos de pronóstico. De la misma manera que hay una gran dispersión de datos a nivel horario, puede existir grandes diferencias de rangos (bueno-regular, alerta, preemergencia y emergencia) a nivel diario entre las estaciones. Las tablas 11 y 12 entregan esas diferencias para las tres estaciones en Temuco (Las Encinas (LE), Padre Las Casas II (PLCII) y Museo Ferroviario (MF)) para MP10 y MP2,5, respectivamente. Para la elaboración de las tablas, se calcularon los promedios diarios de las concentraciones para cada estación de monitoreo con datos entre 2010 y 2013. Basado en los promedios, se evaluó día por día (entre los meses abril- septiembre) el valor máximo de las tres estaciones; así la estación con el valor máximo de un día particular define la categoría para ese día. Después se calculó el valor promedio (\bar{x}) para cada categoría y la diferencia en concentraciones para las otras estaciones. A modo de ejemplo y según tabla 11, la concentración promedio en que la estación Las Encinas (LE) registró el máximo de las tres estaciones y en que ese máximo estuvo en la categoría ALERTA son $211 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Dado que el valor máximo en esos días se registró en la estación Las Encinas, las concentraciones en las dos otras estaciones eran más bajas; en este caso la diferencia promedio en concentraciones en la estación Padre Las Casas II con respecto a Las Encinas fue un 47% y en la estación Museo Ferroviaria 36%. Las tablas entregan los resultados para todos los rangos tanto para MP10 como MP2,5. Las diferencias, que varían entre aproximadamente 20 y 50%, indican que la diferencia entre categorías entre las estaciones puede ser enorme y, además, no son siempre las mismas estaciones que registran las categorías más altas. Es justo esta característica que contribuye a la dificultad y a la incertidumbre de los pronósticos.

Estación	Alerta			Preemergencia			Emergencia					
	$[\mu m/m^3]$	%		$[\mu m/m^3]$	%		$[\mu m/m^3]$	%				
	\bar{x}	LE	PLCII	MF	\bar{x}	LE	PLCII	MF	\bar{x}	LE	PLCII	MF
LE	211	—	47	36	268	—	32	37	364	—	31	47
PLCII	219	28	—	47	272	25	—	27	—	—	—	—
MF	212	17	17	—	279	25	32	—	348	20	—	—

Tabla 11: Resumen del comportamiento promedio de los datos de Material Particulado MP10 para las estaciones Las Encinas (LE), Padre Las Casas II (PLCII) y Museo Ferroviario (MF), separados en grupos correspondientes a las clasificaciones ALERTA, PREEMERGENCIA y EMERGENCIA. Bajo la fila \bar{x} se muestra el valor medio de los promedios diarios para cuando la estación correspondiente registra el valor máximo del grupo de estaciones. Las filas siguientes muestran la diferencia media porcentual de los registros de las otras estaciones, respecto de dicho valor.

Estación	Alerta			Preemergencia			Emergencia					
	$[\mu m/m^3]$	%		$[\mu m/m^3]$	%		$[\mu m/m^3]$	%				
	\bar{x}	LE	PLCII	MF	\bar{x}	LE	PLCII	MF	\bar{x}	LE	PLCII	MF
LE	—	—	—	—	136	—	26	37	216	—	17	33
PLCII	—	—	—	—	136	21	—	26	204	26	—	41
MF	—	—	—	—	136	21	25	—	228	20	19	—

Tabla 12: Resumen del comportamiento promedio de los datos de Material Particulado MP2.5 para las estaciones Las Encinas (LE), Padre Las Casas II (PLCII) y Museo Ferroviario (MF), separados en grupos correspondientes a las clasificaciones ALERTA, PREEMERGENCIA y EMERGENCIA. Bajo la fila \bar{x} se muestra el valor medio de los promedios diarios para cuando la estación correspondiente registra el valor máximo del grupo de estaciones. Las filas siguientes muestran la diferencia media porcentual de los registros de las otras estaciones, respecto de dicho valor.

De lo antes expuesto, es evidente, que la poca representatividad de las estaciones de monitoreo juegan un papel fundamental en la incertidumbre de un pronóstico de calidad del aire. En las subsecciones siguientes (secciones 9.4 y 9.6) en que se evalúan la pronosticabilidad general del material particulado y de episodios en particular, respectivamente.

9.4. Coeficiente de correlación

Una métrica muy común y útil para medir cuantitativamente la relación entre dos variables es el coeficiente de correlación; en el caso presente, las dos variables son las concentraciones de material particulado (MP10 o MP2,5) medidas y pronosticadas. Un valor 1 para el coeficiente de correlación indica una relación perfecta y, por lo tanto, un pronóstico perfecto y, por el otro extremo, un valor 0 significa que no existe ninguna relación entre ambas variables y, por lo tanto, no es posible pronosticar la calidad del aire.

Para los resultados presentados en esta sección, se usó un pronóstico MOS (ver sección 9.2) para MP10 y MP2,5. En lo que sigue se entregan los coeficientes de correlación para cada una de las estaciones de

todas las ciudades contemplado en este estudio. Es decir, se entrenó y aplicó un MOS para cada una de las estaciones.

Tal como se señaló en la sección anterior, la poca representatividad espacial de una estación de monitoreo contribuye a la incertidumbre de un pronóstico. Con el fin de disminuir esta incertidumbre y, por lo tanto, potencialmente aumentar la pronosticabilidad, también se consideran todas las estaciones de una ciudad en su conjunto. Es decir, no sólo se desarrollaron MOS para cada estación individual, sino también para un serie de tiempo que representa las estaciones en su conjunto. Para los resultados en esta sección, se usaron dos métricas para esta representación: 1) los promedios diarios de todos los datos medidos en una ciudad y 2) los máximos de los promedios diarios. En el primer caso, simplemente se calcula el promedio diario para cada una de las estaciones y, de esos promedios, nuevamente se calcula el promedio lo que resulta, finalmente, en un solo valor representativo para ese día y para la ciudad correspondiente. En el segundo caso, se calculan los promedios diarios de todas las estaciones de una ciudad y se elige el valor máximo de esos valores como representativo para ese día y la ciudad correspondiente. La suposición para el primer caso es que, a través de tomar promedios, se puedan filtrar de alguna manera los impactos de emisiones locales (y esporádicos en el tiempo). En este sentido, se espera que el promedio represente mejor la variabilidad de la contaminación debida a la variabilidad meteorológica. El segundo caso representa mejor la práctica común hoy en día para la gestión de episodios en que el máximo de todos los promedios diarios medidos dentro de la red de una ciudad define la categoría de ella para ese día.

Cabe señalar también que los promedios diarios representan el periodo desde las 00:00 - 23:59 hrs (y no un promedio móvil, tal como se está usando en la actualidad por ejemplo para el pronóstico para la Región Metropolitana). Además, se evaluaron los pronósticos sólo para el día siguiente. (El análisis para pronósticos con mayor alcance temporal sería equivalente.)

En lo que sigue, se presentan para todas las ciudades los coeficientes de correlación primero para cada una de las respectivas estaciones. Para las ciudades que cuentan con más de una estación, también se entregan los coeficientes de correlación para los valores promedios y los máximos de todas las estaciones. (Con el fin de poder apreciar la magnitud del problema en las estaciones, las tablas incluyen también el número de preemergencias y emergencias registradas en cada una de ellas.)

9.4.1. Temuco

Contaminante	Estaciones	Coef. de correlación	PE y E
MP10	Padre Las Casas I	0.8682	0
	Padre Las Casas II	0.8071	6
	Las Encinas	0.7869	23
	Museo Ferroviario	0.7838	7
MP2.5	Padre Las Casas II	0.8425	71
	Las Encinas	0.8016	108
	Museo Ferroviario	0.7903	76

Tabla 13: Coeficiente de correlación entre las observaciones de las estaciones disponibles para la ciudad de Temuco y el pronóstico MOS. Además, se incluye el número de eventos (de PREEMERGENCIA y EMERGENCIA) ocurridos durante el periodo evaluado.

	MP10		MP2.5	
	Promedios	Máximos	Promedios	Máximos
Coeficiente de Correlación	0.8167	0.8042	0.8134	0.8288

Tabla 14: Coeficiente de correlación entre el pronóstico MOS y las observaciones para la ciudad de Temuco.

9.4.2. Rancagua

Contaminante	Estaciones	Coef. de correlación	PE y E
MP10	Rancagua I	0.8267	2
	Rancagua II	0.8218	15
MP2.5	Rancagua II	0.8716	37
	Rancagua I	0.8502	27

Tabla 15: Coeficiente de correlación entre las observaciones de las estaciones disponibles para la ciudad de Rancagua y el pronóstico MOS. Además, se incluye el número de eventos (de PREEMERGENCIA y EMERGENCIA) ocurridos durante el periodo evaluado.

	MP10		MP2.5	
	Promedios	Máximos	Promedios	Máximos
Coeficiente de Correlación	0.8563	0.8575	0.8766	0.8601

Tabla 16: Coeficiente de correlación entre el pronóstico MOS y las observaciones para la ciudad de Rancagua.

9.4.3. Curicó

Contaminante	Estaciones	Coef. de correlación	PE y E
MP10	Curicó	0.7480	0
MP2.5	Curicó	0.7732	0

Tabla 17: Coeficiente de correlación entre las observaciones de las estaciones disponibles para la ciudad de Curicó y el pronóstico MOS. Además, se incluye el número de eventos (de PREEMERGENCIA y EMERGENCIA) ocurridos durante el periodo evaluado.

9.4.4. Talca

Contaminante	Estaciones	Coef. de correlación	PE y E
MP10	La Florida	0.7587	2
	UC Maule	0.7487	0
	Universidad de Talca	0.7321	0
MP2.5	UC Maule	0.7846	2
	La Florida	0.7687	31
	Universidad de Talca	0.6987	0

Tabla 18: Coeficiente de correlación entre las observaciones de las estaciones disponibles para la ciudad de Talca y el pronóstico MOS. Además, se incluye el número de eventos (de PREEMERGENCIA y EMERGENCIA) ocurridos durante el periodo evaluado.

	MP10		MP2.5	
	Promedios	Máximos	Promedios	Máximos
Coeficiente de Correlación	0.7696	0.7634	0.8008	0.7966

Tabla 19: Coeficiente de correlación entre el pronóstico MOS y las observaciones para la ciudad de Talca.

9.4.5. Chillán

Contaminante	Estaciones	Coef. de correlación	PE y E
MP10	Purén	0.7714	1
	INIA Chillán	0.7024	0
MP2.5	Purén	0.7431	63
	INIA Chillán	0.7202	1

Tabla 20: Coeficiente de correlación entre las observaciones de las estaciones disponibles para la ciudad de Chillán y el pronóstico MOS. Además, se incluye el número de eventos (de PREEMERGENCIA y EMERGENCIA) ocurridos durante el periodo evaluado.

	MP10		MP2.5	
	Promedios	Máximos	Promedios	Máximos
Coefficiente de Correlación	0.7423	0.7242	0.7567	0.7553

Tabla 21: Coeficiente de correlación entre el pronóstico MOS y las observaciones para la ciudad de Chillán.

9.4.6. Concepción

Contaminante	Estaciones	Coef. de correlación	PE y E
MP10	San Vicente Consultorio	0.7952	0
	Kingston College	0.7905	0
	INDURA	0.7156	1
	Nueva Libertad	0.7127	1
	JUNJI	0.7045	0
	Bocatoma	0.6929	0
	ENAP Price	0.6912	0
	San Pedro de la Paz	0.6908	0
	INPESCA	0.6775	0
	Liceo Polivalente	0.6457	0
Punteras	0.5763	0	
MP2.5	Nueva Libertad	0.6072	0

Tabla 22: Coeficiente de correlación entre las observaciones de las estaciones disponibles para la ciudad de Concepción y el pronóstico MOS. Además, se incluye el número de eventos (de PREEMERGENCIA y EMERGENCIA) ocurridos durante el periodo evaluado.

	MP10		MP2.5	
	Promedios	Máximos	Promedios	Máximos
Coefficiente de Correlación	0.7537	0.7668	0.6072	0.6072

Tabla 23: Coeficiente de correlación entre el pronóstico MOS y las observaciones para la ciudad de Concepción.

9.4.7. Coronel - Lota

Contaminante	Estaciones	Coef. de correlación	PE y E
MP10	Coronel Sur	0.8769	2
	Lagunillas	0.8630	0
	Coronel Norte	0.8066	5
	Lota Rural	0.7839	1
MP2.5	Coronel Norte	0.8179	11

Tabla 24: Coeficiente de correlación entre las observaciones de las estaciones disponibles para las comunas de Coronel-Lota y el pronóstico MOS. Además, se incluye el número de eventos (de PREEMERGENCIA y EMERGENCIA) ocurridos durante el periodo evaluado.

	MP10		MP2.5	
	Promedios	Máximos	Promedios	Máximos
Coeficiente de Correlación	0.8789	0.8764	0.8179	0.8179

Tabla 25: Coeficiente de correlación entre el pronóstico MOS y las observaciones para las comunas de Coronel y Lota.

9.4.8. Los Ángeles

Contaminante	Estaciones	Coef. de correlación	PE y E
MP10	21 de Mayo	0.7722	4
	Los Ángeles Oriente	0.7527	0
MP2.5	21 de Mayo	0.7825	36

Tabla 26: Coeficiente de correlación entre las observaciones de las estaciones disponibles para la ciudad de Los Ángeles y el pronóstico MOS. Además, se incluye el número de eventos (de PREEMERGENCIA y EMERGENCIA) ocurridos durante el periodo evaluado.

	MP10		MP2.5	
	Promedios	Máximos	Promedios	Máximos
Coeficiente de Correlación	0.7679	0.7877	0.7825	0.7825

Tabla 27: Coeficiente de correlación entre el pronóstico MOS y las observaciones para la ciudad de Los Ángeles.

Se puede ver que los coeficientes de correlación, en general, son bastante altos y, por lo tanto, para todos los casos considerados en este estudio, la calidad del aire tiene un alto grado de pronosticabilidad. También se puede ver que cuando se considera un solo valor por ciudad (promedio o máximo), la pronosticabilidad en general aumenta.

Tal como se mencionó anteriormente, el coeficiente de correlación es una buena métrica para medir el desempeño de un pronóstico en general. No obstante, lo que es más relevante en la práctica es que se pueda pronosticar eventos y la pronosticabilidad de eventos es justamente lo que se evalúa en las subsecciones siguientes (9.6 y 9.7).

9.5. Coeficiente de correlación - Meteorología

El análisis de la pronosticabilidad de las variables meteorológicas se realizó de manera análoga al de calidad del aire; utilizando el coeficiente de correlación como parámetro para la evaluación del pronóstico. Las tablas 28 - 30 muestran el coeficiente de correlación para las variables Dirección del viento (DIRV), Velocidad del viento (VELS), Temperatura (TEMP) y Humedad Relativa (HREL), de las estaciones separadas en ciudad de interés.

Las tablas, a continuación, muestran que el coeficiente de correlación para todas las variables se acerca en promedio a 0,8 y en casi todos los casos es superior a 0,6, además, alcanza valores por sobre 0,9 para la temperatura, lo cual da cuenta de la buena pronosticabilidad de las variables meteorológicas utilizando el método de pronóstico MOS. En dicho sentido, algunas bajas correlaciones alcanzadas por el pronóstico son atribuibles a errores en los datos más que a errores del modelo en si.

Ciudad	Estación	Variable	Coef. de correlación
Temuco	Las Encinas	DIRV	0.8287
		VELS	0.7988
		TEMP	0.8362
	Museo Ferroviario	DIRV	0.8860
		VELS	0.7863
		TEMP	0.9195
		HREL	0.8784
	Padre Las Casas I	DIRV	0.8050
		VELS	0.8867
		TEMP	0.8956
		HREL	0.8713
	Padre Las Casas II	VELS	0.8920
TEMP		0.9501	
HREL		0.7791	
Rancagua	Rancagua I	TEMP	0.8190
	Rancagua II	DIRV	0.6622
		VELS	0.6668
		TEMP	0.9216
		HREL	0.7214
	Casas de Peuco	DIRV	0.4481
		VELS	0.6695
		TEMP	0.9197
		HREL	0.7366
	Rengo	DIRV	0.6068
		VELS	0.7015
		TEMP	0.9227
		HREL	0.6609
	San Fernando	DIRV	0.6175
		VELS	0.7542
		TEMP	0.9093
		HREL	0.6833
	San Francisco de Mostazal	DIRV	0.2117
		VELS	0.6008
		TEMP	0.9096
		HREL	0.7853
Subestación Candelaria	DIRV	0.7597	
	VELS	0.6101	
	TEMP	0.9243	

Tabla 28: Coeficiente de correlación entre los resultados del pronóstico MOS y las observaciones meteorológicas. DIRV: dirección del viento; VELS: velocidad del viento; TEMP: temperatura; HREL: humedad relativa.

Ciudad	Estación	Variable	Coef. de correlación
Curicó	Curicó	DIRV	0.7446
		VELS	0.6854
		TEMP	0.9221
		HREL	0.7617
Talca	La Florida	DIRV	0.6272
		VELS	0.7935
		TEMP	0.9340
		HREL	0.8836
	UC Maule	DIRV	0.7121
		VELS	0.8153
		TEMP	0.9341
		HREL	0.8612
	Universidad de Talca	DIRV	0.6863
		VELS	0.7444
		TEMP	0.9297
		HREL	0.8558
Chillán	INIA Chillán	DIRV	0.8718
		VELS	0.8126
		TEMP	0.9117
		HREL	0.8576
	Purén	DIRV	0.8653
		VELS	0.8533
		TEMP	0.9374
		HREL	0.8241
Los Ángeles	Los Ángeles Oriente	DIRV	0.7327
		VELS	0.8726
		TEMP	0.9483
		HREL	0.8468
	21 de Mayo	DIRV	0.7634
		VELS	0.8871
		TEMP	0.9525
		HREL	0.8659
	Met. Los Ángeles	DIRV	0.5485
		VELS	0.8204
		TEMP	0.9294
		HREL	0.8384

Tabla 29: Coeficiente de correlación entre los resultados del pronóstico MOS y las observaciones meteorológicas. DIRV: dirección del viento; VELS: velocidad del viento; TEMP: temperatura; HREL: humedad relativa.

Ciudad	Estación	Variable	Coef. de correlación
Concepción	Kingston College	DIRV	0.7287
		TEMP	0.9104
		HREL	0.8638
	Nueva Libertad	DIRV	0.8041
		VELS	0.7899
	San Pedro de la Paz	DIRV	0.8317
		VELS	0.7570
		TEMP	0.9191
		HREL	0.8465
	Enap Metmast	DIRV	0.7706
		VELS	0.8281
		TEMP	0.8056
		DIRV (24m)	0.7824
		VELS (24m)	0.6860
	Met. Bocamina	DIRV	0.8350
		VELS	0.9000
		TEMP	0.8890
		HREL	0.8292
Met. Hualqui	DIRV	0.7447	
	VELS	0.7282	
	HREL	0.7543	
Coronel-Lota	Lagunillas	DIRV	0.7599
		VELS	0.9035
		TEMP	0.9321
		HREL	0.7807
	Coronel Sur	DIRV	0.7386
		VELS	0.9245
		TEMP	0.9551
		HREL	0.7943
	Coronel Norte	DIRV	0.7639
		VELS	0.9076
		TEMP	0.9348
		HREL	0.7716
	Lota Rural	DIRV	0.7834
		VELS	0.9041
		TEMP	0.9285
		HREL	0.8322
	Lota Urbana	DIRV	0.7726
		VELS	0.9290
		TEMP	0.9239
		HREL	0.8431
Calabozo	DIRV	0.8448	
	VELS	0.8587	

Tabla 30: Coeficiente de correlación entre los resultados del pronóstico MOS y las observaciones meteorológicas. DIRV: dirección del viento; VELS: velocidad del viento; TEMP: temperatura; HREL: humedad relativa.

9.6. Tabla de contingencia

Habitualmente para los análisis de pronosticabilidad se emplean tablas de contingencia de los eventos, utilizando los niveles determinados para las situaciones de contaminación atmosférica según la legislación vigente. El uso de dicha herramienta tiene la desventaja de necesitar la ocurrencia de eventos (constatados) para la determinación del porcentaje de acierto de los pronósticos. Al no contar con registros históricos representativos de la ocurrencia de los eventos, no se puede entregar información acerca del desempeño del pronóstico en dicho rango de datos. Además, es necesario considerar que algunos de los niveles de clasificación resultan acotados y la tabla de contingencia no es capaz de dar información de qué tan grande o pequeña es la diferencia entre los valores observados y pronosticados cuando no se acierta al rango específico establecido.

A continuación se entregan los resultados en términos de tablas de contingencia (sólo se muestran las tablas de contingencia si existe la ocurrencia de al menos un evento de nivel ALERTA o superior), lo que da una idea del comportamiento del pronóstico MOS. Para ello se ha implementado una función de transferencia empírica la cual ajusta los datos del pronóstico al rango de datos de las observaciones y con ello se asegura la obtención de resultados para todos los niveles registrados en las observaciones.

Las tablas de contingencia muestran que el porcentaje de acierto de los resultados del pronóstico son mayores hacia los valores extremos (mínimos en mayor proporción que los máximos). Además, se observa que a través de dicha clasificación el pronóstico logra en muy pocas ocasiones superar el 50 % de acierto a los niveles de concentración exactos establecidos en la legislación vigente. De modo que, la pronosticabilidad de los niveles diarios de concentración dentro de los rangos establecidos, es mucho menor que la de la serie de tiempo en general, lo cual podría resultar en dificultades a la hora de tomar decisiones (desde el punto de vista de gestión de episodios y por parte de la autoridad correspondiente) a partir de dicha información.

9.6.1. Temuco

MP10 - Promedio

	Clasificación	Pronóstico				% de pronóstico
		B/R	A	PE	E	
Obs.	B/R	777	11	4	0	98.11
	A	12	3	4	0	15.79
	PE	3	5	9	0	52.94
	E	0	0	0	0	
% de acierto		98.11	15.79	52.94		

Tabla 31: Tabla de contingencia de los resultados del pronóstico MOS.

MP10 - Máximo

	Clasificación	Pronóstico				% de pronóstico
		B/R	A	PE	E	
Obs.	B/R	684	27	7	3	94.87
	A	29	13	13	0	23.64
	PE	7	12	13	5	35.14
	E	1	3	4	7	46.67
% de acierto		94.87	23.64	35.14	46.67	

Tabla 32: Tabla de contingencia de los resultados del pronóstico MOS.

MP2.5 - Promedio

	Clasificación	Pronóstico				% de pronóstico
		B/R	A	PE	E	
Obs.	B/R	503	38	10	0	91.29
	A	36	31	23	3	33.33
	PE	11	23	30	13	38.96
	E	1	1	14	20	55.56
% de acierto		91.29	33.33	38.96	55.56	

Tabla 33: Tabla de contingencia de los resultados del pronóstico MOS.

MP2.5 - Máximo

	Clasificación	Pronóstico				% de pronóstico
		B/R	A	PE	E	
Obs.	B/R	396	40	18	2	86.84
	A	53	41	17	3	35.96
	PE	7	27	49	22	46.67
	E	0	6	21	55	67.07
% de acierto		86.84	35.96	46.67	67.07	

Tabla 34: Tabla de contingencia de los resultados del pronóstico MOS.

9.6.2. Rancagua

MP10 - Promedio

	Clasificación	Pronóstico				% de pronóstico
		B/R	A	PE	E	
Obs.	B/R	656	16	0	0	97.62
	A	15	4	2	0	19.05
	PE	1	1	3	0	60.00
	E	0	0	0	0	
% de acierto		97.62	19.05	60.00		

Tabla 35: Tabla de contingencia de los resultados del pronóstico MOS.

MP10 - Máximo

	Clasificación	Pronóstico				% de pronóstico
		B/R	A	PE	E	
Obs.	B/R	622	16	8	0	96.28
	A	19	7	5	0	22.58
	PE	5	8	4	2	21.05
	E	0	0	2	0	0.00
% de acierto		96.28	22.58	21.05	0.00	

Tabla 36: Tabla de contingencia de los resultados del pronóstico MOS.

MP2.5 - Promedio

	Clasificación	Pronóstico				% de pronóstico
		B/R	A	PE	E	
Obs.	B/R	429	29	2	0	93.26
	A	28	31	17	1	40.26
	PE	3	17	18	4	42.86
	E	0	0	5	3	37.50
% de acierto		93.26	40.26	42.86	37.50	

Tabla 37: Tabla de contingencia de los resultados del pronóstico MOS.

MP2.5 - Máximo

	Clasificación	Pronóstico				% de pronóstico
		B/R	A	PE	E	
Obs.	B/R	388	31	3	0	91.94
	A	27	30	19	3	37.97
	PE	7	18	34	7	51.52
	E	0	0	10	10	50.00
% de acierto		91.94	37.97	51.52	50.00	

Tabla 38: Tabla de contingencia de los resultados del pronóstico MOS.

9.6.3. Talca

MP10 - Máximo

	Clasificación	Pronóstico				% de pronóstico
		B/R	A	PE	E	
Obs.	B/R	312	5	2	0	97.81
	A	6	2	0	0	25.00
	PE	1	1	0	0	0.00
	E	0	0	0	0	
% de acierto		97.81	25.00	0.00		

Tabla 39: Tabla de contingencia de los resultados del pronóstico MOS.

MP2.5 - Promedio

	Clasificación	Pronóstico				% de pronóstico
		B/R	A	PE	E	
Obs.	B/R	279	13	3	0	94.58
	A	13	5	2	0	25.00
	PE	3	2	6	0	54.55
	E	0	0	0	0	
% de acierto		94.58	25.00	54.55		

Tabla 40: Tabla de contingencia de los resultados del pronóstico MOS.

MP2.5 - Máximo

	Clasificación	Pronóstico				% de pronóstico
		B/R	A	PE	E	
Obs.	B/R	216	16	5	2	90.38
	A	18	16	9	1	36.36
	PE	5	11	14	3	42.42
	E	0	1	5	4	40.00
% de acierto		90.38	36.36	42.42	40.00	

Tabla 41: Tabla de contingencia de los resultados del pronóstico MOS.

9.6.4. Chillán

MP10 - Promedio

	Clasificación	Pronóstico				% de pronóstico
		B/R	A	PE	E	
Obs.	B/R	554	1	1	0	99.64
	A	1	0	0	0	0.00
	PE	1	0	1	0	50.00
	E	0	0	0	0	
% de acierto		99.64	0.00	50.00		

Tabla 42: Tabla de contingencia de los resultados del pronóstico MOS.

MP10 - Máximo

	Clasificación	Pronóstico				% de pronóstico
		B/R	A	PE	E	
Obs.	B/R	534	6	3	0	98.34
	A	7	4	1	0	33.33
	PE	2	2	0	0	0.00
	E	0	0	0	0	
% de acierto		98.34	33.33	0.00		

Tabla 43: Tabla de contingencia de los resultados del pronóstico MOS.

MP2.5 - Promedio

	Clasificación	Pronóstico				% de pronóstico
		B/R	A	PE	E	
Obs.	B/R	412	23	12	1	91.96
	A	24	13	6	2	28.89
	PE	11	9	12	4	33.33
	E	1	0	6	4	36.36
% de acierto		91.96	28.89	33.33	36.36	

Tabla 44: Tabla de contingencia de los resultados del pronóstico MOS.

MP2.5 - Máximo

	Clasificación	Pronóstico				% de pronóstico
		B/R	A	PE	E	
Obs.	B/R	386	22	11	2	91.69
	A	20	16	12	3	31.37
	PE	14	10	22	5	43.14
	E	1	3	6	7	41.18
% de acierto		91.69	31.37	43.14	41.18	

Tabla 45: Tabla de contingencia de los resultados del pronóstico MOS.

9.6.5. Concepción

MP10 - Máximo

	Clasificación	Pronóstico				% de pronóstico
		B/R	A	PE	E	
Obs.	B/R	808	6	2	0	99.02
	A	7	1	0	0	12.50
	PE	1	1	1	0	33.33
	E	0	0	0	0	
% de acierto		99.02	12.50	33.33		

Tabla 46: Tabla de contingencia de los resultados del pronóstico MOS.

MP2.5

	Clasificación	Pronóstico				% de pronóstico
		B/R	A	PE	E	
Obs.	B/R	794	7	0	0	99.13
	A	7	3	0	0	30.00
	PE	0	0	0	0	
	E	0	0	0	0	
% de acierto		99.13	30.00			

Tabla 47: Tabla de contingencia de los resultados del pronóstico MOS.

9.6.6. Coronel-Lota

MP10 - Promedio

	Clasificación	Pronóstico				% de pronóstico
		B/R	A	PE	E	
Obs.	B/R	595	1	0	0	99.83
	A	1	0	0	0	0.00
	PE	0	0	0	0	
	E	0	0	0	0	
% de acierto		99.83	0.00			

Tabla 48: Tabla de contingencia de los resultados del pronóstico MOS.

MP10 - Máximo

	Clasificación	Pronóstico				% de pronóstico
		B/R	A	PE	E	
Obs.	B/R	547	11	2	0	97.68
	A	10	9	4	0	39.13
	PE	3	3	8	0	57.14
	E	0	0	0	1	100.00
% de acierto		97.68	39.13	57.14	100.00	

Tabla 49: Tabla de contingencia de los resultados del pronóstico MOS.

MP2.5 - Promedio

	Clasificación	Pronóstico				% de pronóstico
		B/R	A	PE	E	
Obs.	B/R	263	6	4	0	96.34
	A	7	4	2	0	30.77
	PE	3	3	4	0	40.00
	E	0	0	0	1	100.00
% de acierto		96.34	30.77	40.00	100.00	

Tabla 50: Tabla de contingencia de los resultados del pronóstico MOS.

9.6.7. Los Ángeles

MP10 - Promedio

	Clasificación	Pronóstico				% de pronóstico
		B/R	A	PE	E	
Obs.	B/R	466	5	1	0	98.73
	A	5	0	0	0	0.00
	PE	1	0	2	0	66.67
	E	0	0	0	0	
% de acierto		98.73	0.00	66.67		

Tabla 51: Tabla de contingencia de los resultados del pronóstico MOS.

MP10 - Máximo

	Clasificación	Pronóstico				% de pronóstico
		B/R	A	PE	E	
Obs.	B/R	461	7	0	0	98.50
	A	6	1	1	0	12.50
	PE	1	0	3	0	75.00
	E	0	0	0	0	
% de acierto		98.50	12.50	75.00		

Tabla 52: Tabla de contingencia de los resultados del pronóstico MOS.

MP2.5

	Clasificación	Pronóstico				% de pronóstico
		B/R	A	PE	E	
Obs.	B/R	328	26	5	0	91.36
	A	26	15	6	2	30.61
	PE	5	7	11	3	42.31
	E	0	1	4	5	50.00
% de acierto		91.36	30.61	42.31	50.00	

Tabla 53: Tabla de contingencia de los resultados del pronóstico MOS.

Tal como se ha mencionado anteriormente, para la evaluación de las tablas de contingencias se requiere un pronóstico categórico. El acierto para las distintas categorías generalmente es menos de un 50%. Los bajos valores obtenidos son un reflejo de que, en realidad, todos los pronósticos están asociados a una incertidumbre. Es decir, si se pronostica una cierta categoría existe también la posibilidad de que el valor observado el día siguiente sea de otra categoría. En la subsección siguiente se propone justamente un método de pronóstico que sea de tipo probabilístico, o sea un pronóstico que entrega también la probabilidad de ocurrencia de las otras categorías.

9.7. Pronóstico probabilístico

Con fines que un pronóstico refleje sus incertidumbres asociadas, se propone en esta sección un método de pronóstico probabilístico. Como se ha podido ver a lo largo del desarrollo de este proyecto, bajo iguales condiciones meteorológicas los niveles resultantes de concentración de material particulado en un mismo lugar o zona, no siempre son los mismos, lo que inevitablemente introduce un error en los resultados del pronóstico y hace muy difícil que este acierte al nivel exacto de contaminación del aire por material particulado (según lo visto en las tablas de contingencia en muy pocos casos los pronósticos superan el 50% de acierto al nivel exacto). En lo que sigue se propone un método para generar pronósticos probabilísticos de la ocurrencia de eventos para cualquier resultado del pronóstico MOS, lo que constituye una manera más objetiva y robusta de evaluar la posibilidad de la ocurrencia de un evento. El método propuesto se presenta en base a los promedios y máximos de los promedios diarios de todas las estaciones de las respectivas ciudades (calculados según lo explicado en la sección anterior)

La metodología propuesta se describe a continuación:

- Generar un pronóstico MOS para la variable de interés. Este método ha entregado resultados con alta correlación con las observaciones.
- Aplicar una función de transferencia empírica para ajustar el rango de los datos de pronóstico a las observaciones. Con ello es posible asegurar que los resultados del pronóstico entreguen valores en todo el rango de datos de las observaciones.

- Ajustar una distribución de probabilidad a los resultados del pronóstico respecto de las observaciones en distintos intervalos. Si es posible asumir que los resultados del pronóstico versus las observaciones siguen una distribución normal, entonces es posible realizar un ajuste de distribución de los resultados en intervalos (los cuales para este proyecto fueron del 5 % de los datos).
- Obtener una distribución de probabilidad de la ocurrencia de eventos de acuerdo a los niveles de concentración de interés, los cuales corresponden a BUENO/REGULAR, ALERTA, PREEMERGENCIA y EMERGENCIA de acuerdo a lo establecido en la legislación vigente.

En lo que sigue, se explica el análisis a través del ejemplo de la ciudad Temuco. Para las otras ciudades se entregan sólo las figuras correspondientes.

9.7.1. Temuco

Las figuras 10 - 13 visualizan las incertidumbres de los pronósticos para MP10 y MP2,5 tanto para los promedios como para los máximos, respectivamente. A la izquierda un diagrama de dispersión con las concentraciones pronosticados en el eje x y las concentraciones observadas en el eje y . En rojo se destaca el 5 % más alto de los valores pronosticados. A la derecha se muestra cómo se distribuyen las concentraciones observadas para justamente ese 5 % de las concentraciones más altas pronosticadas. Las figuras muestran claramente que la distribución de frecuencia de los resultados del pronóstico por sobre el percentil del 95 % abarca todos los niveles de concentración definidos en la legislación vigente (reafirmando la idea de que no es posible pronosticar certeramente el nivel de concentración de material particulado, utilizando sólo variables meteorológicas). Suponiendo que dicha distribución de frecuencia se comporta, en primera aproximación, de manera normal, es posible ajustar una distribución a las concentraciones pronosticadas, en intervalos fijos (en este caso del 5 %), y con ello la determinación de la distribución de probabilidades de ocurrencia de eventos. Es decir, para cada valor pronosticado, se le puede asociar a este valor las probabilidades de cada uno de los rangos BUENO/REGULA, ALERTA, PREEMERGENCIA y EMERGENCIA.

MP10 - Promedios

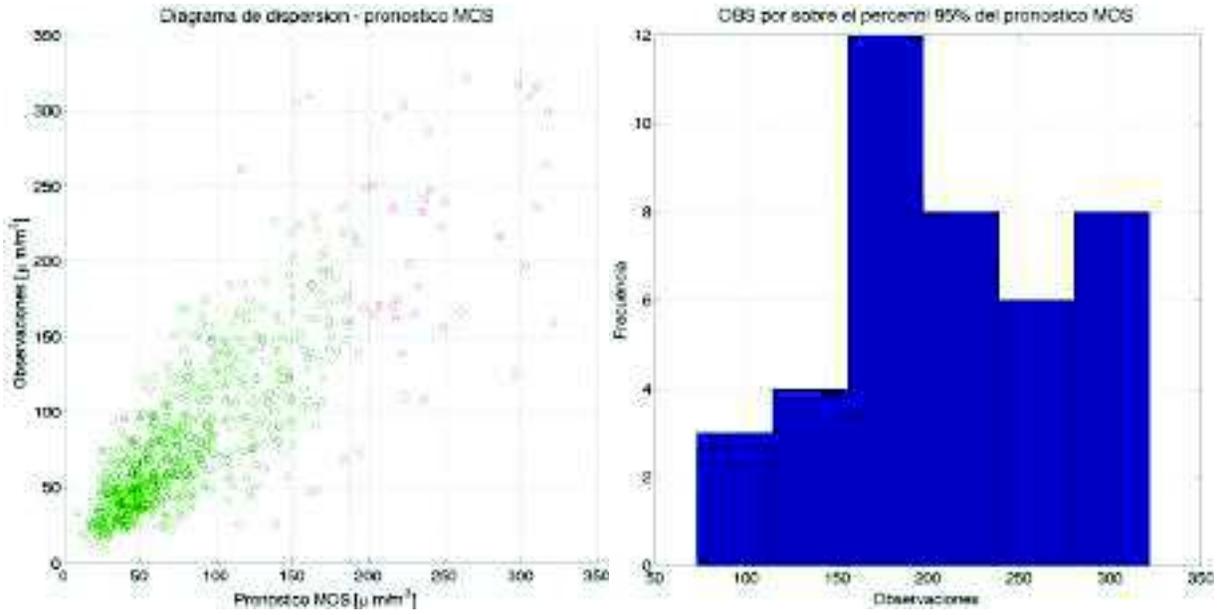


Figura 10:

MP10 - Máximos

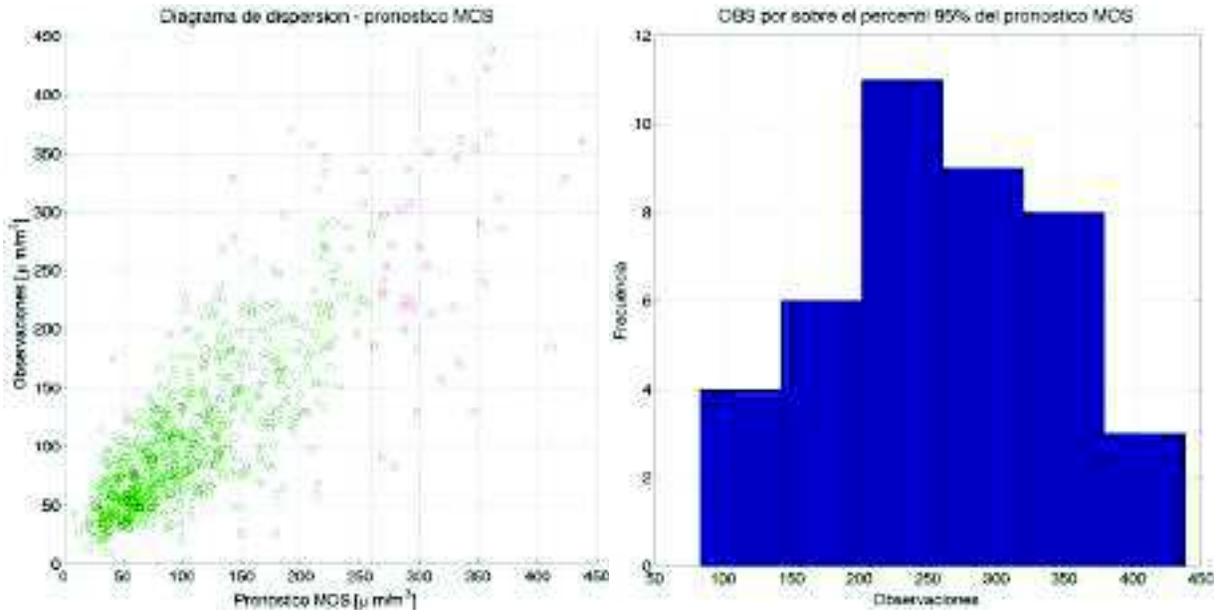


Figura 11:

MP2.5 - Promedios

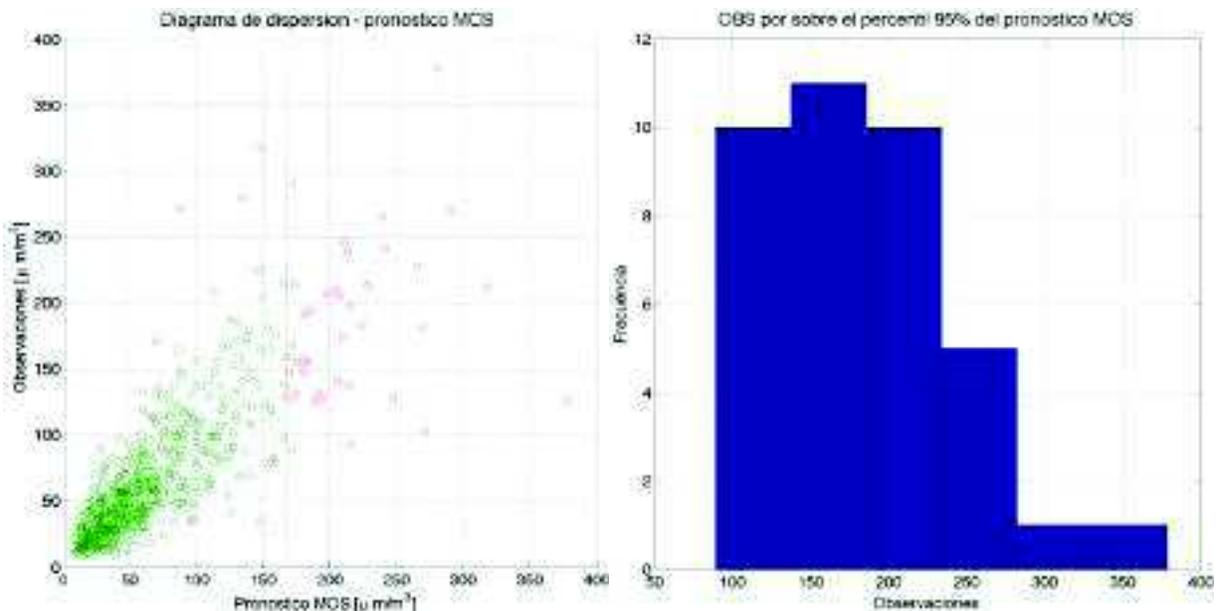


Figura 12:

MP2.5 - Máximos

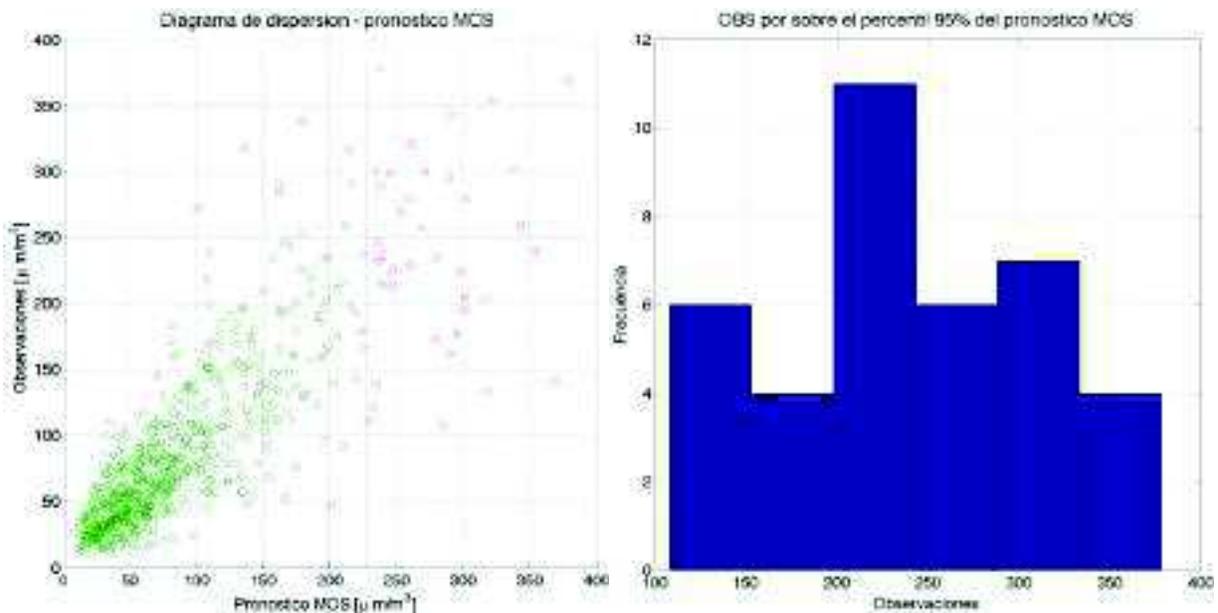


Figura 13:

Se ha aplicado un pronóstico MOS histórico para cada una de las variables (MP10 y MP2,5) y para cada una de las métricas (promedio y máximo). Entonces, para cada uno de estos pronósticos también se ha calculado la probabilidad de ocurrencia de todas las categorías (o bien las “probabilidades de categorías”). Si ahora se discretiza el rango de todas las concentraciones pronosticadas en 20 intervalos en que cada intervalo representa un 5% de los datos, cada uno de los valores en un intervalos tiene asociado

las probabilidades de categorías. Promediando las probabilidades de categorías dentro de un intervalo se obtiene una probabilidad para cada una de las categorías y representativa para este intervalo. Las figuras 14 - 17 muestran justamente estas probabilidades promedio para las variables MP10 y MP2,5 y para las métricas promedio y máximo, respectivamente. A modo de ejemplo, la figura 17 muestra una concentración pronosticada que se encuentra dentro del percentil 95 % de los valores históricos, la probabilidad que este pronóstico signifique una EMERGENCIA es mayor de un 70 %, que sea una PREEMERGENCIA es de un 15 % y que sean BUENO/REGULAR o ALERTA menos de un 5 %, respectivamente.

También se observa que, en el caso de MP10, las probabilidades que sean eventos de tipo EMERGENCIA o PREEMERGENCIA son mucho más bajas que en el caso de MP2,5. Eso se explica por el hecho que los umbrales para esas categorías son mucho más estrictos para el MP2,5 que para el MP10 y, por lo tanto, efectivamente son más probable que ocurran.

MP10 - Promedios

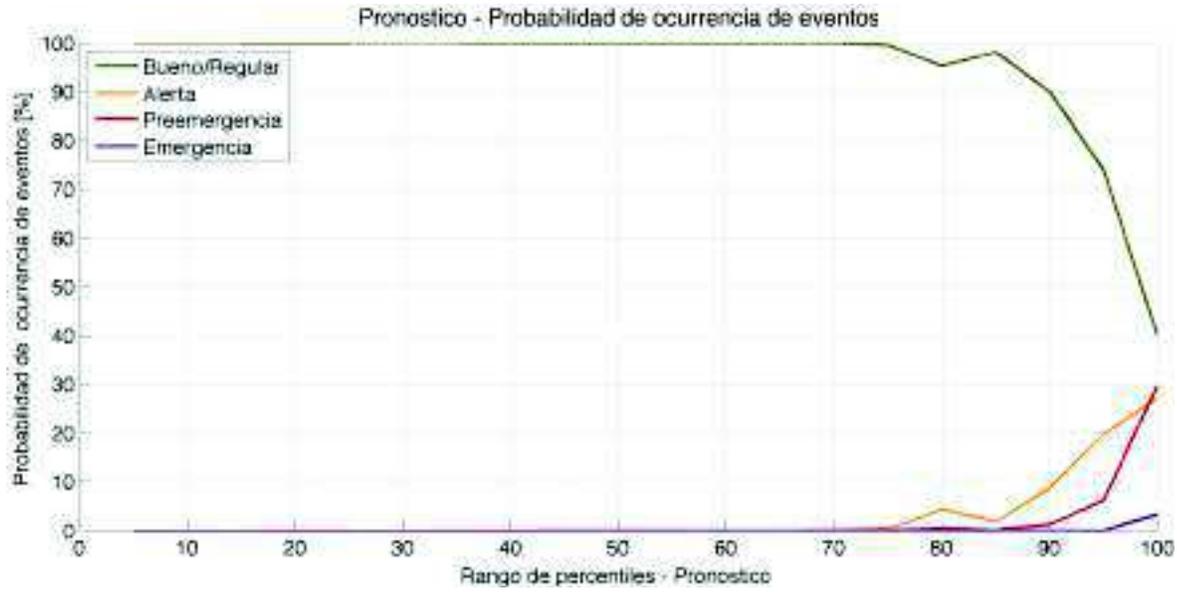


Figura 14:

MP10 - Máximos

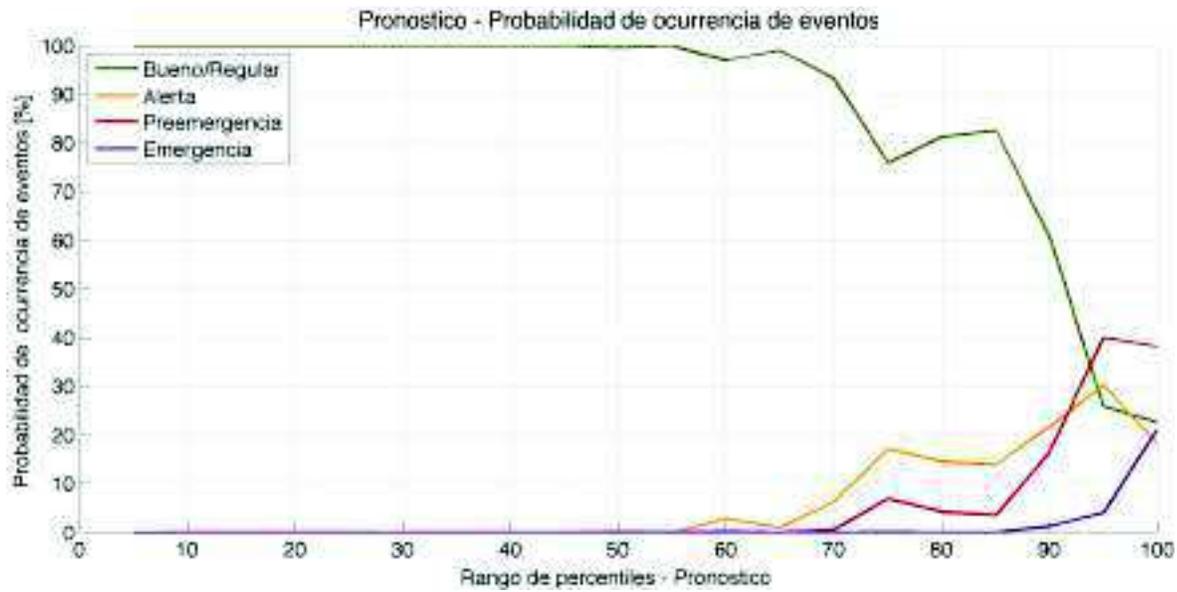


Figura 15:

MP2.5 - Promedios

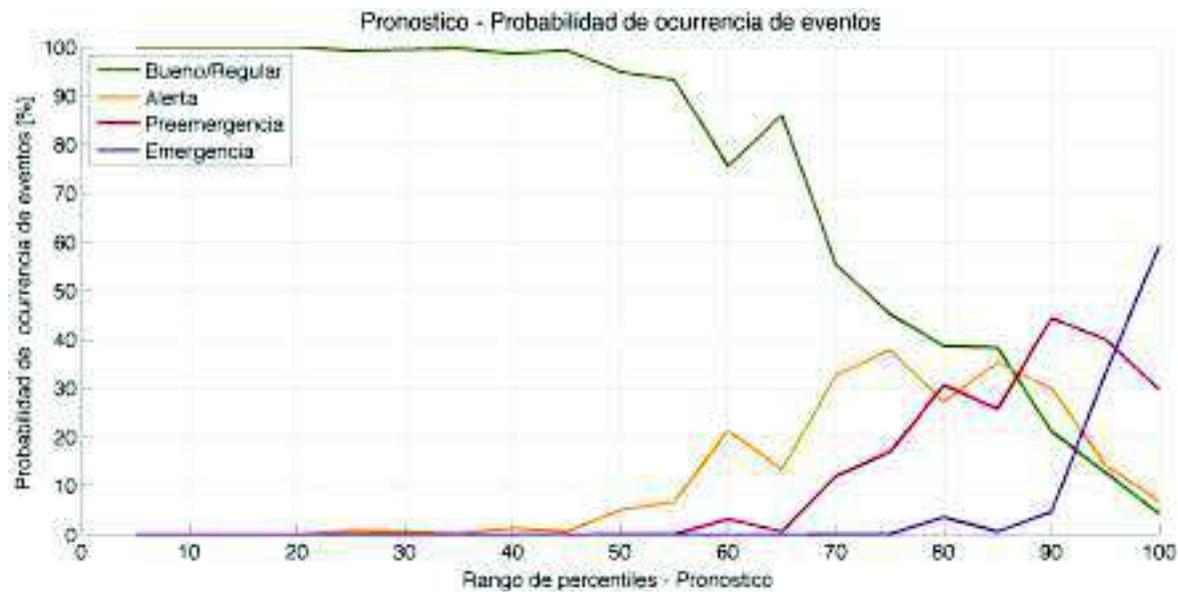


Figura 16:

MP2.5 - Máximos

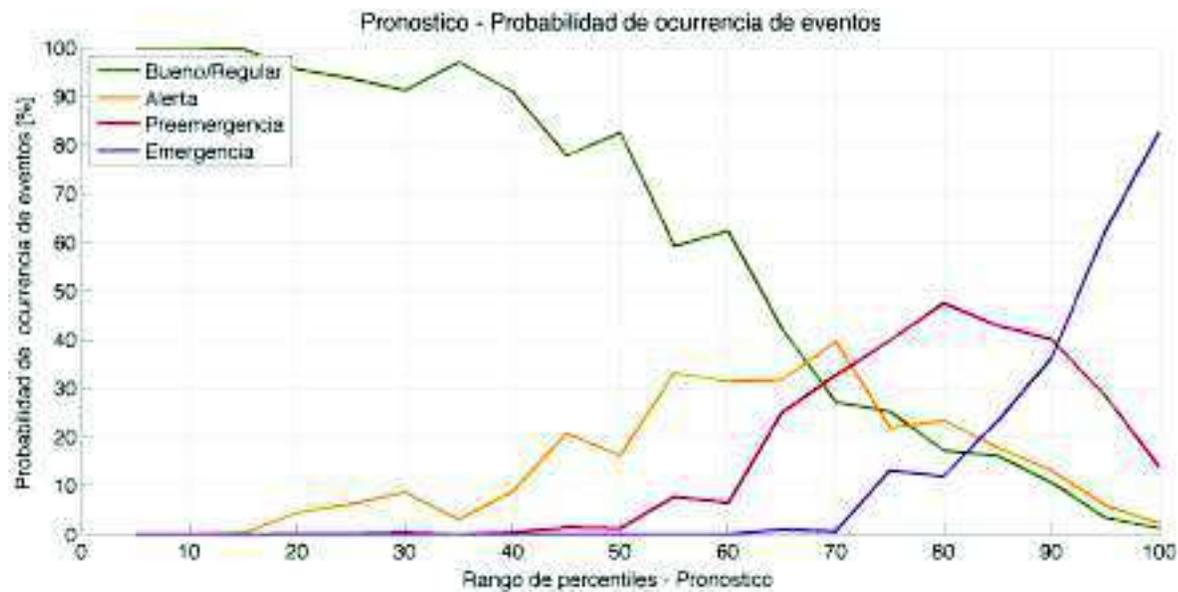


Figura 17:

Los resultados para todas las otras ciudades de estudio se muestran en las subsecciones siguientes.

9.7.2. Rancagua

MP10 - Promedios

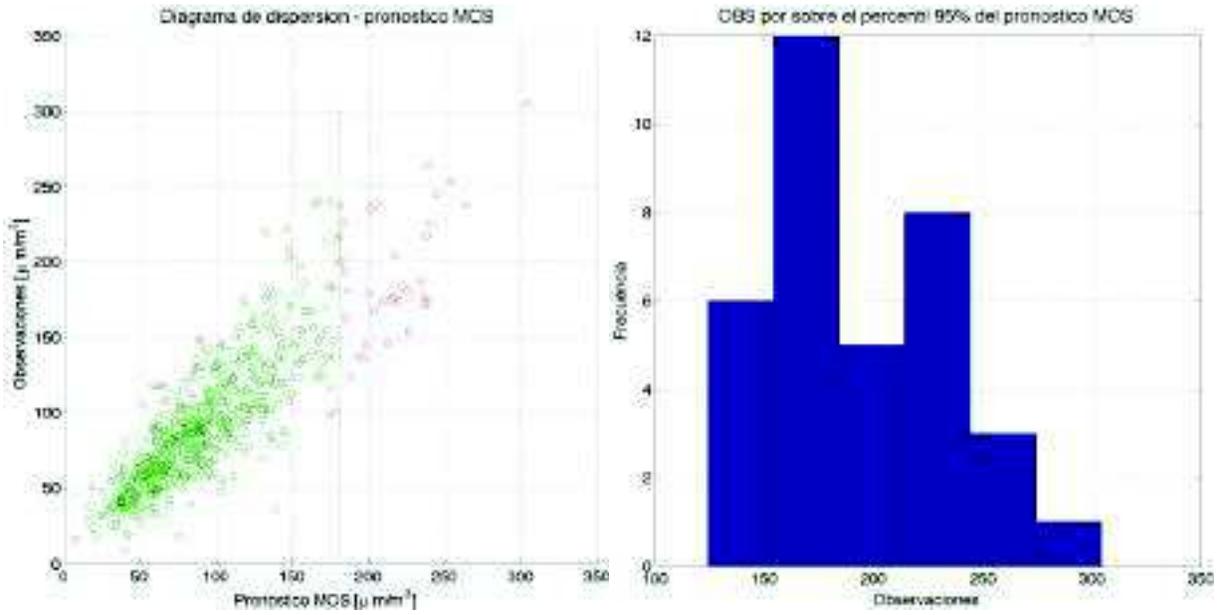


Figura 18:

MP10 - Máximos

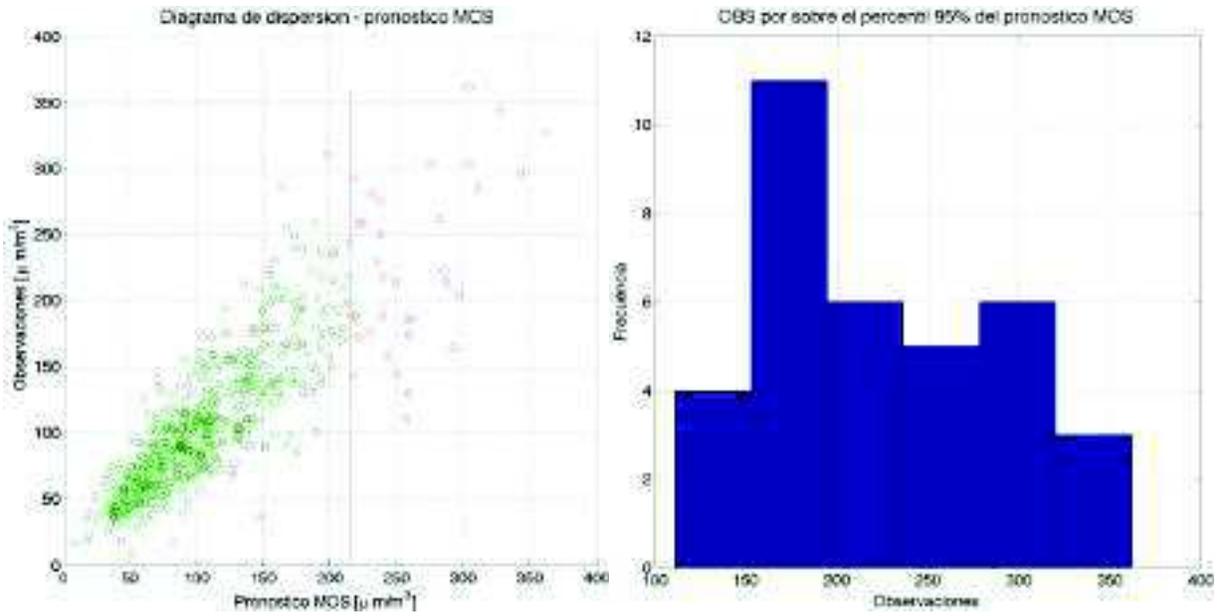


Figura 19:

MP2.5 - Promedios

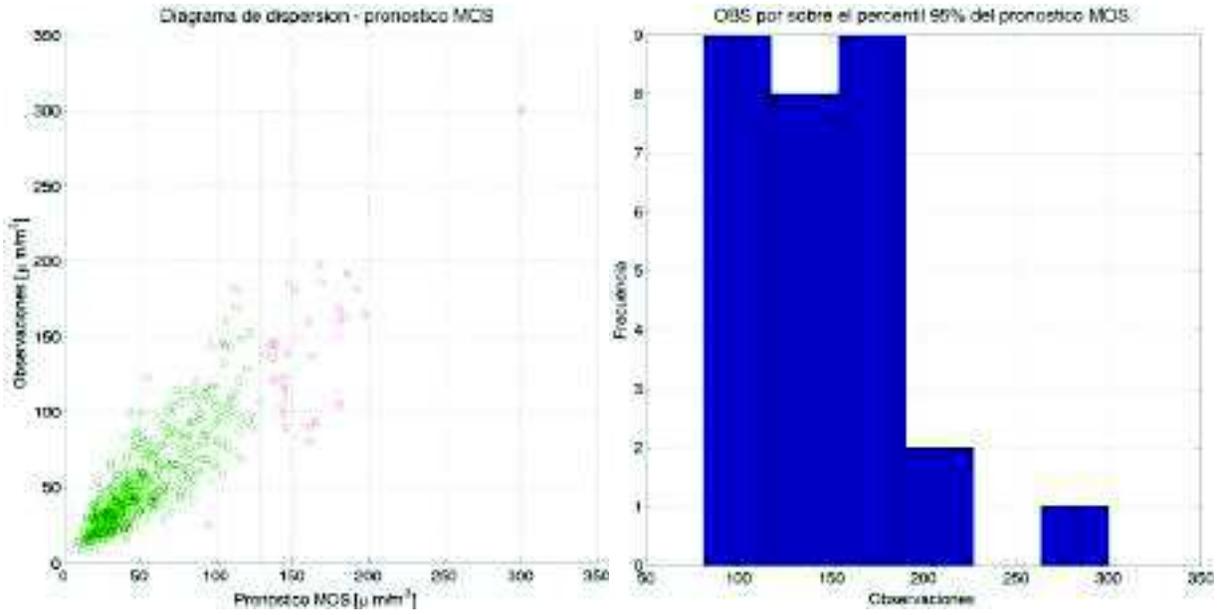


Figura 20:

MP2.5 - Máximos

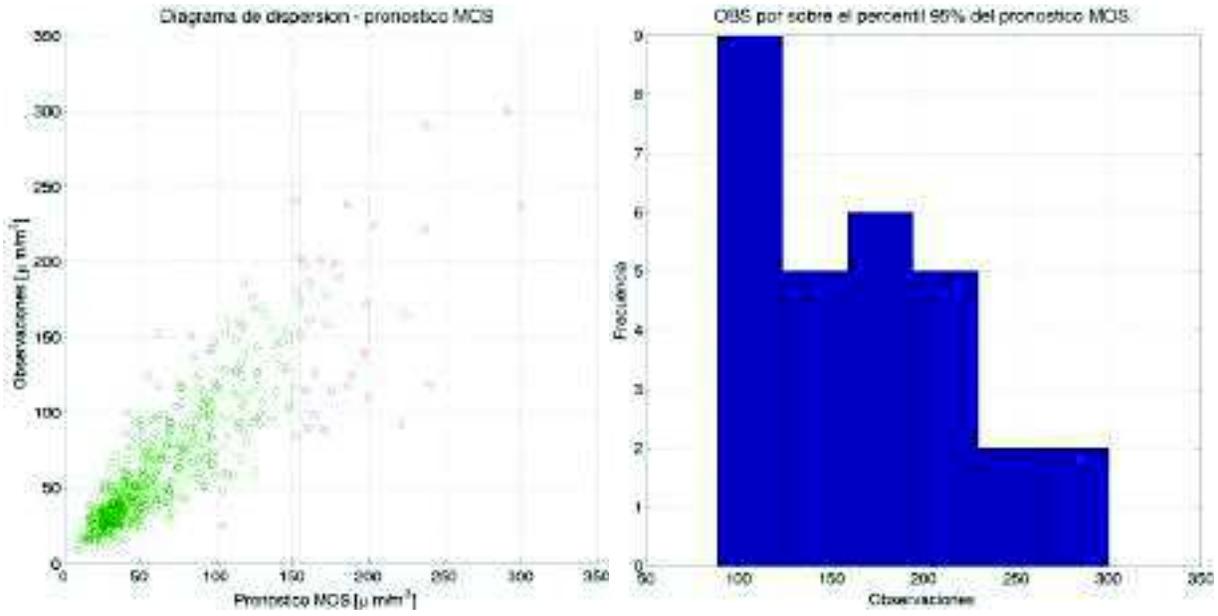


Figura 21:

MP10 - Promedios

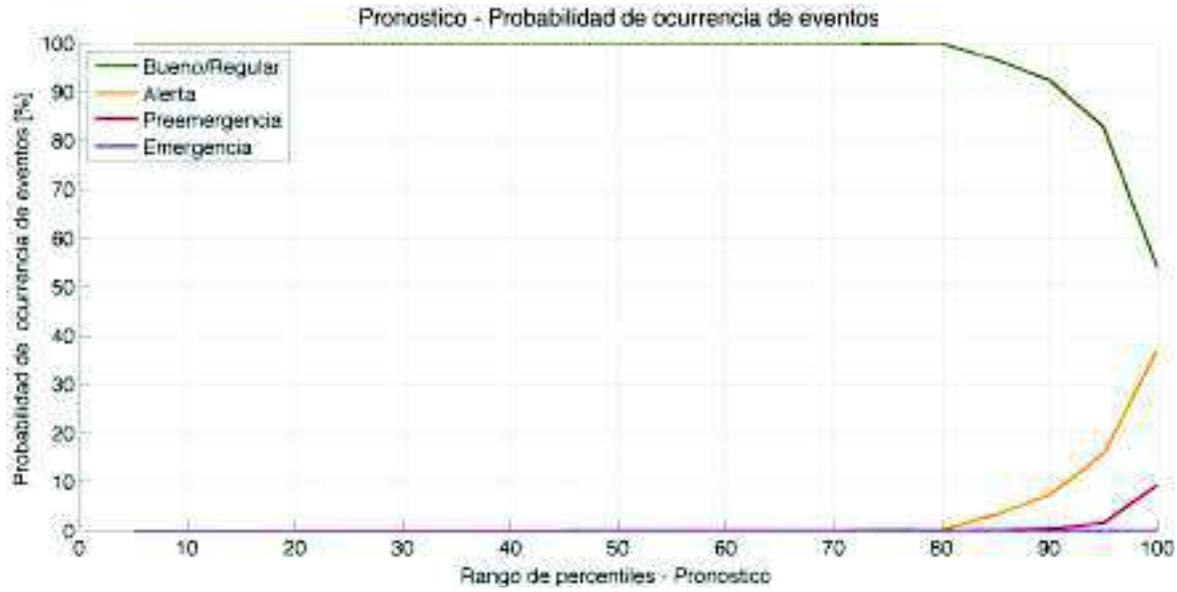


Figura 22:

MP10 - Máximos

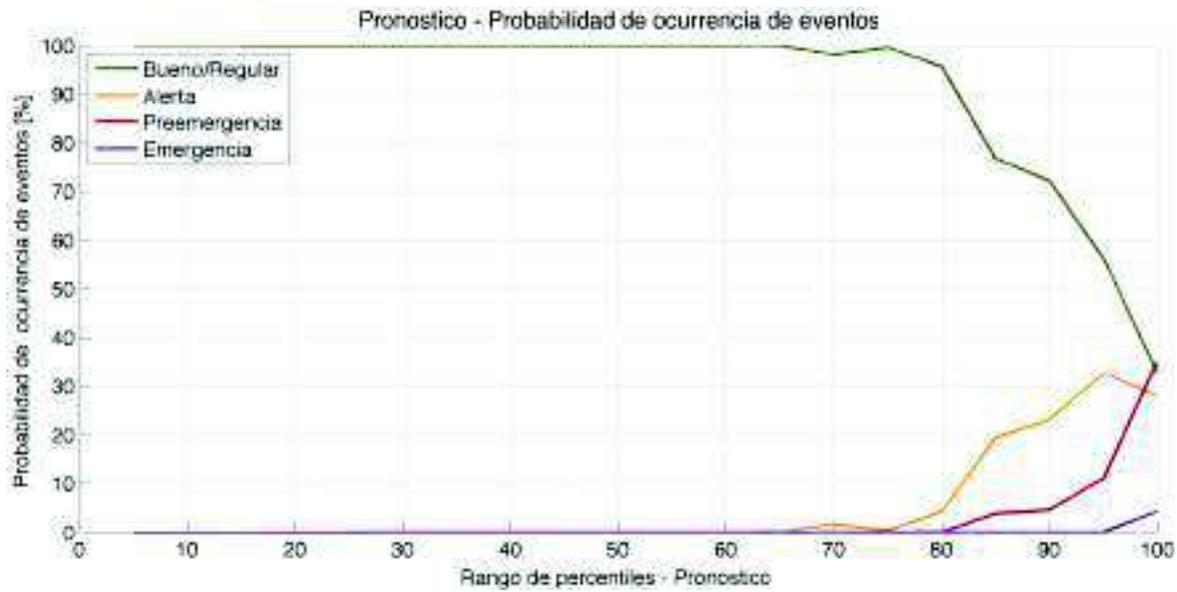


Figura 23:

MP2.5 - Promedios

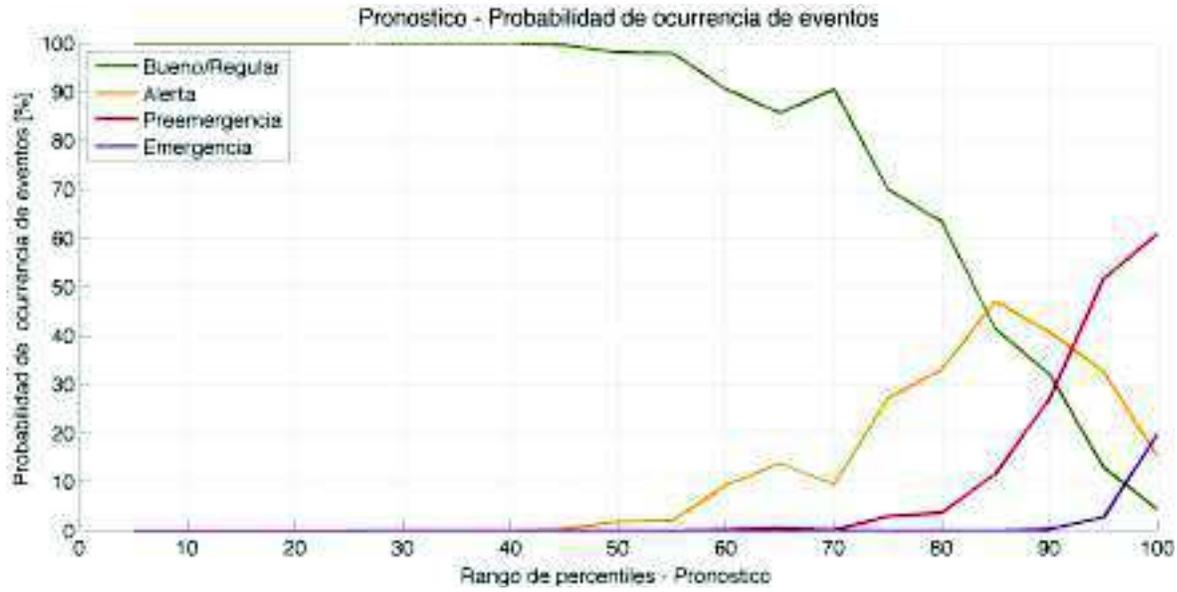


Figura 24:

MP2.5 - Máximos

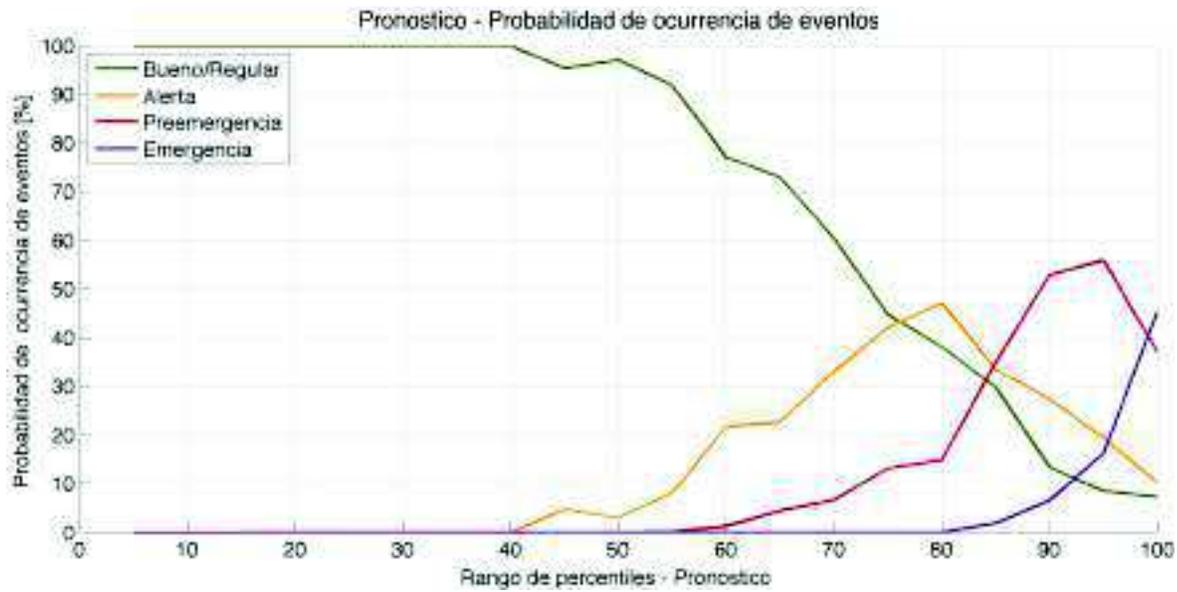


Figura 25:

9.7.3. Curicó

MP10

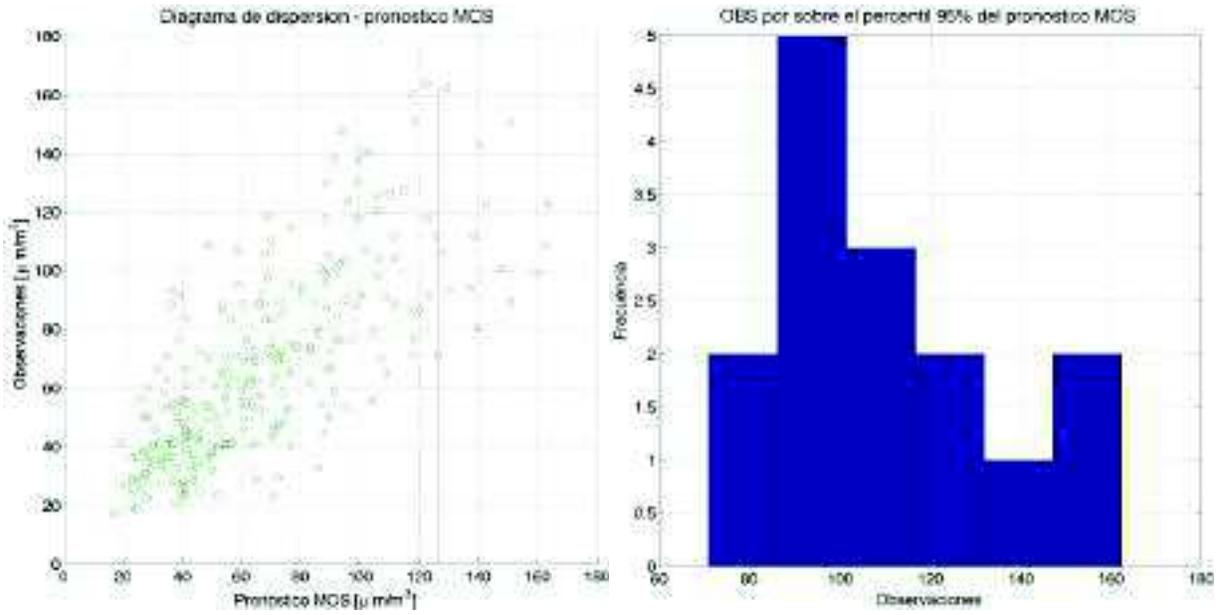


Figura 26:

MP2.5

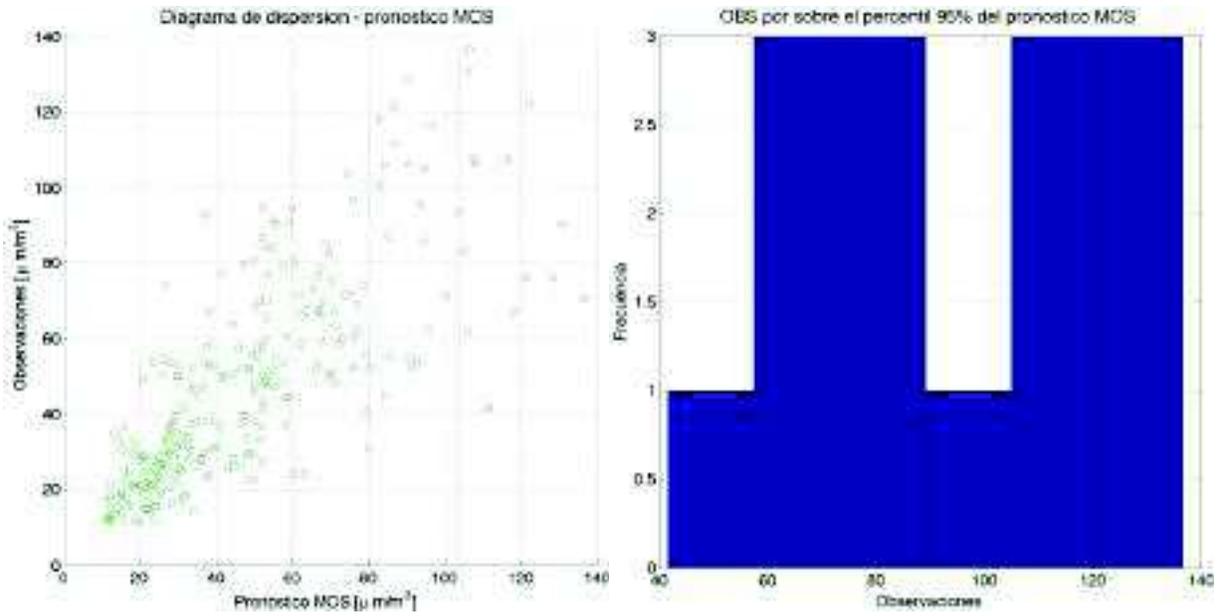


Figura 27:

9.7.4. Talca

MP10 - Promedios

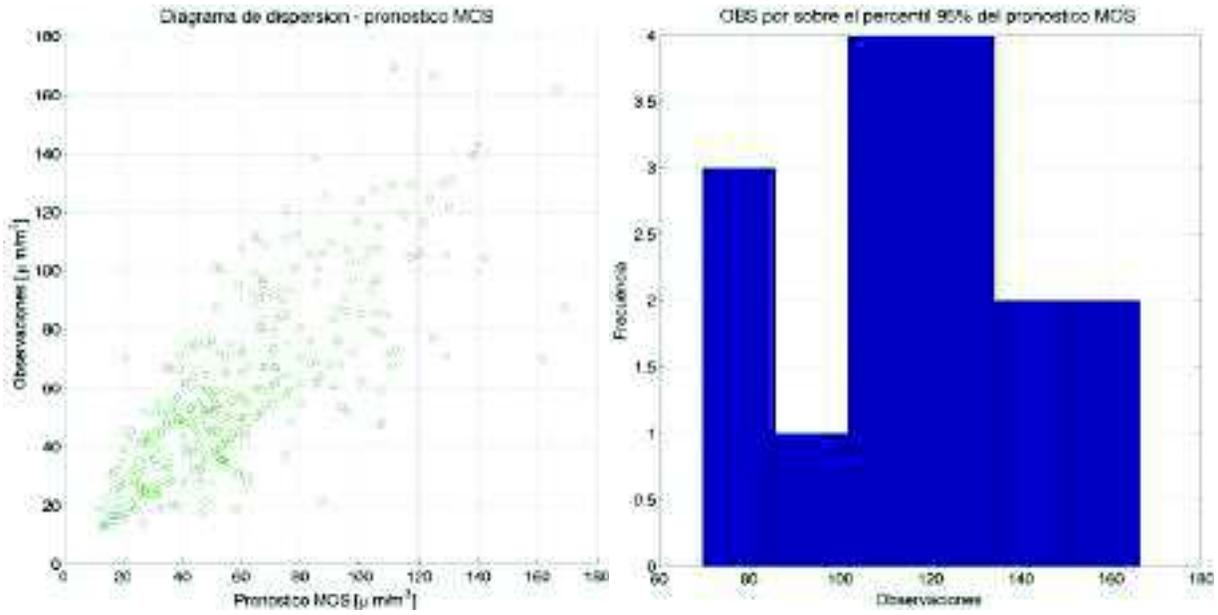


Figura 28:

MP10 - Máximos

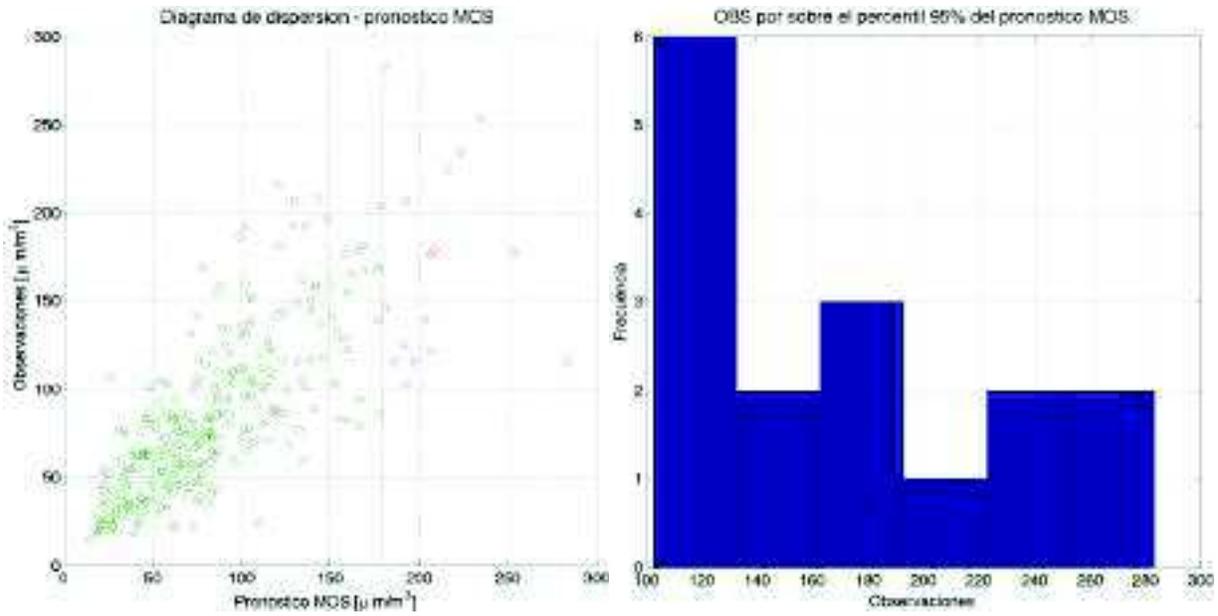


Figura 29:

MP2.5 - Promedios

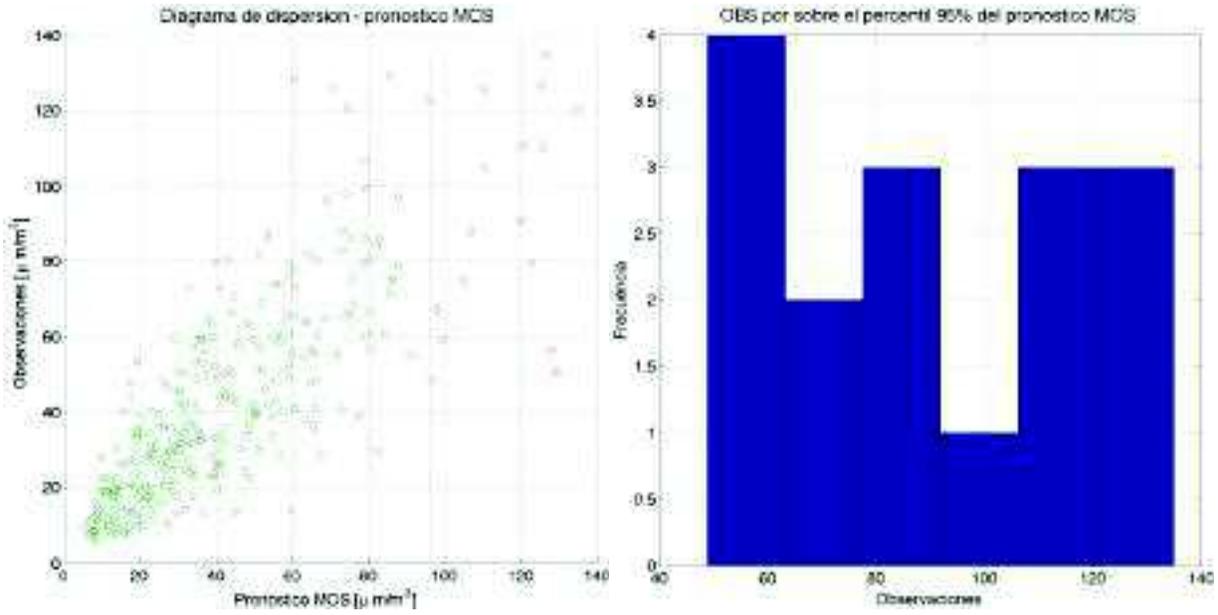


Figura 30:

MP2.5 - Máximos

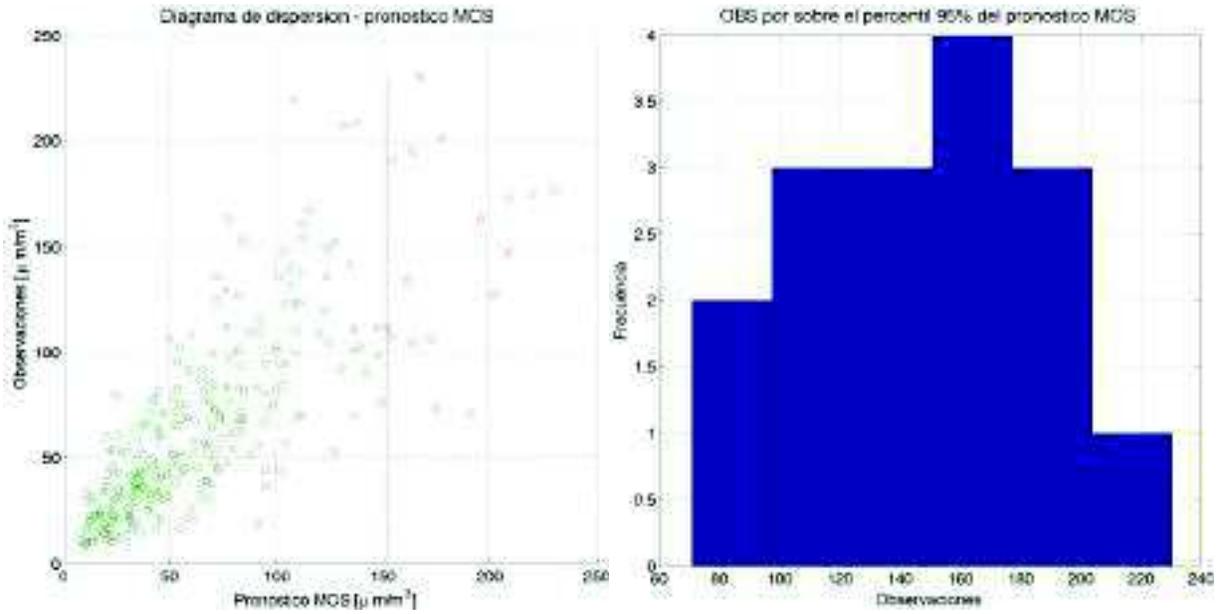


Figura 31:

MP10 - Máximos

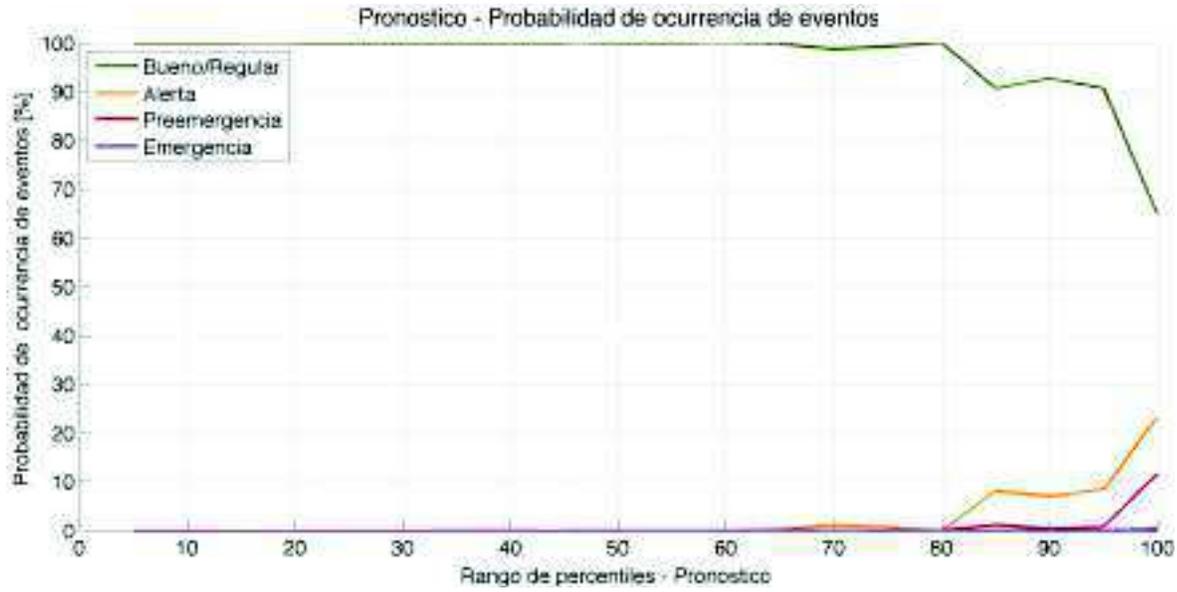


Figura 32:

MP2.5 - Promedios

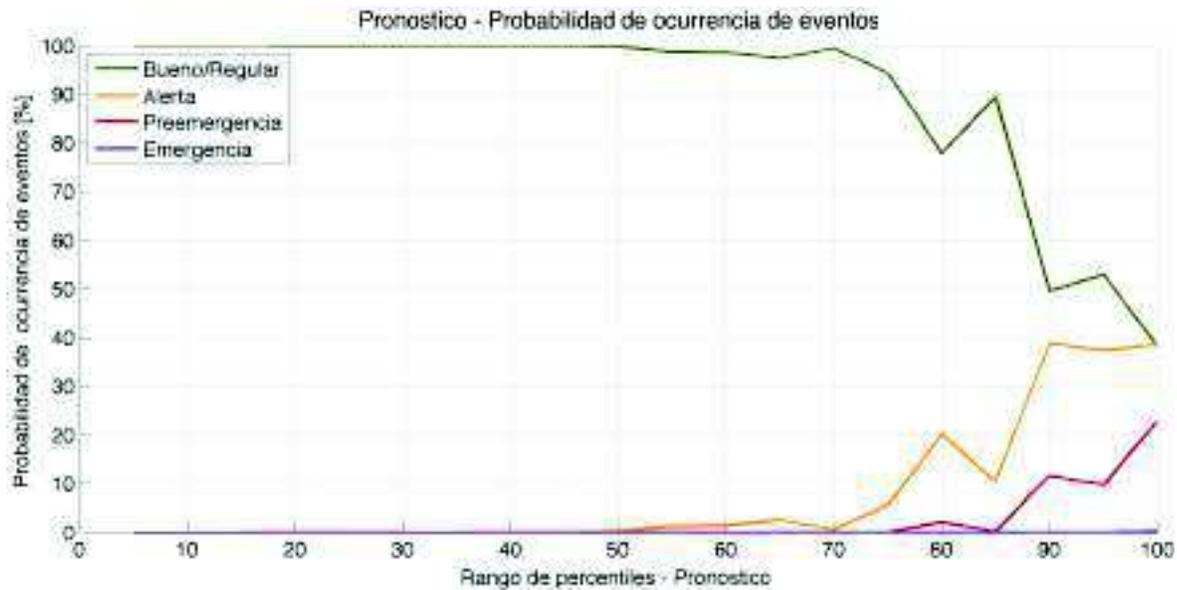


Figura 33:

MP2.5 - Máximos

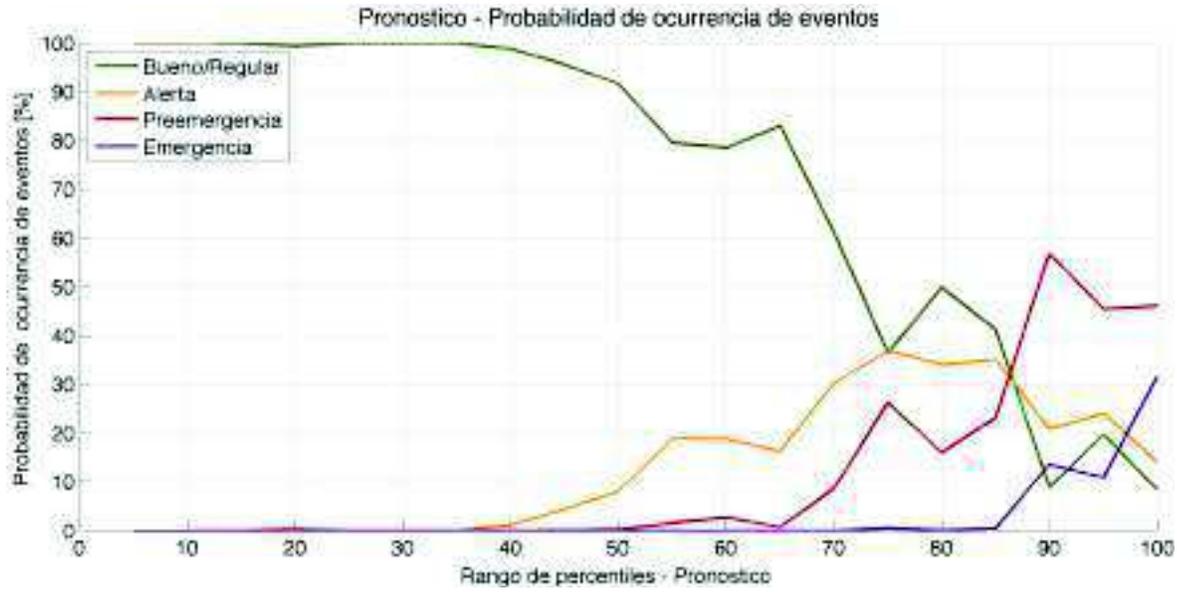


Figura 34:

9.7.5. Chillán

MP10 - Promedios

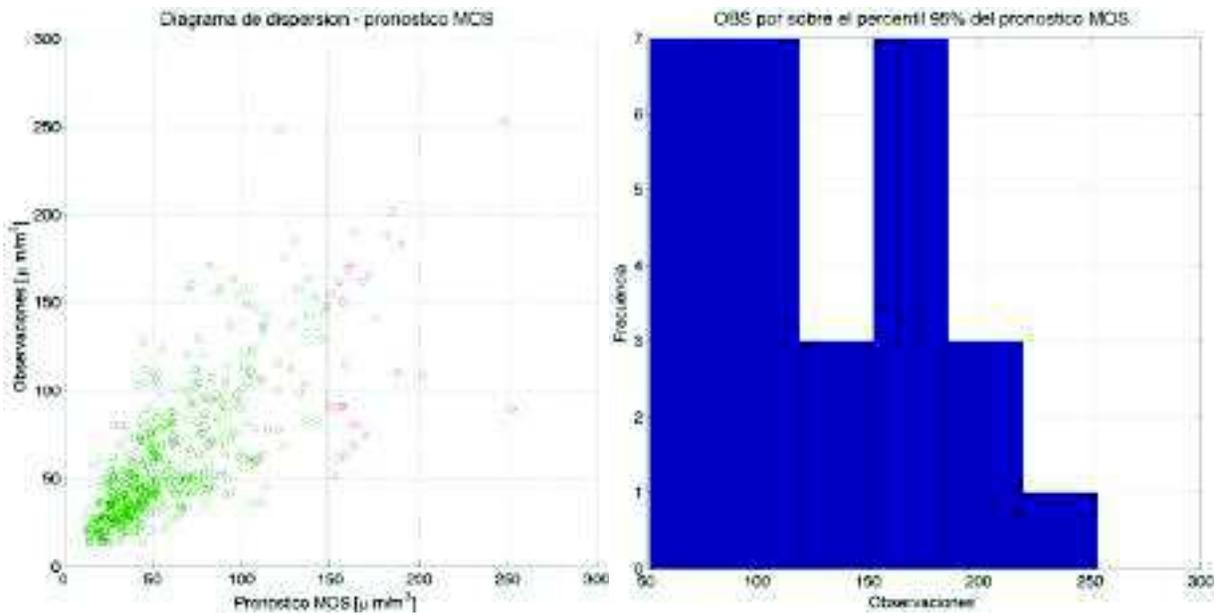


Figura 35:

MP10 - Máximos

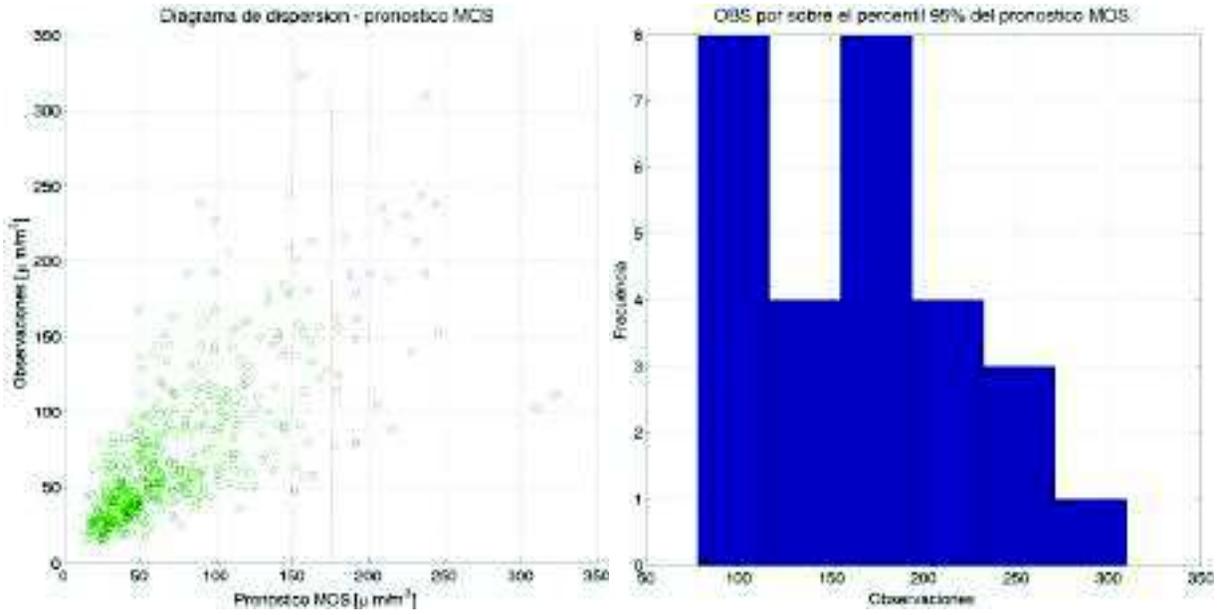


Figura 36:

MP2.5 - Promedios

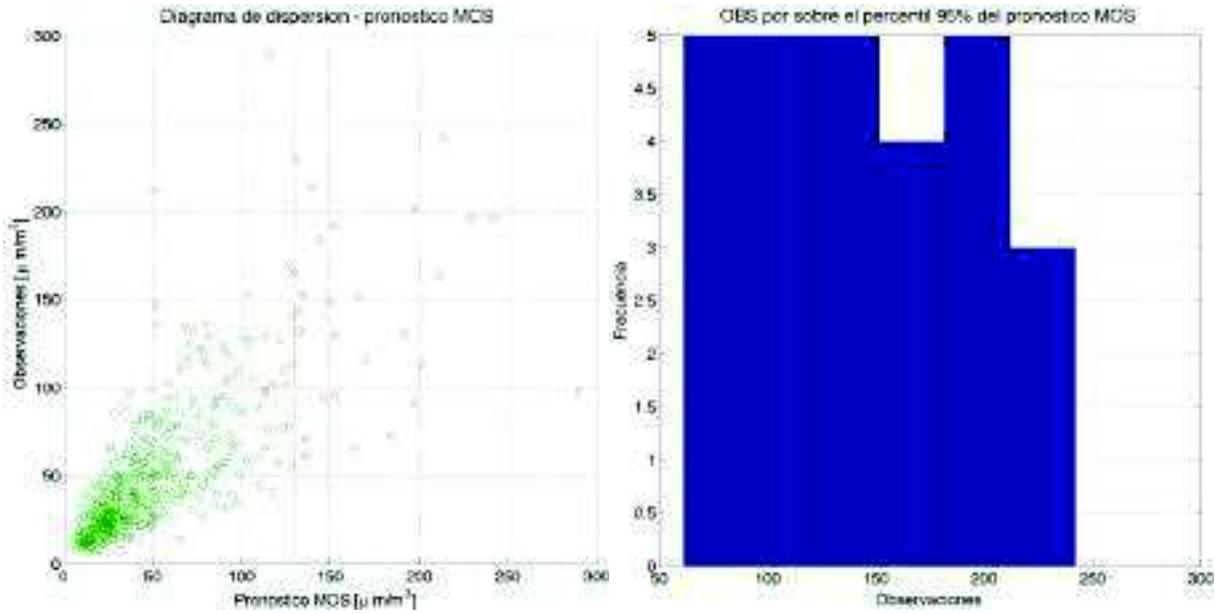


Figura 37:

MP2.5 - Máximos

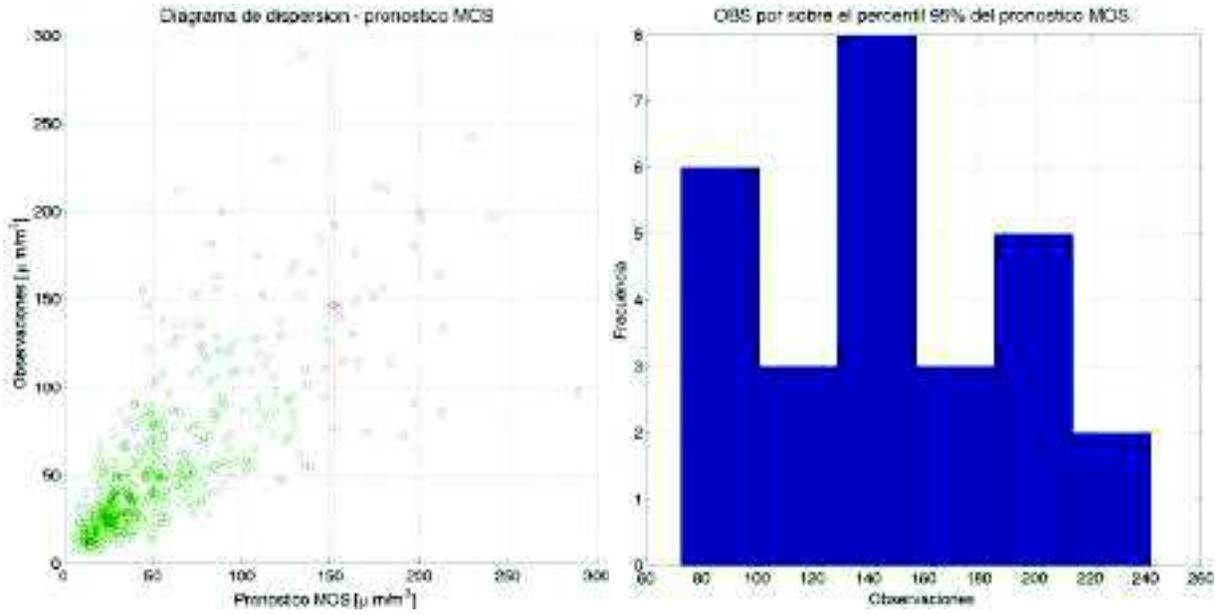


Figura 38:

MP10 - Promedios

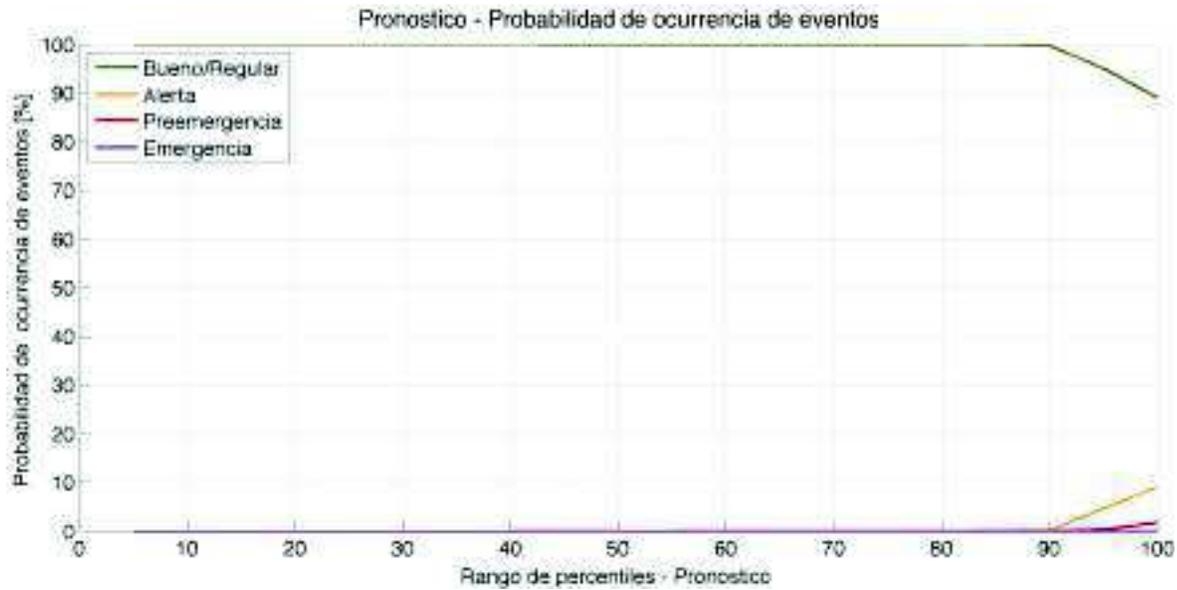


Figura 39:

MP10 - Máximos

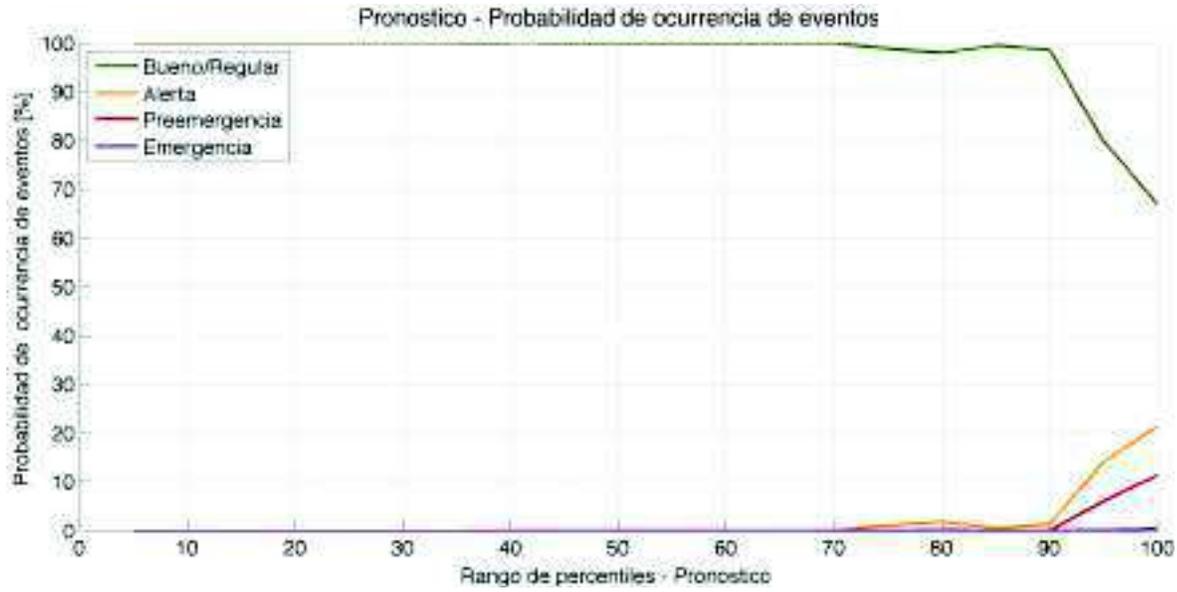


Figura 40:

MP2.5 - Promedios

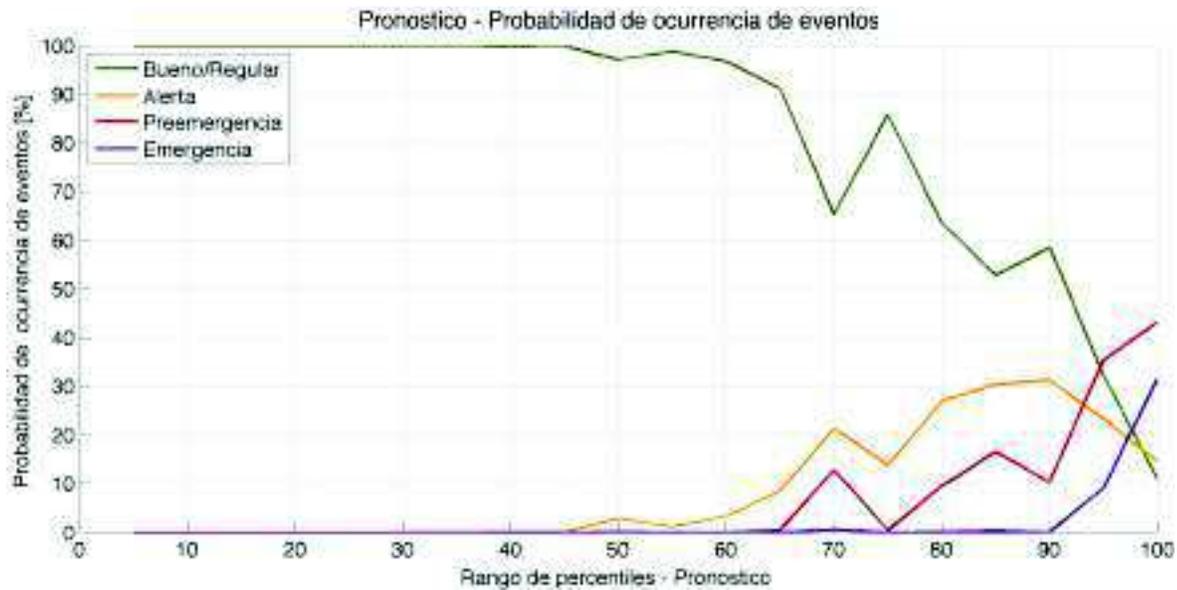


Figura 41:

MP2.5 - Máximos

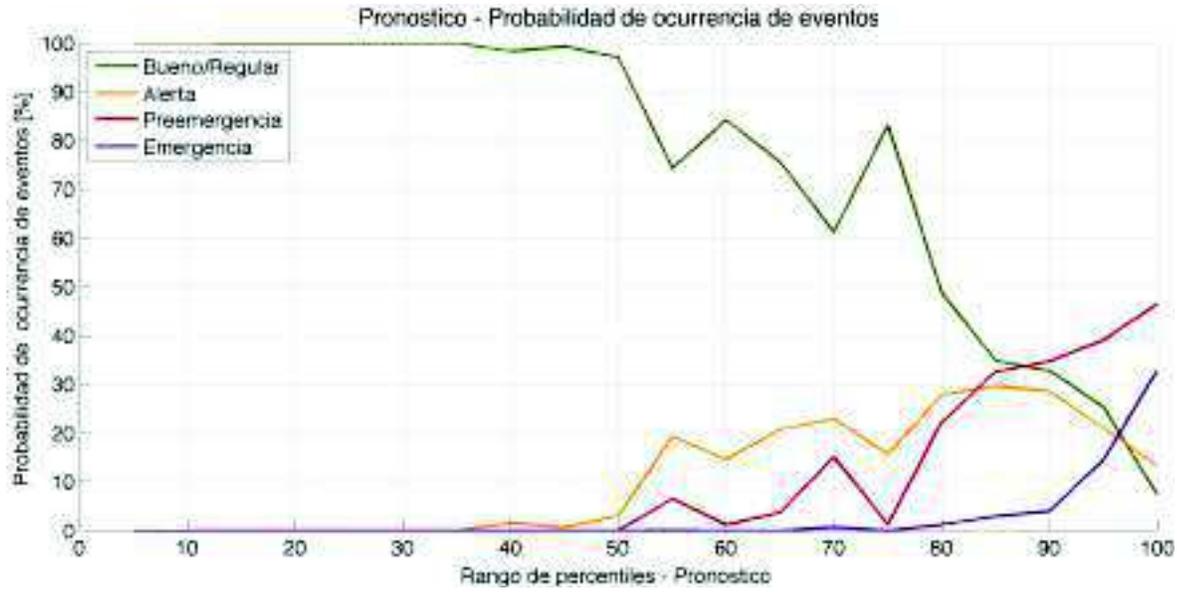


Figura 42:

9.7.6. Concepción

MP10 - Promedios

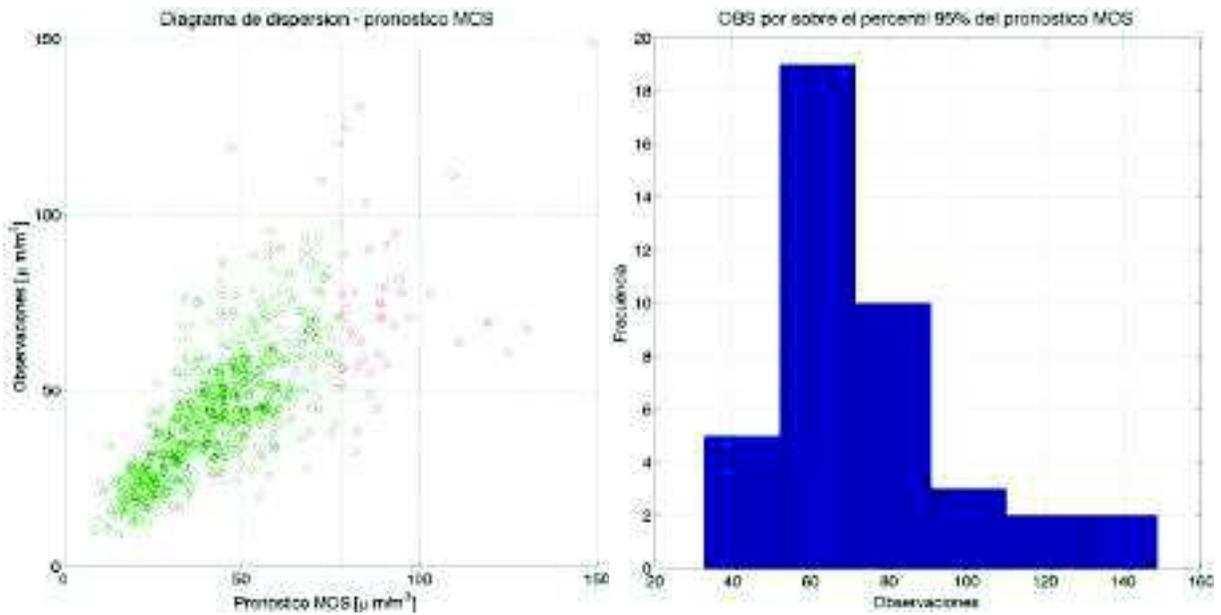


Figura 43:

MP10 - Máximos

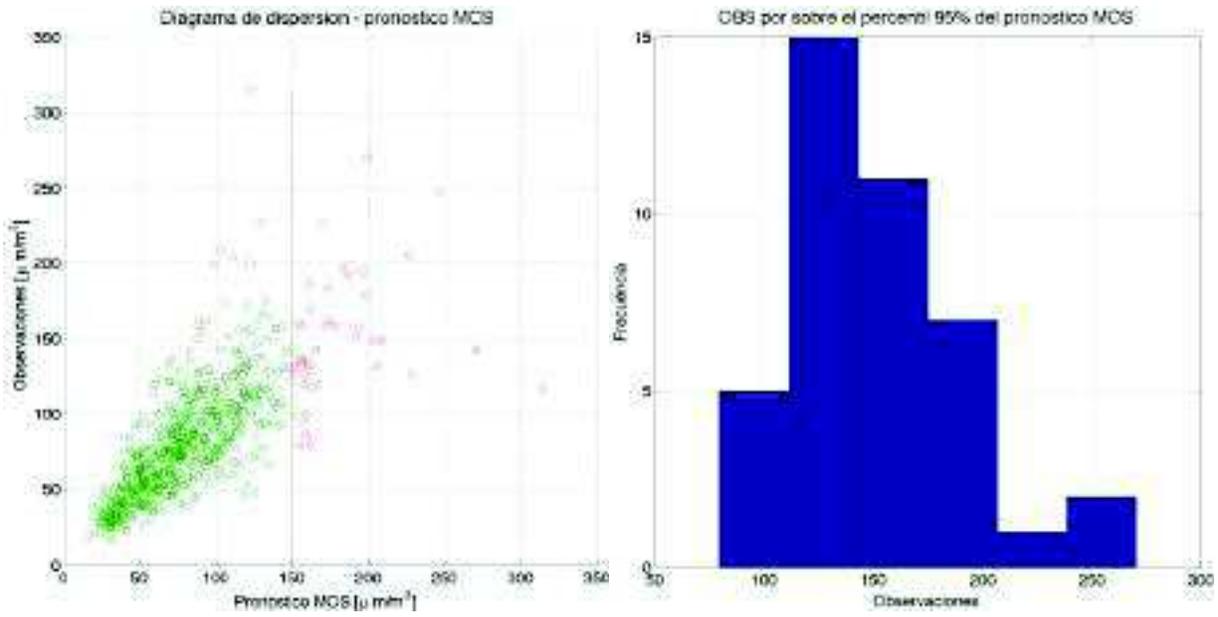


Figura 44:

MP2.5

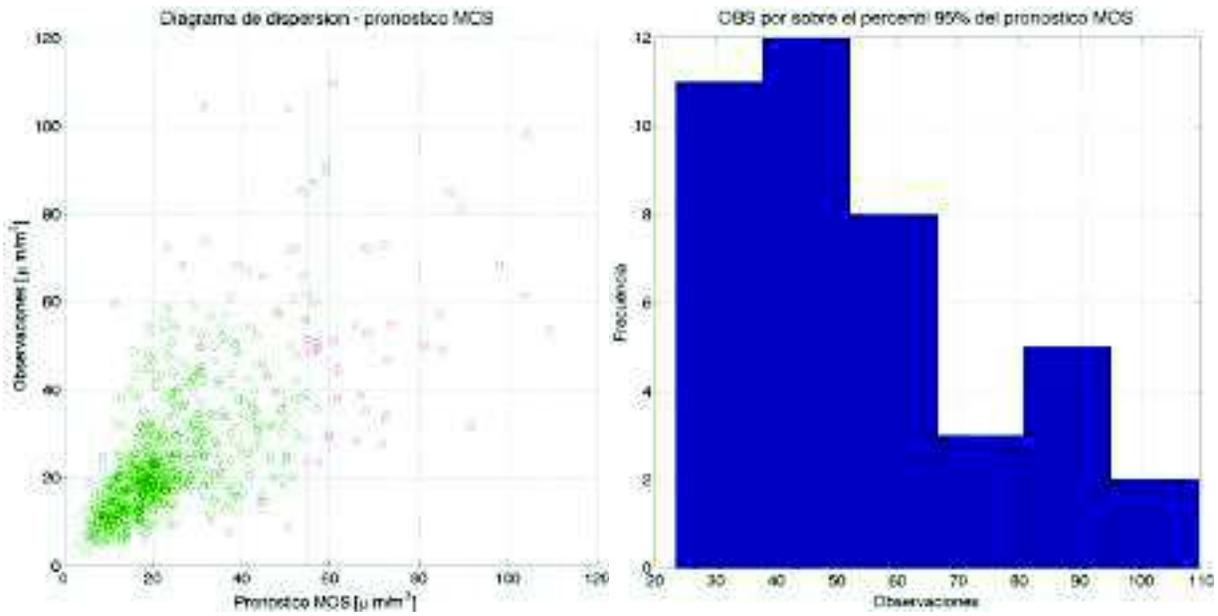


Figura 45:

MP10 - Máximos

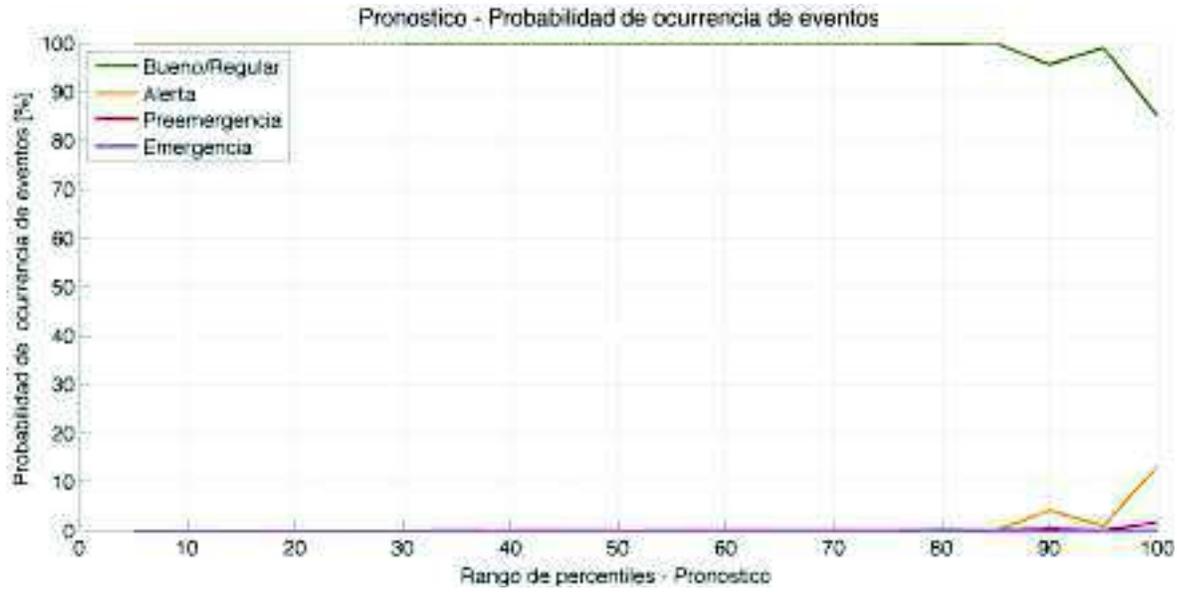


Figura 46:

MP2.5

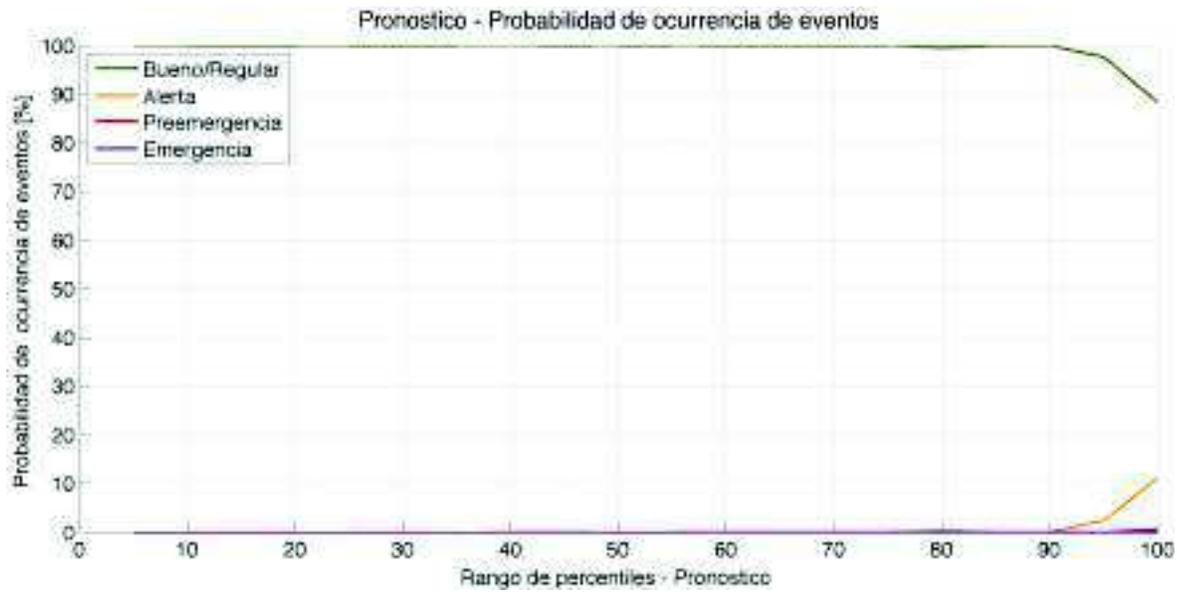


Figura 47:

9.7.7. Coronel - Lota

MP10 - Promedios

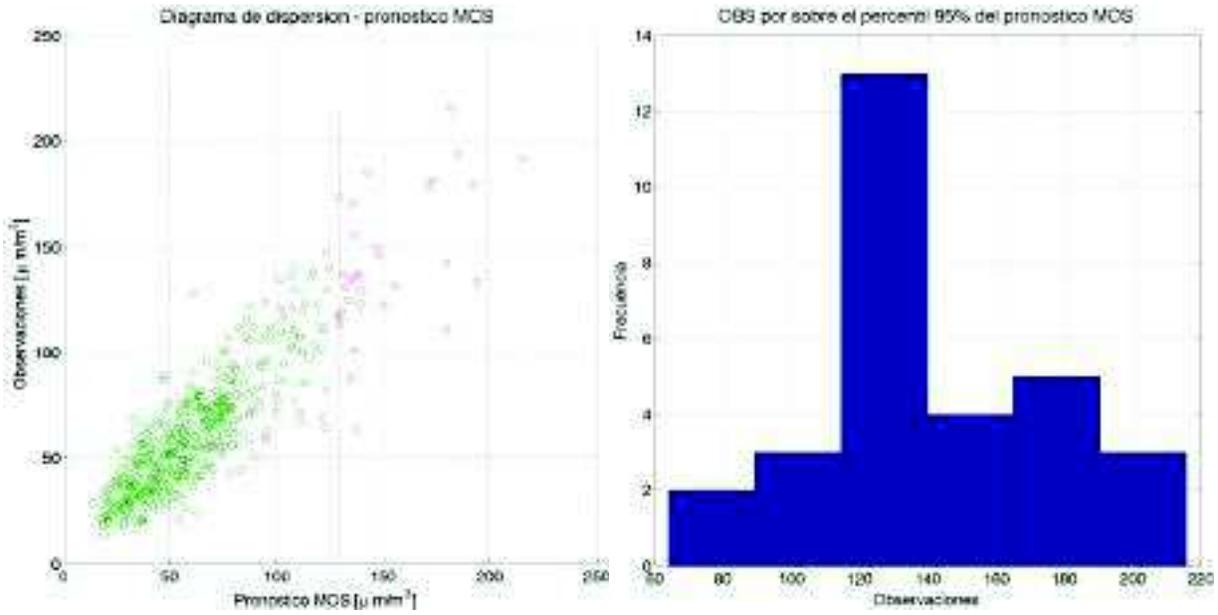


Figura 48:

MP10 - Máximos

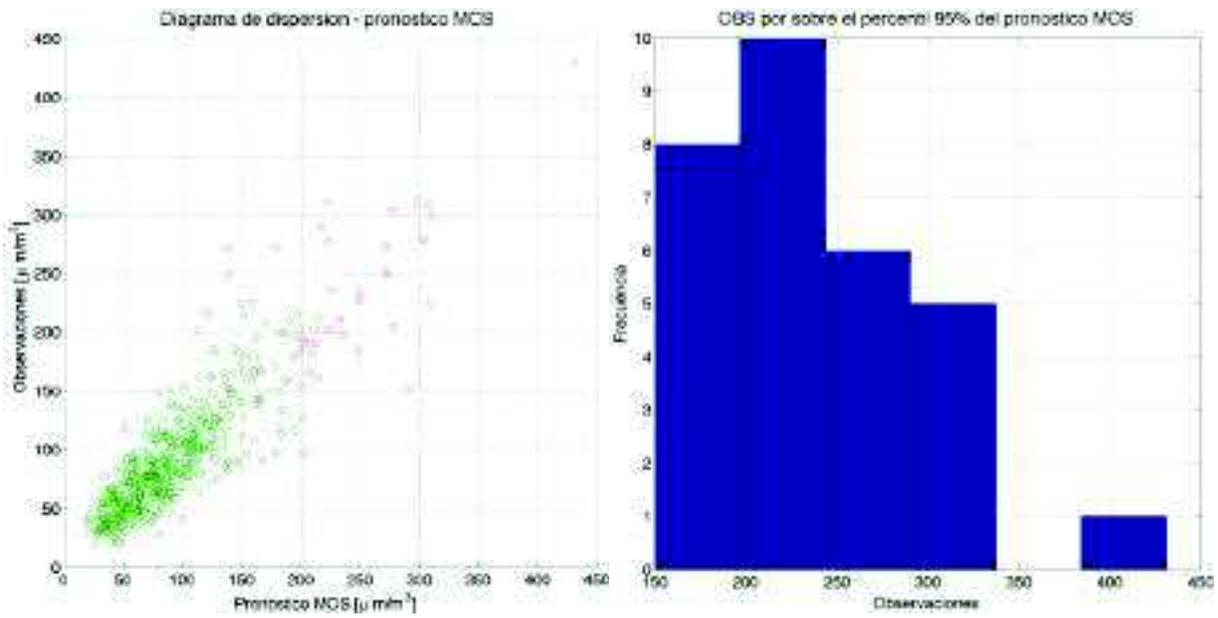


Figura 49:

MP2.5

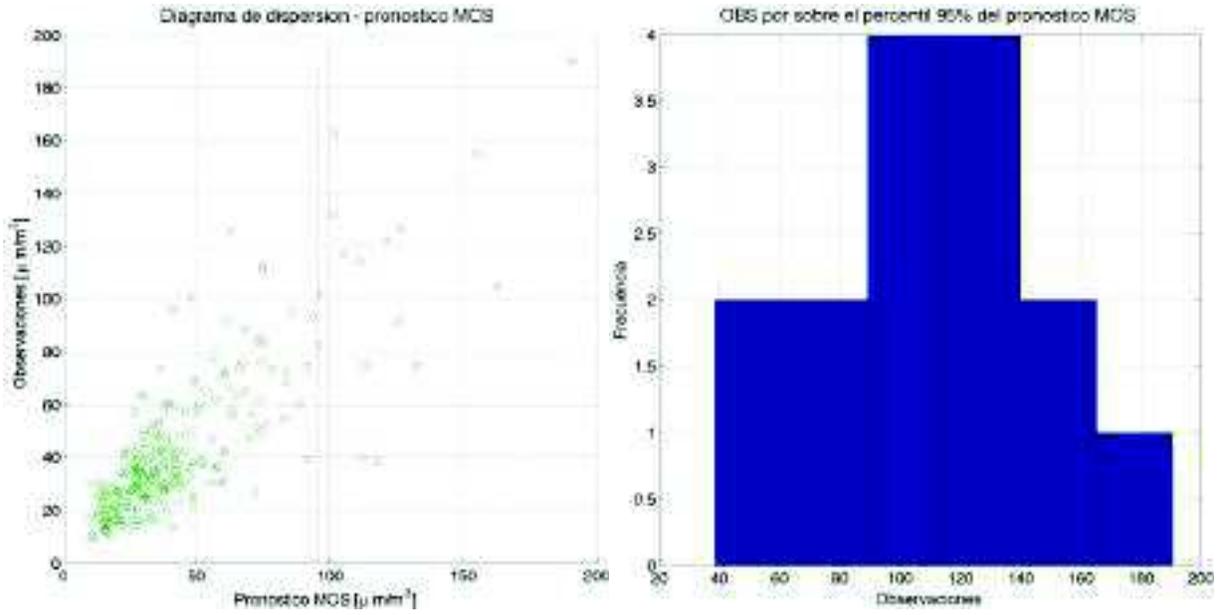


Figura 50:

MP10 - Promedios

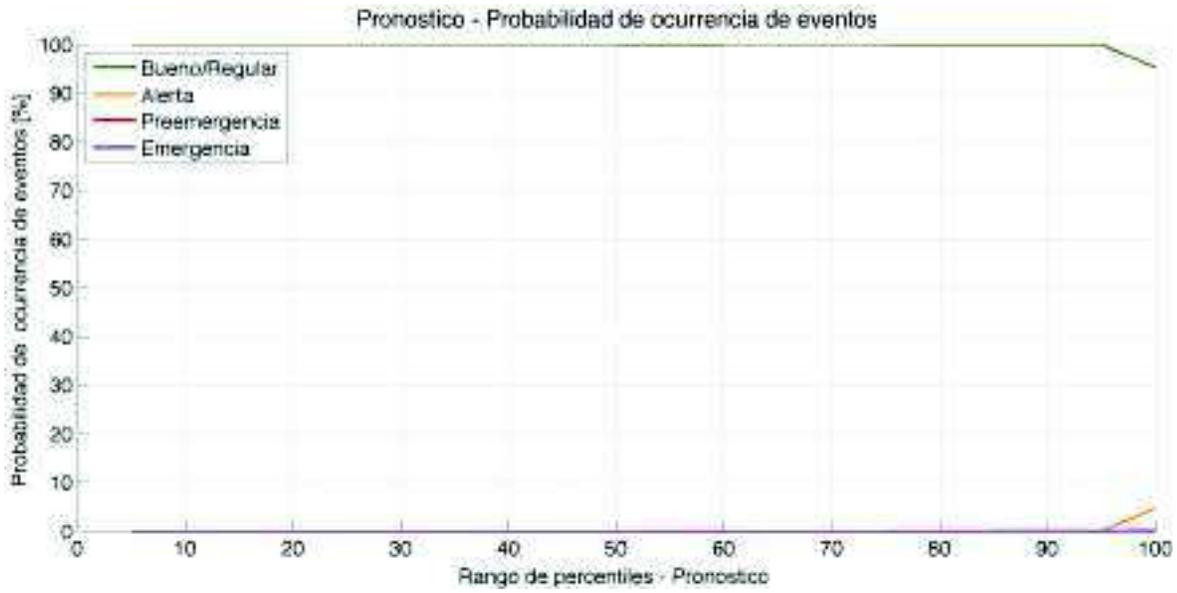


Figura 51:

MP10 - Máximos

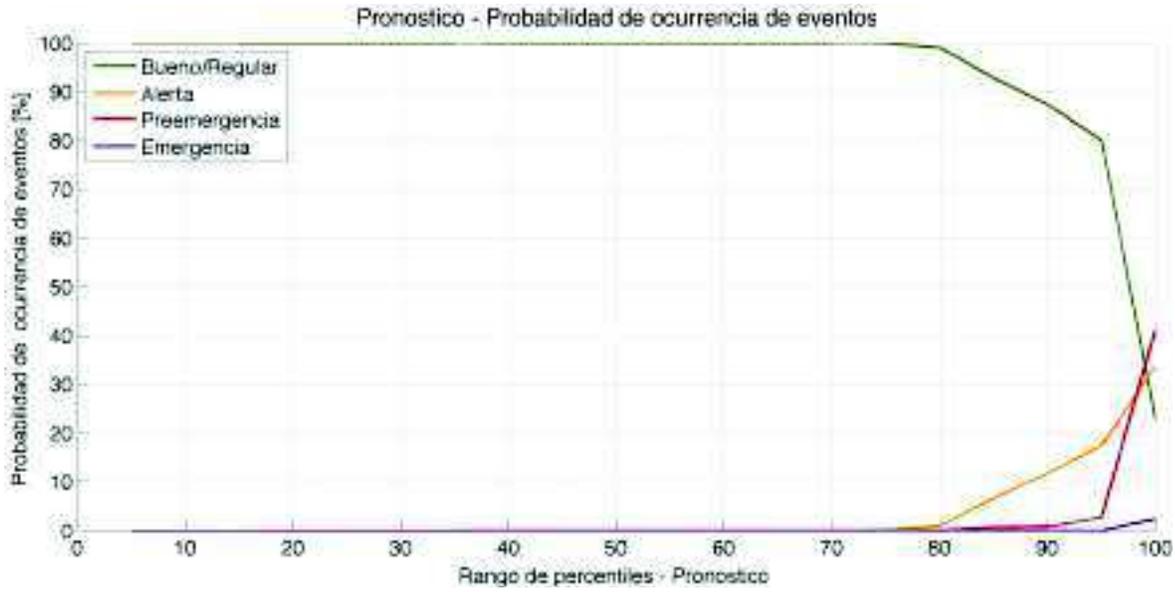


Figura 52:

MP2.5

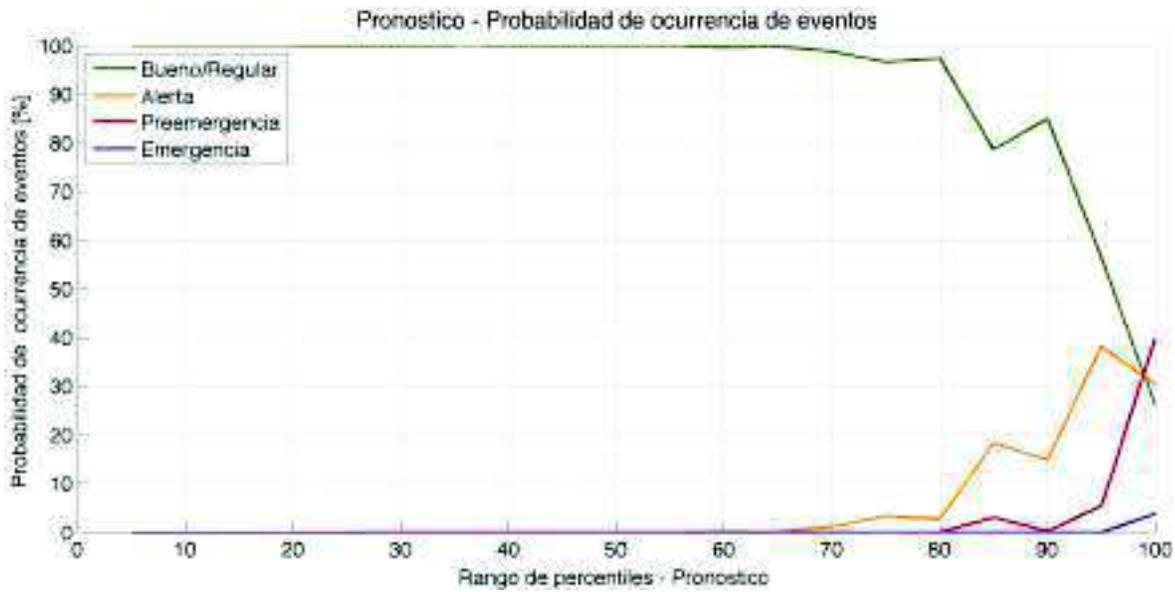


Figura 53:

9.7.8. Los Ángeles

MP10 - Promedios

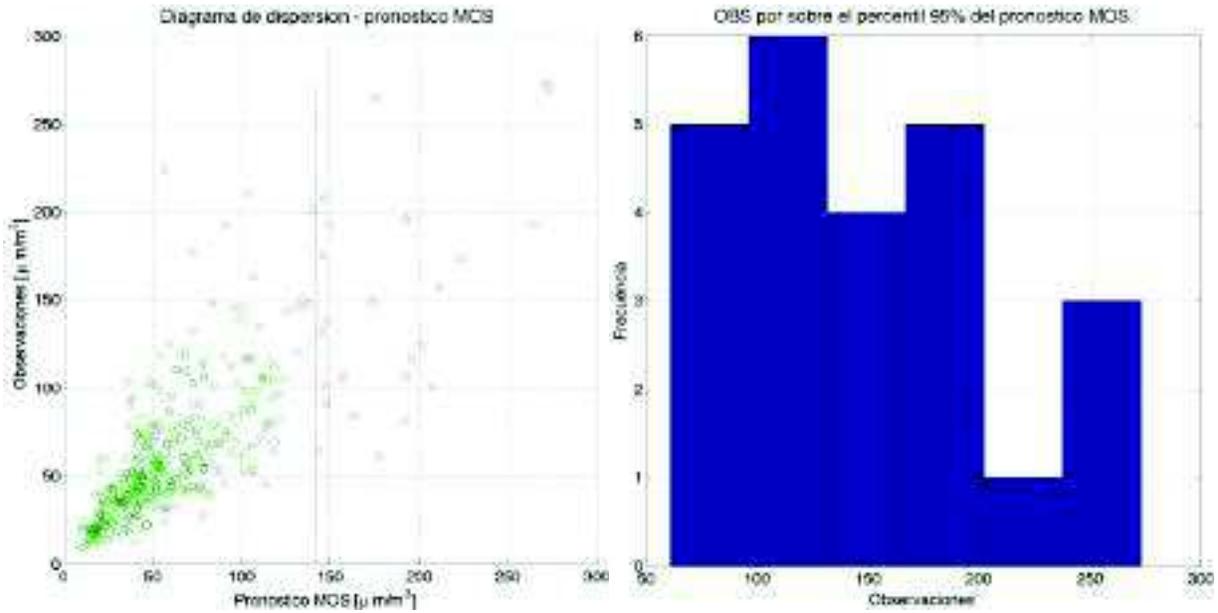


Figura 54:

MP10 - Máximos

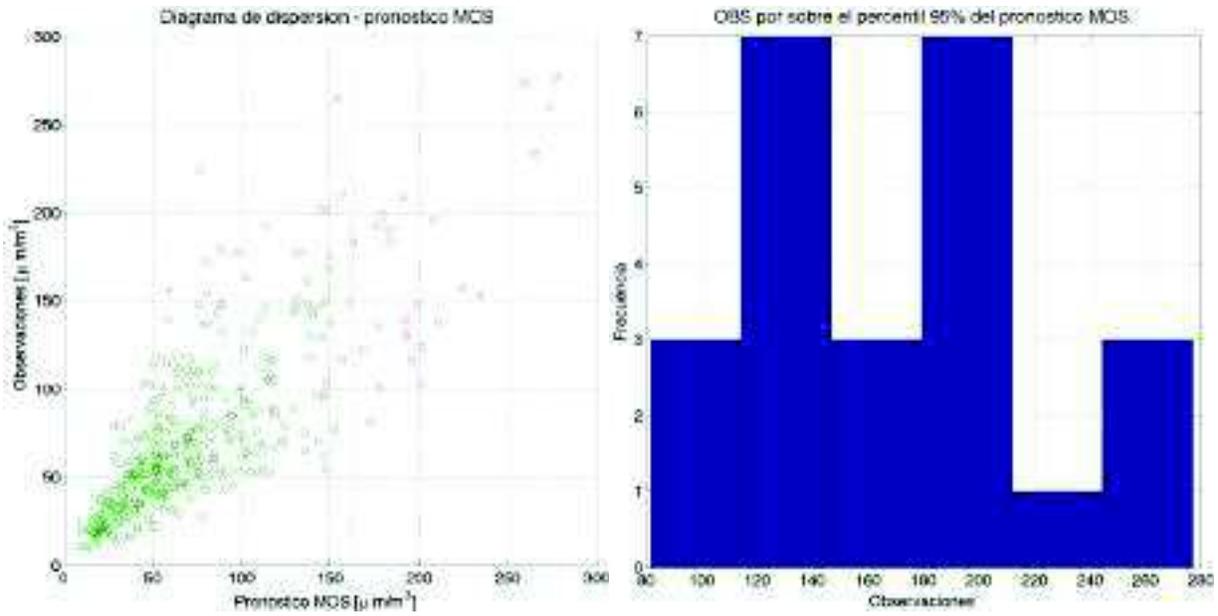


Figura 55:

MP2.5

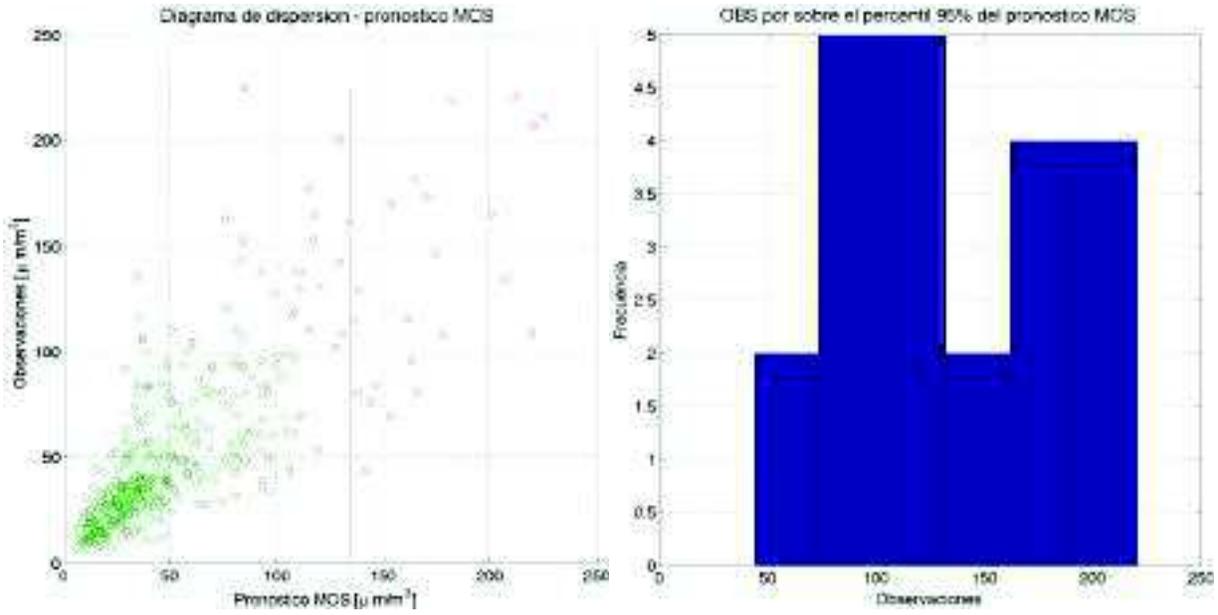


Figura 56:

MP10 - Promedios

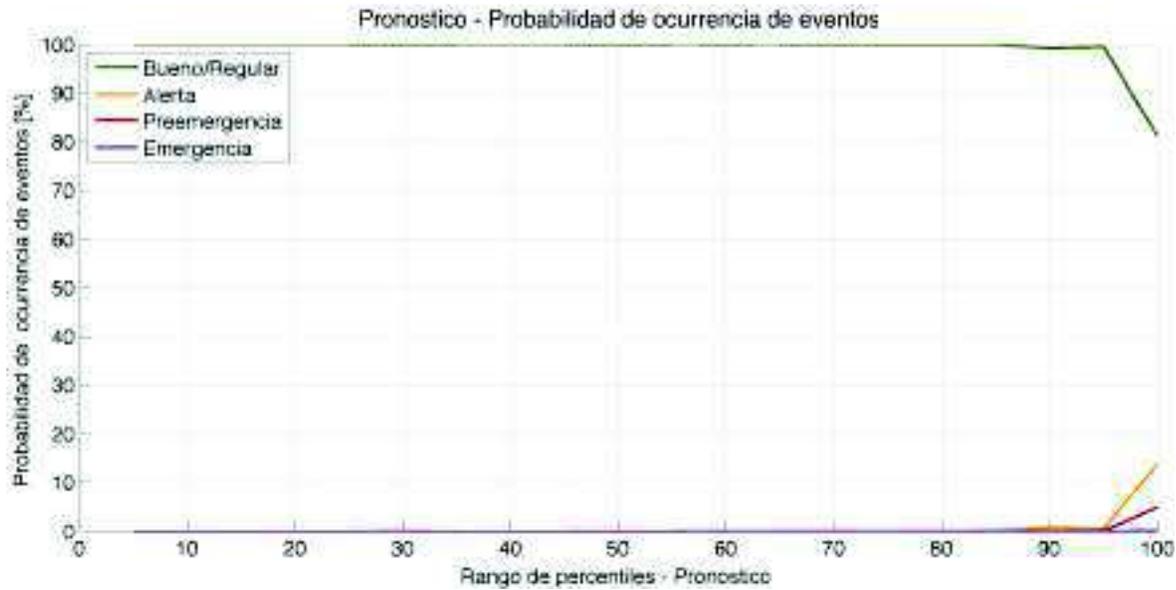


Figura 57:

MP10 - Máximos

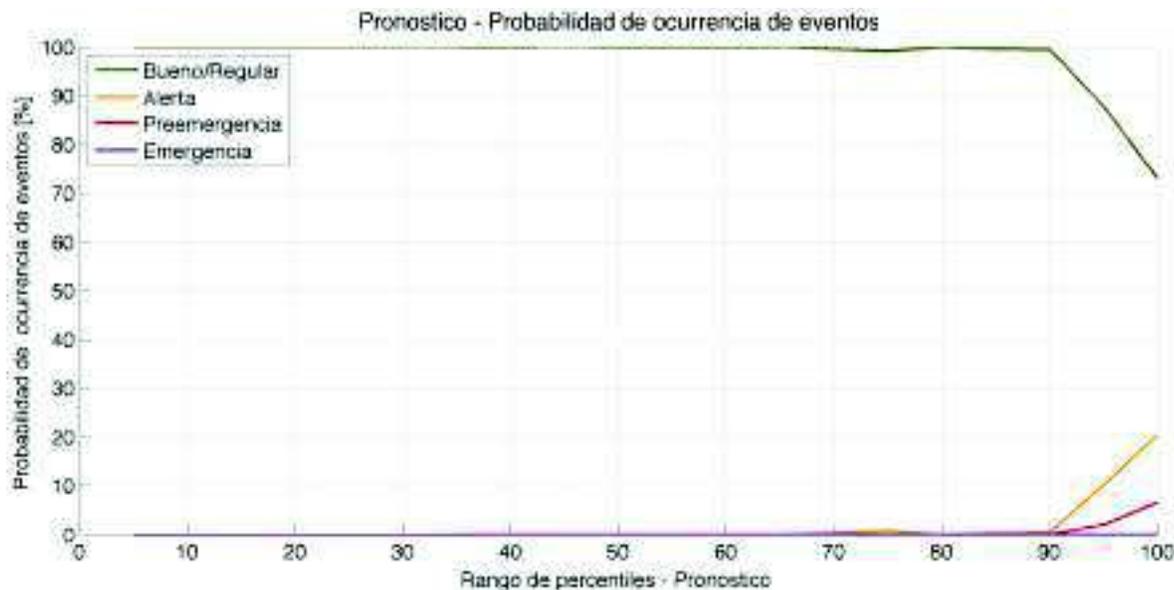


Figura 58:

MP2.5

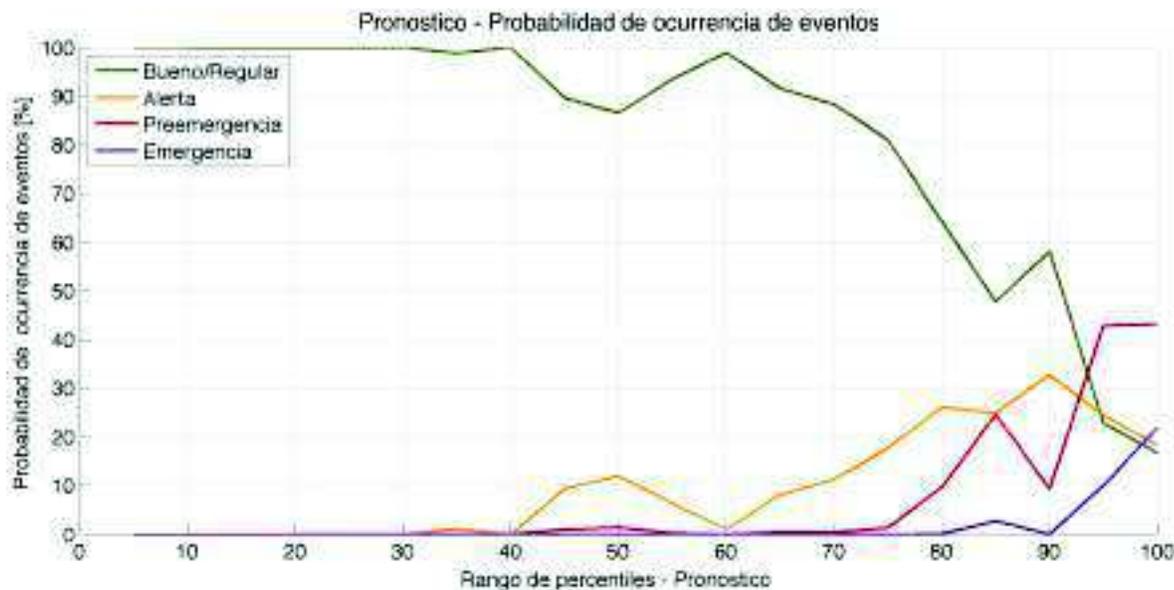


Figura 59:

10. Implementación de técnicas de pronóstico

Como se ha descrito en la sección anterior, para la determinación de la pronosticabilidad de las variables meteorológicas y de calidad del aire se ha utilizado la técnica estadística de pronóstico meteorológico MOS (Model Output Statistics) que combina el pronóstico determinístico GFS (Global Forecast System).

A continuación se describen las principales fortalezas y debilidades del método:

- Fortalezas: Dentro de las fortalezas que presenta el método MOS se cuentan la robustez de sus resultados, la reproducibilidad del método y su capacidad de cuantificar la incertidumbre asociada a distintas situaciones de pronóstico (a diferencia de los modelos de pronóstico numéricos, los cuales son determinísticos). A su vez, es sencillo de implementar y no requiere una gran infraestructura computacional, de modo que también resulta ser un método de bajo costo monetario.
- Debilidades: Entre las debilidades del método se cuentan su falta de cobertura espacial, es decir, es capaz de generar pronósticos sólo para puntos geográficos específicos y depende de que para dicho punto (digamos una estación) se cuente con observaciones. De todos modos y como se ha visto en la sección anterior, los datos existentes en las distintas estaciones permiten la implementación de un pronóstico para la ciudad en este momento, además, la puesta en marcha de la nueva red meteorológica en apoyo a la gestión ambiental garantizaría una mayor cobertura espacial a futuro de las variables meteorológicas y con ello un mejor pronóstico.

Como se ha mencionado arriba, la implementación del método MOS resulta sencilla y de bajo costo, de modo que sería posible contar con un pronóstico meteorológico y de calidad del aire para esta ciudad en un plazo de 3 meses y por un costo anual durante el periodo de gestión de episodios aproximado de \$4.000.000 (CLP).

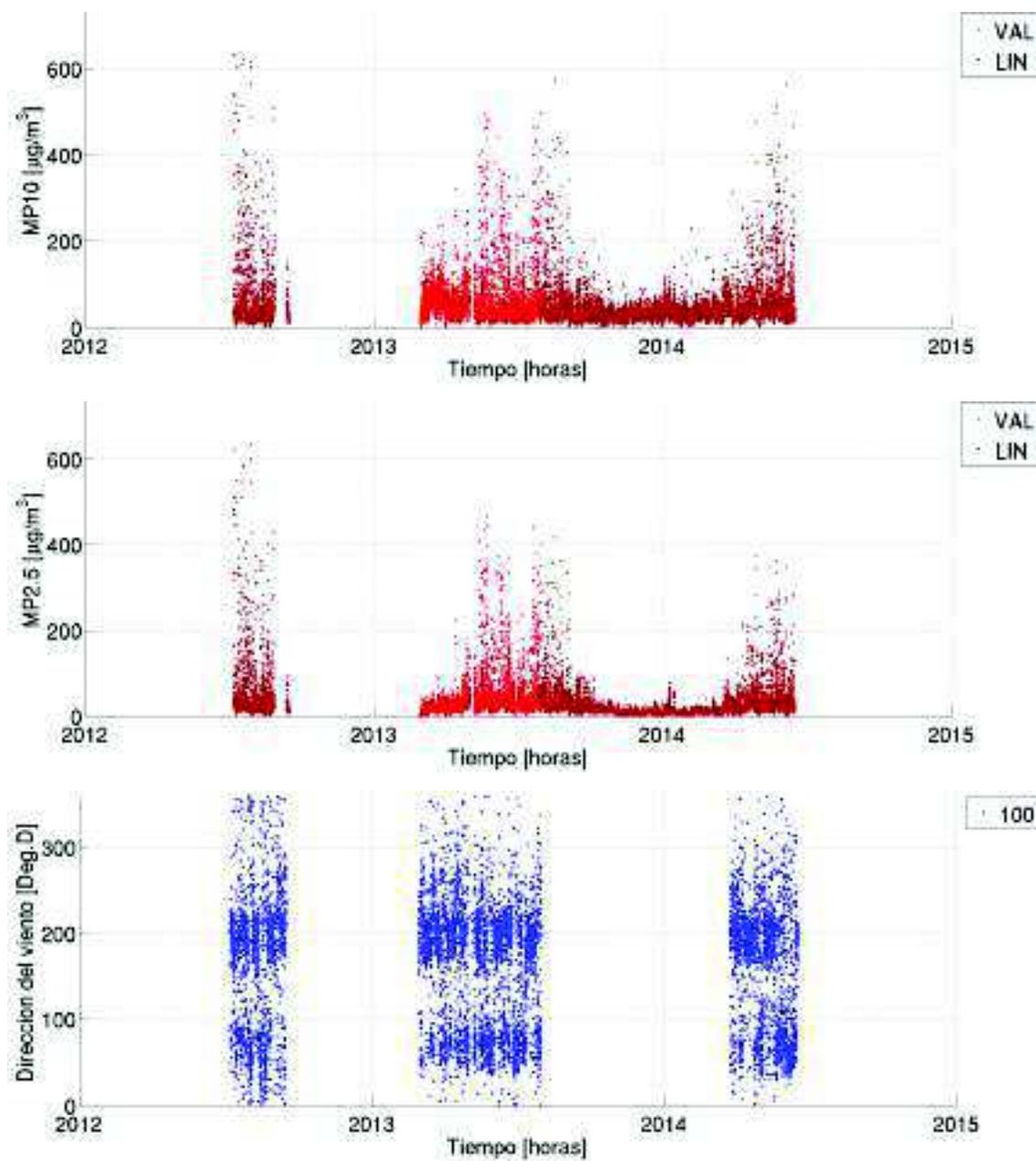
11. Conclusiones

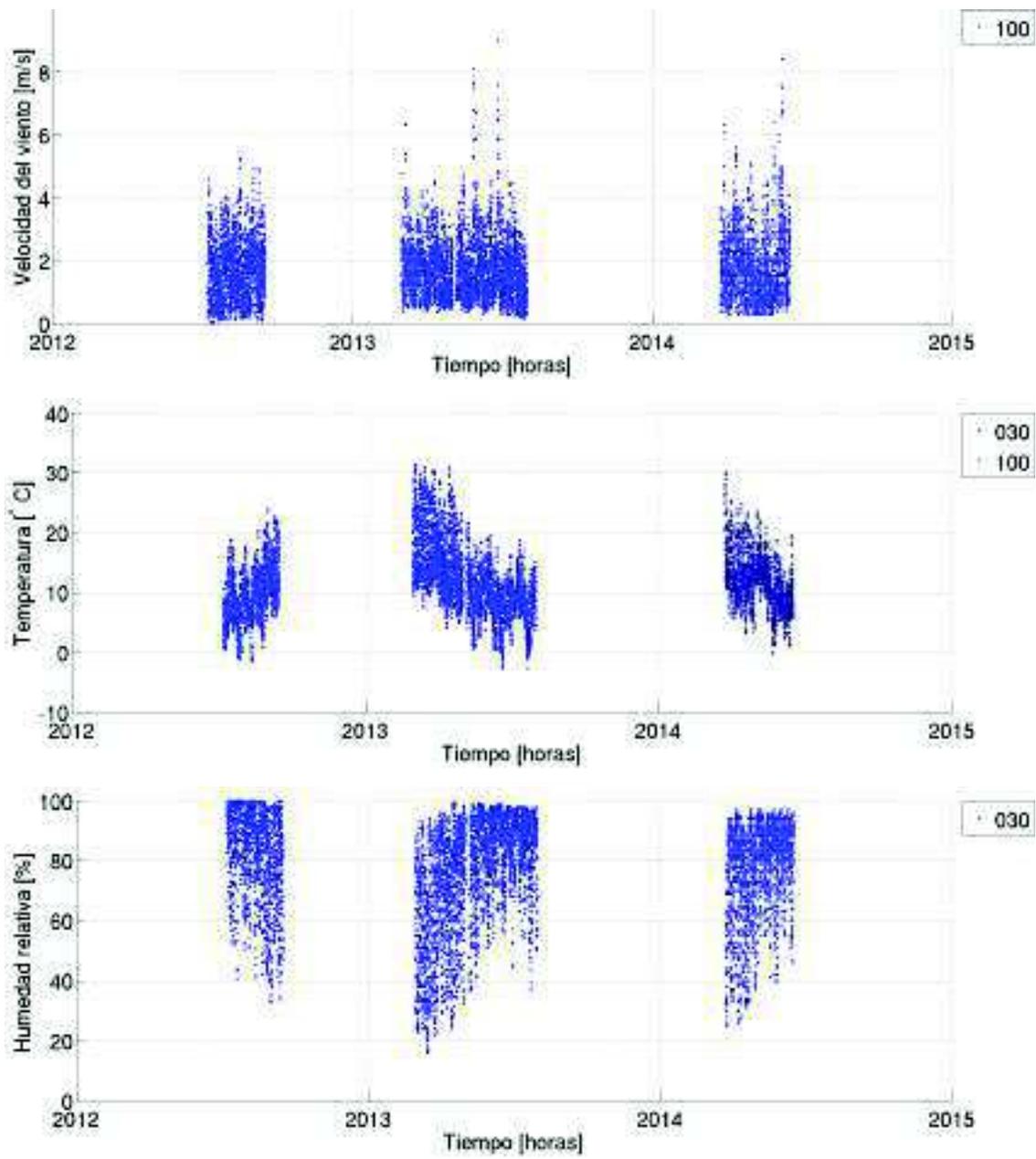
Los resultados de este informe demuestran que el MP10 y el MP2,5 son pronosticables a través del método de pronóstico MOS en la medida que estén disponibles datos históricos en la calidad y cantidad necesaria. Una característica importante de los pronósticos son las incertidumbres asociadas que se deben principalmente a la poca representatividad espacial de las mediciones. A través del uso de promedios o del máximo de los valores diarios de distintas estaciones es posible disminuir las incertidumbres y aumentar, en general, la correlación entre los resultados del pronóstico MOS y las observaciones. Las tablas de contingencia, entregan una idea general del desempeño del pronóstico, pero ocultan información relevante acerca del comportamiento de los resultados de un pronóstico en los límites de los niveles de contaminación establecidos en la legislación vigente. No obstante, es posible el ajuste de una distribución de probabilidad a los resultados del pronóstico respecto de las observaciones por lo que se puede generar una distribución de probabilidad de la ocurrencia de eventos. De esta manera, se permite visualizar la información que queda oculta en las tablas de contingencia, ayudando a tomar mejores decisiones respecto de las medidas a implementar en las distintas situaciones de contaminación ambiental. El método de pronóstico propuesto es de fácil implementación, entrega resultados robustos y es de bajo costo.

12. Anexos

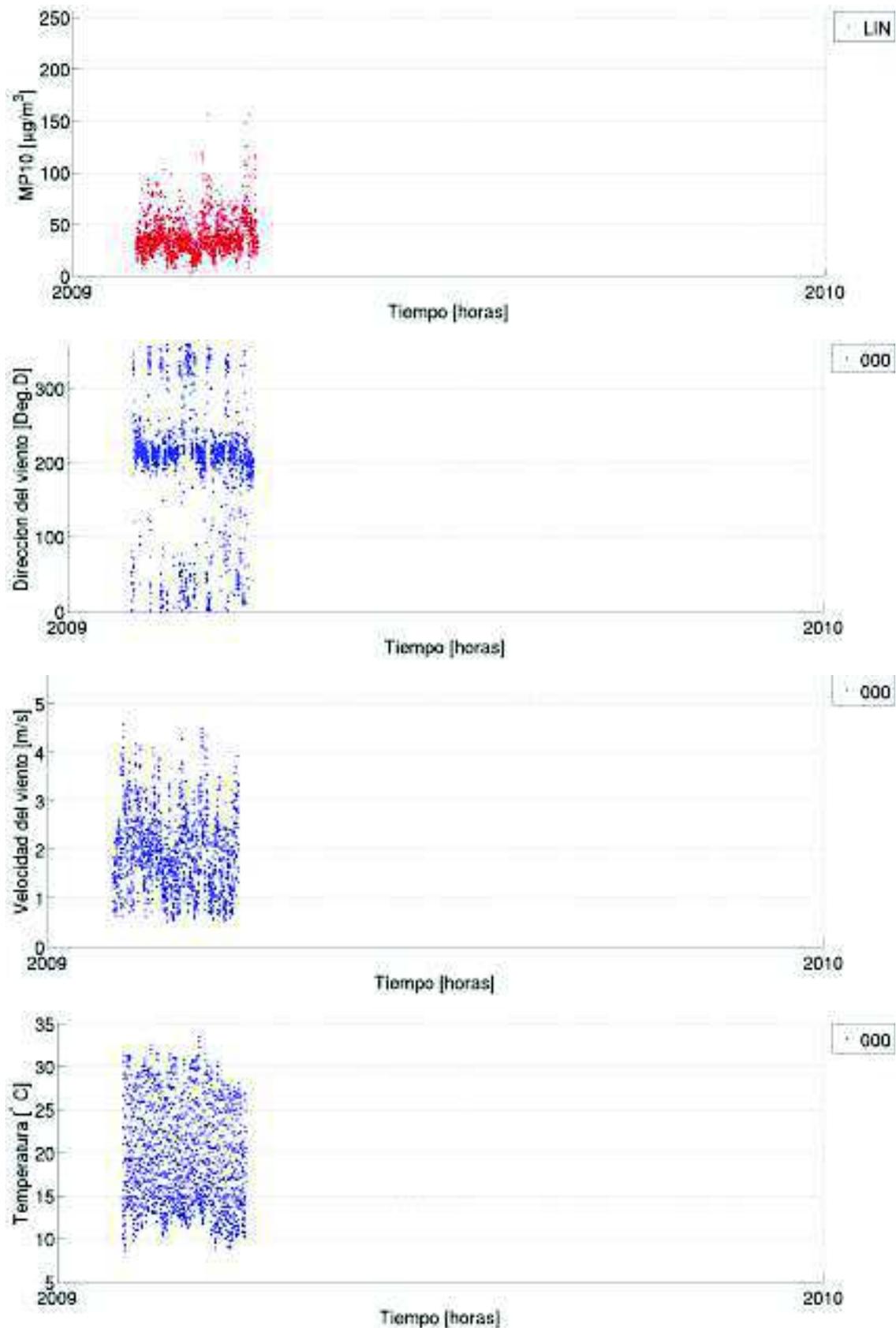
12.1. Series de tiempo

12.1.1. Curicó



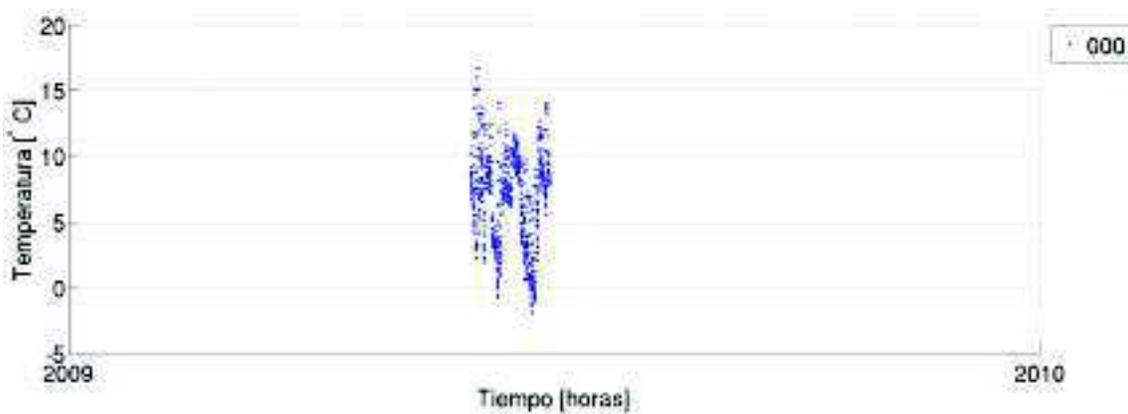
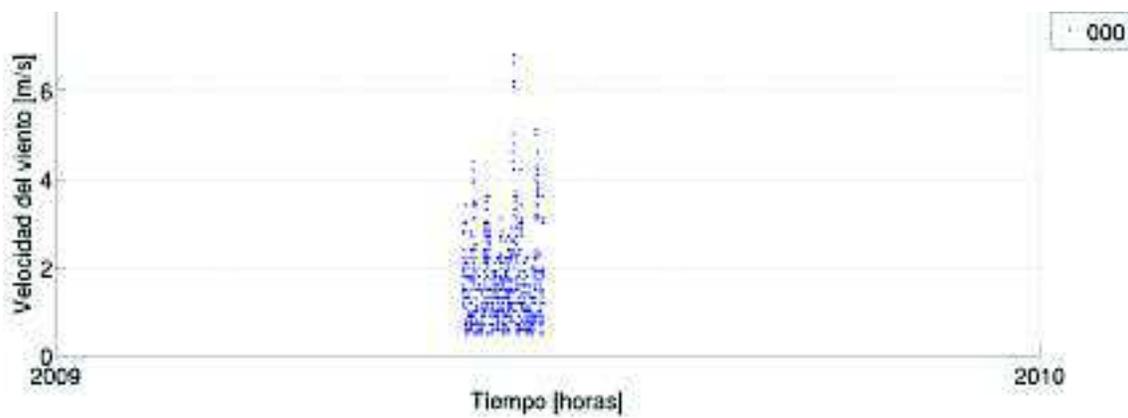
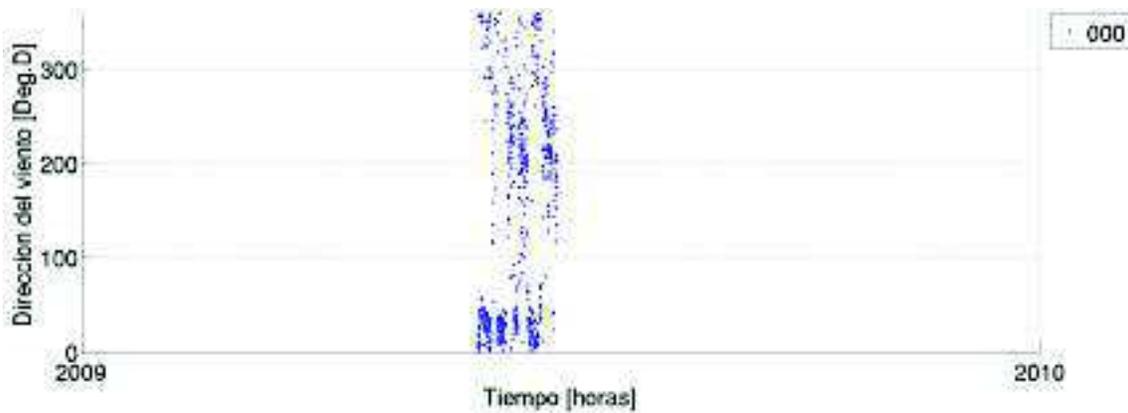


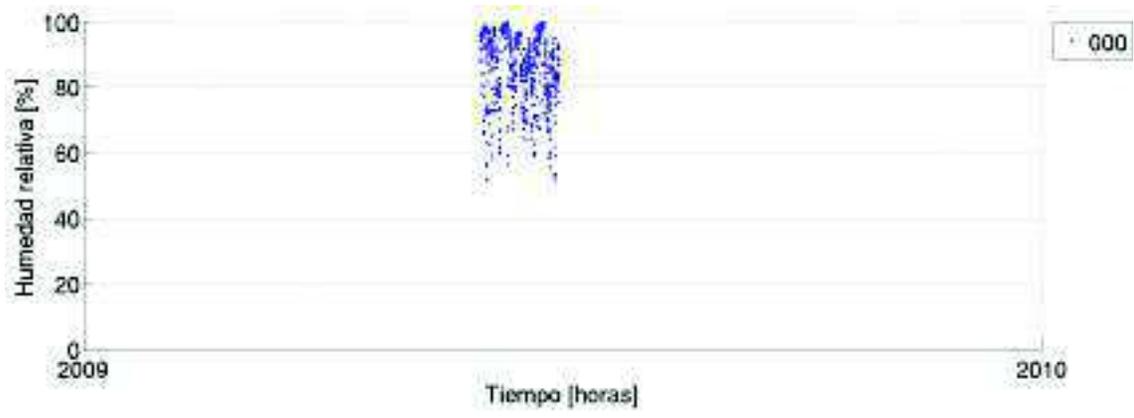
12.1.2. Teno Cementos BIO BIO





12.1.3. Teno Enlasa





12.2. Ciclos estacionales Meteorología

12.2.1. Curicó

