

EPISODIOS DE CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO EN CURICÓ Y SU RELACIÓN CON VARIABLES METEOROLÓGICAS

JACQUELINE HIDALGO P.

Contenidos

I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo General.....	3
2.2 Objetivos Específicos.....	3
III. ANTECEDENTES GENERALES	4
3.1 Contaminación Atmosférica	4
3.2 Material Particulado MP10 y MP2.5	5
3.3 Norma Vigente en Chile.....	8
3.4 Variables Meteorológicas y su influencia en episodios de contaminación por material particulado	10
3.5 Aspectos topográficos y climáticos de la región del Maule.....	12
3.5.1 Topografía	12
3.5.2 Aspectos climáticos de Curicó	14
IV. DATOS Y METODOLOGÍA	16
4.1 Datos	16
4.1.1 Datos utilizados en la caracterización del comportamiento meteorológico y de concentraciones de MP10 y 2.5.....	16
4.1.2 Datos utilizados en el análisis de clúster	19
4.2 Metodología	19
4.2.1 Caracterización de las variables meteorológicas y de concentraciones en Curicó ..	19
4.2.1 Relación entre las variables meteorológicas y concentraciones de MP10 y 2.5	20
4.2.2 Determinación de eventos extremos	22
4.2.2.1 Extremos de concentraciones de MP10 y 2.5	22
4.2.2.2 Extremos meteorológicos.....	22

4.3 Análisis de patrones sinópticos asociados a eventos de altas concentraciones de MP10 y 2.5 en Curicó	23
V. ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	26
5.1 Caracterización meteorológica y de concentraciones en la ciudad de Curicó	26
5.1.1 Temperatura	26
5.1.2 Razón de Mezcla	27
5.1.3 Intensidad del Viento.....	29
5.1.4 Dirección del Viento	30
5.2 Comportamiento diario de las concentraciones de MP10 y 2.5 en Curicó.....	32
5.3 Relación entre las variables meteorológicas y concentraciones de MP10 y 2.5.....	37
5.4 Análisis de patrones sinópticos asociados a eventos de altas concentraciones de MP10 y MP2.5 en Curicó: Análisis de Conglomerados	43
VI. CONCLUSIONES.....	47
VI. BIBLIOGRAFÍA	49
VII. ANEXO.....	51
7.1 Relación entre las variables meteorológicas y concentraciones de MP10 y MP2.5....	51
7.1.1 Variables meteorológicas y MP10	51
7.1.1 Variables meteorológicas y MP25	61

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación de la provincia de Curicó. Fuente: INE 2007.....	14
Figura 2. Cartas de presión a nivel medio del mar para la época estival (a) e invernala letra A, señalada en color rojo, indica el centro del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur.....	15
Figura 3. Mapa de Chile (a). Ubicación de la estación General Freire (meteorológica) y Curicó (calidad del aire) (b).....	17
Figura 4. Esquema que representa la distribución de frecuencia acumulada de anomalías tanto para los eventos extremos de variables meteorológicas y de concentraciones.....	23
Figura 5. Ilustración de un dendograma o diagrama del árbol jerárquico, para cada conglomerado en (a) y distancia entre los grupos fusionados en (b).....	25
Figura 6. Ciclos diarios medios de temperatura del aire en la estación General Freire para los meses de abril a septiembre de los años 2013 al 2015 (a-f). Las barras adjuntas a la curva indican la desviación estándar correspondiente a cada hora.....	27
Figura 7. Ciclos diarios medios de la razón de mezcla en la estación General Freire para los meses de abril a septiembre de los años 2013 al 2015 (a-f). Las barras adjuntas a la curva indican la desviación estándar correspondiente a cada hora.....	28
Figura 8. Ciclos diarios medios de la intensidad del viento en la estación General Freire para los meses de abril a septiembre de los años 2013 al 2015 (a-f). Las barras adjuntas a la curva indican la desviación estándar correspondiente a cada hora.....	29
Figura 9. Rosa de los vientos que representan la direcciones predominantes del viento en la estación General Freire, para el período nocturno (panel izquierdo), mañana (panel central) y tarde (panel derecho) para los meses de abril a septiembre de los años 2013,2014 y 2015 (a-f).....	31
Figura 10. Ciclos diarios medios de concentraciones de MP10 en la estación Curicó para los meses de abril a septiembre de los años 2013 al 2015 (a-f). Las barras adjuntas a la curva indican la desviación estándar correspondiente a cada hora.....	33

Figura 11. Ciclos diarios medios de concentraciones de MP2.5 en la estación Curicó para los meses de abril a septiembre de los años 2013 al 2015 (a-f). Las barras adjuntas a la curva indican la desviación estándar correspondiente a cada hora.....	34
Figura 12. Ciclo medio diario de las concentraciones de MP10 (panel superior) y de MP2.5 (panel inferior), la línea roja representa el ciclo y en verde el rango de percentiles 5% y 95% respectivamente.....	35
Figura 13. Ciclo estacional horario de las concentraciones de MP10 (panel superior) y de MP2.5 (panel inferior)	36
Figura 14. Ciclo diario de emisiones residenciales por estación del año, expresadas como factor de emisión horario, la hora está en formato local	37
Figura 15. Dispersiones entre las anomalías de concentraciones de MP10 y variables meteorológicas (a – f), para el mes de julio correspondiente al período completo (panel izquierdo) y nocturno (panel derecho) para los años 2013 al 2015.	40
Figura 16. Dispersiones entre las anomalías de concentraciones de MP2.5 y variables meteorológicas (a – f), para el mes de junio correspondiente al período completo (panel izquierdo) y nocturno (panel derecho) para los años 2013 al 2015.	42
Figura 17. Compuestos de clústeres para los campos de presión a nivel medio del mar (hPa, líneas continuas azules) y espesores de 1000-500 (m.g.p, líneas segmentadas en verde) correspondiente a episodios de contaminación con su respectivo porcentaje que representa cada compuesto. En punto rojo da cuenta de la ubicación de la zona de estudio.....	45
Figura 18. Compuestos de clústeres para el campo de altura geopotencial en 500 hPa, (líneas continuas verdes cada 60 m.g.p) correspondiente a episodios de contaminación con su respectivo porcentaje que representa cada compuesto. En punto rojo da cuenta de la ubicación de la zona de estudio.	46
Figura 19. Dispersiones entre las anomalías de concentraciones de MP10 y variables meteorológicas (a – f), para el mes de abril correspondiente al período completo (panel izquierdo) y nocturno (panel derecho) para los años 2013 al 2015.	52

- Figura 20.** Dispersiones entre las anomalías de concentraciones de MP10 y variables meteorológicas (a – f), para el mes de mayo correspondiente al período completo (panel izquierdo) y nocturno (panel derecho) para los años 2013 al 2015. 54
- Figura 21.** Dispersiones entre las anomalías de concentraciones de MP10 y variables meteorológicas (a – f), para el mes de junio correspondiente al período completo (panel izquierdo) y nocturno (panel derecho) para los años 2013 al 2015. 56
- Figura 22.** Dispersiones entre las anomalías de concentraciones de MP10 y variables meteorológicas (a – f), para el mes de agosto correspondiente al período completo (panel izquierdo) y nocturno (panel derecho) para los años 2013 al 2015. 58
- Figura 23.** Dispersiones entre las anomalías de concentraciones de MP10 y variables meteorológicas (a – f), para el mes de septiembre correspondiente al período completo (panel izquierdo) y nocturno (panel derecho) para los años 2013 al 2015. 60
- Figura 24.** Dispersiones entre las anomalías de concentraciones de MP2.5 y variables meteorológicas (a – f), para el mes de abril correspondiente al período completo (panel izquierdo) y nocturno (panel derecho) para los años 2013 al 2015. 62
- Figura 25.** Dispersiones entre las anomalías de concentraciones de MP2.5 y variables meteorológicas (a – f), para el mes de mayo correspondiente al período completo (panel izquierdo) y nocturno (panel derecho) para los años 2013 al 2015. 64
- Figura 26.** Dispersiones entre las anomalías de concentraciones de MP2.5 y variables meteorológicas (a – f), para el mes de junio correspondiente al período completo (panel izquierdo) y nocturno (panel derecho) para los años 2013 al 2015. 66
- Figura 27.** Dispersiones entre las anomalías de concentraciones de MP2.5 y variables meteorológicas (a – f), para el mes de agosto correspondiente al período completo (panel izquierdo) y nocturno (panel derecho) para los años 2013 al 2015. 68
- Figura 28.** Dispersiones entre las anomalías de concentraciones de MP2.5 y variables meteorológicas (a – f), para el mes de septiembre correspondiente al período completo (panel izquierdo) y nocturno (panel derecho) para los años 2013 al 2015. 70

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de concentraciones de material particulado (MP) diarias y anuales, registradas en la Estación de Curicó. Fuente: Ministerio del medio ambiente 2015.....	2
Tabla 2. Niveles que generan situaciones de emergencia ambiental por MP10, Fuente: D.S. N°20.....	9
Tabla 3. Niveles que generan situaciones de emergencia ambiental por MP2.5, Fuente: D.S.N°12.....	10
Tabla 4. Descripción de las variables utilizadas.....	16
Tabla 5. Períodos del día utilizados para la construcción de las rosas de los vientos.....	20
Tabla 6: Valor de correlación (r) obtenido entre anomalías de concentraciones (MP10 y 2.5) y anomalías de variables meteorológicas, para los meses de abril a septiembre de los años 2013 al 2015.	43

I. INTRODUCCIÓN

En Chile, la calidad del aire constituye uno de los temas ambientales que más afecta a la población. Pese a los esfuerzos y a los distintos instrumentos utilizados, el país aún no cumple con los estándares establecidos en las normas de calidad primaria y secundaria vigentes. En este contexto en el año 2010, el Ministerio del Medio Ambiente inició la elaboración e implementación del Programa Aire Limpio, mediante el cual se busca mejorar la calidad del aire en las principales zonas urbanas del país, especialmente en la ciudad de Curicó, ya que desde el año 2012 ha presentado problemas graves de contaminación del aire, debido al alto consumo de leña como combustible residencial, calefactores ineficientes, malas prácticas de operación, etc. Desde hace 2 años atrás ha habido un monitoreo continuo de variables de calidad del aire en la ciudad, indicando altos índices de concentraciones de material particulado (CENMA, 2000), la cual superan significativamente la norma primaria de calidad del aire (tabla 1). Dados estos antecedentes en el año 2015, fue declarada como zona saturada por MP2.5, llevando incluso a la autoridad sanitaria regional a tomar medidas concretas como la prohibición de uso de leña en períodos de mala ventilación como también planes de descontaminación para el período 2014-2018.

Planteado lo anterior, es necesario conocer en el ámbito meteorológico como se relacionan las variables meteorológicas con las concentraciones de material particulado 10 y 2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y además conocer qué tipo de configuración sinóptica está asociada con episodios de mala ventilación en la ciudad de Curicó. Dados estos alcances, a continuación se señalan los aspectos más relevantes que contiene esta investigación. En el siguiente capítulo se detalla la problemática, el cual contiene la hipótesis en conjunto con el objetivo tanto general como específicos, mientras que en el capítulo 3 se expone el marco teórico. El capítulo 4 describe los aspectos relacionados a los datos y metodología preliminar empleada

y finalmente el capítulo 5 contiene los resultados preliminares de esta investigación.

Tabla 1. Resumen de concentraciones de material particulado (MP) diarias y anuales, registradas en la Estación de Curicó. Fuente: Ministerio del medio ambiente 2015.

Variable	Norma Primaria ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Años		
			2012	2013	2014
MP10 _{CON}	150 _{24H}	P ₉₈ (c-diaria)	154	135	132
	50 _{Anual Medio}	c-A		52	54
MP2.5 _{CON}	50 _{24H}	P ₉₈ (c-diaria)	140	115	85
	20 _{Anual Medio}	c-A		35	27

II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Identificar el comportamiento meteorológico presente en los eventos de contaminación por MP10 MP2.5 en la ciudad de Curicó durante el período 2013-2015, explorando si es que existen patrones meteorológicos recurrentes asociados a ellos.

2.2 Objetivos Específicos

Caracterizar el comportamiento meteorológico de variables de superficie y el de concentraciones de MP10 y MP2.5 en Curicó, determinando el grado de relación observado entre ambas variables.

Definir los eventos de contaminación en la ciudad e indagar la existencia de configuraciones sinópticas recurrentes asociadas a ellos a través de un análisis de clúster con datos de reanálisis NCEP.

III. ANTECEDENTES GENERALES

3.1 Contaminación Atmosférica

La contaminación atmosférica corresponde a la introducción de químicos o materiales a la atmósfera que, o bien pueden mezclarse con ella debido a que corresponden a compuestos en estado gaseoso, o unirse a ella manteniéndose en suspensión por un tiempo, para el caso de materiales en estado sólido (partículas). La contaminación atmosférica proviene de las llamadas fuentes de emisión que, a mayor emisión de contaminantes, mayor concentración de éstos se encontrarán en el aire, empeorando su calidad. Para Jorquera (2008), los efectos de una mala calidad del aire se pueden clasificar, de acuerdo al receptor siendo afectado en: Efectos en la salud de la población expuesta, efectos en ecosistemas y agricultura, daños a materiales y patrimonio cultural y efectos estéticos. Donde sin duda, el más importante es el producido sobre la salud de las personas. Debido a este efecto, es que el monitoreo ambiental resulta fundamental en la evaluación de la calidad del aire. Generalmente el monitoreo ambiental se realiza sobre los contaminantes que más afectan a la salud de las personas y que normalmente abundan en zonas urbanas o industriales.

Por otro lado, resulta importante construir un inventario de emisiones atmosféricas, el cual proporciona información referente a la cantidad de emisiones que tienen efecto sobre la calidad del aire del lugar en estudio, identificando las fuentes emisoras y cuantificando sus respectivas emisiones. Para realizar un inventario de emisiones, se debe identificar las diferentes fuentes involucradas y clasificarlas en las siguientes categorías (DICTUC, 2007):

- a) Fuentes Estacionarias: Fuentes que poseen una ubicación fija las que destacan son:
 - Puntuales: La emisión se realiza de manera localizada, como una chimenea.

- De área: La emisión se realiza a través de una superficie, como una quema agrícola.
- b) Fuentes Móviles: Fuentes que se encuentran en movimiento y que hacen que la procedencia de la emisión sea variable en el tiempo, como los vehículos. Las que se clasifican en:
- En ruta: Cuando las fuentes móviles se encuentran en caminos establecidos.
 - Fuera de ruta: Cuando la emisión se realiza fuera de caminos establecidos por ejemplo el uso de maquinaria pesada en obras de construcción o en actividades agrícolas.
- c) Fuentes Fugitivas: Corresponden a fuentes de polvo natural y son muy difícil de estimar o medir ya que son difusas e intermitentes, como podría ser en una construcción o el levantamiento de polvo en un camino.

Una vez identificadas las fuentes de emisión estas se deben cuantificar, considerando tanto el nivel de actividad como el factor de emisión específico de la actividad, que equivaldría a la producción de contaminante generada por unidad de combustible consumida.

3.2 Material Particulado MP10 y MP2.5

El Decreto Supremo N°20 dice que para efectos regulatorios el material particulado se clasifica según su diámetro aerodinámico, dado que el tamaño de las partículas es la variable crítica que determina la probabilidad y el lugar de depósito en el tracto respiratorio. En ese contexto, se ha visto una evolución de las regulaciones de material particulado; las primeras estaban dirigidas al material particulado total suspendido. En 1987 la Agencia de Protección Ambiental de los

Estados Unidos de Norteamérica (USEPA) promulgó un estándar para el material particulado con diámetro aerodinámico hasta 10 micrones (MP10) y en 1997 se agregó un estándar para material particulado con diámetro aerodinámico menor a 2.5 micrones (MP2.5). Por lo tanto se entiende por material particulado, MP10, a una fracción gruesa mayor a 2.5 y menor a 10 micrones de diámetro y material particulado, MP2.5, a una fracción fina que considera las partículas de tamaño menor o igual a 2.5 micrones. La fracción gruesa del MP10 está constituida por partículas inhalables que pueden penetrar en las vías respiratorias llegando sólo hasta la región torácica, ya que por su tamaño quedan retenidas en la parte superior del sistema respiratorio. En cambio la fracción fina correspondiente a MP2.5, está compuesta por partículas suficientemente pequeñas que pueden penetrar en las vías respiratorias hasta llegar a los pulmones y alvéolos.

La fracción gruesa del MP10, está constituida generalmente por partículas de origen primario, es decir, emitidas directamente a la atmósfera, ya sea por fuentes naturales o antropogénicas y son el resultado de procesos mecánicos tales como la erosión o abrasión de materiales. Las fuentes antropogénicas más comunes de esta fracción son el polvo suspendido en la agricultura, minería, caminos sin pavimentar y actividades de construcción. La fuente natural más importante de esta fracción es el levantamiento de polvo por acción del viento. Otras fuentes naturales son la evaporación de gotas de agua de mar y las de origen biológico como el polen y fracciones de bacterias. Por otro lado la fracción fina del MP2.5, se produce por emisiones directas de los procesos de combustión de combustibles fósiles, a partir de la condensación de gases, de reacciones químicas en la atmósfera a partir de gases precursores como el dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles, amoníaco, y otros compuestos; y a través de procesos de nucleación y coagulación de partículas ultra finas. Las partículas que se forman en la atmósfera constituyen lo que se conoce como aerosol secundario, o partículas secundarias. En este contexto, las principales fuentes emisoras son los automóviles, buses y camiones, tanto a diésel como a

gasolina, plantas termoeléctricas, caldera, procesos industriales, hornos, fundiciones, procesos metalúrgicos, la combustión de biomasa, como la calefacción residencial a leña, las quemadas agrícolas e incendios forestales, y emisiones de amonio de las operaciones agrícolas.

Las partículas finas poseen un tiempo de residencia en la atmósfera más largo, lo que hacen que éstas puedan transportarse largas distancias, impactando a escala regional. Mientras que las partículas de la fracción gruesa tienen una velocidad de sedimentación mayor y por ello, permanecen menor tiempo en el aire y su impacto es más local.

De acuerdo a la organización mundial de la salud (2004), los efectos del MP10 sobre la salud corresponden a:

- Efectos a corto plazo: Reacciones inflamatorias en el pulmón, síntomas respiratorios, efectos adversos en sistema cardiovascular, incremento del uso de medicamentos, incremento en admisiones hospitalarias, incremento en mortalidad prematura.
- Efectos a largo plazo: Incremento de síntomas en vías respiratorias inferiores, reducción de la capacidad pulmonar en niños, incremento de enfermedad pulmonares obstructivas crónicas, reducción de la capacidad pulmonar en adultos, reducción de la esperanza de vida, principalmente a la mortalidad cardiopulmonar y probablemente al cáncer de pulmón.

Mientras que los impactos y riesgo en la salud por medio del MP2.5 se encuentran: mortalidad y admisiones hospitalarias en pacientes con enfermedad pulmonar obstructiva crónica y con enfermedad cardiovascular, exacerbación de los síntomas e incremento del asma, aumento de riesgo de infartos al miocardio, inflamación pulmonar, inflamación sistémica, disfunciones endoteliales y vasculares, desarrollo de arteriosclerosis, incremento en la incidencia de infección y cáncer respiratorio.

3.3 Norma Vigente en Chile

La contaminación atmosférica es el principal desafío para la autoridad ambiental en Chile. Hoy 10 millones de personas en el país están expuestas a una concentración promedio anual de material particulado, MP2.5, superior a la norma. Incluso en el Primer Reporte del Medio Ambiente publicado en el año 2013 se informa, que según la Organización Mundial de la Salud, la contaminación atmosférica es responsable de al menos 4 mil muertes prematuras a nivel nacional, ya que debido al reducido tamaño de las partículas estas ingresan con facilidad a las vías respiratorias de las personas, produciendo daños severos a la salud, tales como enfermedades pulmonares crónicas, mortalidad prematuras, entre otras (OMS, 2004). Esto reafirma la urgente necesidad de establecer una estrategia que entregue los lineamientos, los plazos y las metas para resolver el problema de la contaminación con la mayor celeridad posible.

En Chile, se encuentran vigentes normas primarias de calidad ambiental que regulan la concentración de los contaminantes nocivos para la salud. Dichas normas, regulan concentraciones máximas respecto a material particulado (tanto MP10, como MP2.5), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono troposférico (O₃), monóxido de carbono (CO) y plomo (Pb). La legislación vigente en Chile acerca del MP10 se enmarca dentro de la Ley 19.300 “Sobre Bases Generales del Medio Ambiente”. Esta ley, en su Artículo 2, define lo que es una norma primaria de calidad del aire y cuándo una zona debe ser declarada como “saturada” por algún contaminante. De acuerdo a esto, la norma primaria de calidad del aire es la que establece los valores de las concentraciones y períodos, sus máximos permisibles de elementos, compuestos, sustancias, cuya presencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la vida o la salud de la población, mientras que una zona “saturada” es aquella en que una o más de éstas normas se encuentran sobrepasadas.

El Decreto Supremo N°20 (D.S. N°20) y N°12 (D.S.N°12) es el documento que estipula el valor de la norma primaria para MP10 y 2.5 en Chile. Anteriormente la norma para MP10, se encontraba establecida en el D.S. N°59 del año 1998, sin embargo, este fue derogado en el año 2013 por el decreto inicialmente señalado. De acuerdo al D.S. N°20, la norma primaria es de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como concentración de 24 horas, la cual se verá sobrepasada si antes que se concluyese un período anual de mediciones de las estaciones monitoras de material particulado respirable MP10 con representatividad poblacional, registren niveles de MP10 sobre este valor por más de siete días. Mientras que el D.S. N°12 para el material particulado fino, MP2.5, establece una norma primaria de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como concentración de 24 horas y $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como concentración anual.

La norma ambiental correspondiente al N°20 y N°12, establece los niveles de concentraciones de 24 horas que generan situaciones de emergencia ambiental tanto para MP10 como MP2.5 (tabla 2 y 3).

Tabla 2. Niveles que generan situaciones de emergencia ambiental por MP10, Fuente: D.S. N°20.

Nivel	Categoría	Concentración 24 Horas
1	Alerta	195-239
2	Pre-Emergencia	240-329
3	Emergencia	330 o superior

Tabla 3. Niveles que generan situaciones de emergencia ambiental por MP2.5,
Fuente: D.S.N°12.

Nivel	Categoría	Concentración 24 Horas
1	Alerta	80-109
2	Pre-Emergencia	110-169
3	Emergencia	170 o superior

De acuerdo a esta normativa, es que en el año 2014 la región del Maule, específicamente la ciudad de Curicó y Teno fueron declaradas como zonas saturadas por MP10 y MP2.5, es por esto que el Ministerio de Salud en conjunto con el del Medio Ambiente establecen un plan de prevención y descontaminación atmosférica el que consiste en establecer una alerta sanitaria ambiental en aquellas zonas donde no existe un plan de descontaminación o prevención vigente, pero que se cuente con evidencia de que la población está expuesta a altas concentraciones de contaminantes, se implementarán medidas tendientes a informar a la población de los riesgos y a disminuir las emisiones que se generan a través de la paralización de fuentes fijas y restricción del uso de leña domiciliaria.

3.4 Variables Meteorológicas y su influencia en episodios de contaminación por material particulado

Un estudio realizado por Hernández y Arroyo en el año 2014, asociado a altos episodios de contaminación en la ciudad de Temuco y configuraciones sinópticas asociadas, hallaron que las altas concentraciones de MP10, están asociadas con viento débil y aumento de la estabilidad atmosférica, mientras que disminuyen las concentraciones de MP10 con un aumento de la velocidad del viento y un debilitamiento de la estabilidad. Por su parte un aumento de las concentraciones de MP10 también está relacionado con una disminución de la temperatura del aire

y baja humedad atmosférica. En este mismo contexto Sierra en el 2006, realizó un estudio de episodios de contaminación y su relación con variables meteorológicas de temperatura, viento y precipitación en la ciudad de Bogotá, encontrando que existe una relación inversa entre la velocidad del viento y el material particulado MP10, es decir un aumento de las concentraciones de MP10, está asociado con viento débil y viceversa, mientras que el resto de las variables meteorológicas presentaron una relación débil con altas concentraciones de MP10.

Las máximas concentraciones de material particulado en la zona central y sur de Chile ocurren durante las estaciones de otoño e invierno, mientras que en verano y primavera ocurren máximos de ozono troposférico (O_3) (Gallardo et al 2002, Hernández y Arroyo 2014). En este contexto existen diversos estudios que están relacionados con episodios de altas concentraciones de MP10 y configuraciones sinópticas típicas. Entre las que destacan un estudio realizado por Rutllant y Garreaud (1995), los cuales encontraron tres configuraciones sinópticas, cuya clasificación está dada por:

- **Configuración del tipo A:** Se caracteriza por la incursión de una alta presión fría en superficie, sincronizada en altura con la irrupción de una dorsal cálida. Esta condición provoca movimientos de descenso de aire y se asocia a inversiones de temperatura cerca de la superficie, viento débil y temperaturas anormalmente frías.
- **Configuración del tipo Baja Pre Frontal (BPF):** Se denomina baja pre frontal a la situación que se presenta antes de la entrada de un sistema frontal débil sincronizado en altura por una dorsal. Previo al ingreso de este sistema frontal, se registran episodios de mala ventilación y dispersión de contaminantes. Estos casos presentan un aumento tanto de la humedad como de la temperatura del aire y una disminución de la velocidad del viento en superficie.

- **Configuración múltiple o mixta:** En este escenario ocurren episodios tanto del tipo A como del tipo BPF en períodos intermedios del orden de 24 horas. Generalmente los episodios mixtos comienzan con una configuración del tipo A, seguida de una tipo BPF.

3.5 Aspectos topográficos y climáticos de la región del Maule

3.5.1 Topografía

La Provincia de Curicó, situada en la Región del Maule, se encuentra ubicada a 207 km de la ciudad Santiago, se caracteriza por un clima de tipo mediterráneo, con una notable diferencia de temperaturas entre la costa, la depresión intermedia y la Cordillera de los Andes. El mes más frío corresponde a Julio con 6,7 °C y el más cálido es enero con 22 °C (DMC, 2001).

Posee una superficie de 7.281,2 km² y una población total de 281.468 habitantes, correspondiendo al 27,5% de la población existente en la región del Maule. Las comunas de la provincia de Curicó que tienen parte de su territorio en el valle central son: Curicó, Teno, Molina, Rauco, Romeral y Sagrada Familia.

La ciudad de Curicó ubicada en los 34° 58´ de latitud sur, con 71° 14´ de longitud oeste, a una altitud media de 228 metros, capital de la Provincia, presenta un grave problema de contaminación, debido al alto consumo de leña como combustible residencial, calefactores ineficientes, malas prácticas de operación, baja inversión térmica principalmente en los meses de invierno, además de las condiciones geográficas y meteorológicas que se presentan en el valle central de la provincia, protegido por un conjunto montañoso.

La ciudad de Curicó cuenta con una estación de monitoreo para material particulado respirable (estación Curicó). Esta estación fue declarada como Estación de Monitoreo con Representatividad Poblacional (EMRP), mediante

Resolución Exenta N° 617 de fecha 27 de Julio de 2015, de la Superintendencia del Medio Ambiente, cumpliendo los requisitos establecidos en el Decreto Supremo N°12 de 2011, del Ministerio del Medio Ambiente (en adelante DS N°12/2011 MMA), que establece la Norma de Calidad Primaria para Material Particulado Respirable MP2.5.

Desde el 1 de enero hasta el 31 de diciembre del año 2014, se cuenta con monitoreo continuo validado de MP2.5 evidenciado una superación de la correspondiente norma primaria en el sector, en su concentración diaria, por lo que en conformidad a lo dispuesto en la Ley N° 19.300 procede la declaración de zona saturada por MP_{2.5}. Esta declaración tiene como fundamento las mediciones realizadas por el Ministerio de Medio Ambiente y reportadas a la Superintendencia mediante el oficio N° 142627 del 3 de julio del 2015.

En el siguiente mapa se muestra la ubicación de la Provincia de Curicó inserta en la región del Maule.

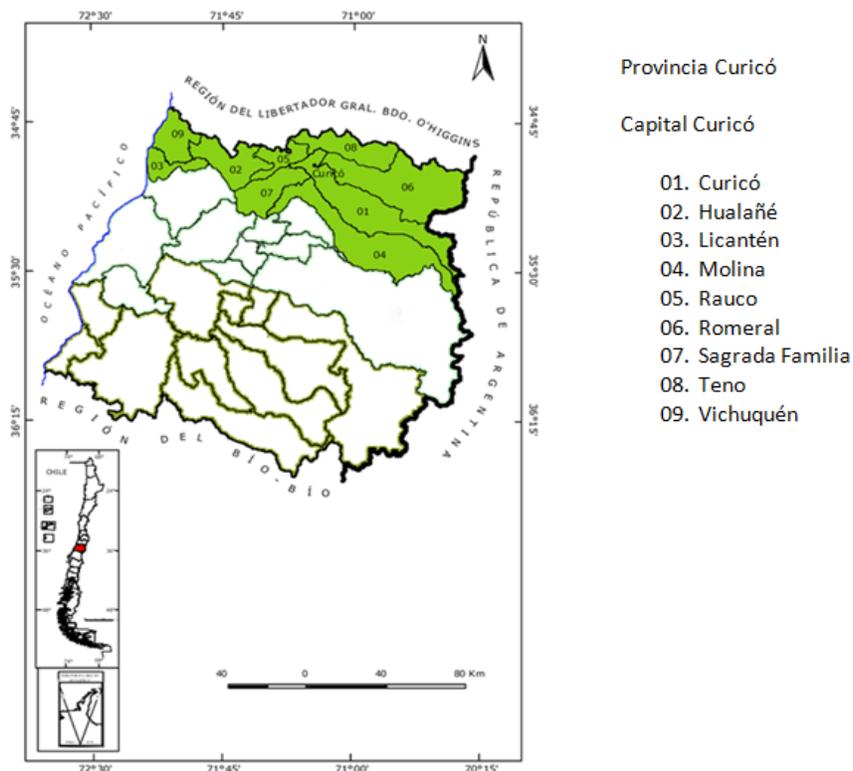


Figura 1. Mapa de ubicación de la provincia de Curicó. Fuente: INE 2007.

3.5.2 Aspectos climáticos de Curicó

Dentro del marco de esta investigación se realiza una reseña de la climatología que presenta en esta localidad, la cual describe los aspectos climáticos generales relacionados con la circulación de gran escala.

La ciudad de Curicó se encuentra ubicada en el valle central cerca de los 35° de latitud sur donde a través del año en la escala sinóptica presenta influencia tanto ciclónica como anticiclónica, las cuales modulan en gran medida las condiciones meteorológicas que se registran en superficie. En la época estival (verano, DEF), el Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur puede extender su influencia hasta los 42°S, actuando como bloqueo al paso de ondas atmosféricas por la región (figura 2a). Mientras que en la época invernal (invierno, JJA) este anticiclón se debilita desplazándose hacia latitudes menores, permitiendo el paso de sistemas frontales

y a su vez el ingreso de masa de aire de origen polar asociadas a altas frías migratorias (figura 2b)

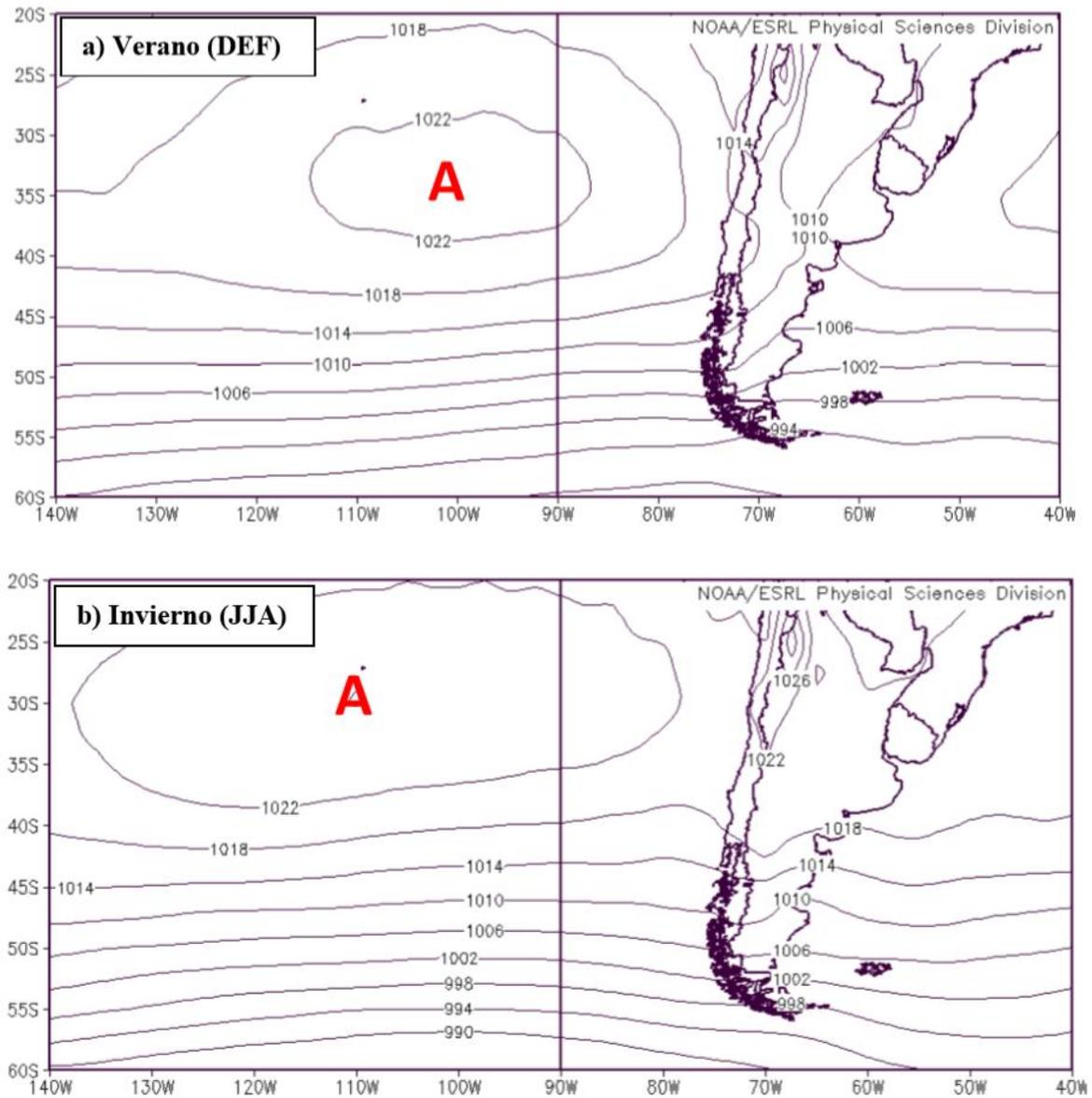


Figura 2. Cartas de presión a nivel medio del mar para la época estival (a) e invernal (b), la letra A, señalada en color rojo, indica el centro del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur. Fuente: figuras extraídas desde el estudio de Hernández y Arroyo (2014).

IV. DATOS Y METODOLOGÍA

4.1 Datos

4.1.1 Datos utilizados en la caracterización del comportamiento meteorológico y de concentraciones de MP10 y 2.5.

Para caracterizar el comportamiento meteorológico en superficie y de las concentraciones de MP10 y 2.5 en la ciudad e indagar si existe una relación entre ellos durante el período invernal, se utilizaron datos horarios de las variables meteorológicas provenientes de la estación General Freire, ubicada en el sector nororiente de Curicó en un sector del aeródromo de la ciudad y datos de concentraciones tanto de MP10 como de 2.5 extraídos de la estación de calidad del aire proporcionados por el Ministerio del Medio Ambiente ubicada en el centro de la ciudad específicamente en el cementerio (tabla 4 y figura 3b).

Tabla 4. Descripción de las variables utilizadas.

Estación	Ubicación	Variabes	Resolución Temporal	Extensión Temporal	Fuente
Curicó	34°58'S 71°14' W	MP 10 MP 2,5	Cada 1 Hora	Marzo 2013 – Agosto 2015	MMA
General Freire	34°57'S 71°13'W	Temperatura del Aire (°C) Humedad Relativa (%) Viento (DDD – ff)	Cada 1 Min	Marzo 2013 – Agosto 2015	DMC
Reanálisis II	34°S 71°W	Altura geopotencial 500 hPa Presión en Superficie	6 hrs	Marzo 2013 – Agosto 2015	NOAA



Figura 3. Mapa de Chile (a). Ubicación de la estación General Freire (meteorológica) y Curicó (calidad del aire) (b).

A partir de esta información se generaron series de tiempo tanto de las variables meteorológicas como de las concentraciones. Para el análisis de la humedad atmosférica, se utilizó la razón de mezcla en vez de la humedad relativa, debido a que la humedad relativa depende de la presión de vapor de saturación y a su vez de la temperatura, por lo tanto cambios en el contenido de humedad en la atmósfera podrían ser difíciles de apreciar en la variable de humedad relativa por efecto del ciclo diario de la temperatura. La razón de mezcla expresa la proporción entre la cantidad de vapor de agua y cantidad de aire seco existente y por lo tanto es una variable representativa de la cantidad de vapor de agua en la atmósfera. A partir de los datos de humedad relativa se obtuvo la razón de mezcla mediante la fórmula propuesta por Bolton (1980):

$$e_s = 6.11 \exp^{\frac{17.67 \cdot T}{243.5 + T}} \quad (1)$$

$$w_s = \frac{0.622 \cdot e_s}{P - e_s} \quad (2)$$

$$HR = \frac{w}{w_s} * 100 \quad (3)$$

Considerando la relación (3) y despejando w se tiene:

$$w = \frac{HR * w_s}{100} \quad (4)$$

Dónde:

6.11 es la presión del punto tripe de equilibrio entre las fases de estado del agua (hPa) y 17.67 (°C), 243.5 (K) y 0.622 (hPa) son constantes.

e_s : Presión de vapor de saturación (hPa).

T: Temperatura (°C).

w_s : Razón de mezcla de saturación (gr/kg).

w: Razón de mezcla (gr/kg).

P: Presión (hPa).

HR: Humedad Relativa (%).

4.1.2 Datos utilizados en el análisis de clúster

Para encontrar patrones sinópticos que se relacionen a episodios de mala ventilación, se analizaron las configuraciones sinópticas asociadas a la ocurrencia de altas concentraciones de MP10 y 2.5 en la ciudad de Curicó. Para ello se aplicó la técnica estadística *análisis de conglomerados o clúster* (Wilks, 2006), cuya metodología será descrita en detalle en la sección 4.2.2. En resumen, esta técnica permite clasificar observaciones individuales en grupos, sin la necesidad de conocer previamente su identidad. Así, esta clasificación se realiza en función del grado de similitud y diferencia entre conjunto de observaciones, asignándole a cada una un grupo o clúster.

Los campos meteorológicos utilizados en este análisis fueron extraídos desde los datos NCEP-DOE Reanalysis 2 (Kanamitsu et al, 2002) y se realizó para las variables detalladas en la tabla 4. Se consideraron estas variables dado que representan campos típicos de análisis meteorológico de escala sinóptica.

4.2 Metodología

4.2.1 Caracterización de las variables meteorológicas y de concentraciones en Curicó

Tanto la caracterización de las variables meteorológicas como de las concentraciones se realizaron en base a un análisis mensual de ciclos diurnos promedios horarios con su respectiva desviación estándar. El análisis fue realizado mensual para evitar la aparición de tendencias estacionales en las variables que puedan de alguna forma disfrazar la información. Para el caso de la dirección del viento, no aplica el análisis medio, dado que corresponde a una variable discreta, por lo tanto, se construyeron rosas de los vientos la cual determinó la dirección predominante. Se hicieron tres histogramas de viento para cada mes del período de estudio, los cuales fueron separados por tres períodos

del día de ocho horas cada uno, con el fin de establecer las direcciones predominante durante la noche-madrugada, mañana y tarde (tabla 5).

Tabla 5. Períodos del día utilizados para la construcción de las rosas de los vientos.

Período del día	Hora UTC	Hora Local
Noche-Madrugada	00 – 07	20:00 – 03:00
Mañana	08 – 15	04:00 – 11:00
Tarde	16 – 23	12:00 – 19:00

4.2.1 Relación entre las variables meteorológicas y concentraciones de MP10 y 2.5

Con el fin de establecer una relación entre las variables meteorológicas y de concentraciones de MP10 y 2.5, se obtuvieron anomalías estandarizadas de cada una de las variables, con el objetivo de excluir ciclos diurnos que podrían disfrazar los resultados. Las anomalías fueron calculadas para cada mes, restando el valor horario medio del valor observado para luego ser dividido por su desviación estándar (ecuación 5). Cuando las anomalías son positivas, quiere decir que los valores observados son superiores a los medios, mientras que anomalías negativas significan que las observaciones se encuentran por debajo de su media.

$$\text{Anomalía Estandarizada} = \frac{\text{Valor Observado Horario} - \text{Valor Medio Horario}}{\text{Desviación Estándar Horaria}} \quad (5)$$

A pesar de la separación mensual realizada para el análisis, las series de anomalías de las variables presentaban una tendencia lineal, la cual fue removida

mediante la aplicación de una *Transformada Rápida de Fourier* o *FFT* (Wilks, 2006). La FFT es un algoritmo matemático para la transformación de una función del tiempo en una función de frecuencia, esta técnica es muy útil para la detección de señales presentes en series de tiempo meteorológicas, tales como ciclos diarios, estacionales o tendencias lineales como lo ocurrido en este caso.

Luego de extraer las tendencias, se calculó el grado de asociación entre ambas concentraciones (MP10 y 2.5) y las variables meteorológicas a través de un análisis de correlación. Éste fue realizado para cada mes separando el análisis en dos. La primera consistió en considerar todo el período del estudio (00 – 23 UTC), mientras que el segundo consistirá en considerar sólo el período nocturno (00 – 09 UTC). Esta separación tiene por objeto conocer si el factor meteorológico tiene influencia en el comportamiento de las concentraciones.

Con el fin de determinar la significancia estadística de cada una de las correlaciones obtenidas de cada variable, se aplicará un test estadístico de Montecarlo (Wilks, 2006), el cual señala sí estos valores realmente dan cuenta de la existencia de una relación entre las variables meteorológicas y de concentraciones y evita deducir que fueron obtenidas al azar. Este test fue elegido debido a que corresponde a un test no paramétrico, es decir no asume ningún tipo de parámetro ni exige que los datos se ajusten a una determinada distribución, de modo que puede ser aplicado a cualquier conjunto de datos. Otra ventaja es que puede aplicarse a cualquier estadístico que requiera ser testeado, siempre y cuando este haya sido obtenido a partir de datos originales.

4.2.2 Determinación de eventos extremos

4.2.2.1 Extremos de concentraciones de MP10 y 2.5

Para definir días considerados como eventos de contaminación en la ciudad, se considerarán los valores de anomalías de concentraciones de MP10 y 2.5 que se encuentren por sobre el percentil 95 (P95) durante al menos tres horas consecutivas del día. Este criterio será escogido arbitrariamente el cual pretenderá localizar los días en que exista una continuidad o persistencia de altas concentraciones. De esta forma, se escogerá el 5% de la cola derecha de la distribución de frecuencia acumulada (figura 4) y se determinará su fecha de ocurrencia. Posteriormente, se determinará su configuración sinóptica asociada a dichos eventos mediante un análisis de conglomerados, la que será detallada en la sección 4.3.

4.2.2.2 Extremos meteorológicos

Para el caso de las variables meteorológicas, el criterio que se utilizará será similar al de las concentraciones, no obstante, se considerarán las anomalías que se encuentren por debajo del percentil 5 (P5) (figura 4). Se utilizará este criterio con el fin de determinar los días en que ocurrieron eventos fríos, secos y viento débil, las cuales son condiciones favorables a la ocurrencia de mala ventilación.

Cabe señalar que tanto para las variables meteorológicas como de calidad del aire, el análisis está enfocado a datos diarios y no en promedios diarios, esto para poder discriminar con mayor detalle el comportamiento interdiario meteorológico versus calidad del aire. Además se conoce que el promedio móvil de 24 horas considera 23 valores pasados (más el tiempo actual), por lo tanto éste no necesariamente representa la situación de calidad del aire del momento. Entonces, los eventos de MP10 y 2.5 que se definen en esta investigación no

serán necesariamente los mismos que son definidos por las normas de calidad del aire actualmente vigente, basadas en promedios móviles de 24 horas.

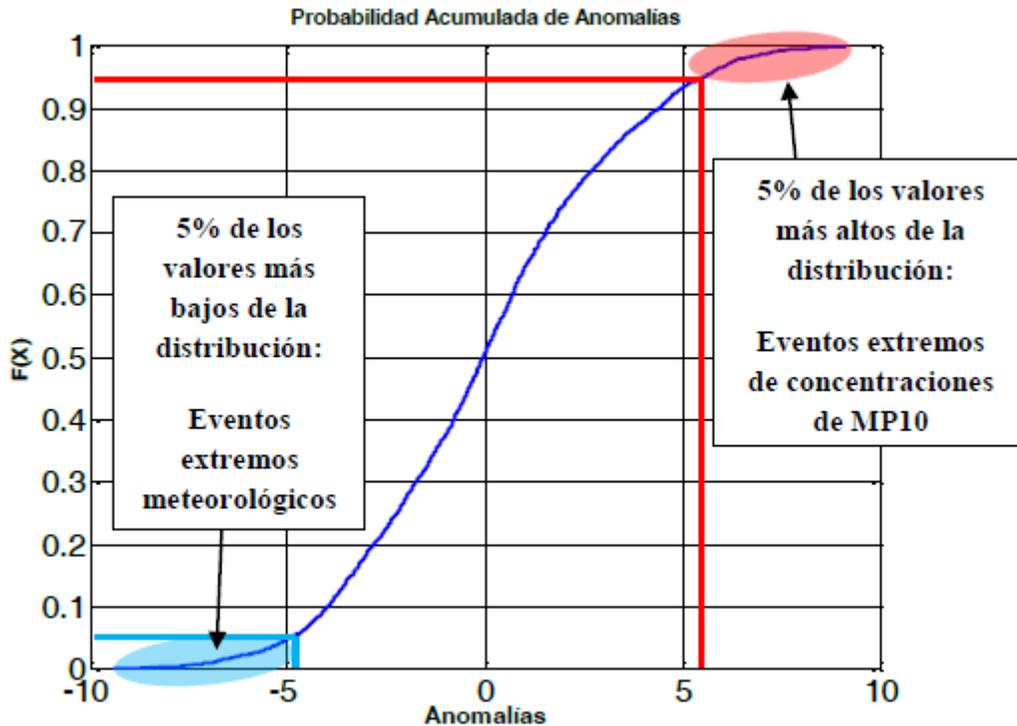


Figura 4. Esquema que representa la distribución de frecuencia acumulada de anomalías tanto para los eventos extremos de variables meteorológicas y de concentraciones (Fuente: figura extraída de Hernández y Arroyo 2014).

4.3 Análisis de patrones sinópticos asociados a eventos de altas concentraciones de MP10 y 2.5 en Curicó

Para encontrar patrones meteorológicos asociados a episodios de mala ventilación en Curicó, se utilizará la técnica estadística de análisis de conglomerado o clúster, la cual agrupa configuraciones sinópticas en función del grado de similitud o diferencia entre un conjunto de observaciones, asignándole a cada uno un grupo o clúster. De modo que los datos que estén en un mismo grupo sean semejantes entre sí u homogéneos (Wilks, 2006).

Para esta investigación, la metodología que será utilizada está basada en un estudio realizado por Hernández y Arroyo (2014), donde se seguirán los siguientes pasos:

Paso 1: Se calcularán las distancias entre los puntos que componen la matriz de anomalías del campo de altura geopotencial en el nivel de 500 hPa mediante la opción de correlación, el cual genera una matriz cuadrada que contiene la distancia entre todos los puntos consigo mismos, otorgando un criterio de similitud entre los datos, de modo que cuanto más grande sea la correlación, menor será la distancia entre los eventos.

Paso 2: Luego para obtener los grupos de conglomerados, se precederá a unir los puntos de la matriz en grupos, mediante la forma de árbol jerárquico (figura 6a), basada en la distancia previamente calculada. Para la unión de estos grupos o llamado en la literatura como “linkage” (Wilks, 2006) en este trabajo se utilizará la función Ward, dado que es uno de los métodos más utilizados debido a que discrimina de mejor forma respecto a niveles de agrupamiento, comparados con los métodos de media, distancia mínima, centroides, entre otros.

Paso 3: Posteriormente se elegirá el número de grupos o conglomerados, para ello se analizará un gráfico de distancias (figura 6b), que representa la unión de los clústeres. Cuando el agrupamiento es realizado en el comienzo del proceso estas distancias son pequeñas, las que van creciendo progresivamente a medida que avanza el mismo. Finalizando el proceso, habrá pocos grupos los que estarán separados por una distancia mucho menor. Todo esto servirá para determinar la detención del proceso y posteriormente encontrar un punto donde las distancias entre la unión de los grupos presentan un salto, con ello se podrá determinar el número de conglomerados a utilizar.

Paso 4: Después de haber encontrado el número de clúster de cada evento, se generarán cartas promedio o compuestos con los campos de altura geopotencial en 500 hPa, presión a nivel medio del mar y espesor de 1000-500 hPa, las que

representarán las condiciones medias de cada grupo, que en este estudio serán las condiciones sinópticas tipo que generan mala ventilación en la ciudad.

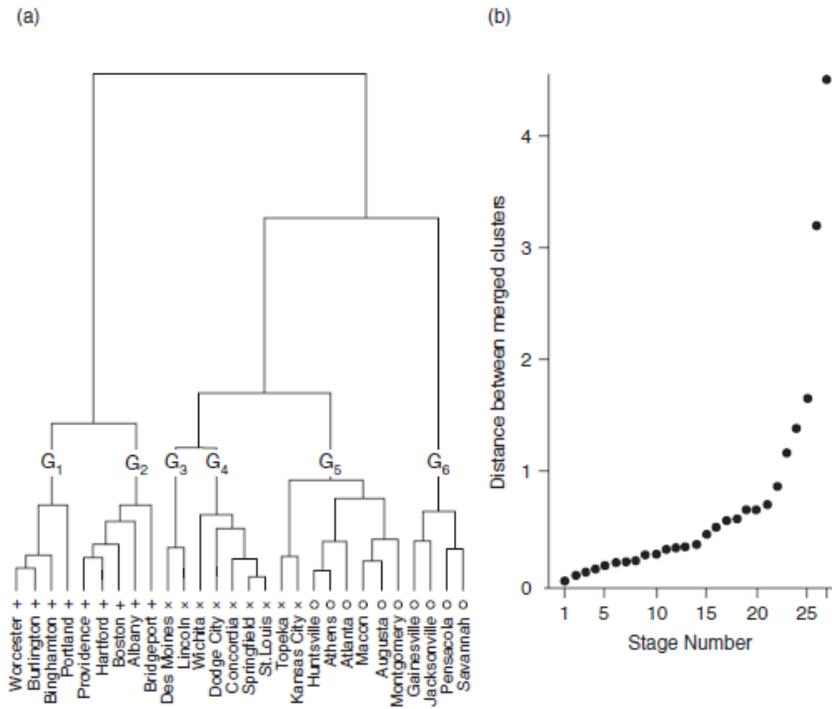


Figura 5. Ilustración de un dendrograma o diagrama del árbol jerárquico, para cada conglomerado en (a) y distancia entre los grupos fusionados en (b) (Wilks, 2006).

V. ANÁLISIS Y RESULTADOS

5.1 Caracterización meteorológica y de concentraciones en la ciudad de Curicó

Se realizó una caracterización meteorológica y de concentraciones de MP10 y 2.5 para Curicó, con el fin de determinar el comportamiento medio de las variables, en particular de los ciclos diarios. La obtención del ciclo medio diario permitió obtener las anomalías estandarizadas, lo que a su vez servirá tanto para determinar la relación y la identificación de los valores extremos.

En base a datos horarios del período abril a septiembre, correspondiente a la estación General Freire y Curicó, se construyeron ciclos diarios promedios para analizar el comportamiento interdiario. Los resultados preliminares son expuestos a continuación:

5.1.1 Temperatura

Las figuras 7 (a-f), señalan el ciclo medio diario mensual de la temperatura. En ellas se observa la variabilidad estacional de la temperatura como era de suponer, es decir temperaturas medias más bajas a medida que se acerca invierno. Esto se explica por la menor radiación que recibe la zona, debido principalmente a la inclinación del eje solar.

En cuanto a la variabilidad de las observaciones horarias, representada por la desviación estándar (barras adjuntas a la curva de temperatura), se observa en general una mayor variabilidad durante los meses de invierno, debido a la incursión de masas de aire de origen polar asociada al paso de sistemas frontales que pasan por la región.

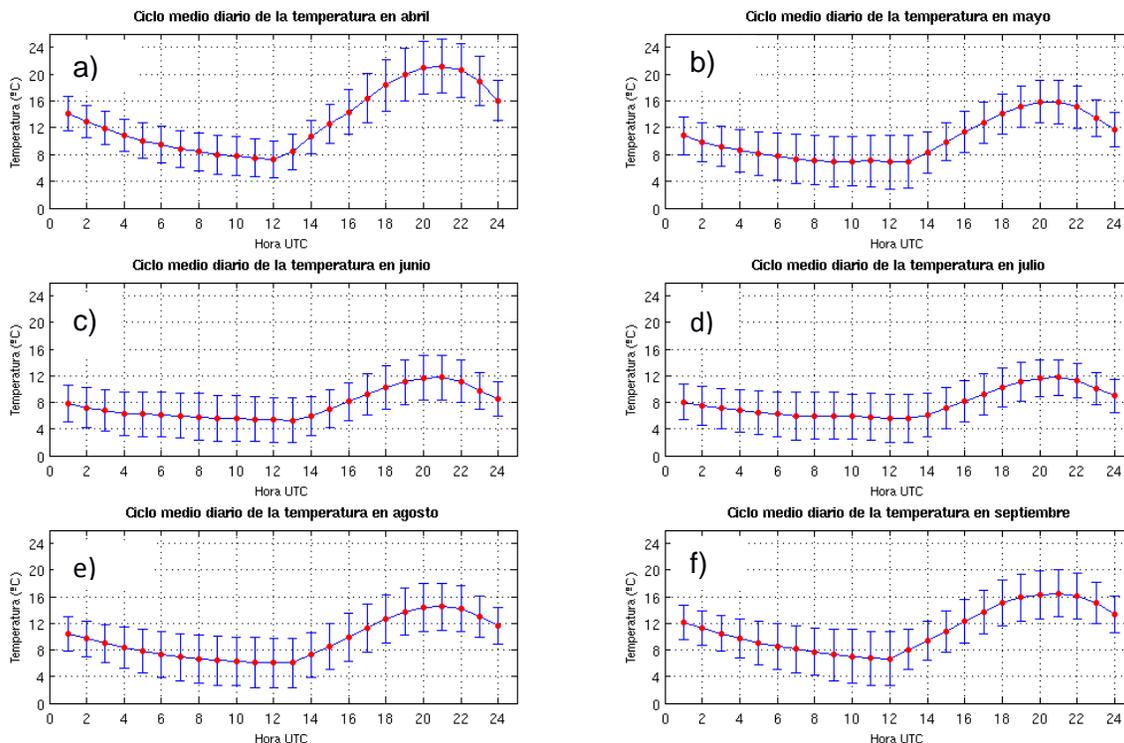


Figura 6. Ciclos diarios medios de temperatura del aire en la estación General Freire para los meses de abril a septiembre de los años 2013 al 2015 (a-f). Las barras adjuntas a la curva indican la desviación estándar correspondiente a cada hora.

5.1.2 Razón de Mezcla

La humedad en Curicó (figura 8 a-f) evidencia una leve estacionalidad en su comportamiento medio, mostrando valores bajos a medida que se aproxima el invierno, lo que podría estar asociado con un factor térmico.

Con respecto a la oscilación diaria, ésta presenta una débil variación durante el día, no obstante, es posible ver un ciclo diurno caracterizado por una disminución de la humedad durante la noche y mañana y un aumento durante la tarde. Esto puede estar directamente relacionado con flujos catábaticos locales asociados a

brisas de tierra a mar, el cual genera un efecto de secamiento de las masas de aire durante la noche, ya que como se verá en la sección 5.1.4, durante la noche y mañana la dirección del viento observada es predominantemente del noroeste. Por otra parte, el leve aumento promedio de razón de mezcla en la tarde puede atribuirse a que durante el día se instaura un flujo del suroeste (figura 10, periodo correspondiente a la tarde, 16-23 UTC), el cual advectaría aire costero más húmedo a la zona (brisa de mar a tierra). En cuanto a la variabilidad horaria, esta no presenta fluctuaciones significativas, tanto en escala diaria como estacional.

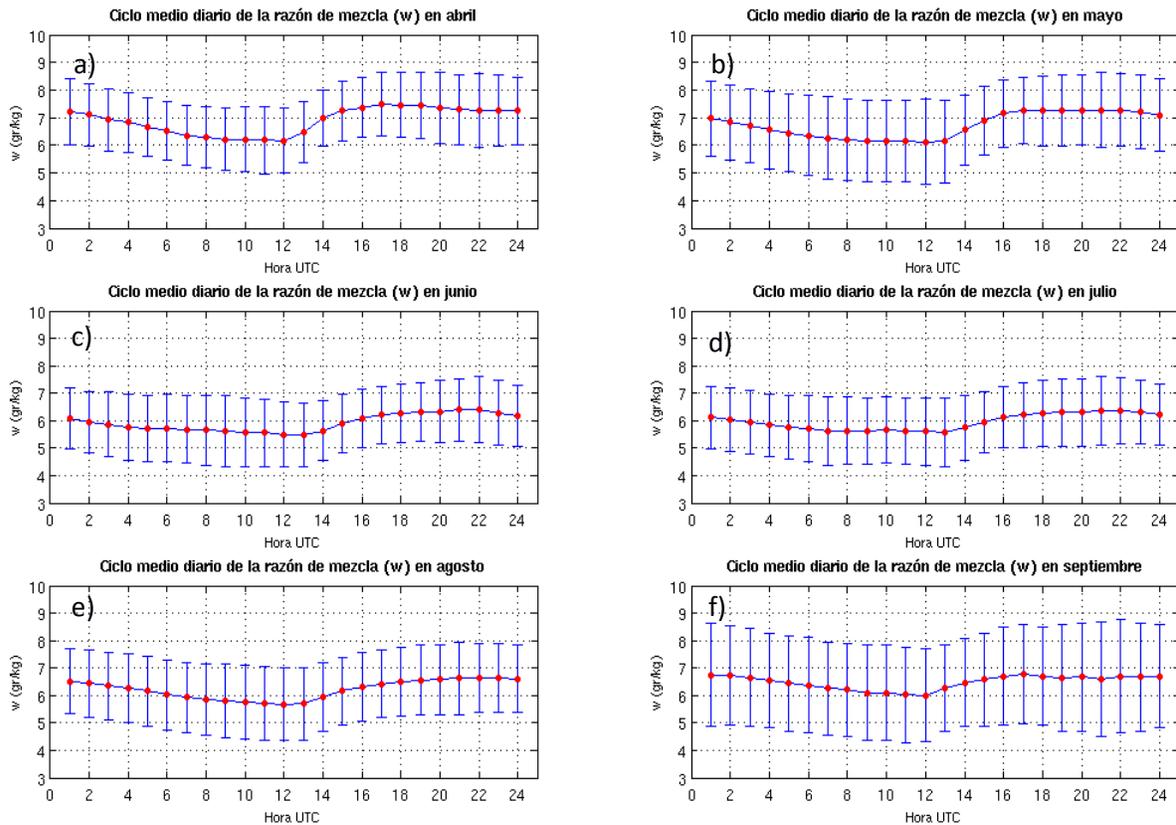


Figura 7. Ciclos diarios medios de la razón de mezcla en la estación General Freire para los meses de abril a septiembre de los años 2013 al 2015 (a-f). Las barras adjuntas a la curva indican la desviación estándar correspondiente a cada hora.

5.1.3 Intensidad del Viento

Las figuras 9 a-f se observa que en general la intensidad del viento en Curicó es débil durante todo el ciclo diurno la cual no supera en promedio los 5 m/s durante todo el período de estudio. Por otra parte se observa un incremento de la variabilidad horaria durante los meses de mayo a agosto asociada al paso de sistemas frontales.

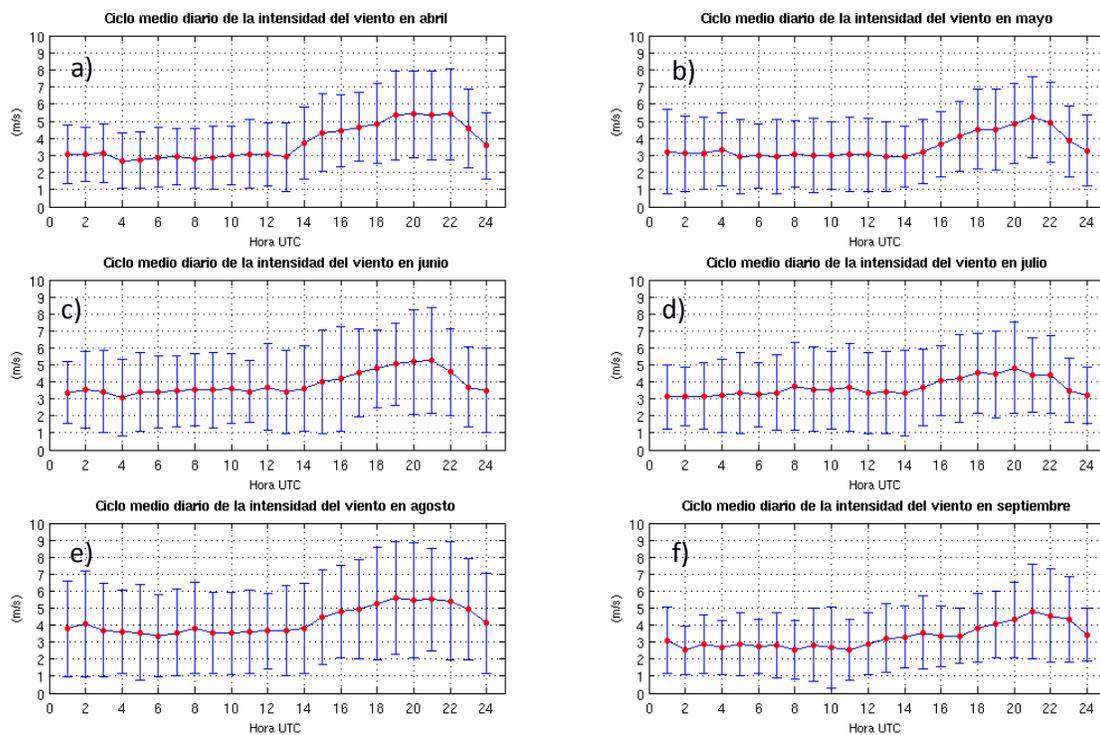
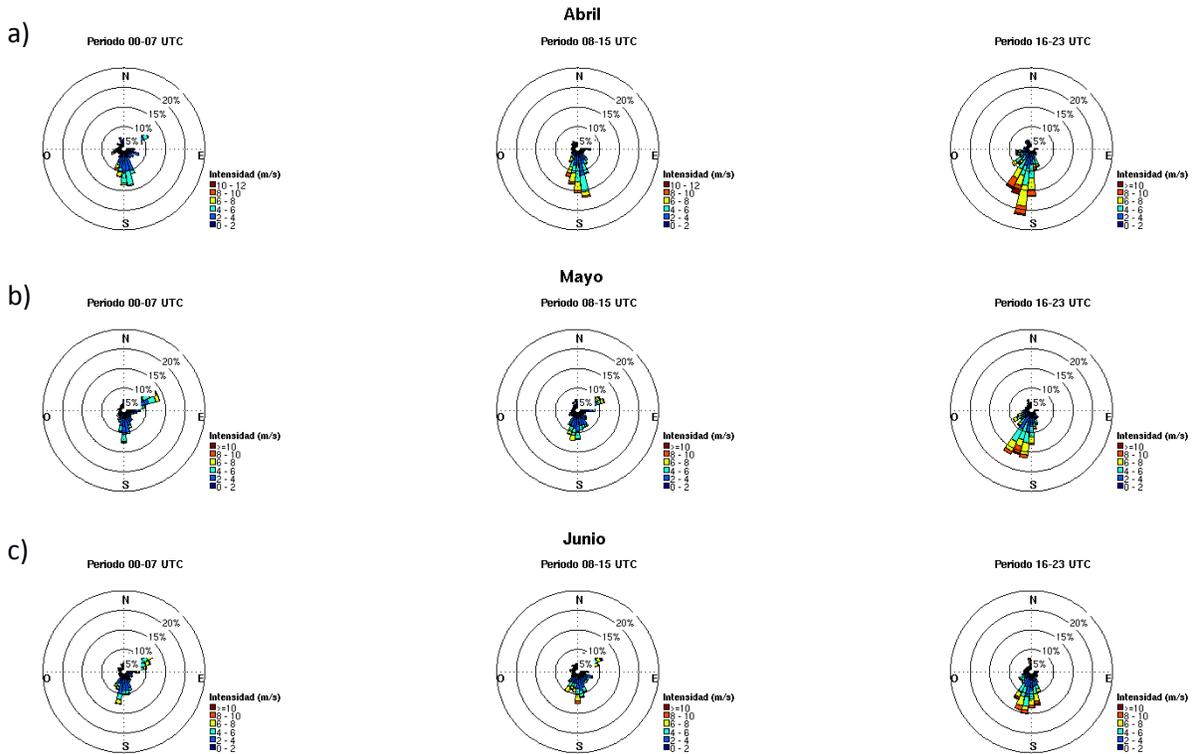


Figura 8. Ciclos diarios medios de la intensidad del viento en la estación General Freire para los meses de abril a septiembre de los años 2013 al 2015 (a-f). Las barras adjuntas a la curva indican la desviación estándar correspondiente a cada hora.

5.1.4 Dirección del Viento

Las figuras 10 a-f señalan la frecuencia de la dirección del viento por mes separando el día en períodos de ocho horas: noche-madrugada (00-07 UTC), mañana (08-15 UTC) y tarde (16-23 UTC). Dentro del período de estudio, durante la noche y mañana en general predomina viento del noreste-sur, asociado a aproximaciones frontales, mientras que durante la tarde predomina viento del suroeste, donde este último podría estar relacionado con un aumento de la humedad (figura 9 a-f).



DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE
 SECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y METEOROLOGÍA APLICADA
 OFICINA DE ESTUDIOS METEOROLÓGICOS

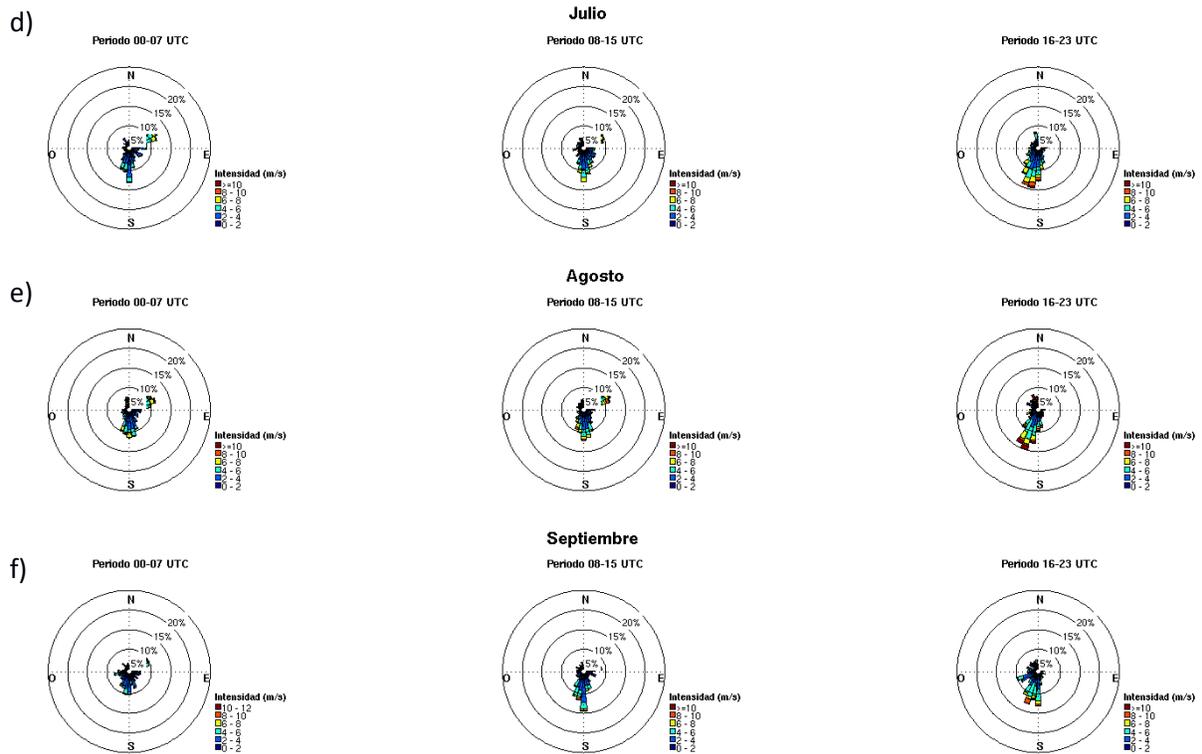


Figura 9. Rosa de los vientos que representan la direcciones predominantes del viento en la estación General Freire, para el período nocturno (panel izquierdo), mañana (panel central) y tarde (panel derecho) para los meses de abril a septiembre de los años 2013,2014 y 2015 (a-f).

5.2 Comportamiento diario de las concentraciones de MP10 y 2.5 en Curicó

La figura 11 y 12 muestra el ciclo diurno mensual de las concentraciones de MP10 y 2.5 correspondiente a la estación de calidad del aire Curicó. En ellas se observa que ocurren dos máximos de concentraciones, uno durante la noche, entre las 00 y las 03 UTC (20:00 y 23:00 hora local), cuyo máximo de MP10 y de MP2.5 ocurre en mayo y julio alcanzando los 170 ug/m^3 y 120 ug/m^3 respectivamente. El otro máximo se genera durante las horas de la mañana, específicamente entre las 11 y las 14 UTC (07:00 y 10:00 hora local), con valores que alcanzan los 70 ug/m^3 para MP10 y 50 ug/m^3 para MP2.5, los cuales ocurren durante casi todo el período de otoño e invierno. Esta información coincide con los resultados obtenidos por la Fundación para la Transferencia Tecnológica en el año 2015. Donde se observa que el problema de material particulado en la ciudad ocurre principalmente durante esas horas del día (figura 13), además cabe destacar que durante el mes de junio las concentraciones se ven disminuidas respecto al resto de los meses de otoño e invierno (figura 14). Las mayores concentraciones de material particulado tanto MP10 como MP2.5, podrían estar relacionados con la poca ventilación durante la noche, es decir con una disminución de la velocidad del viento a partir de las 22 UTC (19:00 hora local), en conjunto con una disminución de la temperatura lo que se traduce en un aumento de la estabilidad atmosférica, en consecuencia el aumento en el uso de calefacción domiciliar a leña. Por su parte el segundo máximo encontrado tanto en MP10 como MP2.5, puede estar asociado según Hernández y Arroyo 2014, al inicio de las actividades cotidianas de la ciudad durante la mañana, no obstante las concentraciones son menores probablemente debido a que la capa de mezcla superficial se encuentra más dilatada respecto del período nocturno.

Por otra parte, la variabilidad estacional de las concentraciones (MP10 y 2.5) señalada en las figuras 11 y 12, se observa un marcado aumento de los valores medios en los meses invernales, debido al incremento de las emisiones

DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE
 SECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y METEOROLOGÍA APLICADA
 OFICINA DE ESTUDIOS METEOROLÓGICOS

residenciales durante este período, es decir al mayor uso de estufas a leña (figura 15) producto de la disminución de la temperatura típica de la época invernal.

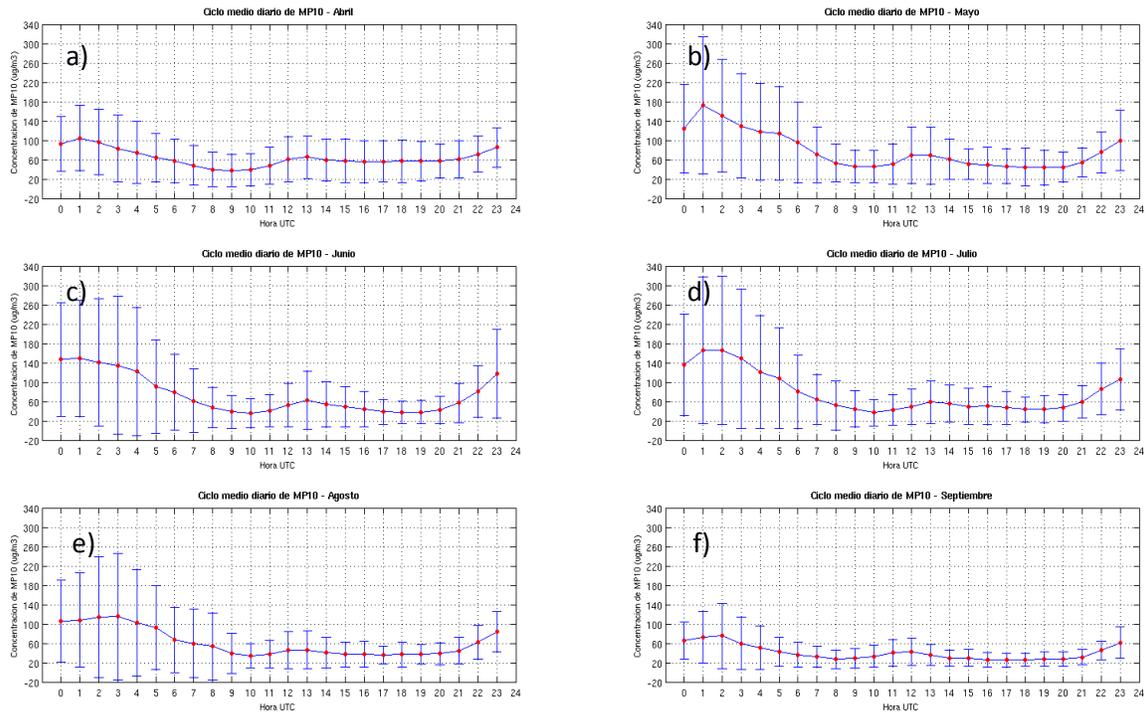


Figura 10. Ciclos diarios medios de concentraciones de MP10 en la estación Curicó para los meses de abril a septiembre de los años 2013 al 2015 (a-f). Las barras adjuntas a la curva indican la desviación estándar correspondiente a cada hora.

DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE
 SECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y METEOROLOGÍA APLICADA
 OFICINA DE ESTUDIOS METEOROLÓGICOS

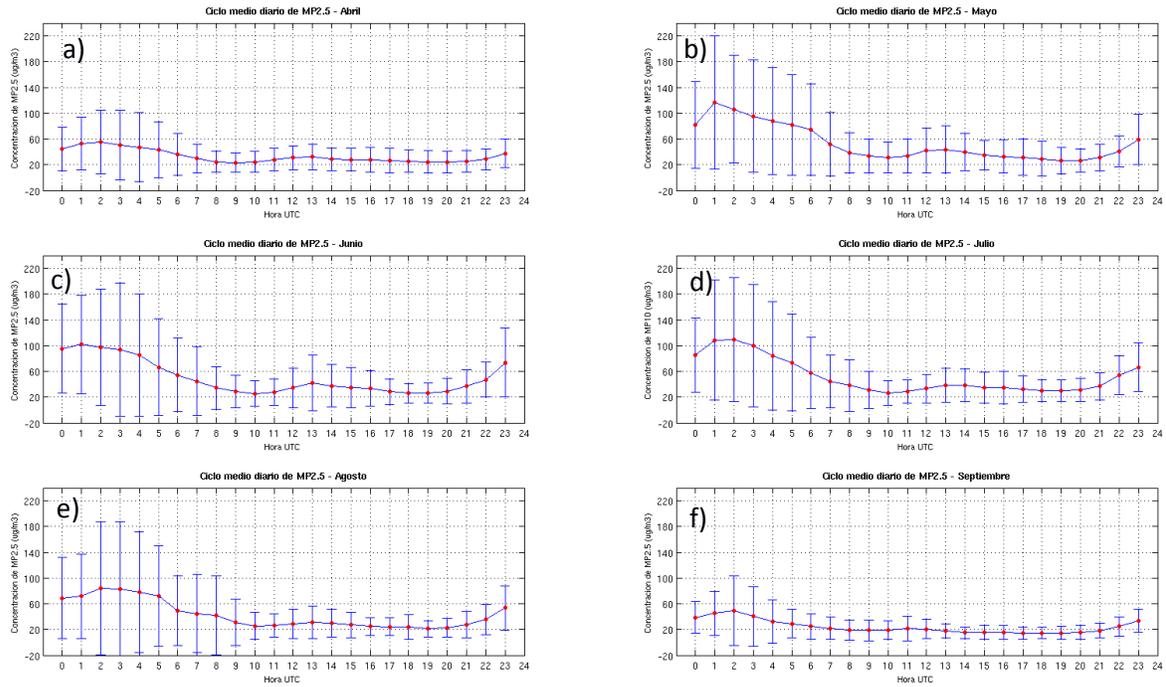


Figura 11. Ciclos diarios medios de concentraciones de MP2.5 en la estación Curicó para los meses de abril a septiembre de los años 2013 al 2015 (a-f). Las barras adjuntas a la curva indican la desviación estándar correspondiente a cada hora.

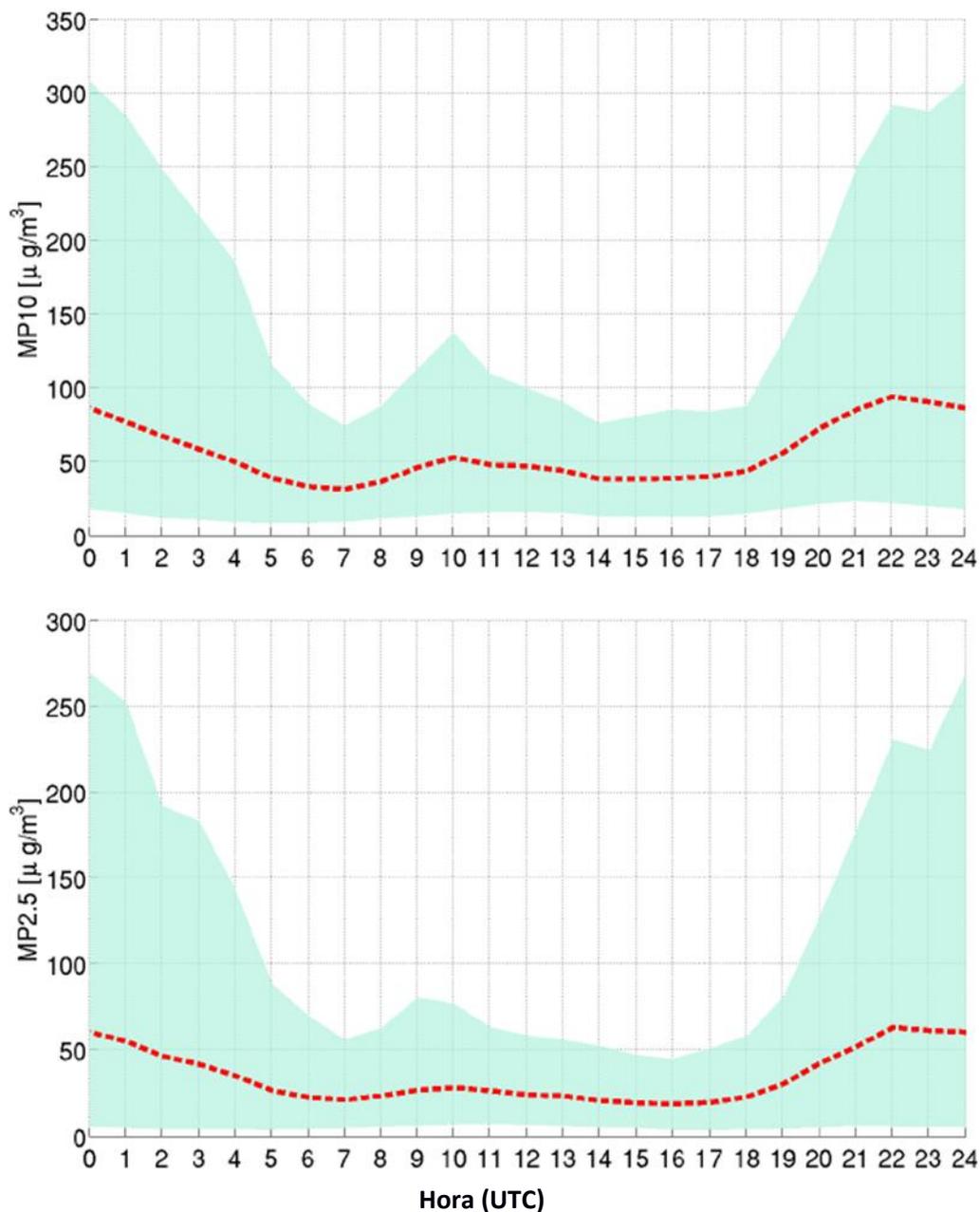


Figura 12. Ciclo medio diario de las concentraciones de MP10 (panel superior) y de MP2.5 (panel inferior), la línea roja representa el ciclo y en verde el rango de percentiles 5% y 95% respectivamente (Fuente: UNTEC, 2015).

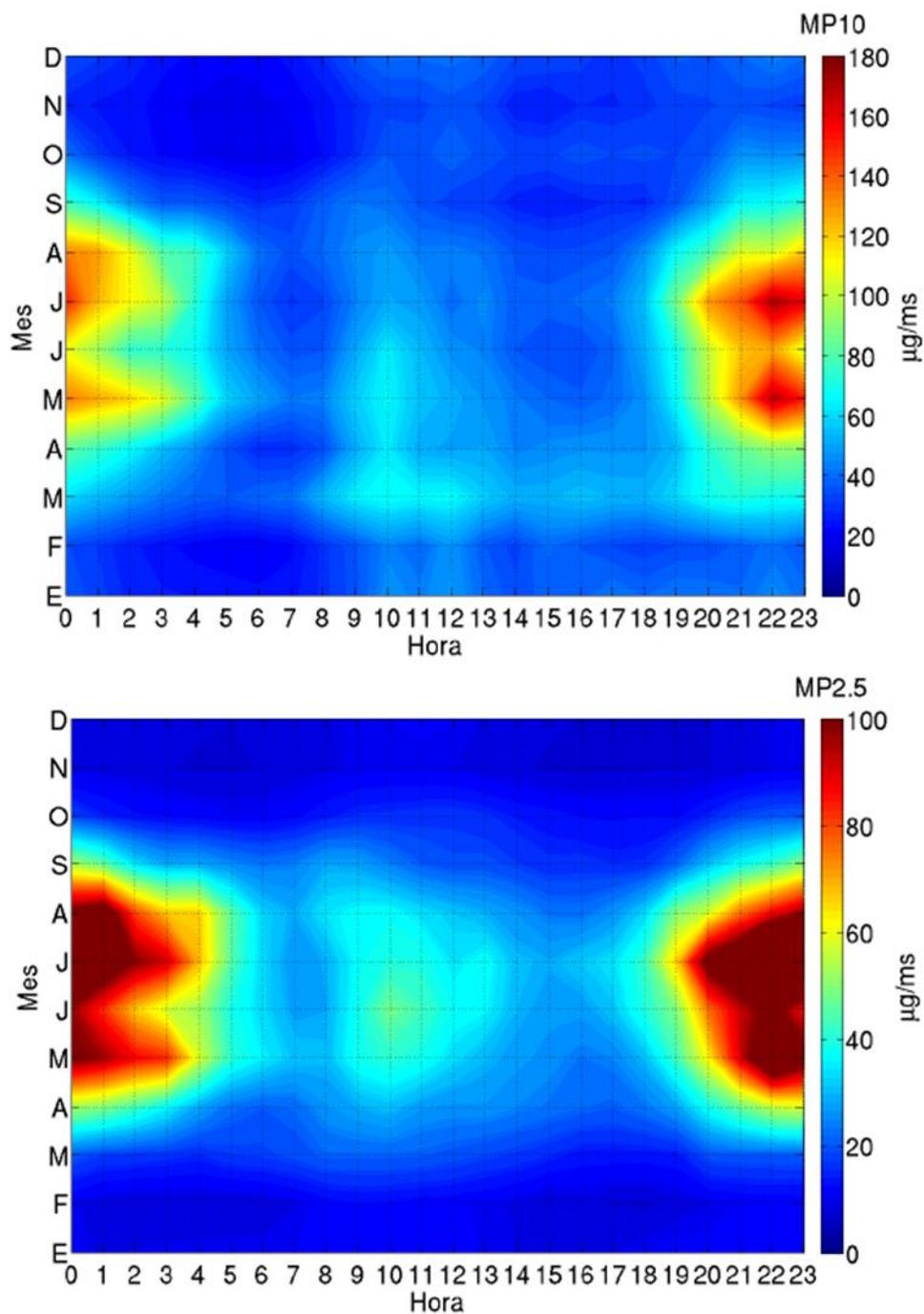


Figura 13. Ciclo estacional horario de las concentraciones de MP10 (panel superior) y de MP2.5 (panel inferior) (Fuente: UNTEC, 2015).

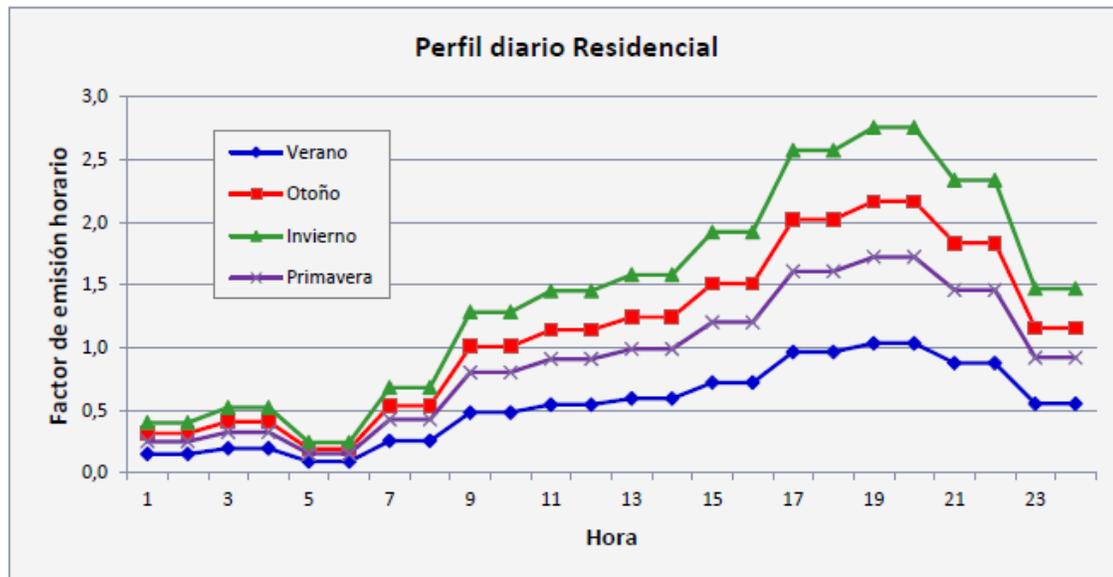


Figura 14. Ciclo diario de emisiones residenciales por estación del año, expresadas como factor de emisión horario, la hora está en formato local (Fuente: figura extraída de Stocker, 2010)

5.3 Relación entre las variables meteorológicas y concentraciones de MP10 y 2.5

Con el propósito de relacionar las concentraciones con las variables meteorológicas, se compararon las anomalías estandarizadas de MP10 y MP2.5 con las anomalías de las variables meteorológicas mediante gráficos de dispersión y a su vez se obtuvo el coeficiente de correlación de Pearson (r). La dispersión fue realizada para dos períodos, uno considerando todas las horas del día y otro sólo el período nocturno (00 – 09 UTC) donde ocurren las máximas concentraciones, con el objetivo de observar en que mes del período existe mayor relación. Las figuras 16 y 17 exhiben las dispersiones obtenidas entre las anomalías de concentraciones (MP10 y MP2.5) y variables meteorológicas, tanto para el período completo como para el nocturno. Donde se observa que existe una débil relación

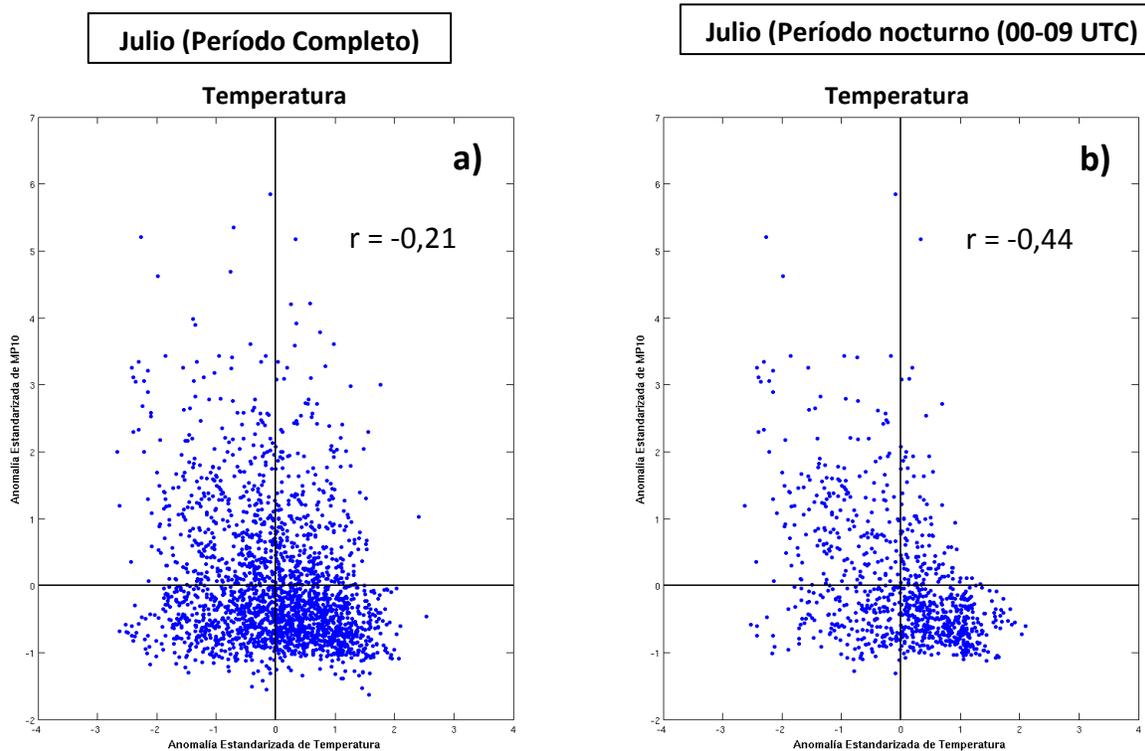
lineal entre las concentraciones y las variables de temperatura y razón de mezcla (figura 16 y 17, a-d) en el período que considera todas las horas del día, la cual mejora durante el período nocturno. En cambio para el caso de la magnitud del viento, al observar los gráficos de dispersión (figura 16 y 17 e-f) existe una evidente ausencia de relación lineal, en consecuencia no puede aplicarse el cálculo de las correlaciones, debido a que éste método sólo es válido para variables que presenten una relación lineal (Wilks, 2006). Al inspeccionar visualmente los gráficos de dispersión tanto para la temperatura como para la razón de mezcla, la relación lineal no es fuerte, pero es más clara que para la intensidad del viento.

La tabla 6 muestra las correlaciones mensuales obtenidas entre las series de anomalías de MP10 y MP2.5 y las variables meteorológicas, donde se aprecia que éstas son negativas para todos los meses, tanto para el período completo como para el nocturno. El signo negativo, indica que existe una relación inversa entre ellas, es decir que cuando se observan anomalías negativas de las variables meteorológicas (menor temperatura y baja humedad) las concentraciones tienden a aumentar. Sin embargo, los valores obtenidos no superan el valor -0.5, lo que da cuenta que la relación entre ambas variables (meteorológicas y concentraciones) es débil, lo que se traduce en una mayor dispersión de los datos, por lo tanto cabe la posibilidad que existan casos (menor frecuencia) en que ocurran bajas concentraciones de material particulado con presencia de bajas temperaturas y menor razón de mezcla. Cabe destacar que los valores de correlación fueron estadísticamente significativos al 99%, de acuerdo a la aplicación del test estadístico de Montecarlo (Wilks, 2006). Al analizar los valores de correlación estas aumentan al considerar el período nocturno, infiriendo que las mayores concentraciones de material particulado ocurren durante las horas de la noche, esto puede estar relacionado a que durante la noche existen condiciones de mayor estabilidad que durante las horas del día, la variable que mejor explica esa condición es la temperatura, alcanzando valores máximos de correlación de -0.44

DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE
 SECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y METEOROLOGÍA APLICADA
 OFICINA DE ESTUDIOS METEOROLÓGICOS

para MP10 en el mes de julio y -0.45 para MP2.5 en el mes de junio, mientras que valores máximos de correlación para la razón de mezcla fueron de -0.38 para MP10 y -0.36 para MP2.5 en el mes de julio.

A modo de ejemplo se muestran las dispersiones correspondientes al mes de julio para las concentraciones de MP10 y junio para MP2.5, debido a que esos meses son representativos de la época invernal, y además fueron los meses donde se encontraron las mayores relaciones entre las variables dado por el valor de correlación (r), el resto de las figuras se encuentran como anexo.



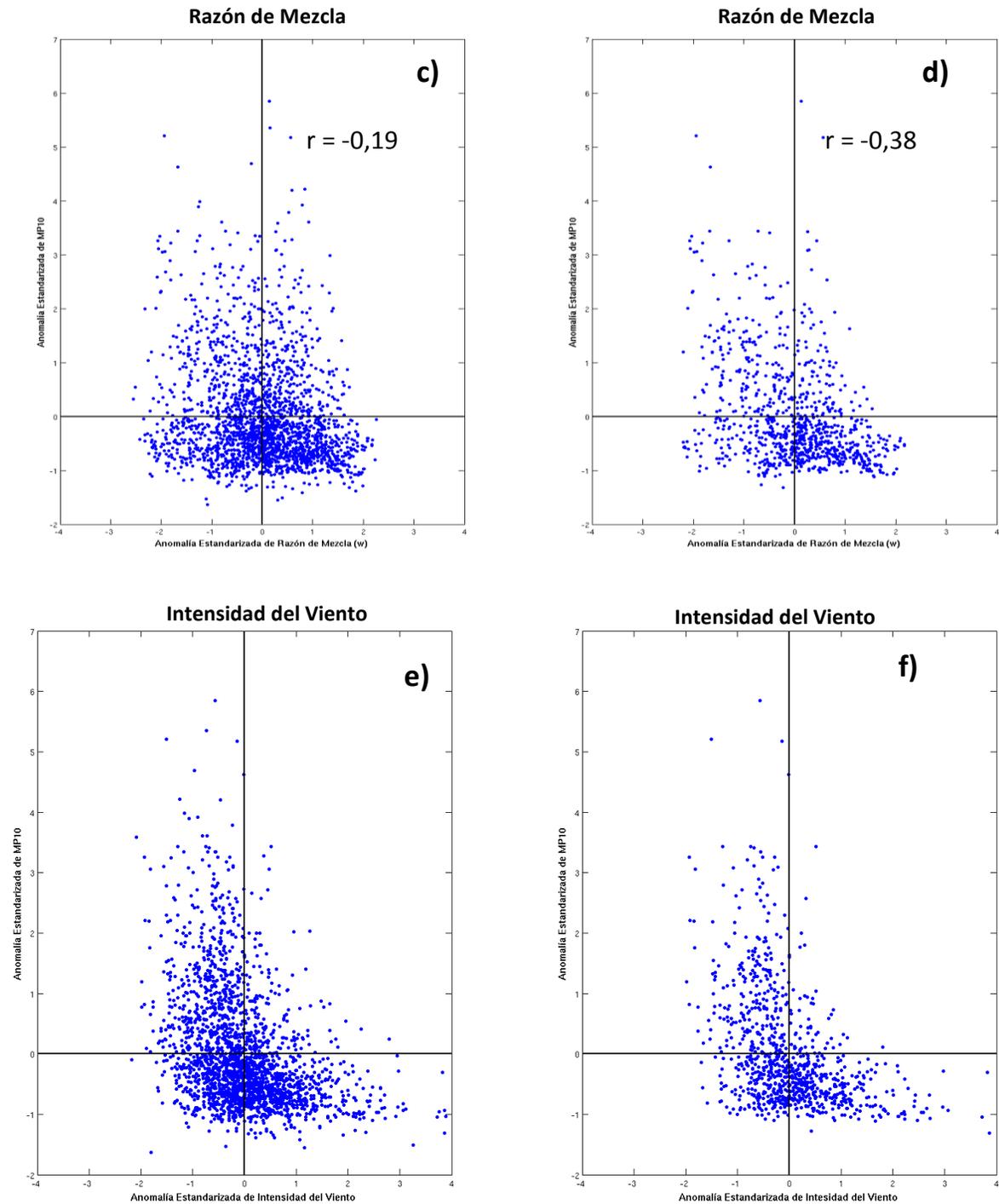
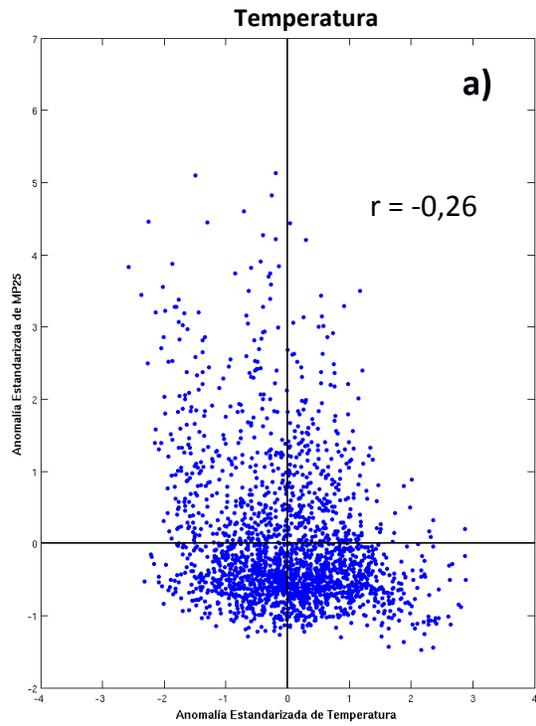
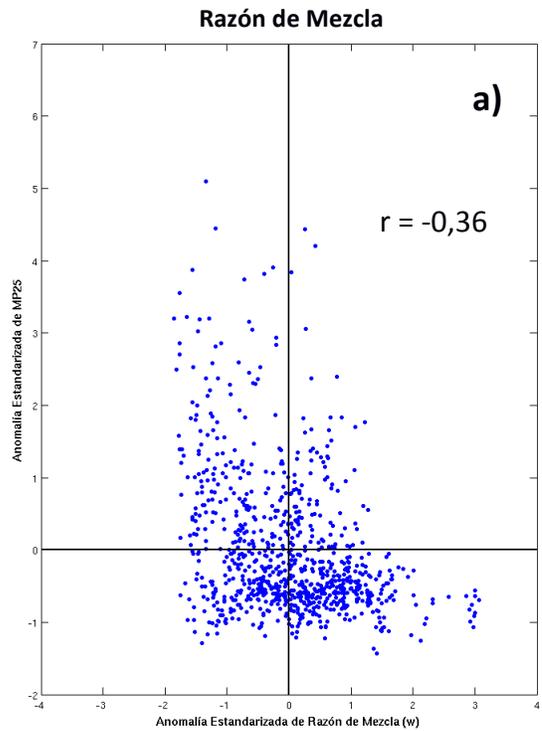
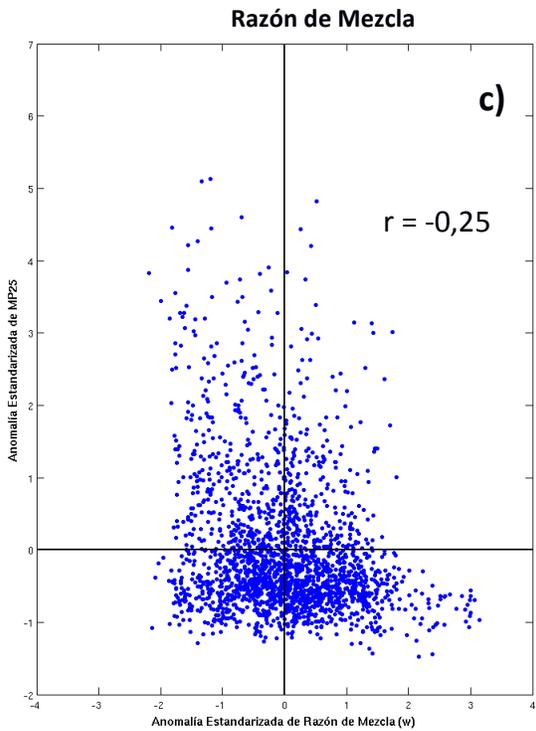
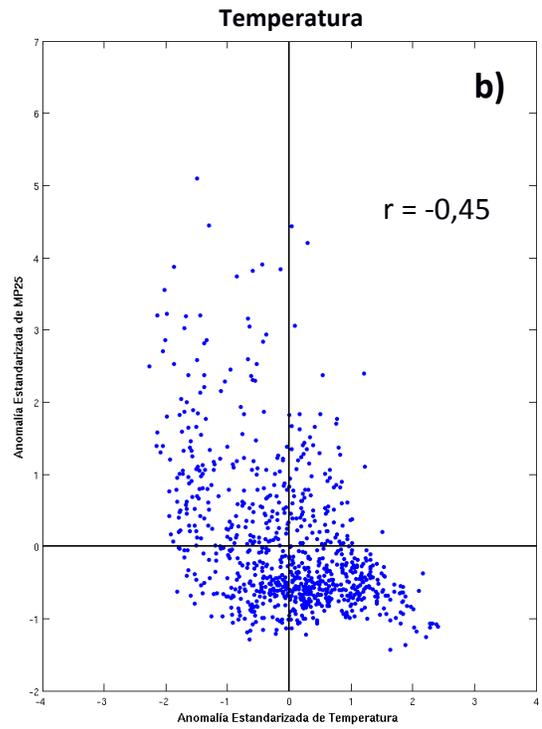


Figura 15. Dispersiones entre las anomalías de concentraciones de MP10 y variables meteorológicas (a – f), para el mes de julio correspondiente al período completo (panel izquierdo) y nocturno (panel derecho) para los años 2013 al 2015.

Junio (Período Completo)



Junio (Período Nocturno 00-09 UTC)



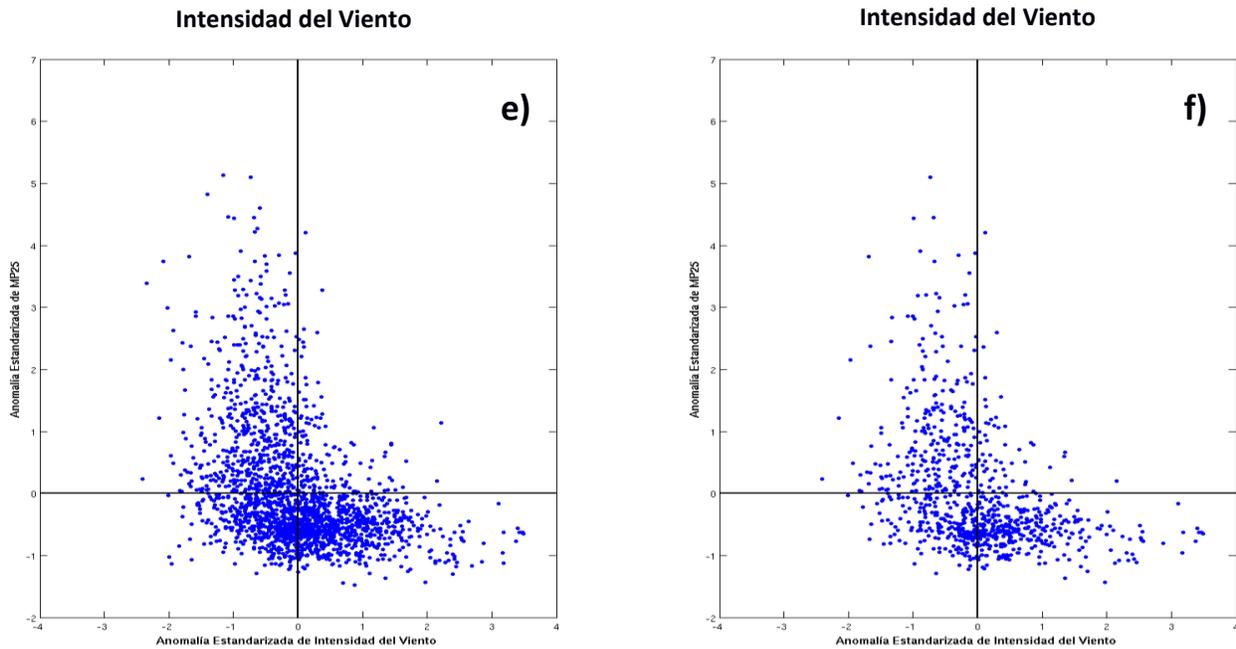


Figura 16. Dispersiones entre las anomalías de concentraciones de MP2.5 y variables meteorológicas (a – f), para el mes de junio correspondiente al período completo (panel izquierdo) y nocturno (panel derecho) para los años 2013 al 2015.

Tabla 6: Valor de correlación (r) obtenido entre anomalías de concentraciones (MP10 y 2.5) y anomalías de variables meteorológicas, para los meses de abril a septiembre de los años 2013 al 2015.

Variables	Mes	Periodo Completo		Periodo Nocturno	
		MP10	MP2.5	MP10	MP2.5
Temperatura	Abril	-0,04	-0,23	-0,38	-0,40
	Mayo	-0,21	-0,25	-0,40	-0,41
	Junio	-0,21	-0,26	-0,38	-0,45
	Julio	-0,21	-0,22	-0,44	-0,44
	Agosto	-0,19	-0,22	-0,43	-0,39
	Septiembre	-0,14	-0,25	-0,20	-0,26
	Razón de Mezcla	Abril	0,02	0,00	-0,03
Mayo		-0,24	-0,24	-0,33	-0,32
Junio		-0,23	-0,25	-0,32	-0,36
Julio		-0,19	-0,15	-0,38	-0,36
Agosto		-0,13	-0,12	-0,31	-0,28
Septiembre		-0,06	-0,07	-0,16	-0,17

5.4 Análisis de patrones sinópticos asociados a eventos de altas concentraciones de MP10 y MP2.5 en Curicó: Análisis de Conglomerados

En esta sección se analizarán las configuraciones sinópticas asociadas a episodios de alta contaminación de material particulado 10 y 2.5 en Curicó, con el objetivo de encontrar patrones meteorológicos que se relacionen con estas condiciones y que a su vez sirvan de utilidad al pronóstico operativo de calidad del aire de ambos materiales en la ciudad. A continuación se presentan los resultados de los conglomerados que concentran el mayor porcentaje de los campos meteorológicos de presión a nivel medio del mar y geopotencial en 500 hPa.

Para los episodios de altas concentraciones de MP10 y 2.5, los compuestos de los campos de presión a nivel medio del mar y espesores de 1000-500 hPa (figura 18)

mostraron al igual que en el trabajo de Hernández y Arroyo (2014) la aproximación y presencia de una alta fría migratoria (figuras 18 a – b) que en conjunto concentran el 48% del total de casos. Por su parte el compuesto de la figura 18c muestra una situación pre-frontal, la cual contribuye al empeoramiento de la calidad de aire en la zona, el cual agrupa el 22% de los episodios totales. Mientras que la figura 18d señala una configuración sinóptica de alta presión que puede estar asociado con el anticiclón subtropical, la cual representa un 30% del total de los casos.

Por otra parte la figuras 19a y 19b representan dos configuraciones sinópticas en 500 hPa asociadas a dorsales. El primer grupo señala un eje de dorsal posicionado sobre la zona de estudio, el cual podría estar relacionado con el punto culmine de la subsidencia, mientras que el segundo, indica el paso de este eje hacia el lado argentino, lo cual podría continuar con condiciones favorables a la mala ventilación de la zona, ambos clústeres representan el 22 y 31% del total de casos. La figura 19c, señala el paso de una vaguada en la troposfera media ubicado justo sobre el área de interés, la cual provoca el ingreso de aire frío, dado por los valores bajos de altura geopotencial, lo que da cuenta que éste aire es más frío que los clústeres descritos previamente. Este grupo concentró un 28% de los casos totales respectivamente. Finalmente, en el clúster de la figura 19d, se observa un flujo zonal al sur de los 35°S con un gradiente de geopotencial intenso, este patrón sinóptico refleja condiciones medias típicas de la época, es decir el desplazamiento del cinturón de bajas presiones extra tropicales hacia latitudes menores.

DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE
 SECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y METEOROLOGÍA APLICADA
 OFICINA DE ESTUDIOS METEOROLÓGICOS

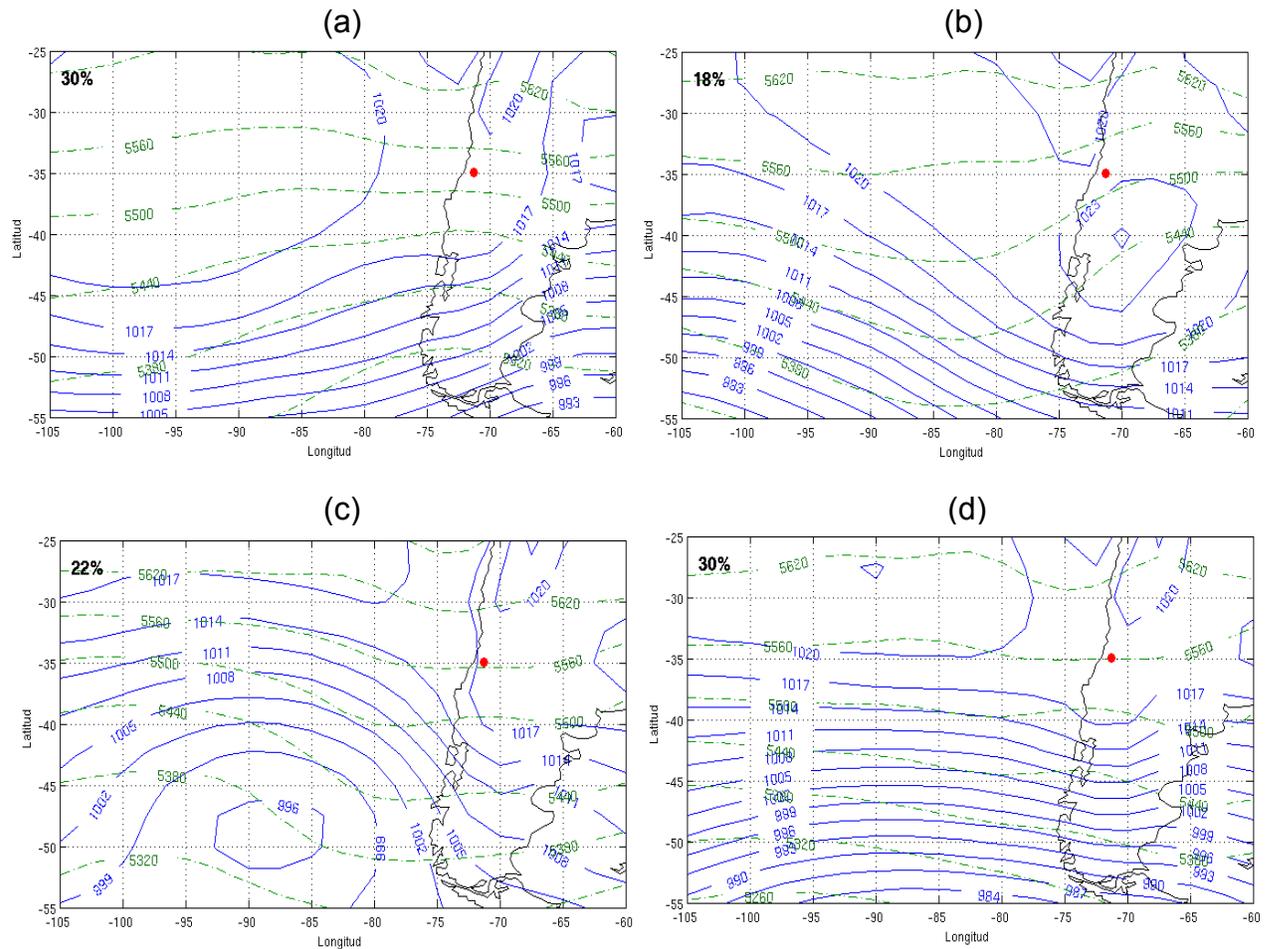


Figura 17. Compuestos de clústeres para los campos de presión a nivel medio del mar (hPa, líneas continuas azules) y espesores de 1000-500 (m.g.p, líneas segmentadas en verde) correspondiente a episodios de contaminación con su respectivo porcentaje que representa cada compuesto. En punto rojo da cuenta de la ubicación de la zona de estudio.

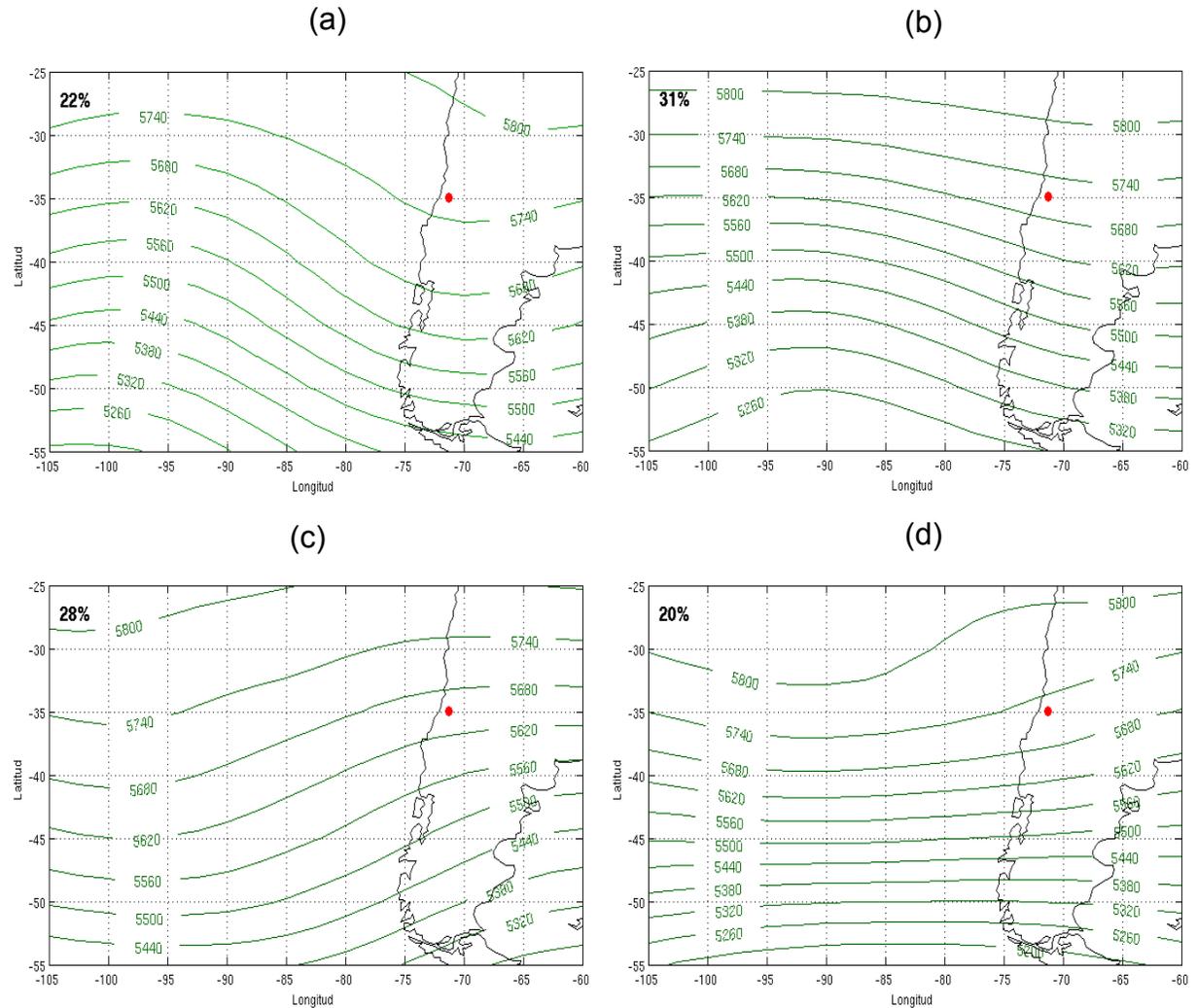


Figura 18. Compuestos de clústeres para el campo de altura geopotencial en 500 hPa, (líneas continuas verdes cada 60 m.g.p) correspondiente a episodios de contaminación con su respectivo porcentaje que representa cada compuesto. En punto rojo da cuenta de la ubicación de la zona de estudio.

VI. CONCLUSIONES

En cuanto al comportamiento medio diario de las concentraciones (MP10 y MP2.5) en Curicó, se observaron dos máximos uno producido durante la noche entre las 00 – 03 UTC (20:00 – 23:00 hora local) y otro durante la mañana entre las 11 – 14 UTC (07:00 – 10:00 hora local). El primer aumento, se atribuye principalmente al mayor uso de calefacción domiciliaria, lo cual es reforzado por las condiciones meteorológicas asociadas a poca ventilación (viento débil), menor temperatura y baja humedad, lo que se traduce en un aumento de la estabilidad atmosférica. En cambio el segundo máximo, está directamente relacionado con las actividades cotidianas de la ciudad, por lo tanto se concluye que la capa de mezcla superficial se encuentra más dilatada respecto de lo sucedido en la noche.

Estadísticamente se encontró que la relación entre las variables meteorológicas y concentraciones es inversa, es decir, cuando se observan bajas temperaturas y poca humedad las concentraciones tienden a aumentar. Además dicha relación exhibida entre ambas variables meteorológicas y de concentraciones es más fuerte en julio para MP10 y junio para MP2.5, principalmente durante las horas de la noche, donde alcanza el mayor porcentaje de varianza explicada ~20%. Para el caso del viento no fue posible obtener una relación lineal, a pesar de ello, esta variable tiene una influencia en el comportamiento del material particulado en la zona similar a lo señalado por la humedad y temperatura, ya que cuando disminuye la intensidad del viento tienden a aumentar las concentraciones o vice-versa.

Para los episodios que exhiben altas concentraciones tanto de MP10 como MP2.5 en la zona, se encontraron a través del análisis de conglomerados que el 48% de los casos están asociados con la aproximación y presencia de altas presiones de origen frío, el 22% a aproximaciones pre-frontales y el 30% restante a la presencia de una alta presión de origen subtropical. En 500 hPa, el 53% del total de eventos se relacionan con la presencia y paso de ejes de dorsales por la zona de estudio,

mientras que un 28% a una vaguada en la troposfera media, la cual cruza el área de interés contribuyendo con el ingreso de aire más frío a la región. Finalmente el 20% restante se relacionan con condiciones típicas de la época, es decir flujo zonal al sur de los 35°S correspondiente con el cinturón de bajas presiones extra tropicales que incursionan hacia latitudes menores.

VI. BIBLIOGRAFÍA

DMC (2001): Climatología Regional. Departamento de Climatología y Meteorología Aplicada, Dirección Meteorológica de Chile (DMC).

Gallardo L., Olivares G., Langer J. Y Aarhus B., (2002): Coastal lows and sulfur air pollution in Central Chile. *Atmospheric Environment* 36:3829-3841.

Garreaud R. (2011): Factores del clima en Chile: Una mirada continental. Capítulo I. Departamento de Geofísica. Universidad de Chile. Santiago 13 pp.

Hernández Y. y Arroyo R. (2014): Estudio de episodios de alta contaminación en Temuco y configuraciones sinópticas asociadas. *Revista Stratus*, Dirección Meteorológica de Chile.

Jorquera H. (2008): Apuntes de contaminación atmosférica. Santiago de Chile.

Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República (2013): Norma de calidad primaria para material particulado respirable MP10, en especial de los valores que definen situaciones de emergencia y deroga decreto N°59, de 1998 del ministerio secretaría general de la presidencia. 16 de diciembre 2013. Santiago de Chile.

Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República (2011): Norma primaria de calidad ambiental para material particulado fino respirable MP2.5. D.S.N°12 de 1 de enero de 2012. Santiago de Chile.

Organización Mundial de la Salud (OMS) (2004): Health aspects of air pollution, results from the WHO project: "Systematic review of health aspects in Europe". Copenhage, Dinamarca.

Rutllant J. y Garreaud R. (1995): Meteorological air pollution potential for Santiago, Chile: towards an objective episode forecasting. *Environmental Monitoring and Assessment* 34:223-244.

Sierra M. (2006): Establecer la asociación existente entre las variables meteorológicas temperatura, velocidad del viento y precipitación y las concentraciones de PM10 registradas en la red de calidad del aire de Bogotá D.C. Tesis de grado Ingeniería ambiental y sanitaria.

Stocker D. (2010): Dispersión del MP10 en Temuco: Construcción del escenario base y análisis del cumplimiento de la normativa ambiental. Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería.

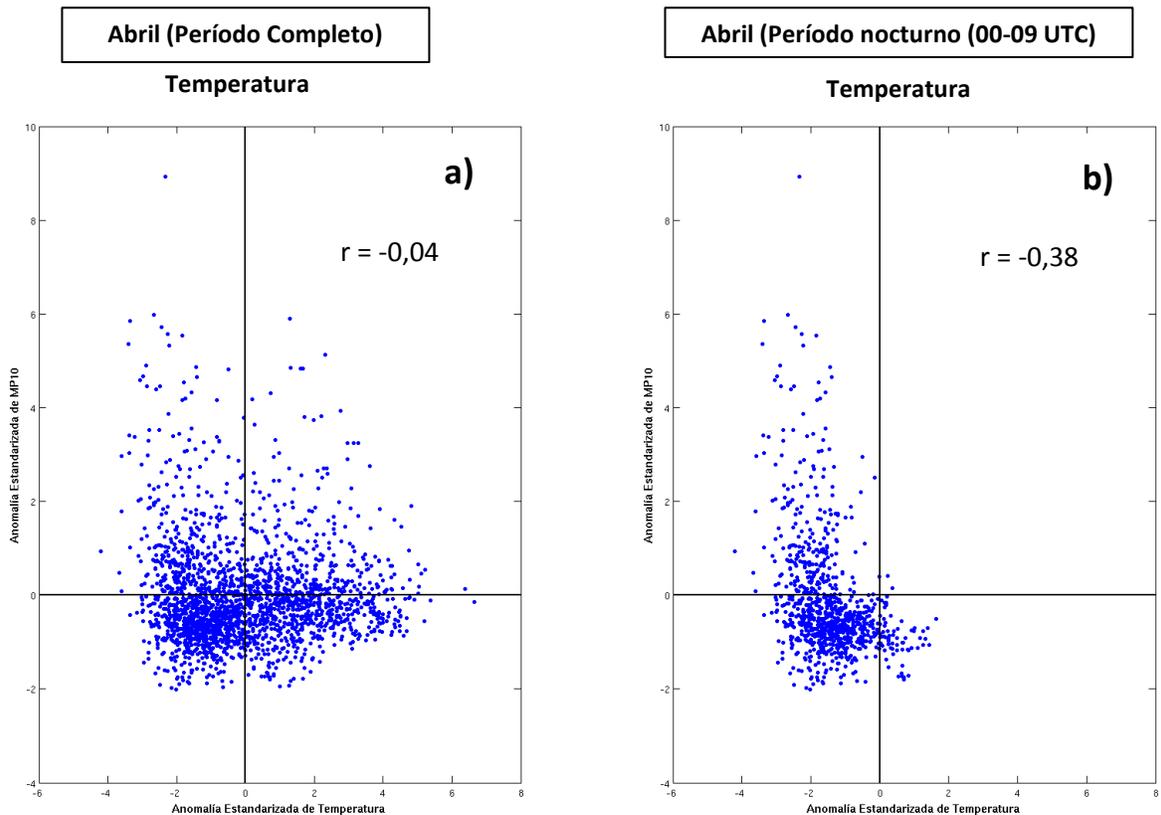
UNTEC (2015): Caracterización del factor meteorológico asociado a contaminación atmosférica y propuesta de diseño de redes meteorológicas para el seguimiento y pronóstico de calidad del aire en cuatro regiones del sur de Chile. Informe Final, VII Región del Maule, Ciudad de Curicó. Informe preparado para el Ministerio del Medio Ambiente.

VII. ANEXO

7.1 Relación entre las variables meteorológicas y concentraciones de MP10 y MP2.5

7.1.1 Variables meteorológicas y MP10

A continuación se presenta el comportamiento de las concentraciones de MP10 en función de las variables meteorológicas en Curicó a través de gráficos de dispersión.



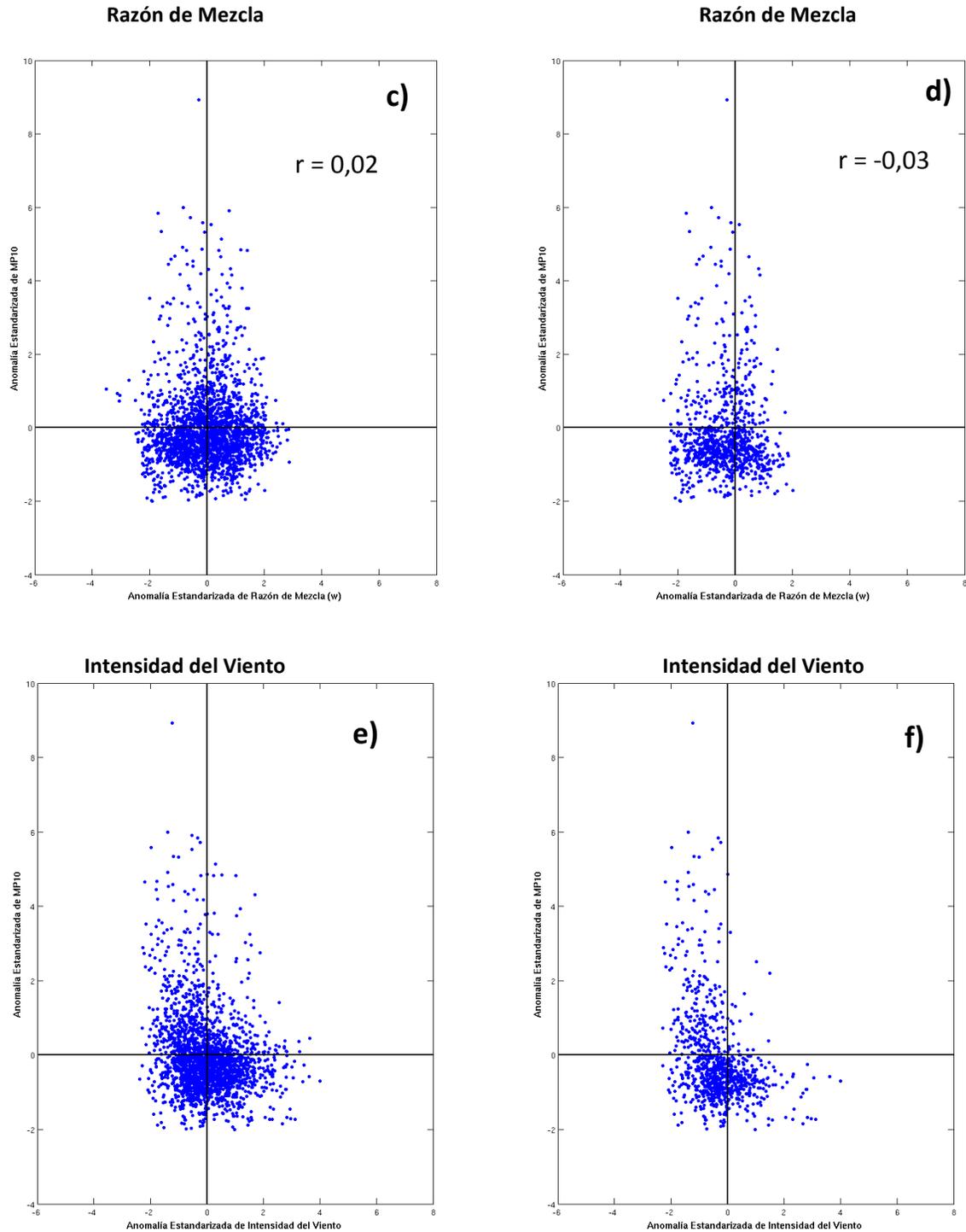
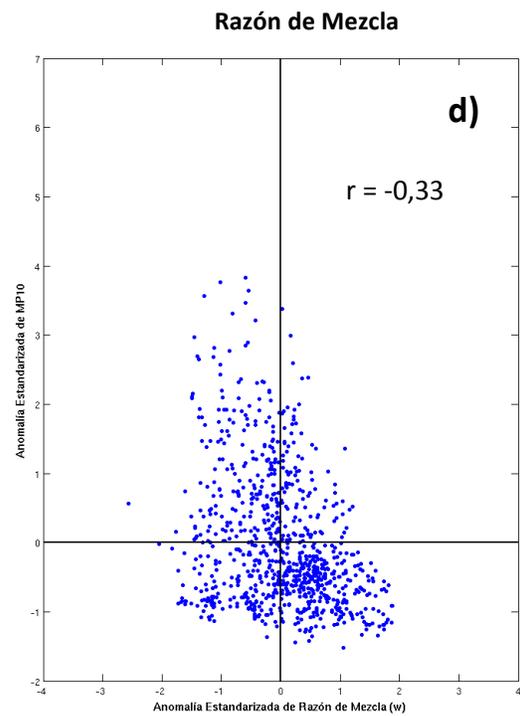
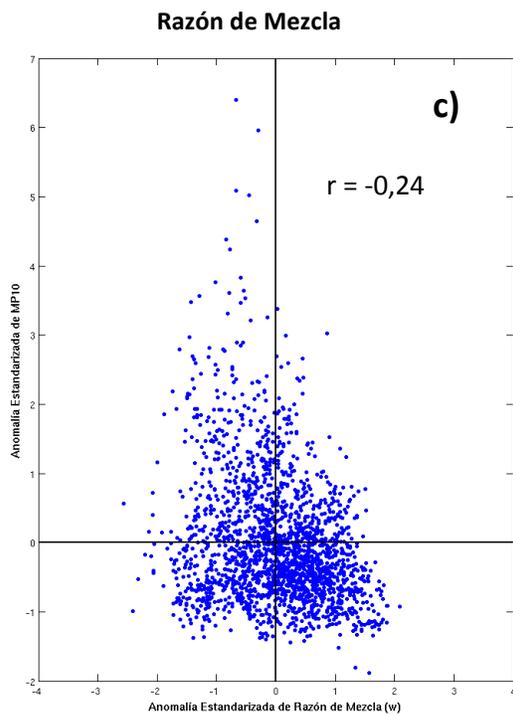
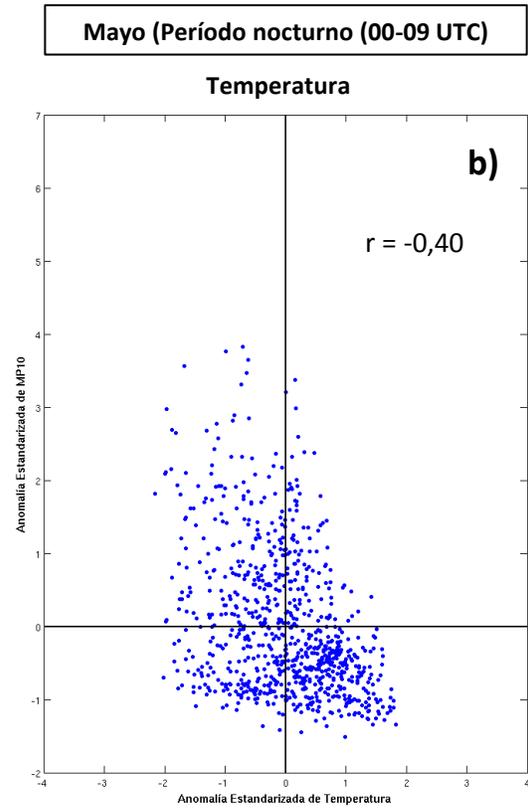
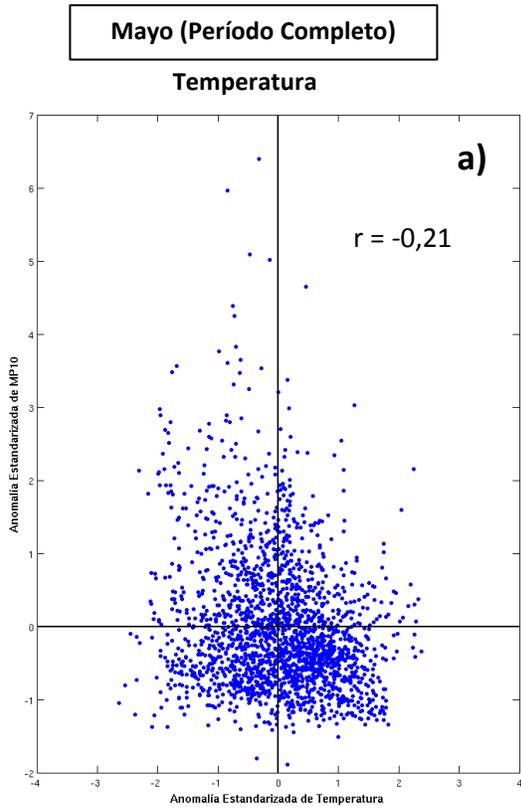


Figura 19. Dispersiones entre las anomalías de concentraciones de MP10 y variables meteorológicas (a – f), para el mes de abril correspondiente al período completo (panel izquierdo) y nocturno (panel derecho) para los años 2013 al 2015.



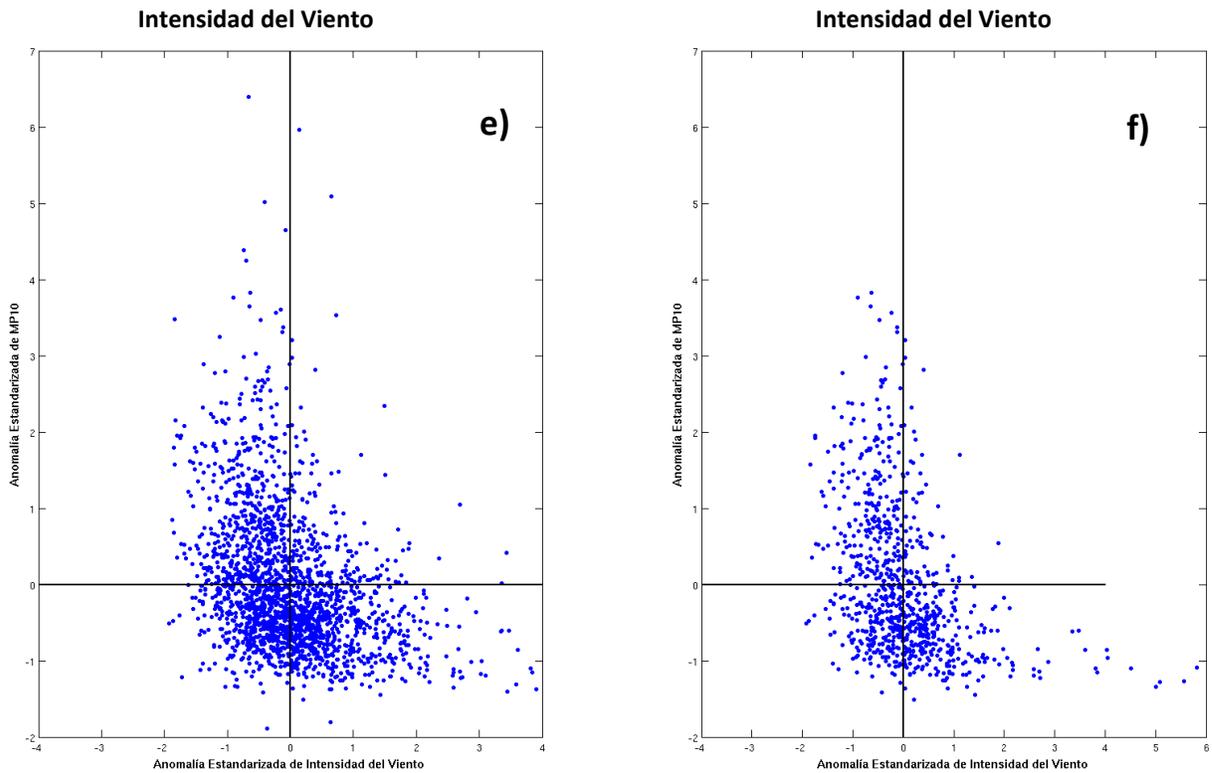
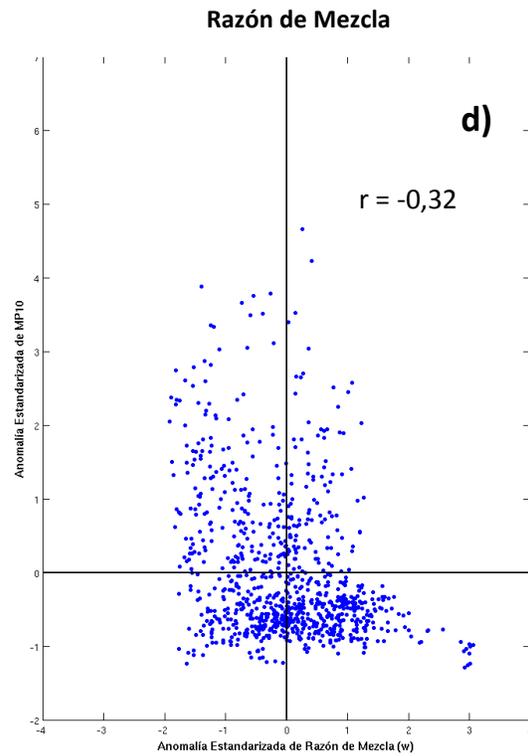
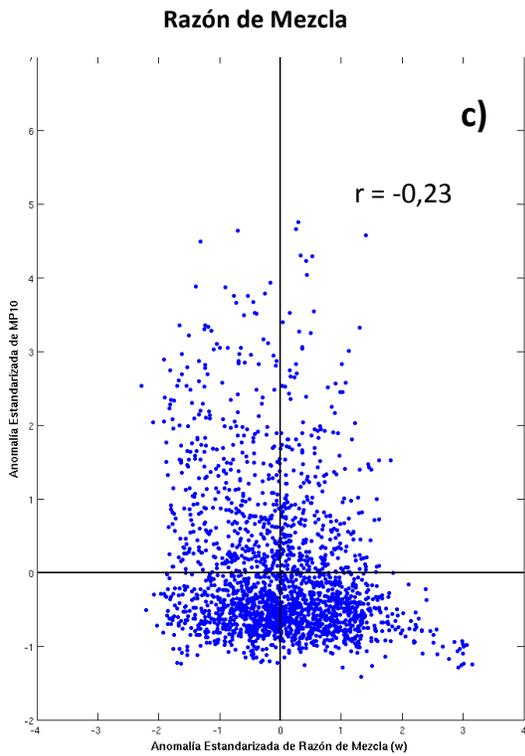
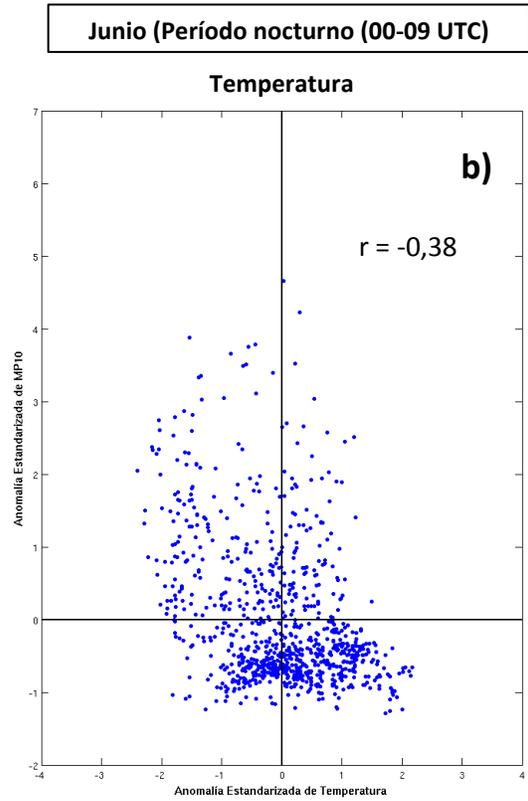
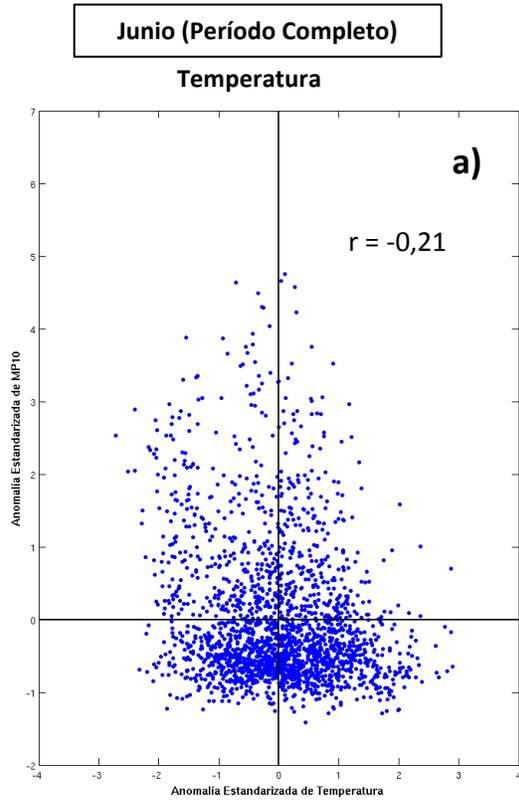


Figura 20. Dispersiones entre las anomalías de concentraciones de MP10 y variables meteorológicas (a – f), para el mes de mayo correspondiente al período completo (panel izquierdo) y nocturno (panel derecho) para los años 2013 al 2015.



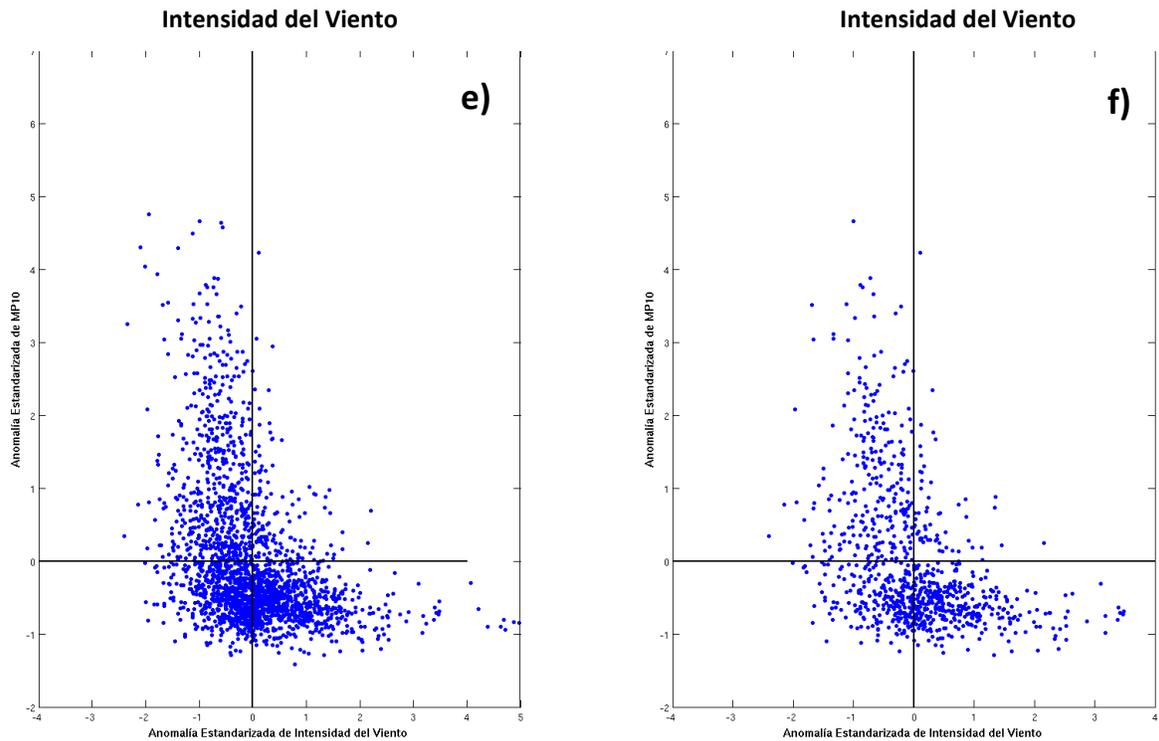
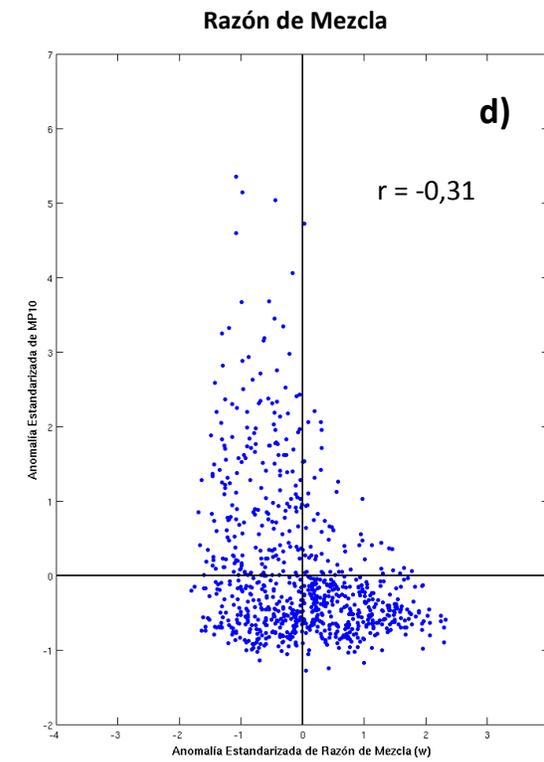
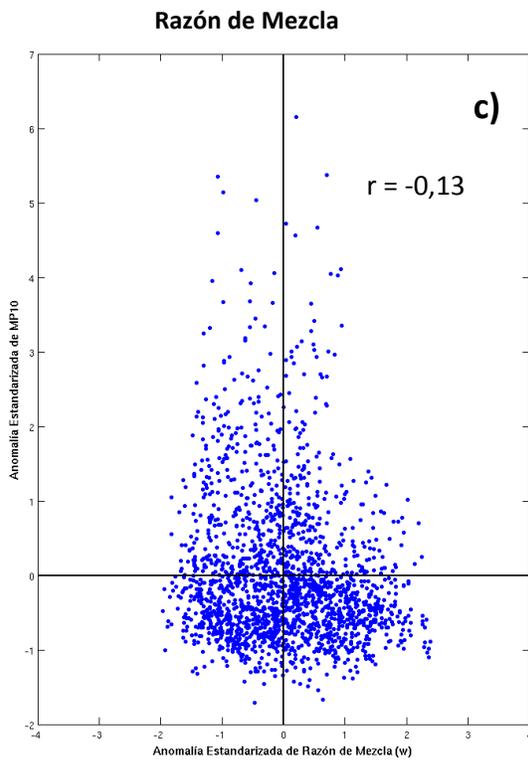
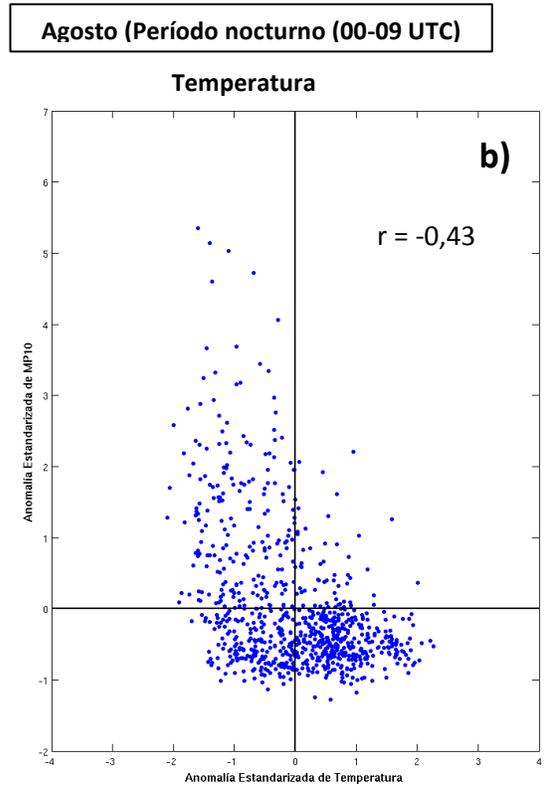
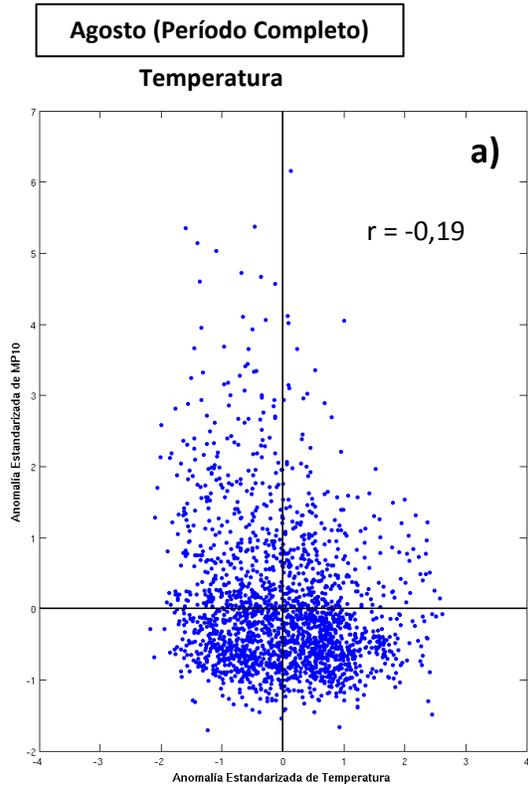


Figura 21. Dispersiones entre las anomalías de concentraciones de MP10 y variables meteorológicas (a – f), para el mes de junio correspondiente al período completo (panel izquierdo) y nocturno (panel derecho) para los años 2013 al 2015.



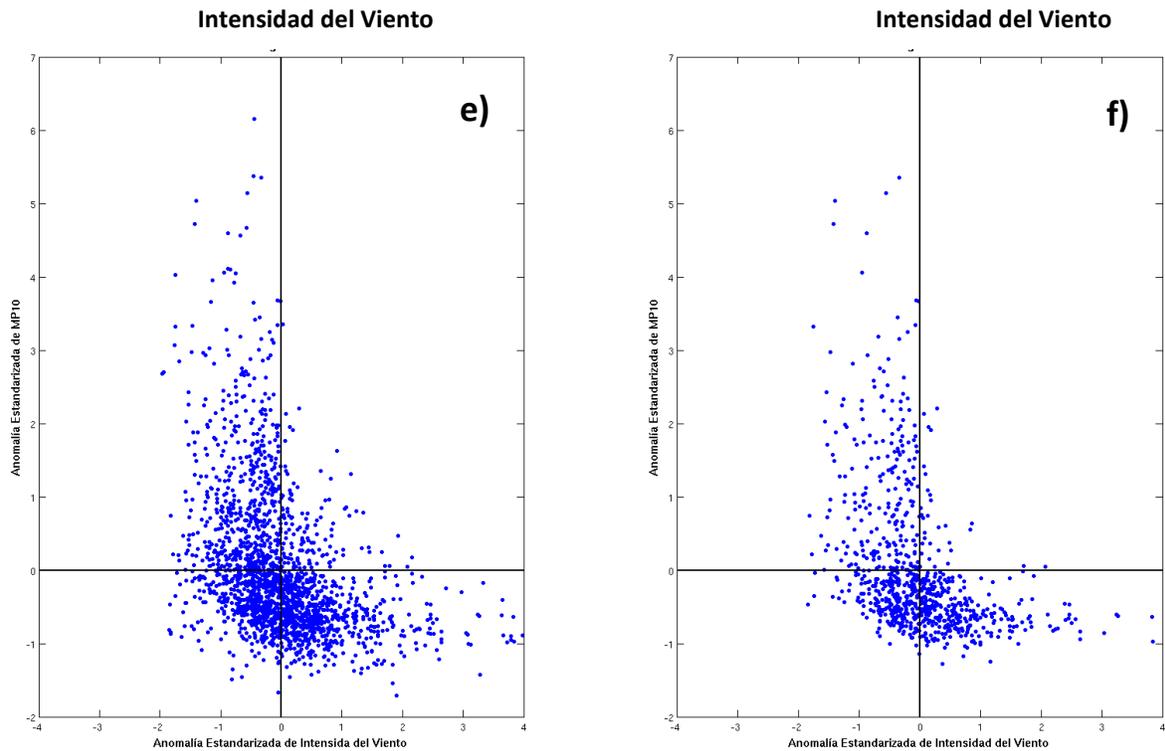
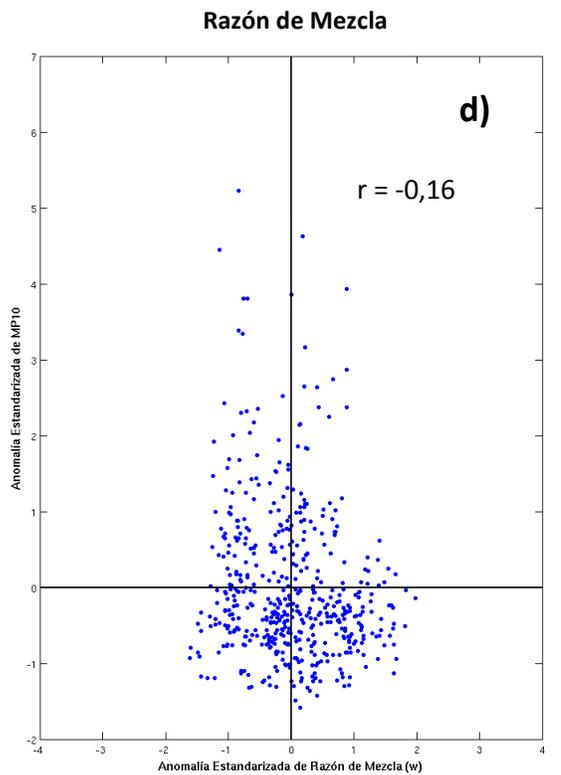
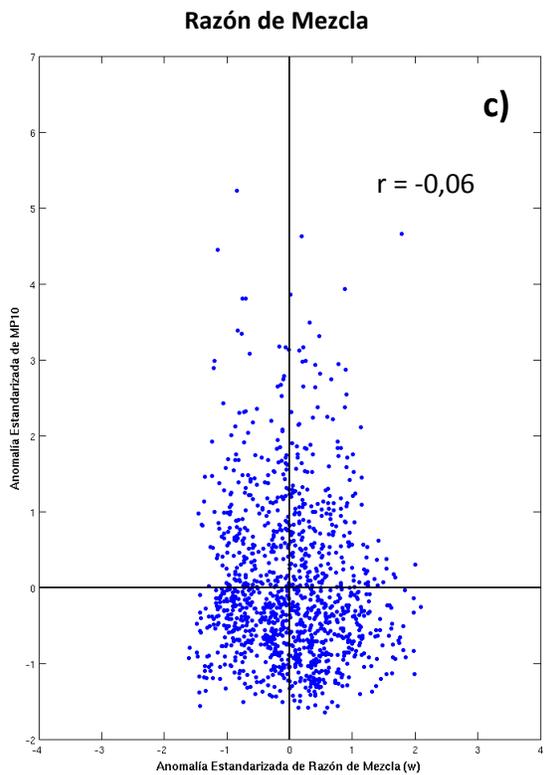
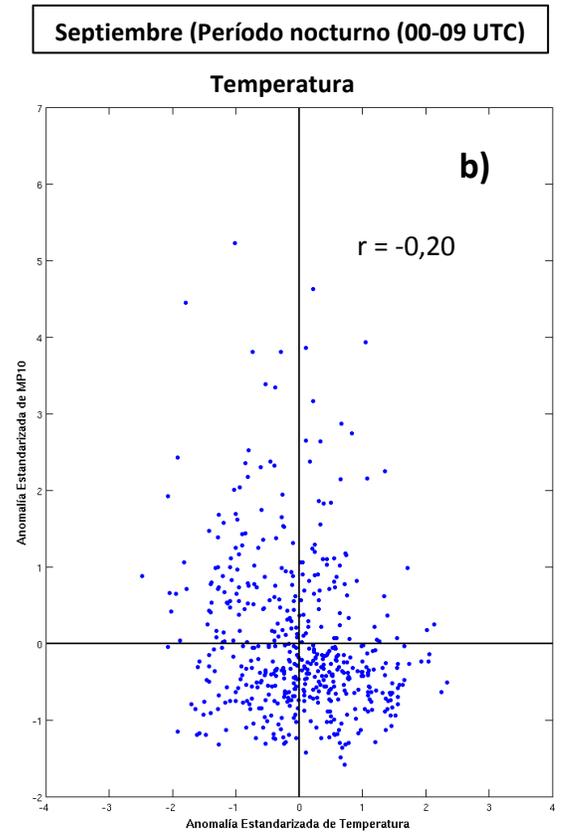
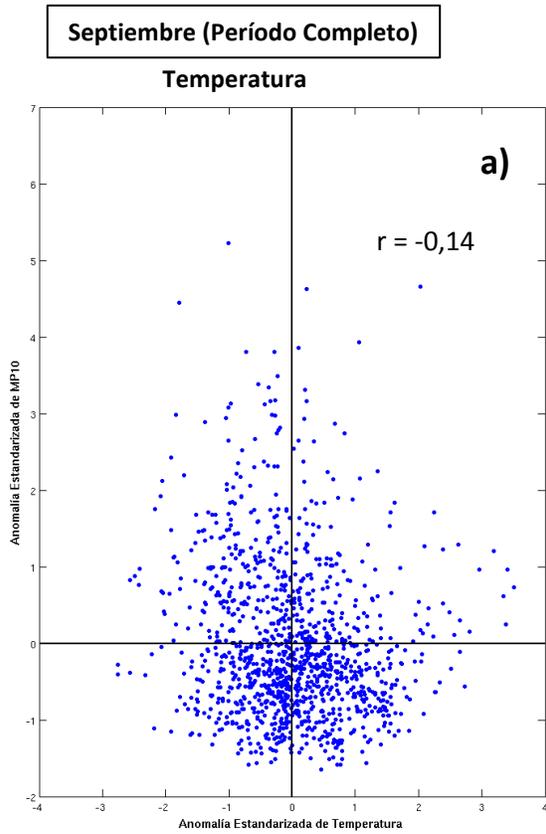


Figura 22. Dispersiones entre las anomalías de concentraciones de MP10 y variables meteorológicas (a – f), para el mes de agosto correspondiente al período completo (panel izquierdo) y nocturno (panel derecho) para los años 2013 al 2015.



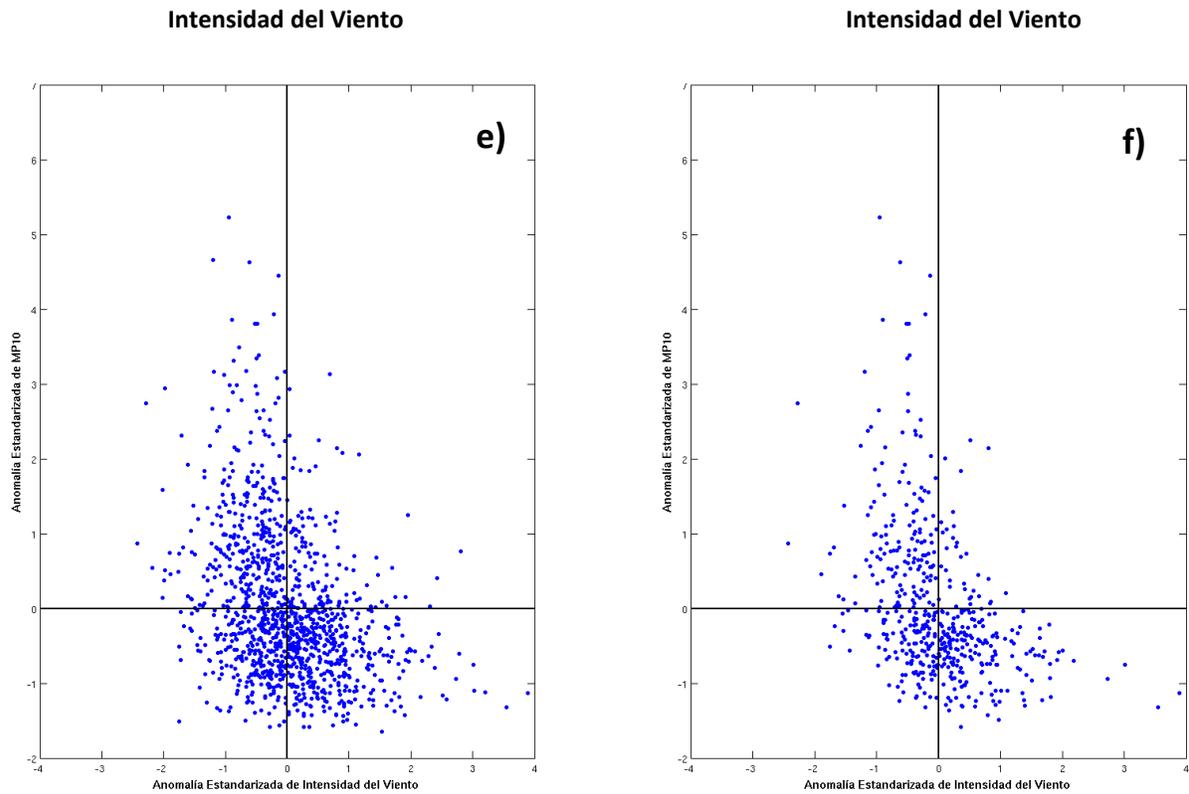
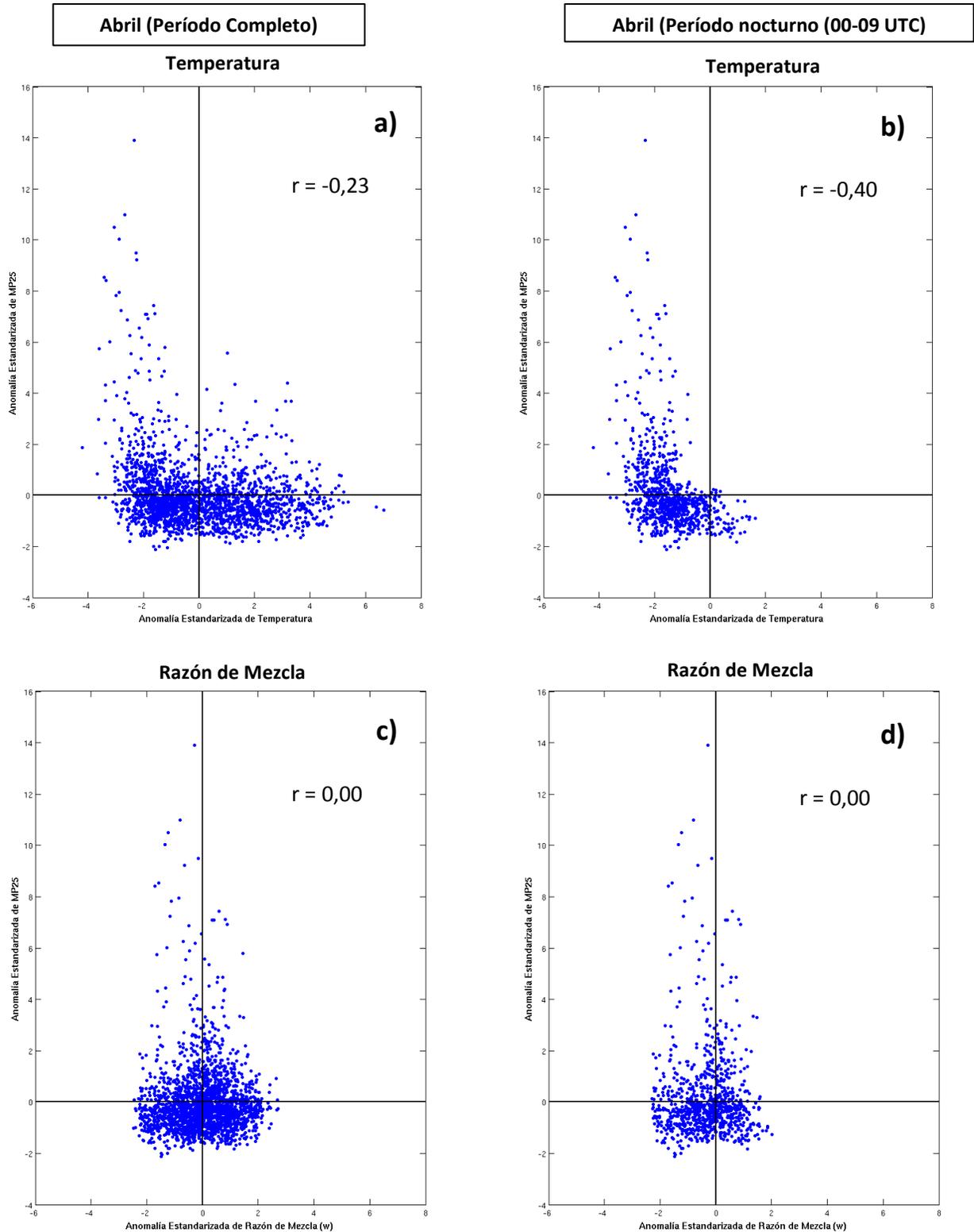


Figura 23. Dispersiones entre las anomalías de concentraciones de MP10 y variables meteorológicas (a – f), para el mes de septiembre correspondiente al período completo (panel izquierdo) y nocturno (panel derecho) para los años 2013 al 2015.

7.1.1 Variables meteorológicas y MP25



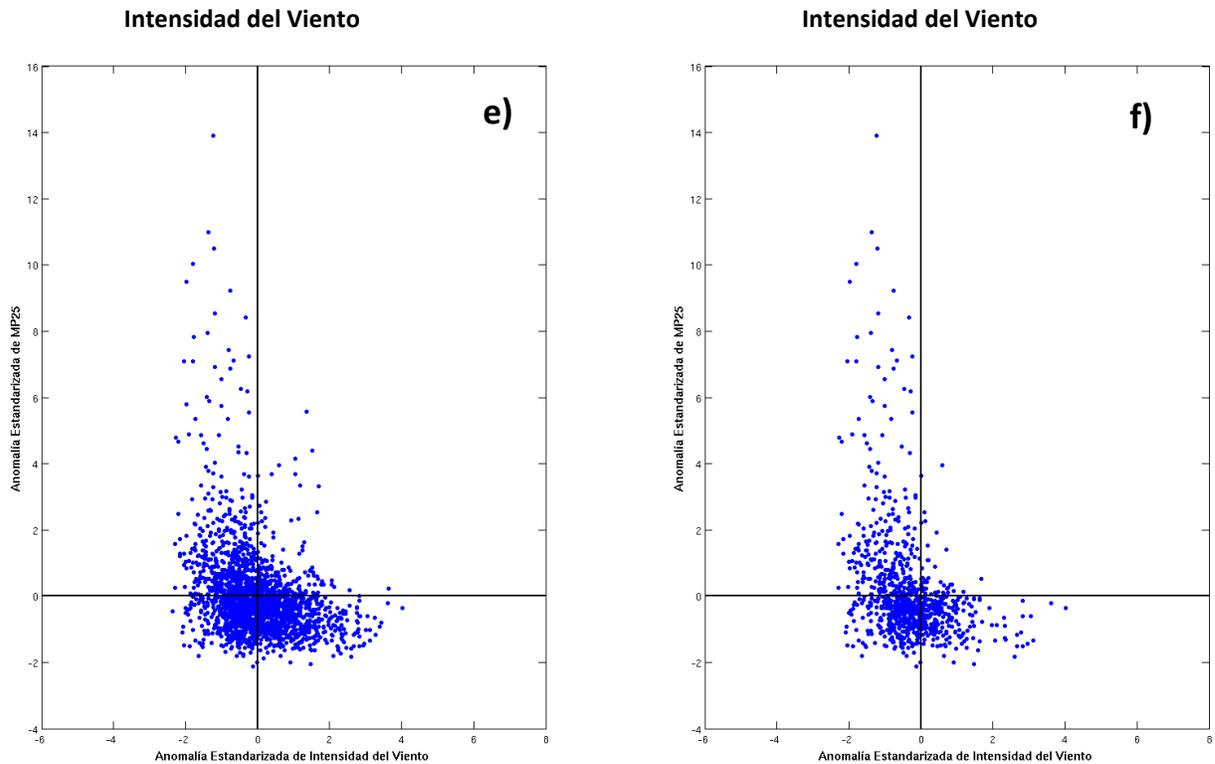
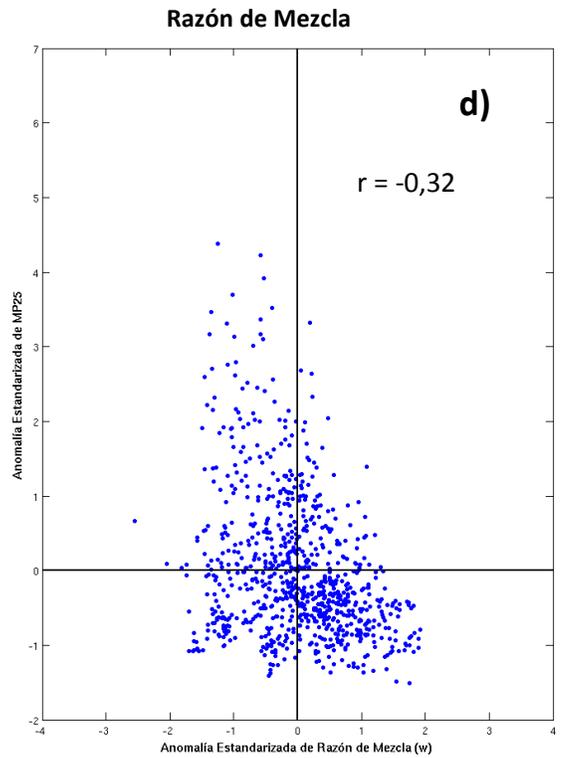
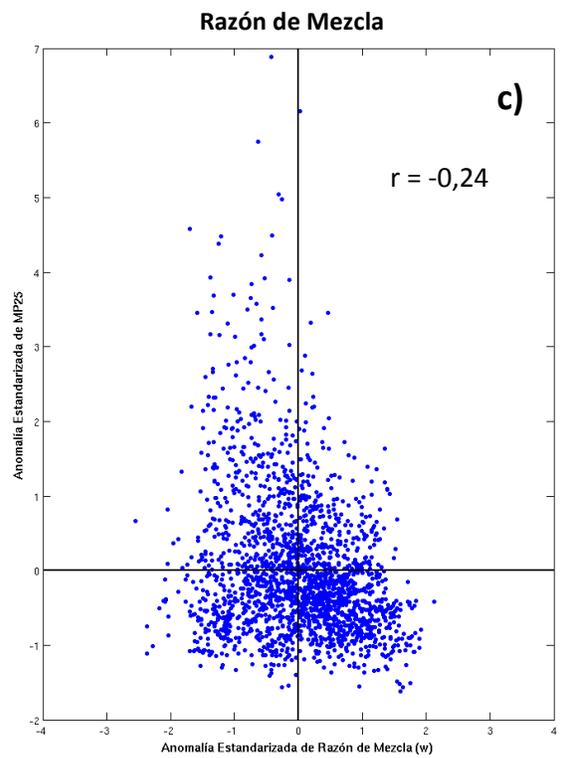
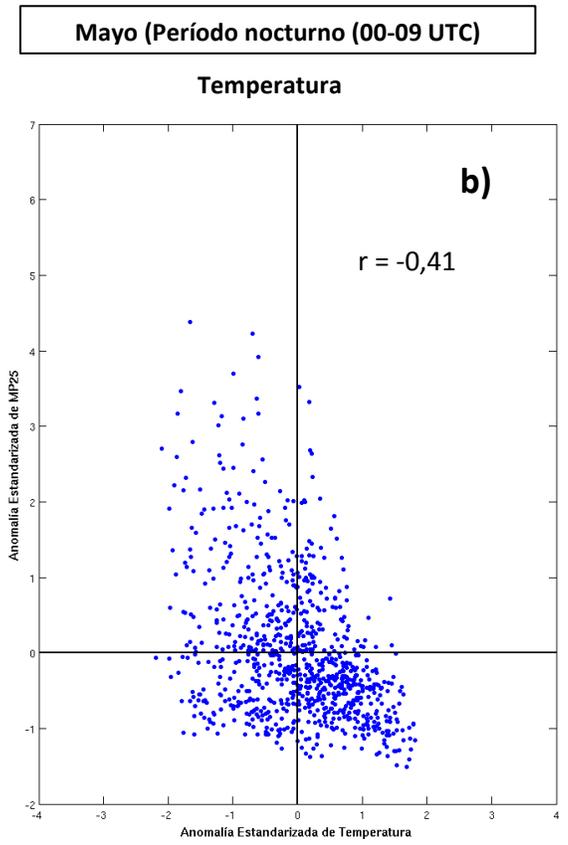
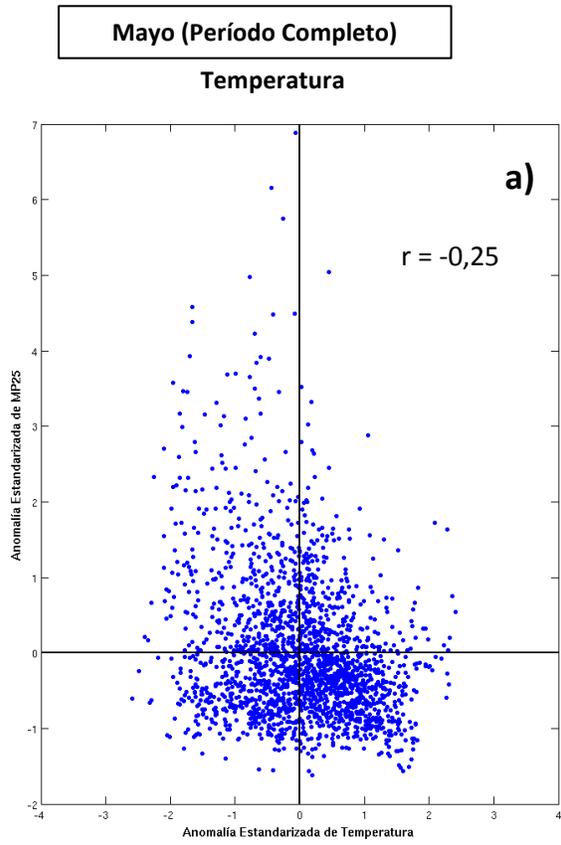


Figura 24. Dispersiones entre las anomalías de concentraciones de MP2.5 y variables meteorológicas (a – f), para el mes de abril correspondiente al período completo (panel izquierdo) y nocturno (panel derecho) para los años 2013 al 2015.



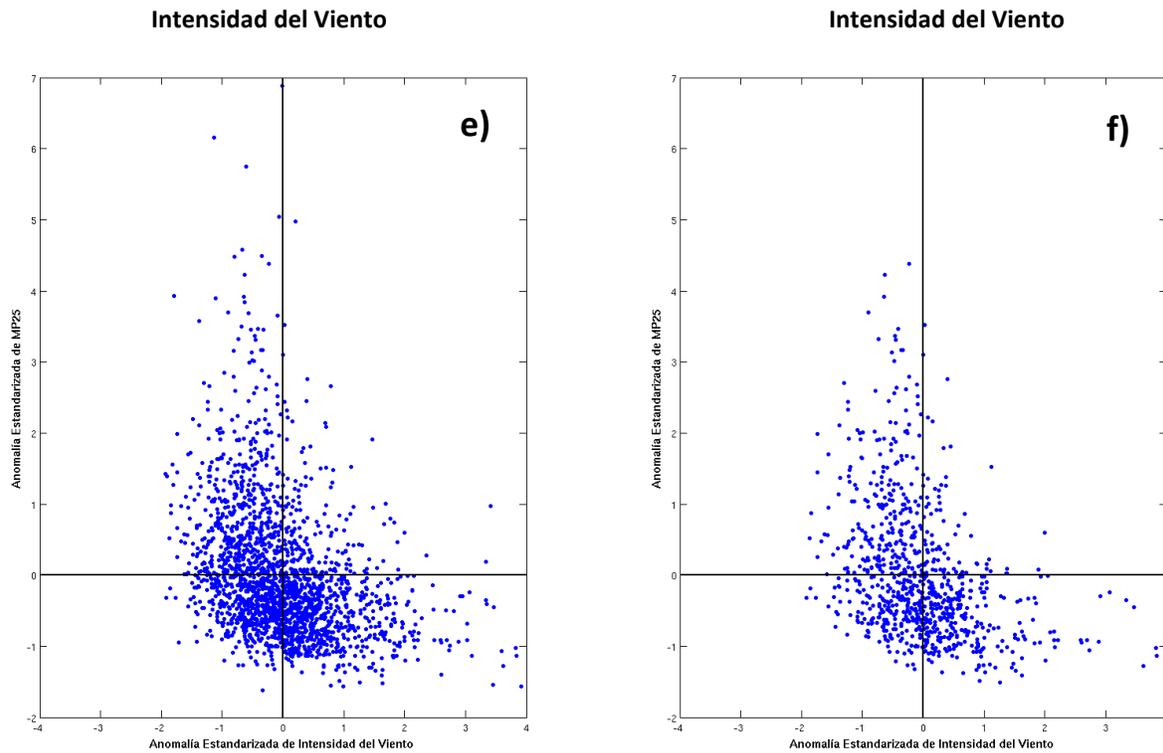
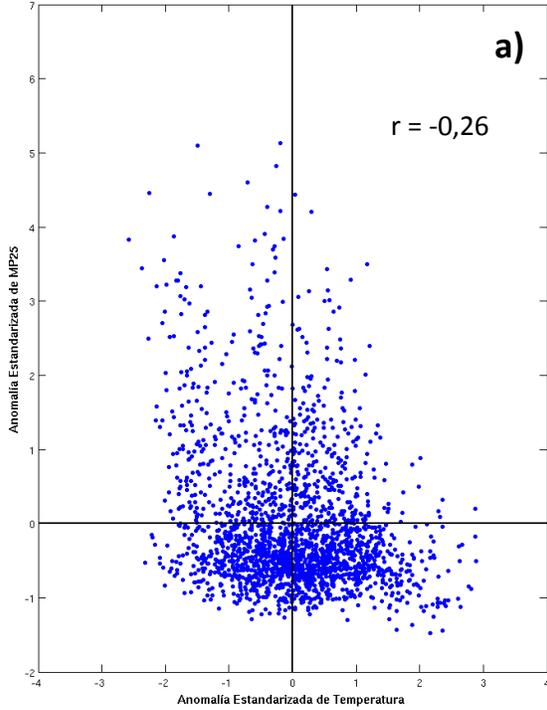


Figura 25. Dispersiones entre las anomalías de concentraciones de MP2.5 y variables meteorológicas (a – f), para el mes de mayo correspondiente al período completo (panel izquierdo) y nocturno (panel derecho) para los años 2013 al 2015.

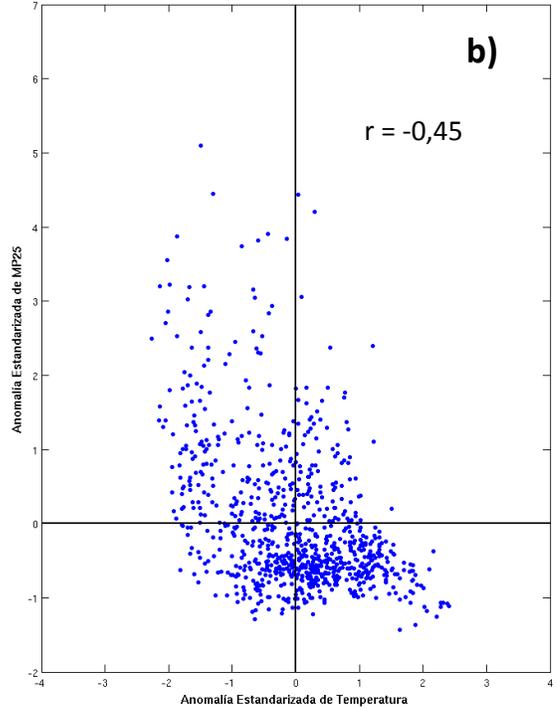
Junio (Período Completo)

Temperatura

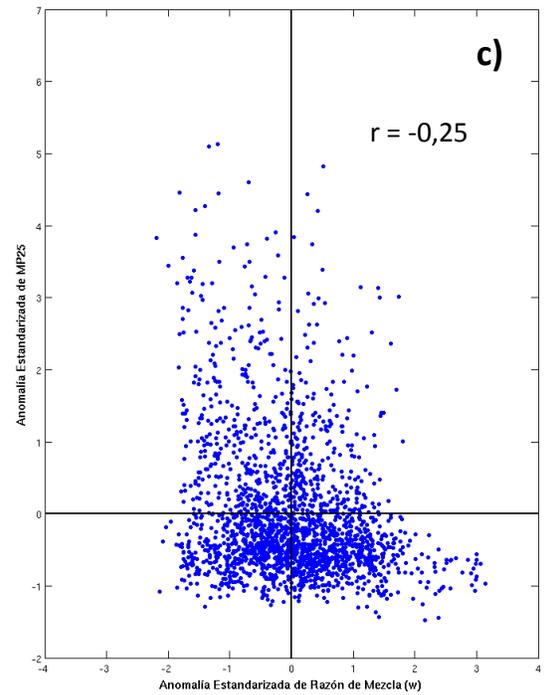


Junio (Período nocturno (00-09 UTC))

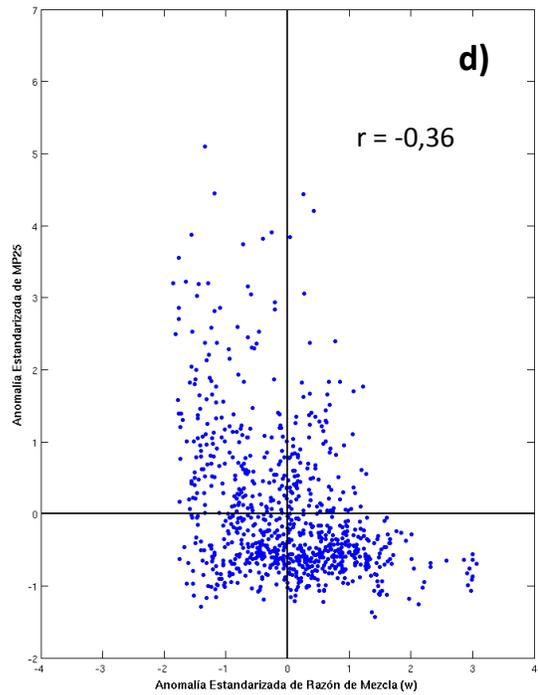
Temperatura



Razón de Mezcla



Razón de Mezcla



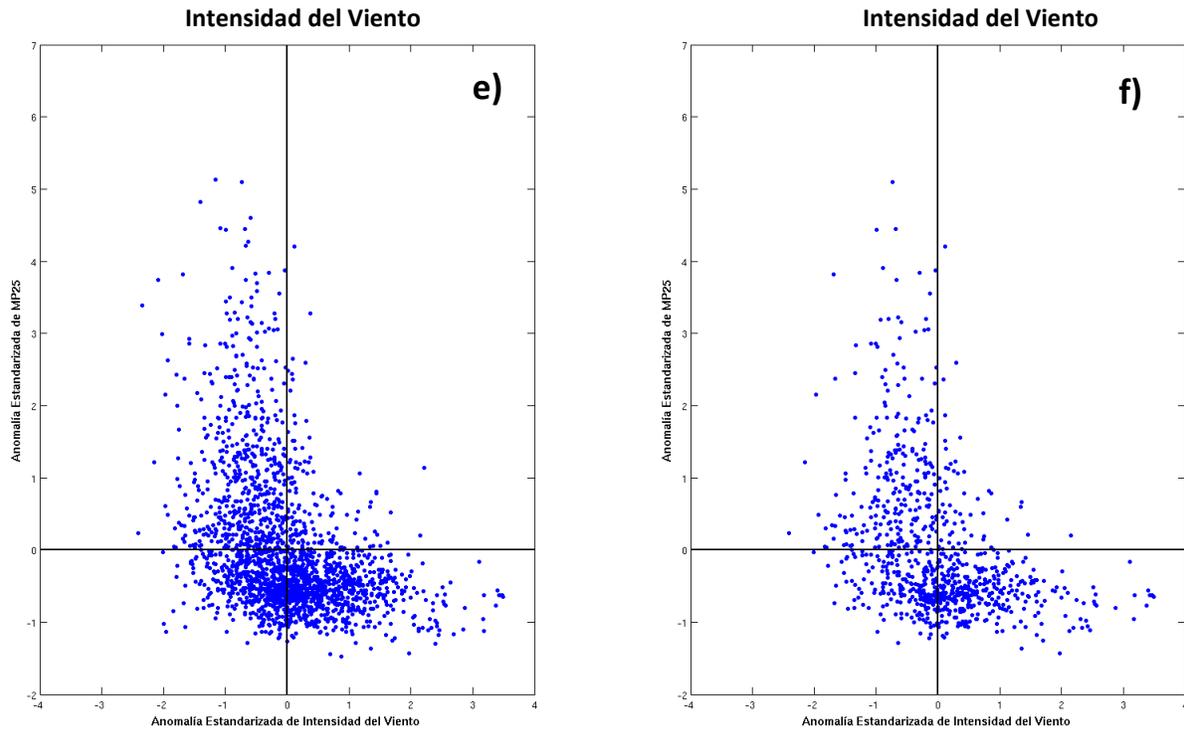
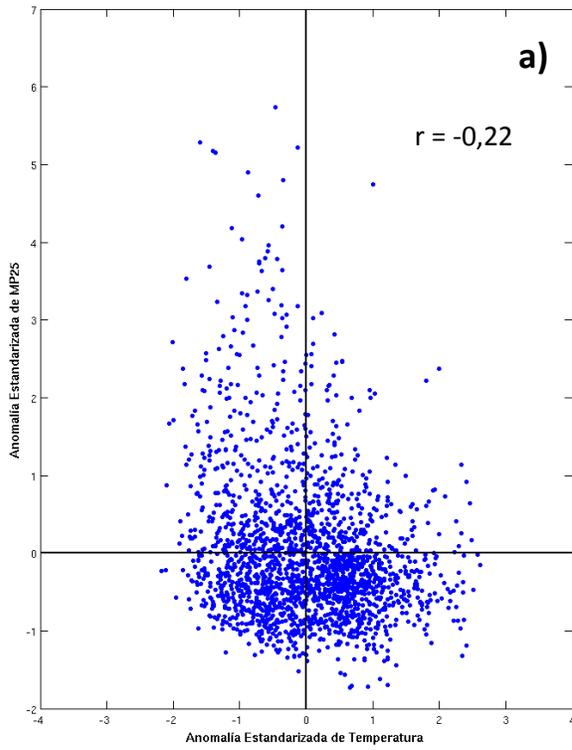


Figura 26. Dispersiones entre las anomalías de concentraciones de MP2.5 y variables meteorológicas (a – f), para el mes de junio correspondiente al período completo (panel izquierdo) y nocturno (panel derecho) para los años 2013 al 2015.

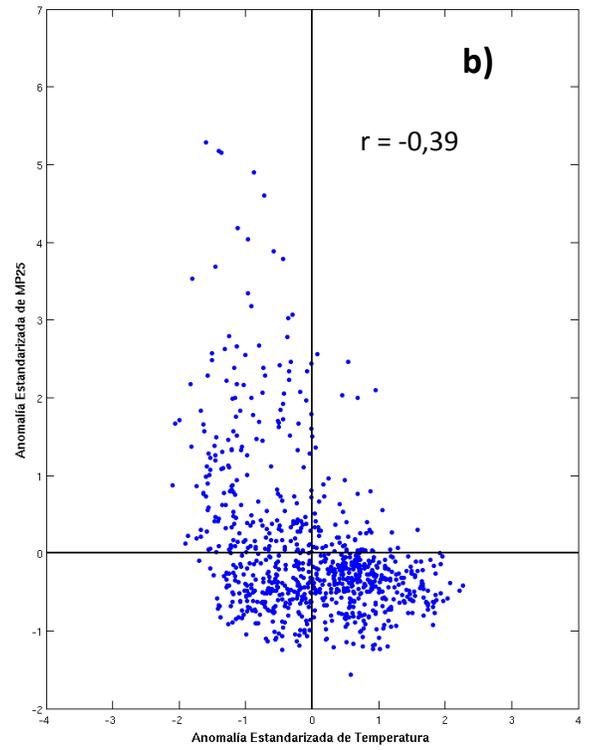
Agosto (Período Completo)

Temperatura

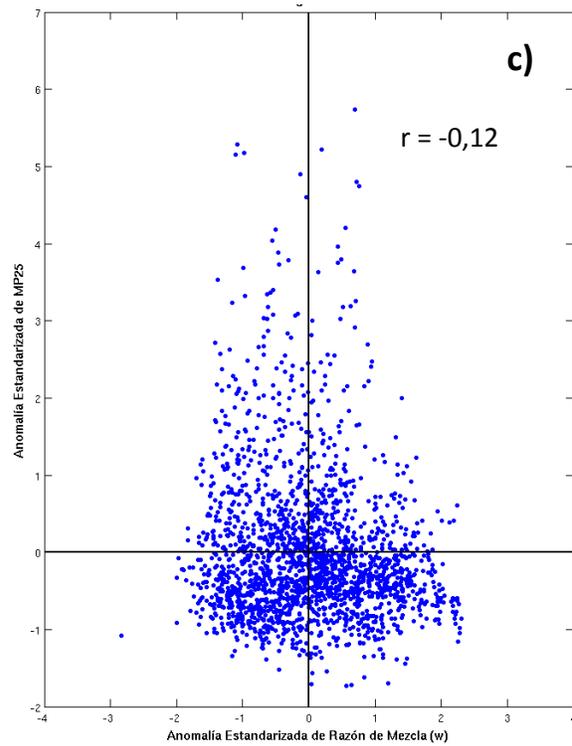


Agosto (Período nocturno (00-09 UTC))

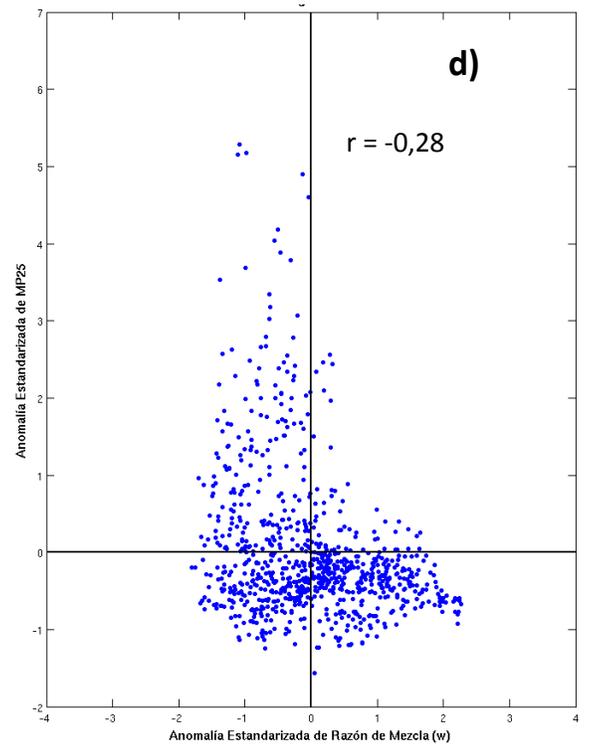
Temperatura



Razón de Mezcla



Razón de Mezcla



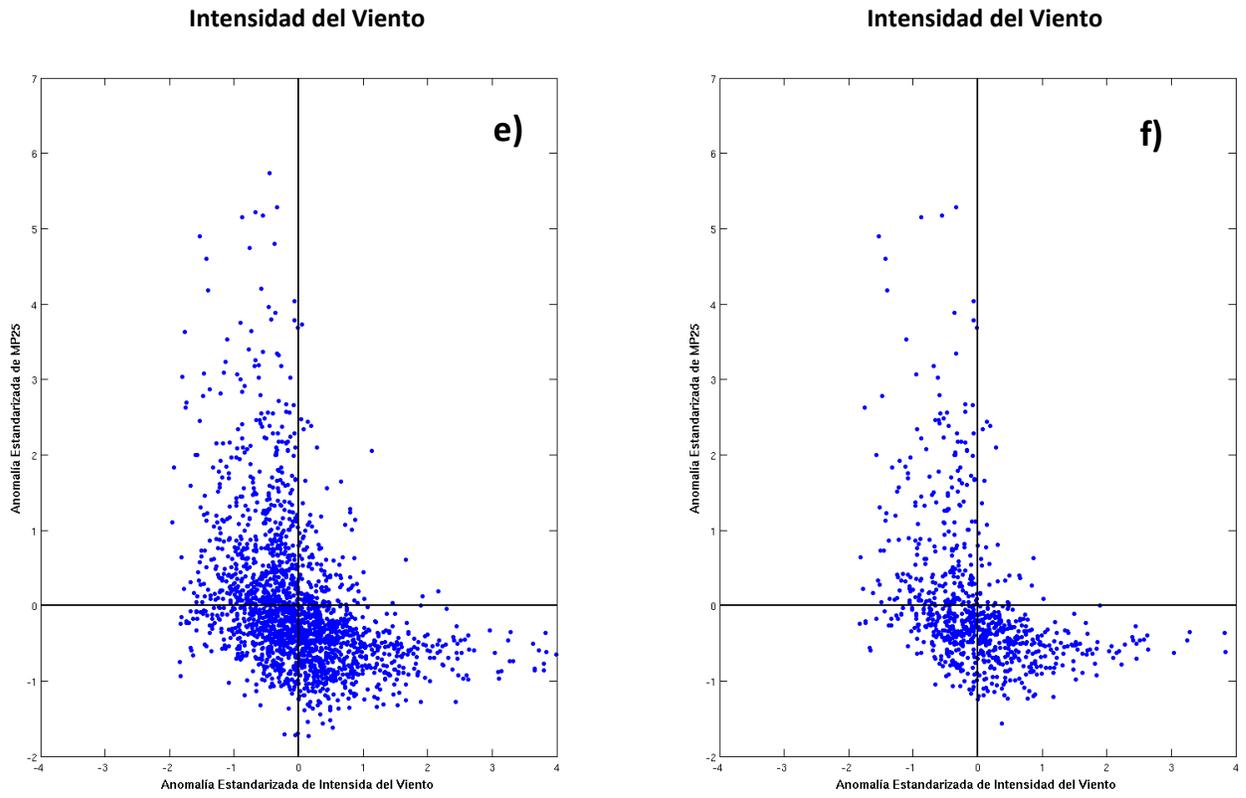
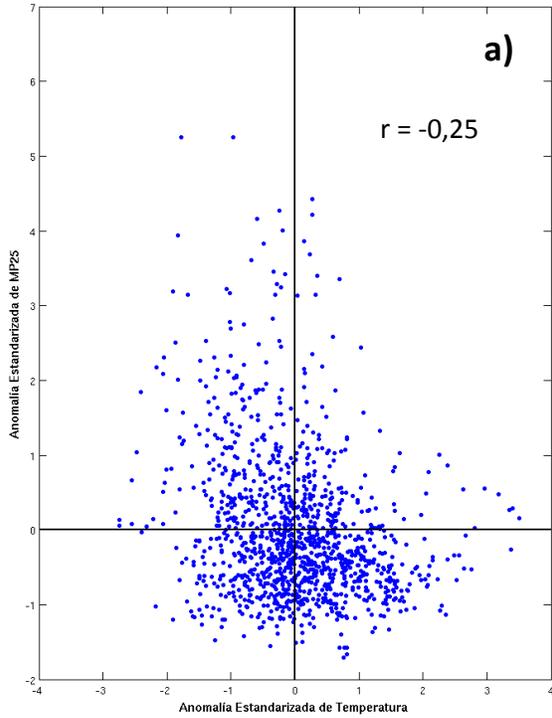


Figura 27. Dispersiones entre las anomalías de concentraciones de MP2.5 y variables meteorológicas (a – f), para el mes de agosto correspondiente al período completo (panel izquierdo) y nocturno (panel derecho) para los años 2013 al 2015.

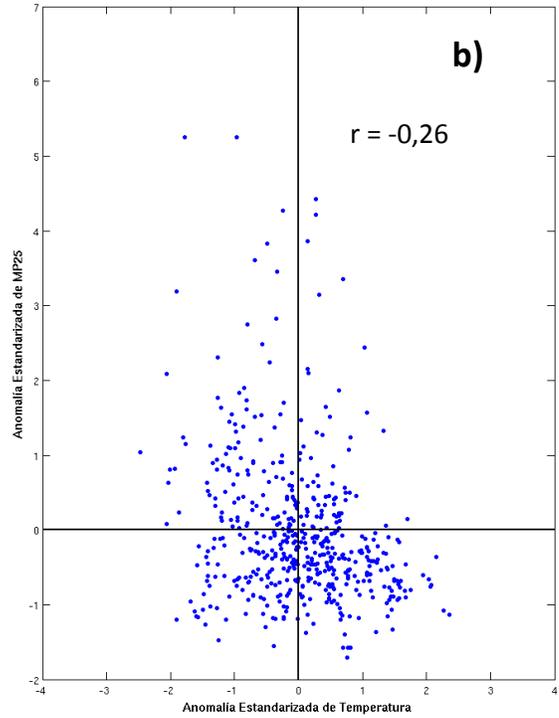
Septiembre (Período Completo)

Temperatura

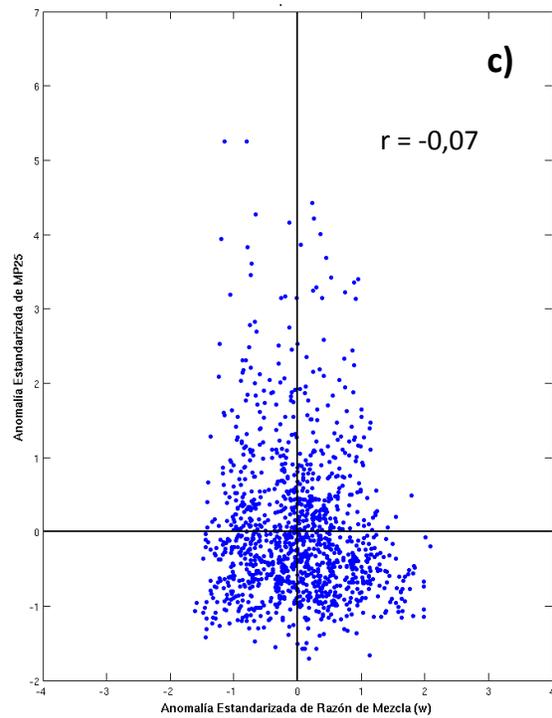


Septiembre (Período nocturno (00-09 UTC))

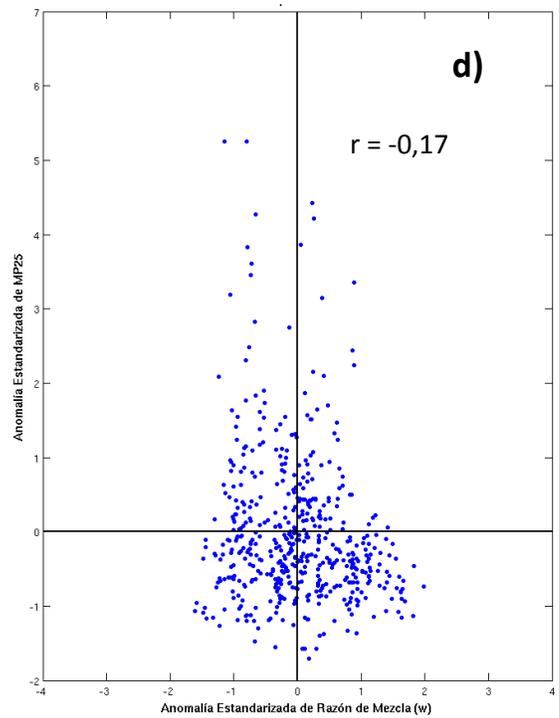
Temperatura



Razón de Mezcla



Razón de Mezcla



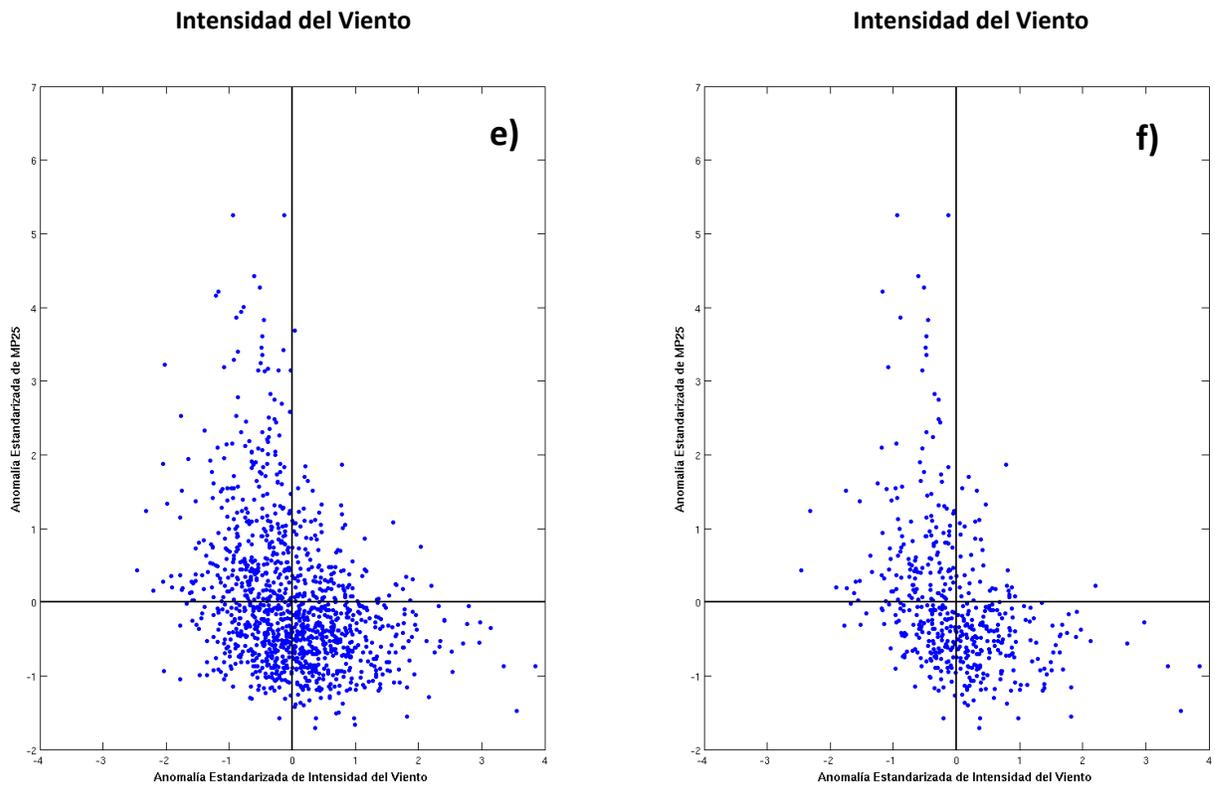


Figura 28. Dispersiones entre las anomalías de concentraciones de MP2.5 y variables meteorológicas (a – f), para el mes de septiembre correspondiente al período completo (panel izquierdo) y nocturno (panel derecho) para los años 2013 al 2015.