

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009



UNIVERSIDAD DE CHILE
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Escuela de Geografía

**DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR
MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS
TEMPERATURAS DEL AIRE y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA
EL AÑO 2009**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE GEÓGRAFO

DUSTYN OPAZO ALBARRÁN

PROFESOR GUIA: DR. HUGO ROMERO

**SANTIAGO, CHILE
2011**

Agradecimientos

Agradezco sinceramente a toda mi familia, en especial a mi madre, por entregarme siempre su apoyo y confianza en todo ámbito.

Agradezco además al Profesor Hugo Romero por su apoyo y consejos durante el desarrollo de la presente memoria, y darme la oportunidad de participar en el Proyecto FONDECYT N° 1100657.

También agradezco a mis compañeros y amigos del Laboratorio Gino Sandoval, Claudio Fuentes, Pamela Smith, Marcela Salgado y Manuel Méndez por su constante apoyo y ánimo en el proceso de desarrollo de esta memoria.

Finalmente agradezco a mis amigos y compañeros de curso por seguir junto a mí este largo camino hacia el cumplimiento de este importante paso en mi vida.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN	9
1.1 INTRODUCCIÓN	9
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
1.3 ÁREA DE ESTUDIO	13
1.4 OBJETIVOS	15
1.5 HIPÓTESIS	15
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ASUNTO	16
2.1 EXPANSIÓN URBANA, MODELOS DE DESARROLLO Y EFECTOS	16
2.2 CAMBIO DE USO Y COBERTURA DE LOS SUELOS	16
2.3 CLIMA URBANO	17
2.4 ISLAS DE CALOR URBANO	18
2.5 ISLAS DE CALOR; DEMANDA ENERGÉTICA Y CONTAMINACIÓN	19
2.6 ISLAS DE CALOR, CONTAMINACIÓN Y SALUD	19
CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO	22
3.1 NORMA DE CALIDAD PRIMARIA PARA PM10	22
3.2 DETECCIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS Y DÍAS CRÍTICOS	22
3.3 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN	23
3.4 ANÁLISIS DE TEMPERATURAS ATMOSFÉRICAS	23
3.5 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS TEMPERATURAS ATMOSFÉRICAS	24
3.6 DISTRIBUCIÓN DE LOS VIENTOS EN SANTIAGO	24
3.7 CORRELACIÓN DE LAS VARIABLES ANALIZADAS	24
	3

CAPITULO 4: RESULTADOS	25
4.1 COMPORTAMIENTO ANUAL DEL MATERIAL PARTICULADO	25
4.2 ANÁLISIS DE MESES CRÍTICOS	28
4.2.1 Variación Mensual del PM10 el año 2009	29
4.3 VARIACIÓN DIARIA Y HORARIA DEL PM10 EL AÑO 2009	31
4.4 VARIACIÓN DIARIA DE LA TEMPERATURA	34
4.4.1 Análisis temperaturas atmosféricas de La Red MACAM	34
4.5 Distribución espacial de la contaminación por Material Particulado	38
4.5.1. Día de alta concentración de PM10: 11 de Mayo de 2009	38
Comportamiento del material particulado a las 6AM	40
Comportamiento del material particulado a las 12PM	42
Comportamiento del material particulado a las 8PM	44
4.5.2 Caso N° 2: Día 26 de Junio de 2009	47
Comportamiento del material particulado a las 6AM	49
Comportamiento del material particulado a las 12AM	51
Comportamiento del material particulado a las 8PM	53
4.5.3. Caso N° 3: Día 15 de Agosto del 2009	55
Comportamiento del Material Particulado a las 6AM	55
Comportamiento del Material Particulado a las 12PM	57
Comportamiento del Material particulado a las 8PM	59
4.5.4 Caso N° 4: Día 10 de Octubre del 2009	61
Comportamiento del Material Particulado a las 6AM	61
Comportamiento del Material Particulado a las 12PM	63
Comportamiento de Material Particulado a las 8PM	65
4.6 Distribución espacial de la Temperatura	67
4.6.1 Caso N° 1: Día 11 de Mayo de 2009	67
Comportamiento de la temperatura a las 6AM	69
Comportamiento de la temperatura a las 12PM	71
Comportamiento de la temperatura a las 8PM	73
4.6.2 Caso N° 2: Día 26 de Junio de 2009	75
Comportamiento de la temperatura a las 6AM	77
Comportamiento de la temperatura a las 12PM	79
Comportamiento de la temperatura a las 8PM	81
4.6.3 Caso N° 3: Día 15 de Agosto del 2009	83
Comportamiento de la temperatura a las 6AM	83
Comportamiento de la temperatura a las 12PM	85
Comportamiento de las temperaturas a las 8PM	87
4.6.4 Caso N° 4: Día 10 de Octubre del 2009	89
Comportamiento de la temperatura a las 6AM	89

Comportamiento de la temperatura a las 12PM _____	91
Comportamiento de la temperatura a las 8PM _____	93
4.7 CORRELACIÓN ENTRE EL MATERIAL PARTICULADO Y LA TEMPERATURA ATMOSFÉRICA _____	95
4.7.1 Caso N° 1: 11 de Mayo del 2009 _____	95
Correlación de Pearson entre Material Particulado y Temperaturas Atmosféricas 11 de Mayo del 2009 _____	98
4.7.2 Caso N° 2: 26 de Junio del 2009 _____	99
Correlación de Pearson entre Material Particulado y Temperaturas Atmosféricas 26 de Junio del 2009 _____	102
4.7.3 Caso N° 3: 15 de Agosto del 2009 _____	103
Correlación de Pearson entre Material Particulado y Temperaturas Atmosféricas 15 de Agosto del 2009 _____	105
4.7.4 Caso N° 4: 10 de Octubre del 2009 _____	106
Correlación de Pearson entre Material Particulado y Temperaturas Atmosféricas 10 de Octubre del 2009 _____	108
CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES _____	109
5.1 DISCUSIÓN _____	109
5.2 CONCLUSIONES _____	112
BIBLIOGRAFÍA _____	114
ANEXOS _____	119
Anexo N° 1: _____	120
Gráficos resúmenes variación mensual PM10 por estación _____	120
Anexo N° 2 _____	128
Gráficos resúmenes variación Diaria PM10 por estación _____	128

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Índices de calidad del aire para Material Particulado (ICAP) y concentraciones (ug/m ³), contemplados en el Plan de Descontaminación Ambiental (PPDA) de la Región Metropolitana. _____	23
Tabla 2: Concentraciones medias anuales de PM10 en estaciones de monitoreo de Santiago, año 2009. _____	27
Tabla 3: Niveles de PM10 por Hora 11/05/2009 _____	46
Tabla 4: Niveles de PM10 por Hora 26/06/2009 _____	54
Tabla 5: Niveles de PM10 por Hora 15/08/2009 _____	60
Tabla 6: Niveles de PM10 por Hora 10/10/2009 _____	66
Tabla 7: Correlación de Pearson 11/05/2009 _____	98
Tabla 8: Correlación Pearson 26/06/2009 _____	102

Tabla 9: Correlación Pearson 15/08/2009	105
Tabla 10: Correlación Pearson 10/10/2009	108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Área de estudio y localización de las estaciones meteorológicas y de medición de la contaminación atmosférica de Santiago	14
Figuras 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8. Promedio anual PM10 en estaciones de monitoreo de Santiago. 1997-2009	26
Figura 9: Promedio anual PM10 Las Condes (1997-2009)	27
Figura 10: Promedio anual de Material Particulado en las estaciones de monitoreo de Santiago el año 2009	28
Figura 11: Promedio PM10 Cerrillos 1998	
Figura 12: Promedio PM10 Cerrillos 2003	28
Figura 13: Promedio PM10 Cerrillos 2009	29
Figura 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23: Promedio anual de PM10 en estaciones de monitoreo de Santiago el año 2009	30
Figura 24: Variación horaria de PM10 en la estación de Cerro Navia	32
Figura 25: Variación horaria de PM10 en la estación de Las Condes	32
Figura 26: Variación horaria de PM10 en la estación de Cerro Navia	32
Figura 27: Variación horaria de PM10 en la estación de Las Condes	33
Figura 28: Variación horaria de PM10 en la estación de Cerro Navia	33
Figura 29: Variación horaria de PM10 en la estación de Cerro Navia	34
Figura 30: Temperatura horaria en El Bosque el 11 de mayo de 2009	35
Figura 31: Temperatura horaria en Las Condes el 11 de mayo de 2009	35
Figura 32: Temperatura horaria El Bosque	
Figura 33: Temperatura horaria Las Condes	35
Figura 34: Temperatura horaria El Bosque	
Figura 35: Temperatura horaria Las Condes	36
Figura 36: Temperatura horaria El Bosque	
Figura 37: Temperatura horaria Las Condes	36
Figura 38: Promedio diario de contaminación por Material Particulado 11/05/2009	38
Figura 39: Promedio horario de contaminación por Material Particulado, 6AM. 11/05/2009	40
Figura 40: Promedio horario de contaminación por Material Particulado, 12PM. 11/05/2009	42
Figura 41: Promedio horario de contaminación por Material Particulado, 8PM. 11/05/2009	44
Figura 42: Promedio diario de contaminación por Material Particulado 26/06/2009	47
Figura 43: Promedio horario de contaminación por Material Particulado, 6AM. 26/06/2009	49
Figura 44: Promedio horario de contaminación por Material Particulado, 12PM. 26/06/2009	51
	6

Figura 45: Promedio horario de contaminación por Material Particulado, 8PM. 26/06/2009	53
Figura 46: Promedio horario de contaminación por Material Particulado, 6AM. 15/08/2009	55
Figura 47: Promedio horario de contaminación por Material Particulado, 12PM. 15/08/2009	57
Figura 48: Promedio horario de contaminación por Material Particulado, 8PM. 15/08/2009	59
Figura 49: Promedio horario de contaminación por Material Particulado, 6AM. 10/10/2009	61
Figura 50: Promedio horario de contaminación por Material Particulado, 12PM. 10/10/2009	63
Figura 51: Promedio horario de contaminación por Material Particulado, 8PM. 10/10/2009	65
Figura 52: Temperatura promedio diaria el 11/05/2009	67
Figura 53: Temperatura a las 6AM el 11/05/2009	69
Figura 54: Temperatura a las 12PM el 11/05/2009	71
Figura 55: Temperatura a las 8PM el 11/05/2009	73
Figura 56: Temperatura promedio diaria el día 26/06/2009	75
Figura 57: Temperatura las 6AM el 26/06/2009	77
Figura 58: Temperatura a las 12PM el 26/06/2009	79
Figura 59: Temperatura a las 8PM el 26/06/2009	81
Figura 60: Temperatura a las 6AM el 15/08/2009	83
Figura 61: Temperatura a las 12PM el 15/08/2009	85
Figura 62: Temperatura a las 8PM el 15/08/2009	87
Figura 63: Temperatura a las 6AM el 10/10/2009	89
Figura 64: Temperatura a las 12PM el 10/10/2009	91
Figura 65: Temperatura a las 12PM el 10/10/2009	93

RESUMEN

Las ciudades chilenas, al igual que otras ciudades del mundo se encuentran inmersas en un marcado proceso de expansión espacial, que se ha evidenciado especialmente en la ciudad de Santiago, la cual ha experimentado un explosivo crecimiento de su superficie urbana desde hace tres décadas, trayendo consigo una serie de cambios y problemas ambientales. Entre los primeros se encuentran aquellos provocados por los cambios de usos y coberturas de los suelos y que se expresan en disminución de las superficies vegetadas y de las tasas de infiltración de las aguas lluvias, aumento de la escorrentía superficial y de las temperaturas, producto de la pavimentación de las superficies, generando modificaciones sobre el clima urbano, como la aparición de islas de calor urbano. Los cambios antes mencionados actúan como catalizadores de la degradación ambiental y de la pérdida de funciones y servicios ambientales en los territorios donde ocurren estos procesos.

La contaminación atmosférica caracterizada por la presencia de concentraciones de materiales particulado en suspensión es uno de los problemas ambientales que se registran en Santiago de Chile, conformando una compleja geografía en su distribución espacial, debido a la localización y magnitud de las fuentes, a los procesos de circulación aérea al interior de la cuenca donde se ubica la ciudad, a sus relaciones con los usos y coberturas de los suelos, etc. Temporalmente, las concentraciones de partículas son mayores en las estaciones de otoño e invierno, como consecuencia de presentarse en estos períodos permanentemente capas de inversión térmica, causadas por la subsidencia atmosférica. Como consecuencia de ello, se registran eventos extremos de contaminación atmosférica, en los cuáles las concentraciones de PM10 sobrepasan los límites establecidos por las normas de protección de la salud, pudiendo tener efectos adversos que abarcan desde muertes por enfermedades cardiovasculares y otras dolencias crónicas hasta problemas respiratorios agudos, tales como bronquitis obstructiva, enfisemas y asma bronquiales.

El principal objetivo de esta investigación es establecer el grado de correlación espacial entre la distribución de las temperaturas atmosféricas, de los vientos superficiales y de los niveles de concentración del material particulado, que se observaron en días críticos en la calidad del aire, registrados en Santiago el año 2009, con la finalidad de proporcionar antecedentes que puedan servir como base para la generación de futuras medidas de mitigación y de adaptación a través de la planificación ambiental urbana.

CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

El proceso de expansión urbana trae consigo importantes modificaciones en las ciudades, tales como un aumento en los límites físicos de éstas, lo que produce un cambio en los patrones de usos y coberturas naturales del suelo, además de modificaciones climáticas, generando un aumento de las temperaturas.

Las mayores temperaturas del área urbana, en comparación con el entorno rural, se denominan islas de calor urbano, las cuales constituyen el mayor aporte que las ciudades realizan al calentamiento global. Sin embargo, estas modificaciones no son estáticas, sino que van variando en función de cómo las ciudades son y serán organizadas. Por otro lado, las transformaciones ambientales conforman complejos sistemas interrelacionados, donde las variaciones de las temperaturas pueden incidir a su vez en el normal comportamiento de la contaminación atmosférica y ambos sobre la salud de las personas y de los ecosistemas.

Desde hace más de 30 años la población de Santiago se ha visto afectada por la contaminación del aire (Morales, 2006). Esta contaminación se encuentra compuesta de manera principal por partículas primarias, que resultan especialmente de los procesos de combustión, y secundarias, que resultan de la transformación físico-química de las anteriores. La contaminación no se distribuye espacialmente de manera homogénea por la ciudad, sino que se ve afectada por factores tales como la presencia y localización de las fuentes emisoras, las diferencias climáticas en su interior, las características topográficas propias de la cuenca de Santiago y los regímenes de vientos. Temporalmente, las concentraciones de partículas son mayores en las estaciones de otoño e invierno debido al predominio de las inversiones térmicas de subsidencia y radiación, que resultan del predominio del sistema subtropical de altas presiones atmosféricas y del enfriamiento del suelo, respectivamente.

Este proyecto busca conocer de mejor manera como se distribuye espacialmente la contaminación atmosférica por material particulado (PM10) en Santiago, en aquellos días definidos como críticos (cuando se supera la norma diaria establecida por el Ministerio de Medio Ambiente) y su posible relación con la distribución espacial de las temperaturas atmosféricas, y con los vientos.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los cambios en los usos y coberturas del suelo de la ciudad de Santiago durante las últimas décadas han provocado una notable modificación en el clima local, generando un clima urbano que difiere de aquel presente en el entorno rural próximo a la ciudad (Romero y Sarricolea, 2006). Las transformaciones climáticas experimentadas por la ciudad se deben a los cambios en los usos y coberturas de los suelos, que en el caso de Santiago, han consistido en una sustitución de las coberturas naturales por usos urbanos. Ello ha provocado a su vez, una disminución de las superficies vegetadas y consecuentemente, una reducción de las tasas de infiltración de las aguas lluvias en el suelo, además de un aumento de la escorrentía superficial y de las temperaturas atmosféricas, producto de la continua pavimentación o impermeabilización de la superficie terrestre (Romero y Molina, 2007). La pavimentación de los suelos, así como las construcciones de viviendas, edificaciones, estacionamientos y otros artefactos urbanos, se realiza empleando materiales de una alta absorción de energía solar y elevada capacidad de retención térmica, lo que se acompaña de variaciones en los albedos o porcentajes de reflectividad y, finalmente, de un aumento de la emisividad de la energía infrarroja o transferencia de calor desde el suelo a la atmósfera, provocando un impacto en el balance energético (Correa et al. 2003), con el consecuente incremento en los flujos de calor sensible a expensas de flujos de calor latente (Lamprey, 2009).

La urbanización incide de manera directa en el aumento de las temperaturas y en la generación de las denominadas islas de calor urbano, debido a que las diferentes superficies de la ciudad, dependiendo de sus usos y coberturas de suelos, registran una mayor absorción de radiación solar, actuando como acumuladores térmicos durante el día y como liberadores de energía almacenada en la noche (Pérez et al. 2003). Es en la noche cuando las islas de calor urbano se presentan con mayor nitidez o intensidad, como lo corrobora Molina (2007) en la ciudad de Santiago. Sin embargo, dado que las áreas urbanas no son homogéneas, debido a la existencia de zonas con diferentes usos y coberturas de suelos, densidades de construcciones y diseños urbanos, existe un complejo patrón espacial y temporal de las islas de calor, que más bien se manifiestan como archipiélagos térmicos donde se observan islas de calor y frío (Romero y Molina 2007).

Las islas de calor corresponden a una muy importante contribución que las ciudades realizan al proceso de calentamiento global en forma acumulativa (Molina, 2007), y que, al mismo tiempo, afectan la calidad ambiental de la ciudad y por ende la calidad de vida de su población. La intensidad y localización de las islas de calor es una función de la variación de las densidades de construcción, los porcentajes de coberturas vegetales, y como lo plantea Oke (1987), de la cantidad de habitantes de la ciudad.

Por otra parte, las islas de calor urbano pueden incidir en el aumento de la demanda de energía, mediante el uso de aire acondicionado o sistemas de refrigeración, existiendo una variación entre meses de invierno y verano (Correa et al. 2003). Esta demanda energética, a su vez, exacerba la emisión de contaminantes, y las mayores temperaturas urbanas, van a actuar como catalizadores de los gases de combustión presentes en la atmósfera, generándose contaminantes secundarios como el ozono troposférico.

En la atmósfera que cubre las ciudades se origina una mayor cantidad de esmog de manera directa y de manera indirecta, por la emisión de contaminantes atmosféricos, tales como el Dióxido de Carbono (CO₂), Óxidos de Nitrógeno (NO_x), Dióxido de Azufre (SO₂) y Material Particulado (PM), por parte de los vehículos, industrias y otras fuentes, tales como las chimeneas domésticas. Además, aumentan los niveles de concentración de ozono o de otros componentes que resultan de las transformaciones de los primeros, y, como se ha indicado, se acrecienta de manera directa la temperatura (EPA, 2006). Consecuentemente, se registra una pérdida notoria de la calidad del aire y un incremento de sus efectos adversos sobre la salud de la población, que se encuentran mayormente concentrados en el interior de la ciudad antes que en los suburbios y áreas rurales (Weng y Yang, 2003).

La Ciudad de Santiago ha presentado históricamente altos niveles de contaminación atmosférica, como consecuencia de encontrarse localizada en latitudes subtropicales, bajo el predominio de altas presiones que generan capas de inversión térmica de subsidencia, que estabilizan la atmósfera y reducen su capacidad de ventilación. A ello se debe agregar la ocurrencia de inversiones térmicas de radiación causadas por la rápida pérdida de calor desde la superficie terrestre que tiene lugar en las madrugadas de los meses de otoño y primavera. La ubicación de la ciudad en el interior de una cuenca topográficamente cerrada, que impide la llegada fácil de masas de aire exteriores es otro factor climático importante y por otro lado, al interior de la cuenca existen áreas de menor temperatura en la medida que las masas de aire fría son transportadas hacia las áreas menos elevadas. Bajo estas condiciones climáticas especiales, se ha producido una alta concentración espacial de fuentes contaminantes, asociada a la residencia de cerca de siete millones de habitantes, así como de industrias, servicios y parque vehicular, constituyéndose en la mayor que se registra en el país.

A lo largo del año, tienen lugar eventos extremos de contaminación atmosférica, en los cuáles las concentraciones de PM₁₀ sobrepasan los límites que aconsejan las normas de calidad del aire (Ostro, 1998), pudiendo tener efectos adversos para la salud, tales como problemas respiratorios y cardiovasculares (Ostro, 1995; Peña y Romero, 2005). La distribución espacial de la contaminación atmosférica obedece a diversos factores, entre los cuales destaca la situación topográfica, los usos y coberturas de los suelos, la localización de las fuentes móviles y fijas y la acción de los vientos locales. Para dar cuenta de ello se requerirían datos e informaciones obtenidos de estaciones fijas y móviles localizadas en función de la variabilidad espacial de los factores mencionados, lo que no ocurre en las ciudades chilenas. Por otro lado, investigaciones recientes han demostrado que las concentraciones de contaminantes se pueden ver agravadas por la cercanía de la población a las carreteras, de lo cual resulta una mayor exposición a los contaminantes causados por el tráfico vehicular, tal como lo plantean Buzelli (2008) y Kim et al (2004).

Para la observación y gestión de la contaminación atmosférica, Santiago cuenta con la Red de Monitoreo Automático de Contaminantes Atmosféricos del Área Metropolitana (Red MACAM), administrada por la Secretaría Ministerial Regional del Ministerio de Salud y constituida por diez estaciones distribuidas en la ciudad (figura 1), que miden contaminantes tales como CO, SO₂ y PM₁₀. Sin embargo la localización de estas estaciones responde de manera principal al interés por registrar niveles de “background”

(Centro Mario Molina, 2007), no pretendiendo dar cuenta de factores específicos o de escalas geográficas detalladas.

Como una forma de avanzar en aclarar la relación espacial entre las concentraciones de contaminantes y los factores explicativos, esta investigación pretende conocer el grado de asociación existente entre las mediciones de PM₁₀ registradas en las estaciones de la Red MACAM y la distribución de las temperaturas atmosféricas y vientos, obtenidas de las mismas estaciones antes señaladas. En el caso de las temperaturas, además se han considerado estaciones fijas del Laboratorio de Medio Ambiente y Territorio del Departamento de Geografía de la Universidad de Chile. A partir de dichos datos se analizará la presencia de islas de calor urbano, seleccionando días que pueden ser considerados críticos en términos de altas concentraciones de PM₁₀. De igual manera y con fines comparativos, se considerarán días de mínima contaminación por material particulado. También se relacionarán los eventos seleccionados con la dirección y velocidad de los vientos.

El material particulado respirable (PM₁₀), corresponde a una mezcla heterogénea de sustancias químicas y partículas de tamaño menor a 10 micrones, a la que regularmente está expuesta la mayoría de la población (Ostro, 1998) y que, además se muestra como muy sensitiva a los cambios meteorológicos representados por variaciones en las temperaturas atmosféricas, humedad relativa, dirección y velocidad de los vientos, etc. (Dawson et al. 2009).

Desde el punto de vista geográfico, el estudio de la distribución de los contaminantes atmosféricos y algunos de sus factores explicativos puede constituir una contribución a la elaboración de evaluaciones ambientales urbanas y por ello, aportar conocimientos que deberían formar parte de los planes y programas de planificación y gestión del medio ambiente urbano, materia aún inexistente en el país.

1.3 ÁREA DE ESTUDIO

El presente trabajo se realiza en el Área Metropolitana del Gran Santiago (AMGS), que abarca 32 comunas, que pertenecen a la Provincia de Santiago, además de la comuna de San Bernardo, que pertenece a la Provincia del Maipo y de Puente Alto, que corresponde a la Provincia Cordillera (Figura N° 1). Dentro de las comunas del AMGS se ubican las diez estaciones monitoras de la Secretaría Regional del Ministerio de Salud: Independencia, La Florida, Las Condes, Santiago, Pudahuel, Cerrillos, El Bosque, Cerro Navía, Puente Alto y Quilicura. Las estaciones de medición de temperatura del Laboratorio de Medio Ambiente y Territorio del Departamento de Geografía de la Universidad de Chile, se encuentran instaladas en las comunas de Quilicura, Las Condes, La Florida, Pedro Aguirre Cerda, Maipú, La Granja y Cerro Navía.

El AMGS se ubica en el llano de la cuenca de Santiago, y forma parte de la llamada Depresión Intermedia, relieve deprimido que se encuentra delimitado al Oeste por la Cordillera de la Costa, el Este por la Cordillera de Los Andes, al norte por el Cordón de Chacabuco y al sur por Angostura de Paine. Esta cuenca cuenta con cauces hídricos tales como el Río Maipo, el cual da origen a la principal hoya hidrográfica de la Región Metropolitana, además del Río Mapocho, el cual es el principal afluente del Maipo.

El clima de la Región Metropolitana es templado-cálido mediterráneo, del tipo llamado continental. Las precipitaciones se concentran en los meses de invierno, al igual que los mayores niveles de contaminación atmosférica, y las temperaturas más altas en los meses de verano.

El Gran Santiago es el principal centro económico y funcional del país, se constituye como la ciudad más grande a nivel nacional, concentrando la mayor cantidad de población y mostrando mayor primacía en la estructura nacional de ciudades.

Referente a la población, alcanza a cerca de siete millones de habitantes, representando el 40% de la población nacional, razón por la cual se considera dentro del grupo de las siete principales áreas metropolitanas de América Latina. A pesar de que Santiago ha experimentado una tendencia histórica al incremento demográfico, las tasas de crecimiento promedio anual muestran una desaceleración en relación a décadas anteriores. Sin embargo, la ciudad de Santiago sigue experimentando un incremento de su superficie, aumentando desde 34 mil hectáreas en el año 1975, a 65 mil en el año 2005 (Romero et al 2008).

ÁREA METROPOLITANA DE SANTIAGO

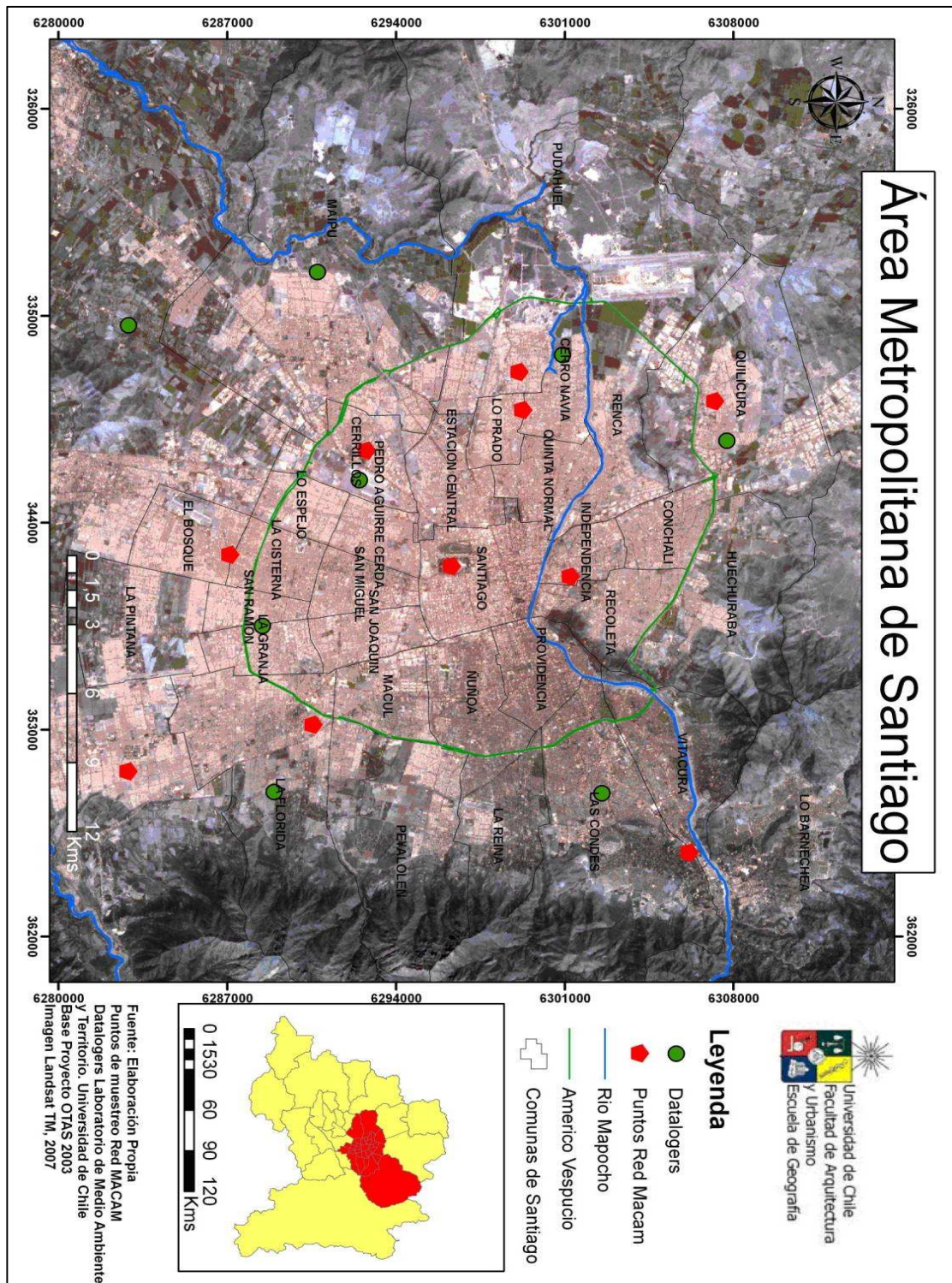


Figura 1: Área de estudio y localización de las estaciones meteorológicas y de medición de la contaminación atmosférica de Santiago Fuente: Elaboración propia.

1.4 OBJETIVOS

Objetivo General:

Conocer el grado de correlación espacial existente entre los niveles de concentración de contaminación atmosférica por Material Particulado y la distribución de las temperaturas atmosféricas, intensidad de las islas de calor urbano e incidencia del régimen de vientos, con el fin de considerarlos en la gestión del territorio y de los espacios urbanos de la ciudad.

Objetivos Específicos:

- Caracterizar el comportamiento del Material Particulado entre 1997 y 2009.
- Seleccionar y caracterizar eventos de contaminación atmosférica que correspondan a días de alta como de baja concentración de Material Particulado.
- Establecer y analizar la distribución espacial y la intensidad y variación de las temperaturas del aire de la ciudad de Santiago para los días críticos de contaminación e identificar posibles islas de calor.
- Relacionar espacialmente la concentración de contaminación por Material Particulado y la distribución de las temperaturas atmosféricas y de los regímenes de vientos para los días de alta y baja concentración observados el año 2009.

1.5 HIPÓTESIS

Existen patrones espaciales de asociación entre las concentraciones de Material Particulado, temperaturas del aire y vientos, que se observan en eventos específicos, tales como períodos específicos de mala y buena calidad del aire.

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ASUNTO

2.1 EXPANSIÓN URBANA, MODELOS DE DESARROLLO Y EFECTOS

Las ciudades corresponden a espacios constituidos por un conjunto de artefactos, fenómenos y factores que se estructuran dando origen a un complejo sistema ambiental (Estébañez, 1988 en Molina 2007), en cuya composición inciden de manera directa los diferentes usos y coberturas de los suelos. Fernández (1995) señala que la ciudad es la forma más radical de transformación del paisaje y del medioambiente natural, ya que su impacto no se limita tan sólo a cambiar la morfología del terreno, sino que también logra modificar las condiciones climáticas y ambientales del espacio.. Diversos autores han indicado que el proceso de urbanización es un fenómeno universal (Romero y Vásquez, 2005; Henríquez et al, 2006; Sudhira et al, 2004), evidenciando que todos los países lo experimentan por el crecimiento poblacional, económico y de infraestructuras. Sin embargo, su relación con episodios de contaminación es un rasgo específico de la geografía y medio ambiente de la ciudad.

En diversos estudios se señala que la expansión urbana puede ser el resultado tanto de factores internos como externos de la ciudad, los que corresponden a locales y regionales, donde los modelos de desarrollo económico y social pueden privilegiar unos u otros como lo plantea Ciccolella (1999): “la desregularización, la privatización y la liberación económica han tendido a someter los factores domésticos ante los factores externos”, además de aquellos factores (regionales), que tienen que ver con la posición geográfica de los centros urbanos y los mercados de trabajo, transportes y servicios que también motivan la expansión física (Azócar et al, 2003 en Molina, 2007).

A su vez la literatura corrobora la existencia de un acelerado crecimiento urbano en América Latina, y en Chile, que está causado por el modelo económico actual, el cual al desregularizar el territorio y el espacio urbano y reducir las funciones del estado en el ejercicio de la planificación a todo nivel, ha dejado a esta última y la toma de decisiones en manos de los privados (Hidalgo et al, 2007 en Sandoval, 2009).

A su vez este proceso de urbanización avanza ocupando superficies naturales (cambio de uso y cobertura de los suelos) afectando los servicios ambientales que estos aportan a la ciudad y que benefician también a la población urbana (Romero y Vásquez, 2005).

2.2 CAMBIO DE USO Y COBERTURA DE LOS SUELOS

El uso del suelo se define como el destino que otorga la sociedad a una porción de la superficie terrestre, mientras que el concepto de cobertura de suelo abarca exclusivamente sus características naturales (Pauleit, et al, 2005). De esta forma la expansión urbana se desarrolla mediante una serie de cambios de usos y coberturas de suelo (Pauleit et al., 2005; Whitford, et al, 2001), de forma continua y dinámica en las ciudades que se encuentran en expansión y en las zonas que comprenden el área metropolitana y las zonas periféricas de las urbes. De acuerdo con Ruiz (2005), ciertas áreas principalmente ubicadas en los sectores periféricos de la ciudad son especialmente frágiles y vulnerables ante la expansión urbana y pueden llegar a perder el equilibrio más o menos estable que poseían desde un pasado inmediato.

Estos cambios en los usos y coberturas de los suelos causados por el crecimiento de las ciudades, consisten principalmente en la sustitución de las coberturas naturales por usos urbanos, lo que trae como consecuencia una disminución de las superficies vegetadas y de las tasas de infiltración de las aguas lluvias, además de un aumento de la escorrentía superficial y de las temperaturas, producto de la pavimentación de las superficies (Romero y Molina, 2007). Tal como lo plantean una serie de autores, los cambios antes mencionados actúan como catalizadores de la degradación y de la pérdida de funciones y servicios ambientales en los territorios donde ocurren estos procesos (Henríquez et al, 2006; Mendoza et al, 2002; Romero y Vázquez, 2005; Romero et al. 2007).

Según la literatura los cambios en los usos y coberturas del suelo de la ciudad provocan una modificación en el clima local, generando características climáticas urbanas que difieren de aquellas presentes en el entorno rural próximo a la ciudad, siendo uno de los principales impactos de la urbanización, la generación de cambios y desequilibrios en el clima urbano, tal como lo plantean Romero y Sarricolea (2006), o Cuadrat et al. (1993). La transformación del medio natural por la acción humana alcanza su máxima expresión en las ciudades, donde se afecta de modo especial a las condiciones climáticas.

Diversos estudios realizados en las metrópolis chilenas (Santiago, Concepción y Valparaíso), muestran los efectos del proceso de cambio de uso y cobertura del suelo, tales como desaparición, reducción y deterioro de las cubiertas vegetales, incluyendo terrenos de cultivos, áreas naturales y humedales (Romero y Fuentes, 2007; Romero y López, 2007; Smith, 2007), además de pérdidas de biodiversidad y reducción y desaparecimiento de hábitats, corredores y parches de vida silvestre (Romero et al, 2001; Romero y López, 2007), pérdida de servicios ambientales y de calidad de los paisajes al interior y alrededor de las ciudades (Vásquez y Romero, 2007), pérdida de la calidad del aire como consecuencia de la incontrolada emisión de contaminantes atmosféricos, generación y fortalecimiento de islas de calor urbanas y desaparecimiento y disminución de las islas frías (Peña y Romero, 2005; Romero y Sarricolea, 2006; Sarricolea y Romero, 2006), y una falta de justicia ambiental y concentración de los efectos adversos (incluyendo enfermedades relacionadas con el medio ambiente urbano), en forma discriminatoria sobre los sectores sociales más vulnerables (Romero y Molina, 2007; Vásquez y Romero, 2007).

2.3 CLIMA URBANO

Según Fernández (1995) y Oke (1987), el clima urbano se genera a partir de la modificación que la ciudad produce sobre el clima regional, pudiendo generar a su vez microclimas, que según Molina (2007) corresponden a climas que se dan a una escala más reducida y cuyos rasgos están principalmente determinados por variables del entorno próximo al suelo, como lo son por ejemplo, los materiales de construcción. Valor et al., (2000) plantean que la alteración del clima local se debe de manera principal a las modificaciones en la composición atmosférica, a través de la emanación de gases; en el balance de energía, debido al cambio en la composición de las superficies terrestres, y en la generación de rugosidad, o efecto de las construcciones sobre la velocidad del viento.

En cuanto a los efectos de la urbanización sobre el clima urbano, la introducción de nuevas superficies construidas aumentan los niveles de contaminación atmosférica que se relacionan directamente con el incremento de las temperaturas, como sucede con el ozono troposférico, por ejemplo. Los climas presentes en las ciudades, tienden a ser

más cálidos que sus alrededores (Pauleit, 2005; Whitford, 2001; Oke, 1998), debido a que la pavimentación de los suelos genera una alta absorción de energía solar y una elevada capacidad de retención térmica, que depende de los diferentes tipos de materiales usados para la construcción y de sus niveles de albedo y emisividad infrarroja, provocando un impacto en el balance energético (Correa et al. 2003), con el consecuente incremento en los flujos de calor sensible a expensas de flujos de calor latente (Lamprey, 2009). Este elemento evidenciaría el gradiente termal existente entre el núcleo urbano y el medio rural próximo (Quadrat, 1993; Oke, 1998, Arnfield, 2003), debido a que las áreas urbanas son capaces de una mayor absorción de radiación solar, actuando como acumuladores térmicos durante el día y como liberadores de energía almacenada en la noche (Pérez et al. 2003), como consecuencia de las mayores densidades y volúmenes de construcción y edificación (Bello F, 1994).

2.4 ISLAS DE CALOR URBANO

Manley (1958) acuñó dicho término por primera vez para referirse a las modificaciones climáticas más claras que causa la urbanización. Las islas de calor urbano han sido definidas por diversos autores, tales como Correa et al (2003), Quadrat et al (2005), Bello (1994), Oke (1987), o Molina (2007), quienes coinciden en que corresponden a un fenómeno en el cual las temperaturas del aire en las zonas urbanas son mayores que las temperaturas en los alrededores de la ciudad, constituyendo una importante modificación climática que se relaciona de manera directa con los usos y coberturas del suelo, la geometría urbana, la influencia del calor antropogénico, y las propiedades térmicas de los materiales de construcción.

En términos estrictos la isla de calor urbana corresponde a la mayor temperatura que registra la capa de aire que cubre las superficies construidas, como consecuencia de la transferencia hacia ella del calor acumulado por las estructuras y cuerpos que componen la ciudad, tales como techos y paredes de las edificaciones, calles y avenidas, sitios eriazos e industriales y estacionamientos (Oke, 1987; Solecki et al, 2002). Todas estas superficies se caracterizan por estar construidas o cubiertas con materiales que absorben y almacenan gran cantidad de calor cuando reciben la insolación directa, para devolverlo a la atmósfera una vez que ha cesado la absorción de ésta.

Según Valor (2000) la temperatura de la ciudad es más alta que la de las áreas rurales durante la noche que durante el día. Esta situación es corroborada por otros autores, tal como Pérez et al (2003), el cual plantea que las áreas urbanas son capaces de una mayor absorción de radiación solar, actuando como acumuladores térmicos durante el día y como liberadores de energía acumulada durante la noche, que según Molina (2007) es aquel momento en el cual las islas de calor urbano se presentan u observan con mayor nitidez o intensidad.

Diversos son los factores que inciden en la configuración y causalidad de las islas de calor urbano, sin embargo la literatura coincide en los siguientes:

-La distinta inercia térmica de los materiales urbanos y rurales, lo que hace que los primeros experimenten un enfriamiento más lento (Fernández et al, 2004; Correa et al, 2003).

-La estructura de la ciudad que logra reducir la pérdida de calor por emisión de onda larga proveniente desde el suelo en el palio urbano, o volumen de aire que se extiende desde éste hasta las alturas mayores de los edificios. A su vez, esta misma estructura puede disminuir la pérdida de calor sensible por procesos advectivos y convectivos a expensas de flujos de calor latente (Fernández et al, 2004; Lamptey, 2009).

-La emisión de calor antrópico, normalmente asociado al transporte del calor del interior de las viviendas, la emisión de vehículos y acondicionadores de aire, así como diversos procesos de combustión (Fernández et al, 2004; Correa et al, 2003, Molina, 2007).

Otro elemento considerado por la literatura a la hora de analizar las islas de calor urbano, guarda relación con la expansión urbana, que en el caso particular de Santiago incide de manera directa en la formación de microclimas urbanos, considerando que el proceso de urbanización en esta ciudad no ha sido homogéneo. La expansión urbana presenta características tales como zonas con diferentes densidades y diseños urbanos, que han generado un complejo patrón espacial y temporal de las islas de calor (Romero y Molina, 2007), que sumado a lo expuesto por Fernández et al (2004), respecto a los cambios experimentados por el viento y las temperaturas, en función del trazado y anchura de la red vial, los diferentes usos del suelo, los materiales de asfalto y edificios, así como sus diferentes alturas y orientaciones, generan o configuran microclimas a una escala local, dentro de los cuales se pueden generar microislas de calor urbano, las cuales se deben a la presencia de superficies extremadamente cálidas, de pequeño tamaño, que son resultado de condiciones urbanas específicas.

La literatura también relaciona las islas de calor urbano con variaciones en las demandas energéticas (Correa et al, 2003) y la relación entre el aumento de las temperaturas urbanas, y la emisión de contaminantes.

2.5 ISLAS DE CALOR; DEMANDA ENERGÉTICA Y CONTAMINACIÓN

Las islas de calor urbano, según diversas fuentes, inciden o afectan la demanda de energía (EPA, 2006; Correa et al, 2003), debido al uso de sistemas de refrigeración o aire acondicionado en verano. Las mayores temperaturas que se registran en el medio urbano en invierno, tienen efectos positivos al reducir la necesidad de calefaccionar los edificios.

La Isla de Calor Urbana genera un tiro convectivo (ascenso de aire cálido) sobre el centro de la ciudad, generando allí una baja presión atmosférica relativa, que acentúa la circulación local de aire proveniente de áreas más frías como la periferia rural. Con ello, se produce un desplazamiento de masas de aire, que puede estar contaminado, que arriban a otros sectores de la ciudad o a áreas rurales situadas a decenas de kilómetros de distancia, pudiendo contaminar lugares que carecen de fuentes fijas o móviles en su cercanía (Crutzen, 2004; Oke, 1987).

2.6 ISLAS DE CALOR, CONTAMINACIÓN Y SALUD

Diversos autores coinciden que las islas de calor urbano pueden aumentar la incidencia de enfermedades y muertes que afectan de manera primordial a niños y ancianos (EPA, 2006; Raso, 2000). Romero y Peña (2005) explican que el efecto de la isla de calor urbano produce disconfort térmico y aumenta la ocurrencia de enfermedades relacionadas con el calor.

Los impactos de los incrementos de la temperatura suponen mayores riesgos para los habitantes en las grandes ciudades que para los residentes de pequeñas poblaciones, no sólo por la mayor magnitud y extensión de la isla de calor urbano, sino que además porque se exacerba la acción de los contaminantes, constituyendo una grave amenaza para la población en general, pero en especial para los pacientes crónicos de enfermedades cardiovasculares y respiratorias (Ostro, 1995; Peña y Romero, 2005; Raso, 2000). Romero et al., 2006 plantearon la existencia de una relación logarítmica entre las temperaturas atmosféricas y el Material Particulado, además de una fuerte incidencia de los diversos usos y coberturas de los suelos sobre la elevación de las temperaturas de la ciudad de Santiago, identificando que aquellas zonas más densamente construidas presentan mayores valores que otras zonas de la ciudad donde los niveles de construcción son menores. A ello se debe adicionar el notable efecto de la vegetación como regulador térmico, así como una fuerte componente social que incide en la distribución inequitativa de las variables analizadas en el espacio. Zonas en que reside población con mayor poder adquisitivo presentan niveles de contaminación por Material Particulado más bajos, existencia de una mayor cantidad de áreas verdes y menores densidades de construcción.

El Material Particulado (PM10), consiste en partículas directamente emitidas al aire tales como hollín de diesel, polvo proveniente de caminos, partículas inherentes a la quema de madera o procesos industriales (Ostro, 1998). Para gestionar los efectos negativos de los altos niveles de contaminación que se presentan en Santiago, se han definido Índices de Calidad del Aire para Material Particulado (ICAP), mediante los cuales se clasifica el estado de la calidad del aire y se pronostican los episodios de contaminación, denominándose como “alertas”, “preemergencias” o “emergencias”, en función de ciertos modelos utilizados por las autoridades ambientales y de salud. El Modelo de Casmassi, que se utilizado en Santiago, formula un pronóstico de calidad del aire de los días siguientes a partir del promedio diario registrado en las estaciones de monitoreo, lo que explica numerosas fallas, debido a que los registros de las últimas horas de la tarde pueden diferir sustancialmente de los promedios diarios y continuar en estas condiciones adversas las horas del siguiente día, o por el contrario mejorar los índices y por ello no justificar medidas de emergencia. Los modelos utilizados actualmente para predecir las concentraciones de contaminantes atmosféricos en Santiago poseen problemas, tales como la predicción falsa de episodios críticos de contaminación, que se relacionan con la variabilidad temporal de las emisiones diarias, la incapacidad para resolver los problemas asociados con la compleja topografía de Santiago y la inexactitud al determinar las condiciones meteorológicas presentes.

Se ha realizado un estudio en Santiago en base al modelo WRF-CHEM (Weather Research and Forecasting Model with Chemistry), mediante la cual se predice el posible comportamiento del Dióxido de Carbono, el que a su vez guarda una estrecha relación con el PM10, por lo que sería posible extrapolar sus concentraciones (Saide et al, 2011), considerando que el Carbono es más fácil de predecir (Jorquera y Castro, 2010; Saide et al, 2009).

Es posible considerar además que actualmente las decisiones referidas a la declaración de episodios críticos de contaminación no pasa solo por los resultados de los modelos de predicción, sino que también implica una decisión tomada por experimentados analistas de calidad del aire, seguida por una decisión política definitiva. En todo caso, es evidente

que la existencia de información limitada, por ejemplo, en cuanto a la representatividad espacial de las escasas estaciones de monitoreo existentes en Santiago, se debe considerar una explicación clave para las fallas de las estimaciones de la calidad del aire. Según Buzelli (2008), las limitaciones en la disponibilidad de estaciones que miden contaminantes, se debe a que no se busca dar cuenta de factores específicos o de escalas geográficas detalladas, sino que de contar con un conocimiento sesgado que disminuya la importancia de los problemas ambientales por razones políticas.

CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO

3.1 NORMA DE CALIDAD PRIMARIA PARA PM10

El Decreto Supremo N° 59 establece las Normas de Calidad Primaria para el Material Particulado respirable (PM10), que corresponden a cifras arbitrarias que representan diversos umbrales de concentraciones que determinan la declaración de episodios de alerta, pre-emergencia y emergencia, en función de sus posibles efectos sobre la salud de las personas. El paso de la calidad buena a regular del aire (nivel 100), está dado por una concentración de ciento cincuenta microgramos por metro cúbico normal ($150 \mu\text{g}/\text{m}^3$) (Tabla 1). Cuando se superan los $195 \mu\text{g}/\text{m}^3$ se pasa de una calidad del aire considerada regular a una de alerta (nivel 200), la que reemplazada por pre-emergencia (nivel 300 y 400) cuando se superan concentraciones de 240 y $285 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, y de emergencia (nivel 500) cuando éstas se elevan sobre $330 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Por otra parte también se establece una norma anual, que corresponde a cincuenta microgramos por metro cúbico normal ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Es importante destacar que los valores establecidos como norma, variarán a partir del año 2012, disminuyendo el promedio de concentración diaria aceptable de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, salvo que en esa fecha exista una norma de calidad ambiental para material particulado fino (PM 2,5), en cuyo caso se mantendría el valor de la concentración de promedio diario actualmente vigente.

3.2 DETECCIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS Y DÍAS CRÍTICOS

Para conocer la distribución de los contaminantes atmosféricos se recopilaron, tabularon y analizaron los datos proporcionados por la Red de Monitoreo Automático de Contaminantes Atmosféricos del Área Metropolitana (Red MACAM) de la Secretaría Regional Ministerial de Salud, para las diversas estaciones que se distribuyen en sitios ubicados en las comunas de Cerro Navia, El Bosque, La Florida, Independencia, Parque O'Higgins, Pudahuel y Cerrillos, las que poseen datos horarios continuos desde 1997 hasta la fecha. Se dejó fuera de este estudio la estación de monitoreo de Providencia, que dejó de operar en el año 2002.

Se compararon los datos promedios horarios, diarios y anuales con las normas anuales y diarias de Material Particulado.

Como días críticos por contaminación atmosférica por concentración de material particulado, se consideraron aquellos en que los niveles superaron el umbral de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como promedio diario y como días de buena calidad del aire aquellos en que los promedios diarios de concentraciones de material particulado fueron los más bajos. Además de considerar los datos diarios promedios, máximos y mínimos, se analizaron también los datos horarios identificando las horas peak de contaminación.

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009

Índices de calidad de Aire para Material Particulado				
ICAP	Categoría ICAP	PM10 ug/m3 (24 hrs.)	Nivel	Episodio
0 a 100 Bueno	0	0	0	--
101 a 200 Regular	100	150	0	--
201 a 300 Malo	200	195	1	Alerta
301 a 400 Crítico	300	240	2	Preemergencia
401 a 500 Peligroso	400	285	2	Preemergencia
> 501 Excede	500	330	3	Emergencia

Tabla 1: Índices de calidad del aire para Material Particulado (ICAP) y concentraciones (ug/m3), contemplados en el Plan de Descontaminación Ambiental (PPDA) de la Región Metropolitana.

Fuente: www.conama.cl

3.3 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN

Se procedió a la localización de las distintas estaciones de monitoreo de la Red MACAM, mediante la digitalización de puntos a través de ArcGis 9.3, creando un shape en ArcCatalog. Este shape se importó en Arcgis y mediante la herramienta Editor, se procedió a anexar a estos puntos una tabla de atributos con los datos diarios promedios, máximos y mínimos y los peaks horarios de contaminación.

Para la espacialización de la contaminación, se utilizó el método de interpolación Kriging ordinario, el cual es una extensión del método Kriging que ha sido utilizado anteriormente (Moral et al, 2006), y que se basa en la distancia entre puntos, lo que significa que los lugares que disten menos entre sí, tendrán valores más semejantes de sus atributos que los correspondientes a los puntos o bloques que estén más separados.

La herramienta Kriging se encuentra contenida en el Software ArcGis 9.3, en la barra de herramienta 3D Analyst, donde se procedió a elegir la opción "Interpolate to raster".

3.4 ANÁLISIS DE TEMPERATURAS ATMOSFÉRICAS

Para conocer la distribución de las temperaturas se procedió a la recopilación, tabulación y análisis de los datos de temperaturas atmosféricas proporcionados por la Secretaría Regional del Ministerio de Salud a través de La Red MACAM, incluyendo las estaciones de Independencia, La Florida, Las Condes, Parque O'Higgins, Pudahuel, Cerrillos, Puente Alto, Quilicura y el Bosque. No se encuentran disponibles los datos de temperatura para la estación de Cerro Navia. A estos puntos de mediciones se agregaron los datos registrados en la red del Laboratorio de Medio Ambiente y Territorio del Departamento de Geografía de la Universidad de Chile (siete dataloggers localizados en barrios seleccionados de la ciudad).

3.5 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS TEMPERATURAS ATMOSFÉRICAS

Se procedió a la digitalización de los datos de temperaturas de las diferentes estaciones de monitoreo (tanto las del SEREMI de Salud como las del Laboratorio de Medio Ambiente y Territorio), a través de ArcGis 9.3, creando un shape de puntos mediante ArcCatalog. Este shape se importó en Arcgis y mediante la herramienta Editor, se procedió a anexarlos a una tabla de atributos con los datos diarios promedios, máximos y mínimos y los datos horarios.

Para lograr una adecuada representación espacial de la distribución de la temperatura atmosférica se utilizó el método de interpolación Kriging (ordinario), a través del mismo proceso llevado a cabo para los datos de contaminación. En "Deutsch and Journal" (1992), se ha descrito al *krigeado* ordinario como el algoritmo geoestadístico más completo (Goovaerts, 1997; Moral; 2003). Por otra parte, Villatoro et al (2008), mencionan como argumento a favor del uso del método ordinario la tendencia del Kriging a la anisotropía, la cual indica que una variable tiene dependencia espacial hacia una o varias direcciones, pudiendo determinar áreas más homogéneas, en contraste con los resultados que pueden ser obtenidos mediante el método de interpolación de Inverso a la distancia o IDW, el cual tiende a producir patrones poco reales conocidos como tipo "ojo de buey" alrededor de los puntos muestreados. La herramienta Kriging se encuentra contenida en el Software ArcGis 9.3, en la barra de herramienta 3D Analyst, donde se procedió a elegir la opción "Interpolate to raster" seleccionando Kriging.

Para concretar el último objetivo específico (Identificar y clasificar las posibles relaciones espaciales existentes entre los valores de temperatura observados y la concentración de contaminantes (PM10) los días que presentan niveles críticos de contaminación), se procedió a la superposición de ambas cartografías.

3.6 DISTRIBUCIÓN DE LOS VIENTOS EN SANTIAGO

Para la representación de los vientos se consideró su dirección y velocidad registrada en cada estación de monitoreo de la Red MACAM. Mediante el software ArcGis 9.3 se digitalizó tal información, generando flechas que muestran una dirección y cuyo ancho señala su intensidad.

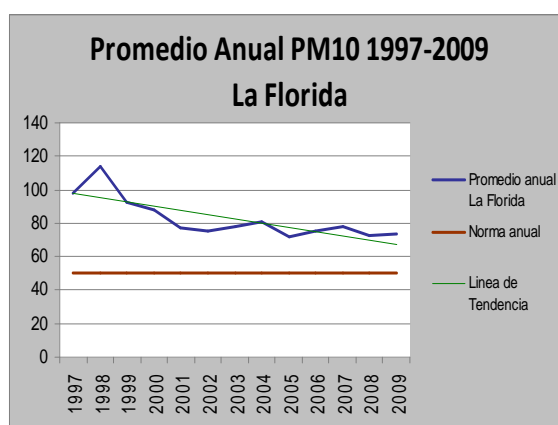
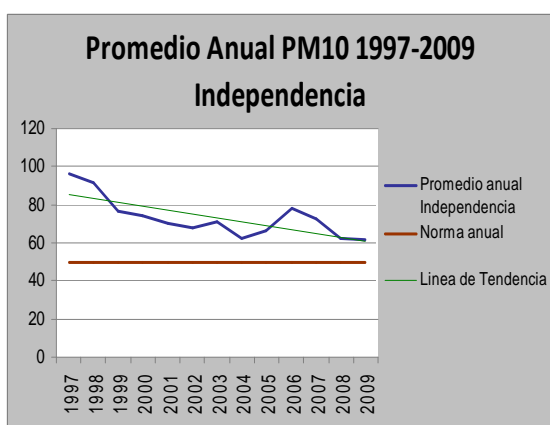
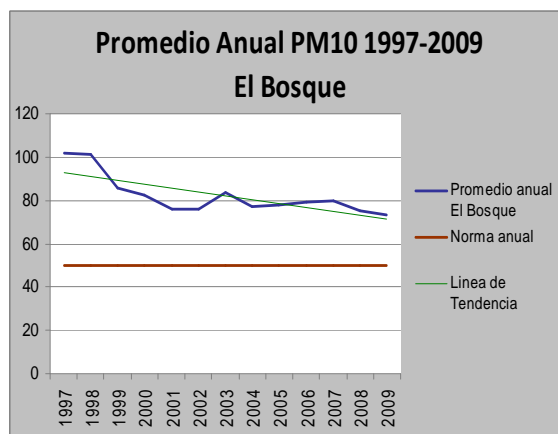
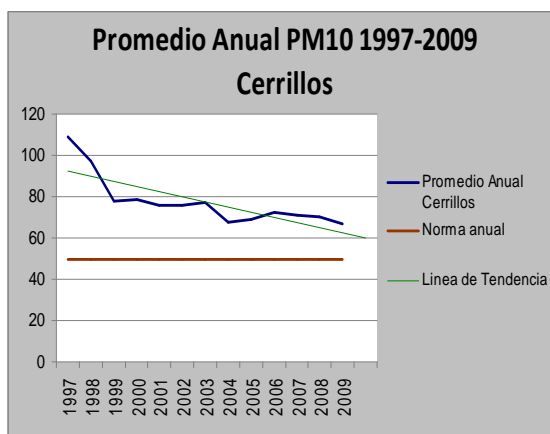
3.7 CORRELACIÓN DE LAS VARIABLES ANALIZADAS

Para establecer el grado de correlación entre las temperaturas atmosféricas y el material particulado, se procedió a la utilización del índice de correlación de Pearson, el cual entrega valores que fluctúan entre -1 y 1. Los valores negativos indican la existencia de una relación inversa entre las variables. Los valores cercanos a cero indican que no existe relación entre los elementos analizados, mientras que los valores positivos dan cuenta de una relación directa entre las variables estudiadas.

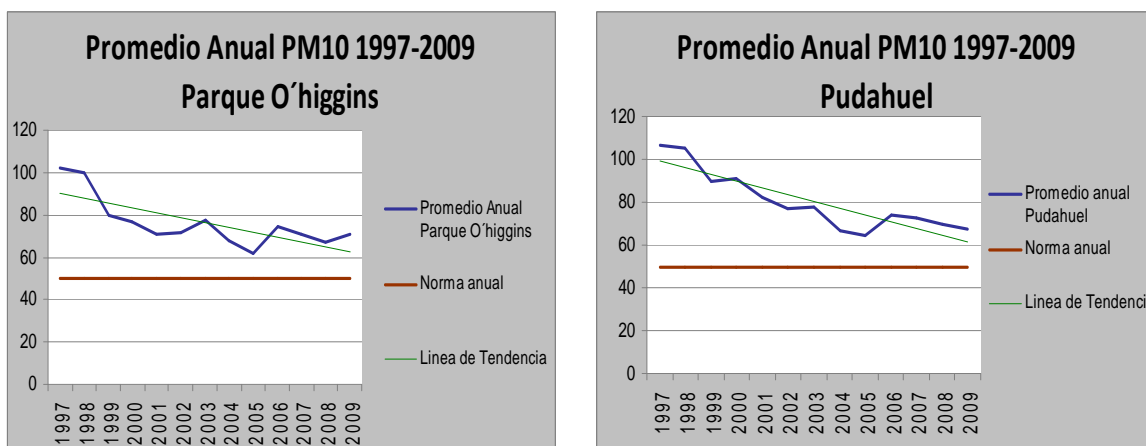
CAPITULO 4: RESULTADOS

4.1 COMPORTAMIENTO ANUAL DEL MATERIAL PARTICULADO

Al analizar el comportamiento del Material Particulado es necesario aclarar que la obtención de datos mediante instrumentos automáticos sólo comenzó en el mes de Abril de 1998 (excluyendo la Estación de monitoreo de Cerro Navia que aún no existía). Desde ese año, todas las estaciones registraron altos niveles de contaminación por material particulado, superando la norma anual impuesta por CONAMA ($50\mu\text{g}/\text{m}^3$). Sin embargo, los niveles de las concentraciones de PM10 se han reducido en el tiempo, acercándose cada vez más al valor de la norma en todas las estaciones de monitoreo (Figuras N° 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8), lo que se debería a medidas adoptadas tales como la renovación del parque automotriz, introducción del gas natural y cambios en la composición de los combustibles, además de diversos programas de pavimentación y lavado de calles, etc.



DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009



Figuras 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8. Promedio anual PM10 en estaciones de monitoreo de Santiago. 1997-2009. Fuente: Elaboración Propia

Como se puede apreciar en las figuras, existe una notable diferencia entre los niveles iniciales de contaminación por material particulado y los evidenciados el año 2009, presentando ciertas fluctuaciones entre 1997 y 2009. La estación de Independencia es la que presenta los menores valores iniciales de PM10 al igual que los correspondientes al 2009, mientras que las demás estaciones superaban en sus inicios por mucho la norma anual, teniendo que las de Pudahuel, Cerrillos, Parque O'Higgins, La Florida y El Bosque presentaban valores por sobre los 100 µg/m³.

Por otra parte la estación de Cerro Navia también supera la norma anual establecida por más de 20 µg/m³, pero hay que considerar que los datos de ésta abarcan sólo 2 años.

Por otra parte, las estaciones de Puente Alto y Quilicura, sólo cuentan con datos desde el año 2009 en adelante, superando también la norma establecida.

Un caso diferente corresponde a la estación de monitoreo de Las Condes, que es la única que presenta valores inferiores a la norma los años 2005 y 2007 (Figura 9). Desde el comienzo de la toma de mediciones, esta estación ha presentado los menores niveles de contaminación relacionada con el PM10 y una tendencia a la disminución interrumpida el año 2008.

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009

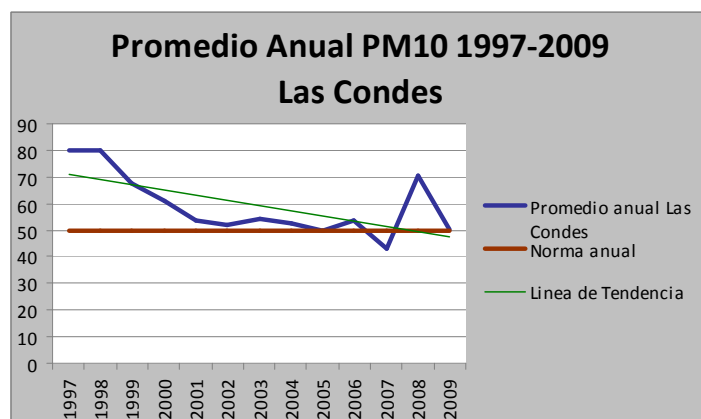


Figura 9: Promedio anual PM10 Las Condes (1997-2009). Fuente: Elaboración Propia

De manera general destaca el hecho de que en los primeros años de toma de mediciones en todas las estaciones se observa una gran cantidad de días en los cuales se supera la norma diaria de Material Particulado. En el año 2009, la estación de Las Condes registró los menores valores, en contraposición a lo ocurrido en las estaciones de Cerro Navia, Quilicura y La Florida, que muestran los mayores promedios anuales, tal como se aprecia en la tabla 2 y figura 10

Estación de Monitoreo	Promedio Anual PM10 2009	Norma Anual
Cerrillos	67,18	50
El Bosque	73,1	50
La Florida	73,62	50
Independencia	61,25	50
Las Condes	50,12	50
Parque O'Higgins	70,87	50
Pudahuel	67,46	50
Cerro Navia	78,34	50
Quilicura	80,29	50
Puente Alto	52,58	50

Tabla 2: Concentraciones medias anuales de PM10 en estaciones de monitoreo de Santiago, año 2009. Fuente: Elaboración propia.

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009

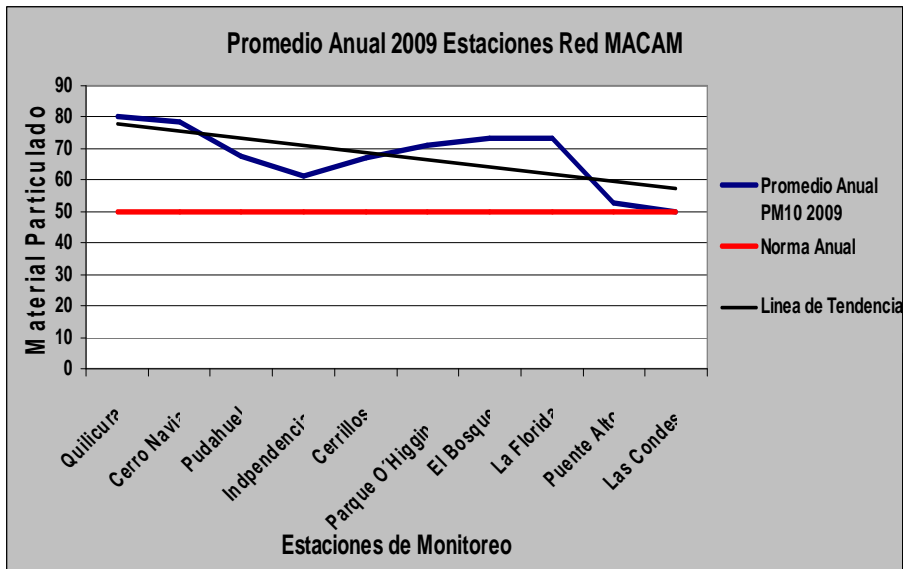


Figura 10: Promedio anual de Material Particulado en las estaciones de monitoreo de Santiago el año 2009. Fuente: Elaboración propia

Si se ordenan las estaciones de monitoreo en función de su altitud (figura 10), se observa que aquellas ubicadas en lugares más altos (como Las Condes) registran los más bajos niveles de contaminación el año 2009.

4.2 ANÁLISIS DE MESES CRÍTICOS

Al observar de manera general los promedios diarios de PM10 registrados por las estaciones de monitoreo de la Red MACAM, es posible apreciar una disminución de los períodos que contienen días que pueden ser considerados como contaminantes (Anexo 1).

Como ejemplo, se muestran tres años de registros de la estación de Cerrillos (figuras 11, 12 y 13), en la cuales es posible observar que mientras en 1998 los días críticos se extendían entre marzo y septiembre, en el año 2003 ocurrieron entre mayo y agosto y en el año 2009, solamente entre mayo y julio.

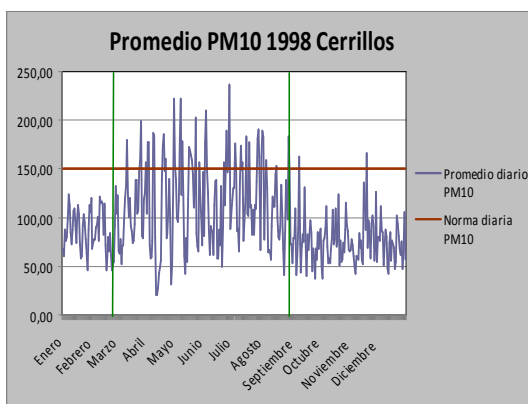


Figura 11: Promedio PM10 Cerrillos 1998

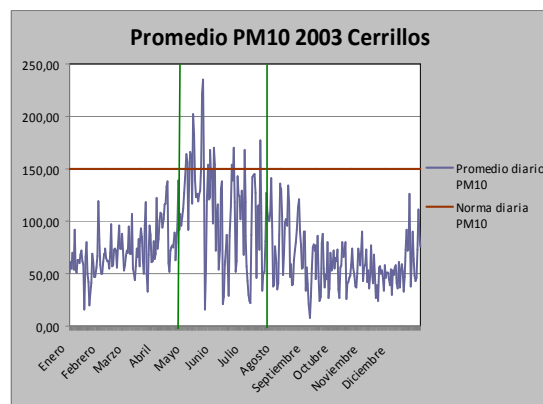


Figura 12: Promedio PM10 Cerrillos 2003

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009

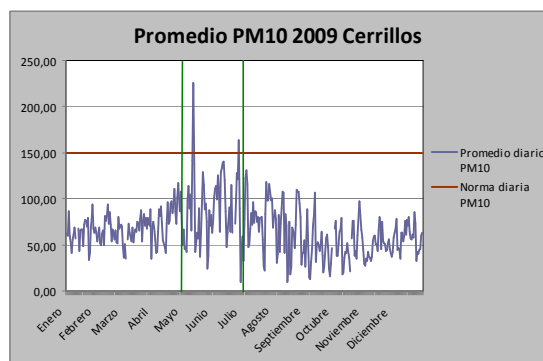


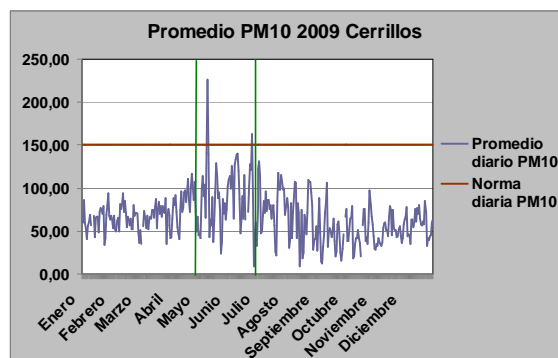
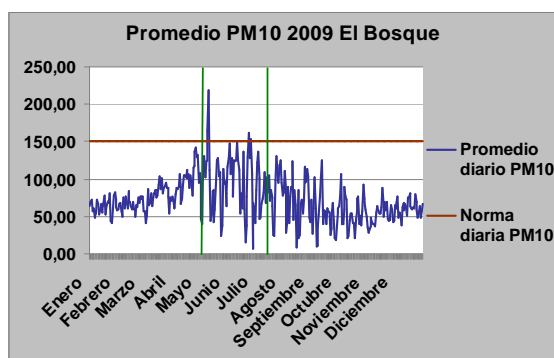
Figura 13: Promedio PM10 Cerrillos 2009

Otro elemento a destacar es la notable disminución en el número de días considerados críticos. En 1998 la Estación de Cerrillos presentaba un total de 45, mientras que en el 2003 fueron 18, y finalmente en el 2009 se redujeron a sólo 2 días.

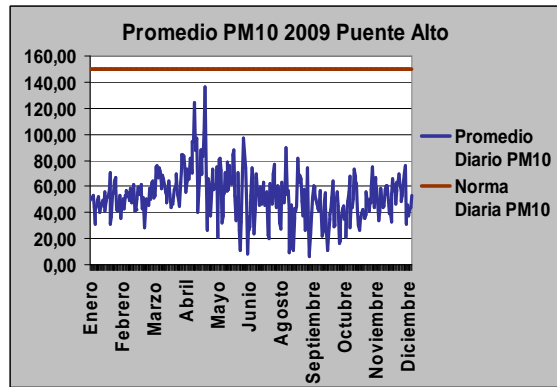
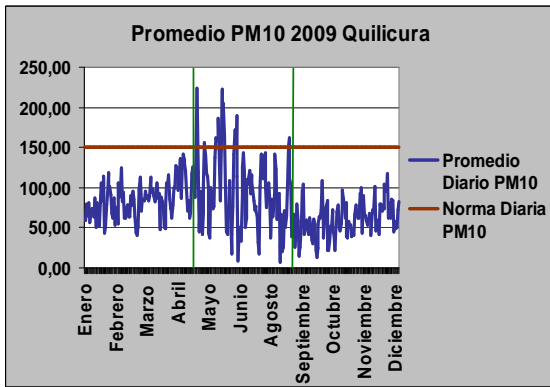
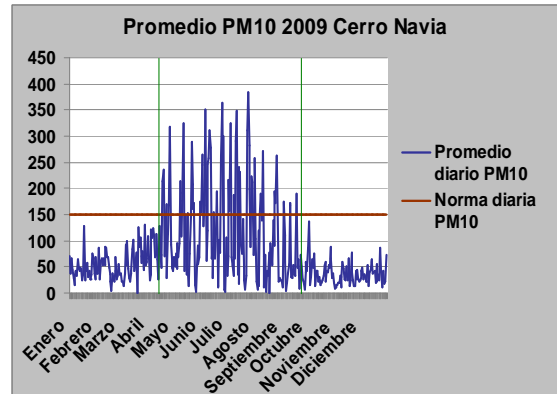
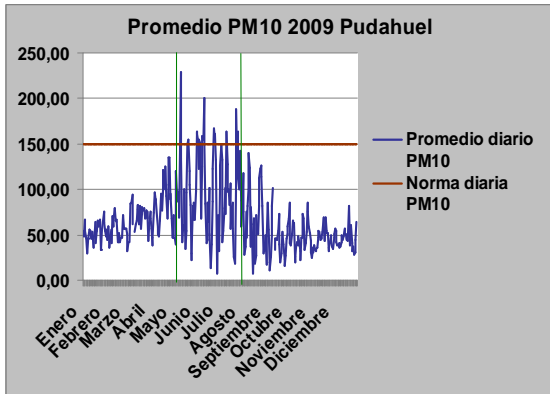
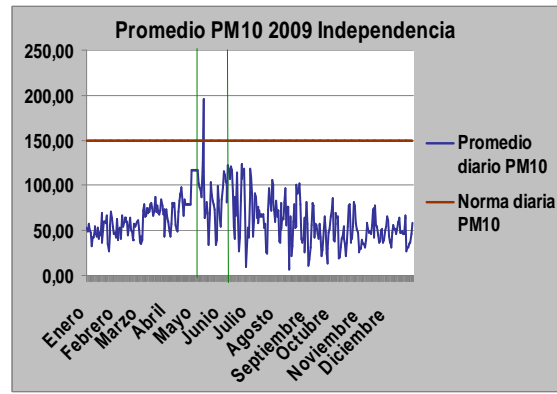
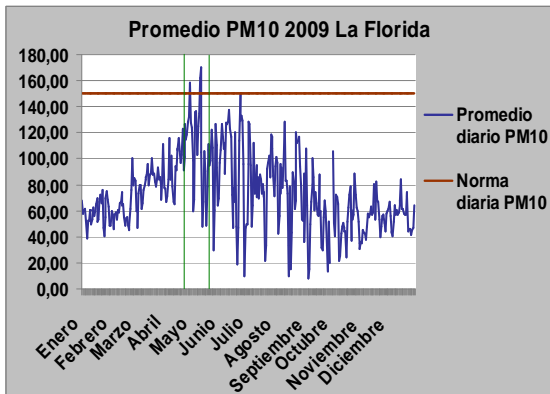
4.2.1 Variación Mensual del PM10 el año 2009

El año 2009, los días en que se superaba el nivel de concentración propio de aire de buena calidad para el material particulado, se registraron a partir del mes de mayo, en casi todas las estaciones de monitoreo. La extensión del período ha sido variable y alcanzó hasta el mes de agosto (Figuras 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21), es decir abarcando parte de las estaciones de otoño e invierno. Es en este período donde se presentaron las mayores concentraciones como consecuencia de la disminución estacional de la temperatura en las capas inferiores de la atmósfera y del incremento de la presión atmosférica que provoca la inversión térmica de subsidencia, lo que genera una situación de inamovilidad o baja capacidad de dispersión (Jorquera et al, 2004). La estación de Pudahuel es la que registró la mayor extensión temporal de altas concentraciones.

Es claramente apreciable que los días con mayor contaminación por Material Particulado ocurren en el mes de mayo. Por el contrario, en los meses correspondientes a las estaciones de primavera y verano se encuentran los menores promedios diarios, como consecuencia de las mejores condiciones de ventilación.



DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009



Figuras 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23: Promedio anual de PM10 en estaciones de monitoreo de Santiago el año 2009. Fuente: Elaboración Propia

Sin embargo, en el año 2009 hay dos estaciones de monitoreo que escapan a lo anteriormente mencionado, correspondiendo a Las Condes y Cerro Navia.

La estación de monitoreo de Las Condes es la única en la que no se presentan días que superen la norma de concentración diaria que indica la pérdida de calidad del aire. Por otro lado, los máximos valores de Material Particulado se presentan a finales del mes de

abril, extendiéndose hasta Julio, lo que si bien coincide con lo evidenciado en las otras estaciones, en todos los casos se encuentran bajo la norma.

La estación de monitoreo de Cerro Navia presenta características que se pueden homologar a las que ocurrían al inicio de la toma de mediciones de las demás estaciones, es decir la existencia de días críticos desde finales de abril hasta octubre. Sumado a esto es posible apreciar que esta estación es la que presenta los mayores valores de concentración diaria del material particulado, alcanzando máximos más altos que los $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$, superando por mucho a otras estaciones, tales como Pudahuel, El Bosque o Cerrillos, que no alcanzaron los $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Es importante destacar que la estación de Cerro Navia solo posee datos de Material Particulado desde el año 2008 (anexo 2), sin embargo en ese año, el período de tiempo en que se evidenciaban días críticos abarcaba desde el mes de abril hasta el mes de agosto, con días que superan los $270 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Al comparar este valor resulta superado por los $383 \mu\text{g}/\text{m}^3$ registrados el año 2009.

4.3 VARIACIÓN DIARIA Y HORARIA DEL PM10 EL AÑO 2009

Al analizar los datos diarios de PM10 es posible observar que el comportamiento de los días críticos ha variado enormemente desde el inicio de la toma de mediciones de la Red MACAM hasta el año 2009.

La cantidad de días en que se supera la norma diaria de máxima concentración para el año 2009 es muy reducida en casi todas las estaciones de monitoreo, excepción hecha de los registros de las estaciones de Pudahuel, Cerro Navia y las Condes.

Las estaciones de Pudahuel y Cerro Navia presentan la mayor cantidad de días que superan la norma diaria, con 16 días la primera y con 49 la segunda. Estos valores son muy altos en comparación con las otras estaciones, en que varían entre uno (Independencia) a 5 días (Parque O'Higgins). Las Condes, por su parte, no presenta días en que los niveles de contaminación superan la norma diaria establecida.

Los días en que se supera la norma en el año 2009 se registraron simultáneamente en las diversas estaciones de monitoreo, tal como sucedió el 11 de Mayo y 26 de Junio. Esos días, todas las estaciones, con excepción de la de Las Condes, presentaron él o uno de los mayores valores de contaminación de todo el año (anexo 3), por lo que pueden ser considerados como días críticos de contaminación en toda la ciudad. Igual simultaneidad existe en lo referente a los días con menos contaminación, que correspondieron al 15 Agosto y 10 de Octubre. No obstante que se está hablando de días con peores o mejores condiciones de contaminación, es importante mencionar la alta variabilidad horaria de estos valores, tal como se representa en las figuras 24, 25, 26, 27, 28 y 29.

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009

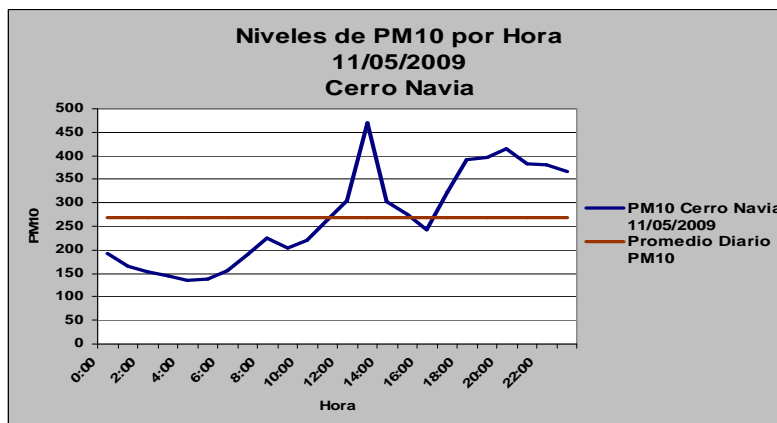


Figura 24: Variación horaria de PM10 en la estación de Cerro Navia. Fuente: Elaboración propia

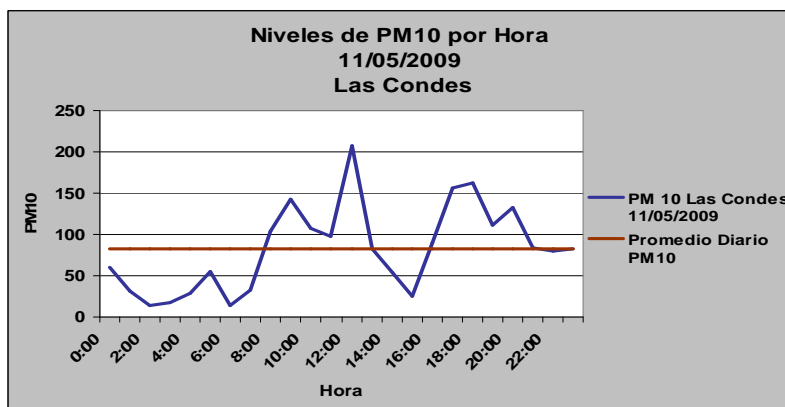


Figura 25: Variación horaria de PM10 en la estación de Las Condes. Fuente: Elaboración propia

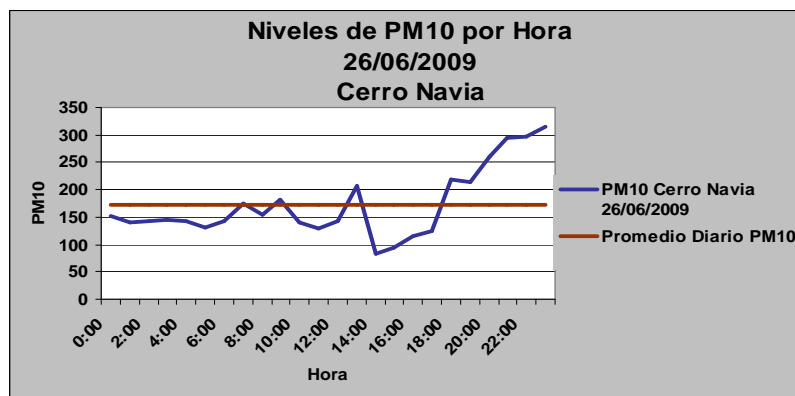


Figura 26: Variación horaria de PM10 en la estación de Cerro Navia. Fuente: Elaboración propia

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009

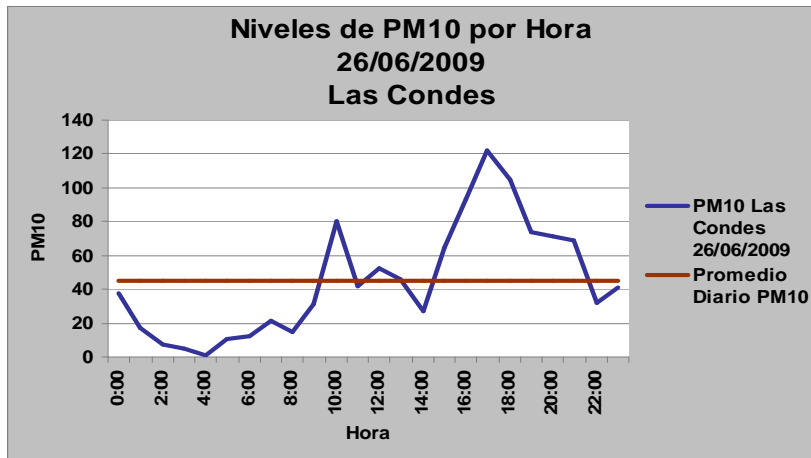


Figura 27: Variación horaria de PM10 en la estación de Las Condes. Fuente: Elaboración propia

Las figuras anteriores, correspondientes a los valores de PM10 registrados los días críticos del 11 de Mayo y 26 de Junio de 2009, permiten observar la notable variación de las concentraciones de PM10 a lo largo del día. Los máximos valores se registraron en torno a las 6 y 8 PM mientras que los valores mínimos se encuentran preferentemente en la madrugada, hasta las 6AM. Una característica general a todas las estaciones en los días seleccionados corresponde a la gran oscilación entre los valores máximos y mínimos, lo que resta representatividad al valor promedio diario. En el ejemplo de la estación de Cerro Navia (figura 24), se aprecia que el 11 de Mayo presentó un mínimo que osciló en torno a los 120 µg/m³ y un máximo que superó los 450 µg/m³. Sin embargo, en Chile no existen normas horarias referidas al PM10 como si lo hay con respecto al Monóxido de Carbono, que se aplica a períodos de 8 horas.

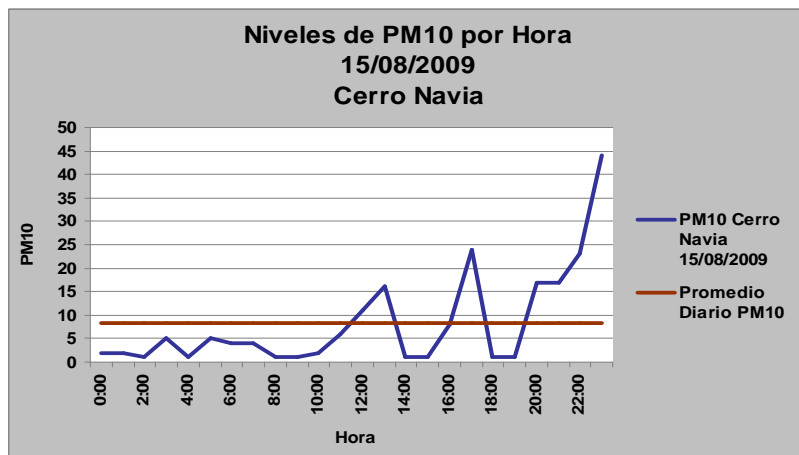


Figura 28: Variación horaria de PM10 en la estación de Cerro Navia. Fuente: Elaboración propia

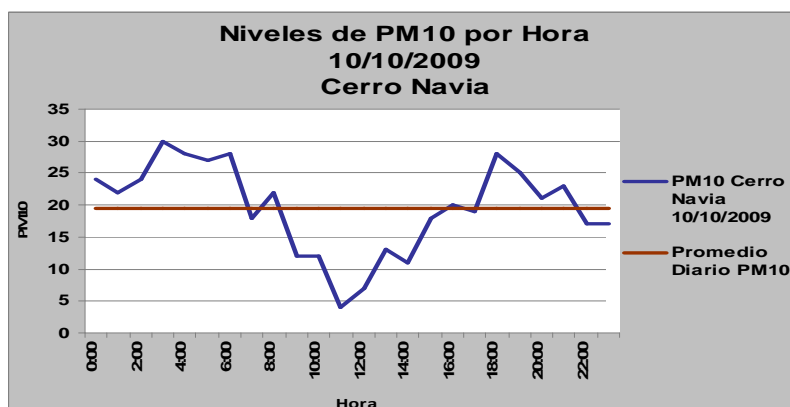


Figura 29: Variación horaria de PM10 en la estación de Cerro Navia. Fuente: Elaboración propia

Los días en que los niveles de contaminación por material particulado presentaron valores mínimos, se registraron en las estaciones de invierno y primavera, y al igual que en el caso anterior, manifestaron una importante variación horaria.

El día 15 de Agosto, los valores mínimos se observaron en la madrugada, mientras que los valores más altos lo hicieron desde las 6PM, presentándose una mayor fluctuación que en el caso de los días con valores máximos, tal como se aprecia en la figura 28. Esto se ve exacerbado el día 10 de Octubre, donde los más altos niveles de contaminación se observaron en la madrugada (todo lo contrario a los casos anteriores), mientras que los mínimos se encuentran a partir de las 10AM (Figura 29).

4.4 VARIACIÓN DIARIA DE LA TEMPERATURA

Tal como se indicó en el marco metodológico, los datos diarios de temperatura corresponden a aquellos días identificados como críticos por sus concentraciones de material particulado.

4.4.1 Análisis temperaturas atmosféricas de La Red MACAM

Las temperaturas de los días seleccionados presentan un comportamiento similar en las diferentes estaciones de monitoreo, registrándose de manera general las menores temperaturas en la madrugada y al anochecer, mientras que las temperaturas más altas se encuentran en la tarde (entre las 12PM y las 4 PM). Las temperaturas comienzan a subir progresivamente a partir de las 7AM. Sin embargo, el único día que presenta diferencias al respecto corresponde al 15 de Agosto, cuando las temperaturas más bajas se registran en el horario en el que los otros días se encontraban valores altos (Figuras 34 y 35).

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009

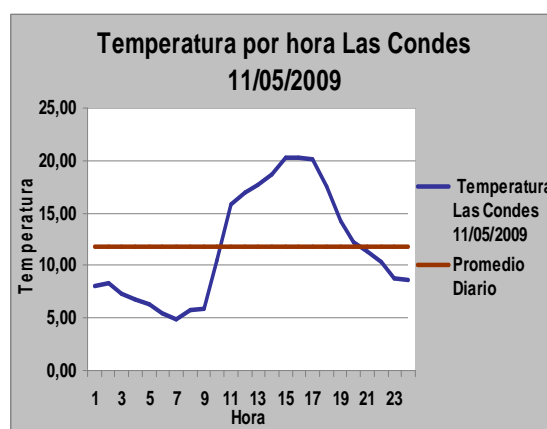
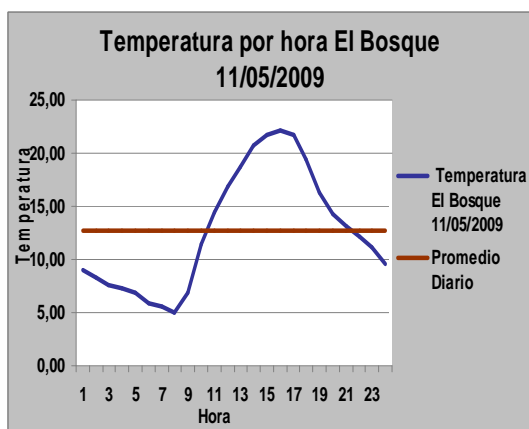


Figura 30: Temperatura horaria en El Bosque el 11 de mayo de 2009
 Figura 31: Temperatura horaria en Las Condes el 11 de mayo de 2009
 Fuente: Elaboración Propia

El día 11 de Mayo todas las estaciones (Anexo 3) presentaron valores máximos que alcanzan o sobrepasan los 20 grados Celsius, tal como se aprecia en la estación del Bosque (Figura 30), y de Las Condes (Figura 31).

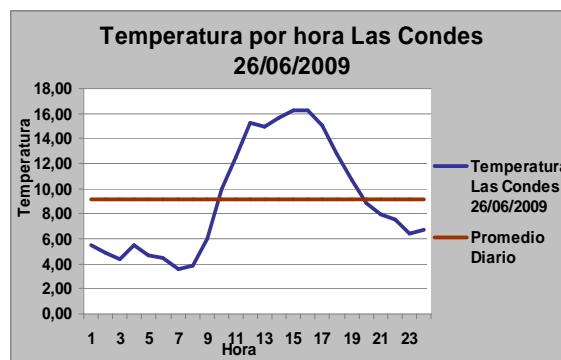
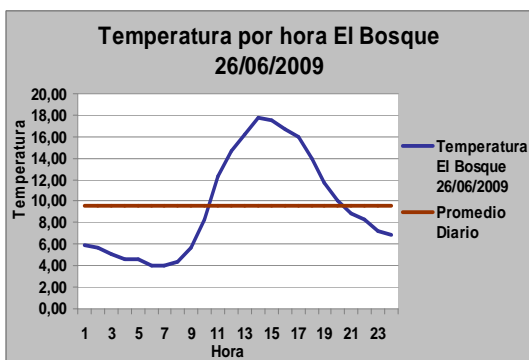


Figura 32: Temperatura horaria El Bosque
 Figura 33: Temperatura horaria Las Condes
 Fuente: Elaboración Propia

El 26 de Junio las temperaturas son menores a las registradas el 11 de Mayo, teniendo que los máximos llegan casi a los 18 grados, tal como se aprecia en la estación de El Bosque (Figura 32), mientras que de nuevo es la Estación de Las Condes la que presenta los menores valores, los cuales apenas rondan los 16 grados (Figura 33).

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009

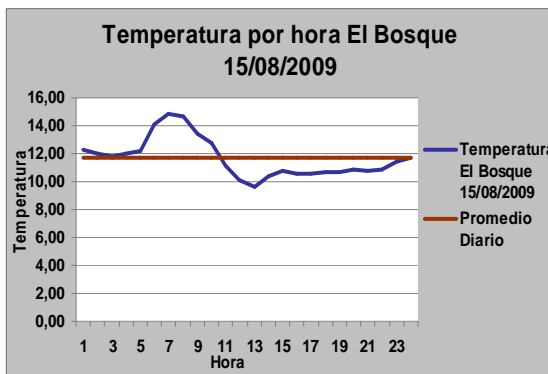


Figura 34: Temperatura horaria El Bosque

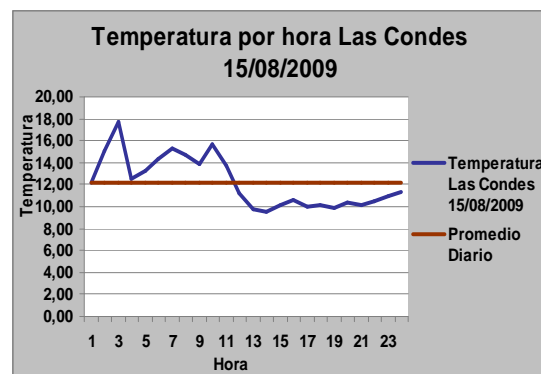


Figura 35: Temperatura horaria Las Condes

Fuente: Elaboración Propia

El 15 de Agosto las temperaturas presentaron marcadas diferencias en comparación a los dos casos anteriores, teniendo que es en la estación de Las Condes donde se registraron los mayores valores (Figura 35), que oscilaron en torno a los 18^o, mientras que las demás estaciones muestran valores que no sobrepasaron los 16^o, tal como se muestra en la estación de El Bosque (Figura 34).

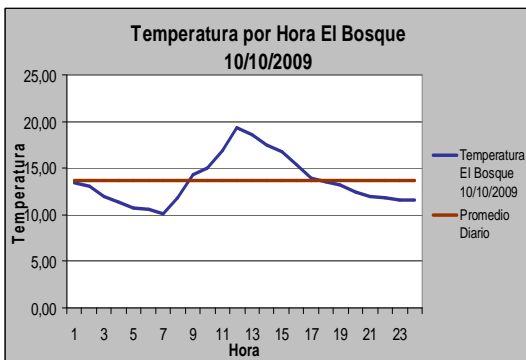


Figura 36: Temperatura horaria El Bosque

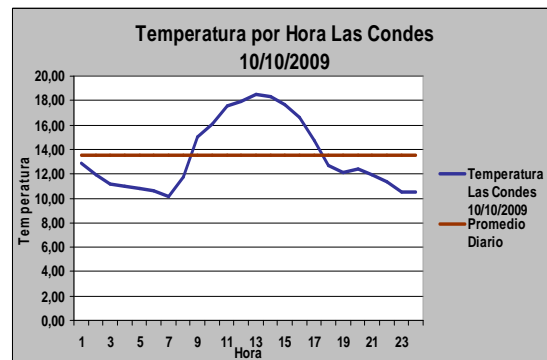


Figura 37: Temperatura horaria Las Condes

Fuente: Elaboración Propia

En este día, los valores de las temperaturas son similares en todas las estaciones, teniendo que los máximos oscilan en torno a los 18 o 20°C, tal como se ve en las figuras 38 y 39, correspondientes a las estaciones de El Bosque (Figura 36) y Las Condes (Figura 37).

Como se planteó anteriormente, el día 15 de Agosto presentó un comportamiento disímil con respecto a los otros días analizados ya que las máximas temperaturas se registraron desde la madrugada, hasta las 9 o 10AM, mientras que las mínimas lo hicieron a partir de las 11AM.

Al relacionar el comportamiento de las temperaturas con el del material particulado, en las diversas estaciones de monitoreo los días 11 de Mayo y 26 de agosto (días de mayor concentración), es posible notar que aquellas horas en que se registran los menores

niveles de contaminación también lo hacen los niveles de temperaturas. Con respecto a los valores máximos, tanto de PM10 como de temperaturas, es posible ratificar la misma relación, teniendo que las mayores temperaturas para los días críticos de contaminación se observan entre las 1 y 7 u 8PM (cuando los datos horarios superan el promedio diario), mientras que los valores máximos de PM10 se observan entre las 4 y 8PM.

Existe una relación directa entre las mayores temperaturas y las mayores concentraciones de material particulado en ambos días estudiados.

Con respecto a aquellos días en que los niveles de contaminación por material particulado son mínimos, no se observa esta clara relación con las temperaturas. En el caso del 15 de Agosto, en la estación de Las Condes, las mayores temperaturas se registraron en la madrugada, mientras que los valores horarios de material particulado que sobrepasaron el promedio diario se registraron hasta las 12PM, y los máximos lo hicieron a las 8PM en adelante. Los mínimos de contaminación ocurrieron cuando las temperaturas fueron más altas.

4.5 Distribución espacial de la contaminación por Material Particulado

4.5.1. Día de alta concentración de PM10: 11 de Mayo de 2009

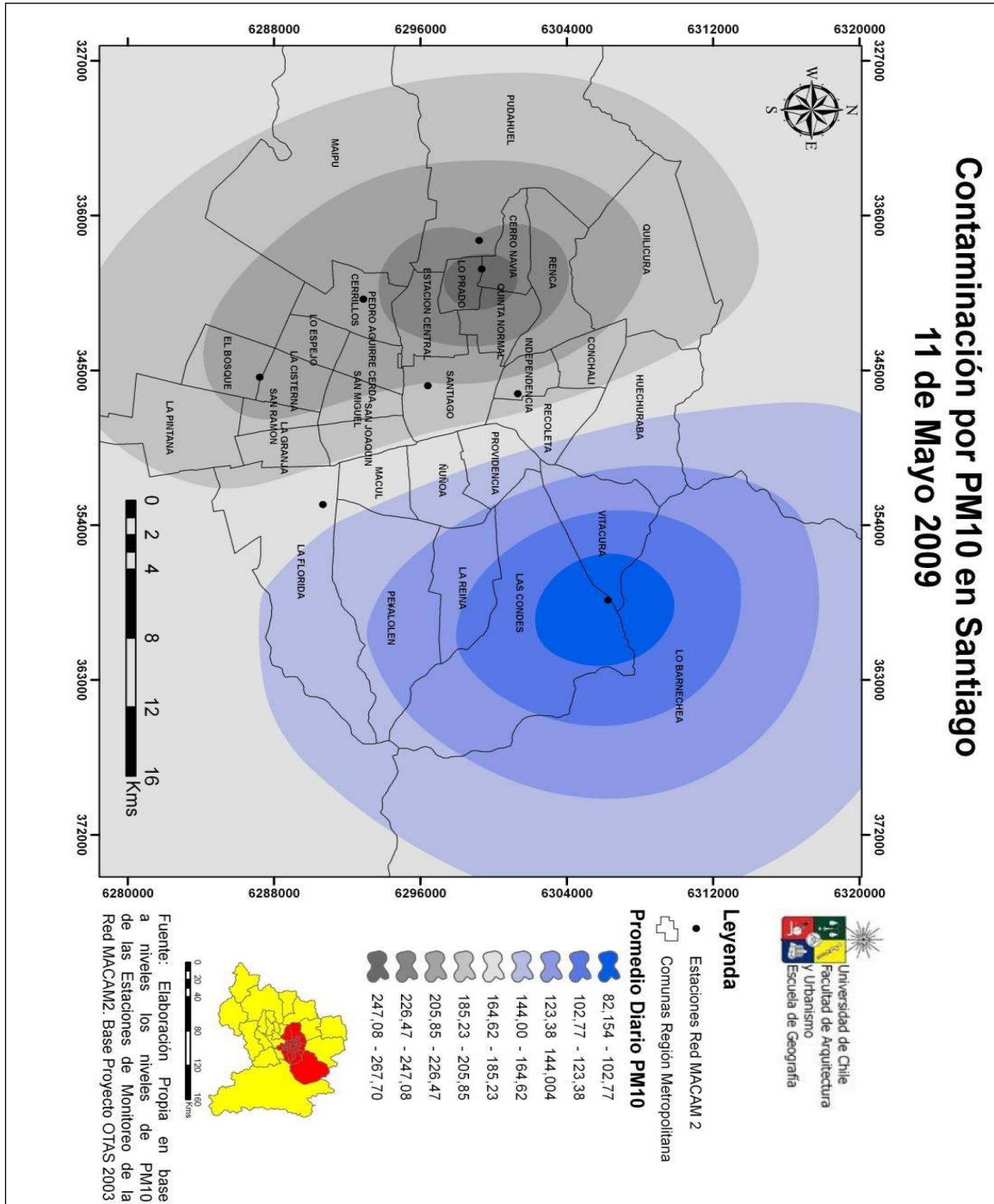


Figura 38: Promedio diario de contaminación por Material Particulado. 11/05/2009.
Fuente: Elaboración propia

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009

La distribución espacial del promedio diario del PM10 en las distintas estaciones de monitoreo (Figura 38) muestra una clara diferenciación, dividiéndose la ciudad en dos secciones, una con altos niveles de contaminación (sector poniente y sur de la ciudad) y otra con niveles más bajos (sector oriente). De manera muy clara, es posible apreciar que las comunas de Las Condes, Lo Barnechea, Vitacura y la Reina, no superan la norma diaria de material particulado, mientras que las de Cerro Navia, Renca, Quinta Normal y Quilicura alcanzan valores muy altos de concentración.

A su vez es posible apreciar una gradiente de disminución de la contaminación por material particulado en función de la altura.

Comportamiento del material particulado a las 6AM

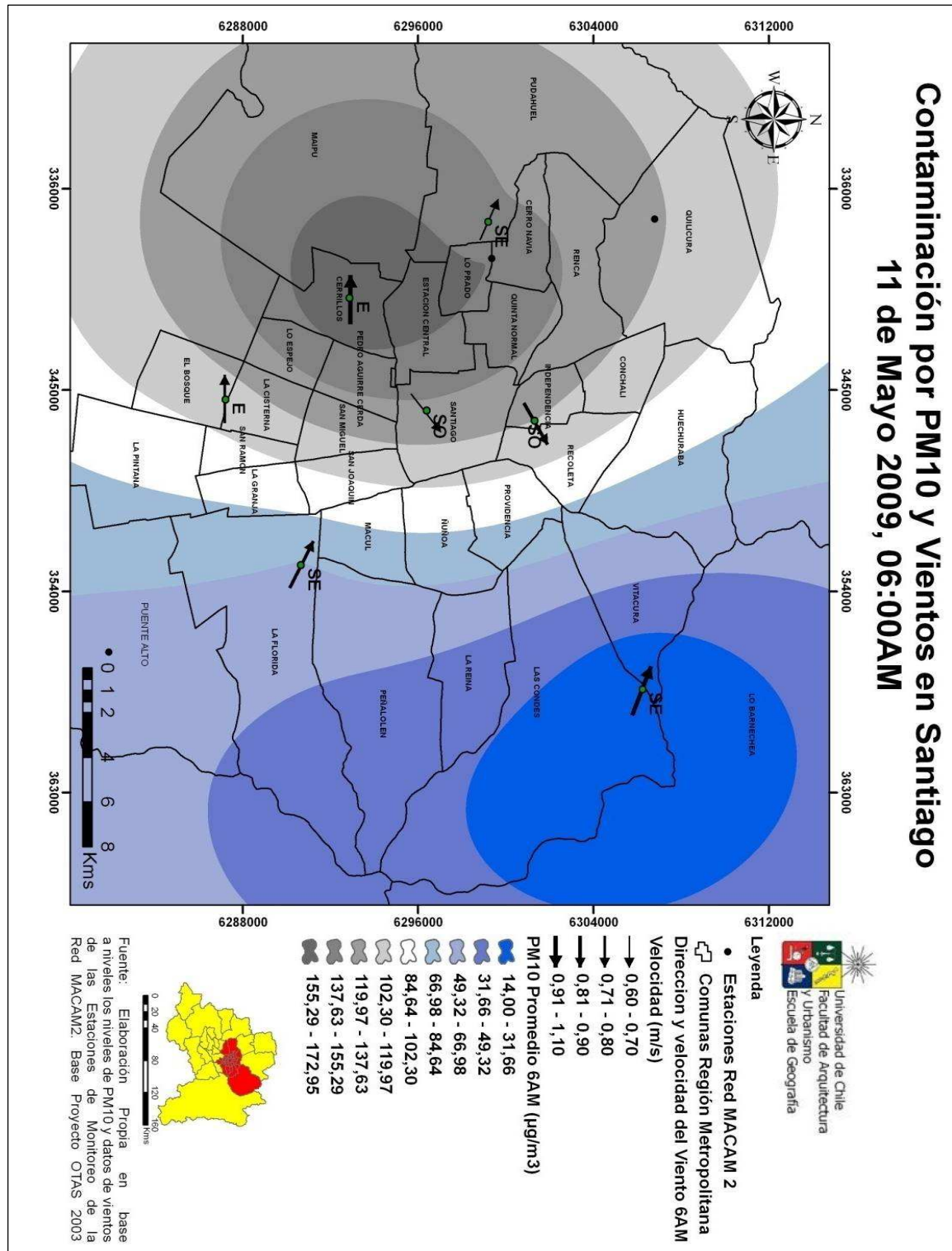


Figura 39: Promedio horario de contaminación por Material Particulado, 6AM. 11/05/2009. Fuente: Elaboración propia

El PM10 tiene en esta hora del día un patrón de distribución espacial similar al promedio diario, es decir, concentrando los menores niveles de contaminación en el sector oriente y los mayores en el sector poniente (Figura 39).

Es importante destacar que a esta hora del día, los niveles de PM10 son relativamente bajos en todo Santiago, teniendo que sólo en las comunas de Cerro Navia, Cerrillos y Estación Central se registran valores que superan la norma diaria establecida. El sector oriente presenta valores extremadamente bajos en comparación con el resto de la ciudad y bastante alejados de una calidad regular. Es claramente identificable la predominancia de la componente Este del viento, permitiendo inferir que los flujos de aire se producían desde el sector oriente de la ciudad hacia el poniente, moviendo de esta manera el Material Particulado desde los sectores más altos a los más bajos de la ciudad.

Comportamiento del material particulado a las 12PM

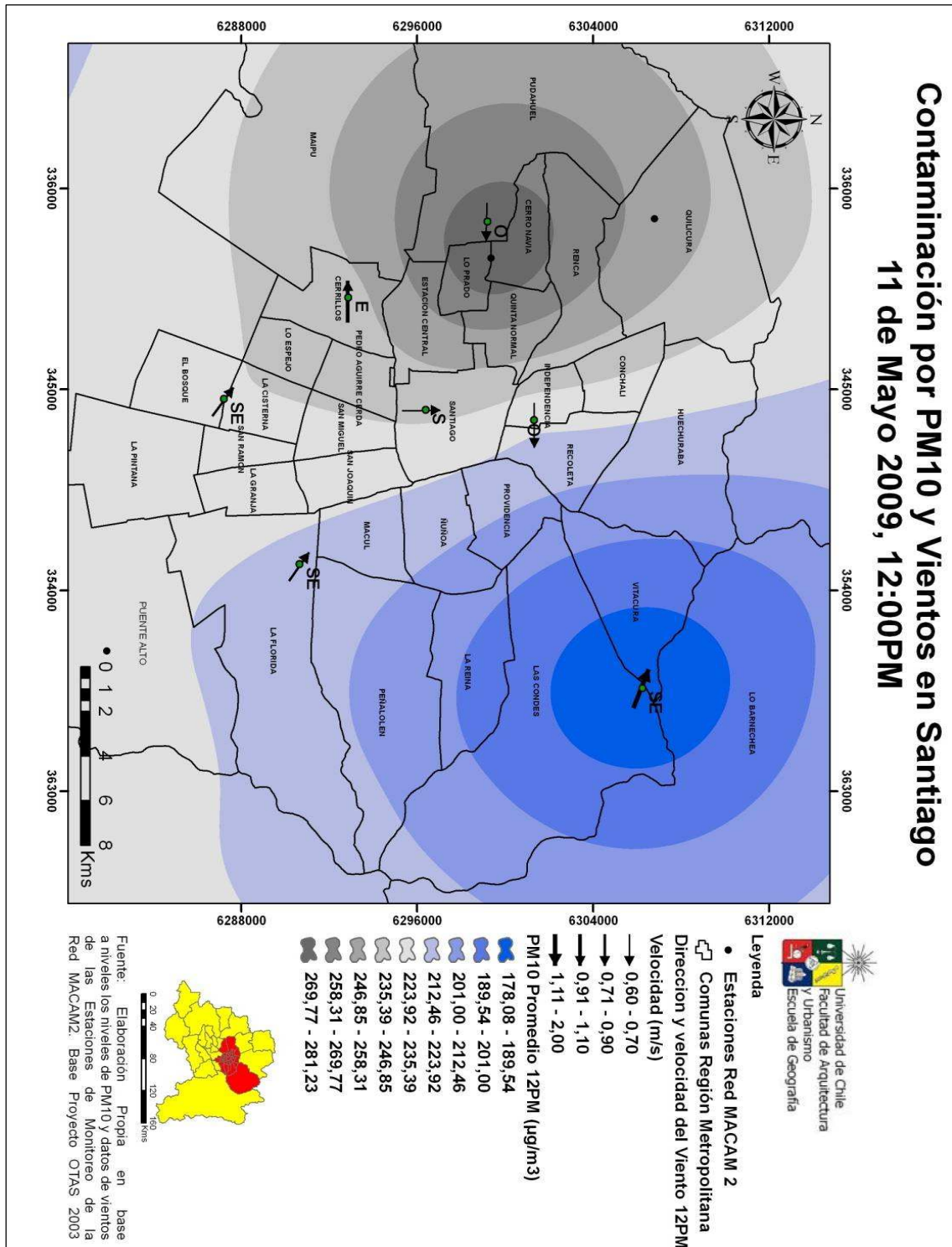


Figura 40: Promedio horario de contaminación por Material Particulado, 12PM. 11/05/2009. Fuente: Elaboración propia

En esta hora del día, se mantiene el mismo patrón de distribución de la contaminación por material particulado (Figura 40) pero se ha producido una generalización espacial de las altas concentraciones, que abarcan la totalidad de la ciudad.

Los valores extremos tienden a concentrarse ocupando prácticamente toda la superficie de la comuna de Cerro Navia, además de sectores de Pudahuel y Lo Prado, mientras que en sectores de Las Condes, Vitacura y Lo Barnechea se vuelven a encontrar los valores de contaminación por material particulado más bajos de toda la ciudad. Esto se explicaría por el predominio constante de la componente este del viento, que trasladaría la contaminación hacia el poniente de la ciudad.. La excepción a esto corresponde al sector de Cerro Navia, donde el viento proviene desde el oeste, pero con velocidades muy escasas (0,6 a 0,7 m/s) que no alcanzan para modificar la distribución del PM10, el cual se concentra en el nor poniente de la ciudad, influenciado por las mayores velocidades del viento provenientes del sureste, con velocidades que fluctúan entre 1,1 y 2 m/s.

Comportamiento del material particulado a las 8PM

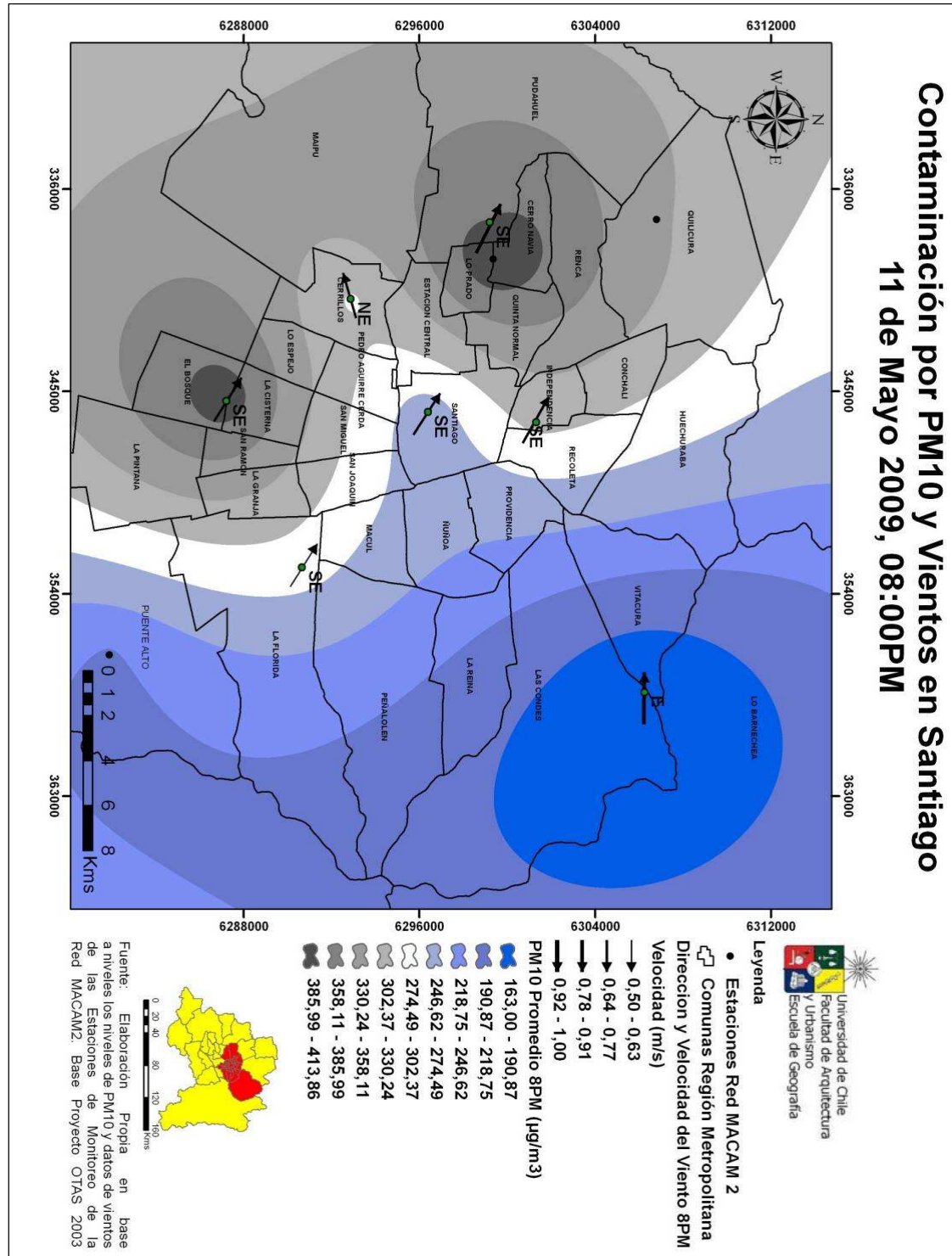


Figura 41: Promedio horario de contaminación por Material Particulado, 8PM. 11/05/2009. Fuente: Elaboración propia

Aquí es posible apreciar una variación en el patrón de distribución espacial de la contaminación ya que ahora existen dos zonas principales en las cuales se concentran los niveles más altos de PM10 (Figura 41), repitiéndose el área comprendida por las comunas de Cerro Navia, Lo Prado y Pudahuel, y sumándose las comunas de El Bosque y La Cisterna (sector sur de la ciudad), las cuales a lo largo del día presentaron valores altos, pero que al anochecer se elevaron considerablemente.

Al igual que en los casos de análisis de las horas anteriores, las comunas del sector oriente siguen manteniendo los menores niveles de contaminación, aunque, sin embargo, estos son más altos que en el resto del día.

Toda la ciudad de Santiago presenta altos niveles de contaminación, pero los valores máximos casi superan los 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Este hecho evidencia la gran amplitud diaria y variación horaria de las concentraciones del material particulado.

Un punto aparte del análisis corresponde a lo observado en la comuna de Cerrillos desde donde comienzan a descender los niveles de contaminación hacia el centro de la ciudad y posteriormente hacia el sector oriente, demostrando la efectividad del cono de aproximación del aeropuerto de Cerrillos como un corredor de viento que logra ventilar a la ciudad, ya que es posible apreciar como por este sector circulan los vientos del noreste, permitiendo un mayor grado de dispersión de los contaminantes. Por otra parte se tiene que las zonas más contaminadas se ven influenciada por la componente este del viento, la cual empuja al material particulado hacia los sectores más bajos de la ciudad.

A lo largo del día es claramente apreciable como varían los valores del material particulado en todas las estaciones de monitoreo de la Red MACAM, mostrando valores más bajos en la madrugada, para ir subiendo sustancialmente a medida que el día avanza, lo que se ejemplifica con la representación de las tres horas seleccionadas de este día crítico junto con la tabla 3, la cual muestra los valores por hora del PM10 por estación de monitoreo.

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009

Niveles de PM10 Por Hora 11/05/2009 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)										
	Quilicura	Cerro Navia	Pudahuel	Independencia	Cerrillos	Parque O'Higgins	El Bosque	La Florida	Puente Alto	Las Condes
0:00	133	192	177	111	170	214	166	110	104	60
1:00	141	165	145	88	151	206	158	77	74	31
2:00	126	153	140	78	165	187	166	51	50	14
3:00	131	145	121	95	147	170	133	23	50	18
4:00	135	136	128	87	155	177	99	49	42	29
5:00	144	137	131	76	146	170	98	45	36	55
6:00	122	155	140	95	173	134	111	66	60	14
7:00	169	191	157	100	182	92	146	119	111	32
8:00	232	224	215	141	243	122	187	189	146	104
9:00	226	203	226	111	263	279	241	228	136	142
10:00	222	221	235	61	212	240	305	271	210	107
11:00	152	264	226	118	229	306	222	265	201	98
12:00	145	304	152	126	233	245	260	170	189	207
13:00	185	470	274	121	175	254	260	216	159	82
14:00	230	303	268	173	141	114	182	167	168	54
15:00	202	275	268	146	152	131	95	100	152	25
16:00	191	242	178	156	217	177	152	183	136	90
17:00	271	323	195	89	273	215	247	210	229	156
18:00	508	393	317	90	336	234	363	356	239	163
19:00	374	396	343	172	332	196	429	422	228	111
20:00	335	414	387	158	299	259	403	288	215	133
21:00	353	383	359	148	365	271	350	244	126	84
22:00	330	381	342	169	362	264	308	138	138	80
23:00	305	367	358	126	297	240	177	102	66	82

Tabla 3: Niveles de PM10 por Hora 11/05/2009. Fuente: Elaboración Propia

4.5.2 Caso Nº 2: Día 26 de Junio de 2009

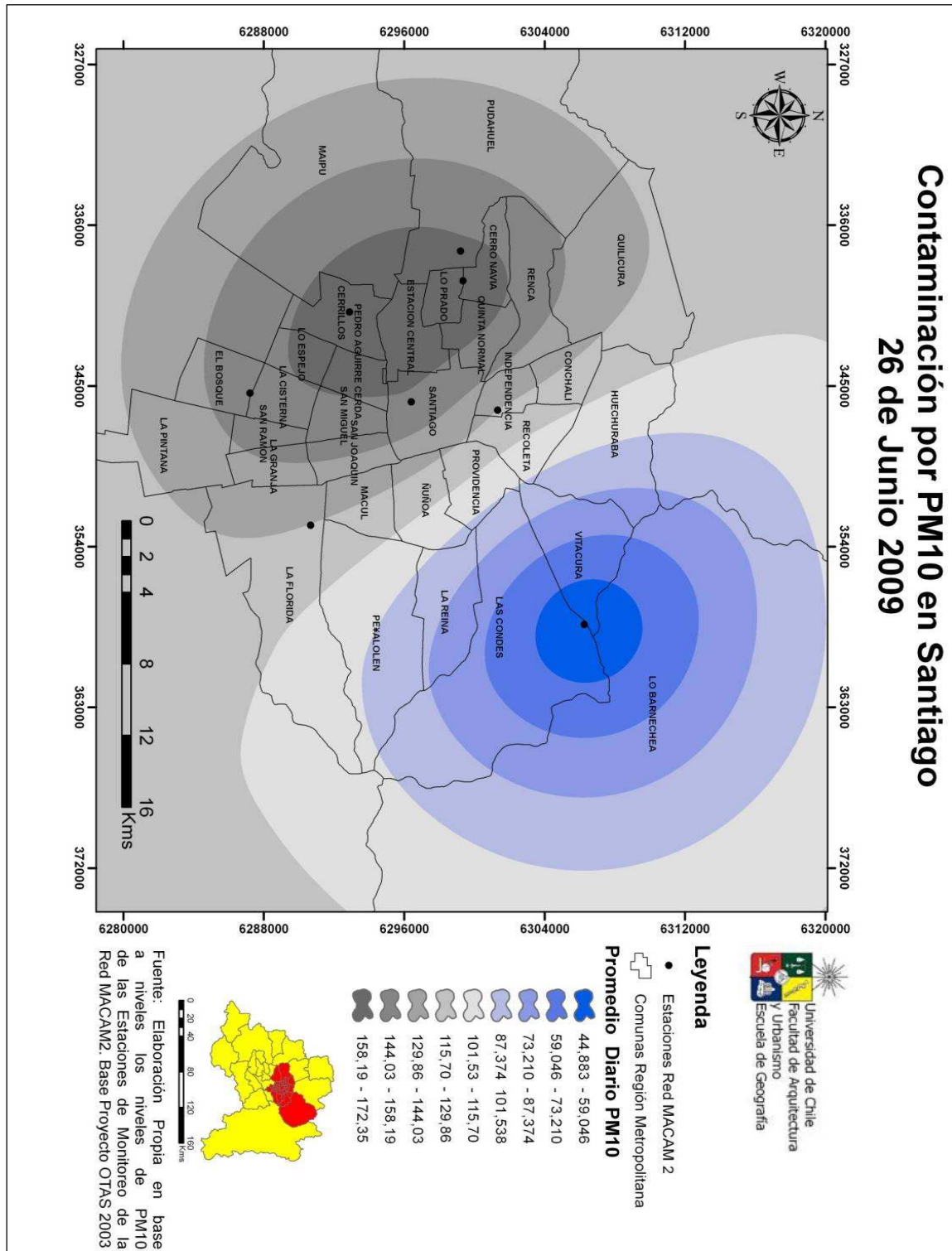


Figura 42: Promedio diario de contaminación por Material Particulado. 26/06/2009. Fuente: Elaboración Propia

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009

El patrón de distribución de las concentraciones de material particulado durante este segundo día crítico analizado se asemeja bastante a lo mostrado el 11 de mayo de 2009, presentándose los mayores niveles de contaminación por material particulado en las comunas del sector poniente y los menores en torno a las comunas del sector oriente de la ciudad, teniendo que la contaminación disminuye desde el sur-oeste al nor-este de la ciudad (figura 42).

Es importante destacar que los niveles de contaminación promedio de este día son menores que en el caso anterior. Además se tiene que los valores mayores ya no se concentran sólo en los sectores de Cerro Navia, Quinta Normal o Lo Prado, sino que se extienden hasta Cerrillos, Pedro Aguirre Cerda y Lo Espejo. Por otra parte los menores valores de contaminación se siguen ubicando en las comunas de Las Condes, Vitacura y Lo Barnechea.

Comportamiento del material particulado a las 6AM

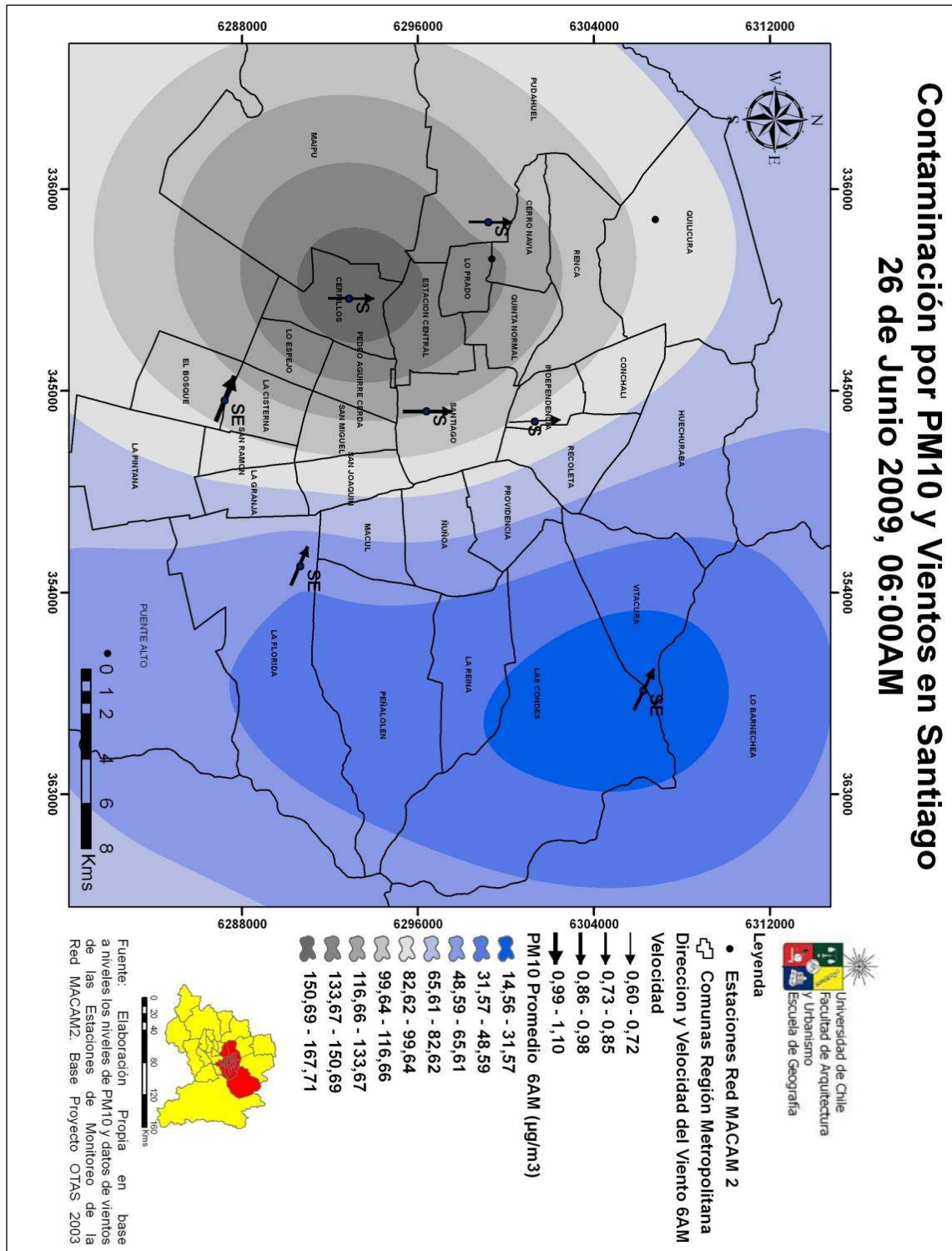


Figura 43: Promedio horario de contaminación por Material Particulado, 6AM. 26/06/2009. Fuente: Elaboración propia

Al igual que en el caso anterior, el PM10 alcanza los menores valores en el sector oriente de la ciudad a esta hora del día, mientras que los mayores se localizan en el sector poniente (Figura N° 43).

A esta hora del día, los niveles de PM10 son muy bajos en todo Santiago. Sólo en las comunas de Cerrillos y parte de Estación Central, se presentan valores que superan la norma diaria establecida, mientras que el sector oriente los valores son menores que en el resto de la ciudad y a su vez muy por debajo de la norma. A ello se debe agregar a que en este sector predominan los vientos del Este, lo que provoca que el PM10 se mueva hacia los sectores más bajos de la cuenca, y que además, se ve modificado por la influencia que ejercen los vientos de dirección sur, los que provocan que la masa de contaminación se extienda en el oeste de Santiago, desde Cerrillos a Pudahuel, Cerro Navia o Estación Central, las cuales se encuentran a una menor altitud que Cerrillos.

Comportamiento del material particulado a las 12AM

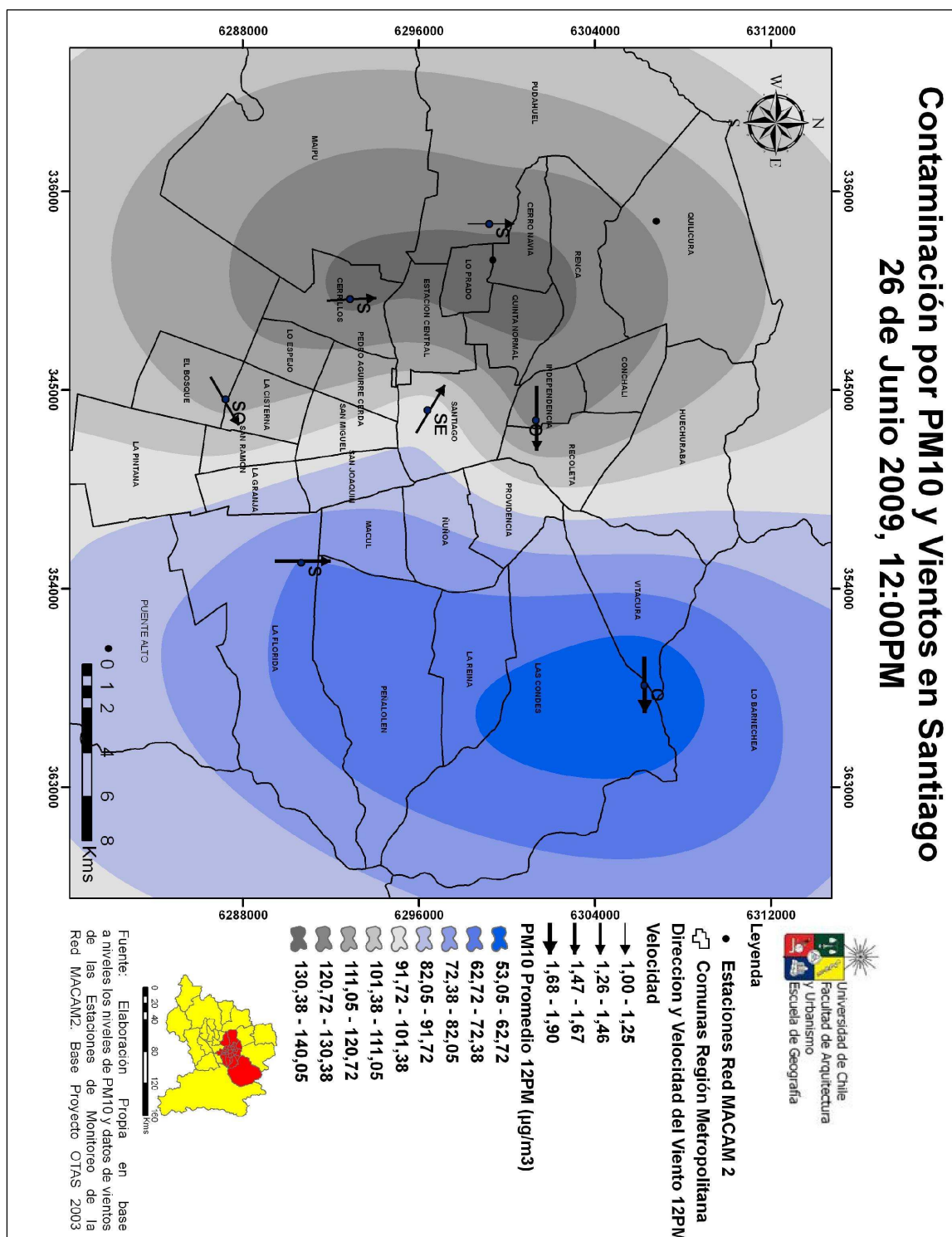


Figura 44: Promedio horario de contaminación por Material Particulado, 12PM. 26/06/2009. Fuente: Elaboración propia

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009

En esta hora del día, se sigue manteniendo el mismo patrón de distribución de la contaminación por material particulado (Figura 44), sin embargo los valores registrados en toda la ciudad de Santiago son inferiores a la norma diaria establecida.

Los valores más altos tienden a concentrarse en toda la comuna de Cerro Navia, además de sectores de Pudahuel y Lo Prado, debido a que los vientos de origen Sur provenientes desde Cerrillos, transportarían en esa dirección los contaminantes. En sectores de comunas de Las Condes, Vitacura y Lo Barnechea se vuelven a encontrar los valores de contaminación por material particulado más bajos de toda la ciudad.

Comportamiento del material particulado a las 8PM

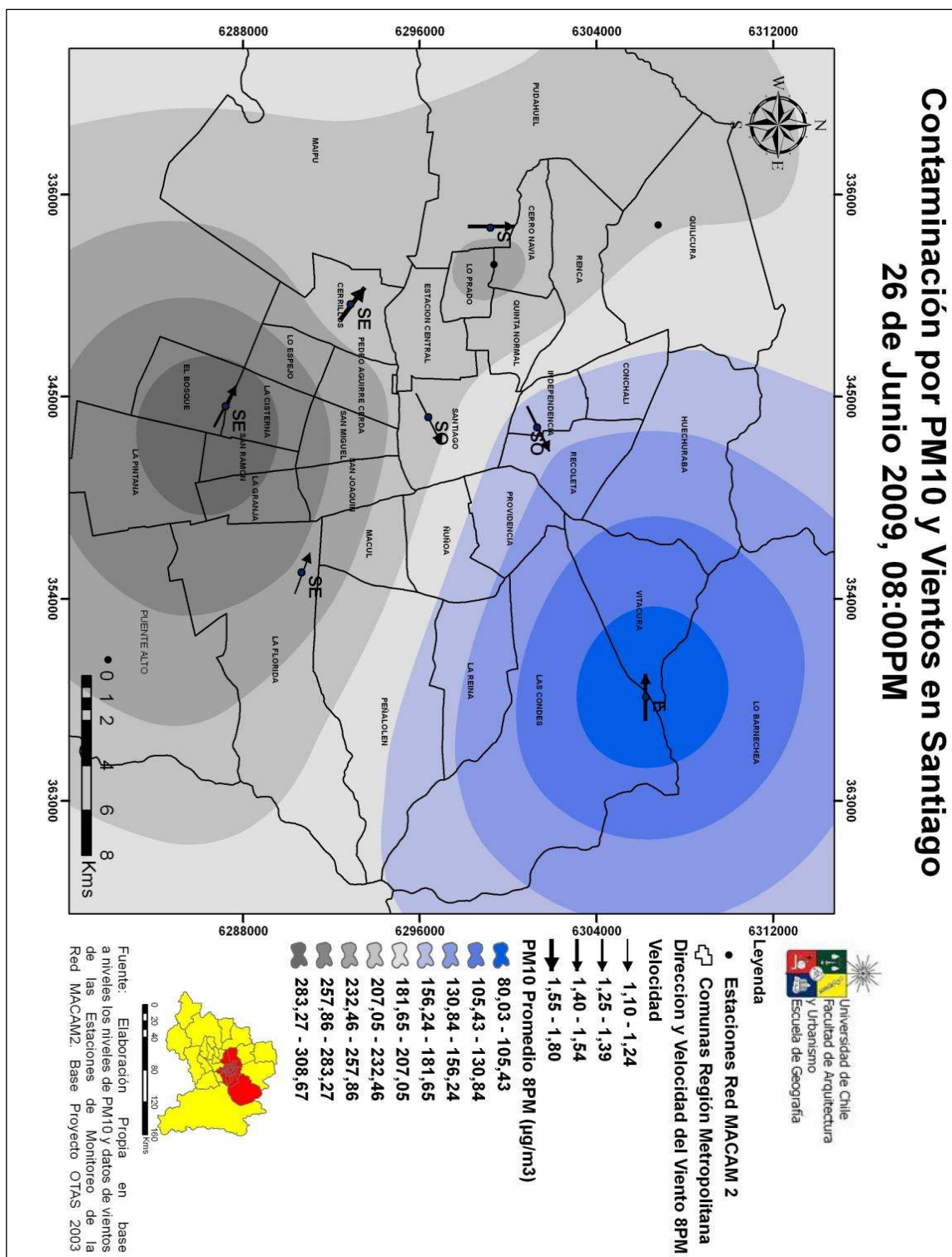


Figura 45: Promedio horario de contaminación por Material Particulado, 8PM. 26/06/2009. Fuente: Elaboración propia

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009

Al comienzo de la noche se observa una variación en el patrón espacial de la contaminación por PM10, ya que ahora las más altas concentraciones se ubican en las comunas de El Bosque, La Pintana, La Cisterna y San Ramón (sector suroeste de la ciudad, figura 45), además de Cerro Navia, ubicada en el poniente de Santiago, y a una menor altura que las comunas antes nombradas. El flujo del viento sur movería la nube de contaminación por material particulado.

A medida que avanza el día, fueron aumentando los niveles de contaminación, mientras que los menores valores se seguían manteniendo en el sector oriente de la ciudad. Gran parte de la ciudad de Santiago superaba los 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de valores máximos mientras que los mínimos se ubicaban en torno a los 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Igual que en el caso analizado anteriormente se observa una notable variación horaria en los niveles de Material Particulado (tabla 4).

Niveles de PM10 Por Hora 26/06/2009 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)										
	Quilicura	Cerro Navia	Pudahuel	Independencia	Cerrillos	Parque O'Higgins	El Bosque	La Florida	Puente Alto	Las Condes
0:00	169	153	125	111	136	125	184	157	96	38
1:00	149	141	140	88	172	169	153	102	85	17
2:00	121	142	147	78	167	153	125	70	70	7
3:00	117	146	135	95	185	166	109	50	60	5
4:00	119	142	146	87	169	153	96	40	60	1
5:00	108	132	146	76	131	123	84	33	44	11
6:00	136	142	121	95	166	118	107	49	65	12
7:00	153	175	155	100	184	158	151	108	71	21
8:00	136	155	127	141	187	211	191	133	88	15
9:00	135	181	163	111	182	167	135	151	110	31
10:00	140	140	175	61	205	183	106	116	68	80
11:00	79	129	100	118	153	113	80	51	12	42
12:00	115	142	125	126	134	93	115	71	44	52
13:00	200	207	199	121	163	108	84	61	17	46
14:00	184	83	68	173	89	176	115	151	84	27
15:00	163	94	112	146	66	123	52	166	80	65
16:00	330	114	145	156	90	82	112	144	92	93
17:00	210	124	111	89	123	139	145	213	71	122
18:00	262	218	207	90	185	153	201	256	108	105
19:00	230	215	181	172	191	215	247	221	125	74
20:00	323	261	221	158	203	220	322	256	86	71
21:00	322	295	238	148	205	221	308	229	106	69
22:00	361	296	283	169	222	192	250	156	93	32
23:00	282	315	302	126	212	174	194	125	43	41

Tabla 4: Niveles de PM10 por Hora 26/06/2009. Fuente: Elaboración Propia

4.5.3. Caso Nº 3: Día 15 de Agosto del 2009

Comportamiento del Material Particulado a las 6AM

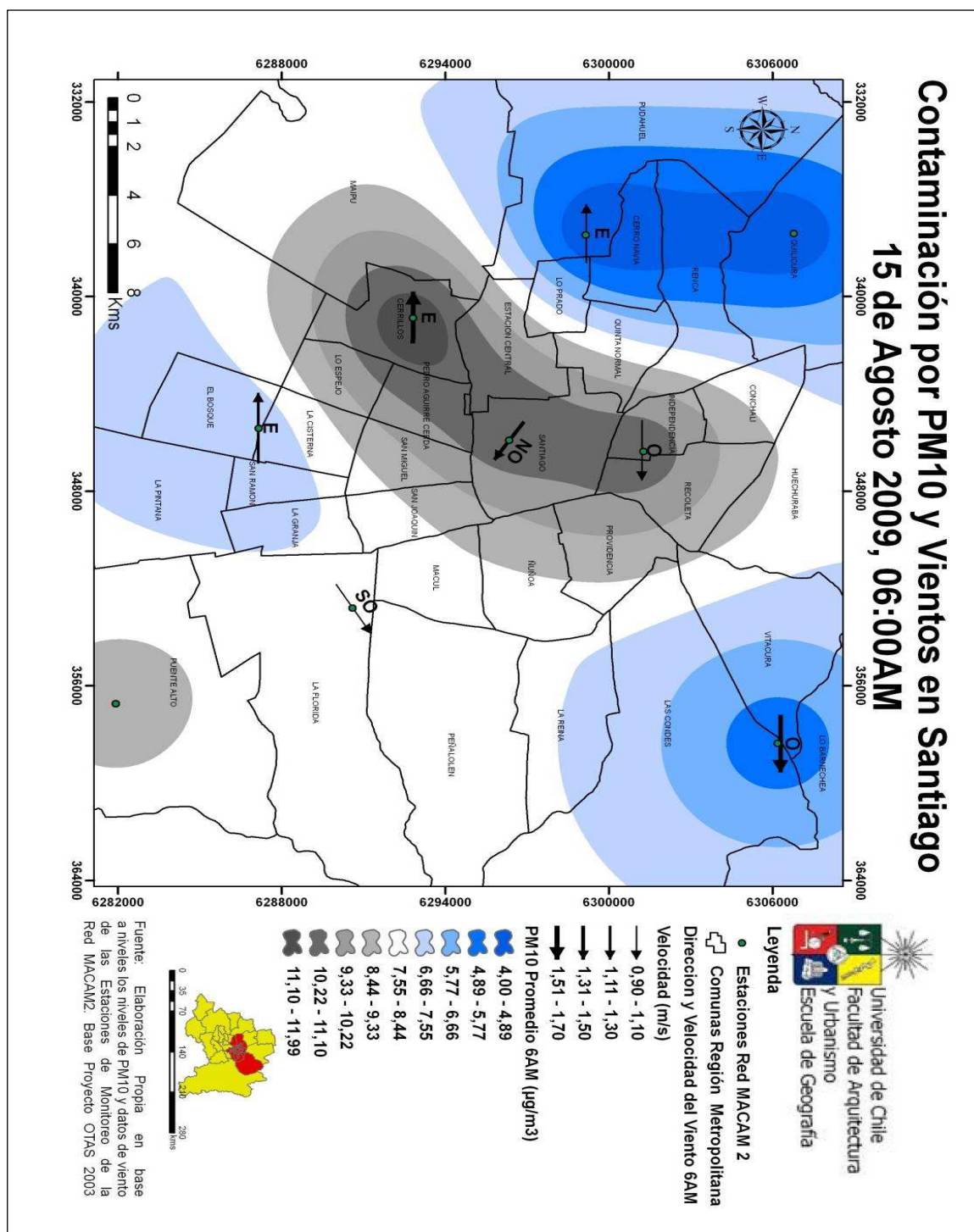


Figura 46: Promedio horario de contaminación por Material Particulado, 6AM. 15/08/2009.
 Fuente: Elaboración propia

En este horario es posible apreciar que los mayores niveles de contaminación se concentran en las comunas del Poniente de Santiago, Cerrillos e Independencia, mientras que en las comunas del sector oriente (Las Condes, Vitacura, Lo Barnechea) se concentran los menores niveles de PM10. Sin embargo, también es posible identificar otro sector de la ciudad en el cual se presentan bajos niveles de material particulado, correspondiendo al sector comprendido por las comunas de Quilicura, Renca, Cerro Navia y Pudahuel, mostrando una clara diferencia con lo ocurrido en los días críticos anteriormente analizados. A esta hora se registraban concentraciones que ni siquiera alcanzaban la mitad de los valores de PM10 evidenciado en los sectores más contaminados (Figura 46). Por otra parte es claramente apreciable que desde el centro de Santiago hacia el oriente predomina la componente oeste del viento, presentando las mayores velocidades la estación de Las Condes, mientras que en las comunas del poniente y sur de la ciudad predomina la componente este de dirección del viento. Sin embargo no se presentan claras relaciones entre la distribución del PM10 y la dirección del viento, tal como se apreciaba en los casos críticos de contaminación.

Comportamiento del Material Particulado a las 12PM

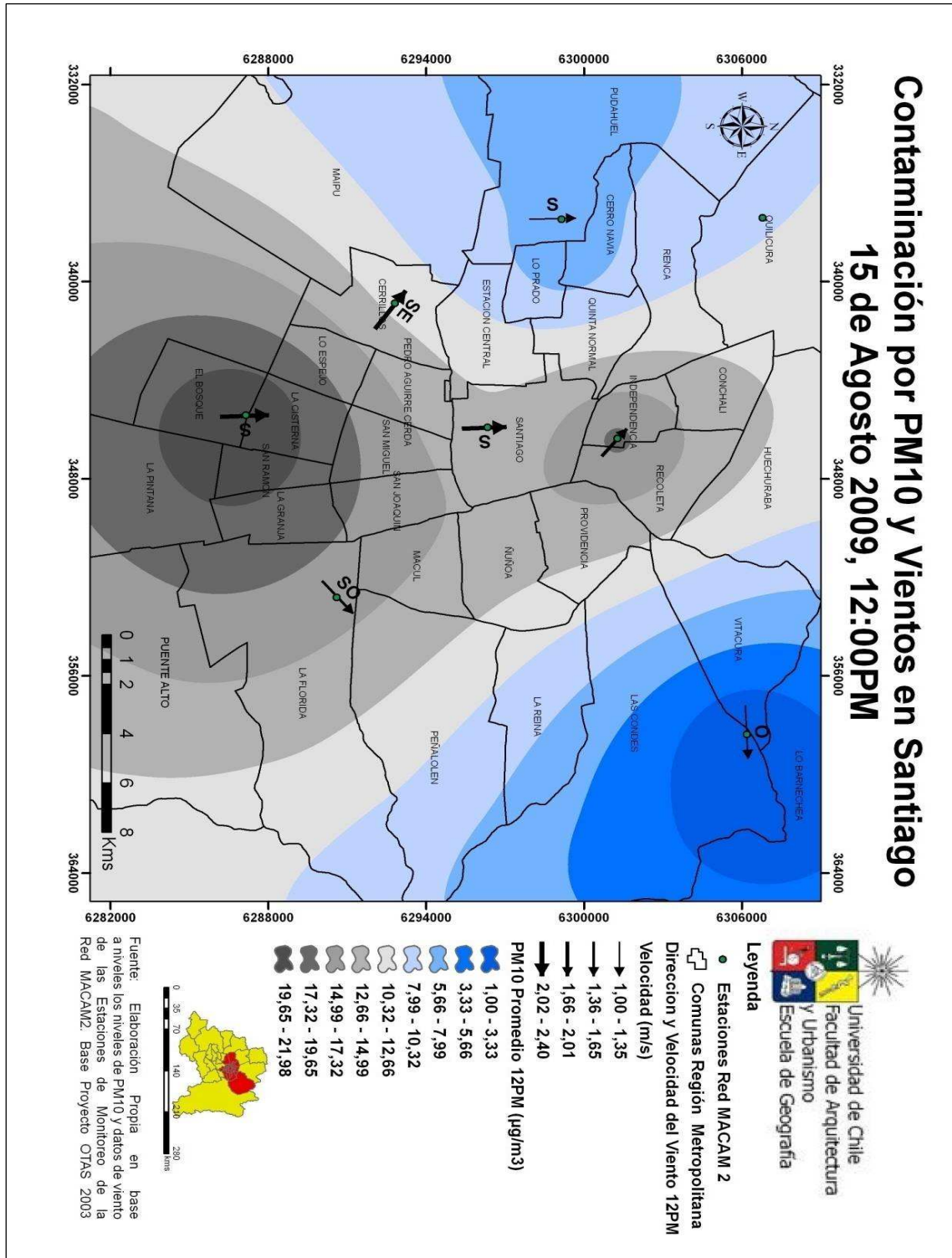


Figura 47: Promedio horario de contaminación por Material Particulado, 12PM. 15/08/2009. Fuente: Elaboración propia

En esta hora del día varía la distribución del PM10 y el núcleo espacial de mayor contaminación de la ciudad se encuentra en el sur de Santiago (Figura 47), desde el cual por efecto del viento se produce un movimiento hacia las comunas más bajas del norte de Santiago. Por otra parte, se mantiene como áreas menos contaminadas las comunas del sector oriente, mientras que otro sector donde los niveles de contaminación eran menores se desplazó hacia Cerro Navia, Lo Prado y Pudahuel. Estas últimas comunas alcanzan grandes diferencias con las concentraciones registradas en los sectores más contaminados, en la medida que las primeras varían entre 1 y 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y las segundas se sobrepasan los $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En esta hora existe un claro predominio de la componente sur del viento en la ciudad, lo que parece no relacionarse claramente con lo descrito en los sectores norte y sur de Santiago.

Comportamiento del Material particulado a las 8PM

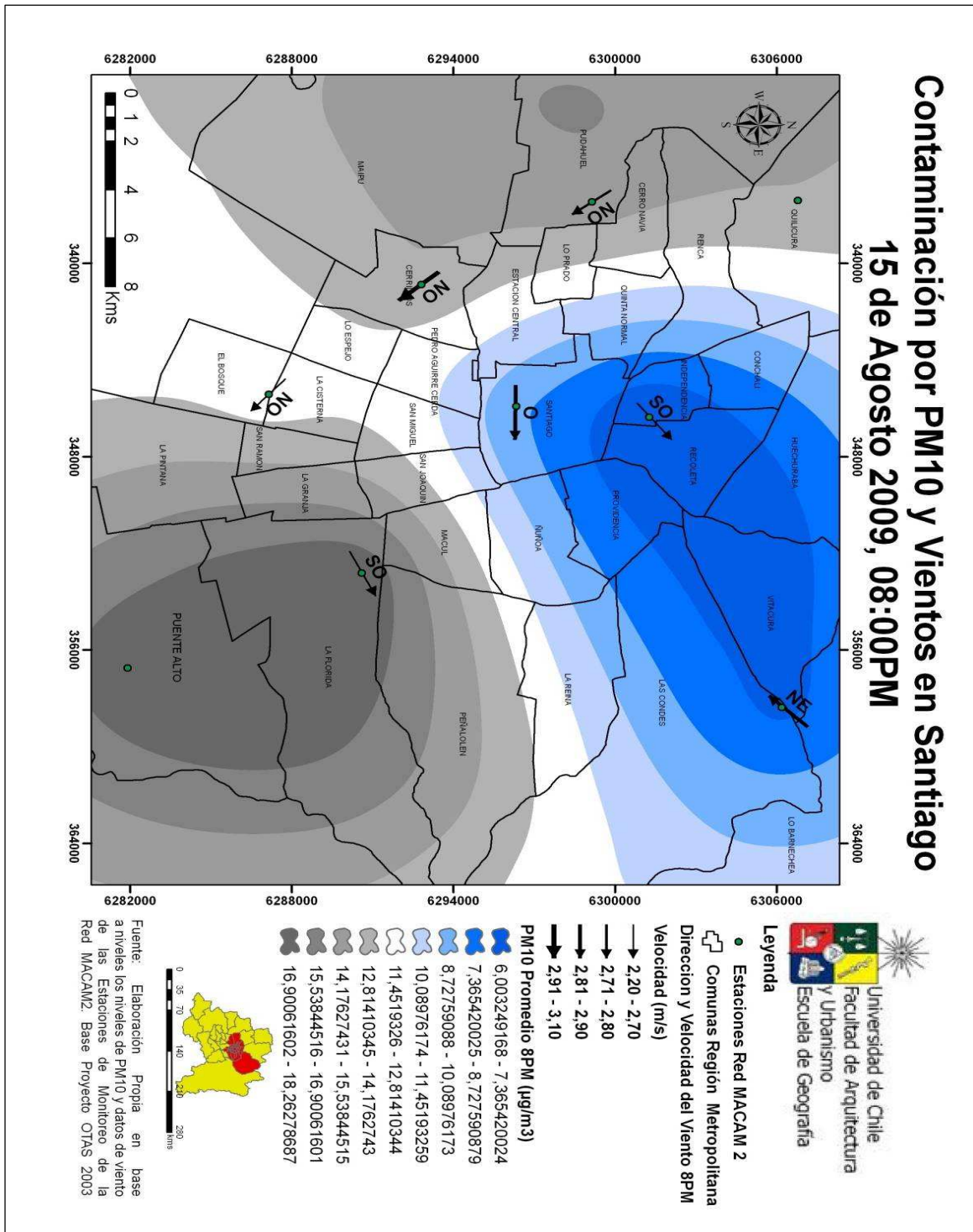


Figura 48: Promedio horario de contaminación por Material Particulado, 8PM. 15/08/2009. Fuente: Elaboración propia

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009

A esta hora se produce un nuevo cambio en la distribución espacial del PM10 en Santiago, ya que ahora las áreas más contaminadas se ubican al sureste y poniente de la ciudad, mientras que la zona que presenta los menores niveles de contaminación por material particulado se extiende al norte y nororiente de la ciudad (Figura 48). Las áreas más contaminadas se ven influenciadas por los vientos provenientes del nor poniente, que empujan al PM10, hacia el poniente y sur oriente de la ciudad. Las zonas menos contaminadas registran entre 6 y 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10, en contraposición a las áreas de mayor contaminación que superan los 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. A esta hora predomina la componente oeste de la dirección del viento.

La tabla 8 permite observar un comportamiento más variado en las concentraciones horarias del PM10, que difiere de la mayor estabilidad observada a lo largo de días críticos. Por otra parte, se muestra una menor amplitud entre los valores extremos a lo largo del día, en comparación a lo evidenciado en los días críticos de contaminación, tal como lo muestra la tabla 5.

Niveles de PM10 Por Hora 15/08/2009 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)										
	Quilicura	Cerro Navía	Pudahuel	Independencia	Cerrillos	Parque O'Higgins	El Bosque	La Florida	Puente Alto	Las Condes
0:00	12	2	1	18	6	37	3	9	8	1
1:00	1	2	7	1	2	40	1	1	1	2
2:00	4	1	1	4	3	48	1	15	9	6
3:00	3	5	1	10	4	44	4	3	6	7
4:00	4	1	2	1	5	1	4	4	6	5
5:00	4	5	4	4	4	1	1	6	2	4
6:00	4	4	4	11	12	11	7	8	9	5
7:00	1	4	2	2	4	6	1	6	8	3
8:00	7	1	1	1	2	1	1	2	1	1
9:00	4	1	1	1	1	1	1	1	4	1
10:00	1	2	1	8	4	4	3	6	2	4
11:00	7	6	6	12	9	15	4	10	14	2
12:00	5	11	8	18	12	13	22	16	6	1
13:00	4	16	22	1	20	11	12	1	2	1
14:00	1	1	1	1	8	4	18	14	5	4
15:00	5	1	1	8	10	2	8	11	7	5
16:00	29	8	20	9	11	1	7	11	18	6
17:00	10	24	14	10	12	5	12	17	20	7
18:00	1	1	1	14	9	9	9	22	8	9
19:00	4	1	1	1	4	1	1	4	7	5
20:00	14	17	16	5	15	10	13	19	18	8
21:00	16	17	12	8	18	20	25	15	16	14
22:00	14	23	16	9	23	15	18	20	16	8
23:00	30	44	41	18	27	29	27	23	17	16

Tabla 5: Niveles de PM10 por Hora 15/08/2009. Fuente: Elaboración Propia.

4.5.4 Caso Nº 4: Día 10 de Octubre del 2009

Comportamiento del Material Particulado a las 6AM

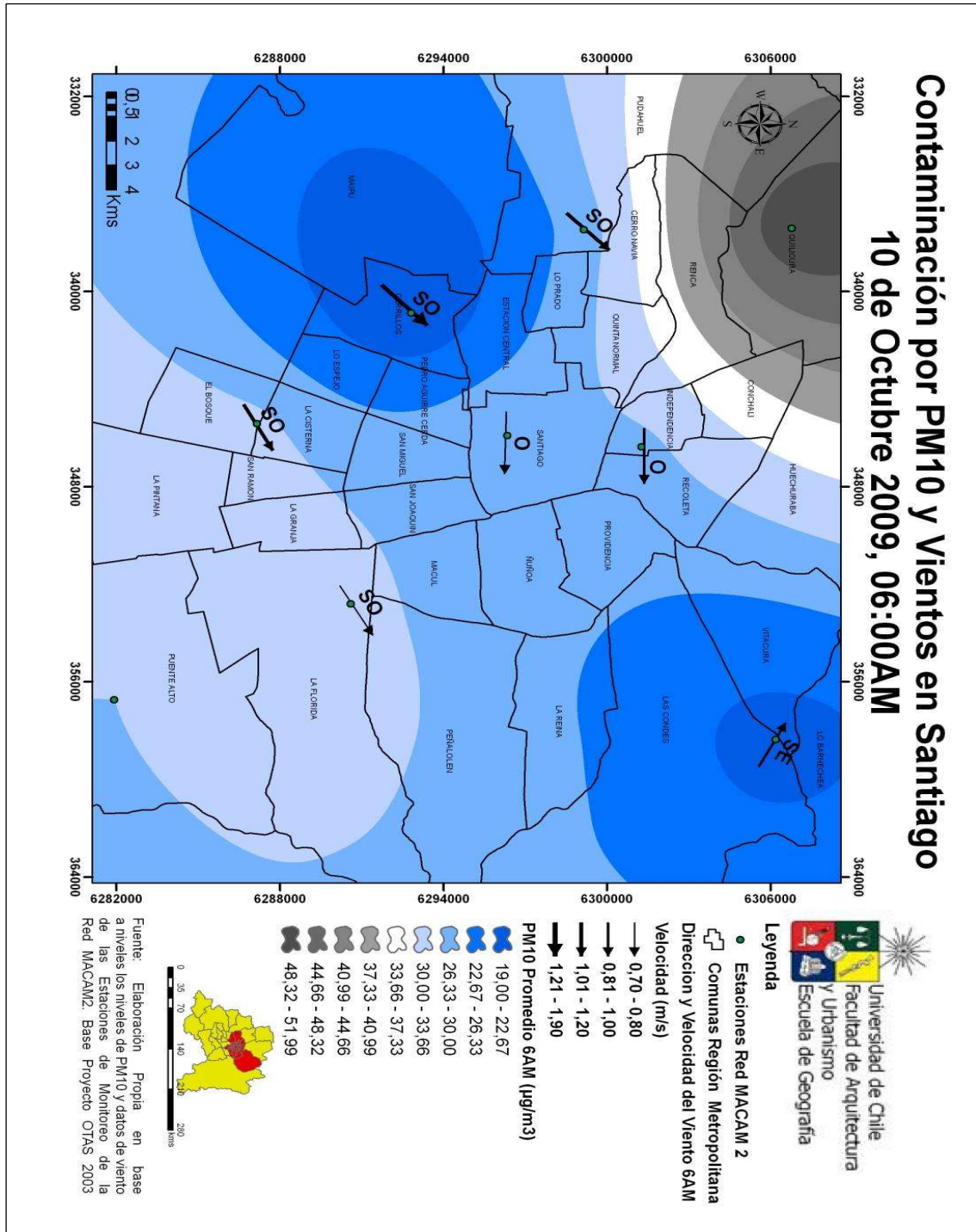


Figura 49: Promedio horario de contaminación por Material Particulado, 6AM. 10/10/2009. Fuente: Elaboración Propia

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009

En la madrugada del 10 de Octubre del 2009 es posible distinguir que el material particulado presentó solo un área en la cual se concentraron los mayores niveles de contaminación, la cual se ubicaba en la zona norte de Santiago, en torno a las comunas de Quilicura y Renca, mientras que el resto de la ciudad registraba bajos niveles de PM10 (Figura 49). Es claramente apreciable que en esta hora del día predomina la componente sur de dirección de viento, presentando las mayores velocidades en el sector poniente de Santiago, que se encuentran en torno a 1,2 m/s, lo que permite una mejor dispersión de partículas.

Comportamiento del Material Particulado a las 12PM

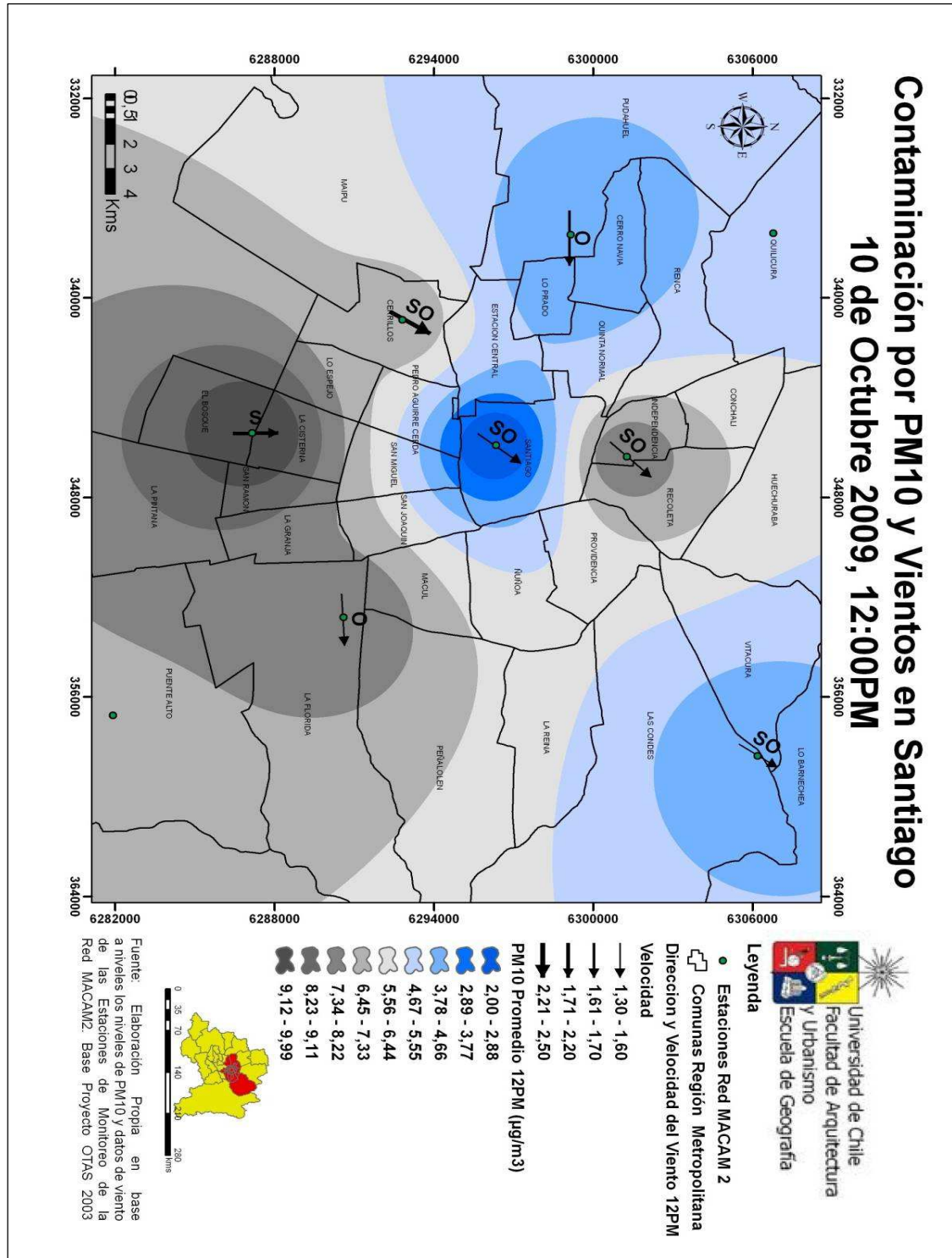


Figura 50: Promedio horario de contaminación por Material Particulado, 12PM. 10/10/2009. Fuente: Elaboración Propia

Al mediodía cambió completamente la distribución del PM10, ya que las áreas más contaminadas se ubicaron en la zona norte de Santiago (comunas de Independencia y Recoleta) y en la zona sur (comunas de La Cisterna, El Bosque, San Ramón y La Pintana). Sin embargo a esta hora del día los niveles de contaminación por material particulado son mucho menores que los observados a las 6am. Al mediodía los mayores valores oscilaban en torno a los 10ug/m³, mientras que en la madrugada superaban los 50ug/m³ (Figura 50). Por otra parte los menores valores de PM10 se ubicaron en el centro (Santiago Centro), oriente (Las Condes, Vitacura y Lo Barnechea) y poniente de la ciudad (Lo Prado, Cerro Navia y Pudahuel).

Al igual que en la hora anterior se mantiene la predominancia de la componente sur del viento, aunque presentando mayores velocidades que en el caso anterior, mostrando valores que alcanzan los 2,5m/s. Sin embargo, los niveles de material particulado son muy bajos en toda la ciudad, manteniendo de manera casi idéntica la distribución de los vientos observada en la madrugada. Por otra parte se aprecia que en la zona sur de Santiago los vientos están incidiendo en la distribución del PM10, ya que su origen Sur expande la masa de contaminación hacia el centro y oriente de la ciudad.

Comportamiento de Material Particulado a las 8PM

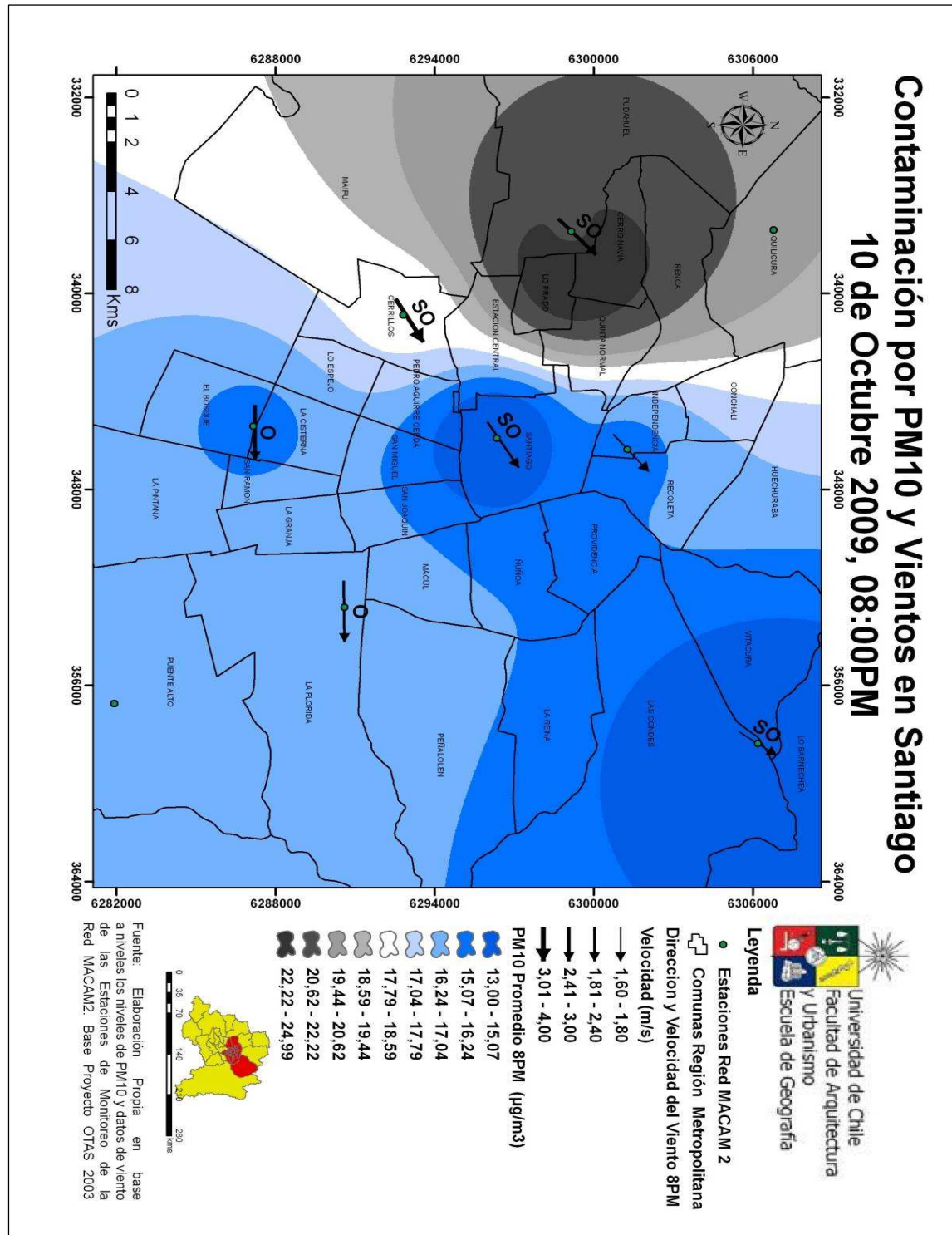


Figura 51: Promedio horario de contaminación por Material Particulado, 8PM. 10/10/2009. Fuente: Elaboración propia

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009

A esta hora del día se produce un nuevo cambio en la distribución espacial del PM10, teniéndose que la zona de más contaminación se concentra en el poniente de Santiago, mientras que el resto de la ciudad presenta bajos niveles. (Figura 51). Las concentraciones son mayores que las evidenciadas al mediodía, alcanzando máximos cercanos a los $25\mu\text{g}/\text{m}^3$; sin embargo, son menores que los observados en la madrugada. Al igual que en el resto del día se mantiene el predominio de la componente sur de la dirección del viento, alcanzando velocidades muy superiores, llegando incluso a 4m/s en la estación de Cerrillos.

Niveles de PM10 Por Hora 10/10/2009 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)										
	Quilicura	Cerro Navia	Pudahuel	Independencia	Cerrillos	Parque O'Higgins	El Bosque	La Florida	Puente Alto	Las Condes
0:00	31	24	32	14	15	32	41	33	13	27
1:00	33	22	28	23	20	25	30	30	16	29
2:00	37	24	22	19	21	31	32	24	22	30
3:00	33	30	27	24	23	34	30	20	21	25
4:00	50	28	30	31	54	37	34	33	32	30
5:00	44	27	33	30	32	45	46	39	31	32
6:00	52	28	36	35	24	38	37	38	30	29
7:00	45	18	21	37	19	25	20	34	35	34
8:00	24	22	18	28	16	23	16	35	25	37
9:00	18	12	15	19	14	16	15	14	10	44
10:00	21	12	13	18	5	18	11	15	10	11
11:00	7	4	1	9	5	5	8	8	10	10
12:00	10	7	4	8	7	2	10	8	6	4
13:00	6	13	13	10	27	11	10	5	7	5
14:00	8	11	9	17	9	8	8	9	10	8
15:00	10	18	17	8	13	11	10	6	5	8
16:00	9	20	19	19	13	16	20	28	11	8
17:00	9	19	18	20	17	17	25	25	17	9
18:00	7	28	18	18	17	17	29	21	12	16
19:00	8	25	22	22	21	21	24	27	16	8
20:00	8	21	22	16	18	13	16	17	13	13
21:00	17	23	27	22	17	16	17	21	16	12
22:00	17	17	18	11	11	33	14	13	14	13
23:00	10	17	17	10	9	9	13	21	9	13

Tabla 6: Niveles de PM10 por Hora 10/10/2009. Fuente: Elaboración Propia

4.6 Distribución espacial de la Temperatura

4.6.1 Caso Nº 1: Día 11 de Mayo de 2009

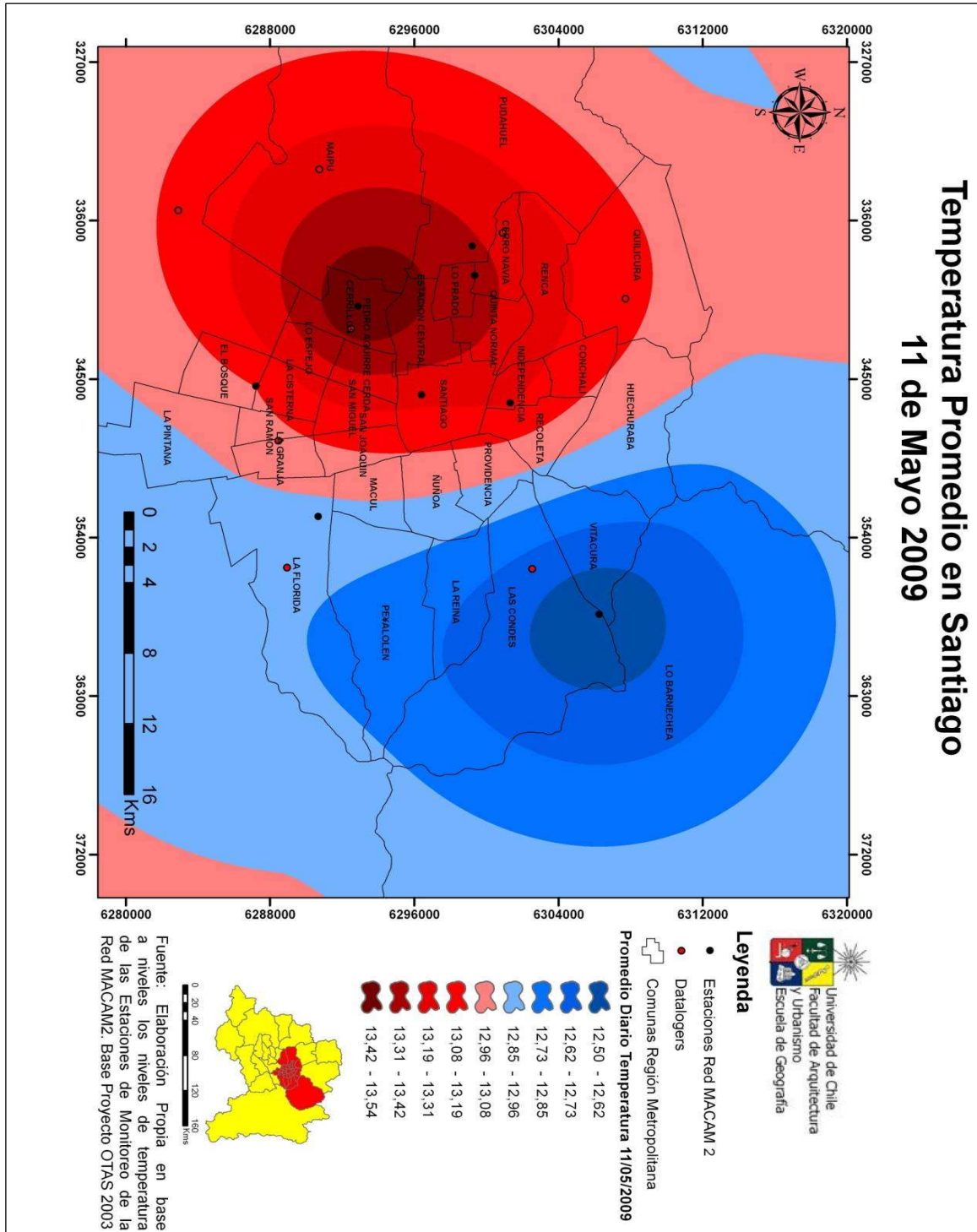


Figura 52: Temperatura promedio diaria el 11/05/2009. Fuente: Elaboración propia

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009

La distribución del promedio diario de temperatura muestra que existen dos grandes áreas, registrándose hacia el poniente las mayores temperaturas y hacia el oriente las menores (Figura 52)

Las más altas temperaturas se aprecian en torno a las comunas de Cerrillos, Estación Central y Maipú, además del centro de la ciudad, mientras que las menores se encuentran en las comunas de Las Condes, Vitacura y lo Barnechea. Es importante destacar que la diferencia entre los valores más altos y más bajos es de alrededor de sólo un grado.

Comportamiento de la temperatura a las 6AM

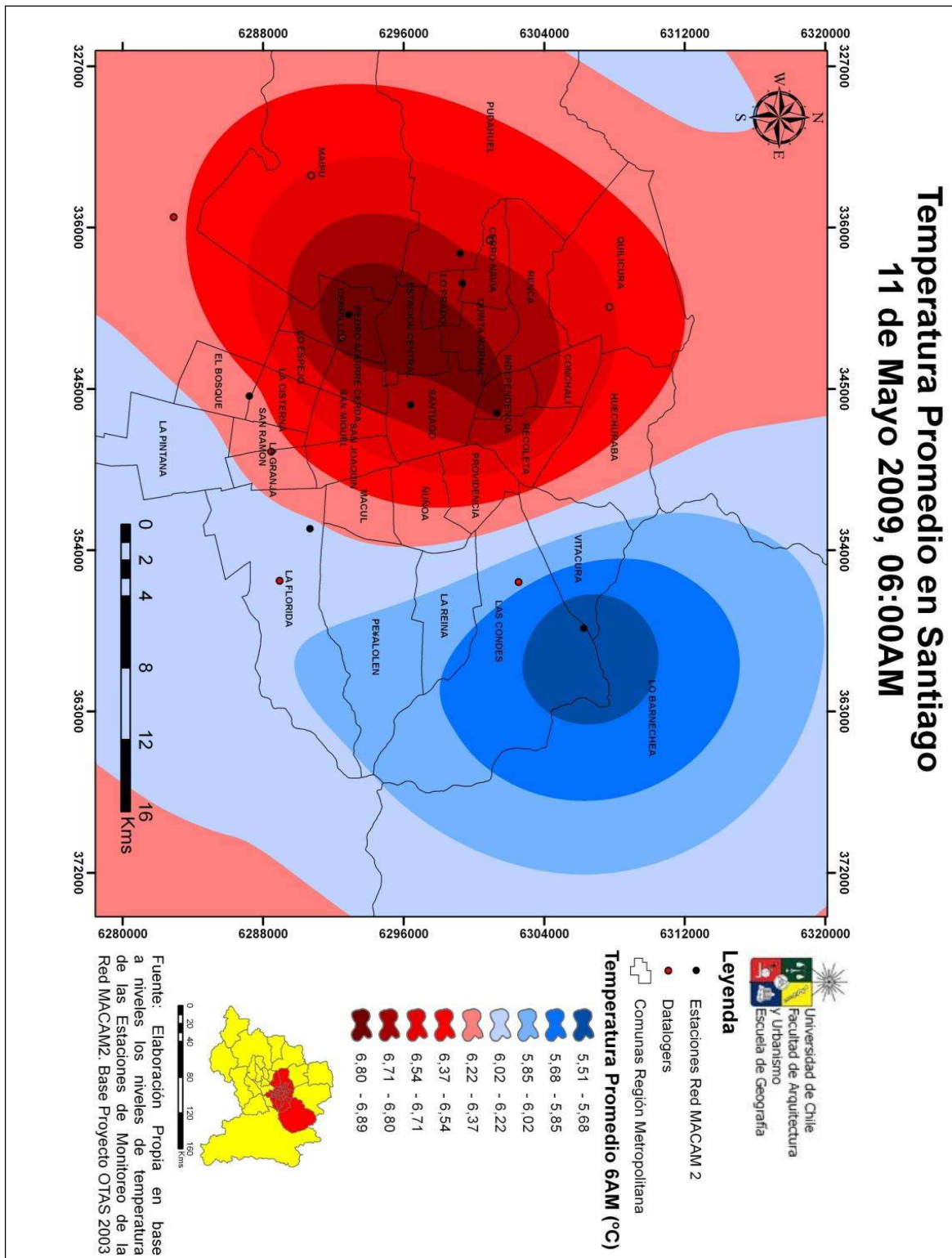


Figura 53: Temperatura a las 6AM el 11/05/2009. Fuente: Elaboración propia

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009

A esta hora se aprecia que, al igual como ocurrió con la distribución del promedio diario de temperatura, los valores más elevados se concentran en el centro y sector poniente de la ciudad, en las comunas de Cerrillos, Quinta Normal, Estación Central, Independencia y Lo Prado (Figura 53).

Las menores temperaturas se concentran en el sector oriente de la ciudad, de manera específica en las comunas de Las Condes, Vitacura y Lo Barnechea, las cuales alcanzan valores de alrededor de un grado y medio menos que aquellas zonas en que las temperaturas son mayores.

Comportamiento de la temperatura a las 12PM

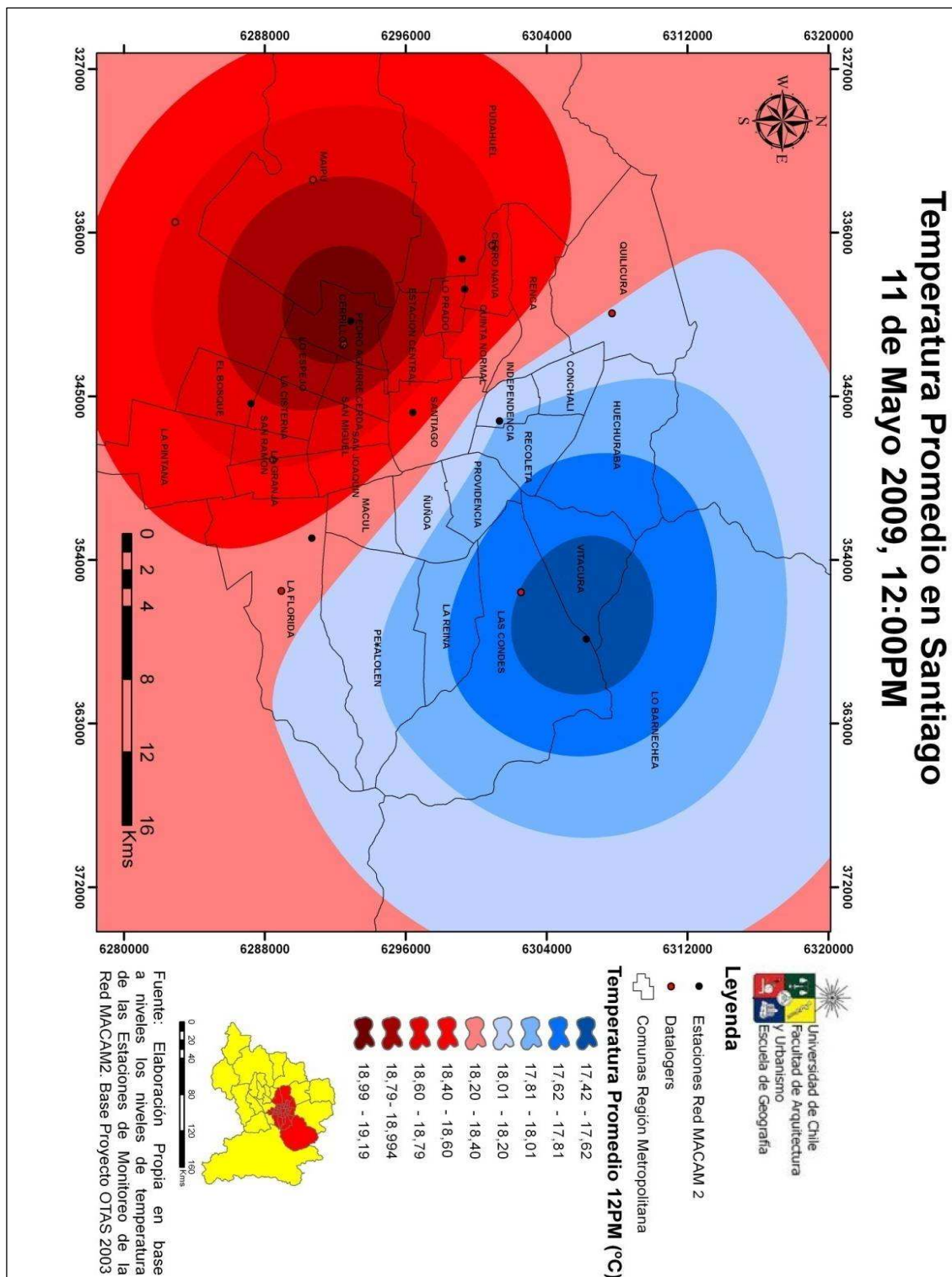


Figura 54: Temperatura a las 12PM el 11/05/2009. Fuente: Elaboración propia

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009

La temperatura a esta hora varía su distribución en comparación con lo ocurrido a las 6AM, ya que ahora las menores temperaturas se concentran en el sur-oeste de la ciudad, en las comunas de Cerrillos, Lo Espejo y parte de Estación Central y Maipú. Mientras que el área comprendida por las comunas de Las Condes, Vitacura y Lo Barnechea siguen manteniendo las menores temperaturas (Figura 54).

Además del notable aumento de las temperaturas de manera general en toda la ciudad, hay un incremento de la diferencia entre las áreas más cálidas y más frías, la que alcanza a más de dos grados.

Comportamiento de la temperatura a las 8PM

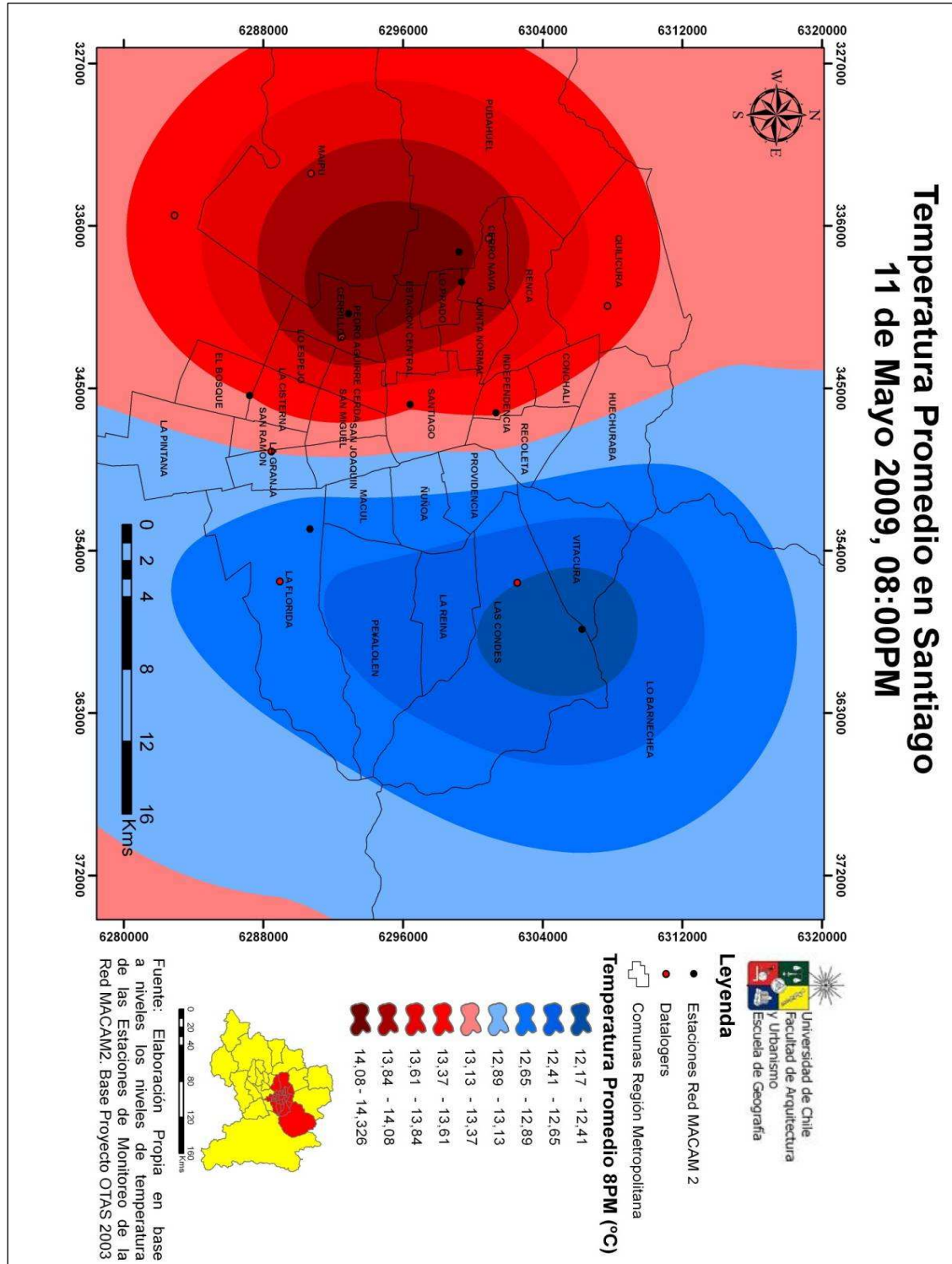


Figura 55: Temperatura a las 8PM el 11/05/2009. Fuente: Elaboración propia

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009

En este horario, la temperatura presenta el mismo patrón que ha sido descrito, registrándose los valores más altos en el sector poniente, en las comunas de Cerrillos, Pudahuel, Maipú y Estación Central, y los más altos en el sector oriente, en las comunas de Vitacura, Las Condes y Lo Barnechea (Figura 55)

4.6.2 Caso N° 2: Día 26 de Junio de 2009

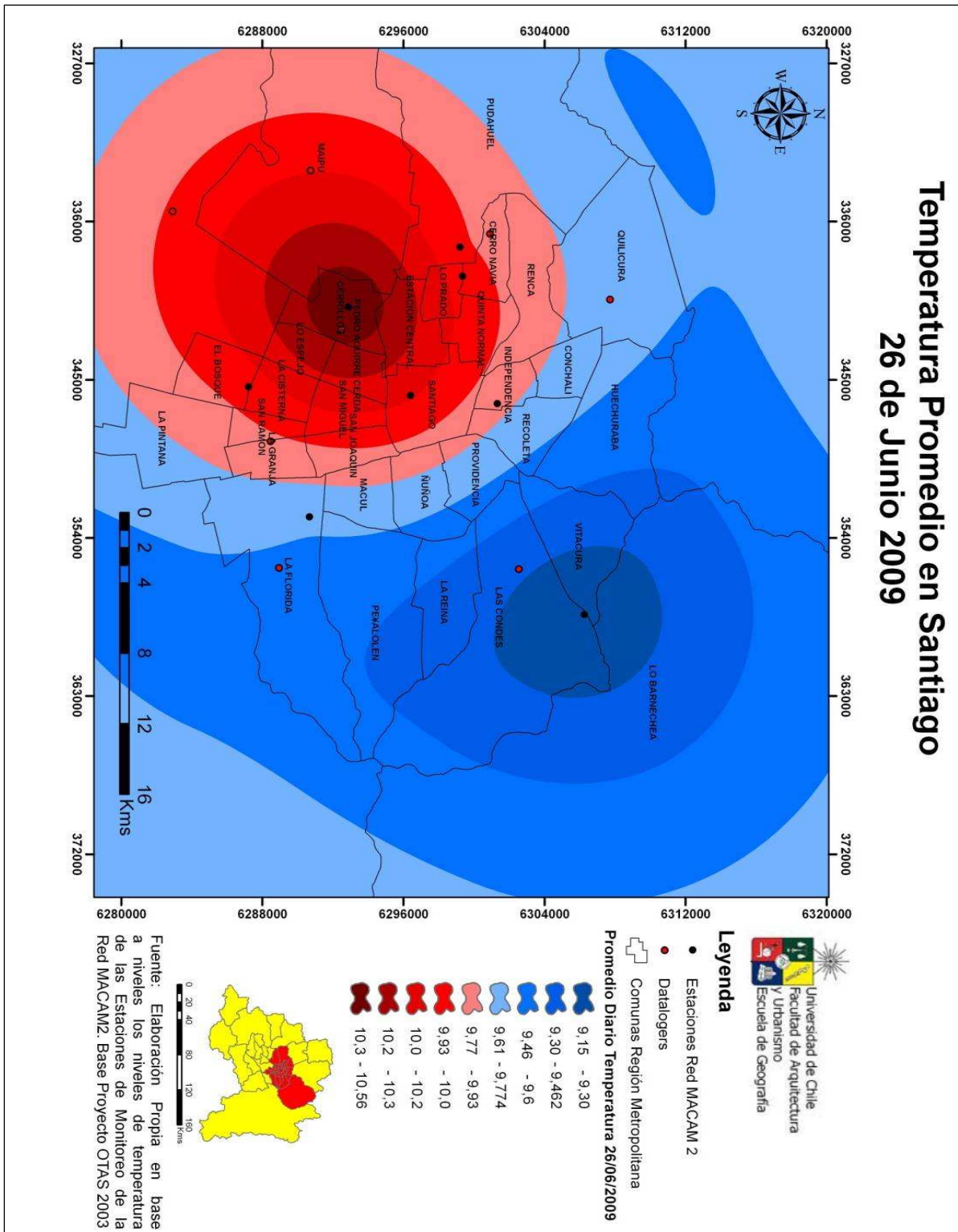


Figura 56: Temperatura promedio diaria el día 26/06/2009. Fuente: Elaboración propia

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009

La distribución de la temperatura promedio diaria del 26 de junio, presenta una diferencia de un grado entre los valores más altos, registrados en la comuna de Cerrillos, y los mínimos que al igual que en el día anteriormente analizado, se concentra en las comunas del piedemonte (Las Condes, Lo Barnechea y Vitacura) (Figura 56).

El centro de Santiago muestra valores en torno a la media de las temperaturas, mientras que hacia el oriente se encuentran los menores valores y hacia el sur-poniente las mayores temperaturas.

Comportamiento de la temperatura a las 6AM

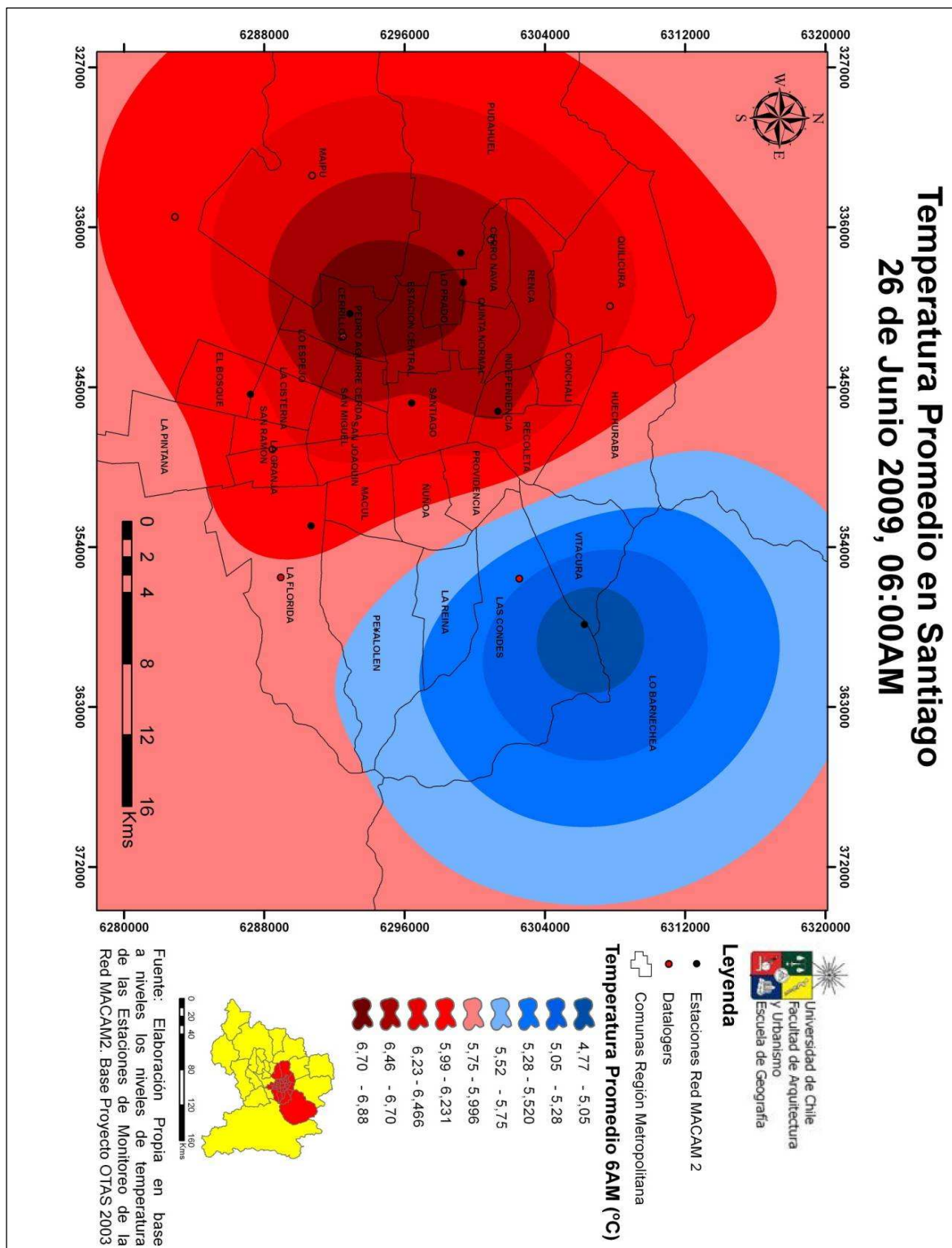


Figura 57: Temperatura las 6AM el 26/06/2009. Fuente: Elaboración propia

A esta hora se aprecia una notable diferencia de más de dos grados centígrados entre el sector comprendido por las comunas de Las Condes, Lo Barnechea y Vitacura (área de menores temperaturas) y aquel integrado por las comunas de Cerrillos, Estación Central y Lo Prado (mayores temperaturas).

Es posible observar que a medida que se avanza hacia el sector oriente de la ciudad, las temperaturas comienzan a descender (Figura 57). Sin embargo se aprecia de manera clara que en la ciudad de Santiago se presentan más zonas de altas que de bajas temperaturas.

Comportamiento de la temperatura a las 12PM

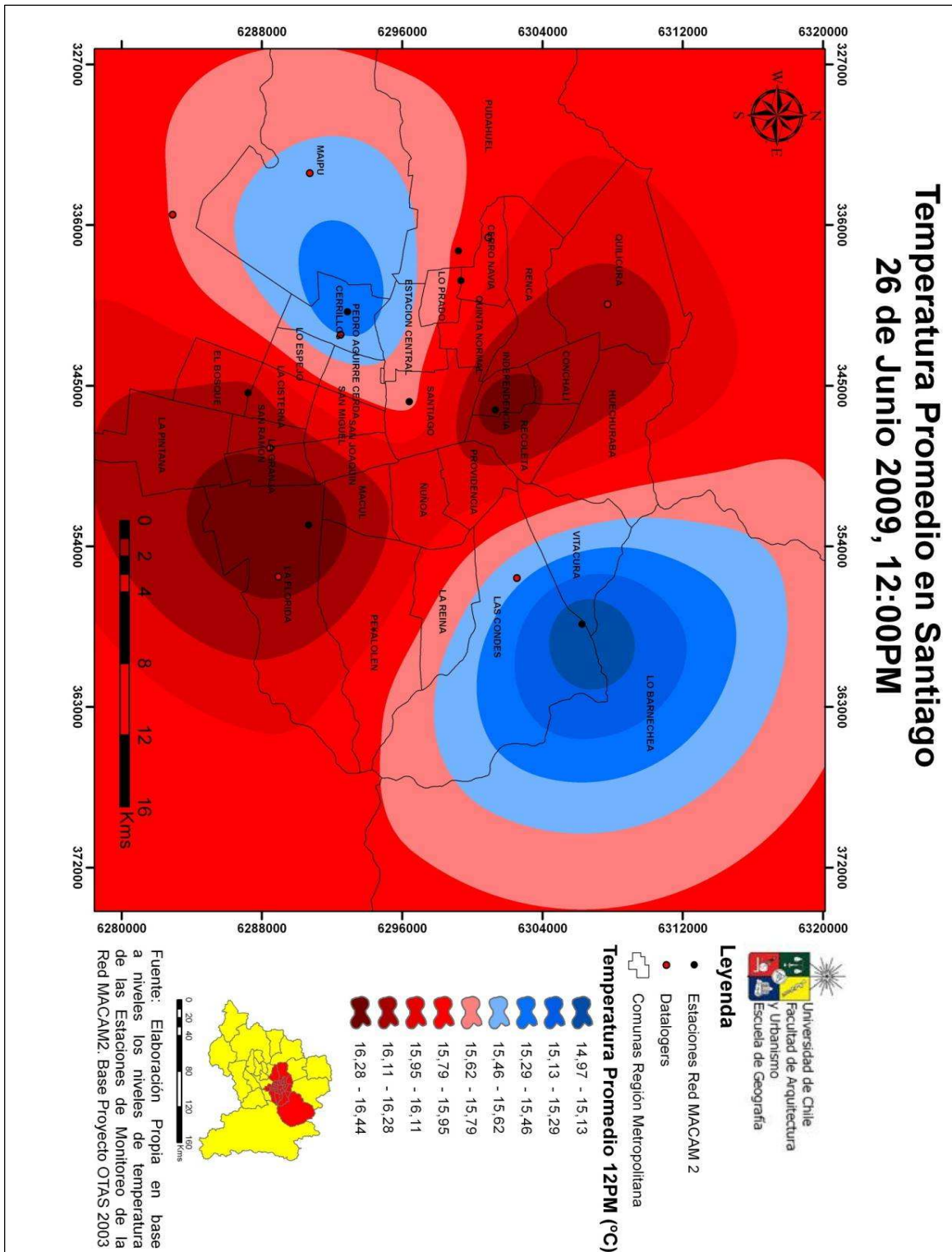


Figura 58: Temperatura a las 12PM el 26/06/2009. Fuente: Elaboración propia

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009

En este horario se da una situación particular, ya que se presentan dos zonas separadas con bajas temperaturas, donde además del área del sector oriente, se suma el área de Cerrillos y Maipú, modificándose notablemente el patrón de distribución de la temperatura evidenciado hasta el momento (Figura 58).

Por otra parte también se produce un cambio en las áreas donde se presentaban las temperaturas más altas, ya que ahora estas se concentran en el área norte de la ciudad, de manera específica en la comuna de Independencia, además de que se presenta otra zona con altas temperaturas, la cual abarca las comunas de La Florida y La Granja principalmente.

Comportamiento de la temperatura a las 8PM

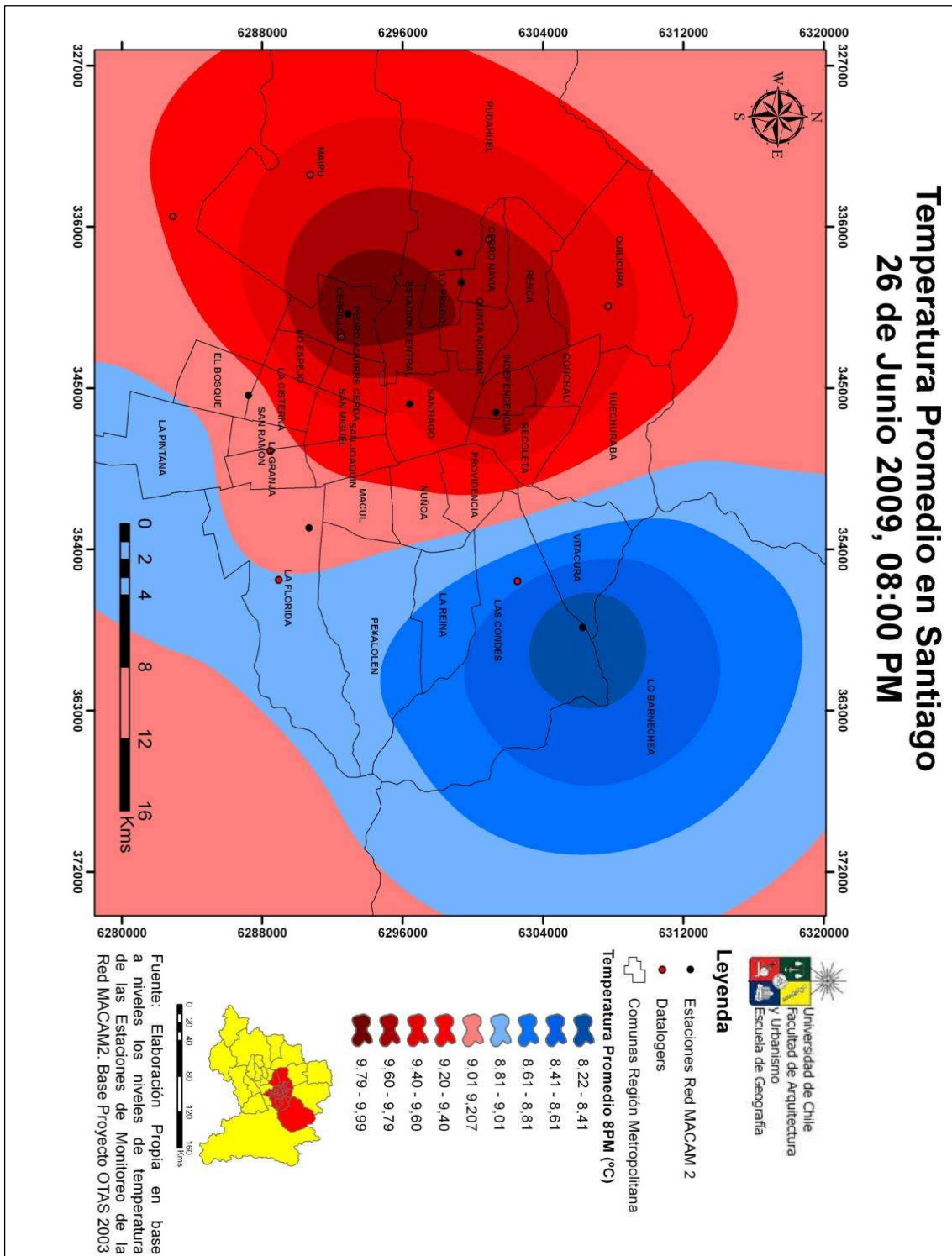


Figura 59: Temperatura a las 8PM el 26/06/2009. Fuente: Elaboración Propia

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009

Es posible apreciar que a esta hora del día, se recupera el patrón normal de distribución de las temperaturas, ya que las máximas se ubican nuevamente en el sector poniente de la ciudad, en las comunas de Cerrillos, Estación Central y Lo Prado, mientras que las mínimas vuelven a concentrarse sólo en el área comprendida por las comunas de Las Condes, Vitacura y Lo Barnechea, estableciéndose una diferencia entre ambas zonas de casi dos grados centígrados (Ver Figura 59).

4.6.3 Caso Nº 3: Día 15 de Agosto del 2009

Comportamiento de la temperatura a las 6AM

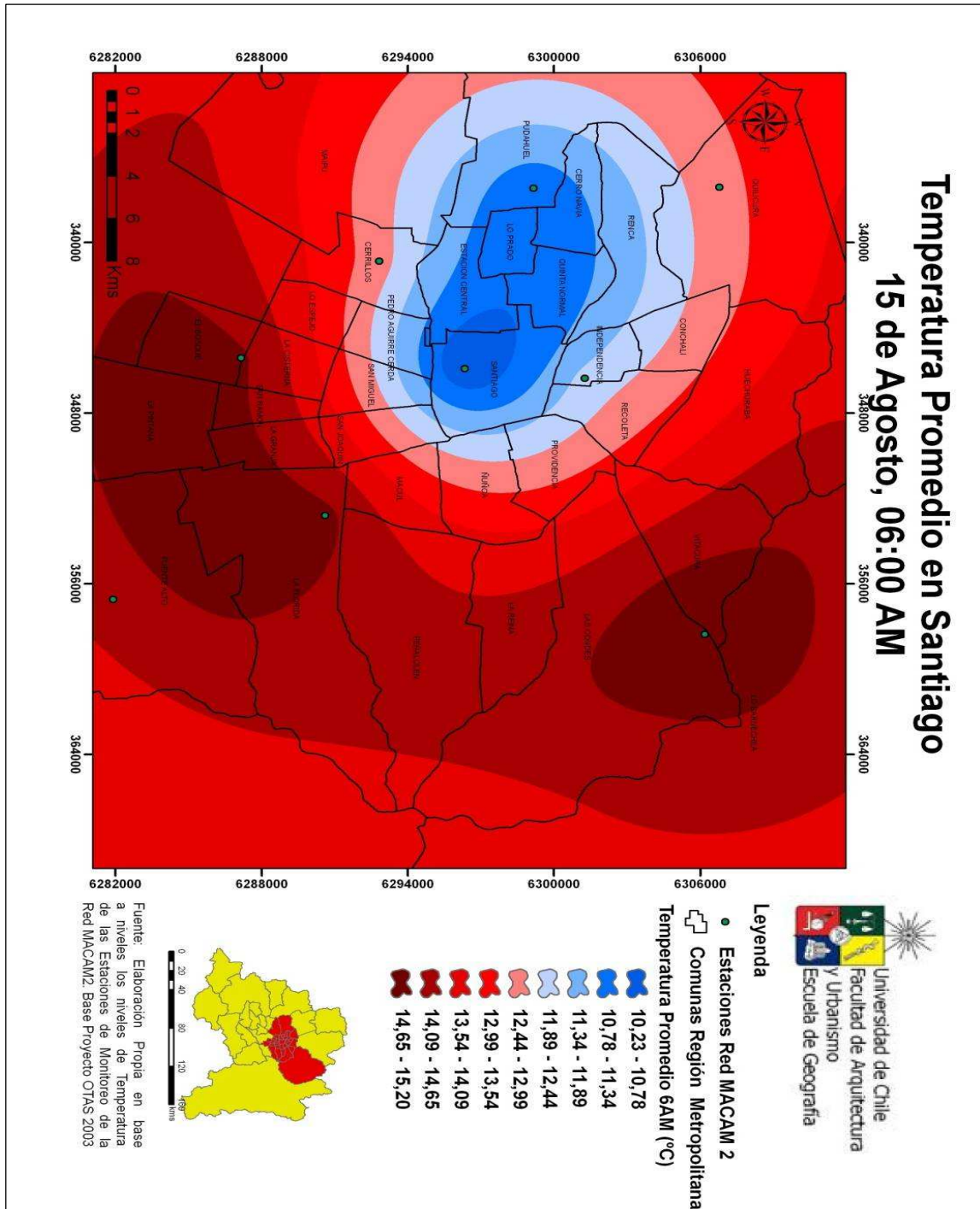


Figura 60: Temperatura a las 6AM el 15/08/2009. Fuente: Elaboración Propia

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009

En la madrugada del 15 de Agosto del 2009 es posible apreciar una clara diferencia en las temperaturas de la Región Metropolitana, que alcanzó hasta 5° Celsius, esto entre el núcleo frío comprendido por las comunas de Santiago, Estación Central, Lo Prado, Quinta Normal, Pudahuel y Cerro Navia, que presenta temperaturas en torno a los 10° C, y las zonas más cálidas, comprendidas por las comunas de Las Condes, Vitacura y Lo Barnechea (sector oriente), y Puente Alto, La Pintana, El Bosque y La Florida (sector sur de Santiago) (Figura 60).

Comportamiento de la temperatura a las 12PM

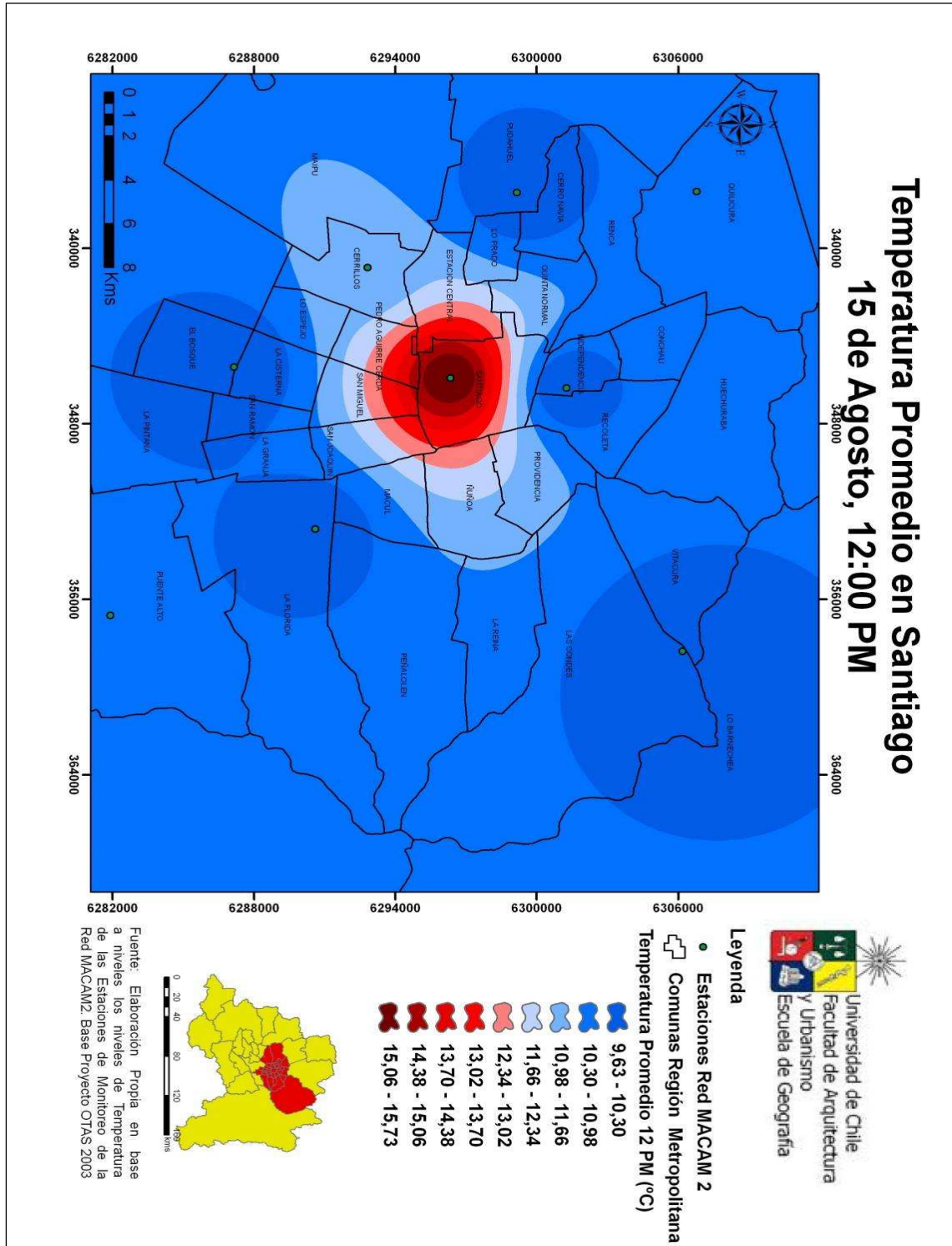


Figura 61: Temperatura a las 12PM el 15/08/2009. Fuente: Elaboración Propia

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009

Al mediodía la distribución de las temperaturas cambia drásticamente, ya que ahora existe solo un núcleo de altas temperaturas, el cual se sitúa en el centro de Santiago, identificándose claramente como una isla de calor (figura 61), presentando temperaturas que superan los 15° C, mientras que el resto de la ciudad presenta temperaturas muy bajas en comparación con la zona antes descritas.

Comportamiento de las temperaturas a las 8PM

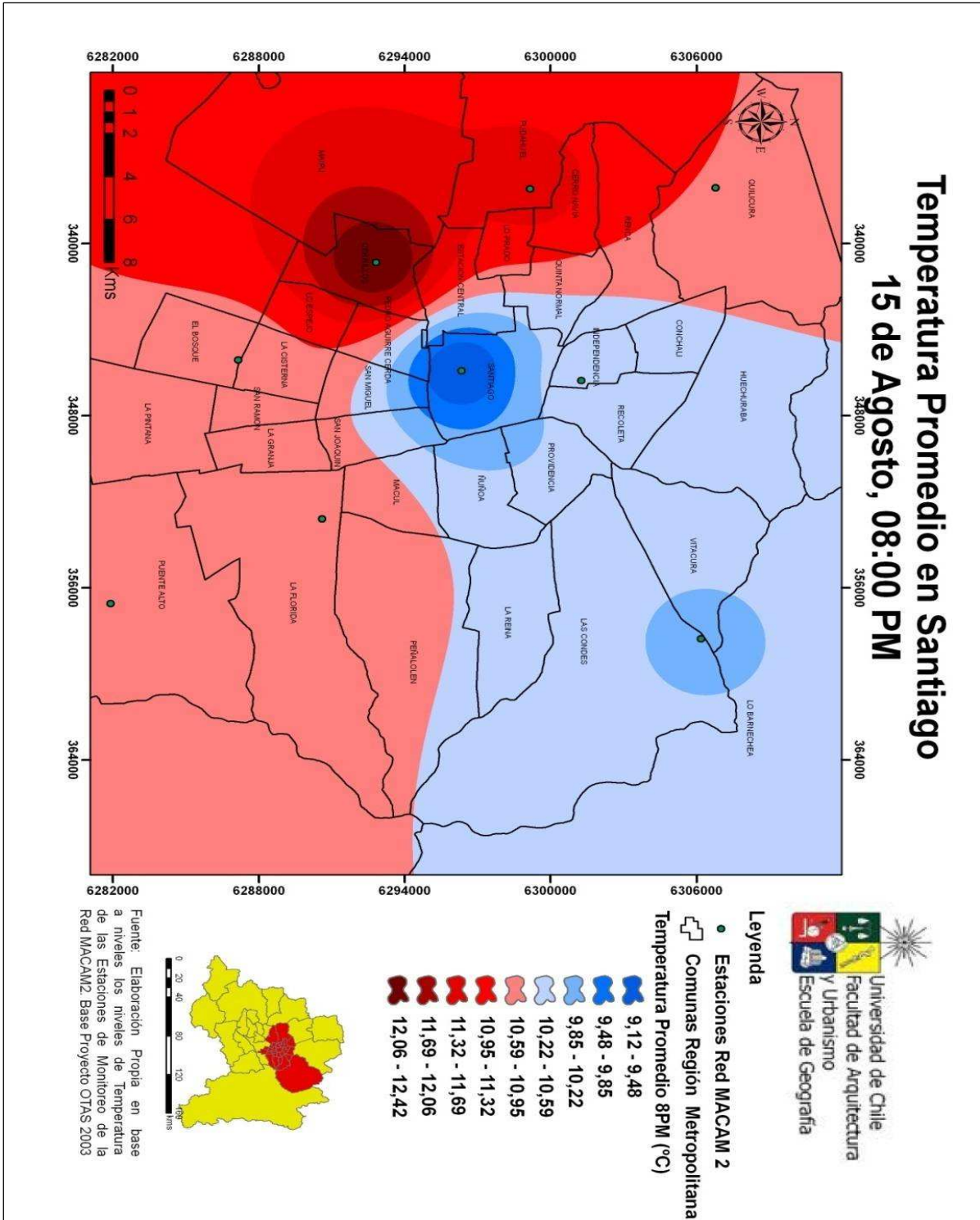


Figura 62: Temperatura a las 8PM el 15/08/2009. Fuente: Elaboración Propia

En este horario nuevamente cambia la distribución de las temperaturas, ya que ahora el centro de Santiago deja de convertirse en una isla de calor para constituirse como una isla fría (Figura 62). Desde este sector hacia el oriente se concentran las menores temperaturas, mientras que las comunas del sector sur-poniente tienen las mayores temperaturas de la ciudad, apreciándose una clara isla de calor en Cerrillos, evidenciándose diferencias de hasta 3° C entre las zonas más cálidas y frías de Santiago.

4.6.4 Caso Nº 4: Día 10 de Octubre del 2009

Comportamiento de la temperatura a las 6AM

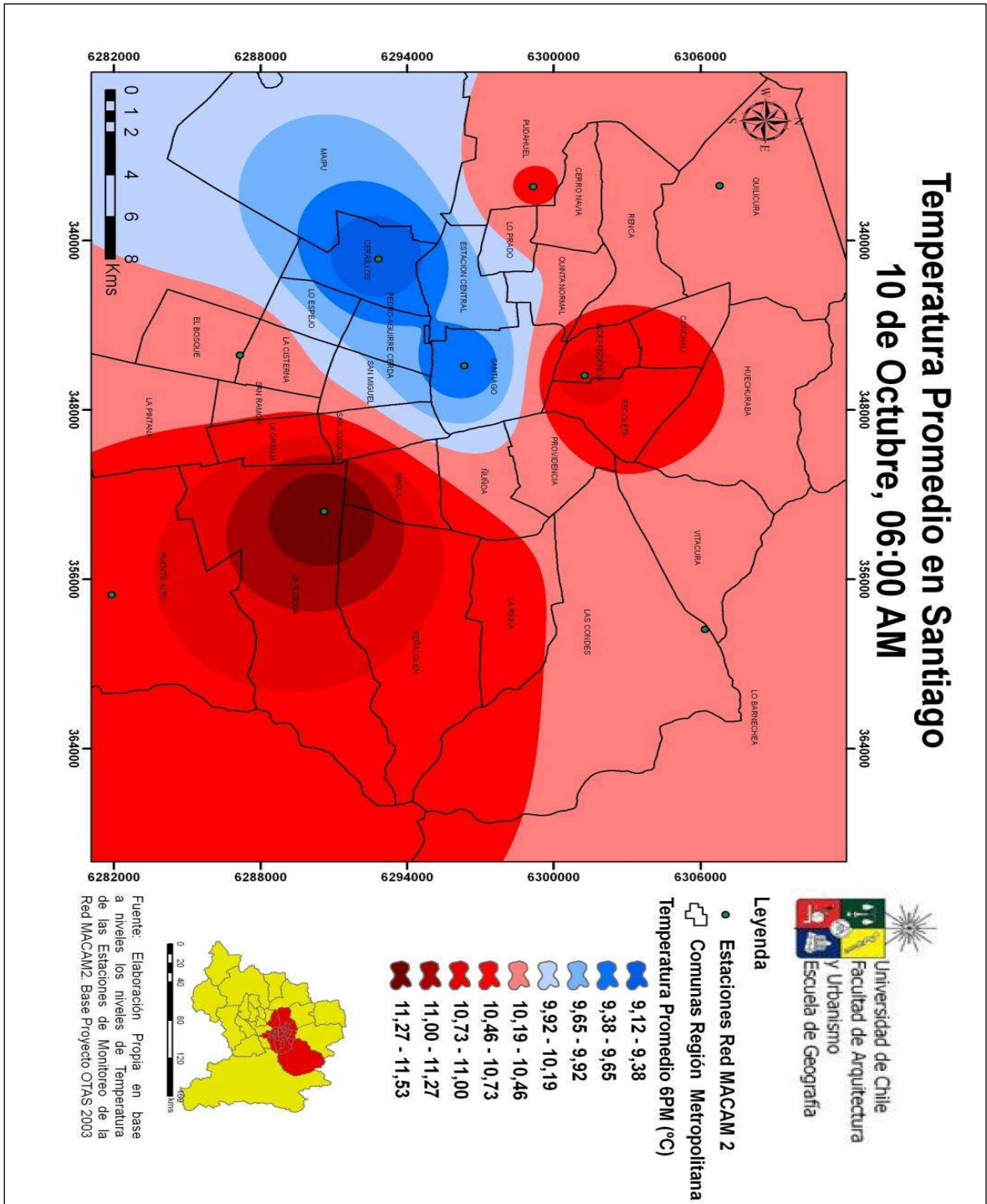


Figura 63: Temperatura a las 6AM el 10/10/2009. Fuente: Elaboración Propia

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009

En esta hora de la mañana gran parte de la ciudad de Santiago presenta temperaturas que fluctúan en torno a los 10,5 y 12° C, mientras que desde el centro de la ciudad, hacia el sur-poniente se observan temperaturas más bajas, generándose diferencias de hasta 3° C entre las zonas más frías y las más cálidas (Figura 63). Cerrillos y Santiago Centro se presentan de manera clara como dos islas frías, mientras que la comuna de La Florida y sus alrededores se erige como una isla de calor.

Comportamiento de la temperatura a las 12PM

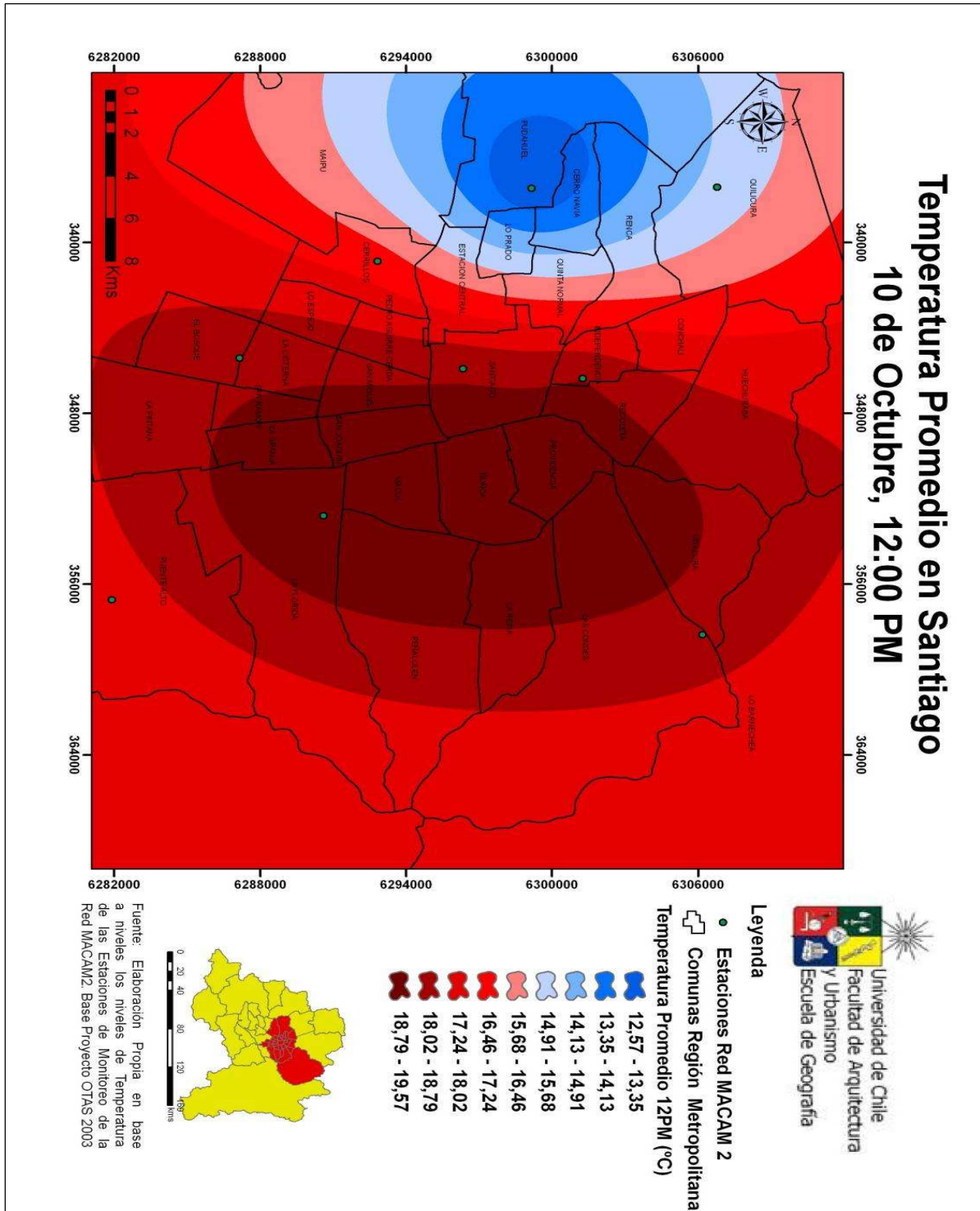


Figura 64: Temperatura a las 12PM el 10/10/2009. Fuente: Elaboración Propia

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009

Al mediodía la distribución de las temperaturas se modifica un poco en comparación con lo acaecido en la madrugada, ya que la zona más fría de la ciudad se ubica ahora en el sector poniente de la Región Metropolitana, específicamente en las comunas de Cerro Navia y Pudahuel, mientras que el resto de la capital se presenta como más cálido que la zona fría antes descrita (Figura 64). Cabe destacar que existe una notable diferencia de hasta 7°C entre ambas áreas.

Comportamiento de la temperatura a las 8PM

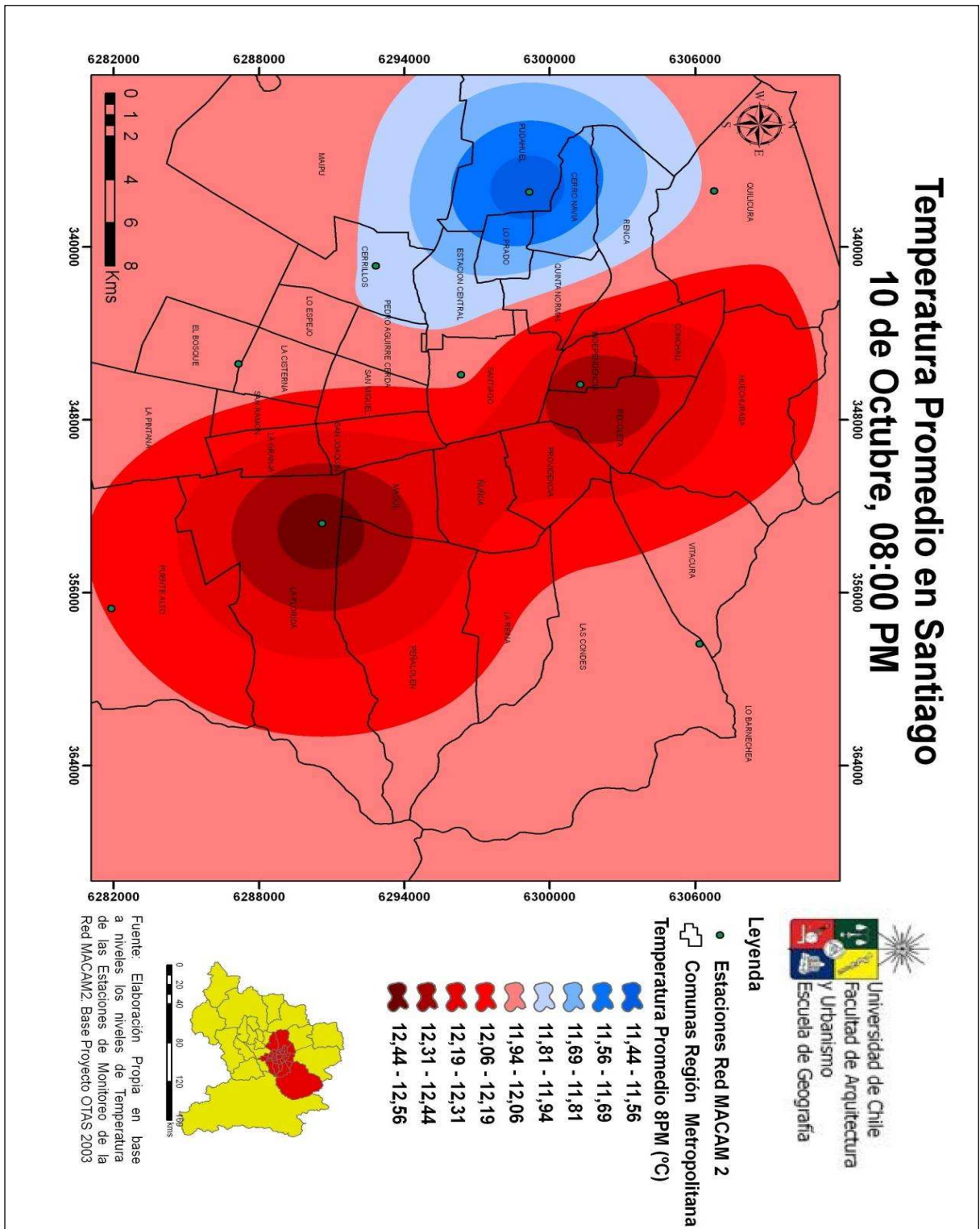


Figura 65: Temperatura a las 12PM el 10/10/2009. Fuente: Elaboración Propia

Al avanzar el día y llegar a las 8PM es posible identificar que se mantiene la distribución de las temperaturas atmosféricas observadas al medio día, lo que significa que las menores temperaturas se concentraron en el sector poniente de la ciudad, de manera específica en torno a las comunas de Pudahuel, Cerro Navia y Lo Prado, mientras que las comunas de Recoleta, independencia (Centro-Norte de Santiago) y La Florida (Sur-Oriente) se observaban las más altas temperaturas (Figura 65). Sin embargo, cabe destacar que la diferencia entre las zonas más cálidas y frías disminuyó en comparación a lo observado en el mediodía, siendo de sólo 1° C.

4.7 CORRELACIÓN ENTRE EL MATERIAL PARTICULADO Y LA TEMPERATURA ATMOSFÉRICA

Al comparar la distribución espacial de las temperaturas atmosféricas y de la contaminación por material particulado (PM10), se observa que la ciudad de Santiago, el día 11 de Mayo, se divide en dos secciones, teniéndose que en el sector oriente se localizan siempre las menores temperaturas y los menores niveles de contaminación a lo largo de todo el día, mientras que en el área poniente siempre se presentan los más altos niveles de contaminación y temperatura, aunque a veces extendiéndose hacia el sur de la ciudad, tal como se aprecia en las figuras 38 y 52.

4.7.1 Caso Nº 1: 11 de Mayo del 2009

a) Relación entre la concentración media diaria de PM10 y la Temperatura 11 de Mayo del 2009

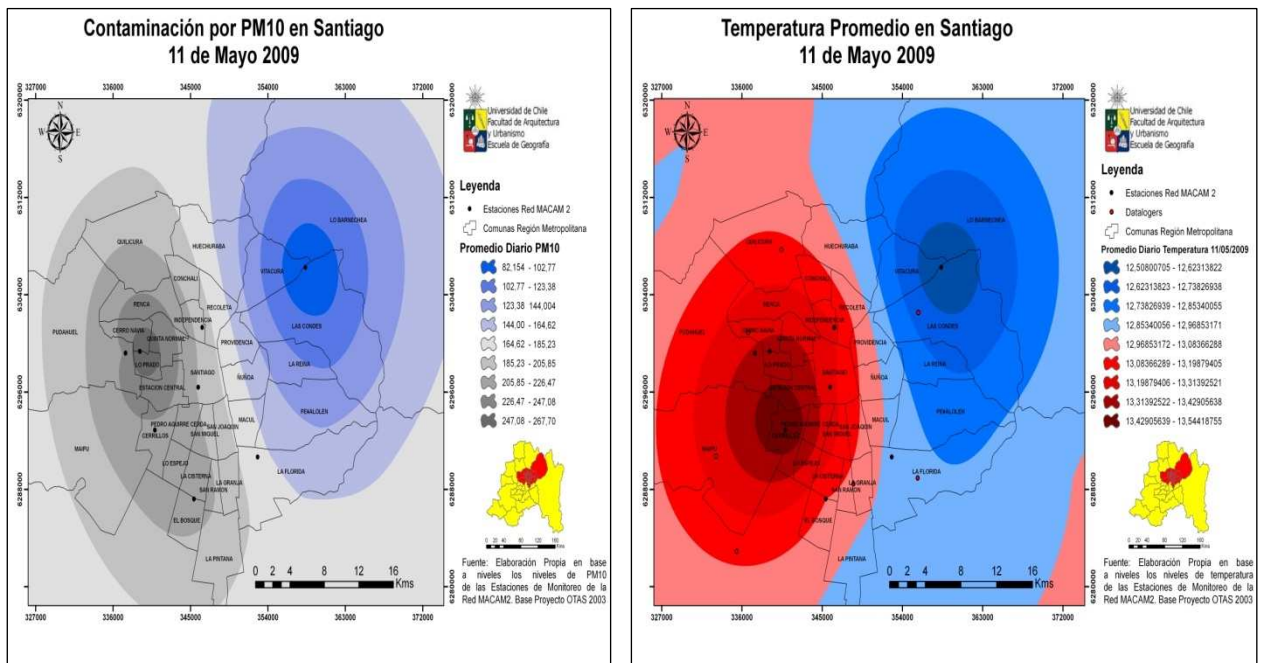


Figura 38: Concentración media diaria de PM10 11/05/2009 Figura 52: Temperatura media diaria 11/05/2009
Fuente: Elaboración Propia

Otro elemento a considerar es la existencia de un área específica dentro de la ciudad, en la que las temperaturas son las más elevadas de Santiago, constituyendo una isla de calor urbana situada en la comuna de Cerrillos.

b) Relación entre la concentración media por hora de PM10 y Temperatura
11 de Mayo del 2009. 06:00AM

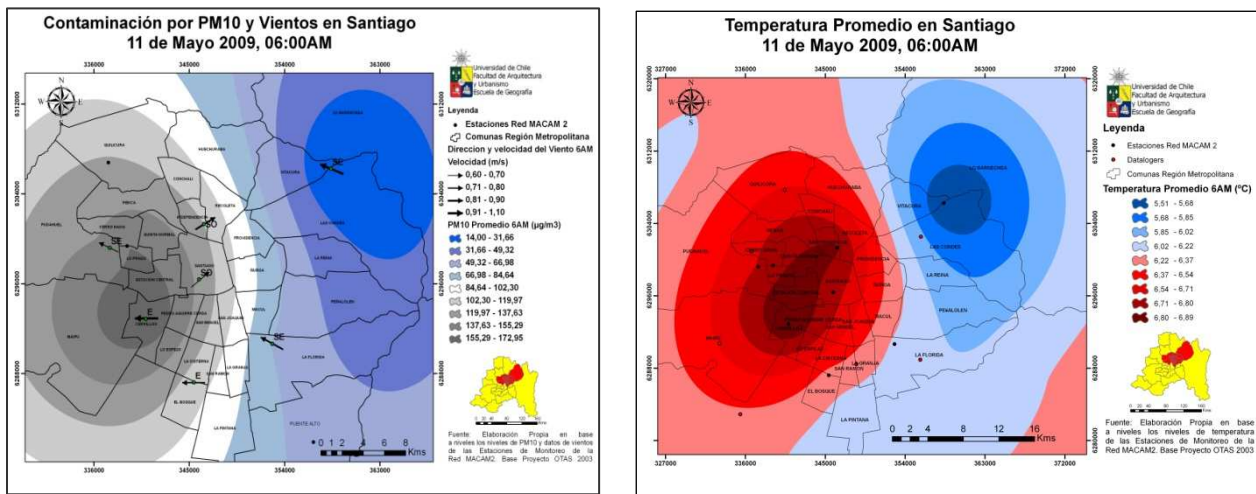


Figura N° 39: Concentración media por hora de PM10 11/05/2009 Figura N° 53: Temperatura a las 6AM el 11/05/2009
Fuente: Elaboración Propia

A esta hora se presenta una situación parecida a la analizada anteriormente, ya que tanto los más altos niveles de contaminación como los de temperatura se sitúan en el sector poniente de la ciudad (Figura 39), con la salvedad de que a esta hora las mayores temperaturas se concentran en un área mayor (Figura 53), abarcando incluso una zona del norte de la ciudad (Independencia). Por otra parte, los menores niveles de contaminación por material particulado y los de temperatura se ubican en el sector oriente de Santiago.

Es claramente identificable la predominancia de la componente Este del viento, mostrando como los flujos se dirigen desde el sector oriente de la ciudad hacia el poniente, debiendo trasladar de esta manera el material particulado desde sectores más altos a los más bajos.

c) Relación entre la concentración media por hora de PM10 y Temperatura
11 de Mayo del 2009. 12:00PM

A esta hora se sigue manteniendo el mismo patrón de distribución de las temperaturas y del material particulado, sin embargo se tiene que las mayores temperaturas se concentran específicamente en la comuna de Cerrillos (Figura 02), al igual que lo mostrado en el análisis de los promedios diarios.

Cerro Navia, nuevamente se muestra como una de las zonas más contaminadas (Figura 54) y con mayores temperaturas, mientras que la zona comprendida por las comunas de Las Condes, Vitacura y Lo Barnechea sigue presentando las menores temperaturas y los menores niveles de contaminación por PM10. Se mantiene la diferenciación Oriente-Poniente. Por otra parte se mantiene el predominio de la componente este del viento, moviendo hacia el poniente la contaminación por material particulado.

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009

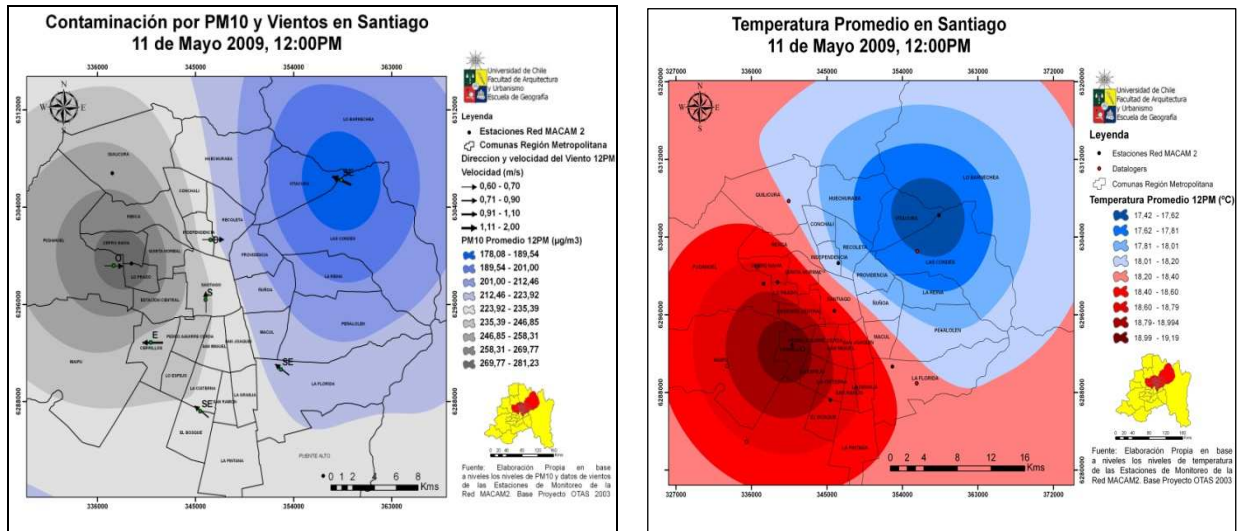


Figura Nº 40: Concentración media por hora de PM10 11/05/2009 Figura Nº 54: Temperatura a las 12PM el 11/05/2009
Fuente: Elaboración Propia

d) Relación entre la concentración media por hora de PM10 y Temperatura
11 de Mayo del 2009. 08:00PM

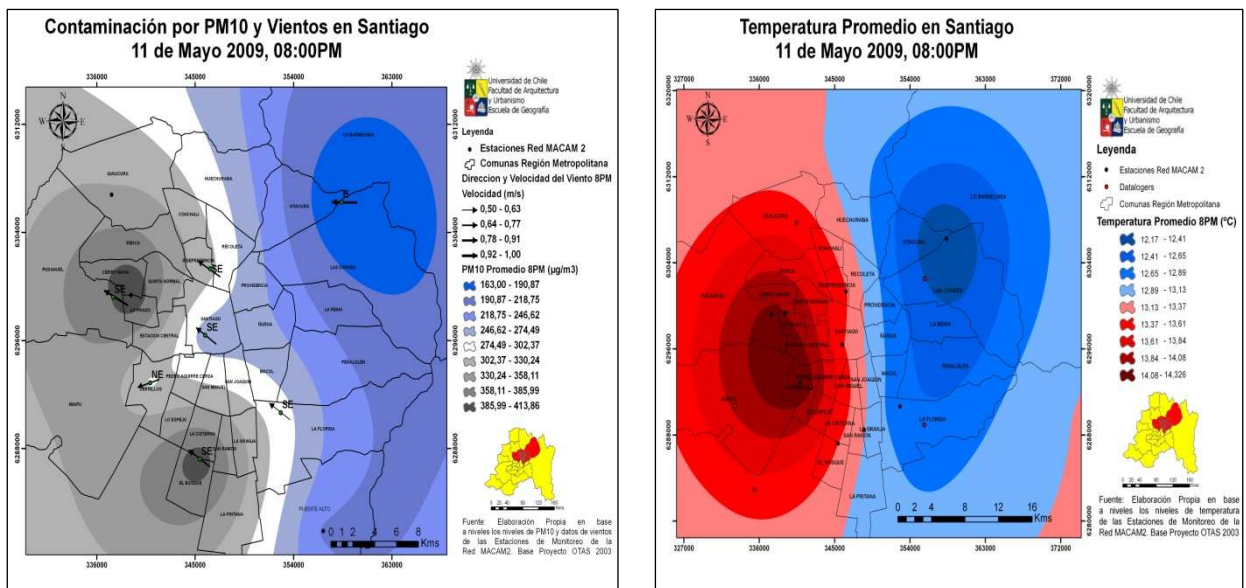


Figura Nº 41: Concentración media horaria de PM10 11/05/2009 Figura Nº 55: Temperatura a las 8PM el 11/05/2009
Fuente: Elaboración Propia

Si bien es cierto que se sigue manteniendo el patrón de distribución evidenciado a lo largo del día, en relación a la división de la ciudad en dos zonas diferenciadas por sus temperaturas y niveles de contaminación, surgen nuevos elementos de interés. Esto tiene que ver principalmente con la zona de Cerrillos (figura 41 y 55), que presenta las más altas temperaturas, pero uno de los menores niveles de contaminación del área poniente de la ciudad, lo que permitiría aseverar que por este sector inciden los vientos del nor-este pasando por el corredor de Cerrillos, permitiendo un mayor grado de dispersión de los contaminantes.

Correlación de Pearson entre Material Particulado y Temperaturas Atmosféricas 11 de Mayo del 2009

Estación de monitoreo	Índice de Pearson 11/05/2009
Independencia	0,73
La Florida	0,74
Las Condes	0,73
Parque O'Higgins	0,79
Pudahuel	0,70
Cerrillos	0,75
El Bosque	0,70

Tabla 7: Correlación de Pearson 11/05/2009. Fuente: Elaboración Propia

La tabla 7 muestra los altos índices de correlación directa entre las temperaturas del aire y las concentraciones de PM10 el día 11 de mayo.

4.7.2 Caso Nº 2: 26 de Junio del 2009

**a) Relación entre la concentración media diaria de PM10 y la Temperatura
26 de Junio del 2009**

Es posible apreciar que en este día existe nuevamente una alta covariación espacial entre las mayores temperaturas y las mayores concentraciones de PM10, teniendo en cuenta que estas últimas se concentran en un área mayor que en el caso anterior (11 de mayo), abarcando las comunas de Cerrillos, Estación Central, Lo Prado y Cerro Navia (Figura 42), lo que coincide con las áreas que presentan los mayores promedios diarios de temperatura.

Por otro lado se sigue manteniendo la relación espacial por la cual las menores temperaturas y los menores niveles de contaminación por material particulado se ubican en el sector oriente de la ciudad (Figura 56).

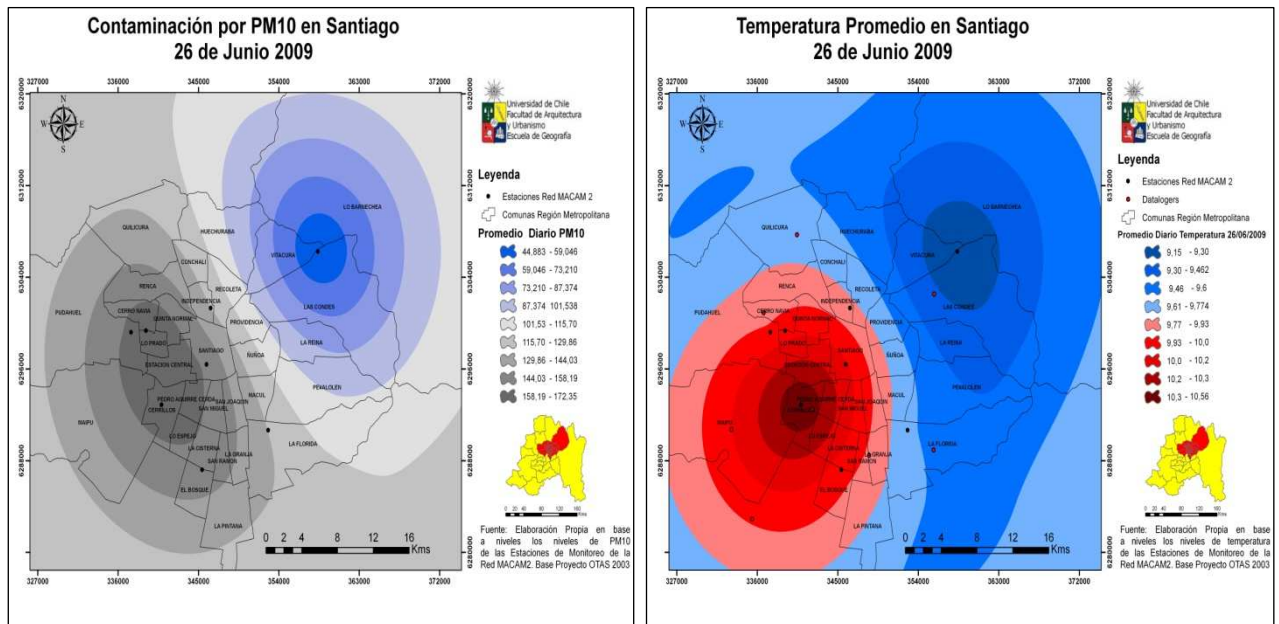


Figura Nº 42: Concentración media diaria de PM10 26/06/2009 Figura Nº 56: Temperatura media diaria 26/06/2009
Fuente: Elaboración Propia

**b) Relación entre la concentración media por hora de PM10 y Temperatura
26 de Junio del 2009. 06:00AM**

A las 6 de la madrugada, la comuna de Cerrillos es la que presenta los mayores niveles de contaminación por material particulado y las más altas temperaturas (Figuras 43 y 57).

Se mantiene la distribución espacial que divide la ciudad en dos zonas, una la zona oriente, con una mejor calidad de aire y con las temperaturas más bajas, y la zona poniente, la cual ya a esta hora presenta sectores donde su supera el valor establecido por la norma de calidad del aire, además de las temperaturas más altas de la ciudad (Estación Cerrillos). En el sector oriente predominan los vientos de origen Este, lo que debería provocar que el PM10 se mueva hacia los sectores más bajos de la cuenca. Además es posible apreciar un movimiento de la contaminación por

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE Y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009

material particulado dentro del sector poniente de la ciudad, debido a la influencia que ejercen los vientos de dirección sur, los que causarían la extensión de la masa de aire contaminado, desde Cerrillos a Pudahuel, Cerro Navia o Estación Central.

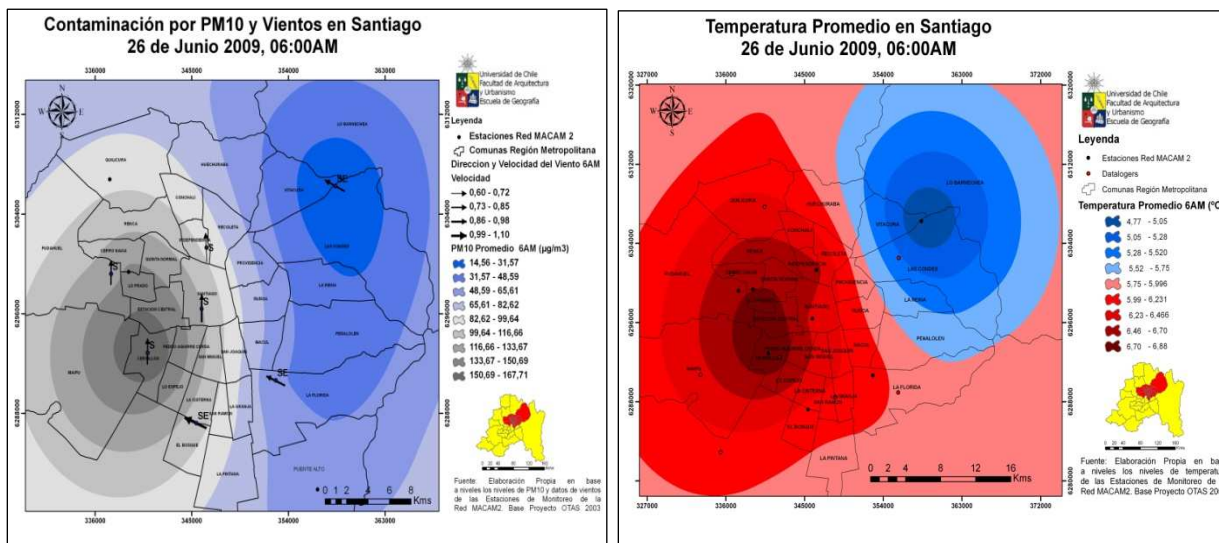
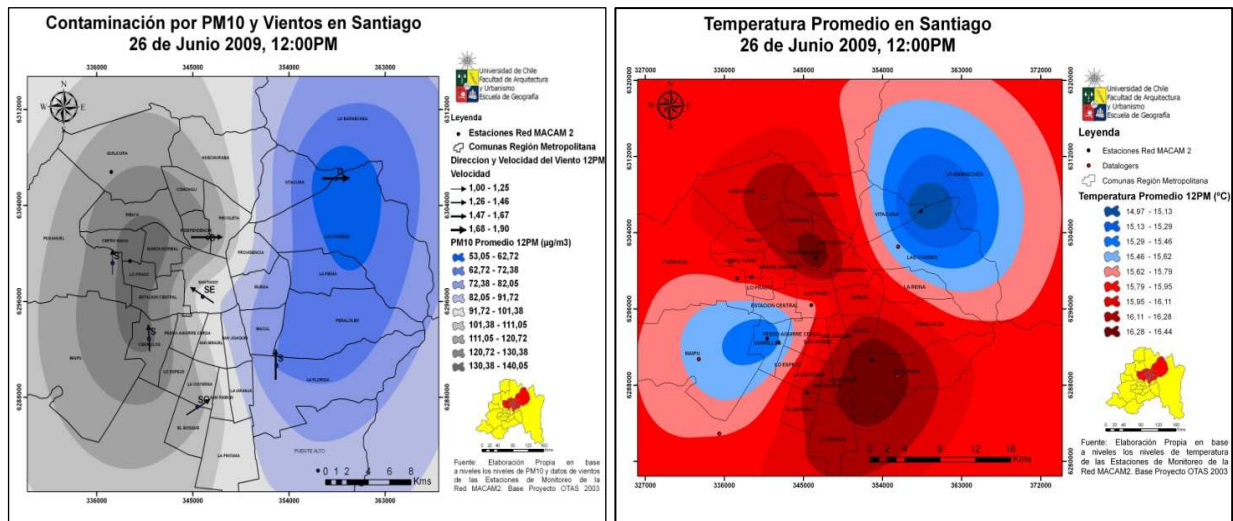


Figura Nº 43: Concentración media por hora de PM10 26/06/2009 Figura Nº 57: Temperatura a las 6AM el 26/06/2009
Fuente: Elaboración Propia

c) Relación entre la concentración media por hora de PM10 y Temperatura 26 de Junio del 2009. 12:00PM

A esta hora la relación entre mayor temperatura y mayor contaminación no se muestra tan clara como lo evidenciado anteriormente, ya que ahora se presentan dos núcleos fríos dentro de la ciudad (Figura 44), uno ubicado en el oriente y otro en el sector poniente, específicamente en torno a Cerrillos y Maipú. Este último registra altos niveles de contaminación. Por otro lado, las mayores temperaturas se dan en el norte y sur de la ciudad (Figura 58), variando completamente el patrón espacial anteriormente mencionado. Los valores más altos tienden a concentrarse en toda la comuna de Cerro Navia, además de sectores de Pudahuel y Lo Prado, las cuales se ven influenciadas por los vientos de dirección Sur provenientes de Cerrillos, desde la cual el PM10 se extiende hacia las comunas antes señaladas.

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE Y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009



26/06/2009 Figura N° 58: Temperatura a las 12PM el 26/06/2009

Fuente: Elaboración Propia

d) Relación entre la concentración media por hora de PM10 y Temperatura 26 de Junio del 2009. 08:00PM

A esta hora se tiene que las temperaturas recuperaron su patrón original de distribución espacial, mientras que la contaminación se vuelve a presentar alta en la zona poniente. Sin embargo, los mayores niveles se registran en la zona sur de la ciudad, en torno a las comunas de El Bosque, La Cisterna y La Granja, comunas que a esta hora presentan valores medios y medio altos de temperatura, además de Cerro Navia, ubicada en el poniente de Santiago, y a una menor altura que las comunas antes nombradas, desde las cuales el flujo del viento SE mueve la masa de contaminación.

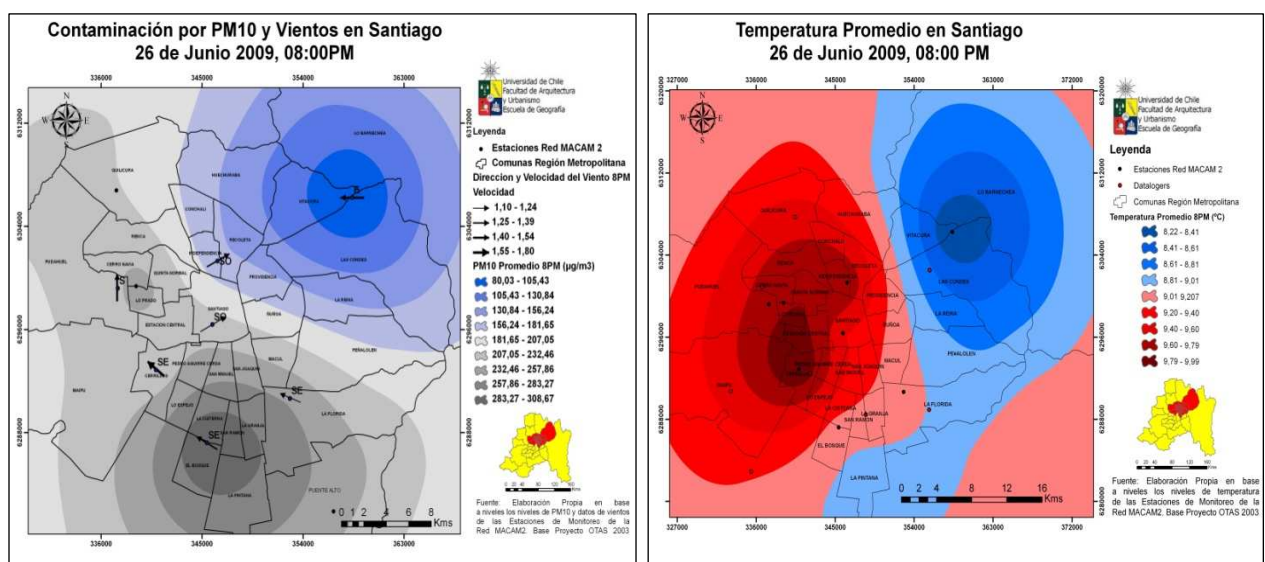


Figura N° 45: Concentración media por hora de PM10 26/06/2009

Figura N° 59: Temperatura a las 8PM el 26/06/2009

Correlación de Pearson entre Material Particulado y Temperaturas Atmosféricas 26 de Junio del 2009

Estación de monitoreo	Índice de Pearson 26/06/2009
Independencia	0,76
La Florida	0,74
Las Condes	0,77
Parque O'Higgins	0,69
Pudahuel	0,71
Cerrillos	0,71
El Bosque	0,71

Tabla 8: Correlación Pearson 26/06/2009. Fuente: Elaboración Propia

Los índices de correlación de Pearson (tabla 8) refrendan la existencia de una relación alta y directa entre el PM10 y las temperaturas.

4.7.3 Caso N° 3: 15 de Agosto del 2009

a) Relación entre la concentración media por hora de PM10 y Temperatura 15 de Agosto del 2009. 06:00AM

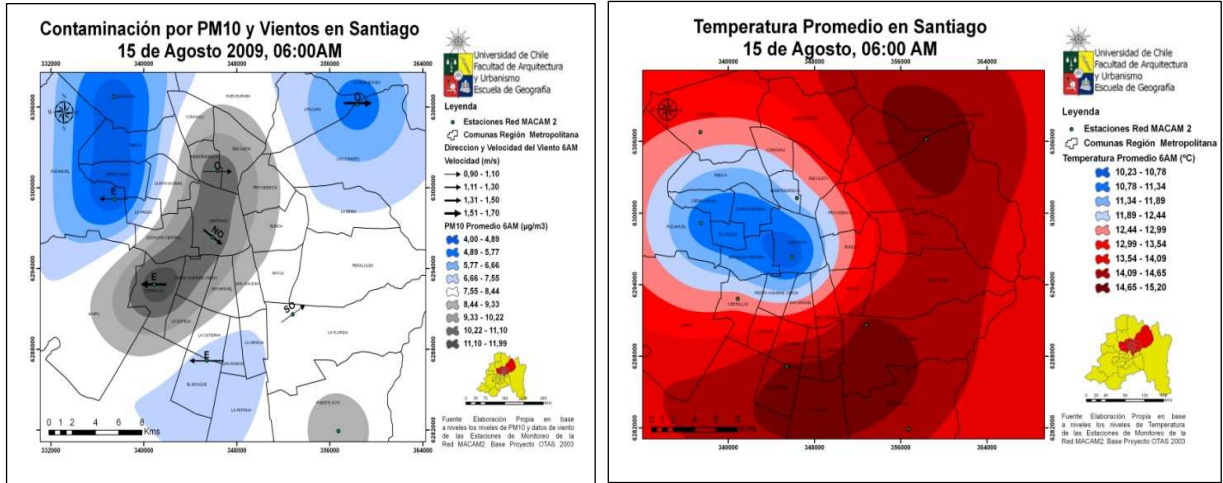


Figura N° 46: Concentración media por hora de PM10 15/08/2009 Figura N° 60: Temperatura a las 6AM el 15/08/2009
Fuente: Elaboración Propia

En la madrugada del 15 de Agosto se observa que las comunas más contaminadas corresponden a Santiago, Independencia y Cerrillos, mientras que los sectores con mejor calidad del aire se observan en el sector oriente y nor poniente de la ciudad (Figura 46). Pero al contrario de lo que se expresó en los ejemplos de los días críticos de contaminación antes analizados, no existe una relación directa entre la temperatura y el material particulado. Por ejemplo, en el sector oriente, en específico el área comprendida por las comunas de Vitacura, Las Condes y Lo Barnechea, se presentan bajos niveles de contaminación pero altas temperaturas (Figura 60), lo mismo que ocurrió en Santiago Centro, donde se observaron altos niveles de PM10 pero bajas temperaturas. Sumado a esto, se observa que no existe una relación clara entre la distribución del PM10 y la influencia del viento, tal como si se apreciaban en los casos críticos de contaminación.

**b) Relación entre la concentración media por hora de PM10 y Temperatura
15 de Agosto del 2009. 12:00PM**

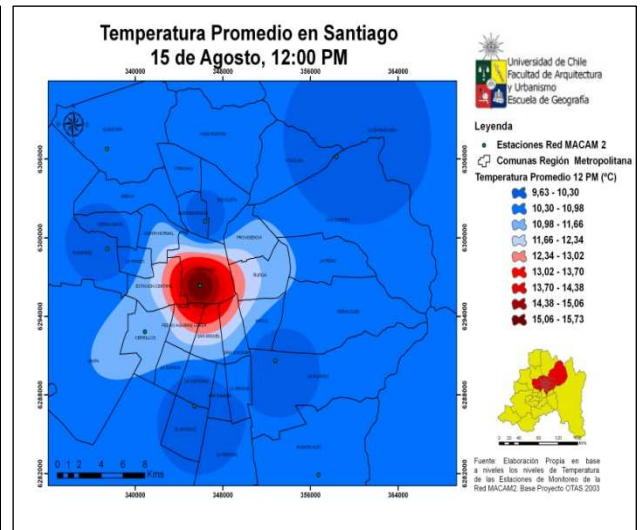
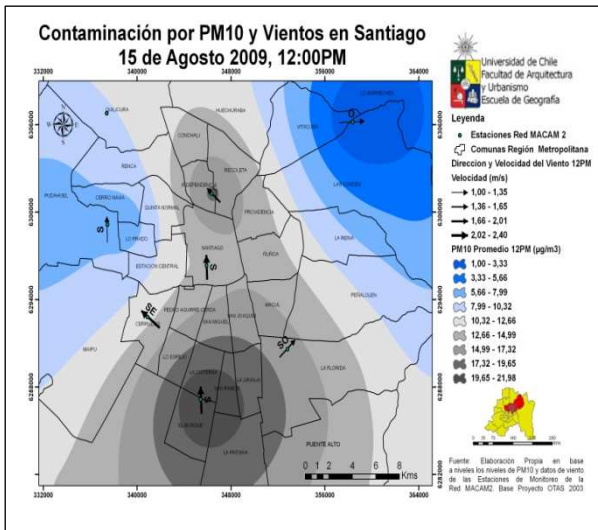


Figura N° 47: Concentración media por hora de PM10 15/08/2009 Figura N° 61: Temperatura a las 12PM el 15/08/2009

Al avanzar el día se presenta una variación con respecto a lo observado en la madrugada, ya que ahora los mayores niveles de contaminación por material particulado se ubican en el sur de Santiago (Figura 47), desde el cual por efecto del viento se produce un movimiento del mismo hacia las comunas del norte de Santiago, que, sin embargo, registran bajas temperaturas (Figura 61), manteniendo las mismas características que en la hora antes analizada.

**c) Relación entre la concentración media por hora de PM10 y Temperatura
15 de Agosto del 2009. 08:00PM**

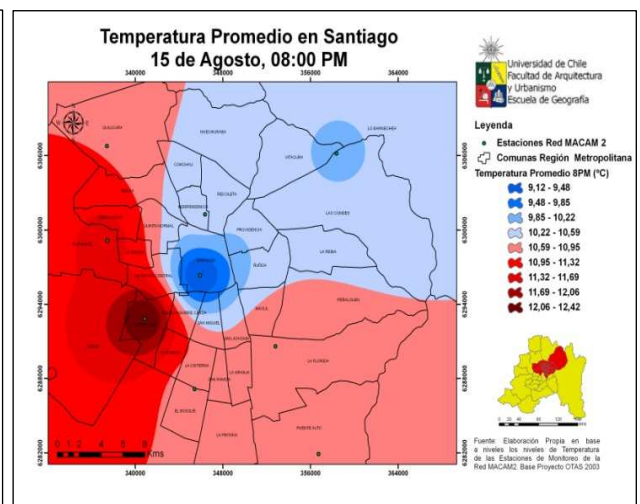
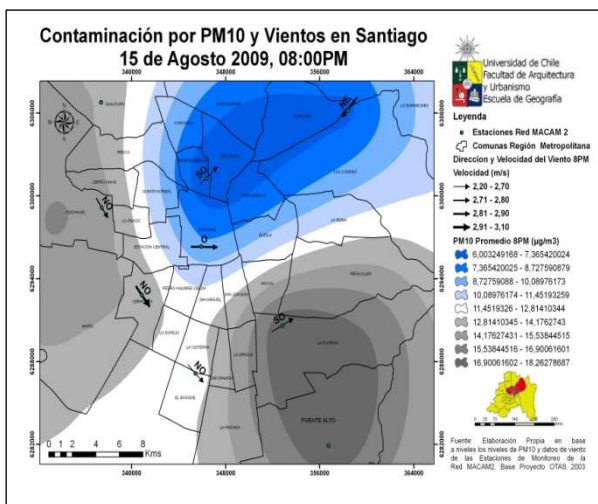


Figura N° 48: Concentración media horaria de PM10 15/08/2009 Figura N° 62: Temperatura a las 8PM el 15/08/2009
Fuente: Elaboración Propia

En este horario se aprecia que existe una mayor relación entre temperaturas y PM10 que lo evidenciado en horas anteriores, teniendo como ejemplo el caso de Puente Alto y La Florida, las cuales presentan los más altos niveles de PM10 (Figura 48) y también temperaturas relativamente altas (Figura 62). Las áreas más contaminadas se ven

influenciadas por los vientos provenientes del nor poniente, los cuales mueven el PM10, distribuyéndolo por el poniente y sur oriente. Es importante destacar que los niveles de contaminación son mucho más bajos que los días de máxima contaminación, presentando valores que nunca sobrepasaron la norma diaria de calidad del aire.

Correlación de Pearson entre Material Particulado y Temperaturas Atmosféricas 15 de Agosto del 2009

Estación de monitoreo	Índice de Pearson 15/08/2009
Independencia	-0,69
La Florida	-0,73
Las Condes	-0,66
Parque O´Higgins	-0,68
Pudahuel	-0,60
Cerrillos	-0,71
El Bosque	-0,75

Tabla 9: Correlación Pearson 15/08/2009. Fuente: Elaboración Propia

La tabla 9 permite observar que en este día existe un gran cambio en comparación a lo acaecido en los días críticos de contaminación: las zonas que presentan altas temperaturas no registran altos niveles de contaminación, sino que en algunos casos, estos últimos se asocian al registro de bajas temperaturas, como lo indican los índices inversos de correlación.

4.7.4 Caso N° 4: 10 de Octubre del 2009

a) Relación entre la concentración media por hora de PM10 y Temperatura 10 de Octubre del 2009. 06:00AM

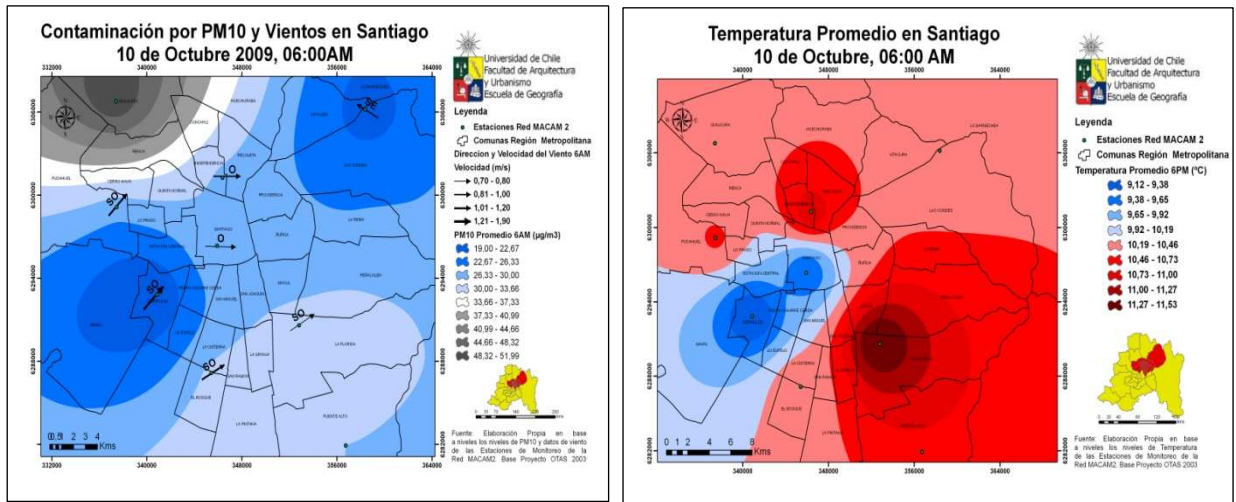


Figura N° 49: Concentración media por hora de PM10 10/10/2009 Figura N° 63: Temperatura a las 6AM el 10/10/2009
Fuente: Elaboración Propia

El día 10 de Octubre a las 6 de la mañana se observan las mismas características que lo evidenciado en el día anteriormente analizado, es decir no existe una relación directa entre altas temperaturas y altos niveles de contaminación por material particulado. Esto se puede ejemplificar con el caso de la estación de monitoreo de Las Condes, la cual presenta bajos niveles de PM10 (Figura 49) y altas temperaturas (Figura 63). Lo mismo se observa en la estación de la Florida y Pudahuel. Sin embargo, es posible distinguir una excepción en el sector sur poniente de Santiago, de manera específica en torno a la comuna de Cerrillos, en la cual se registran bajos niveles de contaminación y bajas temperaturas.

Gran parte de Santiago presenta bajos niveles de PM10, lo que puede deberse a un mayor grado de ventilación proveniente del sur oeste y del sur este, que impide que la masa de contaminación proveniente del nor poniente de la capital se extienda por el resto de la ciudad.

**b) Relación entre la concentración media por hora de PM10 y Temperatura
10 de Octubre del 2009. 12:00PM**

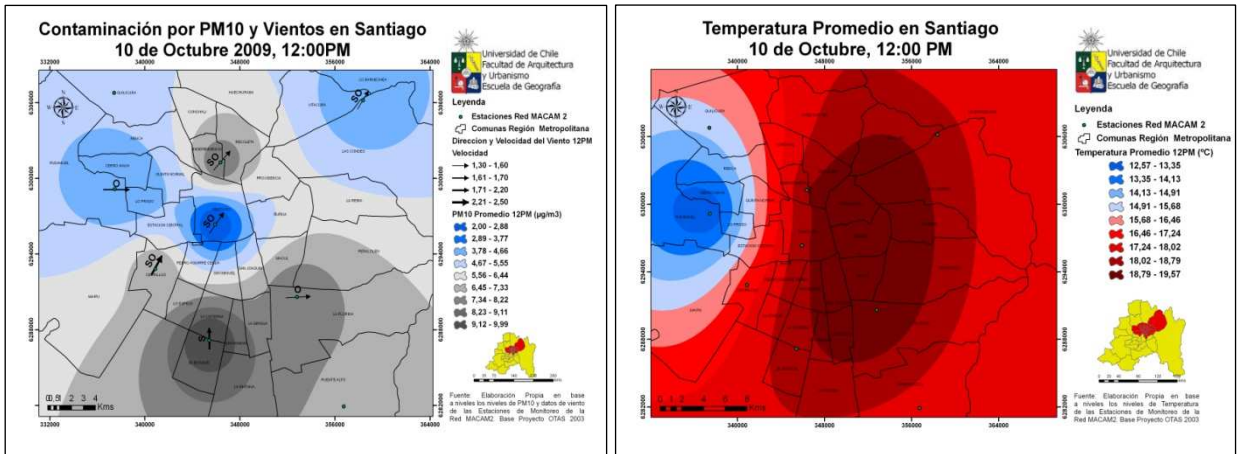


Figura N° 50: Concentración media por hora de PM10 10/10/2009 Figura N° 64: Temperatura a las 12PM el 10/10/2009
Fuente: Elaboración Propia

En este horario es posible notar que la relación entre temperatura y contaminación mantiene el patrón descrito en el horario anterior, es decir no presentándose una relación directa entre ambas variables, lo que queda de manifiesto al observar lo ocurrido en la estación del sector oriente de Santiago, la cual presenta bajos niveles de PM10 y a su vez altas temperaturas (Figuras 50 y 64), lo que se repite en el centro de la ciudad. Sin embargo, en el poniente si se produce una relación directa al registrarse bajas temperaturas y bajos niveles de contaminación por material particulado.

**c) Relación entre la concentración media por hora de PM10 y Temperatura
10 de Octubre del 2009. 08:00PM**

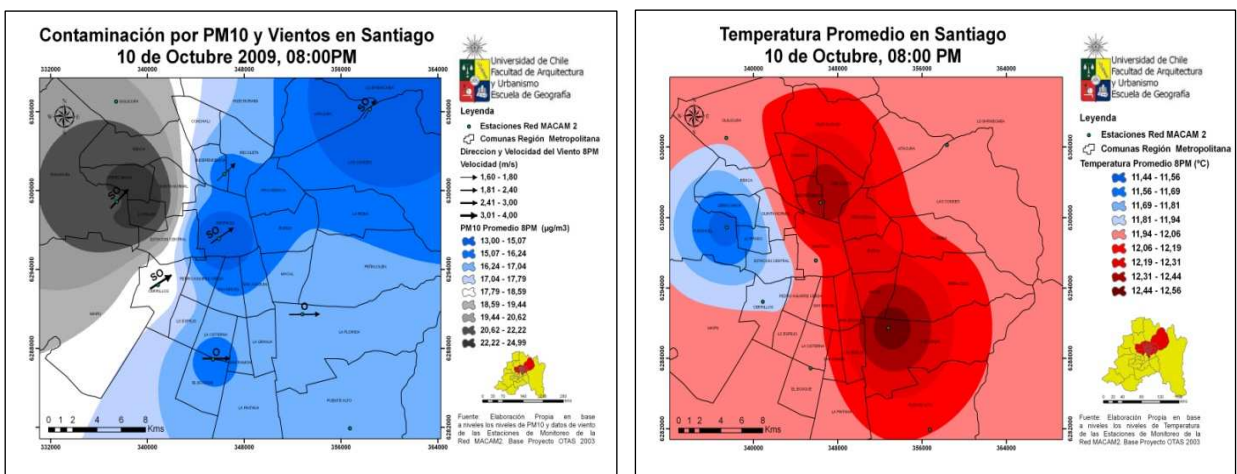


Figura N° 51: Concentración media por hora de PM10 10/10/2009 Figura N° 65: Temperatura a las 8PM el 10/10/2009
Fuente: Elaboración Propia

A las 8PM es claramente apreciable la existencia de una relación inversa entre contaminación y temperaturas, ya que aquellas zonas de la ciudad que presentan los niveles más bajos de contaminación presentan las temperaturas más altas, mientras que aquellas zonas más contaminadas tienen las menores temperaturas de la ciudad.

Un ejemplo de lo primero corresponde a las zonas del centro, norte y sur de Santiago, mientras que el poniente de la ciudad corresponde al segundo caso (Figuras 51 y 65).

Correlación de Pearson entre Material Particulado y Temperaturas Atmosféricas 10 de Octubre del 2009

Estación de monitoreo	Índice de Pearson 10/10/2009
Independencia	-0,63
La Florida	-0,70
Las Condes	-0,41
Parque O´Higgins	-0,56
Pudahuel	0,03
Cerrillos	-0,58
El Bosque	-0,68

Tabla 10: Correlación Pearson 10/10/2009. Fuente: Elaboración Propia

Los coeficientes de correlación de Pearson (Tabla 10) expresan cuantitativamente esta relación inversa, que, no obstante, es muy débil en el caso de la estación de Pudahuel.

CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

5.1 DISCUSIÓN

A partir de este análisis queda demostrado que existe una clara diferenciación en la distribución espacial de la contaminación atmosférica por Material Particulado en la ciudad de Santiago, durante los días de máxima polución, corroborando lo planteado por Romero et al (2008). Las diferencias de temperaturas que se observaron en estos días guardan una estrecha relación con la distribución de material particulado, tal como lo plantea Moral et al. (2004). Además es posible identificar la presencia de islas de calor en el centro y poniente de Santiago. Por otro lado, surgen elementos de cierto interés al analizar cómo se distribuyen las variables analizadas en aquellos días en que los niveles de contaminación son bajos.

Diversos estudios se han centrado en el comportamiento del material particulado en días de máxima contaminación (Garreud y Rutllant, 2006; Moral, 2003), sin embargo, prácticamente hay nulos esfuerzos por estudiar o analizar su comportamiento en días donde la ventilación permite la dispersión natural de las partículas. El patrón de distribución del PM10 se mantiene constante durante el período en que sus niveles son altos y se relaciona directamente con las temperaturas atmosféricas, sin embargo, al analizar casos en que los niveles de PM10 son bajos es posible apreciar que su distribución cambia completamente, presentándose incluso relaciones inversas entre PM10 y temperaturas.

Con respecto a lo anterior, los días que son considerados críticos por contaminación por material particulado son definidos en función de una norma que se aplica al promedio de 24 horas y que reconoce que la calidad del aire pasa de buena a regular cuando se superan $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que se condice con estándares internacionales (EPA, 2006). Sin embargo, las grandes variaciones horarias tornan irrelevantes los promedios diarios y requerirían su sustitución por normas que consideren períodos de tiempo menores, especialmente cuando se utilizan estos valores para determinar medidas de mitigación, como la restricción vehicular que se aplica al día siguiente en circunstancias que se debería hacer en las horas sucesivas a las altas concentraciones.

Los sucesivos gobiernos han abordado el tema de la contaminación atmosférica sin conseguir su eliminación de raíz. Al observar los resultados de los promedios anuales obtenidos en esta investigación, se observan tendencias de disminución de las concentraciones de material particulado desde la puesta en marcha de la red de Monitoreo, por lo que se ha expuesto que Santiago cuenta con una calidad del aire cada vez mejor. Sin embargo, el presente trabajo introduce al análisis las estaciones de Cerro Navia, Quilicura y Puente Alto, obteniendo resultados bastante interesantes. La estación de Cerro Navia está en operación desde el año 2008, y sus concentraciones de material particulado distan mucho del análisis alentador realizado por las autoridades, registrando no solo mayores valores horarios y diarios, sino que también un aumento en los meses en los que se producen episodios críticos de contaminación, abarcando una mayor extensión que el resto de las estaciones de monitoreo.

Por otro lado, las tendencias de los promedios anuales o los días contaminados ocultan, como se ha indicado, grandes variaciones diarias y horarias, que son las que realmente interesan para medir la efectividad de las medidas mitigadoras.

Lo anterior se ve refrendado al observar cómo se distribuyen en el espacio las variables analizadas en los días críticos de contaminación por material particulado, ya que se observan claras diferencias entre las diversas horas del día. En la madrugada, los niveles de contaminación son más bajos y existen zonas de mayor contaminación en el sector poniente de la ciudad, las que a su vez presentan temperaturas más altas y están topográficamente más bajas que la zona oriente de la ciudad, la cual tiene menores niveles de PM10 y menores temperaturas. A pesar de que las temperaturas no presentan grandes diferencias, igual generarían sistemas de vientos y brizas que serían suficientes para trasladar las masas de aire contaminado de los sectores más fríos del oriente a los más cálidos del poniente. Esta zonificación espacial del material particulado y de las temperaturas atmosféricas se mantiene en el día; sin embargo, los valores van aumentando hasta llegar a la noche, cuando las diferencias se tornan críticas dentro de la ciudad, agudizando las diferencias presentadas en horas anteriores.

Por el contrario, durante los días de buena calidad del aire, las diferencias de temperatura son más marcadas y ello debiera contribuir a una distribución del material particulado diferente. Las islas de calor y de frío también cambian de ubicación, entre días críticos o no de contaminación. En el primer caso, las islas de calor siempre se ubican en el poniente de la ciudad, mientras que las islas de frío siempre lo hacen en el sector oriente, abarcando las comunas de Vitacura, Las Condes y Lo Barnechea. Sin embargo, en el segundo caso se observa un cambio en el patrón de distribución de las islas de calor y de frío en la ciudad, ya que incluso se evidencian casos en los que el patrón descrito en los días de máxima contaminación se invierte.

Cada uno de los días analizados es diferente en algunos aspectos, tales como la oscilación térmica o la tendencia horaria de elevarse o decrecer las temperaturas, lo que señalaría la importancia de los procesos meteorológicos de escala sinóptica y su relación con los procesos y formas topoclimáticas, requiriendo un análisis multiescalar, que en este trabajo no se ha realizado.

Trabajos anteriores habían indicado la relación directa entre temperatura del aire y concentración de contaminantes en el sector poniente de la ciudad, tal como lo plantea Romero et al, (2008), el cual establece relaciones logarítmicas entre ambas variables. Las islas de calor del sector poniente, que se observan en los días críticos de contaminación, se relacionarían con las diferencias de los usos y coberturas de los suelos y en especial la existencia de altas densidades construidas, urbanizaciones compactas, elevadas tasas de impermeabilización y escasez o inexistencia de áreas verdes. Desde este punto de vista, la planificación y diseño de los usos de suelo urbanos, debiera contribuir a reducir la participación de la ciudad en la generación y crecimiento de las islas de calor, consiguiendo un mayor equilibrio térmico con las zonas más frías del oriente, que se relacionan espacialmente con menores densidades residenciales, mayores superficies de áreas verdes y consiguientemente menores tasas de impermeabilización (Romero et al, 2010). Sin embargo, cabe destacar que las diferencias más extremas de temperaturas se registraron en los días en que los niveles de PM10 son bajos. Esta mayor diferencia de temperatura debiera generar una mayor circulación del aire y mayor capacidad de ventilación. Lo anterior demostraría que la relación entre las islas de calor o frío urbano y la contaminación es un proceso complejo que requeriría separar los factores meteorológicos de gran escala-que parecen ser muy importantes- de los factores urbanos propiamente tales.

Estas Islas de Calor Urbano generan un tiro convectivo (ascenso de aire cálido) sobre las áreas más densamente urbanizadas de la ciudad, originando zonas de bajas presiones atmosféricas relativas, que controlan la circulación local de aire proveniente

de áreas más frías como la periferia rural o las zonas urbanas del oriente de la ciudad. Con ello, se produce un desplazamiento de masas de aire contaminado, que pueden arribar a otros sectores de la ciudad o a áreas rurales situadas a decenas de kilómetros de ésta, contaminando lugares que carecen de fuentes fijas o móviles en su cercanía (Crutzen, 2004; Oke, 1987), tal como se evidenció en las islas de calor observadas en el presente estudio. Por otra parte se hace necesario limitar el establecimiento de construcciones que reduzcan la ventilación al interior de la ciudad, tal como ocurre con los edificios en altura, los cuales interrumpen o alteran el desplazamiento del aire (Lindberg et al., 2003; Tablada et al., 2009), lo que podría empeorar aun más la situación de Santiago, tomando por ejemplo lo decidido para la comuna de Cerrillos, que eliminaría un corredor de viento que permite la dispersión del material particulado.

No obstante los variados resultados obtenidos, es importante destacar la escala de representatividad espacial que tienen las aproximaciones generadas. La cantidad de estaciones de monitoreo de la Red MACAM en la ciudad de Santiago, alcanza a sólo diez para una ciudad que se extiende por cerca de 70.000 Há., lo que implica que se debe considerar que los datos e informaciones analizados permiten contar sólo con una visión muy general, carente de cualquier especificidad geográfica, lo que dificulta adoptar adecuadas medidas de control y mitigación de la contaminación, al impedir identificar relaciones más precisas entre concentración de contaminantes y fuentes emisoras, entre temperaturas y contaminantes, entre usos y coberturas de suelos y temperaturas y contaminantes, etc. Las autoridades del Ministerio de Salud estiman que las estaciones de monitoreo representan un área de influencia de 5 Km a su alrededor, pero esto carece de argumentaciones científicas, considerando especialmente que la contaminación antes que distribuirse arealmente lo hace en función de la cercanía de las fuentes de contaminación y que, como Buzelli (2008) lo ha sostenido, las concentraciones son máximas en los bordes de avenidas de gran circulación vehicular. En San Francisco (USA) o en Ciudad de México, existen más de 60 y 45 estaciones de monitoreo, respectivamente y se realizan levantamientos de información a lo largo y en los bordes de las vías de mayor tráfico (Ostro et al., 2004; Gilbert et al, 2006; Buzelli, 2008).

5.2 CONCLUSIONES

La contaminación del aire en Santiago por material particulado se concentra principalmente en los meses de otoño e invierno, registrando altos promedios diarios, que en más de algún caso sobrepasan la norma diaria establecida, lo que puede resultar perjudicial para la salud de las personas y de los ecosistemas. Esto se evidencia desde el inicio de la toma de mediciones en Santiago el año 1997, aunque también se aprecia una reducción sistemática en la extensión temporal en que se producen los eventos de máxima contaminación. Por otra parte se observan importantes variaciones en los niveles de PM10 a lo largo del día, que obligan a revisar la efectividad de considerar los promedios diarios con fines preventivos y de mitigación, considerando la gran amplitud observada entre los valores máximos y mínimos de material particulado. Es por esto que se hace patente la necesidad de establecer promedios acotados a períodos de tiempo específicos, tal como se hace con el Monóxido de Carbono.

La distribución espacial de las temperaturas del aire en la ciudad de Santiago se relaciona en forma directa con la distribución de la contaminación por Material Particulado en los días de máxima contaminación, de tal forma que los lugares que registran las temperaturas más elevadas concentran a su vez los mayores niveles de contaminación. De esta manera, se registra una clara diferenciación entre el sector oriente de la ciudad, el cual presenta siempre los más bajos niveles de contaminación y menores temperaturas, y el sector poniente, donde se presentan los mayores niveles de contaminación y las mayores temperaturas. Las diferencias de temperaturas entre estos dos sectores de la ciudad se deben entender como indicadores de las diferencias socioeconómicas de sus residentes, manifestadas en las densidades de ocupación de los suelos urbanos, presencia de áreas verdes, materiales y diseños de las construcciones.

Las diferencias térmicas se asocian con la distribución espacial de la contaminación, debido a que el sistema de brisas prevaleciente al interior de la ciudad, desplaza el aire desde las áreas más frías a las más cálidas y por ello, traslada el Material Particulado desde el sector oriente a poniente, aún en ausencia de vientos propiamente tales, que es otra de las características del clima de Santiago en las estaciones de otoño e invierno. La injusticia ambiental se constituye en la medida que los sectores sociales más pobres y vulnerables de la ciudad son afectados de forma desproporcionadamente alta por la concentración espacial en sus barrios del Material Particulado, de cuyo origen no son responsables y respecto de las cuáles sufren las consecuencias sobre su salud y calidad de vida. Sin embargo esta situación no se presenta tan clara al apreciar cómo se distribuyen las temperaturas y el Material Particulado en aquellos días en que los niveles de contaminación son normales o bajos, ya que se presenta una mayor heterogeneidad en cómo se distribuyen las variables analizadas, mostrándose casos en que la relación entre estas es indirecta.

La información disponible permite aproximaciones de meso-escala, pero impide observar lo que ocurre en espacios sociales más específicos. Mientras no se disponga de información espacialmente más precisa será difícil argumentar sobre los reales niveles de contaminación que afectan a la población de Santiago. La geografía de la Distribución Espacial de la Contaminación por Material Particulado y su Relación con las Temperaturas Atmosféricas y los Regímenes de Vientos en Santiago, como parte de la geografía ambiental, permanecerá desconocida para la mayoría de la población, la cual incluso puede ser inducida a pensar que las condiciones de la calidad del aire han mejorado como consecuencia de las medidas adoptadas por las autoridades políticas. La finalidad última de no disponer de información, o de intentar asignar la

misma a grandes áreas (con lo cual se elimina su representatividad espacial y desvirtúa su utilidad) o de no facilitar la realización de las mediciones sobre calidad del aire a lo largo de las principales vías de circulación, puede pretender disminuir la importancia del problema ambiental, soslayando el crecimiento de las fuentes, causado por el crecimiento ilimitado de la ciudad y el aumento insostenible de los vehículos privados, causado por las deficiencias del transporte público, y acentuado por la deficiente localización de los lugares de trabajo y de servicios en relación a las viviendas, por la comodificación de los recursos espaciales y ambientales, propias del modelo económico implementado en el país, todo lo cual implica responsabilidades políticas que se intentan mantener ocultas.

Los resultados obtenidos corresponden sólo a una primera aproximación para conocer como se distribuyen las temperaturas y la contaminación y la incidencia de los vientos en su distribución, ya que surge la necesidad de complejizar la representación de estas variables, a través de la integración de otros elementos que puedan generar un resultado más completo, tomando por ejemplo los diferentes usos y coberturas presentes en ella. Otro punto a considerar corresponde a la necesidad de disponer de una mayor cantidad de puntos muestrales para que los resultados tengan una mayor validez, ya que por ejemplo sólo se cuenta con 10 estaciones de monitoreo con respecto a contaminantes atmosféricos para toda la ciudad de Santiago.

BIBLIOGRAFÍA

ARNFIELD. J. A. (2003). Two Decades of Urban Climate Research: A Review of Turbulence, Exchanges of Energy and Water, and the Urban Heat Island. *International Journal of Climatology*. 23: 1 - 26.

AZOCAR G, SANHUEZA R y HENRIQUEZ C, 2003. Cambio en los patrones de crecimiento en una ciudad intermedia: el caso de Chillán en Chile Central. *Estudios Urbano-Regionales EURE (Santiago)*, Vol.29, no.87:79-82.

BELLO, F. (1994). La isla de calor y los usos del suelo en Guadalajara. Serie Geográfica. 1994. Volumen 4. Págs. 83-97. Universidad de Alcalá.

BUZELLI, M. (2008). A Political Ecology of Scale in Urban Air Pollution Monitoring. *Trans Inst Br Geogr*. NS 33, 502–517, 2008. Journal compilation. Royal Geographical Society (with The Institute of British Geographers).

CENTRO MARIO MOLINA (2007). Evaluación y Propuesta de Rediseño para la Red de Monitoreo Automático de Calidad del Aire de la Región Metropolitana Red MACAM-2. Resumen Ejecutivo. Págs.19. Santiago.

CICCOLELLA, P. (1999). "Globalización y Dualización en la Región Metropolitana de Buenos Aires. Grandes Inversiones y Reestructuración Socioterritorial en los Años Noventa", *Revista Eure*, 25, 76: 5-27.

CORREA E.N. y FLORES L.S., L G. (2003). Isla de calor urbana: efecto de los pavimentos. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. UNINCO-UNSCONICET. Salta.

CRUTZEN. P. (2004). New Directions: The Growing Urban Heat and Pollution "Island" Effect – Impact on Chemistry and Climate. *Atmospheric Environment*. 38: 3539 – 3540.

CUADRAT. J.M., RIVA J., LÓPEZ F. y MARTÍ A. (1993). El medio ambiente urbano en Zaragoza. Observaciones sobre la isla de calor. *Anales de Geografía de La Universidad Complutense*. N°13, 127-138. Ed. Comp., Madrid.

CUADRAT, J., SERRANO, S. y SÁNCHEZ, M. (2005). Los efectos de la urbanización en el clima de Zaragoza (España): La isla de calor y sus efectos condicionantes. *Boletín de la A.G.E.* Vol. 4. N°40, 311-327. Madrid .

DAWSON, J., RACHERLA, P., LYNN, B., ADAMS, P., and NANDIS, S. (2009). Impacts of climate change on regional and urban air in the quality in the Eastern United States: Role of Meteorology. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 114:pp?.

EPA, (2006). Agencia de Protección del Medio Ambiente, Estados Unidos. Desarrollo inteligente e islas de calor urbano. www.epa.gov/heatisls/resources/pdf/SmarthqwrwthSpanish.pdf. EPA-909-F-04-010. California.

ESCOBEDO, F., NOWAK, D., WAGNER, J., DE LA MAZA, C., RODRIGUEZ, M., CRANE, D. & HERNÁNDEZ, J. (2006). The Socioeconomics and Management of Santiago de Chile's Public Urban Forests. *Urban Forestry & Urban Greening* 4: 105-114.

FERNANDEZ F. (1995). Manual de climatología aplicada: Clima, medio ambiente y planificación. Madrid, Síntesis.páginas?

FERNÁNDEZ. F, MONTAVÉZ. J, GONZÁLEZ-ROUCO y J, VALERO. F. (2004). Relación entre la estructura de la isla térmica y la morfología urbana de Madrid. Asociación Española de Climatología y Universidad de Cantabria. Serie A, N°4, Págs. 641-650.

GILBERT, N., GOLDBERG, M., BECKERMAN, B., BROOK, J.R, and JERRET, M. (2006). Assessing Spatial Variability of Ambient Nitrogen Dioxide in Montreal Canada with a Land Use Regression. Journal of the Air and Waste Management Association 55. 1059-63.

GOOVAERTS, P. (1997). Geostatistics for Natural Resources Evaluation, Oxford Univ. Press, New York. Págs 185-251.

HENRIQUEZ, C., AZÓCAR, G. y AGUAYO, M. (2006). Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile. Revista de Geografía Norte Grande, N° 36. pp. 61-74.

HIDALGO, R., BORSDORF, A. y SANCHEZ, R. (2007). La expansión residencial amurallada en la reconfiguración metropolitana en Santiago de Chile. Taller Nacional sobre "Migración interna y desarrollo en Chile: diagnóstico, perspectivas y políticas", Santiago, Chile 10 de Abril 2007.páginas o CD?

JORQUERA, H.and CASTRO, J., (2010). Analysis of urban pollution episodes by inverse modeling. Atmospheric Environment 44, 42 e 54.

JORQUERA H., ORREGO G., CASTRO J. & VESOVIC V. (2004).Trends in Air Quality and Population Exposure in Santiago, Chile 1989-2001. International Journal of Environment and Pollution, Vol 22, N 4, 507-530.

KIM, J., SMORODINSKY S., LIPSETT, M., SINGER, B., HODGSON, A. and OSTRO, B. (2004). Traffic Related Air Pollution near busy roads: The East Bay Children's Respiratory Health Study. 45 pages.

LAMPTEY, B., (2009). An Analytical Framework for Estimating the Urban Effects on Climate. International Journal of Climatology, Vol.30, Issue 1. 72-88. Colorado.

LINDBERG, F., ELIASSON, I. & HOLMER, B. (2003). Urban Geometry and Temperature Variations. Proc. 5th Int Conf Urban Climate. Vol. 1: 205-208.

MANLEY., G. (1958). On the frequency of snowfall in metropolitan England. Quarterly of Journal of the Royal Meteorological Society. 84: 70-72.

MENDOZA M., BOCCO G., GRANADOS E. y BRAVO M. (2002). Implicaciones hidrológicas del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: una propuesta de análisis espacial a nivel regional en la cuenca cerrada del lago de Cuitzeo, Michoacán, México. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. Núm. 49. 92-117.

MOLINA M. (2007). Efectos de los tipos de urbanización asociados al crecimiento urbano del área Metropolitana del Gran Santiago sobre el comportamiento y

generación de micro islas de calor. Memoria para optar al título profesional de Geógrafo. Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Santiago.

MORAL, F. J. (2003). La Representación Gráfica de las Variables Regionalizadas. Geoestadística Lineal. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Extremadura, Cáceres.

MORALES, R G E. (2006) Contaminación Atmosférica Urbana. Episodios críticos de contaminación ambiental en la ciudad de Santiago. Editorial Universitaria, SA, Santiago de Chile.

OKE, T, (1987). Boundary layer climates (2nd ed). University Press. Cambridge. 435p.

OKE T., (1998). The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates, International Journal of Remote Sensing, Vol. 19, N°. 11, 2085 - 2104

OSTRO, B., SÁNCHEZ J.M., ARANDA, C. and ESKELAND, G. (1995). Air pollution and mortality: Results from Santiago, Chile. The World Bank, Policy Research Department, Public Economic División.

OSTRO, B., (1998). Como estimar los efectos de la contaminación atmosférica de la salud. Revista Estudios Públicos. N°69. Págs. 125-154, Verano. Santiago.

PAULEIT S., ENNOS, & GOLDING. (2005). Modeling the Environmental Impacts of Urban Land Use and Land Cover Change: a Study in Merseyside, UK. Elsevier, Landscape and Urban Planning N° 71, 295- 310.

PEÑA, M. y ROMERO, H. (2005). Relación espacial y estadística entre las islas de calor de superficie, coberturas vegetales, reflectividad y contenido de humedad del suelo, en la ciudad de Santiago y su entorno rural. Anales de la Sociedad Chilena de Ciencias Geográficas, 2005, 107-118.

PÉREZ, M., GARCÍA, M. y GUERRA, A. (2003). Análisis del clima urbano a partir de imágenes satelitales en el centro peninsular español. Anales de Geografía de La Universidad Complutense. Págs. 187-206.

PLATT, R. (2006). Urban Watershed Management One Stream at Time. *Environment* Vol.48, N° 4: 26-42.

RASO J.M. (2000). Salud, clima y cambio climático. Asociación de geógrafos españoles. Clima y calidad ambiental. Universidad de Santiago de Compostela. España. Capítulo 4. Págs. 201-249.

ROMERO, H., TOLEDO, X., ORDENES, F., VASQUEZ, A. (2001). Ecología urbana y gestión ambiental sustentable de las ciudades intermedias chilenas. Ambiente y Desarrollo, Diciembre 2001, vol. XVII, N° 44, p. 45 51.

ROMERO, H. y VASQUEZ, A. (2005). Evaluación ambiental del proceso de urbanización de las cuencas del piedemonte andino de Santiago de Chile. Revista EURE (Santiago), vol.31, no.94, pp. 97-117. ISSN 0250-7161.

ROMERO H. y SARRICOLEA P. (2006). Patrones y factores de crecimiento espacial de la ciudad de Santiago de Chile y sus efectos en la generación de islas de calor

urbanas de superficie. *Clima, Sociedad y Medio Ambiente: V Congreso de la Asociación Española de Climatología*, Sept. 18 – 21, Zaragoza, España.

ROMERO, H y MOLINA, M. (2007). Relación espacial entre tipos de usos y coberturas de suelos e islas de calor en Santiago de Chile. *Anales de la Sociedad Chilena de Ciencias Geográficas*: 223-230. Santiago.

ROMERO, H., MOLINA, M., MOSCOSO, C., SARRICOLEA, P., SMITH, P. y VASQUEZ, A. (2007). Caracterización de los cambios de usos y coberturas de suelos causados por la expansión urbana de Santiago, análisis estadístico de sus factores explicativos e inferencias ambientales. En DE MATTOS C., HIDALGO R. (Editores), *Santiago de Chile, Movilidad Espacial y Reconfiguración Metropolitana*. pp. 251-270.

ROMERO, H. y FUENTES, C. (2007). Análisis de los Cambios de Usos-Coberturas de Suelo y la Escorrentía en tres Cuencas del Piedemonte de Santiago, entre 1975-2007. Presentación al Coloquio Internacional Construyendo Resiliencia de los Territorios. Instituto de Geografía, Universidad Católica de Valparaíso, 17-19 de octubre de 2007.

ROMERO, H. y LÓPEZ, C. (2007). Variaciones de la funcionalidad ambiental del mosaico de paisaje vegetal del Gran Santiago entre 1975 y 2007. Presentación al Coloquio Internacional Construyendo Resiliencia de los Territorios. Instituto de Geografía, Universidad Católica de Valparaíso, 17-19 de octubre de 2007.

ROMERO, H., MOLINA, M., MOSCOSO, C., SARRICOLEA, P. y VÁSQUEZ, A. (2008). Cambio Climático y Sustentabilidad Urbana de las Metrópolis Chilena. II Coloquio Chile Metropolitano, Universidad del Bío-Bío, Concepción, 20 - 21 Noviembre 2008.

ROMERO, H., IRARRAZAVAL, F., OPAZO, D., SALGADO, M., SMITH, P. (2010). Climas urbanos y contaminación atmosférica en Santiago de Chile [versión electrónica]. *Eure*, 36 (109), 35-62.

RUIZ M., (2005). Evaluación de la situación ambiental de la ciudad de San Juan. República Argentina: Consecuencias del crecimiento urbano sobre los componentes ambientales. Tesis para optar al grado de Magíster en Geografía. Santiago de Chile.

SAIDE, P., OSSES, A., GALLARDO, L., OSSES, M., (2009). Adjoint inverse modeling of a CO emission inventory at the city scale: Santiago de Chile's case. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions* 9, 6325e6361. www.atmos-chem-physdiscuss.net/9/6325/2009/.

SAIDE, P., CARMICHAEL, G., SPAK, S., GALLARDO, L., OSSES, A., CARRASCO, M., PAGOWSKI, M. (2011). Forecasting Urban PM10 and PM2,5 Pollution Episodes in very Stable Nocturnal Conditions and Complex Terrain using WRF-Chem CO Tracer Model. *Atmospheric Environment* 45: 2769-2780.

SARRICOLEA, P. y ROMERO, H. (2006). Cambios de usos y coberturas del suelo entre 1998 y 2004 y sus efectos sobre la configuración de la isla de calor urbana de superficie de Santiago. *Anales de la Sociedad Chilena de Ciencias Geográficas*, 2006, p. 207-210.

SOLECKI, W. ROSENZWEIG, C. POPE, G. PARSHALL, L. and WIENCKE, M. (2002). The Current and Future Urban Heat Island Effect and Potential Mitigation Strategies in

the Greater Newark, New Jersey Region. New Jersey. Department of Earth and Environmental Studies. Montclair State University. 51 p.

SMITH, P. (2007). Evolución Espacial y Temporal de la Calidad Ambiental del Paisaje de los Humedales de Concepción entre 1975 y 2004: Efectos Ambientales provocados por la Urbanización. Memoria para optar al título de Geógrafo, 24 de Septiembre de 2007.

SANDOVAL, G. (2009). Análisis del Proceso de Cambio de Uso y Cobertura del Suelo en la Expansión Urbana del Gran Valparaíso, su Evolución y Cambios futuros. Memoria para optar al título de Geógrafo, Diciembre, 2009. Santiago de Chile.

SUDHIRA, H.S., RAMACHADRA, T.V. and JAGADISH, K.S., (2004). Urban sprawl: Metrics, Dynamics and Modelling Using GIS. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 5: 29-39.

TABLADA, A., De TROYER, F., BLOCKEN, B., CARMELIET, J. & VERSCHURE, H. (2009). On Natural Ventilation and Thermal Comfort in Compact Urban Environments – the Old Havana Case. Building and Environment 44: 1943-1958.

VALOR E., CASELLES V., COLL C., SÁNCHEZ E., RUBIO E., SOSPEDRA F., (2000). Análisis comparativo del efecto de isla térmica de la ciudad de Valencia con imágenes TM, MUST y AVHRR. [Revista de teledetección: Revista de la Asociación Española de Teledetección](#), ISSN 1133-0953, N° 15

VÁSQUEZ, A. y ROMERO, H. (2007). El libremercado de las áreas urbanas y la falta de justicia ambiental en la disponibilidad de áreas verdes en Santiago de Chile, 2007, Scripta Nova, Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales, Universidad de Barcelona.

VILLATORO M., HENRÍQUEZ C., SANCHO F. (2008). Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de PH, CA, CICE, y P del suelo. Agronomía Costarricense. 32(1): 95-105. Costa Rica.

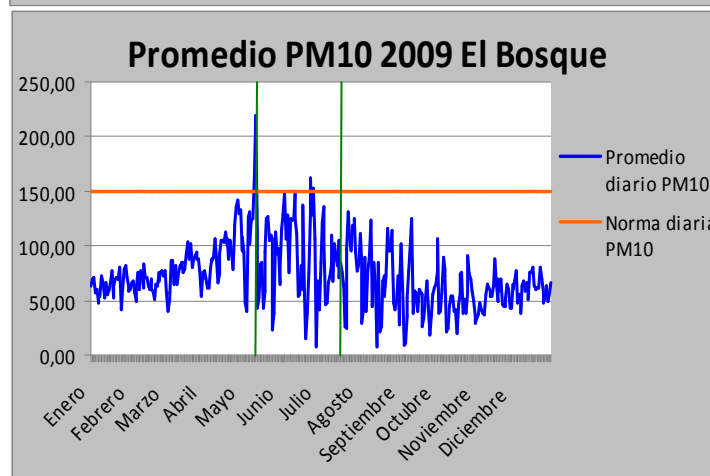
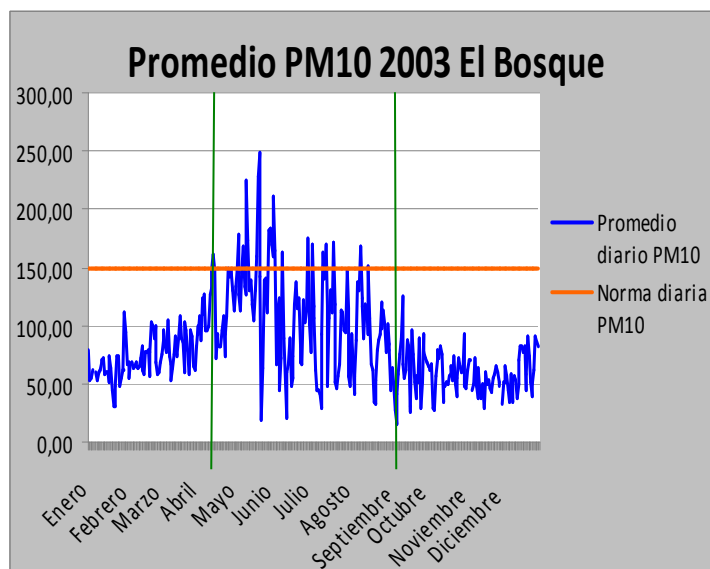
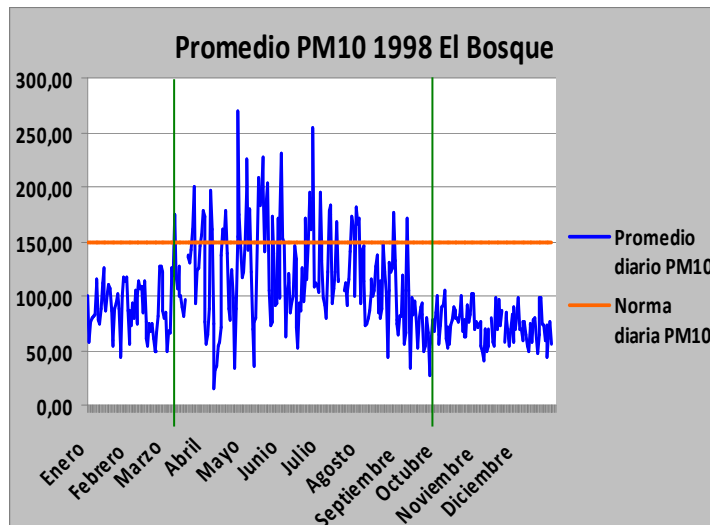
WENG, Q. y YANG, S. (2006). Urban air pollution patterns, land use, and thermal landscape. Environmental Monitoring and Assessment. Springer, Vol. 117: 463-489. Guangdong.

WITHFORD W., ENNOS A., HANDLEY J., (2001). City form and natural process: Indicators for the ecological performance of urban areas and their application to Merseyside, UK. Elsevier, Landscape and Urban Planning N° 57 pág. 91-103.

ANEXOS

Anexo N° 1:

Gráficos resúmenes variación mensual PM10 por estación

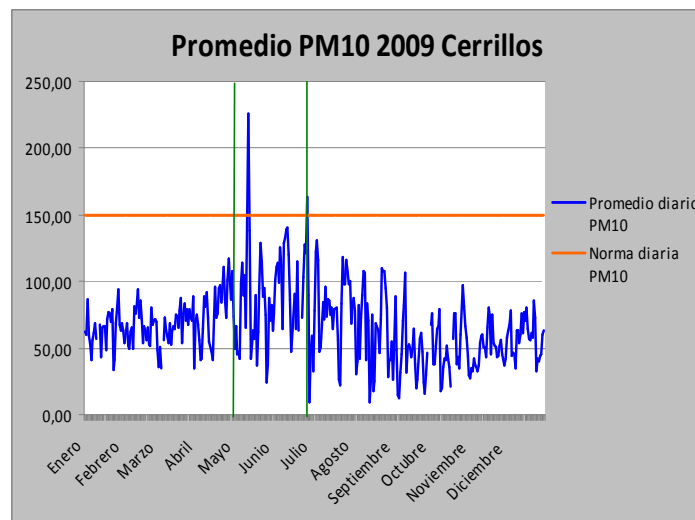
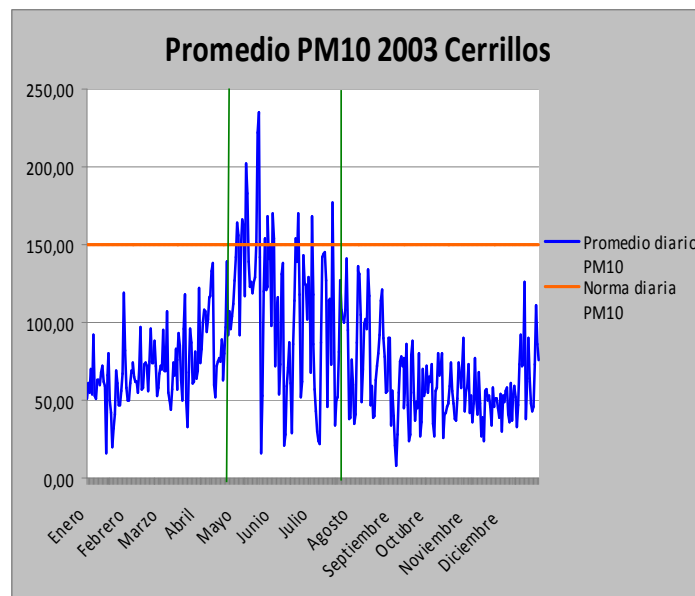
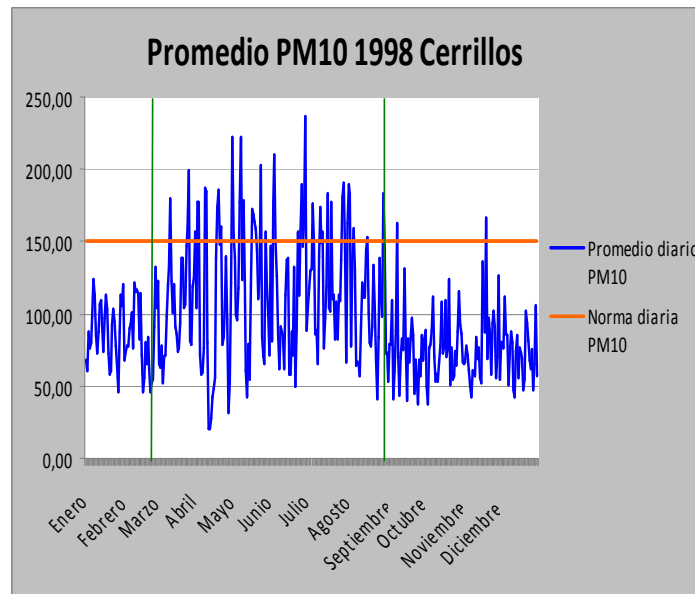


Gráficos

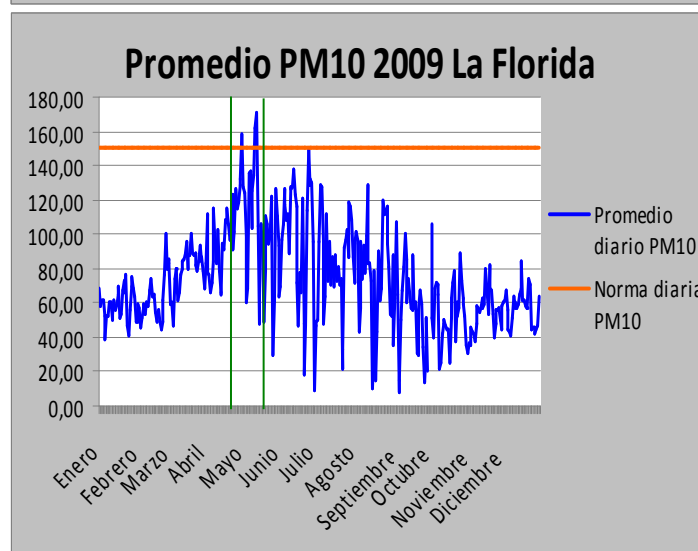
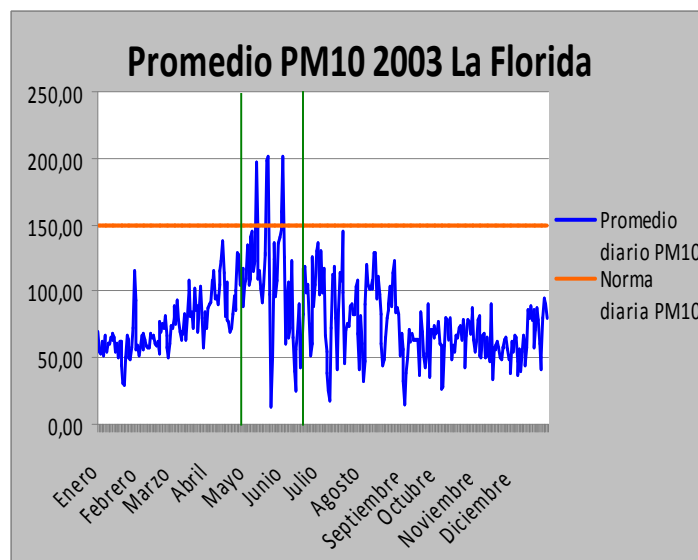
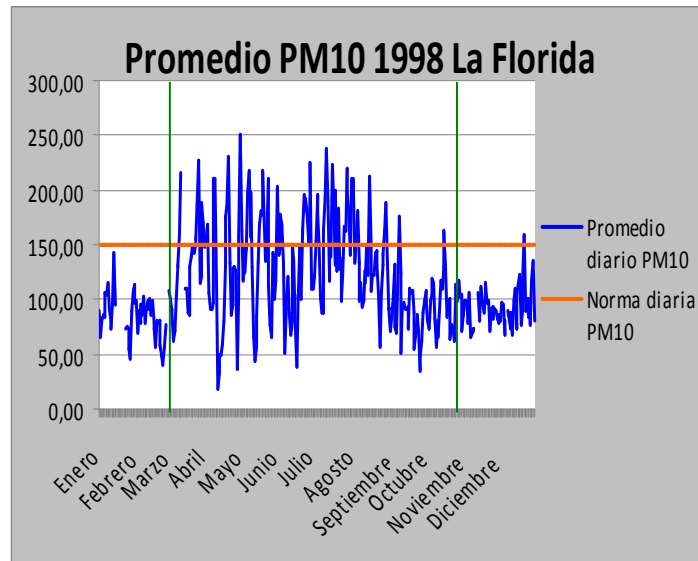
variación mensual El Bosque.
Fuente: Elaboración Propia

resúmenes

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009

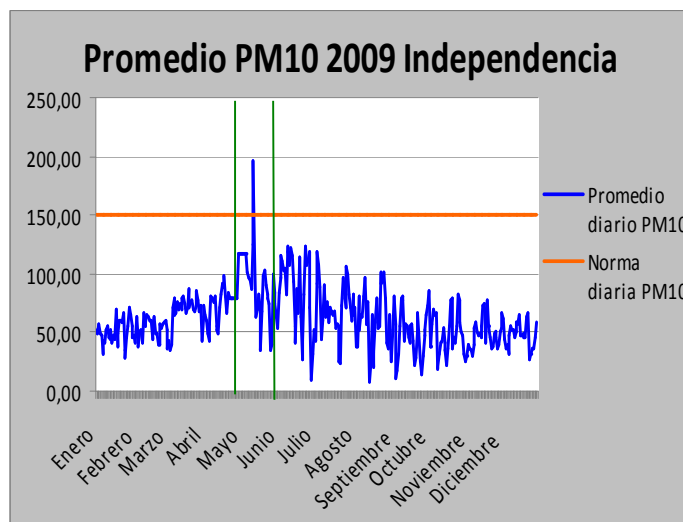
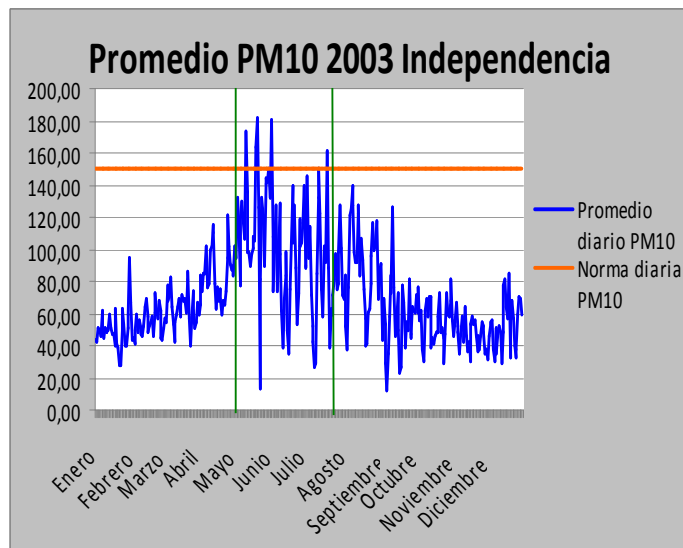
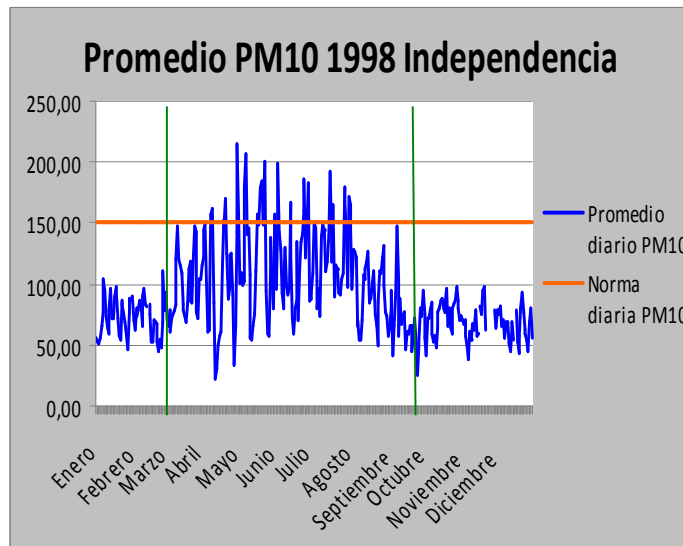


Gráficos resúmenes variación mensual Cerrillos.
Fuente: Elaboración Propia



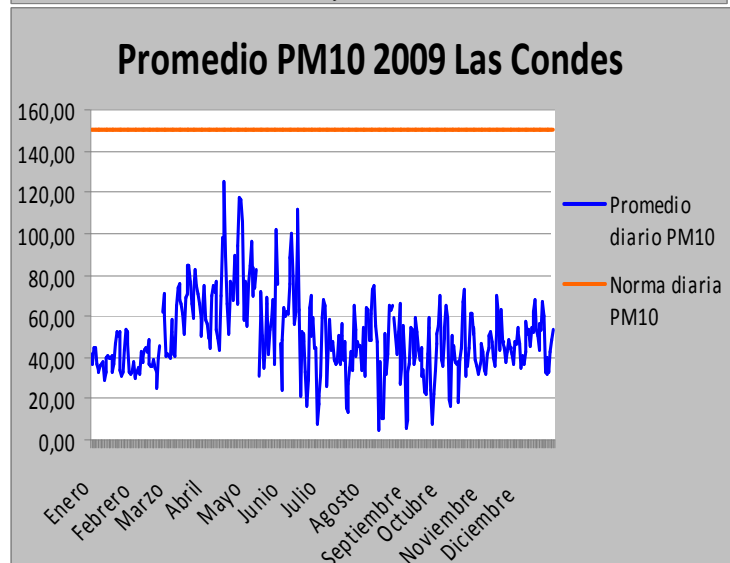
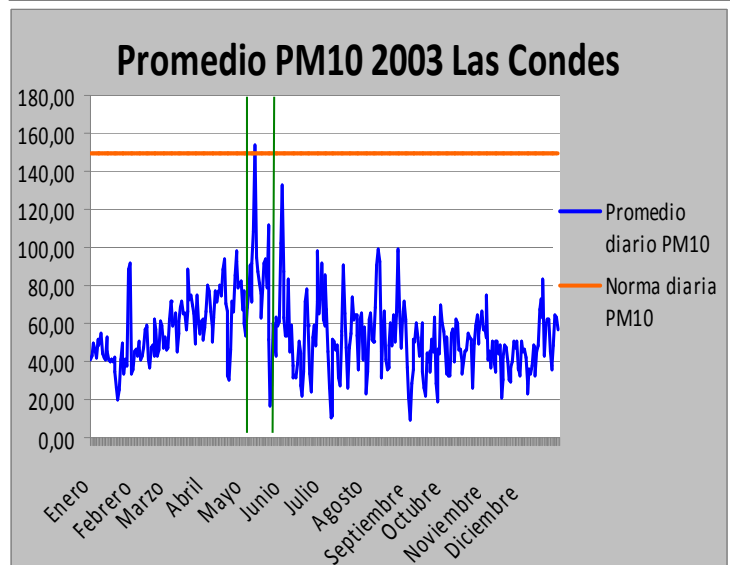
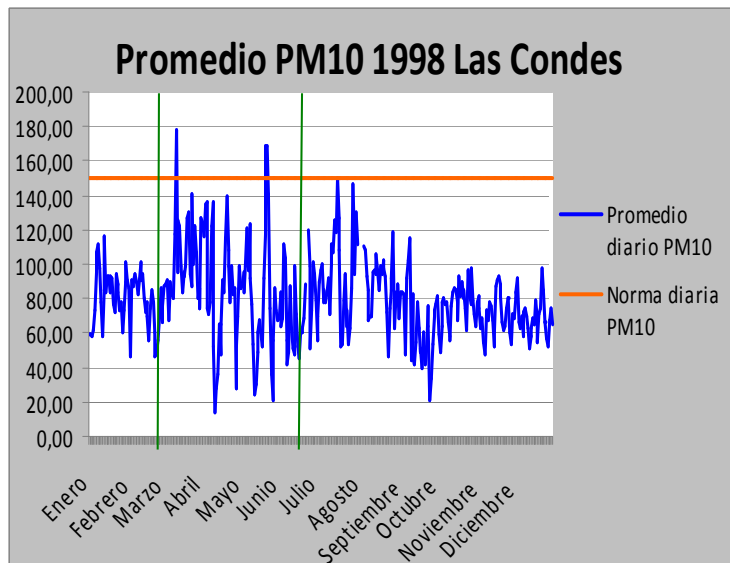
Gráficos resúmenes variación mensual La Florida.
Fuente: Elaboración Propia

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE Y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009

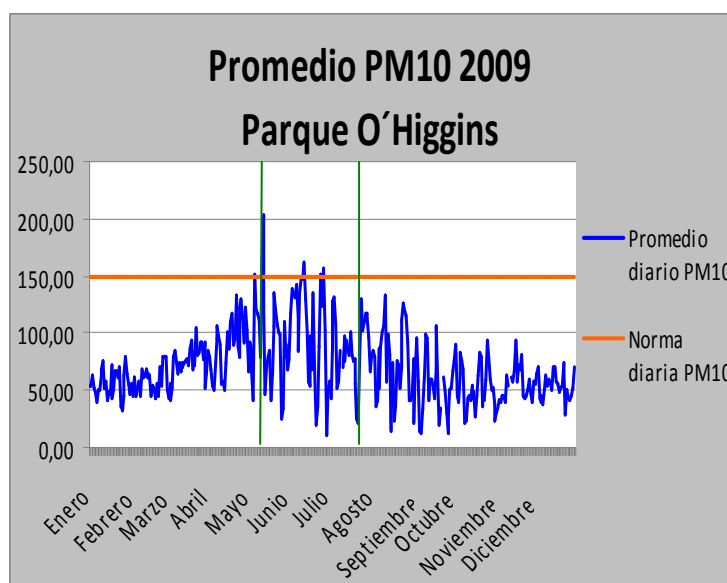
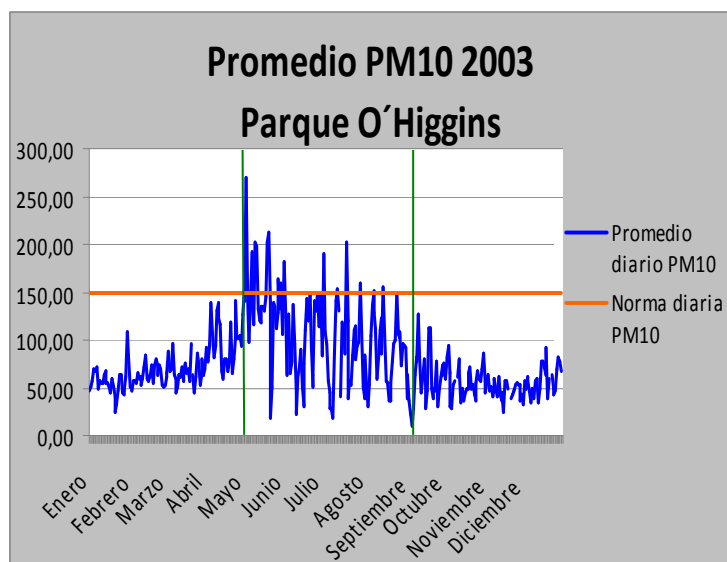
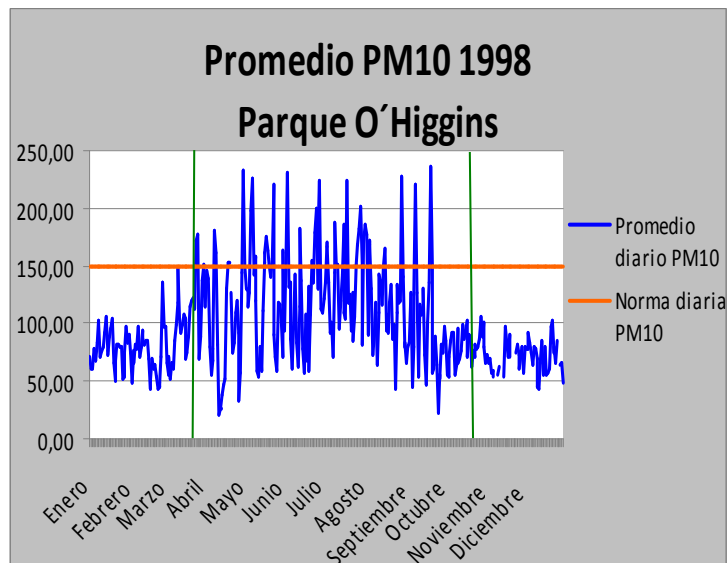


Gráficos resúmenes variación mensual Independencia.
Fuente: Elaboración Propia

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009

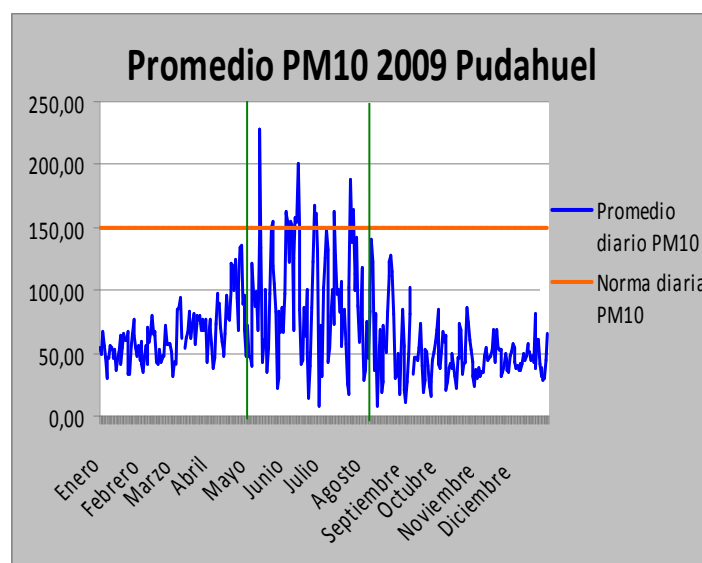
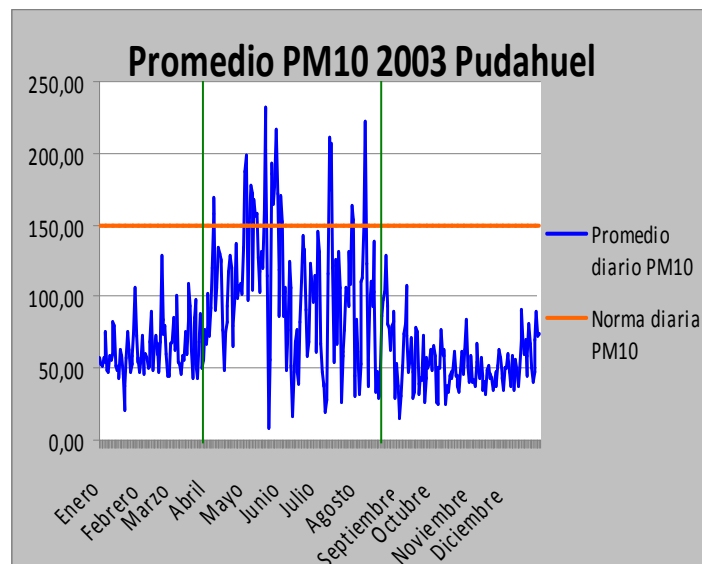
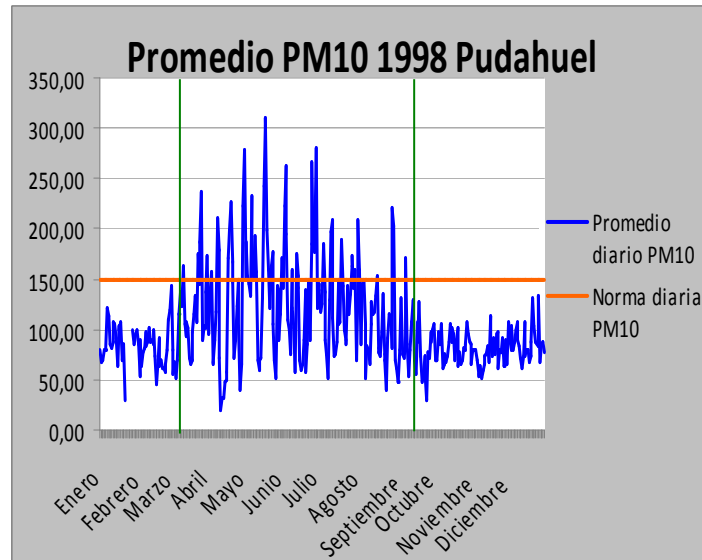


Gráficos resúmenes variación mensual Las Condes
Fuente: Elaboración Propia

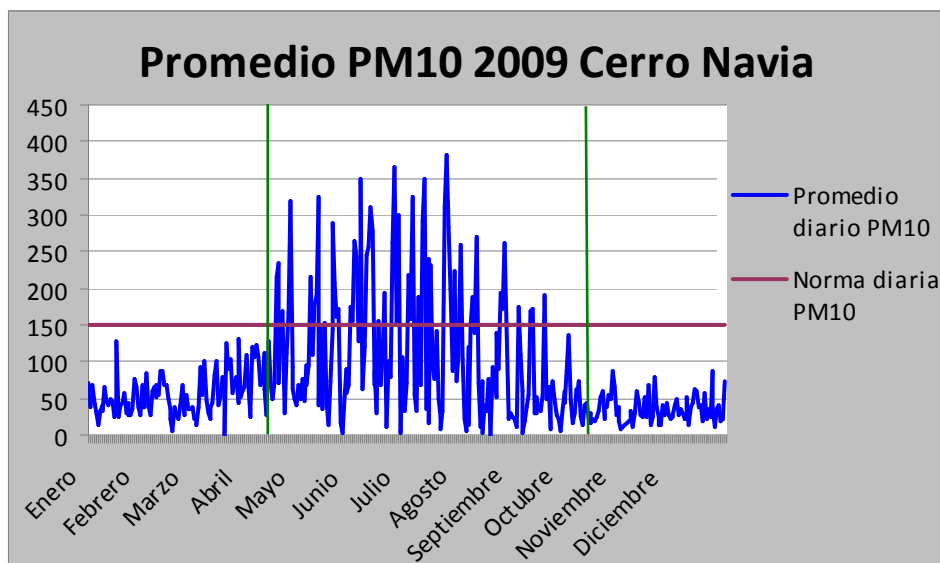
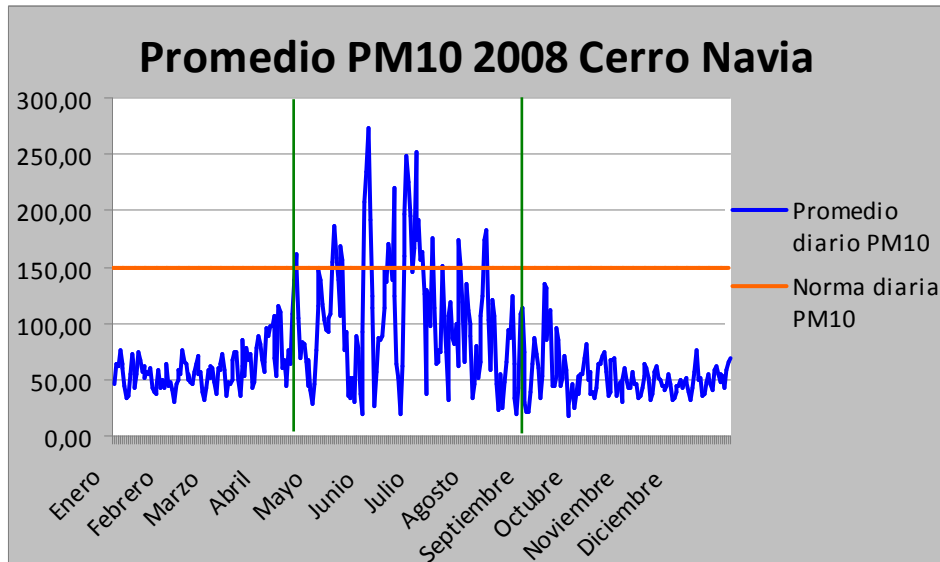


Gráficos resúmenes variación mensual Parque O'Higgins
Fuente: Elaboración Propia

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009



Gráficos resúmenes variación mensual Pudahuel
Fuente: Elaboración Propia

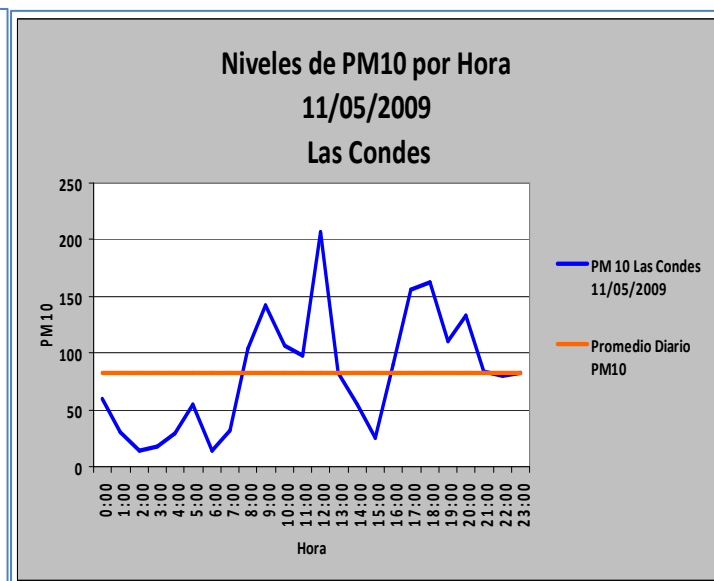
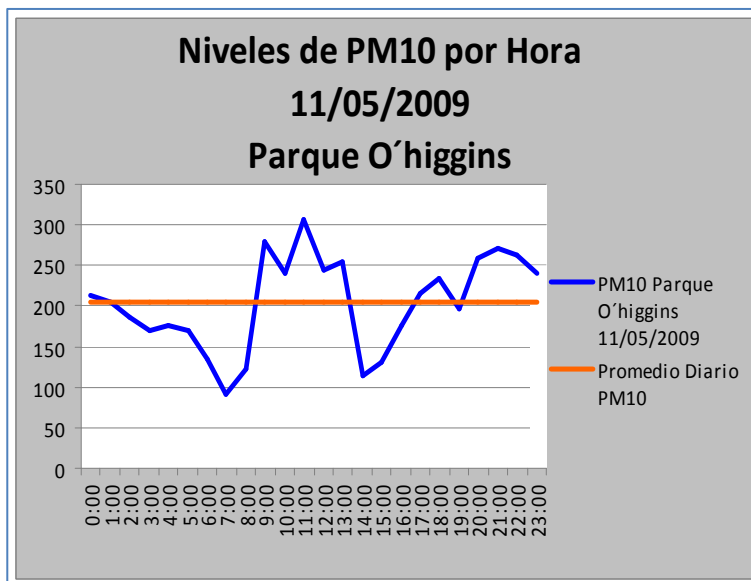
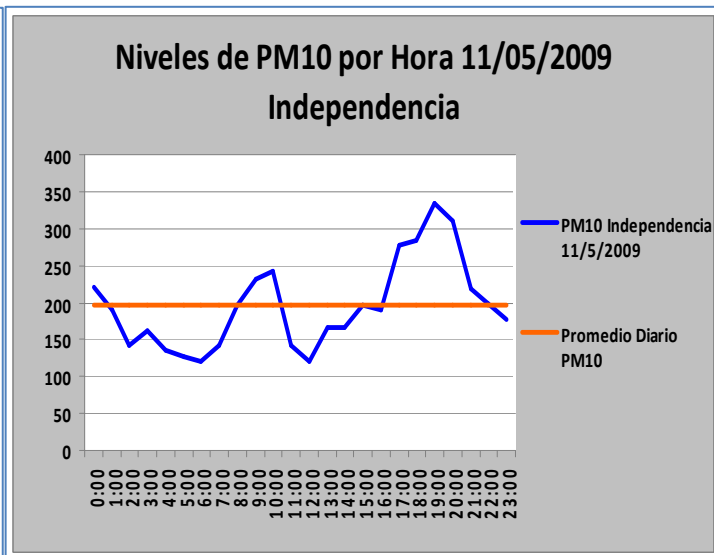
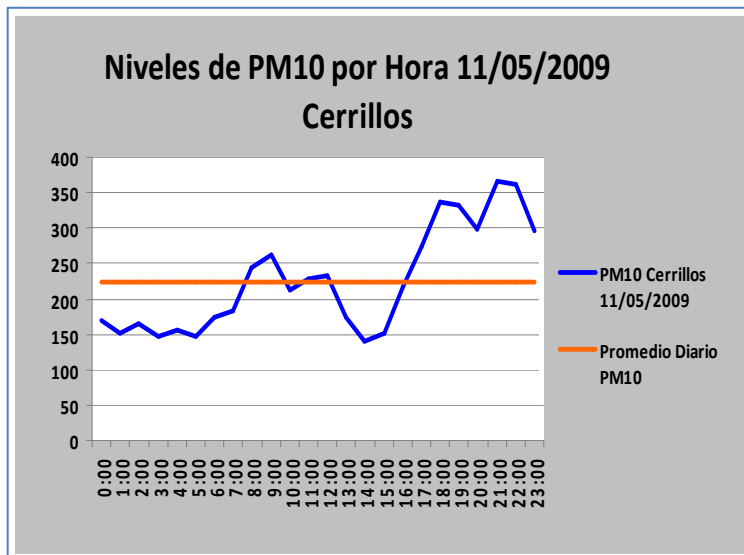


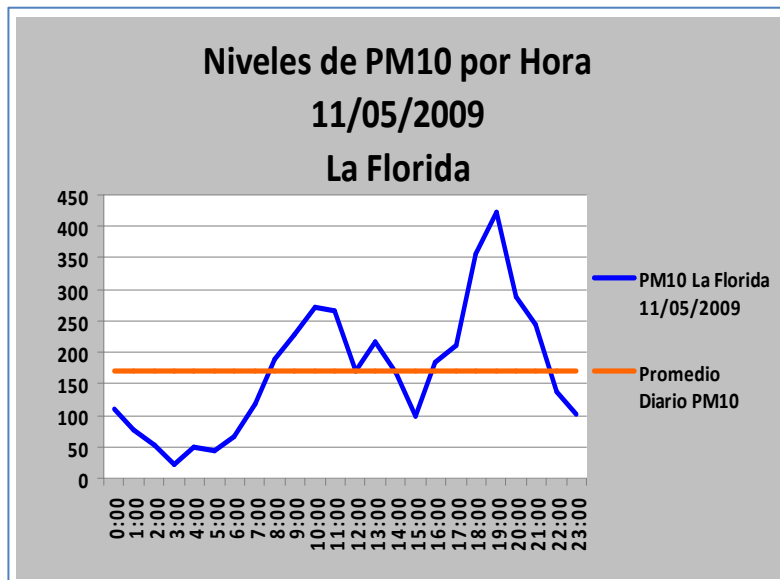
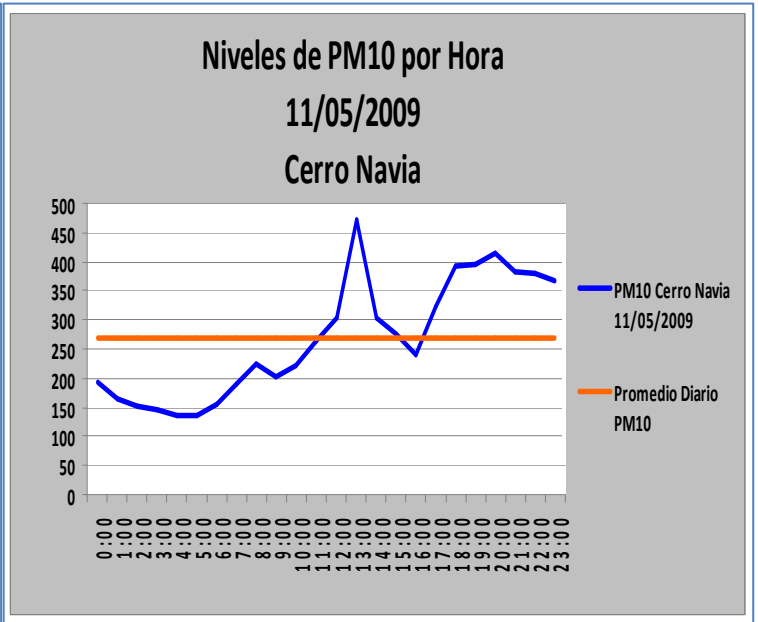
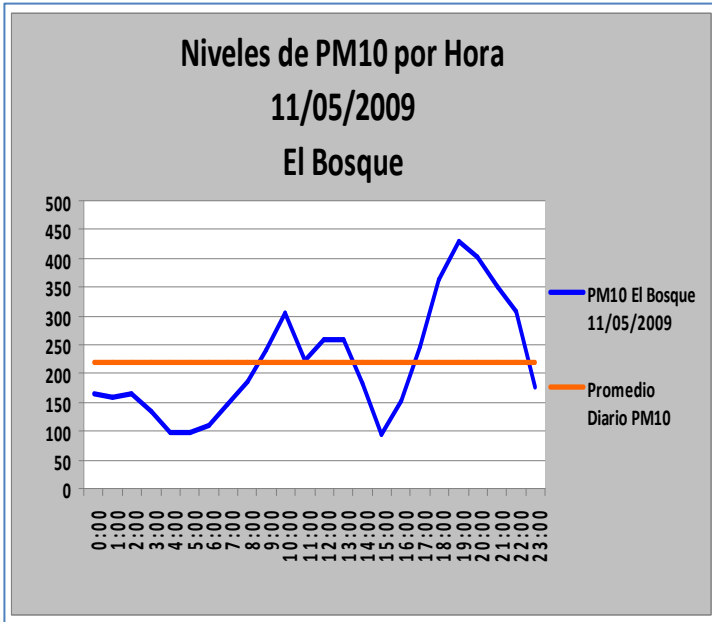
Gráficos resúmenes variación mensual Cerro Navia
Fuente: Elaboración Propia

Anexo N° 2

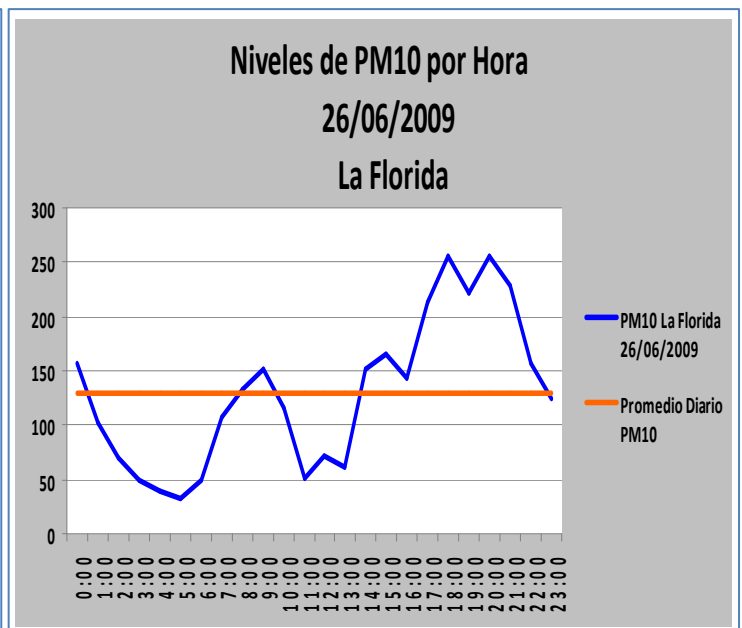
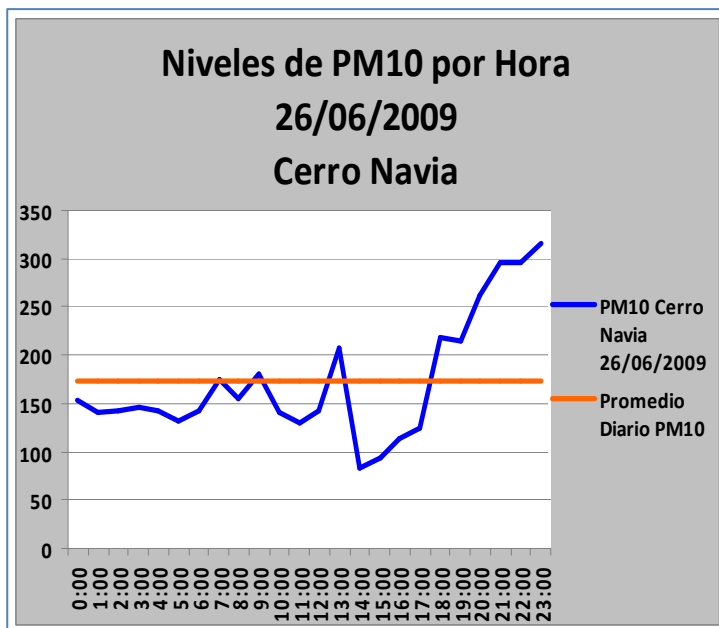
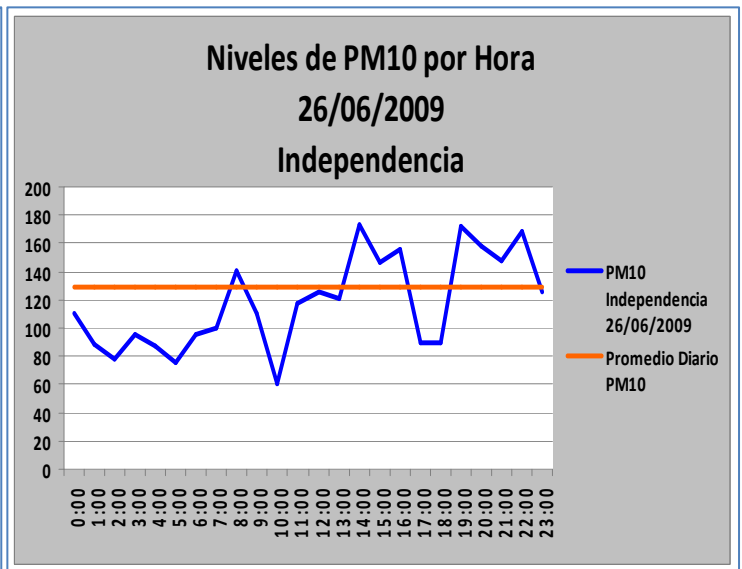
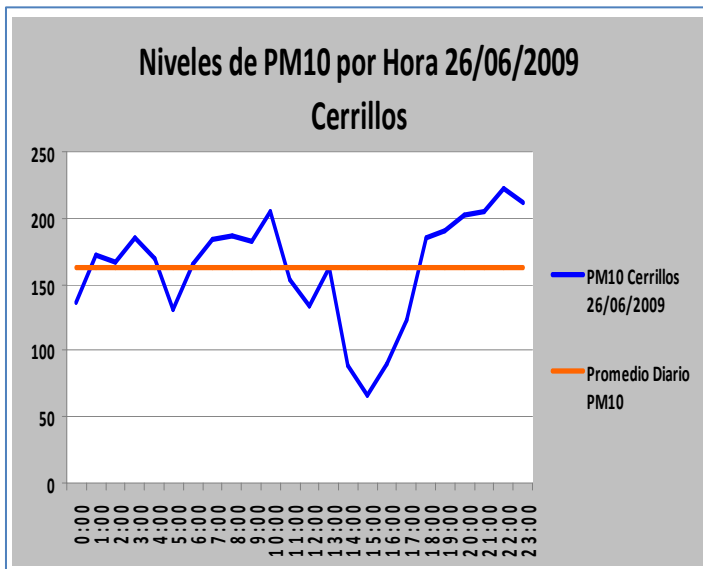
Gráficos resúmenes variación Diaria PM10 por estación

Caso N° 1: 11/05/2009

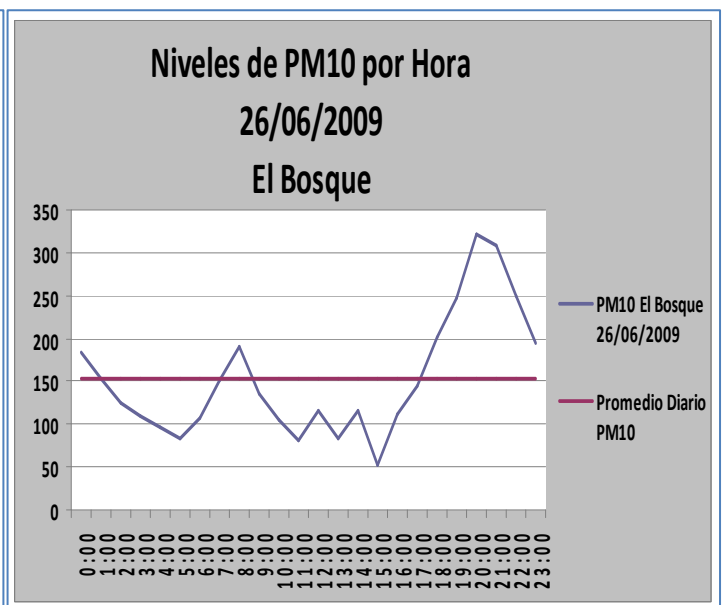
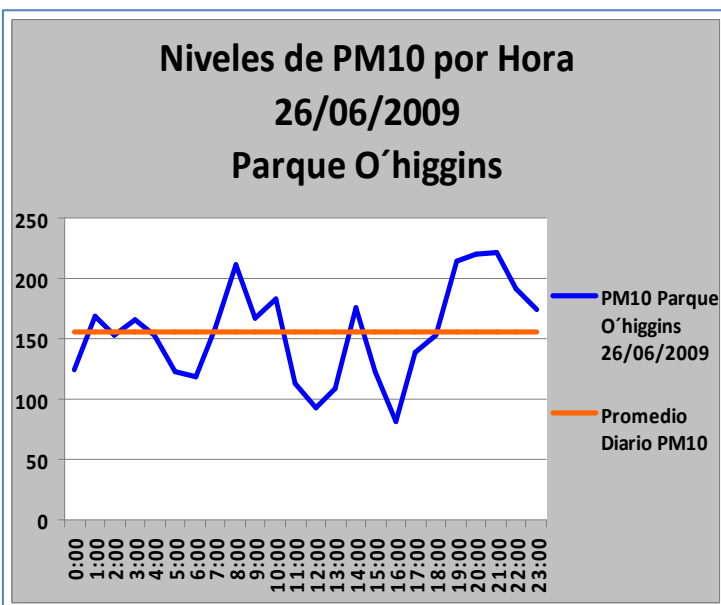
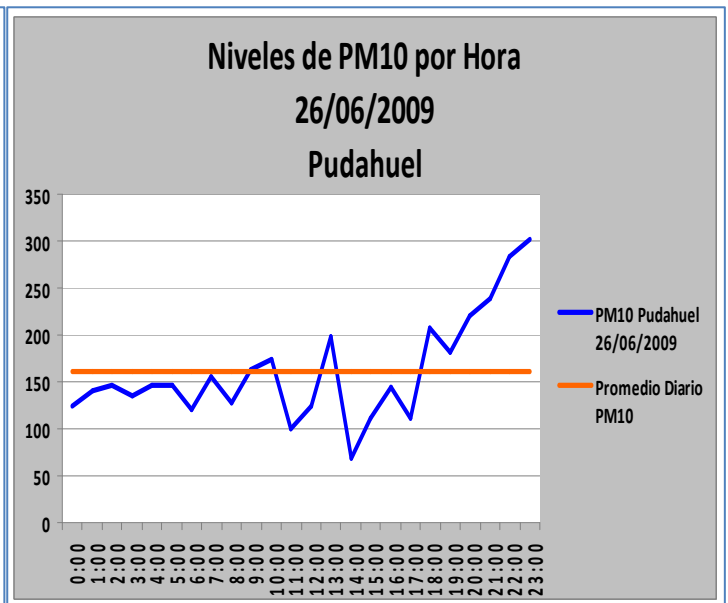
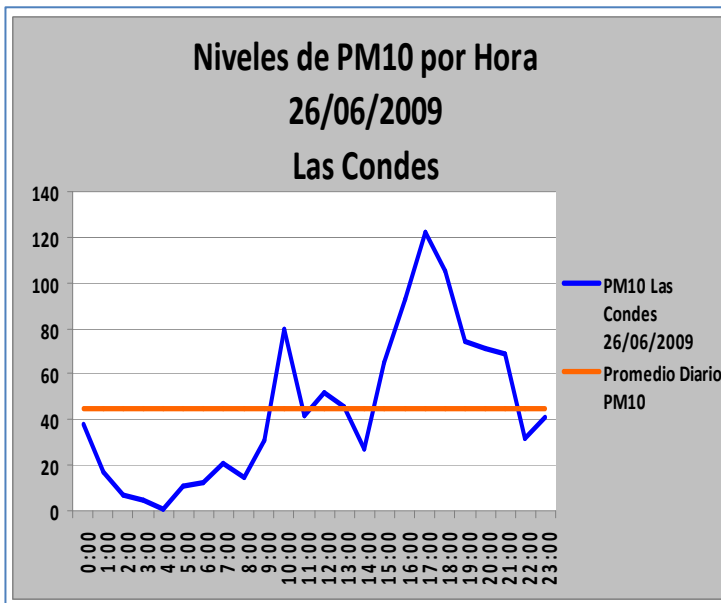




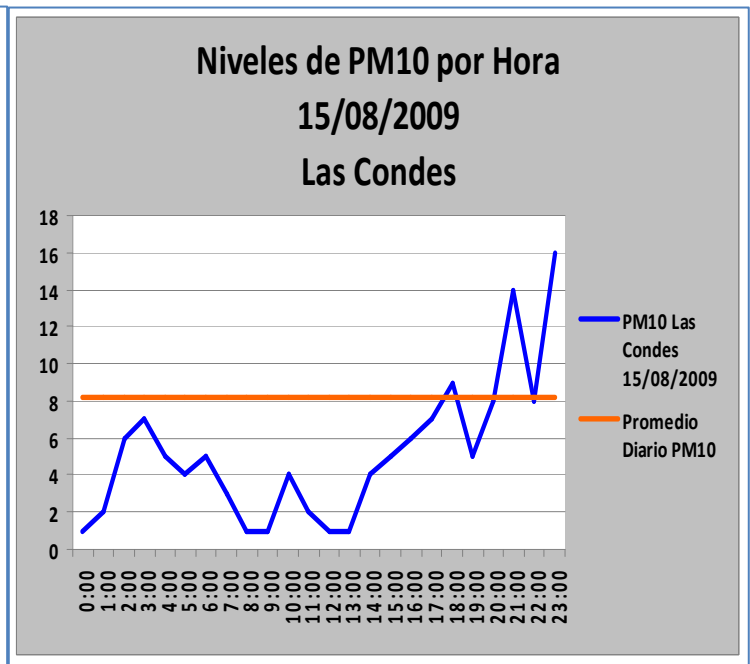
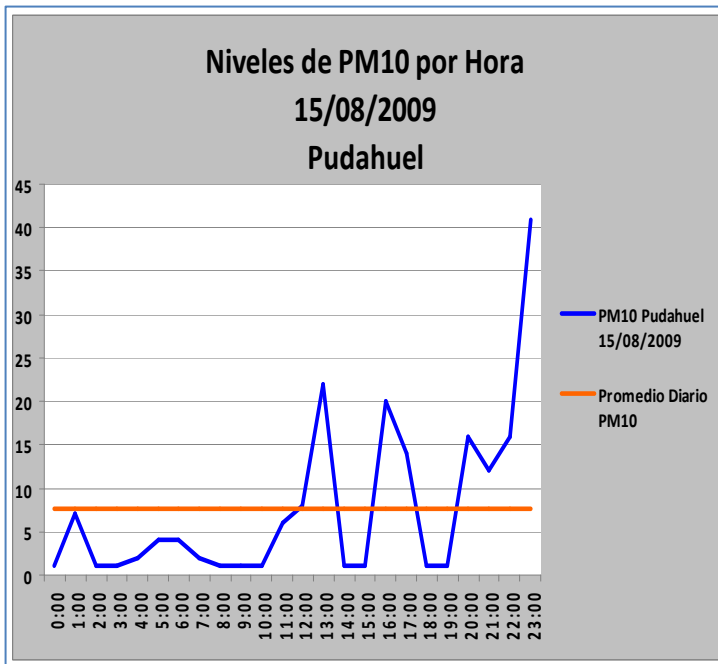
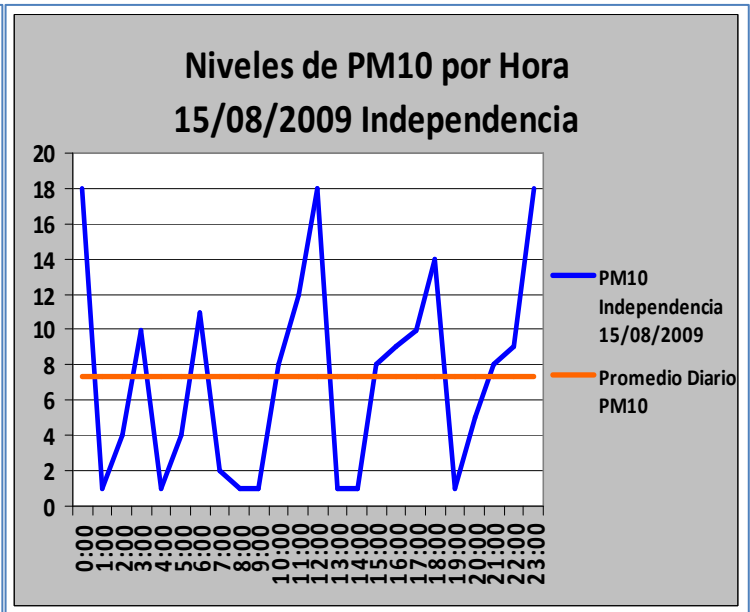
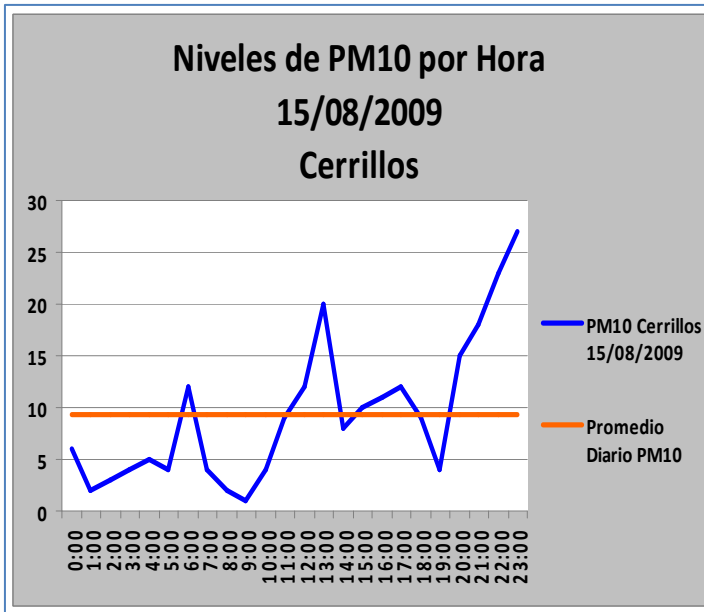
Caso N° 2: 26/06/2009



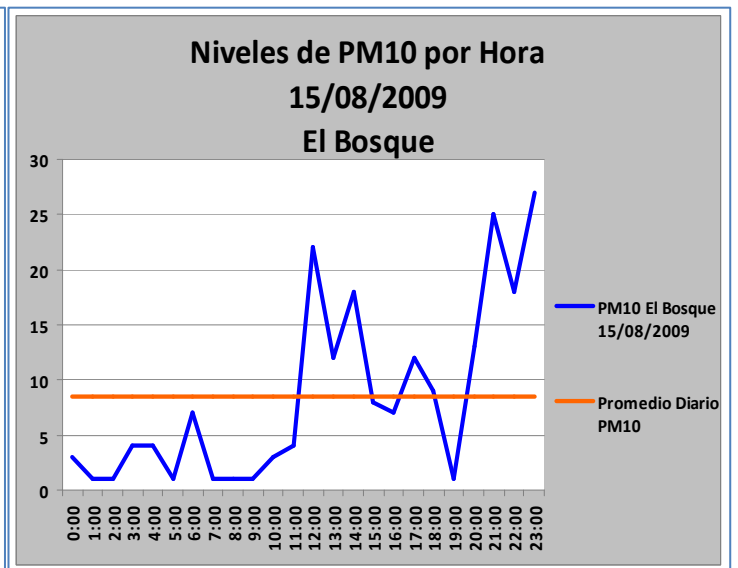
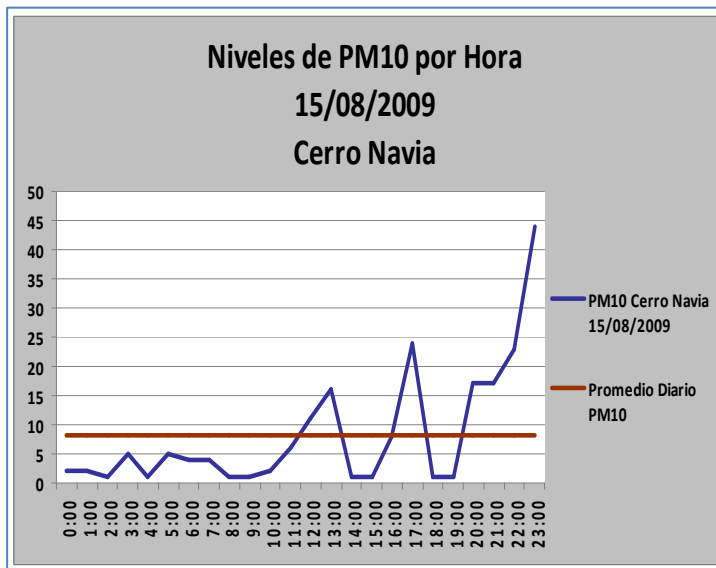
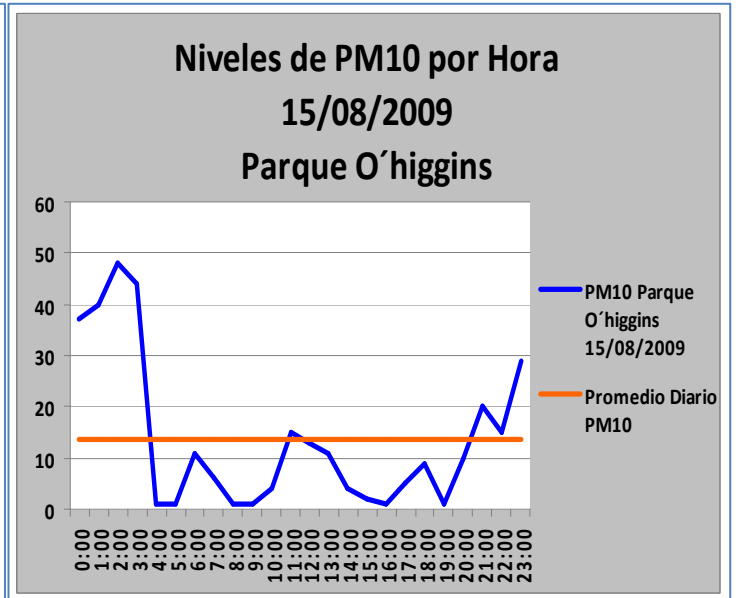
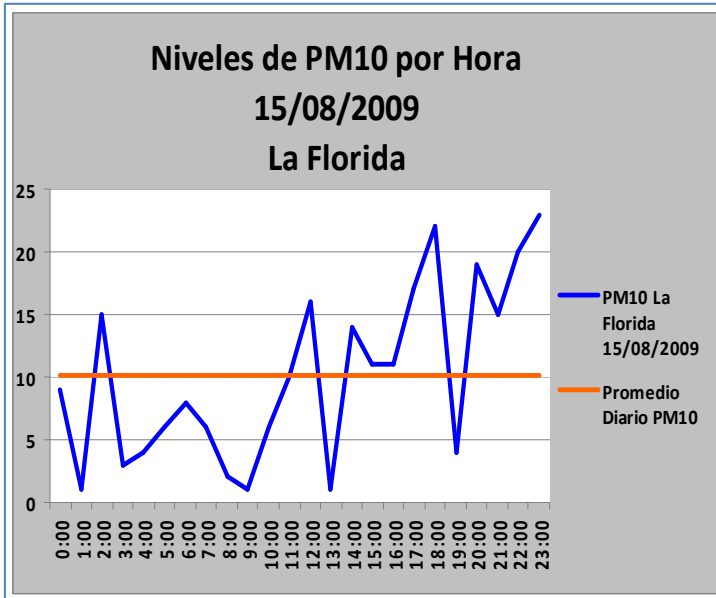
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009



Caso N° 3: 15/08/2009



DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LAS TEMPERATURAS DEL AIRE y LOS VIENTOS EN SANTIAGO PARA EL AÑO 2009



Caso N° 4: 10/10/2009

