



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA

MAGÍSTER EN GESTIÓN Y PLANIFICACIÓN AMBIENTAL

PROGRAMA INTERFACULTADES

TÍTULO DE TESIS

DISTRIBUCIÓN TERMAL INTRAURBANA EN SANTIAGO DE CHILE. APORTE A LA GESTIÓN AMBIENTAL DE LA CIUDAD A PARTIR DE LA CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO QUE PERMITA GENERAR UN MAPA TÉRMICO DE VERANO.

Tesis para optar al grado de Magíster
en Gestión y Planificación Ambiental

Alumna: Pamela Elisa Smith Guerra

Director de Tesis
Prof. Hugo Romero Aravena

Santiago, Chile

2011



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA

MAGÍSTER EN GESTIÓN Y PLANIFICACIÓN AMBIENTAL

PROGRAMA INTERFACULTADES

TÍTULO DE TESIS

DISTRIBUCIÓN TERMAL INTRAURBANA EN SANTIAGO DE CHILE. APORTE A LA GESTIÓN AMBIENTAL DE LA CIUDAD A PARTIR DE LA CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO QUE PERMITA GENERAR UN MAPA TÉRMICO DE VERANO.

ALUMNA

Pamela Elisa Smith Guerra

Director de Tesis:

Prof. Dr. Hugo Romero

COMISIÓN DE EVALUACIÓN

Presidente

Prof. Pablo Morales

Profesor Informante (1)

Maureen Amín

Profesor Informante (2)

Prof. Luis Morales

Santiago, Chile

2011

Contenido

CAPITULO I. PRESENTACIÓN	7
1.1 Introducción y planteamiento del problema.....	7
1.2 Objetivos	11
1.3 Hipótesis.....	12
1.4 Área de Estudio.....	13
CAPITULO II. ESTADO DEL ASUNTO	16
2.1 Crecimiento Urbano de Santiago de Chile	16
2.2 Medioambiente Urbano.....	17
2.3 Clima Urbano.....	18
2.4 Características del clima de la zona central de Chile	24
2.5 Investigaciones de Clima Urbano en la Ciudad de Santiago.....	27
2.6 Gestión Ambiental.	31
2.7 Datos meteorológicos puntuales y su representatividad espacial	35
CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO	38
3.1 Materiales.....	38
3.2 Métodos.....	39
3.2.1 Información histórica	39
3.2.2 Análisis de la relación entre la temperatura atmosférica, cobertura vegetal, superficies impermeables, relieve (altura y exposición), rugosidad urbana, distancia a los cursos de agua, y temperatura de emisión superficial.....	39
3.2.3 Desarrollo de un modelo espacial de distribución de la temperatura atmosférica en verano.....	46
3.2.4 Análisis de la estructura termal urbana, estableciendo su relación con las Zonas Termales (ZT) para el año 2009.	50
CAPITULO IV. RESULTADOS.....	53
4.1 Aspectos Climáticos	53
4.1.1 Sistema océano-atmósfera en el Pacífico ecuatorial.....	53
4.1.2 Aspectos climáticos en Chile	54
4.1.3 Condiciones en la ciudad de Santiago.....	55
4.2 Selección de Variables.	63

4.2.1 Correlación de variables con temperatura atmosférica.....	64
4.3 Resultado del modelo de Regresión.....	66
4.3.1 Datos Atmosféricos utilizados en la construcción del Modelo de Regresión y la obtención del Mapa Térmico de Verano para la ciudad de Santiago.	68
4.3.2 Validación del modelo de regresión.	70
4.3.3 Diagnóstico de los resultados del modelo de regresión.....	71
4.4 Distribución Espacial de las temperaturas.....	78
4.4.1 Distribución temperaturas a las 9:00 horas.....	78
4.4.2 Distribución temperaturas 16:00 horas.	81
4.4.3 Distribución temperatura 22:00 horas.	84
4.4.3 Gradiente Térmico.....	87
4.5 Relación con Zonas Termales de Stewart & Oke.....	89
4.5.1 Análisis de las temperaturas en las Zonas Termales	90
CAPITULO V. DISCUSION.....	96
5.1. Discusiones metodológicas.....	102
CAPITULO VI. CONCLUSIONES.....	105
CAPITULO VII. BIBLIOGRAFÍA.....	110
CAPITULO VIII. ANEXOS.....	117

Figuras.

Figura N°1. Área de Estudio	14
Figura N°2. Perfil de una isla de calor.....	20
Figura N°3. Factores que influyen sobre el clima urbano de una ciudad y su modificación	21
Figura N°4. Comportamiento Oscilación Decadal del Pacífico.....	24
Figura N°5. Gradiente Térmica durante la noche (22 hrs.) en la ciudad de Santiago...	30
Figura N°6. Localización de las estaciones fijas y transectos móviles de medición de temperaturas en la ciudad de Santiago.....	41
Figura N°7. Clasificación de la orientación en grados.....	44
Figura N°8. Oscilación del sur entre enero 2004 y enero 2009.....	53
Figura N°9. Localización estación Quinta Normal v/s Expansión Urbana.....	56
Figura N°10. Promedio anual temperatura (°C) entre 1862 y 2009 Estación Quinta Normal.....	57
Figura N°11. Temperatura Atmosférica diaria año 2009.....	59
Figura N°12. Anomalía de la Temperatura Media diaria en Santiago (QN).....	60
Figura N°13. Comportamiento temperatura atmosférica, 20 y 21 de enero.....	68
Figura N°14. Datos temperatura atmosférica incluidos en el modelo de regresión.....	69
Figura N°15. Diferencias de los datos obtenidos por el modelo de regresión y la interpolación con la temperatura atmosférica observada durante la mañana	72
Figura N°16. Diferencias de los datos obtenidos por el modelo de regresión y la interpolación con la temperatura atmosférica observada durante la tarde.....	73
Figura N°17. Diferencias de los datos obtenidos por el modelo de regresión y la interpolación con la temperatura atmosférica observada durante la noche.....	74
Figura N°18. Diferencias de los datos obtenidos por el modelo de regresión y la interpolación, ambos corregidos, con la temperatura atmosférica observada durante la noche.....	75

Figura N°19. Localización puntos que registran diferencias superiores a 2°C entre los resultados del modelo de regresión y los datos observados durante la mañana, tarde y noche.....	76
Figura N°20. Distribución Temperaturas Atmosféricas, 9:00 horas.....	79
Figura N°21. Distribución Temperaturas Atmosféricas, 16:00 horas.....	82
Figura N°22. Distribución Temperaturas Atmosféricas, 22:00 horas.....	85
Figura N°23. Perfil Poniente – Oriente Temperatura Atmosférica.	87
Figura N°24. Zonas Termales en transecta oriente – poniente.....	89
Figura N°25. Temperatura atmosférica promedio – Zonas Termales.....	90
Figura N°26. Diferencias entre zonas termales respecto de su temperatura atmosférica.....	93
Figura N°27. Diferencias entre zonas termales respecto de su temperatura atmosférica, tipologías vegetadas.....	94

Tablas

Tabla N°1. Variables que tienen efecto en la temperatura atmosférica en la ciudad, según sus autores	23
Tabla N°2. Tipología de Zonas Termales.....	51
Tabla N°3. Condición Sinóptica.....	54
Tabla N°4. Comportamiento promedio anual y estival año 2009 respecto a últimos 30 años.....	58
Tabla N°5. Test de Normalidad.....	62
Tabla N°6. Coeficientes de Correlación.....	63
Tabla N°7. Ecuación Modelos de Regresión.....	65
Tabla N°8. Efecto de la vegetación, impermeabilización y altura sobre la temperatura atmosférica.....	66
Tabla N°9. Modificaciones de los diferentes arreglos espaciales de cobertura vegetal y superficies impermeables sobre una T° igual a 30°C	67
Tabla N°10. Resultados de la validación cruzada.....	70
Tabla N°11. Normalidad datos temperatura atmosférica.	91
Tabla N°12. Resultados ANOVA.	92
Tabla N°13. Resultados Test de Levene.....	92

RESUMEN

El proceso de urbanización ha significado el reemplazo de coberturas naturales y seminaturales, principalmente vegetación dispersa y cultivos, por usos de suelo urbanos, cuyos materiales se caracterizan por un bajo albedo o reflectividad, una baja capacidad de absorción de agua y un comportamiento térmico propicio para el almacenamiento y la emisión de calor, contribuyendo entre otros efectos a elevar la temperatura atmosférica de la ciudad (Peña y Romero, 2006). Surge así un clima urbano, como parte del medioambiente urbano, que resulta de la modificación de las condiciones naturales previas y que se define comparando los rasgos climáticos al interior de la ciudad con su entorno rural próximo (Oke & Voogt, 2009; Stewart & Oke, 2009).

El clima se refiere al promedio de las condiciones atmosféricas de al menos 30 años (JPCC, 1995) y está condicionado, tanto a escala global como regional, por diversos factores, principalmente naturales, como por ejemplo, la altura, latitud, orografía, etc. Sin embargo, en un entorno urbano se van agregando nuevos factores o elementos que influyen en la formación de un clima diferente. Es necesario disponer de un mapa climático que integre y sintetice los datos meteorológicos obtenidos de estaciones fijas y móviles, y los relacione con aquellos capturados por las imágenes de satélite, que constituyen una importante herramienta disponible en la actualidad.

Esta investigación analiza la relación existente entre temperaturas atmosféricas, previamente validadas, y temperatura de emisión superficial, Cobertura Vegetal, Tasas de Impermeabilización, Relieve (altura y orientación), Rugosidad de las edificaciones y Distancia a Cursos de Agua, con el fin de establecer parámetros que permitan la espacialización de las temperaturas atmosféricas de verano mediante la construcción de un modelo de regresión múltiple. Los resultados obtenidos se validan con estaciones meteorológicas no incluidas para la creación del modelo, y luego se comparan con los obtenidos a partir de métodos de interpolación como el Kriging. Finalmente, se establecen las relaciones entre la temperatura atmosférica y las zonas termales definidas por Stewart & Oke en el año 2009.

Se utiliza Información extraída de fuentes bibliográficas y cartográficas preexistentes, así como también datos e informaciones resultantes del tratamiento digital de imágenes satelitales LANDSAT TM (Thematic Mapper) y ASTER. Las Zonas Termales para la ciudad de Santiago son reconocidas por Irarrázaval (2011). Se consideran los datos de temperatura atmosférica estandarizados, provienen de variadas fuentes. La distribución de las temperaturas en la ciudad se obtiene a partir de un modelo de regresión que incluye a los factores relacionados con la temperatura atmosférica, según los resultados de una correlación por pares.

De acuerdo a los resultados de las correlaciones entre la temperatura atmosférica y las variables seleccionadas: la cobertura vegetal, impermeabilización, altitud y, temperatura de emisión superficial, resultaron ser significativas, se incluye también la interpolación de temperatura atmosférica para otorgar variabilidad horaria al modelo. Una vez obtenido el mapa térmico para la mañana, tarde y noche de un día de verano se pudo establecer que existen diferencias significativas entre las zonas climáticas, respecto al promedio y la varianza de su temperatura atmosférica.

ABSTRACT

The process of urbanization has implied the replacement of the natural or semi-natural ground coating –mainly sparse vegetation and crops- by urban ground use, with materials whose albedo or reflectivity and absorption capacity are significantly lower, and whose thermal behaviour favors the storage and emission of heat, resulting –among other effects- in the raise of the atmospheric temperature inside the city (Peña and Romero, 2006). This leads to an urban climate, as a part of the urban environment, caused by the change of previous natural conditions, which is defined by comparing the climatic traits inside the city with those observed in its rural surroundings (Oke & Voogt, 2009; Stewart & Oke, 2009).

Climate refers to the average atmospheric conditions along a period of at least 30 years (IPCC, 1995) and is determined, at a global and regional scale by several mainly natural factors, like altitude, latitude, orography, etc. However, in an urban environment, there are new factors to be considered in the development of a different climate. It is, therefore, necessary to draw a climatic map in which meteorological data obtained from stationary and mobile tracking stations may be integrated, summarized and related with those registered by satellite images.

In the current research, we analyze the relation between atmospheric temperatures previously validated and surface emission temperature, Vegetal Coating, Impermeabilization Rates, Relief (altitude and orientation), buildings rugosity and distance to water courses, in order to find parameters which allow the spatialization of summer atmospheric temperatures by building a multiple regression model. Tracking weather stations not considered in the building of the model are used to validate the results, which are, as well, compared with those derived of interpolation such as the Kriging method. Finally, the relations between the atmospheric temperature and the thermal zones defined by Stewart & Oke in 2009 are established.

Information gathered from preexisting bibliographical and cartographical sources, as well as data obtained by digital treatment of satellite images LANDSAT TM (Thematic Mapper) y ASTER are used in this research. The city of Santiago Thermal Zones are determined by Irarrázaval (2011). Standardized temperature data from different sources are considered. The temperature distribution within the city is obtained from a regression model including those factors related to the atmospheric temperature, according to pair correlation results.

Consistently with the results obtained, the correlations between the atmospheric temperature and the selected variables – vegetal coating, impermeabilization, altitude and surface emission temperature - proved to be significant. In order to add time variation, the model includes atmospheric temperature interpolation. Once the thermal (thermal) map for a summer day's morning, afternoon (evening) and night was completed, it was possible to observe significant differences between the climatic zones, with respect to the average and variance of its atmospheric temperature.

CAPITULO I. PRESENTACIÓN

1.1 Introducción y planteamiento del problema

En las últimas tres décadas, la ciudad de Santiago ha experimentado un crecimiento sostenido de su superficie urbanizada, la que ha aumentado en más del doble desde el año 1975. Este proceso ha significado el reemplazo de coberturas naturales y seminaturales, principalmente vegetación dispersa y cultivos, por usos de suelo urbanos, cuyos materiales se caracterizan por un bajo albedo o reflectividad, una baja capacidad de absorción de agua y un comportamiento térmico propicio para el almacenamiento y emisión de calor, contribuyendo entre otros efectos a elevar la temperatura atmosférica (Peña y Romero, 2006). Surge así un clima urbano, como parte del medioambiente de la ciudad, que resulta de la modificación de las condiciones naturales previas y que se define comparando los rasgos climáticos al interior de la ciudad con su entorno rural próximo (Oke & Voogt, 2009; Stewart, I. & Oke., 2009).

En el caso de las metrópolis latinoamericanas, como es el caso de Santiago, la capital de Chile, se trata de un medio ambiente extraordinariamente complejo, dada la extensión espacial de la ciudad, su constante crecimiento y cambios de los usos y coberturas de los suelos, como los procesos de centralización y difusión de sus servicios (policentralidad), de segregación socio- espacial de sus habitantes y de gentrificación, que se refiere al traslado de habitantes de altos ingresos hacia sectores de menor valor de los suelos que va complicando el panorama socioeconómico. (Sabatini *et al.*, 2007; Sierralta, 2008).

Oke (1987) señala que la magnitud de las transformaciones de los climas urbanos se relaciona directamente con el tamaño de las ciudades. En Santiago de Chile, se concentran cerca de siete millones de habitantes, lo que implica el 45% de la

población total del país, sobre una superficie urbanizada que supera las 70.000 Há. El volumen de estas concentraciones espaciales de personas, artefactos urbanos y actividades económicas, debiera haber generado y estar generando grandes transformaciones climáticas, sin duda mucho mayores a los cambios estimados por los modelos que se aplican a escalas globales. La ciudad es el lugar donde los cambios climáticos deberían estar ocurriendo a velocidades muy altas y en grandes magnitudes (Founda & Giannakopoulos, 2009; Wolf *et al.*, 2010 y Romero *et al.*, 2010).

El estudio ambiental de las ciudades y su aplicación a la gestión y planificación de los espacios urbanos, implica la consideración de una serie de complejos elementos y sub sistemas, entre los cuales necesariamente debe incluirse el clima urbano. Constituye todo un desafío el plantearse un estudio de esta naturaleza debido a que el análisis y caracterización de los climas plantea requerimientos en términos de los plazos de observación y la representatividad espacial de los datos e informaciones. El clima es definido como el estado medio de la atmósfera, registrado sobre áreas geográficas representativas y que reproducen el comportamiento cíclico de elementos tales como las temperaturas, humedad relativa, vientos y presión atmosférica. La gran mayoría de las estaciones meteorológicas de la ciudad de Santiago – que constituyen la principal fuente de información - han sido instaladas en los últimos 20 años, y han tenido por fines la operación de los aeropuertos, pronosticar el tiempo meteorológico y aplicar estos conocimientos a los planes de desarrollo agrícola, minero o forestal, y por lo anterior, aun cuando se cuenta con más de 30 estaciones distribuidas en la ciudad midiendo temperatura atmosférica, no existe articulación de los diferentes organismos e instituciones públicas y privadas que las administran y por lo tanto se carece de la necesaria noción de red que debiese existir, lo que dificulta el tratamiento de las series de datos en forma conjunta. Lo anterior es fundamental cuando se persigue el objetivo de construir un mapa térmico donde la ocurrencia y

densidad de información, así como la posibilidad de su tratamiento en forma conjunta es requisito indispensable.

Respecto a la representatividad espacial de los datos puntuales de estaciones meteorológicas, como para comprender y explicar el clima de la ciudad, se reconoce que los diferentes usos del suelo que la componen (que son muy variados y heterogéneos), actúan como un factor determinante que modifica las condiciones de los climas regionales y locales. Los estudios existentes para Santiago indican que se registran diferencias relevantes en los indicadores climáticos entre las distintas áreas de la ciudad, cuyos límites y características varían en el transcurso del día, relacionándose estrechamente con los tipos y coberturas de los suelos.

Por lo anterior, es indispensable realizar esfuerzos para normalizar espacial y temporalmente los datos e informaciones climáticos que existen al interior de la ciudad, con el objeto de convertirlas en series temporo-espaciales comparables. Es necesario disponer de un mapa climático que integre y sintetice los datos meteorológicos obtenidos de estaciones fijas y móviles, y los relacione con aquellos capturados por las imágenes de satélite, que constituyen una importante herramienta disponible en la actualidad. En efecto, las imágenes satelitales de escala media, tales como las proporcionadas por LANDSAT y ASTER, proporcionan datos de temperatura superficial para unidades espaciales y temporales preestablecidas, que están determinadas por los usos y coberturas del suelo y se expresan tanto en las diferencias que se aprecian al interior de la ciudad, como aquellas que existen entre las áreas urbanas y rurales.

Reconociendo la complejidad del comportamiento de la temperatura atmosférica de la ciudad de Santiago, esta investigación busca identificar aquellas variables ambientales y de diseño urbano, a escala metropolitana, que se encuentren

relacionadas con su distribución. Las relaciones entre variables serán incorporadas en un modelo de análisis estadístico que permita, mediante procedimientos automatizados de interpolación y empleando los sistemas de información geográfica como principal instrumento de espacialización, diseñar un mapa térmico de verano. Este análisis espacial facilitará la comprensión de las condiciones térmicas de aquellos lugares que en la actualidad no disponen de información o que no se encuentran representados por las actuales estaciones meteorológicas.

1.2 Objetivos

General.

Incorporar al clima urbano, caracterizado por la distribución espacio-temporal de las temperaturas, en la comprensión del medio ambiente de la ciudad de Santiago, con la finalidad de que sea considerado en las evaluaciones ambientales de sus instrumentos de planificación y gestión

Específicos

1. Analizar la relación existente entre la temperatura atmosférica obtenida de estaciones de medición fijas y: a) Cobertura Vegetal, b) Superficies Impermeables, c) Relieve (altura y orientación), d) Rugosidad urbana, e) Distancia a los cursos de agua, y f) Temperatura de Emisión Superficial.
2. Desarrollar un modelo espacial de distribución de la temperatura atmosférica en verano.
3. Analizar la estructura termal urbana, estableciendo su relación con las Zonas Climáticas para el año 2009.

1.3 Hipótesis

El comportamiento de la temperatura atmosférica de la ciudad de Santiago puede ser explicado a escala metropolitana por variables ambientales que actúan aumentando o disminuyendo la cantidad de calor.

La ciudad de Santiago presenta importantes y significativas diferencias térmicas en su interior y respecto a las zonas rurales, que permiten caracterizar islas de calor y frío, que conforman verdaderos archipiélagos térmicos y que se expresan como gradientes de variabilidad, continuos y discretos, que dependen a su vez de sus relaciones con los usos y coberturas de los suelos.

Los diferentes usos y coberturas urbanas, expresados en categorías de zonas climáticas en la ciudad poseen características térmicas significativamente distintas

1.4 Área de Estudio

La ciudad de Santiago (figura 1), capital nacional y regional, se inserta al interior del Área Metropolitana de Santiago, también llamada Gran Santiago, y aunque es posible concebirla como una única gran ciudad, Santiago no constituye una sola unidad administrativa sino, por el contrario, forma parte del territorio de 37 comunas que corresponden a cinco provincias: Santiago, Cordillera, Chacabuco, Talagante y Maipo. De las 37 comunas, 26 son completamente urbanas y las restantes poseen parte de su territorio rural, estando algunas desconectadas del radio urbano de la ciudad.

Según los datos del último censo de Población y Vivienda realizado hace 9 años por el Instituto Nacional de Estadísticas, la población del área metropolitana de Santiago alcanzaba los 5.428.590 habitantes, equivalente al 35,91% del total nacional y al 89,56% del total regional, siendo además, la séptima ciudad más habitada de América Latina y, según algunas estimaciones, una de las 50 áreas metropolitanas más pobladas del mundo. Los datos recogidos el año 2002 dan cuenta del amplio crecimiento en la población de la ciudad durante el siglo XX: en 1907 habían 383.587 habitantes, 1.010.102 en 1940, 2.009.118 en 1960, 3.899.619 en 1982, 4.729.118 en 1992 y 5.428.590 en 2002. Según estimaciones de la Seremi de Planificación y Coordinación, Región metropolitana de Santiago, el año 2010 la población del Gran Santiago habría llegado a 6.286.574 aproximadamente. En el último censo (año 2002), 28,54%, que corresponde a 4.313.719 personas, afirman haber nacido en una de las comunas del Gran Santiago.

En la actualidad, gran parte de los habitantes se localizan en los sectores periféricos de la ciudad tradicional consolidada, teniendo individualmente las comunas de Puente Alto, La Florida (en el sector sureste) y Maipú (por el

suroeste) sobre 400.000 pobladores, duplicando cada una de ellas la cantidad de habitantes de la comuna de Santiago. Al analizar las cifras de crecimiento demográfico, las comunas centrales como Santiago, Independencia o San Joaquín registran cifras negativas, mientras las periféricas superan con facilidad el 4% e incluso el 20% como en el caso de Quilicura, en el extremo noroeste.

La ciudad de Santiago se ubica en la cuenca de los ríos Maipo-Mapocho, localizada entre la Cordillera de Los Andes y Cordillera de la Costa, además de algunos cerros islas, como el Santa Lucía ubicado en la comuna de Santiago Centro, y el Cerro Renca, que es el punto más alto alcanzando los 800 msnm.

El río Maipo, que constituye el cauce principal de la cuenca, nace en la Cordillera de Los Andes, al sureste de Santiago y desciende por un cañón conocido como el Cajón del Maipo. El río más importante para la ciudad es el río Mapocho, que ingresa a la ciudad por el oriente, cruzándola en sentido este-oeste para luego recorrer zonas agrícolas hasta llegar a El Monte, donde se junta con el Maipo, siendo uno de sus principales afluentes.

De acuerdo a la dirección meteorológica, el clima de la ciudad de Santiago se define como templado cálido con lluvias invernales y estación seca prolongada. La principal característica son las precipitaciones que caen preferentemente en invierno, entre mayo y agosto, donde precipita alrededor del 80% de lo que cae en todo el año.

Ambas cordilleras tienen importantes efectos climáticos: la Cordillera de la Costa, con algunas cumbres superiores a 2.000 m. impide una mayor influencia marítima, a excepción de cuando el nivel de inversión térmica asciende sobre 1.000 m y asociado a vientos del oeste en los niveles más bajos, permite el ingreso de nubosidad baja costera a través de los valles de los ríos, además de disminuir las

Distribución termal intraurbana en Santiago de Chile. Aporte a la gestión ambiental de la ciudad a partir de la construcción de un modelo que permita generar un mapa térmico de verano.

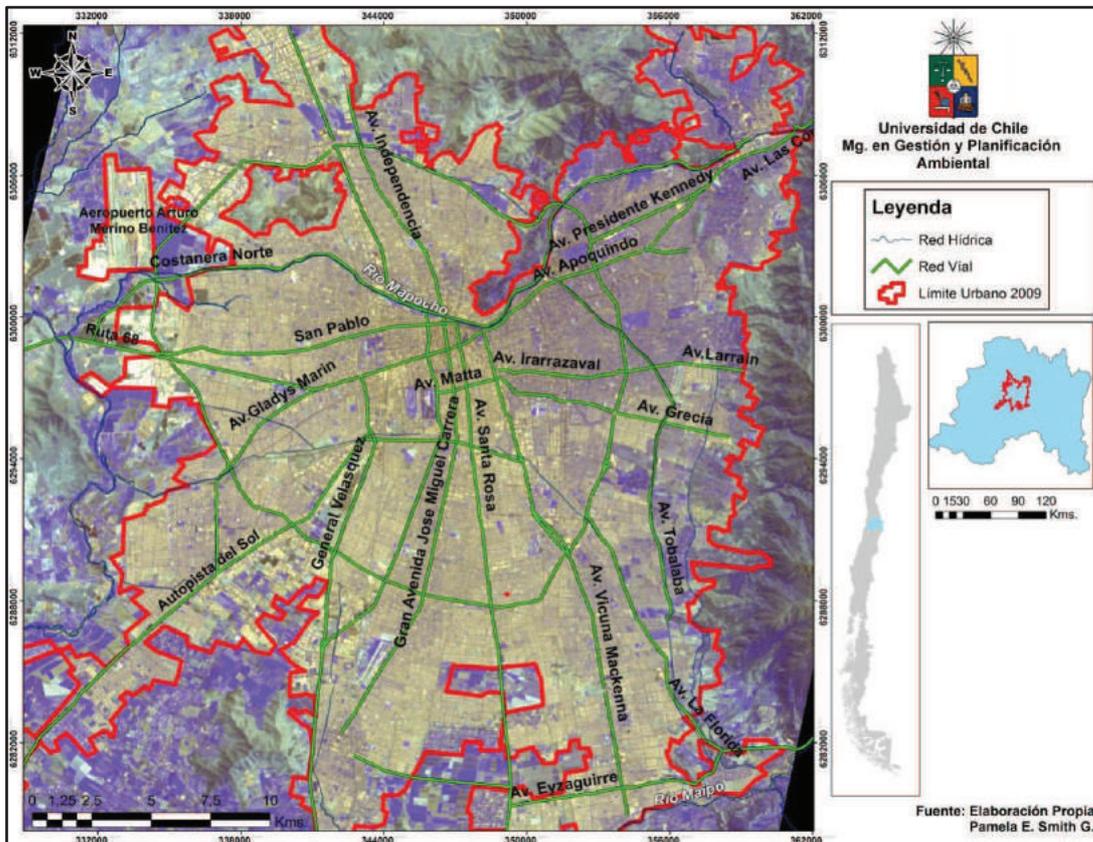
Magíster en Gestión y Planificación Ambiental

Pamela Smith Guerra

cantidades de precipitación en los sectores aledaños a su ladera oriental (efecto se sombra pluviométrico).

Debido a la situación de continentalidad en que se encuentra la cuenca de Santiago, la humedad relativa es relativamente baja, ligeramente superior al 70% como promedio anual. Además las amplitudes térmicas son altas: hay casi 13°C de diferencia entre el mes más cálido (enero) y el más frío (julio) y la diferencia media entre las máximas y mínimas diarias es de 14°C a 16°C. La dirección del viento predominante es del suroeste, siendo más persistente en el verano, con una intensidad media de 15 km/hr. (DMC, 2011).

Figura 1. Área de Estudio.



Fuente: Elaboración Propia.

CAPITULO II. ESTADO DEL ASUNTO

2.1 Crecimiento Urbano de Santiago de Chile

Cada vez con más frecuencia, el mundo científico vuelca su atención al estudio de la ciudad, ya que esta constituye el hábitat principal del ser humano. Según cifras entregadas por la ONU (2006), las ciudades albergan el 77,6% de la población de Latinoamérica, siendo Argentina, Brasil, Chile, Uruguay y Venezuela, los países latinoamericanos más urbanizados de la región. Así mismo se espera que para el año 2030, el 60% de la población total mundial se encuentre viviendo en áreas urbanas.

El aumento de la superficie urbana y el consecuente reemplazo de superficies naturales y seminaturales por condiciones fuertemente artificializadas, no está exento de efectos sobre el medio ambiente. (Pauleit *et al.*, 2005; Molina, 2007.; Romero *et al.*, 2009; Smith y Romero, 2009) El crecimiento espacial de la ciudad se basa principalmente en la ocupación de sectores naturales seminaturales, forestales o agrícolas, que desempeñan valiosos servicios ambientales (Romero, 2001; Romero *et al.*, 2003) entre los cuales se encuentran el control de las temperaturas, la humedad atmosférica y la infiltración del agua de lluvia en los suelos. El área construida se considera como un parámetro que cuantifica la extensión urbana y a ella se asocia la impermeabilización de los suelos y la devastación de las cubiertas vegetales, todo lo cual influye en el origen de los climas urbanos. Dada la rapidez con que se expanden y cambian los usos del suelo en las ciudades, las áreas construidas se identifican y clasifican usando cartas topográficas, mapas de usos y coberturas de suelos y datos adquiridos remotamente. (Sudhira *et al.* 2004; Xian & Crane, 2005).

Según resultados de Sudhira *et al.* (2004), la tasa de desarrollo urbano de las ciudades, es mayor que la de crecimiento de la población, lo que implica que la tierra es consumida en tasas per capita excesivas. Si se observan los datos de crecimiento de superficie urbana y el aumento en el número de habitantes de las principales áreas metropolitanas de Chile - Área Metropolitana de Santiago, Valparaíso y Concepción - queda de manifiesto que lo establecido por Sudhira es también válido para nuestro país.

2.2 Medioambiente Urbano.

“Una ciudad es un lugar en el cual viven estrechamente un gran número de personas debido a razones sociales, residenciales, culturales y productivas, y puede ser entendida como un sistema abierto de seres vivos, personas, animales y vegetales”. Una ciudad, al igual que un organismo vivo, *“nace, crece, interactúa con su entorno físico, modifica el medio construido, se relaciona con el medio exterior y muere”.* Douglas (1983) en Tessman *et al.* (1999).

Las ciudades modifican las condiciones naturales anteriores a su instalación, dando origen a un medio ambiente urbano que posee ciertas características que le son propias, Hough (1995) en Rodríguez *et al.* (2005) expresa que *“la urbanización crea un nuevo medioambiente hidrológico, donde el asfalto y el concreto reemplazan al suelo, los edificios reemplazan a los árboles y los desagües y conductos de aguas-lluvias reemplazan a los canales y cuencas naturales”.* Las áreas urbanizadas modifican, además, el clima local, generando el clima urbano, concepto que se define en comparación con el entorno próximo de las ciudades. Éste se genera a partir de la modificación que el espacio urbano produce sobre el clima regional; se producen en consecuencia las islas de calor

urbanas, que se generan según Gorsevski *et al.* (1998) por el reemplazo de la vegetación natural por superficies que absorben calor.

En este mismo sentido, una distinción esencial entre espacios urbanos y rurales es la mayor proporción de tierras construidas en los primeros respecto de los segundos, así como la gran cantidad de superficies pavimentadas al interior de las ciudades. Asimismo, en estas últimas se encuentra una menor presencia de vegetación, situación que se agudiza si se refiere a vegetación nativa.

Es así como Romero (2004) señala que *“la urbanización es la perturbación ambiental más drástica, actúa afectando a los servicios ambientales, altera los climas locales, los componentes del ciclo hidrológico, la biodiversidad y la calidad ambiental general del paisaje”*, ya que por ejemplo, al eliminar la vegetación, se provoca una alteración de la humedad atmosférica, aumentando las islas de calor urbanas, que se definen según el mismo autor como *“superficies duras urbanizadas con materiales que absorben grandes cantidades de calor durante las horas de insolación directa y lo emiten durante las noches y madrugadas”*.

2.3 Clima Urbano

El clima es definido como el estado medio de la atmósfera, registrado sobre áreas geográficas representativas y que reproducen el comportamiento cíclico de elementos tales como las temperaturas, humedad relativa, vientos y presión atmosférica. Si bien en general se estima que un período de treinta años reproduce condiciones de normalidad estadísticas y por ello es recomendado por instituciones internacionales, el tema de las escalas temporales y espaciales de registro de las condiciones climáticas es una materia de alta complejidad. El clima global, a escala planetaria o hemisférica depende de la circulación general de los océanos y la atmósfera y permite dividir el planeta en grandes zonas latitudinales,

que a su vez. Están influidas por las relaciones entre la Tierra y el Sol. El clima a escala continental no sólo depende de los factores mencionados sino que también de la acción de los sistemas de montaña, distancia al mar, distribución de las cuencas. El clima local agrega particularidades que dependen de los usos y coberturas de los suelos.

Desde el punto de vista temporal, existen variaciones y tendencias que se prolongan por milenios y siglos, mientras que otras obedecen al carácter cíclico originado especialmente por la estacionalidad. Entre medio se ubican variaciones decadales y de menor tiempo como la Oscilación del Sur (fenómenos El Niño-La Niña) o bien cambios locales generados por la sustitución de las cubiertas vegetales o el reemplazo de superficies agrícolas por urbanas, o la densificación de las áreas construidas, que pueden consistir en procesos rápidos y vertiginosos.

En un entorno urbano se van agregando nuevos factores o elementos que influyen en la formación de un clima diferente. Cada uso urbano del suelo posee un comportamiento térmico diferencial al interior de la ciudad, razón por la cual ésta se convierte en un sistema complejo de mosaicos de paisajes, cada uno de los cuales presenta sus particulares coeficientes de absorción, almacenaje y emisión de calor. Esta complejidad aumenta si se consideran, además, ciertos elementos que configuran las distintas tipologías urbanas, tales como la vegetación y la altura de las construcciones, entre otros (Eliasson, 1999; Rohinton, 1999 y Honjo, 2003).

La temperatura del aire en las ciudades puede elevarse entre 2 y 8 °C respecto al entorno rural, (Oke, 1987), dibujando un gradiente típico que encuentra su máximo en las áreas centrales de la ciudad (figura 2). Se estima que para una tarde de verano, la temperatura del aire de una ciudad tipo puede estar hasta 2,5°C por sobre las áreas rurales circundantes (Akbari *et al*, 2001). Los autores calculan que la demanda energética para enfriamiento se incrementa entre 2 y 4% por cada 1°C

de aumento en la temperatura máxima diaria por sobre un umbral entre los 15°C y 20°C. Asimismo, se ha determinado que la diferencia máxima de las temperaturas entre un área verde densa y las construcciones de la Universidad de Singapur a las 13:00 hrs. alcanza alrededor de 4°C. A la medianoche, la diferencia de temperaturas entre estas dos posiciones es aproximadamente 3°C (Nyuk & Kardinal, 2008).

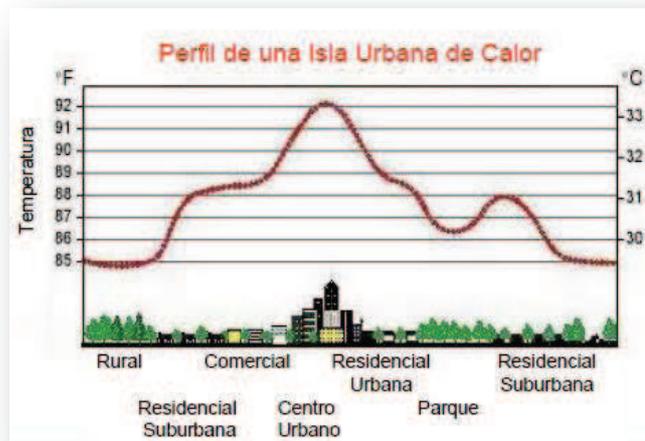
La isla de calor urbana (ICU) constituye una modificación climática directamente relacionada con los usos y coberturas urbanas del suelo y la energía usada en la ciudad (Oke, 1998; Molina, 2007). El conocimiento de su dinámica permite determinar cómo el ambiente urbano modifica al clima local.

Las islas de calor pueden ser divididas en dos tipos: La ICU propiamente tal corresponde a la mayor temperatura que registra la capa de aire que cubre la ciudad como consecuencia de la transmisión hacia ella del calor acumulado por las estructuras y cuerpos que la componen, tales como techos y paredes de las edificaciones, calles y avenidas, sitios eriazos, industriales y estacionamientos. La isla de calor urbana superficial (ICUs), por el contrario, corresponde a las altas temperaturas de emisión que alcanzan las diferentes estructuras y cuerpos urbanos y que son captadas directamente por sensores infrarrojos, tales como los que disponen los satélites de observación terrestre, que permiten generar lo que se conoce como temperatura de emisión superficial.

La intensidad de la isla de calor aumenta en el transcurso del día, partiendo desde la salida del sol hasta un máximo que se registra unas pocas horas después de la puesta del sol y las horas previas a la madrugada. Como contrapartida, la intensidad del calor urbano es por lo general bastante débil, y a veces negativa (*isla fría*) durante el día en aquellas partes de la ciudad en que edificios en altura u otras estructuras proveen sombra extensa, y donde hay una carencia de

calentamiento, debido a los materiales de construcción (Valor, 2000; Voogt *et al.* 2003).

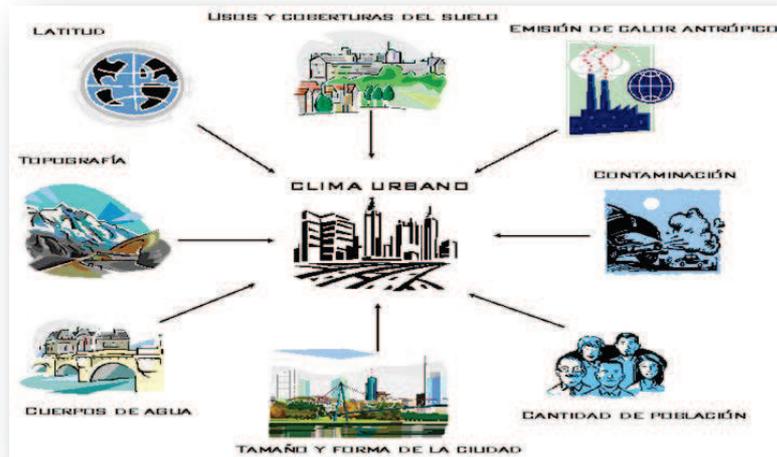
Figura 2. Perfil de una isla de calor urbana (ICU).



Fuente: Oke, 1998.

La figura 3 muestra los factores que tienen efectos sobre el comportamiento térmico de las ciudades; asimismo, la tabla 1 menciona algunos de los autores que a través de sus investigaciones han demostrado la existencia de relación entre temperatura atmosférica y un listado de factores ambientales y urbanos que pueden ser aplicados en una aproximación a escala metropolitana del clima urbano.

Figura 3. Factores que influyen sobre el clima urbano de una ciudad y su modificación



Fuente: Molina, 2007.

Honjo *et al* (2003) y Oke (1982) establecen que la presencia de superficies vegetadas es decisiva para la mitigación de las islas de calor urbanas. Parques y jardines se comportan como “islas de frescor” y generan un fenómeno llamado “brisa de parque” (Park breeze), que se desarrolla durante las noches, contribuyendo a enfriar los espacios construidos, fenómeno que es también señalado por Nowak & McPherson en el año 1993.

Potchter *et al.* (2006), en un estudio en Tel-Aviv, Israel, durante el verano, calcularon que un parque urbano con árboles altos y un dosel amplio tiene un máximo efecto de enfriamiento durante el día, y reduce la temperatura hasta 3,5°C; árboles de mediano tamaño pero de densa cobertura, también pueden reducir las temperaturas hasta 2,5°C durante el día.

Por otra parte, la impermeabilización de los suelos es un concepto que deriva de la hidrología y se refiere a aquellas superficies que tienen propiedades que inhiben la infiltración del agua en los suelos (Pauleit, *et al.*, 2005). En el contexto de la

temperatura urbana la impermeabilización de los suelos provoca una disminución de la evapotranspiración entre un 30 y 40% (Arnold & Gibbons, 1996), y consecuentemente, contribuye a aumentar la temperatura, al exponer superficies pavimentadas a la radiación solar directa y difusa, además de dejar de consumir calor en el proceso de evaporación. Provoca además la homogenización de la superficie térmica causada por las islas de calor, todo lo cual contribuye a aumentar el calentamiento local y global, elevando las temperaturas y disminuyendo la humedad en términos directamente relacionados con los usos y coberturas de los suelos, densidad de ocupación urbana y presencia de calles, estacionamientos, techos y otros artefactos urbanos.

Arnfield, 2003 y Prashad, 2004 encuentran correlaciones espaciales altas entre las islas de calor de superficie y del aire, lo que permite asumir que los patrones de distribución espacial de ambas son semejantes en un alto grado, aunque no en lo que respecta a la cantidad de calor registrado. Se han establecido también relaciones importantes entre las islas de calor urbanas y la topografía, tal como lo señalan Beral-Guyonet (1997), Cuadrat *et al.* (2003 y 2005) y Jo *et al.* (2001) cuando establecen que las depresiones hacen posible la generación de masas de calor, debido al menor dominio de los vientos, y se transforman así en la variable que explica mayormente la ICU (Tabla 1).

A partir de una revisión de estudios referidos a la ICU entre 1950 y 2007, que incluyen datos y aportes científicos acerca de la asociación entre los usos y coberturas urbanas además de aportar antecedentes respecto a parámetros que se encuentran relacionados con el clima de las ciudades como la impermeabilización y la cobertura vegetal, Stewart y Oke, en el año 2009, elaboraron lo que denominaron zonas climáticas, que corresponden a áreas homogéneas respecto a su tipología urbana y comportamiento climático sobre la base de una clasificación de 20 sub categorías.

Tabla 1. Variables que tienen efecto en la temperatura atmosférica en la ciudad, según sus autores.

VARIABLE	AUTOR
Cobertura Vegetal	Honjo <i>et al.</i> , 2003 y Oke, 1982; Nyuk & Kardinal, 2008
Superficies Impermeables	Arnold & Gibbons, 1996; Pauleit, <i>et al.</i> , 2005; Stewart & Oke, 2009.
Altura	Beral-Guyonet, 1997;
Orientación	Cuadrat <i>et al.</i> 2003 y 2005 y Jo <i>et al.</i> ,2001.
Rugosidad	Eliasson, 1999, Rohinton, 1999 y Honjo, 2003.
Distancia a cursos de agua	Molina, 2007. Sarricolea, 2009
T° emisión superficial	Arnfield, 2003 y Prashad, 2004

Fuente: Elaboración Propia.

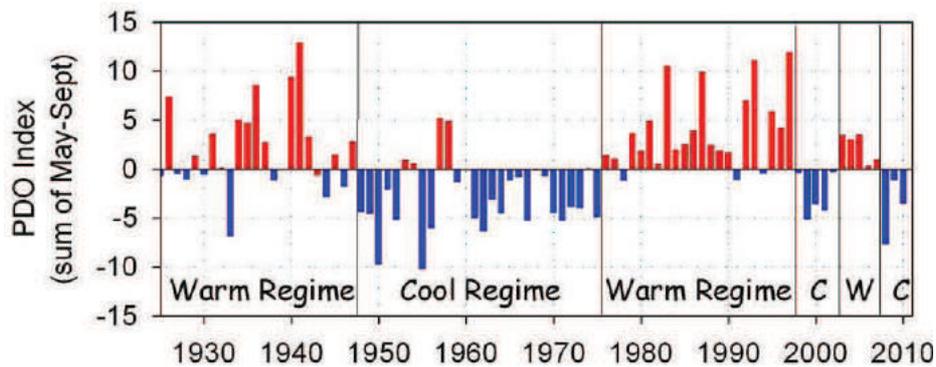
2.4 Características del clima de la zona central de Chile

Las condiciones climáticas de un lugar están determinadas por la interacción de fenómenos meteorológicos estudiados a diferentes escalas espaciales y temporales, desde los sistemas globales como grandes celdas de convección y circulaciones planetarias, hasta los efectos locales propios del relieve y la superficie terrestre, tales como circulaciones mecánicas y térmicas, expuestos en la literatura como brisas de valle-montaña, flujos anabáticos - catabáticos y nivel de turbulencia atmosférica.

El Anticiclón Semipermanente del Pacífico Sur es un factor esencial en el clima de Chile, ya que en el sector que enfrenta el territorio nacional corresponde a un centro de dispersión de masas de aire. Se asocian a él los vientos que soplan desde el océano hacia las costas de Chile; son los "vientos del oeste", predominantes en las zonas Central y Austral del país.

Un factor global relevante en Chile cuando se habla acerca de la interacciones océano-atmosfera son la Oscilación decadal del Pacífico (ODP) y El Niño-Oscilación Sur (ENOS). Una de las diferencias entre ambos es la escala temporal. La duración típica de las fases ENOS oscila entre 1 y 2 años, mientras que las fases de la ODP son del orden de 20 a 30 años. La Oscilación Decadal del Pacífico (ODP) consta de una fase positiva (o cálida) y una fase negativa (o fría), que ha sido descrita a partir del año 1900 por Mantua (1999), y que corresponde a un índice que se basa en las variaciones de la temperatura superficial del océano (figura 4).

Figura 4. Comportamiento Oscilación Decadal del Pacífico.



Fuente: Mantua et al., 1997.

El Fenómeno de El Niño se manifiesta cada cierta cantidad de años, manteniendo condiciones cálidas en el Pacífico ecuatorial y costas del norte de Chile, Perú, Ecuador y Colombia, que se asocian a una disminución de la presión atmosférica. El aumento de la temperatura superficial del agua marina inhibe la surgencia en la superficie del mar (afloramiento de aguas frías, ricas en microorganismos, desde las profundidades marinas), lo que provoca un aumento de la temperatura del aire en 1 a 2° sobre lo normal.

Frente al evento de El Niño, el anticiclón subtropical del Pacífico se debilita en el sector oriental (frente a Chile) disminuyendo sus efectos en la Zona Central y Norte Chico del país y facilitando el desplazamiento de los sistemas frontales que provienen de la región oeste del Pacífico, lo que actúa aumentando e intensificando la frecuencia de bandas nubosas frontales. Por esto, el elemento climático más afectado por un Fenómeno El Niño es la precipitación desde la III hasta la VII región del país, en que se experimenta un importante aumento en el número de días, la cantidad e intensidad del agua caída. De este modo la precipitación anual normal de Santiago, es de 312.5 milímetros, valor que aumenta al calcular el promedio de precipitaciones registradas durante los años Niño del siglo XX, que alcanza a 453.6 mm, 45% superior a la normal anual (calculado respecto a los 18 eventos niño registrados).

Di Castri y Hajek (1976), señalan que gran parte del territorio continental chileno posee un clima mediterráneo que se proyecta al norte hacia áreas que habían sido consideradas hasta el momento típicamente desérticas y al sur hacia territorios con fuertes influencias oceánicas. El clima mediterráneo se caracteriza no sólo por una dominancia invernal de la lluvia sino también por la existencia de sequía estival (Emberger, 1955¹). En la zona central de Chile las precipitaciones decrecen de la costa hacia el valle longitudinal, para aumentar nuevamente desde éste hacia la cordillera de los Andes. En Colina, y en menor grado en la zona de Santiago, existen áreas de clima más árido y con mayores fluctuaciones térmicas, que reflejan la penetración del clima de estepa algo continental que se presenta en la provincia de Aconcagua.

El Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI elaborado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile (2006) da cuenta de las tendencias experimentadas por las precipitaciones y temperatura a partir del año

¹ En Di Castri y Hajek (1976)

1930. (). Sobre la base de estudiar los cambios en la temperatura media a nivel de superficie durante la década de 1990 (Aceituno *et al.*, 1992; Rosenbluth *et al.*, 1997), se demostró que a partir de la década de 1940 o 1950 se observó un régimen térmico relativamente estacionario en Chile con excepción de la región Centro-Sur, donde se observó un marcado descenso de la temperatura media. Esta situación fue interrumpida por un aumento relativamente abrupto a mediados de la década de 1970.

En la región comprendida entre Santiago y Concepción se aprecian aumentos de $+0.05^{\circ}\text{C}/\text{década}$ y de $+0.18^{\circ}\text{C}/\text{década}$ en los promedios anuales de temperatura máxima y mínima, respectivamente.

Quintana (2004) muestra que la evolución de la precipitación en Chile, al sur de 30°S , está condicionada por una fuerte variabilidad en la escala de tiempo decadal, vinculada a cambios en la Oscilación del Sur (y de la frecuencia de eventos El Niño y La Niña) así como en las condiciones atmosféricas y oceánicas en toda la cuenca del Pacífico (Oscilación Decadal del Pacífico). En la región comprendida entre 30°S y 39°S se aprecia el predominio de una tendencia negativa hasta aproximadamente 1970. A partir de 1970, se apreció un aumento de la frecuencia de inviernos relativamente lluviosos que contribuyó a revertir la tendencia decreciente.

2.5 Investigaciones de Clima Urbano en la Ciudad de Santiago

Aranda y Romero en el año 1989 contribuyen de manera significativa al estudio del comportamiento climático de la ciudad de Santiago, localizada en la cuenca homónima, al identificar los hechos más importantes que caracterizan la topoclimatología de la ciudad,

- a) Su situación a 33° S. en el margen occidental de América del Sur, bajo condiciones anticiclónicas predominantes durante todo el año, con breves interrupciones asociadas a las lluvias frontales e irregulares entre los meses de mayo y septiembre, que determinan la existencia de una capa persistente de inversión térmica de subsidencia entre los 600 y 1 200 m.s.n.m, que se ve fortalecida por inversiones radiativas de superficie, en especial en los meses de otoño e invierno.

- b) El hecho de que la ciudad se ubique en el centro mismo de una cuenca cerrada, de entre 300 y 600 m. de altura, rodeada completamente por cadenas montañosas, resulta en la constante intercepción de las laderas con capa de inversión que impide el intercambio del aire fuera de los límites de la cuenca.

Por otro lado, los sistemas de vientos de esta atmósfera extraordinariamente estable están reducidos a los anticiclónicos débiles que soplan del SW y S a las brisas de mar a continente que logran penetrar por el valle aguas arriba y a los sistemas de vientos que soplan durante el día desde el valle a la montaña (anabáticos) y en dirección inversa en las noches y madrugadas (catabáticos). De la Cuadra (2003), aporta antecedentes respecto de la dirección de los vientos, estableciendo que durante la mañana y durante el día los vientos soplan desde el sector sur poniente (zona industrial Cerrillos) hacia la ciudad. Da cuenta además, que producto de las condiciones meteorológicas, en el verano aumenta la capacidad de ventilación de la cuenca (mayor velocidad del viento y menor potencia de la inversión térmica). En cambio, durante el invierno no se produce el efecto anterior, lo que provoca una recirculación de los contaminantes al interior de la cuenca.

- c) Una heterogénea morfología urbana que se localiza sobre el piedemonte y la llanura aluvial, conformada por el centro antiguo de alta densidad y

cañones urbanos, por barrios residenciales con superficies verdes ubicados en el área oriente y por extensas áreas marginales, urbanas e industriales, en que se alternan laderas desforestadas, sitios eriazos de suelo desnudo y calles sin pavimentar, localizados especialmente en los sectores S y SW.

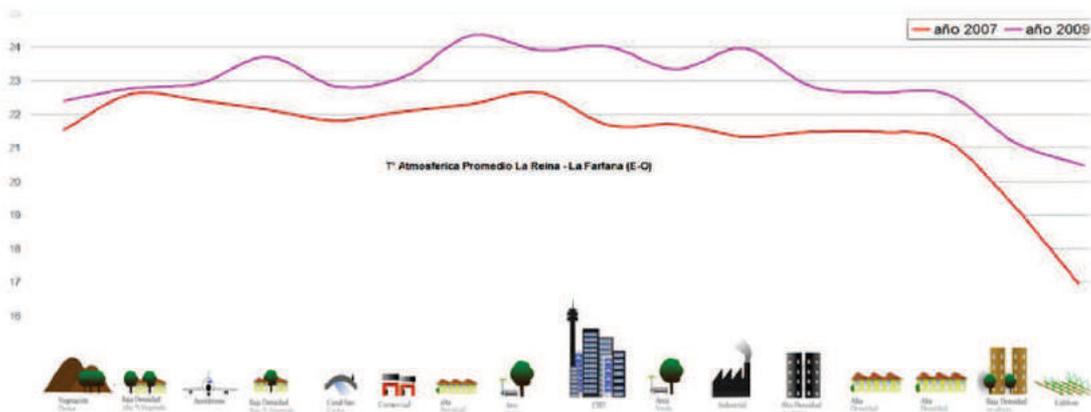
Estudios más recientes, como el de Molina (2007), demuestran la transformación de la ciudad en una verdadera Isla de calor urbana (ICU) durante el día. En el centro de la ciudad las temperaturas del aire son, en promedio, 4°C más cálidas que su entorno rural. Al mismo tiempo, se registran variaciones significativas de la temperatura del aire causadas por pequeños incrementos del porcentaje de coberturas de vegetación, hasta alcanzar un 40%. Sobre dicho porcentaje de cobertura, su influencia sobre los cambios en la temperatura del aire sería poco significativa.

Romero (2001) estableció que un 56% de la superficie de incremento urbano había aumentado su temperatura superficial entre 2 y 4°C en el periodo 1994 - 2001. Un 18% de la superficie urbana había aumentado su temperatura en más de 4°C. Luego, Molina (2007) y Sarricolea (2008), reconocieron la existencia de un patrón espacial similar en la distribución de las temperaturas de emisión superficial y de las temperaturas atmosféricas, ambas comandadas fuertemente por la distribución de los usos y coberturas del suelo de la ciudad de Santiago. Aun cuando el hallazgo anterior es significativo, es importante considerar que corresponden a datos de diferentes días de la misma época estival (verano del año 2007). Queda aún pendiente entonces el correlacionar los datos obtenidos por mediciones realizadas con termómetros instalados en lugares específicos de la ciudad y las temperaturas de emisión superficial registradas por los satélites u otros sensores remotos. Uno de los resultados obtenidos por los estudios de la isla de calor urbana el año 2007, establecía que producto del desaparecimiento de los paisajes naturales y las cubiertas vegetales que regulan las temperaturas

superficiales y del aire de la ciudad, se produce un proceso de calentamiento que localiza islas de calor en el borde occidental de Santiago en las primeras horas del día, que migran hacia el centro al mediodía y que se ubican en esa zona durante las noches.

El estudio llevado a cabo por Romero *et al.* (2008), da cuenta de que las temperaturas más altas del suelo y la atmósfera durante las mañanas son registradas en las comunas del NW de Santiago (Quilicura, Colina, Pudahuel y Maipú), mientras en la zona SW, las comunas de San Bernardo y Calera de Tango, mantienen temperaturas menores que son transferidas al centro de la ciudad a través de un corredor formado por el cono de aproximación del Aeropuerto de Cerrillos. La situación anterior cambia a partir del mediodía, momento en que las temperaturas del centro igualan primero, y luego superan, a las rurales. Las islas de calor se ubican desde esta hora cerca del centro histórico y las áreas comerciales que lo rodean (figura 5).

Figura 5. Gradiente Térmico durante la noche (22 hrs.) en la ciudad de Santiago



Fuente: Modificado de Molina 2007.

Si bien estos estudios son actualmente los únicos que describen las relaciones entre los patrones térmicos de la ciudad y los usos urbanos del suelo, constituyen

muestras de corto plazo, que más bien corresponden a las condiciones meteorológicas registradas los días de mediciones antes que a datos climáticos propiamente tales.

Las condiciones climáticas de las áreas naturales y rurales que rodean la ciudad deberían formar parte de los estudios de impacto ambiental de los planes reguladores metropolitanos y comunales y la mantención de rasgos climáticos favorables para la calidad ambiental y bienestar de la población deberían formar parte de los objetivos de sustentabilidad que toda ciudad moderna debe aspirar. Al interior de la ciudad, en las áreas densamente urbanizadas, las zonas para la creación de nuevos parques son limitadas y pueden llegar a ser muy costosas. Por ello, la urbanización actual implica la construcción en altura como la principal alternativa, sobre todo en las áreas centrales de la ciudad, que constituye por lo general el área donde la isla de calor se manifiesta con mayor intensidad. Los nuevos paradigmas de diseño deberían tomar en cuenta cómo la vegetación afecta el clima local y consecuentemente el uso de energía de los edificios, el confort térmico de la población y la calidad del aire. Lamentablemente, no existen instituciones y reglamentos específicos, como conceptos, modelos e indicadores, que acompañen estos nuevos esquemas de planificación.

2.6 Gestión Ambiental.

El ambiente es un sistema global, formado por la interacción de componentes naturales, construidos y socioculturales, que se está modificando históricamente por la acción del hombre y que rige y condiciona todas las posibilidades de vida en la tierra, en especial la humana, al ser su hábitat, su fuente de recursos y el receptáculo de sus desechos.

Las temáticas medio ambientales, desde sus inicios en la década del 70 y tal como las conocemos hoy día, incorporan una nueva relación entre sociedad y naturaleza, no como hechos aislados, sino que estrechamente interrelacionados e inscritos en un sistema mayor, no cerrado, que abarca las múltiples y complejas interacciones entre ambiente natural, ambiente construido y ambiente social. Los parámetros y los paradigmas convencionales ya no sirven. Hoy día tenemos que revisar nuestra relación con la naturaleza, la que sin frenar el desarrollo, ni perjudicar el crecimiento, pueda conjugar bienestar humano con respeto a los ecosistemas.

Es preciso un enfoque global y de largo plazo. Se necesita una mayor perspectiva, ya que no es posible seguir solucionando los problemas desde el inmediatez. La planificación se ha reducido a propuestas que no van más allá de períodos estrechos. Se tiene que proyectar a muchos años y por lo mismo, estar dispuestos a iniciar obras que no se alcanzarán a ver terminadas. Con una nueva visión importa atreverse a construir el presente y el futuro simultáneamente, sacrificando el éxito de una rentabilidad inmediata por soluciones más acordes con la supervivencia del planeta y de las futuras generaciones (Gross, 2005).

El concepto de Gestión Ambiental Local se entiende como la capacidad de un grupo de personas organizadas en un territorio para gestionar las medidas de conservación y protección al medio ambiente y lograr así un mejoramiento sostenido y equitativo en la calidad de vida de sus habitantes. La Gestión Ambiental Local involucra acciones que incluyen la formulación de políticas y de legislación, el diseño de instrumentos y la implementación de aspectos de administración, comprendiendo no sólo aquellas acciones materiales directas, sino todas las intervenciones en el ambiente (Olivos y Pedroni, 2005).

Otros autores ya han planteado lo que también sostiene Alcoforado *et al.* (2009) respecto de que la proporción de la población que vive en zonas urbanas está aumentando a un ritmo cada vez mayor. Lo anterior deriva en un aumento sostenido y creciente de la superficie que atenta sobre la sustentabilidad urbana, que según la autora debe garantizarse a fin de aumentar la calidad de vida de los habitantes y reducir los impactos que genera la ciudad fuera de los límites urbanos. Algunas de las características físicas de las ciudades están reguladas (calidad del aire, ruido, etc.); sin embargo, no existe un marco legal que pretenda asegurar un espacio de buena calidad en términos climáticos, aún más, es poco común encontrar normativas que de manera indirecta sostengan un mejoramiento del funcionamiento climático de la ciudad. Existen algunos buenos ejemplos en Suiza y Alemania que contienen en sus lineamientos para la planificación urbana investigaciones y reportes climáticos (Scherer *et al.*, 1999; Fehrenbach *et al.*, 2001; Thommes *et al.*, 2001; Baumüller *et al.*, 2005)².

Alcoforado *et al.* Plantean que una de las razones principales de que no se considere el aspecto climático se debe a que los datos meteorológicos “clásicos”, son por definición inadecuados para el estudio del clima a escala urbana (meso y micro climas según los autores); el 90% de los planes estudiados contiene solo los valores medios (precipitación anual total y temperatura media), y en los casos en que se incluyeron también mapas, sus escalas eran inadecuadas. Una razón adicional, consiste en la falta de conocimiento de los autores de dichos trabajos respecto de las características del clima urbano y de la forma en que estos afectan a favor o en contra la calidad de vida de los habitantes de las ciudades. A partir de 1992, Alcoforado (1992), Andrade (2003); Lopes (2003), Alcoforado & Andrade, (2006) y (2006), en conjunto con otros investigadores se ha dedicado a investigar el clima urbano de Lisboa, relevando los beneficios de considerar estos aportes en la determinación de lineamientos que deberían ser incluidos en los instrumentos

² En Alcoforado *et al.*, 2009.

de planificación urbana. Un aspecto importante es que estas directrices climáticas son de utilidad en los planes cuando se refieren a áreas cuyos límites son precisos y se encuentran identificados. Por lo anterior, se han construido para Lisboa zonas de respuesta climática homogénea, cuya ventaja es que surgen de acuerdo a “factores climáticos”, o rasgos urbanos que influyen sobre el clima, tales como la rugosidad y geometría de las construcciones. Se definen clases de ventilación climática que se cruzan en una matriz con los usos y coberturas del suelo.

La investigación revisada plantea medidas para reducir al mínimo los problemas climáticos referidos a la Isla de Calor Urbana y a la mala ventilación, que deben ser aplicables a escala de ciudad y suficientemente claras para ser leídas y comprendidas por los no especialistas.

Para las zonas de alta densidad urbana, que se caracterizan por no presentar espacios abiertos, se debe (1) evitar el aumento de la densidad construidas, (2) Asegurar que se mantenga una relación 1 a 1 entre la Altura de los edificios (H) / Ancho de las calles (W), (3) Incluir jardines en los techos para aumentar las superficies vegetadas, y (4) Se opte por colores claros y materiales de baja conductividad térmica. (Oke *et al.*, 1991; Doulos *et al.*, 2004)³.

Las medidas para las zonas de media y baja densidad urbana deben apuntar a: (1) mantener una relación 1:1 entre H/W, y (2) Crear áreas verdes de superficie pequeña y media. Se distinguen las zonas de igual densidad pero ubicadas topografías diferentes, como la meseta norte, donde el viento prácticamente no encuentra obstáculos, y se trata de un área sujeta a grandes presiones por la urbanización, y por lo tanto se debe apuntar a (1) evitar el aumento de la densidad de construcción (H/W inferior a 1), (2) Promover vías de ventilación al lado de las autopistas y, (3) Crear amplias áreas verdes.

³ En Alcoforado *et al.*, 2009.

A medida que avanza el desarrollo urbano, los planificadores deben estar conscientes de que la construcción de edificios en la ribera del río se transforma en un obstáculo a la penetración del aire fresco hacia el interior, y se recomienda que se creen corredores con baja altura (altura menor a 0,5 m. para evitar una reducción del viento superior a 0,3 m/s). Se proponen caminos de ventilación que deben mantenerse libres para permitir la circulación de los vientos predominantes hacia el centro de la ciudad. Para su ubicación se consideró: topografía, densidad de construcción y orientación.

Por último, respecto a las áreas verdes se plantea que se deben mantener las ya existentes, crear nuevas donde hay suficiente espacio, las que deben tener una estructura interna diversificada.

2.7 Datos meteorológicos puntuales y su representatividad espacial

En los estudios de clima urbano existe una primera complicación respecto al tipo de datos que sirven de base, ya que las mediciones de temperatura atmosférica, por ejemplo, provienen de diversas estaciones cuya localización es puntual, es decir representan condiciones atmosféricas propias de un lugar específico. Por otro lado, pueden corresponder a períodos de observación y registro distintos.

Lo primero que se debe resolver entonces es lograr que los datos sean validados y estandarizados para ser estadísticamente comparables. Esto ha sido abordado por muchos autores que han tenido que enfrentarse a problemas que causan inhomogeneidades tales como: cambios en los instrumentos de medición, de lugar y en el tiempo de medición, modificaciones en los métodos para calcular los valores medios y cambios en el entorno alrededor de la estación (Osés y Saura, 2004). Muchas veces estos factores derivan en problemas con los registros, datos anómalos o ausencia de éstos, para cuya resolución se han utilizado

comparaciones de estadísticas descriptivas tales como el promedio y la desviación y correlaciones simples entre los datos y estaciones vecinas (Moreira *et al.*, 2006).

Una vez que se cuenta con una serie de datos temporales comparables para las distintas fuentes es importante el transformar dicha información puntual dándole continuidad en el espacio. Para esto se acude a métodos de interpolación que ofrecen la ventaja de proyectar mapas o superficies continuas a partir de datos discretos (Villatoro *et al.*, 2008). Los métodos más simples se basan en la ponderación de cada valor por el inverso a la distancia al punto, asignando mayor peso a los valores más cercanos. En estos se incluyen el método inverso a la distancia (IDW) o el krigging ordinario (Sluiter, 2009). Respecto a este último, existen versiones que permiten introducir nuevas variables que representan la variación píxel por píxel, debiendo estar todas altamente correlacionadas. No obstante, se trata de procedimientos cuantitativos que no consideran las variaciones espaciales en los usos y coberturas de los suelos, que, como se ha indicado, constituyen importantes factores en las variaciones climáticas que se registran al interior de la ciudad.

La disponibilidad de las imágenes basadas en los satélites proporciona una perspectiva adicional para observar estos efectos urbanos sobre el clima local (Voogt & Oke, 2003; Beeson *et al.*, 2005). Por tanto el estudio de correlación entre datos satelitales y datos puntuales obtenidos a nivel de la atmósfera urbana representa un elemento útil para complementar los métodos de espacialización de datos meteorológicos y reconstruir series climáticas para varias aplicaciones (Fariás *et al.*, 2007).

Existen numerosos ejemplos de investigaciones que se basan en el uso de imágenes de satélite para llevar a cabo estudios de clima urbano. La utilización de imágenes del satélite AVHRR es bastante frecuente como lo establecen Voogt &

Oke (2003); asimismo el uso de imágenes Aster y SPOT es aún incipiente. Si bien el satélite Landsat no es el más comúnmente utilizado para estudios urbanos debido a su menor resolución espacial, presenta la ventaja de registrar imágenes termales desde la década de los 80, disponibles gratuitamente en línea. El uso de las imágenes de satélite ha permitido abordar las diferencias o gradientes térmicos de temperatura (ej. Carnahan & Larson, 1990), modelos de balance de energía (ej. Kim, 1992), distribución espacial de temperaturas de emisión superficial y cobertura vegetal (ej. Aniello *et al.*, 1995), patrones de temperatura asociados a los cambios de usos de suelo (ej. Lougeay *et al.*, 1996), patrones espaciales de temperatura y su relación con la morfología urbana (ej. Nichol, 1996), modelos de balance de energía de áreas urbanas usando imágenes de satélite (ej. Parlow, 1999), evaluación de la calidad del aire (ej. Wald & Baleynaud, 1999)⁴ y uso combinado de temperatura atmosférica y de emisión superficial (Beeson *et al.*, 2005).

En Chile se han hecho también estudio de clima urbano recurriendo a la información extraída de sensores remotos; fundamentalmente se ha trabajado con imágenes Landsat, calculando temperaturas de emisión superficial, cobertura vegetal y relacionando incipientemente estos factores con la temperatura atmosférica (Peña y Romero, 2006; Molina, 2007; Sarricolea, 2008).

⁴ Todos los ejemplos anteriores aparecen citados en Voogt, J. & Oke, T. (2003),.

CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1 Materiales

Se utilizará información extraída de fuentes bibliográficas (investigaciones, memorias, manuales, etc) y cartográficas preexistentes (por ejemplo, Proyecto OTAS 2002), así como también datos e informaciones resultantes del tratamiento digital de imágenes satelitales en Sistemas de Información Geográfica (Idrisi Andes y Arcgis 9.2), que comprenderán el análisis multiespacial y mutlitemporal de las imágenes seleccionadas, Además se utilizará un mosaico construido a partir de las imagenes color verdadero del satélite Quick Bird, año 2009, disponibles en Google Earth.

Información importante para el desarrollo de esta investigación corresponde a los datos meteorológicos de temperatura atmosférica, que serán extraídos de las campañas de mediciones realizadas por el Laborarlo de Medioambiente y Territorio del Departamento de Geografía de la Universidad de Chile, los días 20 y 21 de enero del año 2009, correspondiendo a 49 puntos móviles a los cuales se suman los datos de 10 estaciones fijas instaladas en la ciudad desde agosto de 2008.

Se incorporarán además los datos de las estaciones meteorológicas instaladas en la ciudad de Santiago, que pertenecen al Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA), a la Secretaría Regional Ministerial del Ministerio de Salud (Red MACAM), a la Dirección General de Aguas, y a todas aquellas instituciones que las poseen instaladas en la ciudad de Santiago y sus inmediaciones rurales, con acceso público y gratuito a los datos registrados.

3.2 Métodos

3.2.1 Información histórica

Se ha llevado a cabo un análisis climático inicial del área de estudio, considerando la evolución histórica a escala anual de la temperatura atmosférica de la ciudad a partir de los datos proporcionados por la estación meteorológica más antigua, que corresponde a la Quinta Normal. Así mismo, considerando el promedio de los últimos 30 años y su desviación estándar se pudo establecer si el año 2009 y su período estival (Diciembre a Marzo) correspondió a un año de comportamiento atmosférico normal, que es definido como aquel cuyos valores promedios no superan una Desviación Estándar. (Mantua *et al.*, 1997; Villarroel *et al.*, 2006).

También se analizan los factores regionales que regulan el clima de la Zona Central de Chile y la condición sinóptica de los días considerados en el estudio, para lo cual se utilizarán los informes realizados por el Departamento de Geofísica y la información proporcionada por el Centro Nacional del Medioambiente (CENMA), ambos pertenecientes a la Universidad de Chile y de la Red Macam de la Secretaría Regional Ministerial del Ministerio de Salud.

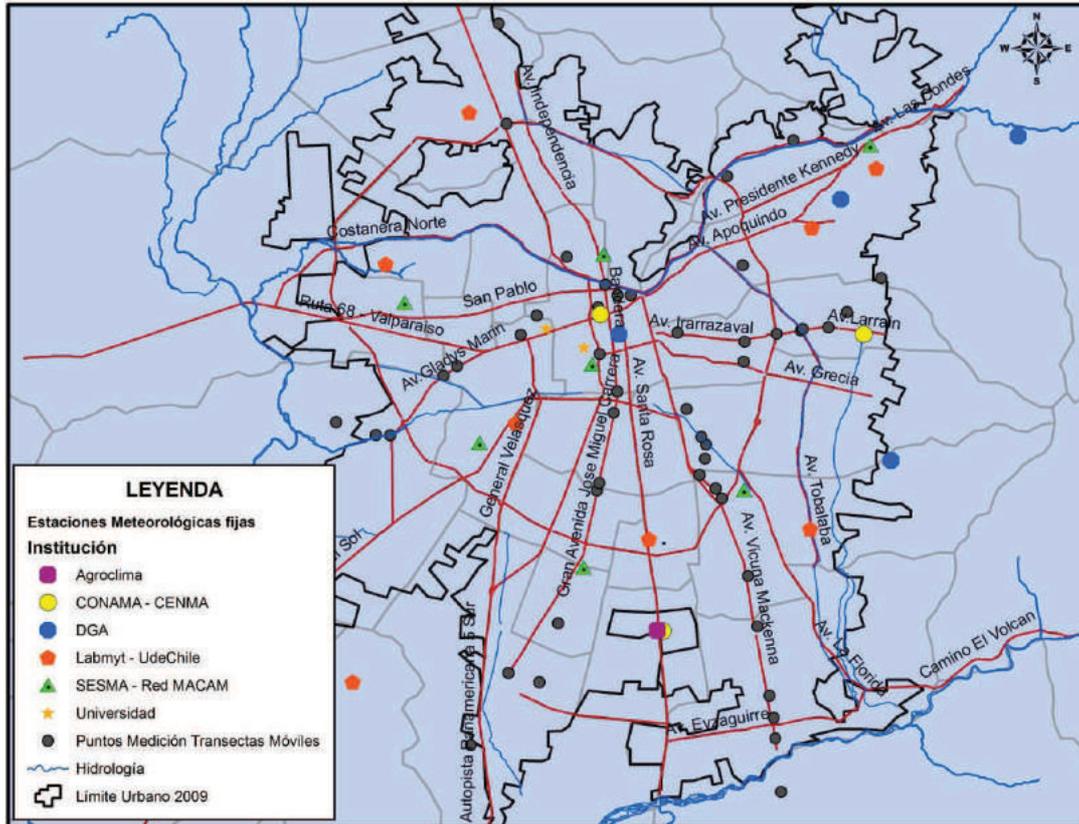
3.2.2 Análisis de la relación entre la temperatura atmosférica, cobertura vegetal, superficies impermeables, relieve (altura y exposición), rugosidad urbana, distancia a los cursos de agua, y temperatura de emisión superficial.

Los datos de temperatura atmosférica utilizados para el estudio de la distribución térmica para el año 2009 provienen de varias fuentes: Se encuentran disponibles doce estaciones meteorológicas fijas del Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA) y una del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, vigente desde el año 1999, ocho pertenecientes al Servicio de Salud Metropolitano del ambiente (Red MACAM), una del Departamento de Física de la Universidad de Santiago de Chile, cuatro pertenecientes a la Dirección General de Aguas y

finalmente, cuatro instaladas durante el año 2009 por el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA), disponibles en la Red Agroclima (figura 6).

Para los días 20 y 21 de enero de 2011, se cuenta con los datos obtenidos en las transectas móviles llevadas a cabo a tres horas del día, mañana (10:30 hrs.), mediodía (14:30 hrs.) y noche (20:30 en invierno y 22:00 hrs. en verano). Corresponden a 49 puntos de medición de temperatura atmosférica, dirección y velocidad del viento y humedad relativa del aire, que se encuentran distribuidos en la ciudad de Santiago, a lo largo de seis 6 transectas que recorren la ciudad de Santiago desde áreas rurales ubicadas al sur (Pirque y San Bernardo) y Oriente (La Reina) hasta áreas con similares características al Poniente (Maipú) y norte de la ciudad (Lo Barnechea y Quilicura) (figura 6). La ubicación de estos puntos fue determinada en verano del año 2007 (cuando el Laboratorio de Medioambiente y Territorio de la Universidad de Chile llevó a cabo la primera campaña de medición en Santiago) en función de los diferentes usos y cobertura de los suelos. Las mediciones han sido llevadas a cabo

Figura 6. Localización de las estaciones fijas y transectos móviles de medición de temperaturas en la ciudad de Santiago.



Fuente: Elaboración propia.

Los datos de las diferentes fuentes deben ser estandarizados, validándolos e identificando datos anómalos con el objeto de hacerlos comparables. Se evalúa la consistencia de las series de temperatura de todas las estaciones reunidas, considerando los criterios siguientes:

- Consistencia Interna: Se refiere a la regularidad del comportamiento de los datos de cada estación por separada, estableciendo si existen comportamientos anómalos.
- Consistencia Externa: Se establece comparando el comportamiento de series de datos de estaciones vecinas, ya que, aun cuando los valores pueden ser diferentes, existe un comportamiento que debe ser similar entre las estaciones de medición.

- Consistencia Física: Se evalúa considerando el comportamiento temporal de las variables, por ejemplo, ocurrencia de máximas y mínimas posibles de acuerdo a cada estación del año y también el comportamiento de la temperatura atmosférica respecto a otros parámetros relacionados tales como la humedad relativa del aire.

Los datos anómalos son eliminados de las series de datos y son rellenos los datos llevando a cabo el procedimiento planteado por Moreira *et al.* (2006), quién señala que un dato faltante corresponde a la media aritmética de los valores que se tengan para los dos días anteriores y posteriores que se registran en una estación meteorológica a la misma hora. Para los días utilizados en este trabajo esto no fue necesario ya que se contaba con todos los registros y estos no presentaban problemas.

Análisis de imágenes satelitales

Durante el año 2009 existen disponibles 11 imágenes del satélite LANDSAT 5 puestas a disposición por el Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales (INPE) de Brasil. Dos de ellas corresponden al período estival y fueron captadas el 12 de febrero y el 16 de marzo. Se escogió la primera, ya que se encuentra en mejores condiciones respecto a su visibilidad. Adicionalmente se cuenta una imagen ASTER del 4 de febrero proporcionada por el Helmholtz Centre for Environmental Research – UFZ, Leipzig, Alemania.

Se realizó un pre procesamiento a las imágenes satelitales que consistió en llevar a cabo en primer lugar correcciones atmosféricas y topográficas, la primera consiste en disminuir el efecto que los gases atmosféricos o neblina (haze) causan sobre las imágenes (Tagstad, 2000), afectando principalmente su contraste, y la segunda, permite compensar las diferencias de iluminación solar, debidas a la

variación altitudinal del terreno (Riaño *et al.*, 2000); las correcciones descritas fueron aplicadas a todas las bandas menos a la termal que corresponde a la banda número 6. Posteriormente se llevo a cabo una corrección geométrica a todas las bandas, incluida la banda 6, que corresponde a la georreferenciación, proceso a través del cual se logra el posicionamiento espacial mediante la asignación de coordenadas verdaderas asociadas a un sistema de coordenadas y datum determinados. La imagen ASTER cuenta con correcciones atmosféricas y topográficas previas, llevadas a cabo en su fuente de origen y sólo se ajustó su georreferenciación.

Selección y obtención de variables relacionadas

Las variables consideradas fueron seleccionadas a partir de la revisión bibliográfica (tabla 1), considerando la opinión de diferentes autores, que las identifican como elementos que poseen relación con el comportamiento de la temperatura atmosférica en la ciudad:

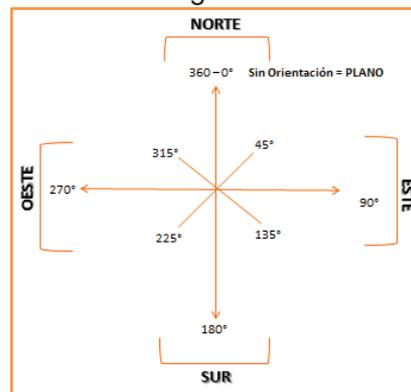
Tanto los porcentajes de cobertura vegetal como los de impermeabilización se obtuvieron a partir de una clasificación supervisada a escala de sub píxel de las imágenes satelitales con un clasificador blando que entrega un grupo de valores probables sobre el grado de pertenencia de cada píxel a una de las clases.

De este modo se determinó, por una parte, el porcentaje de la superficie que se encuentra cubierto de vegetación y, por otra, que proporción se encuentra cubierto por usos que inhiben la infiltración de las aguas de lluvia, como techos, estacionamientos, vías de transporte, etc.

A partir de las curvas de nivel, con equidistancia de 50 metros, que proporcionan información acerca de la altura a través de isocurvas, se obtuvo un modelo digital de elevación (DEM) en el programa ArcGis, que expresa la altura de manera

continúa en el espacio, atribuyendo información píxel por píxel. Así mismo, el DEM es la base que permitió calcular la orientación, esto es, la posición relativa de las laderas, expresada en grados (figura 7), que corresponden a los diferentes puntos cardinales:

Figura 7. Clasificación de la orientación en grados.



Fuente: Elaboración Propia.

La base de la cobertura digital de los cursos de agua presentes en el área de estudio fue extraída del Proyecto de Ordenamiento Ambientalmente Sustentable para la Región Metropolitana, Proyecto OTAS del año 2002, y posteriormente actualizada a partir de un mosaico construido con imágenes de Google Earth del año 2009. La cobertura fue importada en el programa IDRISI Kilimanjaro y procesada en el módulo DISTANCE, a partir del cual se obtuvo la distancia en metros de cada píxel del área de estudio con respecto a los cursos de agua presentes.

La rugosidad urbana está referida a la altura de las edificaciones. Esta información proviene del Servicio de Impuestos Internos del año 2008, que corresponde a la altura promedio por manzana y que, debido a la escala del estudio, fue clasificada en rangos de altura.

La temperatura de emisión superficial de la imagen Landsat fue calculada en el programa IDRISI a partir del procesamiento de su banda termal, número 6, se calcularon los valores de radiancia a partir de la banda termal y se consideró también el valor de emisividad de los objetos que conforman la superficie terrestre. El cálculo se llevó a cabo en el programa IDRISI, en su módulo Thermal, incorporando una emisividad inicial de 0.98 (Guerra, 2009).

La imagen ASTER contaba ya con los resultados del cálculo de temperatura de emisión superficial desde su fuente de origen, quienes la obtuvieron siguiendo la metodología planteada por Wong *et al.*, 2009, que consiste en obtener una imagen de brillo a partir de la banda termal, y luego el cálculo del valor de emisividad de cada uso y cobertura de suelo. El valor de temperatura superficial se obtiene de manera automática en el programa ENVI, en su módulo Thermal Atm Correction. Los resultados deben ser transformados a grados celcius.

Finalmente, para conocer la distribución espacial de la Temperatura Atmosférica a escala diaria, se aplicó una interpolación por hora, considerando los datos puntuales de las distintas estaciones fijas distribuidas en la ciudad, a través del método Kriging, donde los pesos asignados a los puntos muestrales se determinan por la dirección y la distancia con respecto a otros puntos conocidos (Eastman, 2003).

La interpolación se llevó a cabo a las 11 am., 14 y 22 hrs. los días 4 y 12 de febrero, que corresponden a los días con que se cuenta con imágenes satelitales, a partir de las cuales se obtuvo la temperatura de emisión superficial, la cobertura vegetal e impermeabilización. Asimismo, se interpolaron los datos de las estaciones fijas el 21 de enero, día en que se realizaron transectas móviles en la ciudad, incluyendo 49 puntos que servirían para la validación del modelo.

Finalmente, se interpolaron los datos de las 9, 16 y 22 horas., del 20 y 21 de enero, días en que se construyó el mapa térmico de la ciudad.

3.2.3 Desarrollo de un modelo espacial de distribución de la temperatura atmosférica en verano.

Al poseer datos atmosféricos horarios fue posible considerar para los días 04 y 12 de febrero la temperatura atmosférica más próxima a la pasada del satélite. El satélite Landsat pasa por Chile a las 11:30 AM, y el satélite ASTER lo hace a las 10:51 AM. Por ello, se optó por considerar la temperatura registrada a las 11 de la mañana. Para ambos días se consideró también la temperatura atmosférica de las 14:00 y 22:00 hrs. De esta forma, resultó posible conocer el comportamiento espacial de las temperaturas en tres momentos del día y la existencia e intensidad de la isla de calor urbano, durante las primeras horas de la mañana, cuando se registra menor radiación solar, a la hora de mayor insolación, y finalmente, 2 o 3 horas después de la puesta de sol, cuando los materiales de la ciudad, liberan el calor que han almacenado durante todo el día.

La existencia de correlación lineal entre dos variables que presentan covariabilidad espacial, permite utilizar la información proporcionada por una de ellas para estimar con mayor precisión la segunda. Por ello, se analizaron las correlaciones existentes entre los datos de temperatura de emisión superficial y los ocho factores considerados, con el objetivo de reconocer aquellos que inciden sobre el comportamiento térmico, definiendo parámetros espaciales que dirijan en la última etapa la interpolación de la información puntual de temperatura atmosférica de las estaciones a través de un modelo de regresión.

Previo al análisis de correlación, se analizó la normalidad de distribución de los datos de cada uno de los factores, determinando así el test estadístico que debía ser aplicado. Debido al número reducido de la muestra (n: 29), se optó por utilizar el test de Shapiro – Willks.

Para utilizar estadística paramétrica se requiere que:

- a) Ambas variables procedan de una muestra aleatoria de individuos.
- b) Al menos una de las variables tenga una distribución normal (o de Gauss), en la población de la cual procede la muestra.

En aquellos casos en que la distribución de los datos fue normal, el test de correlación utilizado fue el Coeficiente de Correlación de Pearson, y en los restantes, se aplicó el de Spearman.

Ambos coeficientes permiten evaluar si existe relación lineal entre dos variables X e Y, empleando un parámetro que mide la fuerza de asociación entre ambas. La medida de asociación utilizada entre dos variables o factores es “r” o Coeficiente de Correlación Lineal, parámetro que se mide en términos de covarianza de X e Y.

Los resultados del coeficiente de correlación significan lo siguiente:

- Si $R = 1$, existe una correlación positiva perfecta entre X e Y
- Si $R = -1$, existe una correlación inversa perfecta entre X e Y
- Si $R = 0$, no existe correlación lineal, pudiendo existir otro tipo de relación
- Si R se encuentra entre 0 y -1, existe correlación inversa, mayor cuanto más se aproxime a -1.
- Si R se encuentra entre 0 y 1, existe correlación positiva mayor cuanto más se aproxime a 1.

Los datos atmosféricos provenientes de las distintas fuentes estudiadas se presentan como puntos o áreas en el espacio, razón por la cual, un último paso para obtener la distribución de las temperaturas en la ciudad es llevar a cabo su interpolación espacial. Con el objeto de estimar los valores desconocidos y dar continuidad espacial a la información, se aplicó un Modelo de Regresión Múltiple,

que permitió incorporar factores adicionales a la temperatura atmosférica. El resultado obtenido da cuenta entonces de la variabilidad espacial de cada píxel que conforma la imagen.

Los factores y elementos climáticos no se encuentran relacionados con una sola variable. Y por lo tanto, los investigadores han incorporado el uso de la correlación y regresión múltiple para obtener una explicación más completa de los fenómenos y sus causas de variación espacial. La regresión múltiple o multivariada es un método estadístico caracterizado por la existencia de una variable dependiente “Y”, cuyo comportamiento es explicado como una función lineal de distintas variables independientes (Aguayo y Lora, 2005). Estas relaciones, generalmente establecen la medida en que una variable dependiente es influenciada por una o más variables independientes.

Este trabajo consideró la ecuación establecida por McGrath (1975):

$$Y = \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \epsilon$$

Donde,

Y; representa la variable dependiente,

X1, X2, y X3; simbolizan las variables independientes.

β_1 , β_2 , y β_3 ; denotan los coeficientes Beta o coeficientes de regresión parciales constantes, los cuales representan la magnitud del cambio en la variable dependiente que resultan de las transformaciones de las variables independientes, o, en otros términos, la contribución única de cada variable independiente (Mcgrath, 1975; Bryman & Cramer, 1994).

ϵ ; indica la proporción de la varianza que no es explicada por las variables independientes incluidas en la ecuación.

La ecuación de regresión múltiple se obtuvo en el Programa de Estadísticas SPSS Versión 18 a través del tipo de modelo Introducir, e incluyó aquellos factores que

estuviesen correlacionados significativamente con la temperatura atmosférica. Inicialmente se había considerado construir un único modelo que sirviese para construir el mapa de temperaturas de las diferentes horas del día; sin embargo, debido el hecho de durante el día varía la influencia de los distintos factores sobre el comportamiento de la temperatura, se construyeron tres modelos, para la mañana, tarde y noche.

El mapa de distribución de temperaturas atmosféricas se realizó para la mañana, tarde y noche de los días de realización de transectas móviles (20 y 21 de Enero de 2009).

Validación del modelo de regresión

Para la validación del modelo de regresión se consideró el valor R, que corresponde a la proporción de la varianza explicada por el modelo. Este valor varía entre cero y uno y lo óptimo es que tienda a uno. Sin embargo, valores sobre 0,75 son aceptables. Se aplicó también la validación cruzada, que es al igual que la anterior, un procedimiento estadístico que se lleva a cabo dividiendo aleatoriamente la muestra en dos grupos. De esta forma, se obtienen dos modelos con el fin de compararlos estimando la ecuación de regresión de cada una de las submuestras, y calculando su coeficiente de correlación R. La diferencia entre el cuadrado de ambos coeficientes se denomina índice de reducción en la validación cruzada (Molinero, 2002).

Finalmente se llevó a cabo el Diagnóstico del Modelo, que consiste en comparar los valores observados y los valores estimados por la ecuación de regresión, a través del residuo que surge de la diferencia entre ambos y que da cuenta de la proporción de la varianza de los datos que no es explicada para cada unidad de observación.

El diagnóstico se llevó a cabo con los puntos de las transectas móviles realizadas el 20 y 21 de enero de 2009, y por lo tanto con valores observados que no habían sido considerados en la construcción del modelo y por lo tanto, además de validar el modelo en sí, permitían dar cuenta de la posibilidad de utilizar sólo los datos de las estaciones fijas para construir un mapa térmico, sin necesidad de llevar a cabo campañas de medición periódicas.

3.2.4 Análisis de la estructura termal urbana, estableciendo su relación con las Zonas Termales (ZT) para el año 2009.

Los usos y coberturas del suelo se expresan en tipologías de zonas termales, identificadas y clasificadas por Irarrázaval (2011), mediante una fotointerpretación de la composición color verdadero de imágenes Quick Bird disponibles en el programa Google Earth, utilizando como base la clasificación elaborada por Stewart & Oke (2009) (tabla 2). Stewart & Oke construyen una tipología de clasificación de usos y coberturas basada en el comportamiento termal, y para esto consideran variables de diseño urbano como la densidad de construcción y la altura, y variables ambientales como el porcentaje de cobertura vegetal, estos autores han comprobado que las zonas reconocidas tendrían un comportamiento homogéneo respecto de su temperatura.

En la ciudad de Santiago se incluyen algunas tipologías intermedias que resultan adecuadas al trabajar en la ciudad de Santiago. El trabajo de Irarrázaval (op.cit) cruza la ciudad de Santiago en un transecto de oriente a poniente.

Las diferentes zonas termales fueron relacionadas con la distribución promedio de las temperaturas atmosféricas durante la mañana, tarde y noche.

Tabla 2. Tipología de Zonas Termales.

Stewart & Oke, 2009	Irarrázaval, 2011	CODIGO
Compact Highrise	Alta densidad de gran altura	B1
	Alta densidad de media y gran altura	B1/B2
Compact Midrise	Alta densidad de media altura	B2
	Alta densidad de baja y media altura	B2/B3
Compact Lowrise	Alta densidad de baja altura	B3
Open-set Highrise	Baja densidad de gran altura	B4
	Baja densidad de gran y media altura	B4/B5
Open-set Midrise	Baja densidad de media altura	B5
	Baja densidad de media y baja altura	B5/B6
Open-set Lowrise	Baja densidad de baja altura	B6
Extensive Lowrise	Extensivo de baja altura	B7
Sparsely Developed	Urbanización dispersa	B9
High-energy Industrial	Industrial	B10
	Cobertura arbórea compacta	N1
	Cobertura arbórea dispersa	N2
	Matorral y arbusto	N3
	Cobertura vegetal rasante	N4
	Suelo desnudo	N5

Fuente: Elaboración Propia a partir de Irarrázaval 2011.

Luego, para resolver si existen diferencias significativas entre las Zonas Termales respecto de su temperatura atmosférica se aplicó el test de ANOVA, en el programa PASW Statistics 18 (SPSS 18). Como en pasos anteriores, se definió primero la condición de normalidad de las variables a través del test de Shapiro – Wilk.

El test ANOVA se aplica cuando se tiene variable dependiente cuantitativa, y se quiere ver su relación respecto a varias variables independientes cualitativas denominadas factores. En este caso la primera de ellas corresponde a la temperatura atmosférica, mientras que los factores son resumidos en las Zonas

Termales.

Cuando el resultado final del test, resulta significativo, únicamente se puede determinar que al menos un subgrupo del factor considerado es distinto de los demás, sin especificar cuál es ese subgrupo concreto. Ante ello surge una nueva pregunta que consiste en saber entre qué clases existen dichas diferencias significativas respecto de la varianza de sus datos. Ello se resuelve aplicando un Post Test, ante de los cual debe considerarse el cumplimiento del supuesto que existe homogeneidad en las varianzas. Para esto se aplica el test de Levene, que realiza una comparación de medias para estimar la homogeneidad de las varianzas. El resultado entrega la significación estadística, o valor “p”. Cuando ese valor “p” es significativo ($p < 0,05$) se debe dudar de la homogeneidad de las varianzas.

Finalmente, se utilizó un post test que permitiera, a partir de muestras aleatorias, comparar la probabilidad de diferencia o similitud en la varianza entre las diferentes zonas termales, esto es llevado a cabo por pares. Si se asume homogeneidad de las varianzas en el paso anterior, al aplicar el test de Levene, se utilizara el post test denominado HSD de Tukey y si ocurre lo contrario, se utilizara la prueba C de Dunett, ambas se encuentran en el programa SPSS. En ambos casos, uno de los resultados obtenidos es el intervalo, si entre el límite inferior y superior existe el valor 0, no se puede asumir que exista diferencia entre los grupos, en este caso zonas climáticas, y por el contrario, en aquellos casos donde no se cruce dicho valor, se puede establecer que existen diferencias significativas respecto del promedio y varianza de los datos de temperatura atmosférica.

CAPITULO IV. RESULTADOS

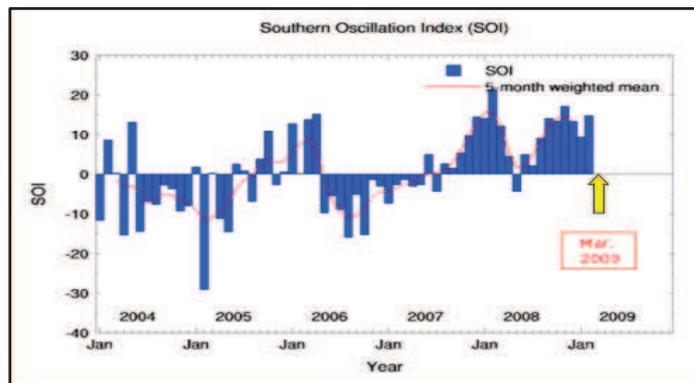
4.1 Aspectos Climáticos

Según lo establece el informe elaborado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, que analiza la evolución de los factores climáticos de gran escala, el semestre primavera – verano 2008 – 2009 fue anormalmente cálido y seco en la región central y centro – sur del país. Esta condición estuvo asociada a un patrón anómalo de circulación atmosférica que favoreció el fortalecimiento y expansión hacia el sur del anticiclón subtropical del Pacífico suroriental, así como un desplazamiento hacia el sur de los sistemas frontales. La condición anormalmente cálida fue más intensa durante marzo.

4.1.1 Sistema océano-atmósfera en el Pacífico ecuatorial.

Durante enero y febrero de 2009 la Oscilación del Sur (OS) continuó en la fase positiva (figura 8), con valores comparables a los observados durante los meses finales de 2008.

Figura 8. Oscilación del sur entre enero 2004 y enero 2009.



Fuente: Departamento de Geofísica, 2009.

Se apreció, en el comportamiento de los vientos alisios, la persistencia de una componente del Este anormalmente intensa durante el semestre primavera – verano, situación consistente con las condiciones del evento frío de La Niña que comenzó su desarrollo durante el último trimestre de 2008.

4.1.2 Aspectos climáticos en Chile.

El primer trimestre del año 2009 se caracterizó por una condición de déficit pluviométrico en la región centro-sur del país (entre Concepción y Puerto Montt) particularmente notoria durante enero y marzo.

Durante enero y marzo se registraron condiciones anormalmente cálidas, particularmente en la zona central y sur del país. Lo anterior significó que el promedio mensual de la temperatura máxima diaria haya superado en más de 2°C el promedio climatológico entre Santiago y Valdivia.

En la región central del país, la condición más extrema respecto de la evolución diaria de las temperaturas extremas diarias ocurrió en marzo, cuando en forma persistente se registraron anomalías superiores a +2.0°C en el régimen de temperatura máxima diaria.

La circulación atmosférica en el hemisferio sur durante el primer trimestre de 2009 estuvo caracterizada por el predominio de anomalías positivas de altura geopotencial y de presión a nivel del mar en latitudes subtropicales y latitudes medias, en contraste con anomalías negativas en altas latitudes (anexo 1). El mes de enero se presentó en fase positiva, lo que se asocia a la existencia de dorsales que se caracterizan por cielos despejados y cálidas temperaturas, correspondiéndose además con la fase La Niña aun presente. El sistema anterior disminuyó su intensidad durante el mes de febrero, encontrándose al centro de la escala, para volver a presentar valores positivos en el mes de marzo, que si bien

ocupó menor superficie, alcanzó la zona central y centro sur del país, provocando una situación de alta calidez. Lo anterior generó una situación que favoreció durante todo el trimestre enero – marzo 2009 el fortalecimiento y expansión hacia el sur del anticiclón del Pacífico suroriental así como un desplazamiento anómalo hacia el sur de los sistemas frontales, y por lo tanto el déficit pluviométrico ya comentado en el sur del país (Departamento de Geofísica, 2009).

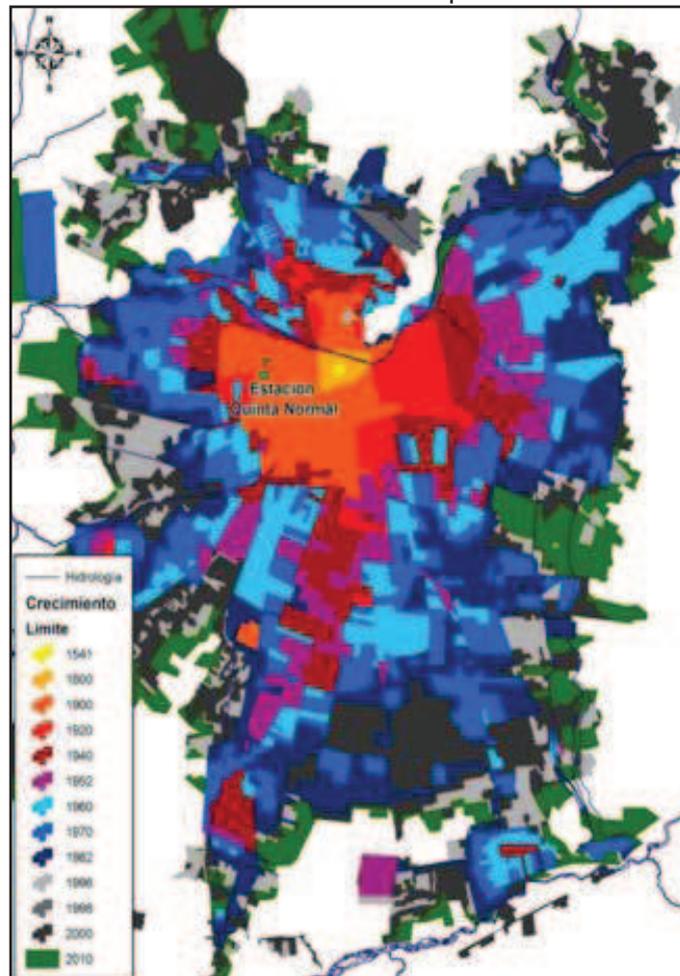
4.1.3 Condiciones en la ciudad de Santiago.

Tendencia Temperatura Atmosférica a partir del año 1880 en Santiago

Se cuenta con registros de temperatura atmosférica para la Estación Quinta Normal, perteneciente a la red de estaciones de la Dirección Meteorológica de Chile, que corresponde al servicio meteorológico oficial del país, fundado en 1884. La figura 9 muestra la localización relativa de la estación Quinta Normal respecto a la ocupación urbana de los suelos. En sus inicios se encontraba fuera de los límites urbanos, cambiando su condición en el período comprendido entre los años 1900 y 1920 cuando fue absorbida por la ciudad, quedando ubicada en el centro de la misma. Sin embargo, la Quinta Normal ha mantenido siempre su condición de parque, caracterizada por una alta proporción de superficie vegetada.

La figura 10 muestra los promedios anuales de temperatura del aire a partir de 1862, iniciándose en el año 1919 el monitoreo en manera regular, lo que permite contar con casi 100 años de información continua. El comportamiento de la temperatura presenta pulsos que describen puntos de inflexión, altos y bajos, que difieren en general en 1°C. El valor máximo del periodo se registró en el año 2008 (evento La Niña), con 16,3°C. La línea de tendencia general muestra un aumento en las temperaturas promedio de 1,5°C aproximadamente.

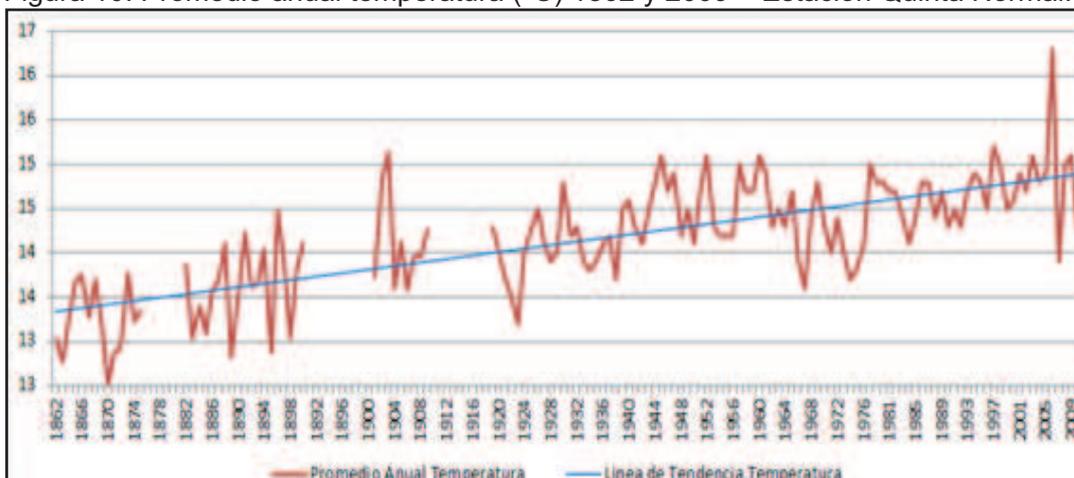
Figura 9. Localización estación Quinta Normal v/s Expansión Urbana.



Fuente: Elaboración propia a partir de base digital proporcionada por el Observatorio de Ciudades de la Pontificia Universidad Católica.

Del análisis de la información no es posible detectar con claridad el efecto que puede haber provocado la expansión física que significó la incorporación del sector de la Quinta Normal al interior del límite urbano entre los años 1900 y 1920. Sin embargo, resulta relevante el aumento de 1,5°C a lo largo del período, y que antes de 1920 alcanzaba sólo a 0.5°C de aumento.

Figura 10. Promedio anual temperatura (°C) 1862 y 2009 – Estación Quinta Normal.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de los anuarios meteorológicos de la Dirección Meteorológica de Chile.

En el caso particular del año 2009 respecto a las temperaturas registradas en los últimos 30 años (tabla 4), es posible determinar que tanto el promedio de temperaturas del período estival como el promedio anual del año presentan anomalías de +0.4 respecto al periodo climatológico. Adicionalmente, es posible señalar que, en ambos casos, se encuentra entre el promedio y una desviación estándar, situándose como un año de comportamiento normal.

Tabla 4. Comportamiento promedio anual y estival año 2009 respecto a últimos 30 años.

	Promedio 30 años	Desviación estándar	Promedio año 2009
Anual	14,7	0,42	15,1
Verano (diciembre-Marzo)	20,5	0,41	20,9

Fuente: Elaboración propia.

Temperatura año 2009.

El comportamiento de la temperatura del aire durante el año 2009 se analiza considerando los promedios diarios de 15 estaciones meteorológicas ubicadas en la Región Metropolitana (figura 11). A pesar de su localización diferencial, que incluye algunas estaciones instaladas fuera del área urbana, el comportamiento

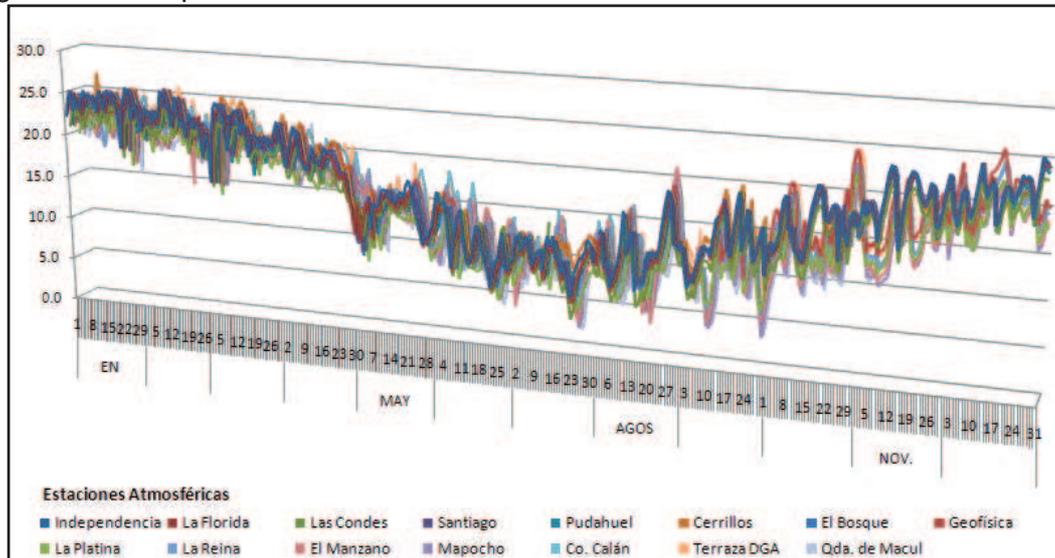
temporal es similar.. Las estaciones difieren en los extremos de los valores registrados, pero no en sus tendencias.

En todas las estaciones meteorológicas consideradas se aprecia claramente la estacionalidad de los registros, propio de los ciclos mensuales de temperatura esperados para Chile Central. Los mayores promedios de temperatura diaria se registran en los meses de Diciembre, Enero y Febrero, observándose un sostenido descenso a partir de Abril, ubicando los promedios más bajos en los meses de Junio y Julio. Se observan además, oscilaciones térmicas diarias relevantes en todas las estaciones meteorológicas, siendo menores en verano. .

Los valores promedios de temperatura observados para el período estival diciembre 2008-marzo 2009 asocian anomalías positivas respecto al promedio climatológico de los últimos 30 años, en concordancia con los informes elaborados por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile para ese período, que establecen que fue anormalmente cálido y seco en la región central y centro – sur del país, condición considerada anómala y que estuvo asociada a un patrón de circulación atmosférica que favoreció el fortalecimiento y expansión hacia el sur del anticiclón subtropical del Pacífico suroriental y de los sistemas frontales, condición anormalmente cálida particularmente severa durante marzo.

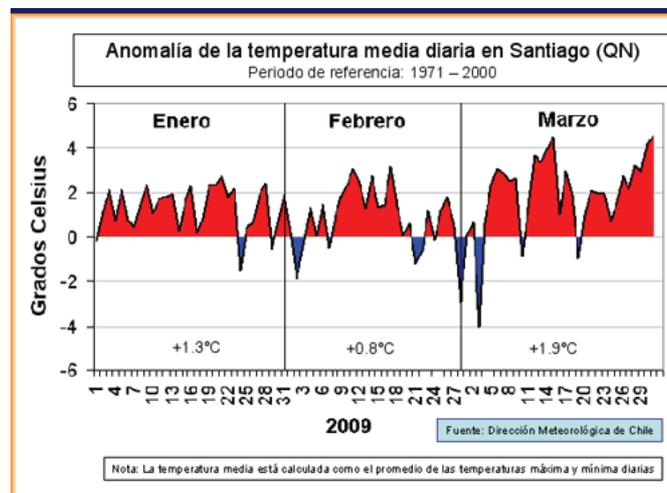
En Santiago, la condición cálida también se intensificó durante marzo cuando el promedio de temperatura media en la estación Quinta Normal excedió casi en +2.0°C el promedio climatológico (figura 12). El valor máximo absoluto fue 34.8 °C, y se observó el 11 de febrero.

Figura 11. Temperatura atmosférica diaria año 2009.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 12.



Fuente: Departamento de Geofísica Universidad de Chile, 2009.

Comportamiento meteorológico trimestre enero-marzo, 2009.

Comportamiento de la Temperatura del aire.

Los ciclos horarios de temperatura para los meses de enero, febrero y marzo (anexo 2) fueron analizados a partir de los datos de tres estaciones de la Red de

vigilancia de calidad del aire (Red MACAM) perteneciente a la Autoridad Sanitaria Región Metropolitana, localizadas al poniente (Pudahuel), centro (Independencia) y Oriente (Las Condes). Los ciclos diarios promedios mensuales de temperatura muestran un comportamiento similar, con diferencias de alrededor de 2°C entre las estaciones de Independencia y Las Condes, registrando la primera valores más altos (anexo 3). El comportamiento horario de la temperatura describe un patrón más regular durante los meses de enero y febrero, mientras que la oscilación diaria es de aproximadamente 15°C, con aumentos y disminuciones regulares tanto de la máxima como la mínima; prácticamente todos los días registran una máxima superior a 30°C. El mes de marzo, en el otro extremo, representa un patrón menos regular, con mayor variabilidad interdiaria.

Comportamiento de la dirección y velocidad del viento.

El comportamiento horario del viento muestra claras diferencias entre las tres estaciones consideradas en lo que respecta a la velocidad (m/seg) y dirección observadas. Al analizar los valores horarios de velocidad del viento, se observa un comportamiento diario permanente (anexo 4), existe un aumento que alcanza un máximo durante la tarde, entre las 15 y 18 hrs. la velocidad del viento comienza a disminuir a media noche, manteniéndose bajo durante la noche, hasta las 09 horas (anexo 5). El comportamiento de las estaciones de Independencia y Las Condes son similares, oscilando entre 0,5 y 3 m/seg. La estación de Pudahuel, si bien coincide en los mínimos valores registrados, tanto en magnitud como en el horario en que estos se registran, presenta máximos que superan en general los 5 m/seg, el día 25 de enero es el único día en que esta estación iguala su comportamiento con las dos restantes.

Las Rosas de direcciones predominantes del viento (anexo 6) dan cuenta de la variabilidad diaria del comportamiento del viento, el viento durante el día se mueve principalmente desde sur sur oeste al nor oeste, observándose las mayores diferencias durante la mañana (entre las 8 y 10 horas). En la tarde disminuyen las

direcciones y las estaciones Independencia y Pudahuel son similares. Finalmente en la noche el viento en la sección de la ciudad ubicada al norte de la Avenida Libertador Bernardo O'Higgins es predominantemente sur.

Condición Sinóptica días estudiados.

La condición sinóptica que se presenta en la tabla 3, corresponde a la descripción de condiciones meteorológicas que suceden al nivel medio de la troposfera (500 hPa) y en superficie (1000 hPa) en una escala horizontal del orden de mil kilómetros y escala temporal de algunos días. Para los días 20 y 21 de enero se observó la irrupción de una dorsal en altura (presencia y paso) en fase con una vaguada costera en superficie, condición típicamente asociada a calentamiento en niveles bajos de la troposfera. La variación de cielo despejado a parcial del día 21 se explica por la disminución de la estabilidad atmosférica originada por el paso de la dorsal y la posterior aproximación de una vaguada en altura.

La dorsal en altura es un área de alta presión y alta temperatura en altura, asociada a movimientos de descenso de masas de aire. El aire al descender se calienta y determina una intensificación de la inversión térmica cerca de la superficie (Rutllant, 1994).

La vaguada costera en tanto es un área de baja presión en superficie, que se presenta frente a la costa central de Chile, usualmente ubicada entre el área de alta presión semipermanente del Pacífico sur (Alta Subtropical) y un área de alta presión típica de una masa de aire frío que se ha desplazado desde el Sur hacia el centro de Argentina. La vaguada costera determina que el aire fluya desde el Este, descendiendo desde la cordillera hacia el Oeste, intensificando la capa de inversión térmica y acercándola a la superficie.

Para los días 04 y 12 de febrero primaron condiciones sinópticas de vaguada en altura, aunque de características débiles, mientras que en superficie se observó un margen de altas presiones, registrándose a nivel local altos valores de temperatura.

Una vaguada en altura es un área de baja presión y baja temperatura en altura, asociada a movimientos de ascenso de masas de aire y frecuente formación de nubosidad. El ascenso del aire normalmente determina un debilitamiento de la inversión térmica cerca de la superficie, aunque en este caso la vaguada fue débil y no logró inestabilizar la atmósfera, situación apoyada en parte por el factor estacional.

Tabla 3. Condición Sinóptica.

Fecha	Día de la semana	Condiciones Sinópticas	Tiempo Significativo	T° Mín.	T° Máx.
20 Enero	Martes	Aproximación y presencia de dorsal en altura. Vaguada costera en superficie.	Mayormente despejado.	15,0°C	32,2°C
21 Enero	Miércoles	Paso de dorsal en altura. Formación de vaguada en altura asociada a núcleo frío. Vaguada costera en superficie.	Despejado a parcial.	15,1°C	32,8°C
04 Febrero	Miércoles	Aproximación de vaguada débil en altura. Margen anticiclónico en superficie.	Despejado a parcial.	13,9°C	31,3°C
12 Febrero	Jueves	Aproximación de vaguada débil en altura asociada a núcleo frío. Margen anticiclónico en superficie.	Despejado	14,1°C	32,8°C

Fuente: Elaboración propia a partir de información enviada por CENMA.

4.2 Selección de Variables.

El procedimiento a partir del cual se escogieron las variables que fueron ingresadas al modelo de regresión consistió en correlacionarlas con la temperatura atmosférica. Antes de llevar a cabo la correlación entre los ocho factores y los datos de temperatura registrados a las 11, 14 y 22 hrs., del día 04 de febrero de 2009, se aplicó el test de normalidad Shapiro Willks. Además de los ocho factores se incluyen los resultados obtenidos para la interpolación de temperatura a cada una de las horas evaluadas, permitiendo dar variabilidad horaria al modelo, que de lo contrario, sería fijo respecto únicamente a las imágenes de satélite con que se cuente.

La tabla 5 muestra los resultados del índice, incluyendo los valores del test estadístico (W) y significancia (p). Para comprobar la normalidad de los datos, el valor del test estadístico (W) debe ser mayor a 0,896, determinado para un n=28, 0,896 (con nivel de significancia igual a 0,01). Adicionalmente, el valor p debe ser mayor a 0,05. (González, 2006).

Tabla 5. Test de Normalidad.

Variable	Escala	Shapiro – Willks		Resultados
		Índice (W)	Sig. (p)	Normalidad
Rugosidad	Nominal	0,781	0,000	Distribución anormal
Distancia a cursos de agua	Escala	0,874	0,003	Distribución anormal
Orientación	Escala	0,909	0,019	Distribución normal
Altura	Escala	0,836	0,000	Distribución anormal
T° de emisión superficial	Nominal	0,98	0,842	Distribución normal
Superficies Impermeables	Nominal	0,962	0,387	Distribución normal
Vegetación	Escala	0,959	0,325	Distribución normal

Interpolación 11am.	Escala	0,916	0,027	Distribución normal
Interpolación 14pm.	Escala	0,917	0,029	Distribución normal
Interpolación 22pm.	Escala	0,864	0,000	Distribución normal

Fuente: Elaboración propia.

Las variables con distribución normal son, la temperatura de emisión superficial, las superficies impermeables, la cobertura vegetal, la orientación y en todos los casos la interpolación de temperatura que resulta de la realización de un kriging a los datos puntuales de la temperatura atmosférica. Para todas las variables restantes (rugosidad de las edificaciones, distancia a cursos de agua y altura) no se cumple la distribución normal de los datos, lo que significa la utilización de estadística no paramétrica.

4.2.1 Correlación de variables con temperatura atmosférica.

Se escogieron aquellas variables que tuvieran una relación estadística significativa con la temperatura atmosférica para ser ingresadas al modelo de regresión múltiple (Tabla 6). Además, que la magnitud de la correlación fuese superior a 0,5. No se consideró el signo de la correlación como criterio de selección.

Las variables escogidas corresponden a Altura, Temperatura de emisión superficial, Superficie impermeable, Cobertura vegetal, y la Interpolación de temperatura atmosférica. A las 22 hrs. la altura queda excluida. Todas las variables, con excepción de la cobertura vegetal a las 22 hrs. alcanzan una relación estadísticamente significativa en el nivel 0,01.

La temperatura de emisión superficial fue descartada a las 22 horas, debido a corresponde a un valor que el satélite capta durante la mañana.

La altura y cobertura vegetal se relacionan inversamente con la temperatura, coincidiendo con los antecedentes bibliográficos en donde se establece que la temperatura disminuye al aumentar la altura y aumenta al disminuir la cobertura vegetal, siendo un factor significativo cuando se combate la isla de calor.

Tabla 6. Coeficientes de correlación.

	Temperatura atmosférica 11:00 hrs.		Temperatura atmosférica 14:00 hrs.		Temperatura atmosférica 22:00 hrs.	
	Pearson	Spearman	Pearson	Spearman	Pearson	Spearman
Rugosidad		0,218		0,309		0,469*
Dist. Cursos de Agua		0,147		0,056		-0,238
Orientación	-0,219		-0,312		0,136	
Altura		-0,719**		-,662**		-0,301
T° Emisión Superficial	0,526**		0,588**		0,544**	
Superficie Impermeable	0,624**		0,670**		0,509**	
Cobertura Vegetal	-0,662**		-0,660**		-0,413*	
Interpolación T° atm. 11am	0,916**					
Interpolación T° atm. 14pm			0,838**			
Interpolación T° atm. 22pm					0,998**	

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

Nota: en negrita se encuentran las variables escogidas

4.3 Resultado del modelo de Regresión

Se construyeron tres modelos diferentes para generar los mapas de distribución de temperaturas atmosféricas durante la mañana, tarde y noche.

La variable dependiente corresponde a la temperatura del aire registrada a las 11:00, 14:00 y 22:00 hrs. y las explicativas son: la altura, vegetación, impermeabilización, temperatura superficial e interpolación de las temperaturas atmosféricas. Para las 22:00 hrs., se consideran como variables explicativas sólo la vegetación, impermeabilización y la interpolación de las temperaturas atmosféricas.

La tabla 7 presenta los coeficientes de regresión parciales que permiten evaluar la participación de cada variable en la determinación de la temperatura atmosférica.

Tabla 7. Ecuación Modelos de Regresión.

HORA	MODELO DE REGRESIÓN	R
Mañana	$\text{Temperatura del aire (}^\circ\text{C)} = - (\text{Altura} * 0,001) - (\text{Vegetación} * 0,005) + (\text{Impermeabilización} * 0,006) + (\text{Interpolación} * 1,424) - (\text{Temperatura Superficial} * 0,077) - 9,923$	0,873
Tarde	$\text{Temperatura del aire (}^\circ\text{C)} = - (\text{Altura} * 0,001) - (\text{Vegetación} * 0,015) + (\text{Impermeabilización} * 0,004) + (\text{Interpolación} * 1,272) - (\text{Temperatura Superficial} * 0,006) - 8,269$	0,969
Noche	$\text{Temperatura del aire (}^\circ\text{C)} = - (\text{Vegetación} * 0,0058) + (\text{Impermeabilización} * 0,0064) + (\text{Interpolación} * 1,019) - 0,435$	0,997

Fuente: Elaboración propia.

A partir de lo anterior es posible estimar cuantitativamente el efecto de los factores sobre la distribución de la temperatura atmosférica (tabla 8). Se observan algunas similitudes durante el día: en los tres horarios evaluados la vegetación actúa disminuyendo la temperatura, con máximos que oscilan entre 0,5 y 1,5°C. Igualmente la altura significa reducir el calor registrado. Por el contrario, las

superficies impermeables aumentan la temperatura, aunque existen diferencias durante el día respecto a su efecto. Durante la tarde la diferencia máxima de temperatura entre un sector completamente cubierto de vegetación respecto a un terreno 100% impermeabilizado puede alcanzar a casi dos grados.

Tabla 8. Efecto de la vegetación, impermeabilización y altura sobre la temperatura atmosférica.

	100% vegetal	cobertura 100% impermeable	superficie	Cada 100 metros
Mañana	-0,5 °C	+0,6 °C		-0,1°C
Tarde	-1,5 °C	+0,4 °C		-0,1°C
Noche	-0,58 °C	+0,64 °C		No aplica

Fuente: Elaboración propia

La tabla 9, muestra la temperatura atmosférica que resulta considerando diferentes arreglos espaciales entre cobertura vegetal y superficies impermeables. En el ejemplo expuesto se parte de una temperatura inicial igual a 30°C, y se comparan las modificaciones, la diferencia es más significativa durante la tarde, donde se observa por ejemplo que, el pasar de un 100% a un 75% de superficies impermeables significa una reducción de 0,5°.

Tabla 9. Modificaciones de los diferentes arreglos espaciales de cobertura vegetal y superficies impermeables sobre una T° igual a 30°C.

Cobertura Vegetal	Superficie Impermeable	Mañana	Tarde	Noche
Porcentaje (%)		Temperatura (°C)		
100	0	29,5	28,5	29,4
75	25	29,78	28,99	29,73
50	50	30,05	29,45	30,03
25	75	30,3	29,93	30,34
0	100	30,6	30,4	30,64

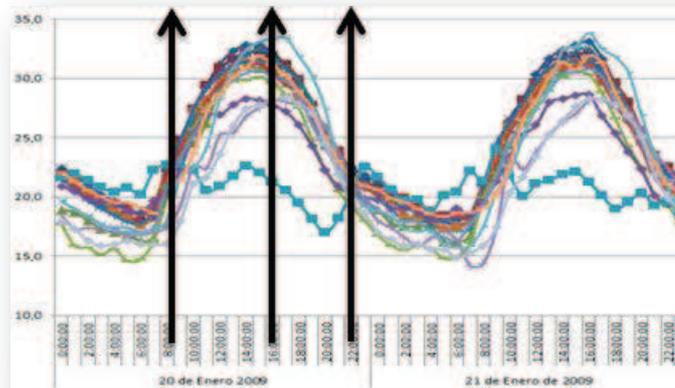
Fuente: Elaboración propia.

4.3.1 Datos Atmosféricos utilizados en la construcción del Modelo de Regresión y la obtención del Mapa Térmico de Verano para la ciudad de Santiago.

Los días 20 y 21 de enero de 2009 se llevaron a cabo transectas móviles en la ciudad de Santiago, el mapa de temperaturas se llevo a cabo el día 21 de enero, ya que el 20 de enero hubo algunos problemas que significaron no tener los datos de algunos puntos, el 21 de enero además, existe una menor diferencia temporal entre los puntos y por lo tanto una mayor rapidez en la realización de las transectas que permite corregir con mayor exactitud.

En la figura 13 se gráfica el comportamiento de la temperatura durante los días 20 y 21 de enero de 2009, ambos días muestran un comportamiento térmico similar, la temperatura comienza a elevarse alrededor de las 9 horas., hasta alcanzar un máximo durante la tarde, entre las 15 y 17 hrs., comenzando entonces a disminuir, el mínimo se observa durante la madrugada, entre las 03 y 05 hrs. Los hitos diurnos mencionados anteriormente coinciden con aquellos momentos significativos en la variabilidad diaria de la isla de calor urbana, las primeras horas de calor, las horas de mayor insolación durante la tarde, y finalmente unas dos o tres horas después de la puesta de sol, que corresponde a un momento en qué, pese a que el sol ya se ha puesto, se mantiene liberando calor de manera paulatina, lo anterior motiva la selección de los horarios en que finalmente se construyó el mapa de distribución de temperatura atmosférica de la ciudad.

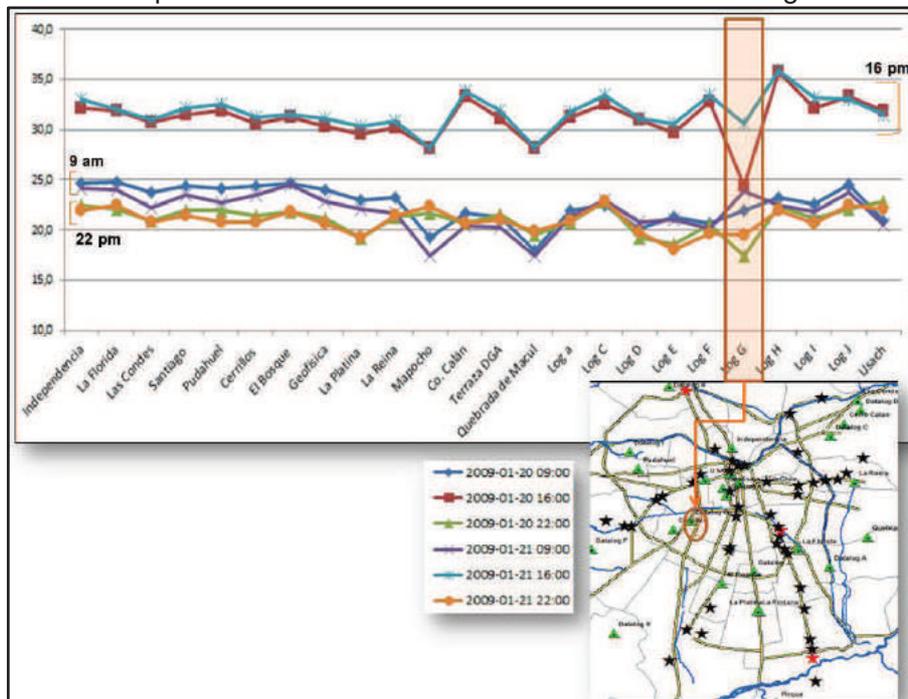
Figura 13. Comportamiento temperatura atmosférica, 20 y 21 de enero.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 14 se presenta los datos de cada una de las estaciones fijas a las 9, 16 y 22 hrs. para los días 20 y 21 de enero. Ambos días el comportamiento es similar, las mayores diferencias se observan en el datalog G, instalado por el Laboratorio de Medioambiente y Territorio de la Universidad de Chile, que se encuentra localizado en el cono de aproximación del Aeropuerto de Cerrillos, en un área de industrias y galpones (figura 19), en este, el dato de temperatura atmosférica de la tarde del día 20 de enero se acerca al registrado en el mismo punto a las 9 am. lo que es aun más llamativo considerando que el día siguiente, 21 de enero, el dato de la tarde se ajusta bastante al rango observado por el resto de las estaciones fijas consideradas.

Figura 14. Datos temperatura atmosférica incluidos en el modelo de regresión.



Fuente: Elaboración propia.

4.3.2 Validación del modelo de regresión.

En los tres modelos de regresión construidos, el valor de R (tabla 7) se encuentra cercano a 1, lo que les otorga validez estadística.

La tabla 10 presenta el resultado de la validación cruzada que constituye un segundo método de validación estadística de los modelos de regresión. El índice de reducción de validación cruzada en todos los casos es inferior a 0,1, lo que indica que corresponden a modelos fiables (molinero 2002).

Tabla 10. Resultados de la validación cruzada.

Hora	R sub grupo a	R sub grupo b	Ra – Rb
Mañana	0.941	0.894	0.047
Tarde	0.983	0.969	0.014
Noche	0.999	0.995	0.004

Fuente: Elaboración propia.

4.3.3 Diagnóstico de los resultados del modelo de regresión.

El diagnóstico del modelo corresponde a una comparación entre los valores de temperatura observados y los calculados por el modelo. Por otro lado, se comparan los valores obtenidos por el modelo de regresión múltiple y aquellos que son resultado de la interpolación realizada mediante el modelo de Kriging.

La evaluación se llevó a cabo comparando los datos de temperatura atmosférica obtenidos mediante en los transectos móviles del 21 de enero de 2009, que no han sido incluidos en la elaboración del modelo, ni en la interpolación de temperatura incluida como factor en la construcción del mapa de temperatura, justamente para evaluar la efectividad de este para determinar el valor de temperatura atmosférica en aquellos puntos que no cuentan con datos.

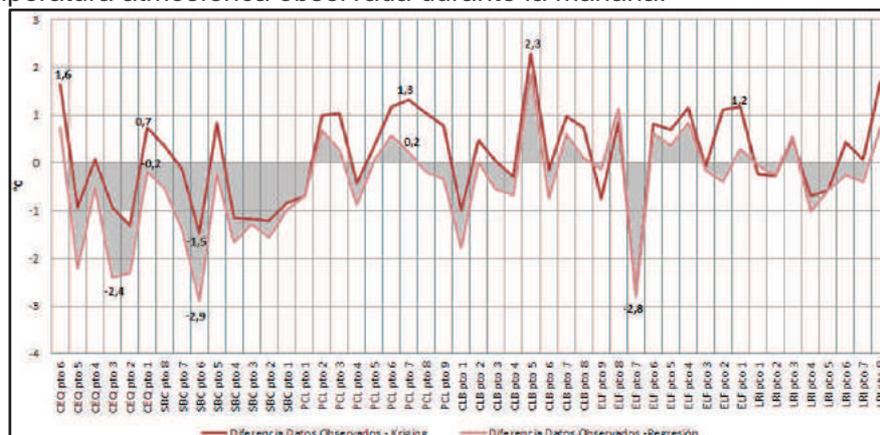
Diagnóstico del modelo, 11 am, 21 de enero de 2009.

En la medición de la mañana la diferencia promedio entre los datos observados y el modelo de regresión múltiple construido es de $-0,42^{\circ}\text{C}$. 34 de los 49 puntos de mediciones comparados presentan valores inferiores a un grado de temperatura de diferencia. De los puntos restantes, cinco poseen diferencias superiores a 2°C (anexo 8). Los puntos con mayores diferencias se localizan, según se observa en la figura 19, distribuidos en el poniente de la ciudad, principalmente en la transecta que cruza de norte a sur, desde Quilicura a San Bernardo. Sólo uno de ellos se ubica en Maipú, camino a la Farfana. Los restantes se ubican en el centro de la ciudad, cercanos a varias estaciones meteorológicas fijas., lo que no permite atribuir las diferencias observadas a una ausencia de estaciones y por lo tanto puede deberse a una variabilidad espacial mayor de los datos, o alguna condición que ha sido medida en terreno y no está representada en el modelo de regresión.

Respecto a las diferencias observadas entre las distribuciones espaciales de la temperaturas obtenidas por la aplicación del modelo de regresión y por el modelo kriging de interpolación, existen en este último 27 datos cuya diferencia es mayor que la observada en el modelo. Sólo dos puntos del modelo de interpolación poseen diferencias superiores a dos grados respecto a los datos observados, y de esto uno coincide con el modelo de regresión, razón por la cual la diferencia observada por los cuatro puntos restantes entre el modelo de regresión y los datos observados podría deberse en gran medida a la incorporación de los factores adicionales.

Al observar la figura 15, es posible observar que la interpolación en la transecta que va desde el Estadio monumental a Pirque (puntos PLC), siempre resulta en mayores diferencias y que estas son atenuadas con el modelo de regresión.

Figura 15. Diferencias de los datos obtenidos por el modelo de regresión y la interpolación con la temperatura atmosférica observada durante la mañana.



Fuente: Elaboración Propia.

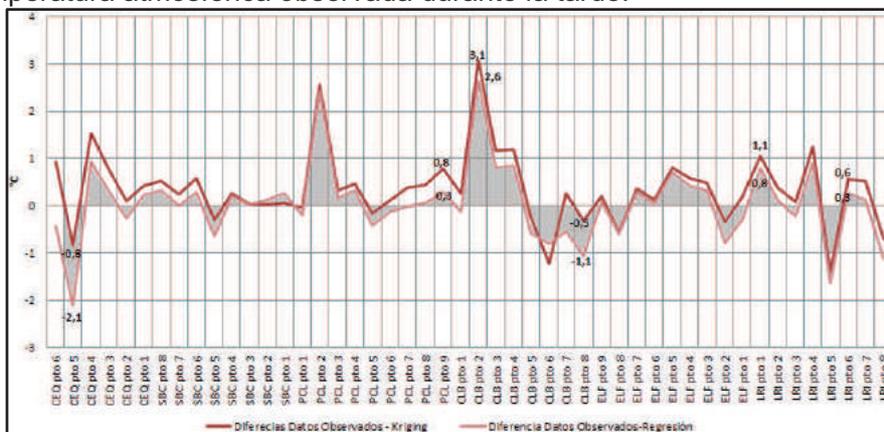
Diagnóstico del modelo, 14 pm., 21 de enero de 2009.

Durante la tarde, las diferencias en los resultados obtenidos por la interpolación y el modelo de regresión son menores. Sin embargo, en 32 puntos, el resultado

conseguido por la interpolación obtiene mayores diferencias respecto de los datos observados (figura 16, anexo 9). La diferencia promedio también es mayor con el krigin, que alcanza 0,4°C promedio versus 0,05°C obtenidos por el modelo de regresión.

Al compara los datos obtenidos por el modelo de regresión y los datos observados, 42 de los 49 puntos evaluados poseen diferencias inferiores a un grado Celsius Sólo tres puntos del modelo de regresión poseen diferencias superiores a los 2°C respecto de los datos observados, el punto cinco de la transecta que va del centro a Quilicura (figura 19) había presentado también diferencias de este orden durante la mañana, los dos puntos restantes se localizan más al sur, uno de ellos en la ribera norte del río Maipo, área que no se encuentra representada por estaciones meteorológicas fijas.

Figura 16 Diferencias de los datos obtenidos por el modelo de regresión y la interpolación con la temperatura atmosférica observada durante la tarde.



Fuente: Elaboración Propia.

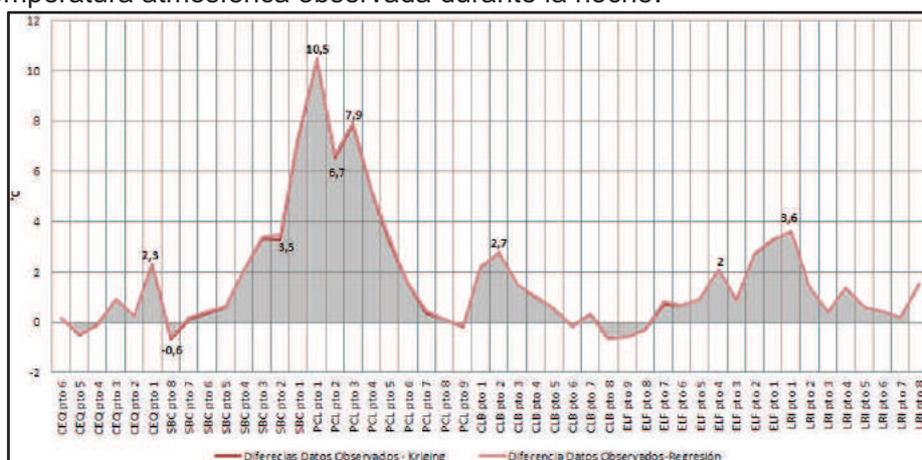
Diagnóstico del modelo, 22 hrs. del 21 de enero de 2009.

En la noche se observan las mayores diferencias cuando se comparan los datos obtenidos de los modelos de interpolación y regresión y los datos observados,

existiendo puntos con diferencias que superan los 3, 5 e incluso 10°C (figura 17, anexo 10). Los resultados del kriging y el modelo de regresión son prácticamente iguales, ambos poseen una diferencia promedio respecto de los datos observados de 1,7°C.

Respecto a los resultados del modelo de regresión, 33 de los 49 puntos poseen diferencias por debajo de un grado, de los restantes, 16 presentan diferencias superiores a 2°C, localizados en el centro y sur de la ciudad, cercanas a estaciones meteorológicas fijas (figura 24). De los cinco puntos que poseen más de 3°C de diferencia, dos se ubican en la periferia, uno por el oriente y otro en el sur de la ciudad. Cuatro son los puntos con 5°C de diferencia, tres de ellos se ubican en la transecta que va del estadio monumental a Pirque, ubicados al norte del río Maipo, que como se ha dicho antes, corresponden a lugares sin estaciones fijas en la fecha estudiada que representen las áreas urbanizadas, el punto restante se localiza en San Bernardo. Con más de 10°C existe un único punto ubicado en la ribera sur del Maipo, en un sector predominantemente rural.

Figura 17. Diferencias de los datos obtenidos por el modelo de regresión y la interpolación con la temperatura atmosférica observada durante la noche.



Fuente: Elaboración Propia.

Corrección interpolación 22 hrs.

Debido a las grandes diferencias que existen entre los datos modelados y aquellos observados a las 22 hrs. se evalúan modificaciones que permiten disminuir diferencias y aumentar la precisión del modelo.

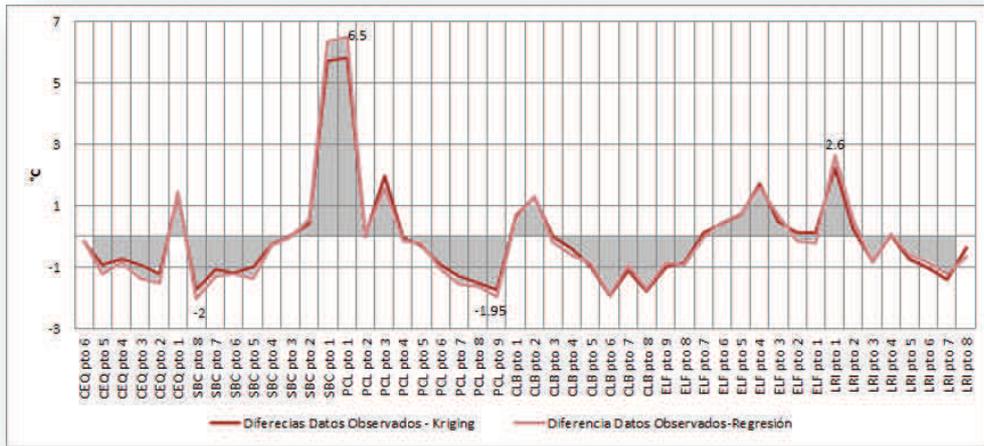
Durante el segundo semestre del año 2010 fueron instalados 30 nuevos dataloggers en la ciudad de Santiago, cubriendo aquellos lugares de la ciudad que hasta ese momento no se encontraban representados por las estaciones fijas existentes. Considerando lo anterior, se observaron las zonas que presentaban mayores diferencias, y se incorporaron al modelo aquellos puntos de las transectas cercanos a los lugares donde se encuentran los nuevos dataloggers. De esta manera se incorporaron al factor de interpolación tres nuevos puntos, dos localizados al sur de la ciudad y el restante ubicado en el centro; San Bernardo – Centro n°3 (SBC3), Pirque – Estadio Monumental n°4 (PLC4) y Centro – La Farfana n°1 (ELF 1) (figura 19). Lo anterior tuvo importantes resultados, redujo la diferencia promedio de los puntos a -0,1 y paso de 16 a sólo tres puntos con diferencias superiores a 2°C, tal como se observa en el gráfico siguiente (figura 18, anexo 10).

Distribución termal intraurbana en Santiago de Chile. Aporte a la gestión ambiental de la ciudad a partir de la construcción de un modelo que permita generar un mapa térmico de verano.

Magíster en Gestión y Planificación Ambiental

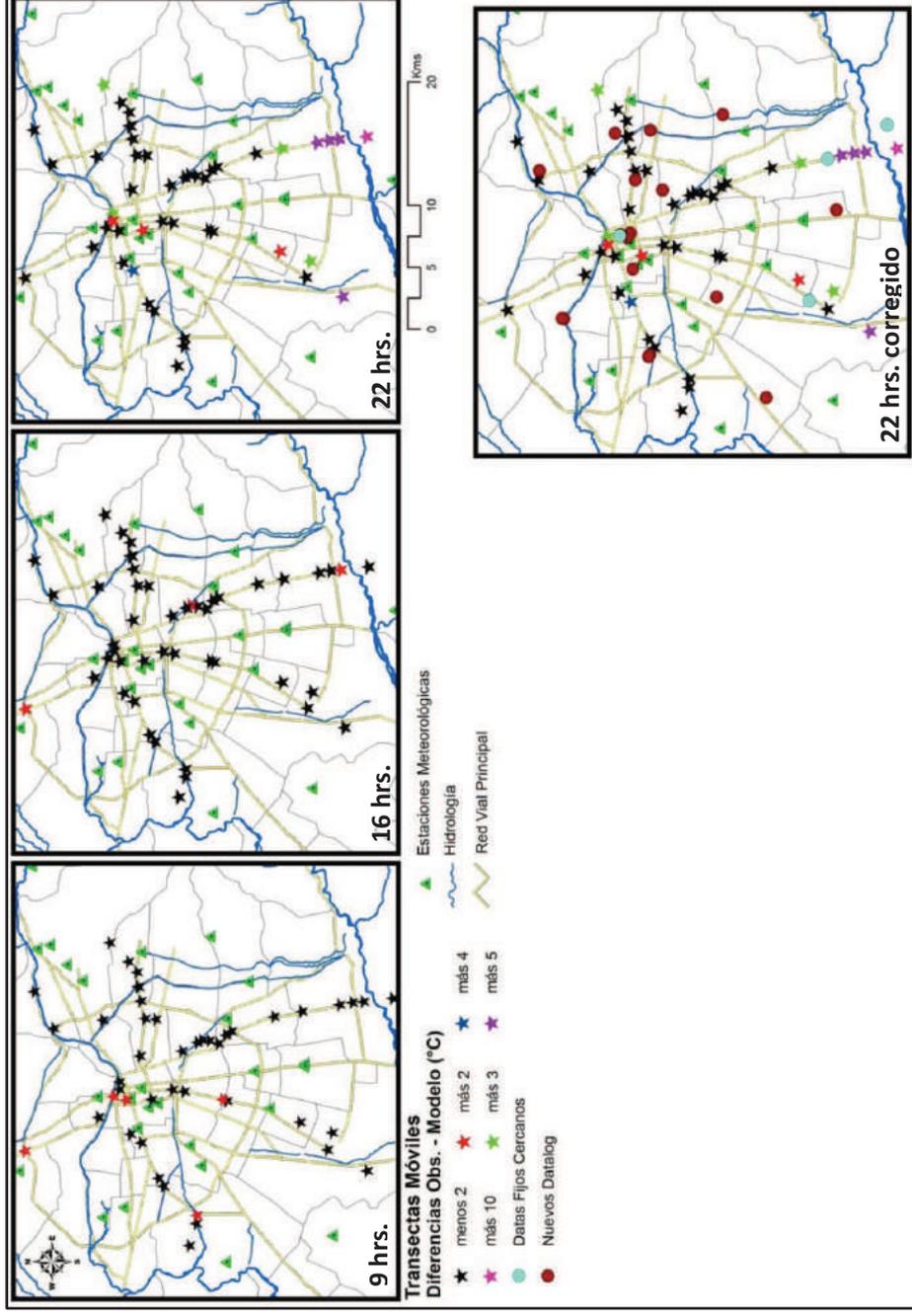
Pamela Smith Guerra

Figura 18. Diferencias de los datos obtenidos por el modelo de regresión y la interpolación, ambos corregidos, con la temperatura atmosférica observada durante la noche.



Fuente: Elaboración Propia

Figura 19. Localización puntos que registran diferencias superiores a 2°C entre los resultados del modelo de regresión y los datos observados durante la mañana, tarde y noche.



4.4 Distribución Espacial de las temperaturas

4.4.1 Distribución temperaturas a las 9:00 horas.

En las horas de la mañana se percibe la diferencia que existe entre la temperatura de la ciudad y su entorno no urbano. Las áreas más frías, principalmente localizadas en el sector oriente de la ciudad registran temperaturas que fluctúan entre 18 y 20,5 °C, mientras el sector más cálido, que se concentra en el sector sur, registra valores entre 22 y 23,2 °C (figura 20).

El sector oriente de la ciudad, ubicado al interior del límite urbano posee temperaturas similares al área rural, no urbana. La intensidad de la isla de calor es de 7°C, que corresponde a la diferencia observada entre las áreas más cálidas de la ciudad y la temperatura que presenta el área no urbana.

Además de las diferencias que existen entre la ciudad y su entorno rural, el área urbana no es térmicamente homogénea. Las temperaturas más altas se concentran al sur de la ciudad, entre las avenidas Vicuña Mackenna y Gran Avenida, dibujando una isla de calor de importante superficie. En términos generales la temperatura decrece del centro a la periferia, fuera de la circunvalación de Américo Vespucio. Es posible identificar el cono de aproximación del ex Aeropuerto de Cerrillos y la existencia de algunos parches de características agrícolas hacia el sur de la ciudad. Sin embargo, aún en la periferia, las temperaturas de la comuna de Pudahuel, cercanas al aeropuerto internacional, registran pequeñas islas de calor.

El sector oriente de la ciudad se encuentra más frío, lo que es percibido desde Av. Vicuña Mackenna hacia el Este y resulta aún más significativo desde la Avenida Tobalaba al Este. Esta área corresponde al sector de mayor altitud de la ciudad,

que a esta hora no recibe radiación solar directa y posee una menor densidad de construcciones, con mayores porcentajes de vegetación, que actúan enfriando el aire.

Por otro lado, se distinguen áreas de menor temperatura en las zonas vegetadas de mayor extensión, que se localizan en las comunas del centro y poniente de la ciudad, identificándose el Parque O'Higgins y la Quinta Normal. No se encuentran a esta escala diferencias en las temperaturas aledañas a los cursos de agua. Por el contrario, el curso del río Mapocho que atraviesa la ciudad de oriente a poniente, se presenta con temperaturas más elevadas, sobre todo en las comunas del centro y poniente, probablemente debido a las condiciones fuertemente artificializadas del cauce, además del bajo caudal que presenta en enero y al ser vecino además de una autopista urbana.

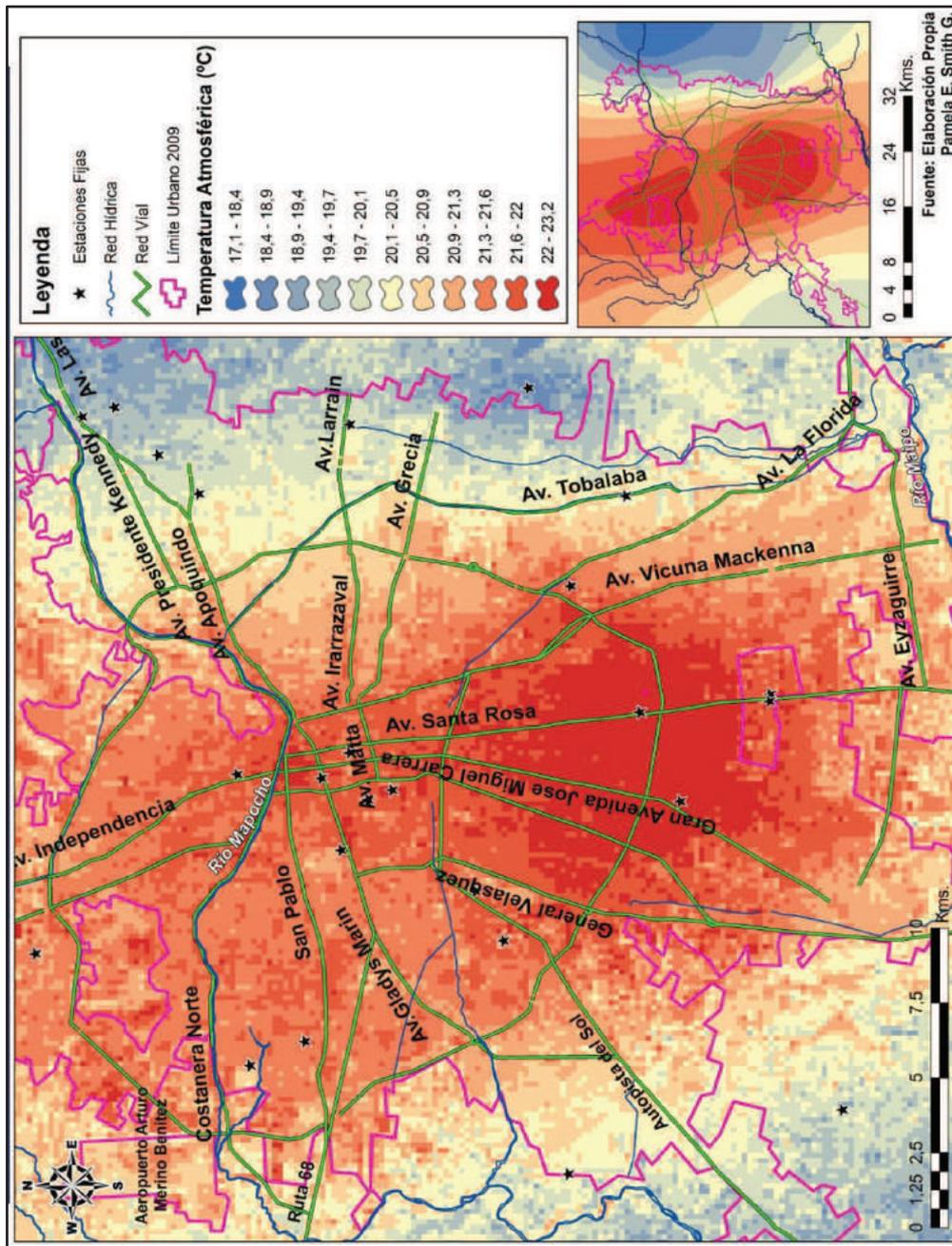
Las diferencias entre la distribución espacial de las temperaturas obtenidas por la aplicación del modelo de regresión múltiple, respecto a la que se logra realizando una interpolación que sólo considera los datos de temperatura atmosférica, resultan evidentes. Si bien el patrón espacial es semejante entre ambas representaciones, la interpolación, que se presenta a la derecha de la figura, no permite diferenciar las temperaturas entre áreas vegetadas, parques y plazas al interior de la ciudad. Tampoco se observa que al sur de la ciudad, existen sectores menos cálidos que corresponden a cultivos. Debido al mayor detalle que se alcanzan con la aplicación del modelo de regresión, es posible registrar las diferencias térmicas que existen entre áreas vecinas, que con la interpolación son generalizadas.

Distribución termal intraurbana en Santiago de Chile. Aporte a la gestión ambiental de la ciudad a partir de la construcción de un modelo que permita generar un mapa térmico de verano.

Magister en Gestión y Planificación Ambiental

Pamela Smith Guerra

Figura 20. Distribución Temperaturas Atmosféricas, 9:00 horas.



4.4.2 Distribución temperaturas 16:00 horas.

A la hora de mayor calor en la ciudad de Santiago es posible percibir mayores diferencias en la distribución espacial de sus temperaturas (figura 21). Gran parte de la ciudad registra temperaturas sobre los 30°C, trasladándose la isla de calor hacia el norte de la ciudad, con temperaturas superiores a 34°C. La diferencia entre las temperaturas urbanas y rurales es ahora más elevada, la intensidad de la isla de calor alcanza alrededor de 10°C. Sin embargo, es posible distinguir islas de calor rurales, que se ubican fuera del límite urbano.

Al interior de la ciudad existen lugares fríos, con temperaturas similares a aquellas que presentan los sectores rurales, localizados en el sur y oriente. Sigue siendo importante la avenida vicuña Mackenna para diferenciar el comportamiento térmico, y aún más significativa la avenida Tobalaba.

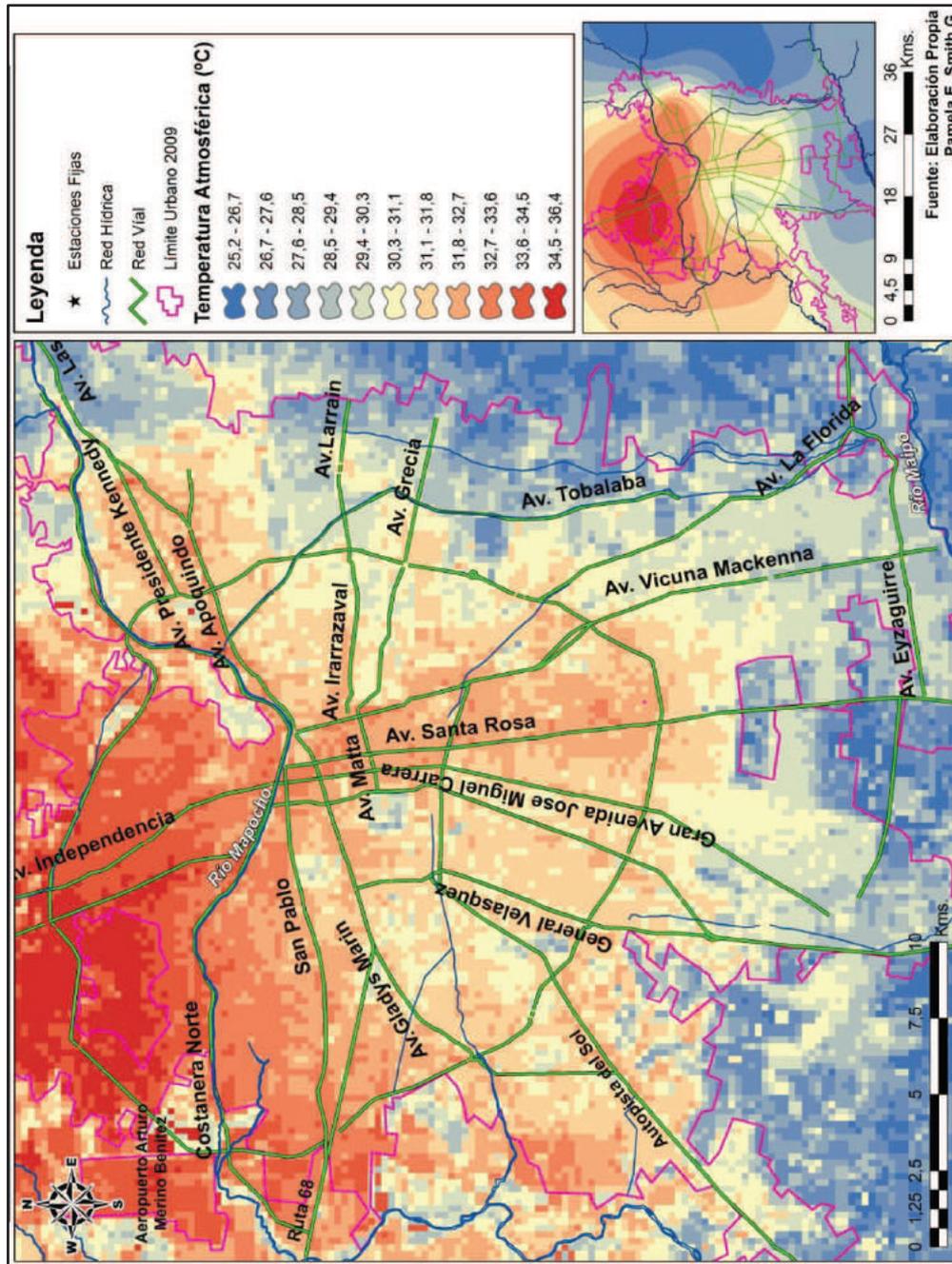
Aún es posible distinguir el efecto de enfriamiento del cono de aproximación del aeropuerto de Cerrillos, y se sigue presentando la disminución de la temperatura desde el centro a la periferia, con la excepción del nor-poniente de la ciudad. Es en esta última zona donde se localiza la isla de calor urbana. Si bien ya en la mañana era posible distinguir una pequeña isla, restringida al área cercana al aeropuerto, es a esta hora que alcanza una extensión mucho mayor, incluyendo áreas no urbanas, con temperaturas superiores a 33°C.

Se distinguen con gran nitidez los parques al interior de la ciudad. La Quinta Normal alcanza hasta -3°C de diferencia con la matriz urbana circundante y el Parque O'Higgins es 2°C más frío. El cerro San Cristóbal es también una isla de frescor alcanzando hasta -4°C de diferencia respecto al área construida ubicada al nor-poniente.

Se observan gradientes, que van desde las menores temperaturas registradas desde áreas periurbanas ubicadas al sur de la ciudad a las mayores encontradas al avanzar al centro.

Las diferencias a esta hora entre los resultados obtenidos por la aplicación del modelo de regresión, comparado con los de la interpolación, son significativas y muy importantes. Si bien es cierto, coinciden en términos generales los sectores más cálidos y más fríos en ambos casos, la interpolación, no permite observar diferencias al interior de la mancha más cálida localizada ocupando áreas del centro, poniente y norte de la ciudad, desbordando los límites urbanos y ocupando áreas no urbanas, del norte y norponiente. La mancha cálida entonces, muestra una situación homogénea, que tiene menos relación con la situación real respecto a los resultados obtenidos por la regresión. Los resultados del modelo de interpolación muestran temperaturas mayores en el sector oriente y menor heterogeneidad en el centro y sur de la ciudad. Es posible sí identificar el cono de aproximación del aeropuerto de Cerrillos, caracterizado por la presencia de menores temperaturas.

Figura 21. Distribución Temperatura Atmosférica, 16:00 horas.



4.4.3 Distribución temperatura 22:00 horas.

Como muestra la figura 22, unas horas después de la puesta de sol la ciudad de Santiago se ha convertido en un archipiélago de calor, o bien en una gran y única isla de calor urbana que incluye casi por completo la superficie urbana, existiendo zonas cálidas también en las áreas rurales ubicadas al norte. En el centro de la ciudad se encuentra una isla que posee la mayor temperatura y que se propaga sutilmente hacia el oriente, aledaña al cerro San Cristóbal.

La diferencia que existe entre los sectores más cálidos y los más fríos de la ciudad y su entorno no urbano alcanza 10°C. Incluso el sector oriente presenta temperaturas elevadas. La distribución térmica es a esta hora altamente homogénea, ya no existe la distinción oriente – poniente, ni se perciben las diferencias entre las áreas vegetadas y las construidas. La ciudad ha acumulado gran cantidad de calor durante el día, con temperaturas superiores a 30°C por varias horas, y ha comenzado, luego de la puesta de sol, a devolver lentamente el calor acumulado. La vegetación no logra tener un efecto significativo a esta escala.

El efecto de las áreas rurales del sur de la ciudad es importante a esta hora, ingresan temperaturas menores por el cono de aproximación del aeropuerto de Cerrillos y en partes de la comuna de la Pintana y Puente Alto, esta diferencia respecto a los sectores rurales del poniente y norte de la ciudad puede deberse al predominio de la actividad rural en los primeros, además de la presencia del río Maipo, que permitiría una circulación mayor de vientos. Las áreas rurales del norte y poniente de la ciudad, por el contrario, han sido paulatinamente urbanizadas constituyendo islas urbanas, además de localizarse gran parte de la industria en estos sectores, sumado a la presencia del aeropuerto internacional y a las condiciones naturales de los suelos que corresponden a un depósito de cenizas.

Finalmente, al comparar los dos modelos utilizados, a esta hora sólo existen sutiles diferencias, ya que ambos permiten distinguir por ejemplo, la presencia de islas frías al interior del gran archipiélago de calor y las menores temperaturas registradas en los cultivos del sur.

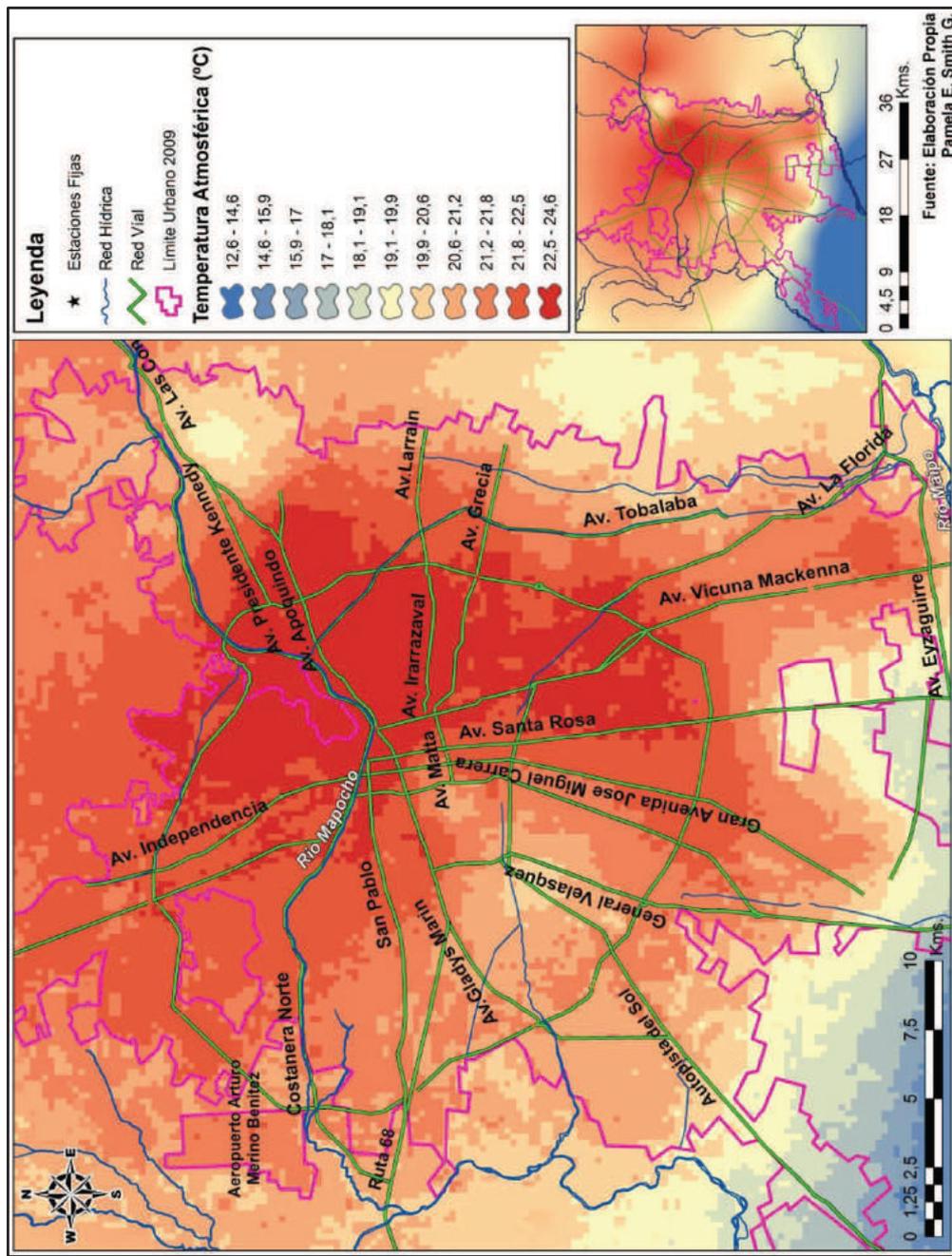
Sin embargo, el modelo de regresión da cuenta de una mayor precisión en las diferencias y una morfología más cercana a la configuración de la ciudad, describe las formas de parques, o cultivos en mejor forma, y define algunas diferencias de áreas vecinas que en la interpolación se muestran completamente homogéneas. Muestra también diferencias respecto de las laderas del oriente de la ciudad y los sectores rurales del poniente y sur, que poseen una heterogeneidad mayor que la mostrada en los resultados del Kriging. El modelo de regresión muestra con mayor claridad la presencia del cono de aproximación del ex aeropuerto de Cerrillos a esta hora.

Distribución termal intraurbana en Santiago de Chile. Aporte a la gestión ambiental de la ciudad a partir de la construcción de un modelo que permita generar un mapa térmico de verano.

Magister en Gestión y Planificación Ambiental

Pamela Smith Guerra

Figura 22. Distribución Temperatura Atmosférica, 22 horas.



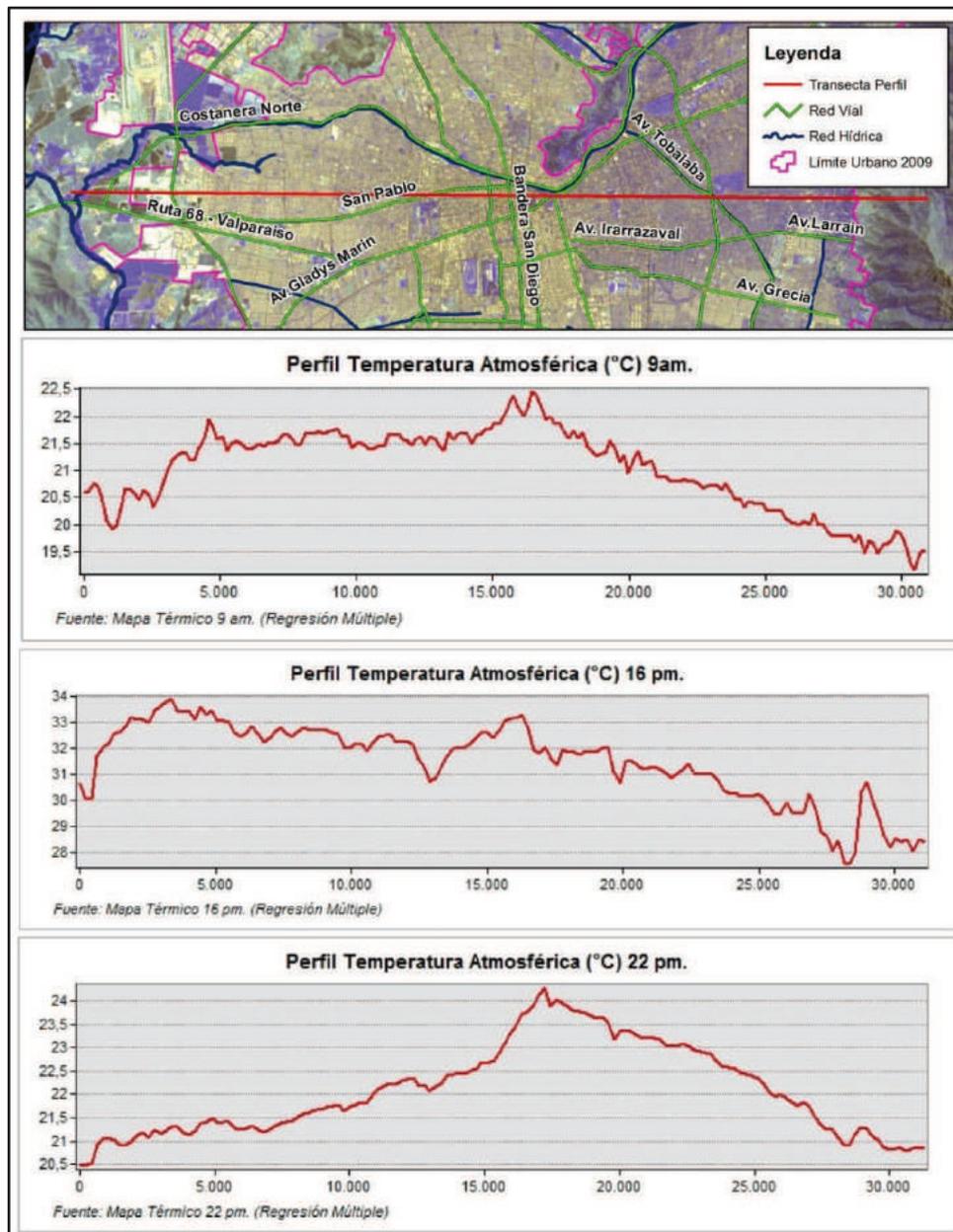
4.4.3 Gradiente Térmico.

A partir de los mapas de temperatura se construyen perfiles de temperatura que dan cuenta del gradiente de temperatura en una transecta que recorre la ciudad de poniente a oriente (figura 23).

El perfil que parte fuera de los límites urbanos en el poniente de la ciudad, aproximándose al centro y terminando en el piedmont andino por el oriente, demuestra que para la mañana y noche, la temperatura aumenta en el centro, y que el perfil térmico se corresponde con lo expuesto por Oke y otros autores, similar, estableciendo además que la isla de calor se manifiesta con mayor intensidad durante la noche.

La mayor variabilidad se presenta durante la tarde, a las 16 hrs., cuando se hace más evidente lo que es posible también observar en el perfil de la mañana, con temperaturas más cálidas por el poniente, aun fuera del límite urbano, que corresponden a los sectores más bajos de la cuenca, poco vegetados, y con suelos que favorecen el aumento de temperatura.

Figura 23. Perfil Poniente – Oriente Temperatura Atmosférica.



Fuente: Elaboración propia.

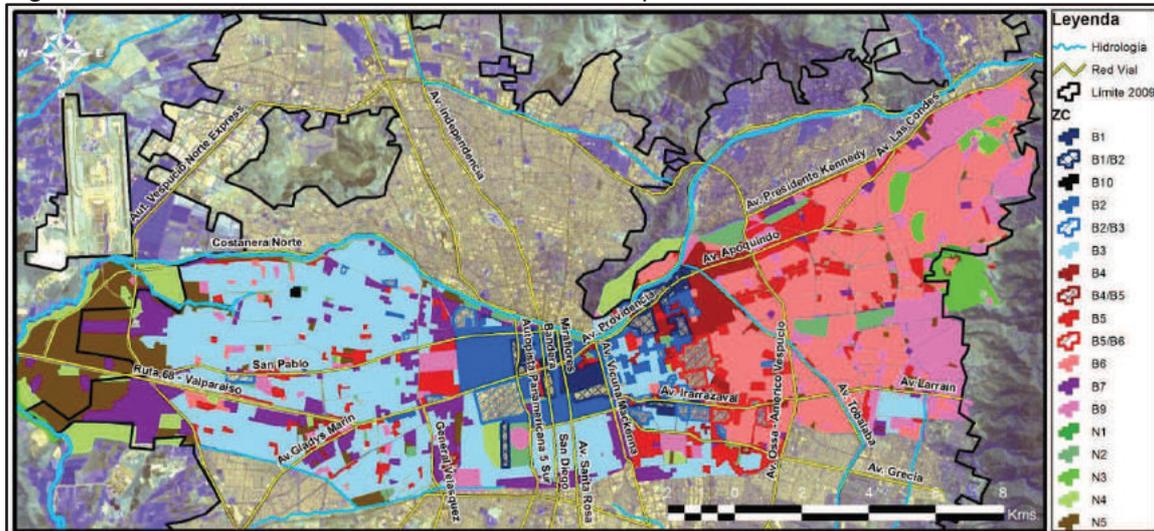
4.5 Relación con Zonas Termales de Stewart & Oke.

Tal como fue descrito ya por Irrarzával (2011), las Zonas termales de la ciudad de Santiago muestran algunas claras tendencias en su distribución (figura 24). Las altas densidades residenciales de baja y media altura, así como las tipologías intermedias reconocidas entre éstas, se localizan principalmente en el centro de la ciudad. La avenida vicuña Mackenna marca un límite, al oriente del cual se concentran las zonas climáticas termales asociadas a bajas densidades. La urbanización dispersa, que corresponde a un tipo de “parcelas de agrado”, se encuentra en el límite urbano oriente, sobre el área del piedemonte, cercanos a parches cubiertos con matorrales y arbustos que han quedado dentro del área urbanizada.

Hacia el poniente de la ciudad las características de la ocupación urbana se corresponden principalmente con áreas de residencias de alta densidad y baja altura, conformando una matriz extensa, dentro de la cual se ubican parches urbanos de baja densidad de media altura. Las zonas de uso extensivo y de baja altura se localizan también en el poniente, asociada por ejemplo a galpones, centros comerciales, etc. El límite poniente de la ciudad está ocupado principalmente por sitios eriazos, en extensas superficies ubicadas al interior de la ciudad y en el sector periurbano. En menor proporción se encuentran también parches cubiertos por vegetación rasante.

Los parches vegetacionales que se pueden identificar al interior de la ciudad corresponden a parques y plazas, destacando entre los primeros el Parque O’Higgins y el Cerro San Cristóbal, en la zona centro y norte de la transecta estudiada.

Figura 24. Zonas Termales en transecta oriente – poniente.



Fuente: Elaboración propia.

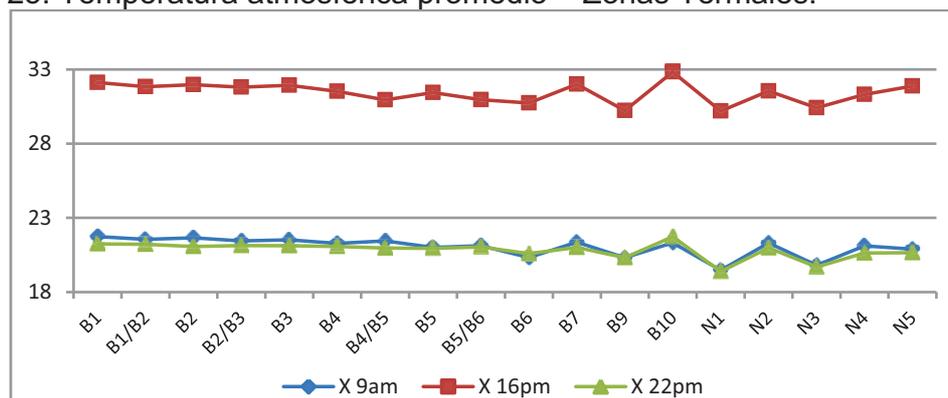
4.5.1 Análisis de las temperaturas en las Zonas Termales

Análisis de los promedios.

Las mayores diferencias respecto de la temperatura atmosférica promedio que poseen las Zonas termales se observa durante la tarde. Respecto a las tipologías urbanas propiamente tal, la temperatura es menor en aquellas áreas menos densas, donde alcanza a 1°C aproximadamente, y entre éstas, son más frías las áreas residenciales de baja densidad de baja altura y las categorías intermedias, tales como baja densidad de gran y media altura y baja densidad de media y baja altura (figura 25). Las mayores temperaturas se registran en las áreas ocupadas por usos industriales. Figuran también como áreas cálidas las ocupadas por usos extensivos de baja altura (galpones, centros comerciales), con una temperatura similar a la observada en los sitios eriazos, ambas principalmente ubicadas al poniente de la transecta, coincidiendo también con los sectores más bajos de la cuenca. Las tipologías más frías, con tres grados de diferencia respecto a los usos

industriales, corresponden a la urbanización dispersa y las superficies de cobertura arbórea compacta y aquellas cubiertas por arbustos y matorrales.

Figura 25. Temperatura atmosférica promedio – Zonas Termales.



Fuente: Elaboración propia.

Las tipologías urbanas no muestran diferencias significativas y entre éstas, la más fría corresponde a las áreas residenciales de baja densidad de baja altura y a la urbanización dispersa, ambas con temperaturas promedios similares. Las mayores temperaturas se observan, al igual que durante la tarde, en los usos industriales, y las menores temperaturas también se observan en sectores con cobertura arbórea compacta y en superficies de arbustos y matorrales, alcanzando la primera una diferencia de 3°C respecto al promedio de la tipología más cálida (anexo 11).

En los tres horarios estudiados, la cobertura arbórea dispersa, a pesar de corresponder a una tipología vegetada, posee promedios de temperatura atmosférica semejantes a los que presentan los usos urbanos.

Diferencias entre las temperaturas atmosféricas de las zonas termales de la ciudad de Santiago.

Previo al análisis estadístico de la relación existente entre las Zonas termales de la ciudad y su temperatura atmosférica, se demostró, mediante el test de normalidad

de Shapiro Wills, que la distribución de los datos en los tres horarios evaluados (9, 16 y 22 hrs) es normal con un grado de confianza de 99,5 (tabla 11).

Tabla 11. Normalidad datos temperatura atmosférica.

Variable	Shapiro – Willks	
	Test estadístico (W)	Sig. (p)
T° Atmosférica 9 hrs.	0,916	0,000
T° Atmosférica 16 hrs.	0,960	0,000
T° Atmosférica 22 hrs.	0,864	0,000

Fuente: Elaboración propia.

La condición de distribución normal de los datos de temperatura atmosférica permitió la utilización del test ANOVA. Los resultados del test de ANOVA (tabla 12) dan cuenta de la existencia de diferencias significativas entre las zonas climáticas respecto de su temperatura atmosférica, con un nivel de significancia de 0,05. Es posible entonces rechazar la hipótesis nula que establece que las medias de los grupos son iguales.

Este índice únicamente establece si existe o no diferencia estadísticamente significativa entre las clases, siendo necesario posteriormente aplicar tests que permitan definir la localización de estas zonas y la ubicación de las diferencias entre ellas.

Tabla 12. Resultados ANOVA.

	F	Significancia
ANOVA 9 am.	183,177	0,000
ANOVA 16 pm.	64,100	0,000
ANOVA 22 pm.	32,542	0,000

Fuente: Elaboración propia.

El test de Levene corresponde al estadístico que permite evaluar la homogeneidad de las varianzas. Los tres grupos evaluados, correspondientes a las temperaturas

registradas a las 9, 16 y 22 hrs. poseen un valor de significancia estadística inferior a 0,05; lo que no permite asegurar una varianza homogénea (tabla 13). Con lo anterior, se decidió utilizar el post test C de Dunett que permite determinar qué zonas climáticas poseen diferencias respecto a su temperatura atmosférica, y como varía esta situación durante el día, es decir, entre qué zonas existe diferencia durante la mañana, tarde y noche.

Tabla 13. Resultados Test de Levene.

Horas	Estadístico de Levene	Significancia
9	55,787	0,000
16	18,582	0,000
22	15,328	0,000

Fuente: Elaboración propia.

A partir de la figura 26, que muestra en color rojo las zonas termales que, de acuerdo al promedio y varianza de su temperatura atmosférica, poseen diferencias significativas, se puede determinar en primer lugar que éstas son variables durante el día, lo que se traduce en que haya ciertas áreas urbanas, como las residenciales de baja densidad y gran altura o las de media altura, que habiendo registrado diferencias con la mayoría de las tipologías restantes durante la mañana y tarde, presenten durante la noche diferencias con un número reducido de zonas climáticas termales (anexo 12).

Existen por el contrario, zonas climáticas que sostienen durante todo el día sus diferencias respecto al comportamiento de su temperatura atmosférica, como es por ejemplo el caso de las residencias de baja densidad de baja altura, área urbana que resulta ser distinta a todas las clases, con excepción de las zonas con baja densidad de gran y media altura y con aquellas superficies cubiertas por superficies arbóreas compactas

Figura 26. Diferencias entre zonas termales respecto de su temperatura atmosférica.

Cód.	Tipología ZCT	Hora	B1	B1/B2	B2	B2/B3	B3	B4	B4/B5	B5	B5/B6	B6	B7	B9	B10	N1		
B1	Alta densidad de gran altura	9:00	Grey	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	
		16:00	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
		22:00	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
B3	Alta densidad de baja altura	9:00	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	
		16:00	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
		22:00	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
B4	Baja densidad de gran altura	9:00	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	
		16:00	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
		22:00	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
B6	Baja densidad de baja altura	9:00	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	
		16:00	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
		22:00	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
B7	Extensivo de baja altura	9:00	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	
		16:00	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
		22:00	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
B9	Urbanización dispersa	9:00	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	
		16:00	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
		22:00	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
B10	Industrial	9:00	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	
		16:00	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
		22:00	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue

Fuente: Elaboración propia.

De los resultados de las tipologías urbanas se desprende que es durante la noche cuando existe entre ellas una mayor homogeneidad, con excepción de la baja densidad de baja altura y la urbanización dispersa. Por el contrario, las mayores diferencias se encuentran durante la mañana.

La clase industrial posee los mayores promedios de temperatura atmosférica durante todo el día (figura 25) y al comparar la varianza de sus datos con las restantes tipologías, se observa que es durante la noche cuando se diferencia más claramente.

Los usos o coberturas de suelos parcial o completamente vegetados se diferencian entre sí durante la noche (figura 27), así mismo ocurre con el suelo desnudo, que durante la tarde posee un comportamiento similar al de los usos urbanos más densos. En la mañana y noche no presenta semejanzas, salvo algunas excepciones.

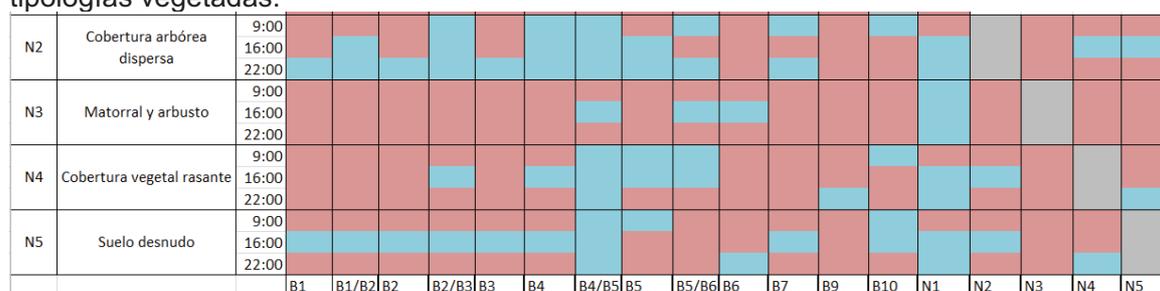
Distribución termal intraurbana en Santiago de Chile. Aporte a la gestión ambiental de la ciudad a partir de la construcción de un modelo que permita generar un mapa térmico de verano.

Magíster en Gestión y Planificación Ambiental

Pamela Smith Guerra

Las mayores diferencias entre las Zonas termales respecto de las coberturas naturales consideradas se observan en las clases que incluyen una mayor proporción urbanizada. Llama la atención la diferencia observada entre las coberturas naturales vegetadas y la urbanización dispersa, así como también, las diferencias que presentan entre sí las coberturas naturales. La cobertura arbórea compacta por ejemplo, salvo en la mañana, no presenta diferencias con los usos urbanos y sí lo hace con las restantes coberturas naturales.

Figura 27. Diferencias entre zonas termales respecto de su temperatura atmosférica, tipologías vegetadas.



Fuente: Elaboración propia.

CAPITULO V. DISCUSION

El comportamiento de la temperatura atmosférica anual promedio se analizó con los datos de la estación Quinta Normal, que corresponde a la estación meteorológica de más larga data en la ciudad de Santiago. La estación Quinta Normal fue absorbida por el crecimiento de la matriz urbana entre los años 1900 y 1920. Se observan diferencias entre el comportamiento térmico de la estación antes y después de ocurrir la urbanización, pasando de un aumento de 0,5°C a 1,5°C, lo que abre la interrogante de poder separar los cambios de temperatura causados por la urbanización del entorno de la estación meteorológica del aumento atribuible al Cambio Climático Global.

El promedio de temperaturas del año 2009 y de su período estival corresponden a un comportamiento normal que se encuentra entre el promedio y una desviación estándar, límite establecido por Mantua *et al.* (1997) y Villarroel *et al.*, (2006). Aun cuando según los criterios establecidos por dichos autores, el año 2009 y su periodo estival poseen un comportamiento normal, existe una anomalía positiva que alcanza +0,4°C, lo que se corresponde con lo señalado por el informe del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, que considera que el verano del año 2009 fue anormalmente cálido.

Se reconoce que el clima por definición se refiere al promedio de las condiciones atmosféricas de al menos 30 años (IPCC, 1995), condicionado por diversos factores, principalmente naturales. Esta investigación demuestra lo planteado por Eliasson (1999); Rohinton(1999) y Honjo(2003), entre otros autores, quienes establecen que en la ciudad se agregan nuevos factores que actúan sobre el comportamiento meteorológico y en consecuencia, en la formación de un clima diferente.

Respecto a lo anterior, se seleccionaron factores que, según la literatura, se encontraban asociados al comportamiento del clima urbano. Ya en el año 1982, Oke planteaba, lo que es reafirmado por diversos autores en años posteriores (Honjo *et al.*, 2003; Nowak & Macpherson, 1993), que la vegetación es uno de los factores más importantes respecto a su relación con el comportamiento de la temperatura en la ciudad, y más específicamente, que actúa disminuyéndola, cumpliendo un rol fundamental en el control de las islas de calor urbano. Esta investigación comprueba que la vegetación en la ciudad de Santiago es capaz de disminuir hasta en 1,5°C la temperatura atmosférica en una tarde de verano, pudiendo encontrar diferencias que superan los 4°C, entre los parques que se reconocen a escala metropolitana, y sus áreas urbanas adyacentes.

Al igual que con la vegetación, se encuentran relaciones entre la distribución de las temperaturas con las superficies impermeables durante todo el día. Los efectos de la existencia de coberturas de suelos altamente impermeabilizadas sobre la temperatura atmosférica se corresponden con lo planteado por Arnold & Gibbons (1996); Pauleit *et al.* (2005) y Stewart & Oke (2009).

Se comprueban los resultados obtenidos por Arnfield *et al.* (2003) y Prashad (2004) quienes determinan la existencia de elevadas correlaciones espaciales entre las islas de calor de las temperaturas de superficie y del aire. Respecto a las relaciones existentes entre las islas de calor urbanas y la topografía, sólo es posible sostener dicha afirmación respecto a la altitud, como lo señalan Beral-Guyonnet (1997), Cuadrat *et al.* (2003 y 2005) y Jo *et al.* (2001). Sin embargo, durante la noche no se aprecia una relación relevante entre la altitud y la temperatura.

A pesar de existir autores que planteaban que la distancia a los cursos de agua, la orientación y la rugosidad de las edificaciones influyen sobre el comportamiento de

la temperatura atmosférica, los resultados obtenidos no permiten comprobar esto para la ciudad de Santiago, quedando descartada su incorporación en el modelo.

Se realizó el diagnóstico del modelo, utilizando los datos de las transectas móviles. Aquellos puntos que se observan con diferencias entre el dato observado y el dato modelado superiores a 2°C durante la mañana y tarde se encuentran cercanos a varias estaciones meteorológicas fijas, por lo que dicha diferencia podría estar asociada a una variabilidad espacial mayor de los datos, o a alguna condición que ha sido medida en terreno y que no se encuentra representada en el modelo de regresión. Durante la noche se observan las mayores diferencias respecto del dato observado, tanto en la interpolación como en el modelo de regresión, superando incluso 10°C, asociados a lugares con ausencia de estaciones. Una primera causa de lo anterior podría deberse a la carencia de estaciones que representen la condición a esa hora y por lo anterior, se evalúan y llevan a cabo modificaciones que permitieron disminuir diferencias y aumentar la precisión del modelo durante la noche.

Si bien, se logra una mayor precisión, aún se mantienen un par de puntos con diferencias superiores a tres grados localizados en la ribera del Río Maipo, lo que podría estar relacionado con la existencia de vientos que descienden de la cordillera al valle – flujos catabáticos - por el cajón del río Maipo, para los cuales no se tienen registros y que no han sido considerados en la construcción del modelo.

Se ha demostrado que la ciudad, su crecimiento y las modificaciones que esto va significando en los paisajes, principalmente por el reemplazo de coberturas naturales y semi naturales por usos urbanos (Sudhira *et al.*, 2004; Xian & Crane, 2005; entre otros), va dando origen a un clima urbano, caracterizado por su heterogeneidad, constituyendo un mosaico de situaciones atmosféricas

fuertemente influenciadas por las características de diseño y medioambiente urbano. En consecuencia, es posible advertir que existen importantes diferencias de la ciudad respecto de sus entornos rurales, presentando, en términos generales, la primera mayores temperaturas atmosféricas (Rodríguez *et al.*, 2005). Asimismo, se comprueba la existencia de una isla de calor urbano en la ciudad, que en la noche se manifiesta con mayor intensidad (Valor, 2000; Voogt *et al.* 2003), presentando un gradiente típico que encuentra su máximo en las áreas centrales (Oke, 1987). Las diferencias de temperatura encontradas entre las zonas más cálidas de la ciudad, en sus áreas centrales, y aquellas zonas más frías, en general asociadas a zonas rurales, varía entre 5°C durante la mañana, hasta 12°C en la noche. Si bien existe la diferencia urbano – rural, existen también áreas urbanas que poseen igual comportamiento al de las áreas rurales, como por ejemplo, el sector oriente de la ciudad durante la mañana y tarde, así mismo, se describen durante la tarde islas de calor que se ubican en un alto porcentaje en sectores no urbanos del nor poniente.

La distribución espacial de la temperatura atmosférica de la ciudad que fue modelada para el mes de enero de 2009, se corresponde altamente con resultados obtenidos por investigaciones precedentes. De este modo parece bastante coherente lo señalado por Aranda y Romero (1989), respecto a que las condiciones de la topoclimatología de la ciudad de Santiago servirían para explicar el resultado meteorológico y el comportamiento térmico. La ciudad posee una heterogénea morfología urbana localizada sobre el piedemonte y la llanura aluvial, conformada por el centro antiguo de alta densidad y cañones urbanos, barrios residenciales con superficies verdes ubicados en el área oriente y por extensas áreas marginales, urbanas e industriales, en que se alternan laderas desforestadas, sitios eriazos de suelo desnudo, localizados actualmente al N y NW. Este mosaico urbano descrito explica en alguna medida que al oriente de la ciudad se localicen áreas que poseen una menor temperatura con respecto al

resto de la ciudad, y por el contrario se explicarían aquellas islas de calor ubicadas al poniente, ocupando superficies no urbanas, que se corresponderían con terrenos industriales y áreas naturales desforestadas, sumado al color oscuro de los sedimentos, producto de su formación geológica cinerítica. El sector norponiente además se ubica sobre los sectores más bajos de la cuenca, favoreciendo la concentración de brisas de aire cálida que actúan aumentando las temperaturas (Beral –Guyonnet, 1997; Cuadrat *et al.*, 2003 y 2005 y Jo *et al.*, 2001).

Lo anterior fue posteriormente probado por Romero *et al.* (2008), en una investigación que analiza la isla de calor urbana para el verano del año 2007, donde se señala que, producto de las condiciones que posee el sector W y NW de la ciudad, se produce un proceso de calentamiento que localiza islas de calor en el borde occidental de Santiago durante la mañana y tarde..

Asimismo, esta investigación encuentra que las temperaturas más bajas se ubican en la zona SW. Las comunas de San Bernardo y Calera de Tango, mantienen temperaturas menores, que podrían ser transferidas al centro de la ciudad a través de un corredor formado por el cono de aproximación del Aeropuerto de Cerrillos.

Si bien esta investigación no consideró el estudio del viento, se cuenta con antecedentes que permiten establecer que existe relación entre ambas variables climáticas, sobre todo respecto a su dirección y la distribución espacial de la temperatura atmosférica, según lo señalado por Aranda y Romero (1989) y actualmente por Romero y Opazo (2010). La localización de la ciudad en una cuenca cerrada, rodeada por cadenas montañosas genera un sistema de vientos anticiclónicos débiles que soplan del SW y S, lo que explicaría el efecto que se manifiesta sobre todo durante la mañana y la tarde con el cono de aproximación del ex aeropuerto de Cerrillos, que producto de su localización permite la entrada

de estos vientos a la ciudad provocando un enfriamiento. La caracterización meteorológica consideró el viento, las estaciones analizadas se localizan al norte de la Avenida Libertador Bernardo O'Higgins. Predominan en estas estaciones las direcciones Oeste – Sur Oeste durante el día, y las direcciones Sur en la noche, asumiendo esto para el resto de la ciudad, el cono de aproximación del ex aeropuerto cerrillos se comporta como un corredor de vientos. No todas las estaciones consideradas para la construcción del modelo poseen registros de viento, y los datos con que se cuenta no permiten estudiar las brisas locales, o aquellos flujos anabáticos (valle – montaña), o catabáticos (montaña – valle) que se producen producto de las características geográficas de la ciudad.

Esta investigación aporta elementos que pueden considerarse en la gestión ambiental de la ciudad de Santiago, los resultados de los modelos de regresión permiten establecer el efecto que tienen sobre la temperatura los factores escogidos durante la mañana, tarde y noche.

Entre los antecedentes mencionados por Alcoforado *et al.* (2009), existen experiencias en que se ha considerado el comportamiento térmico como un elemento dentro de la planificación urbana. La misma autora además entrega lineamientos construidos a partir de zonas que define en función del clima y que pueden asemejarse a las zonas termales definidas por Stewart & Oke y luego aplicadas en Santiago por Irrarrázaval en el año 2011. El éxito de la gestión de la ciudad está dado en una medida importante por reconocer unidades de aproximación con límites y lineamientos claros, lo que sería en esta investigación el considerar las zonas termales como unidad de planificación.

Gran parte de las medidas planteadas por Alcoforado están relacionadas con la vegetación, asociada a un área homogénea que da cuenta de las necesidades y posibilidades de mantener y aumentar la superficie vegetada y disminuir las

superficies construidas, como un elemento esencial en el control de la temperatura, factores que se ha probado influyen sobre el comportamiento de la temperatura en la ciudad de Santiago. Asimismo se plantea el tema de la rugosidad urbana como un factor necesario de considerar por su efecto sobre el viento en la ciudad. Los resultados de esta investigación determinan que no existe relación entre las temperaturas y la rugosidad, y en gran parte esto puede explicarse porque este estudio no consideró el viento, sumado a razones técnicas que se relacionan con la escala y calidad de la información obtenida respecto de la altura de las edificaciones en la ciudad. El estudio del viento es sin duda una tarea pendiente que debe ser abordada para complementar el actual estudio y poder aportar mayores antecedentes a la planificación.

Finalmente, Alcoforado *et al.*, consideran la posición geográfica como un elemento importante a la hora de establecer lineamientos de gestión ambiental urbana. Este estudio consideró dos variables referidas a ello: altitud y orientación. Sin embargo, solo la primera fue incluida para el modelo de regresión de la mañana y la tarde. A raíz de lo anterior, puede parecer relevante también incorporar este tipo de elementos, sobre todo relacionados con la orientación respecto al sol y los flujos de viento y posición geográfica, tales como laderas y fondos de valle por ejemplo, considerando que la ciudad de Santiago se encuentra localizada en una cuenca.

5.1. Discusiones metodológicas

Esta investigación considera únicamente información de estaciones meteorológicas con acceso público y gratuito. Dicha información no está contenida en una red coordinada, sino que por el contrario, corresponde a estaciones instaladas por diversas instituciones y por consiguiente, con objetivos también diversos, lo que impone una limitación al estudio, existiendo zonas de la ciudad no cubiertas por estaciones meteorológicas fijas y dudas respecto a la calidad de los

datos que pueden ser parte importante de la causa de las diferencias observadas entre los resultados modelados y medidos en terreno para la noche del 21 de enero de 2009.

Respecto a lo mismo, y debido a las particularidades observadas en el comportamiento climático de una ciudad, sobre todo si se consideran los factores que influyen, la posibilidad de aplicar el modelo que se construye debe necesariamente ser objeto de validación, evaluando la pertinencia de los factores además de los pesos otorgados a éstos en la estimación de los valores de la variable dependiente.

La utilización de información calculada a partir de imágenes de satélite permitió la obtención de factores de representación espacial continua, siendo un complemento significativo a la información discreta proveniente de los puntos de información extraída de estaciones meteorológicas fijas y móviles, tal como lo plantean Voogt & Oke (2003), Beeson *et al.* (2005) y Farías (2007), entre otros. Este estudio utilizó finalmente la información obtenida de la imagen ASTER del 04 de febrero. No obstante, en el desarrollo de la investigación se compararon los resultados del modelo con las variables de cobertura vegetal, superficies impermeables y temperatura de emisión superficial calculadas también sobre imágenes Landsat (12 de Febrero de 2009). Ambas imágenes satelitales arrojaron resultados similares, dando cuenta de un mismo patrón espacial. La importancia de lo anterior radica en comprobar que es posible utilizar una imagen Landsat de menor resolución espacial considerando que estas se encuentran disponibles en forma gratuita en sitios tales como el Instituto de Pesquisas Espaciales de Brasil (INPE) y la Universidad de Maryland, con una data que abarca las últimas tres décadas.

Como se mencionó en la metodología de la presente investigación, inicialmente se pretendía aplicar un modelo de interpolación cokriging, que permite además incorporar factores altamente correlacionados con el elemento a interpolar, en este caso, la temperatura atmosférica. A pesar de las importantes ventajas que según la literatura tiene este método, fue descartado ya que se encontraron pocas investigaciones que lo hayan aplicado para modelar la distribución espacial de parámetros climáticos, y de éstas, todas se encontraban referidas a la interpolación de las precipitaciones, incorporando no más de tres variables (Hartkamp *et al.*, 1999; Diodato, 2005). Fue imposible encontrar descripciones del módulo que permitieran entender cada uno de los parámetros necesarios. Se escogió a raíz de esto utilizar un modelo de regresión que igualmente permitió incorporar factores asociados a un factor de regresión parcial que indicaba su participación en la obtención de la variable dependiente, temperatura atmosférica.

CAPITULO VI. CONCLUSIONES

La temperatura atmosférica anual promedio de la ciudad de Santiago a partir del año 1920 describe ciclos con puntos de inflexión, altos y bajos, que difieren en general en 1°C. La estación Quinta Normal es absorbida por la ciudad entre 1900 – 1920, el efecto del cambio rural – urbano experimentado no es evidente al comparar los datos anteriores a 1900 y aquellos posteriores a 1920, sin embargo si resulta relevante el aumento de 1,5°C entre 1920 y 2010, que antes de 1920 alcanzaba sólo medio grado.

El año 2009, comparado con el promedio de las temperaturas y su desviación estándar en los últimos 30 años es considerado, tanto en su promedio de temperaturas estival y anual, un año de comportamiento normal, sin embargo se observa una anomalía positiva de +0,4°C La oscilación termica diaria de los días analizados muestra un comportamiento similar , la temperatura comienza a elevarse entre las 8 ó 9 de la mañana, para alcanzar un máximo en la tarde, a las 16 horas aproximadamente. Por lo anterior el modelo se construye para tres horas del día, mañana (9 hrs.), tarde (16 hrs.) y noche, aproximadamente dos horas y media después de la puesta de sol (22 hrs.), quedando excluidas las estaciones de Lo Prado y Torre Entel, debido a que su comportamiento corresponde a situaciones especiales.

Esta investigación reconoce aquellos factores que influyen en la formación del clima urbano de la ciudad de Santiago, de ocho factores considerados a partir de la literatura, sólo cinco son finalmente aquellos que se relacionan con el comportamiento de la temperatura atmosférica. Las variables que se seleccionaron para ser introducidas en el modelo de regresión varían durante el día, y por tanto el comportamiento de la temperatura permite ser explicado por diferentes factores locales en la mañana, tarde y noche.

Durante la mañana y la tarde, la cobertura vegetal, las superficies impermeables, la altura, la temperatura de emisión superficial y la interpolación de temperatura atmosférica se encuentran relacionados con la temperatura atmosférica, y son incluidos en el modelo. En la noche los factores se reducen a tres, debido a que la altitud no se encuentra correlacionada y la temperatura de emisión superficial es descartada. La interpolación de temperatura atmosférica es aquel factor que permitió dar variabilidad horaria al modelo.

La altura y cobertura vegetal poseen una correlación de signo negativo con la temperatura. El efecto de disminución que tiene la cobertura vegetal sobre la temperatura oscila entre 0,5 y 1,5°C. Por el contrario, las superficies impermeables aumentan la temperatura. Durante la tarde, los sectores completamente cubiertos por vegetación pueden encontrarse 1,5°C por debajo, y si se considera el aumento respecto a la impermeabilización, la diferencia máxima entre un sector completamente cubierto de vegetación respecto a un terreno 100% impermeabilizado puede alcanzar diferencias superiores a 2°C. Los antecedentes anteriores permiten comprobar la hipótesis que establecía que el comportamiento de la temperatura atmosférica de la ciudad de Santiago puede ser explicado a escala metropolitana por variables ambientales adicionales que actúan aumentando o disminuyendo la cantidad de calor.

Respecto a que la ciudad de Santiago presenta importantes y significativas diferencias térmicas en su interior y en referencia a las zonas rurales, que permiten caracterizar islas de calor y frío, que conforman verdaderos archipiélagos térmicos expresados como gradientes de variabilidad, continuos y discretos, la investigación permitió obtener mapas térmicos en tres horarios, dando cuenta de la existencia de zonas más cálidas al interior de la ciudad que dibujan islas de calor urbanas de distintas superficies, además de algunas pequeñas islas frías

que se corresponden con áreas vegetadas, y que se manifiestan más claramente durante la tarde y noche.

Durante el día el área urbana no es térmicamente homogénea, las áreas más frías se encuentran localizadas principalmente en el sector oriente de la ciudad y el sector más cálido se concentra en el sector sur. El sector oriente de la ciudad posee temperaturas similares al área rural, no urbana. En términos generales la temperatura decrece del centro a la periferia, fuera de la circunvalación de Américo Vespucio. Es posible identificar el cono de aproximación del ex aeropuerto de cerrillos y la existencia de algunos parches de características agrícolas hacia el sur de la ciudad; sin embargo, las temperaturas en Pudahuel, cercanas al aeropuerto internacional, localizadas fuera del límite urbano, describen islas de calor, que aumentan su superficie de la mañana a la tarde. Es posible identificar el Parque O'Higgins y la Quinta Normal como áreas de menor temperatura. La Quinta Normal alcanza hasta 3°C de diferencia con la matriz urbana circundante y el Parque O'Higgins es 2°C más frío.

En la noche Santiago se ha convertido en un archipiélago de calor, o bien una gran y única isla de calor urbana que incluye casi por completo la superficie de la ciudad, existiendo zonas cálidas también en las áreas rurales ubicadas al norte. La isla de calor más intensa se ubica en el centro y se propaga sutilmente hacia el oriente, aledaña al cerro San Cristóbal. La distribución térmica es a esta hora altamente homogénea, ya no existe la distinción oriente – poniente, ni se perciben las diferencias entre las áreas vegetadas y las construidas. La vegetación no logra tener un efecto significativo a esta escala. A esta hora, ingresan temperaturas menores por el cono de aproximación de cerrillos y en partes de la comuna de la Pintana y Puente Alto, que puede explicarse por el predominio de la actividad rural, además de la presencia del río Maipo, que permite una circulación mayor de vientos.

Respecto a la hipótesis de que los diferentes usos y coberturas urbanas, expresados en categorías de zonas climáticas en la ciudad, poseen características térmicas que permiten diferenciarlas, del análisis de las zonas climáticas de acuerdo al comportamiento de su temperatura atmosférica, es posible determinar que existen diferencias entre las diversas unidades termales urbanas y que esto es variable durante el día. En primera instancia se describen las diferencias respecto al promedio, donde se observa que las categorías urbanas propiamente tal poseen los mayores valores, y entre éstas, la zona climática industrial, es durante todo el día, la tipología más cálida.

La investigación, determinó la existencia de diferencia significativa entre las zonas a los tres horarios considerados, y posteriormente, se pudo dar cuenta de las clases entre las cuáles se encontraban las mayores diferencias, situación que demostró, al igual que en el caso del análisis de los promedios, una significativa variabilidad diaria. Una vez más la zona industrial se diferenció netamente de casi todas las zonas restantes. Asimismo, se encontraron diferencias entre las clases urbanas de residencias de mayores densidades respecto de las series naturales vegetadas. Zonas climáticas de menores densidades atenuan la situación anterior. De los resultados se desprende una similitud del comportamiento térmico de los sitios eriazos con los usos de suelo urbanos más densos.

El que existan diferencias entre las zonas termales respecto de su comportamiento térmico, sumado al reconocimiento de que existen factores ambientales y urbanos que están influenciando dicho comportamiento constituyen antecedentes valiosos de considerar en la gestión ambiental de la ciudad, que permitan definir acuerdos y construir políticas que propendan al mejoramiento de la calidad de vida de sus habitantes. Lo anterior requiere de la incorporación del concepto de red de monitoreo que sirva a la articulación de las diferentes fuentes de datos meteorológicos actualmente disponibles para la ciudad de Santiago. Si

bien es cierto, se cuenta con datos de 30 estaciones meteorológicas, el que pertenezcan a instituciones distintas que tienen objetivos diversos constituye una limitación ya que aumenta el nivel de incertidumbre respecto a la utilización de las series de datos de manera conjunta, aun más considerando que no existe información respecto al estado de los instrumentos y la calidad de los datos registrados.

CAPITULO VII. BIBLIOGRAFÍA

AGUAYO, M. y LORA, E. 2005. Cómo realizar “paso a paso” un contraste de hipótesis con SPSS para Windows: Relación o asociación y análisis de la dependencia (o no) entre dos variables cuantitativas. Correlación y regresión lineal simple. Fundación Andaluza Beturia para la investigación en salud. Docuweb FABIS. Dot. N° 0702005. 15 p.

AKBARI , H., POMERANTZ, M. y TAHA, H. 2001. Cool Surfaces and Shade Trees to Reduce Energy Improve Air Quality in Urban Areas, *Solar Energy* Vol. 70, no 3. Elsevier Science Ltd., pp. 295–310.

ALCOFORADO. M, ANDRADE. H, LOPES. A y VASCONCELOS. J. Application of climatic guidelines to urban planning: The example of Lisbon (Portugal). *Landscape and Urban Planning* 90. 56–65. 2009.

Aranda C, Romero H. Topo-climatología de la cuenca de Santiago y sus efectos en la contaminación atmosférica y en la salud. *Enf Resp Cir Tor* 1989; 5: 24-30.

ARNFIELD, J., 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.

ARNOLD, C. AND J. GIBBONS. 1996. *Impervious Surface Coverage: The Emergence of a Key Environmental Indicator*. *Journal of the American Planning Association* 62(2):243-258.

BEESON, C.; BLUMBERG, D.; BRAZEL, A.; SHASUA-BAR, L. 2005. *Combined methods of thermal remote sensing and mobile climate transects in Beer Sheva, Israel*. *International Archives of Photogrammetry, Remote sensing and Spatial Information Sciences*, Vol XXXVI, Part8/W27 (eds. M. Moeller, E. Wentz).

BERRAL-GUYONNET, I. 1997. Analyse spatiale des températures mensuelles dans l'agglomération lyonnaise. *Revue de Géographie de Lyon* 72: 263-266.

CUADRAT, J., M. SAZ, S. VICENTE-SERRANO, 2003. Surface wind direction influence on spatial patterns of urban heat island in Zaragoza (Spain). *Geophysical Research Abstracts*, 5: 02592. European Geophysical Society.

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

DE LA CUADRA, F. 2003. Conflicto ambiental y acción colectiva en Chile: el caso de la contaminación atmosférica de Santiago. En libro: Ecología política: naturaleza, sociedad y utopía. P. 277-291.

DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA UNIVERSIDAD DE CHILE, DGF. (2006) *Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI*. Comisión Nacional del Medioambiente (CONAMA), Santiago, Chile.

DIODATO, N. 2005. The influence of topographic co-variables on the spatial variability of precipitation over small regions of complex terrain. *International Journal of Climatology*, N° 25, p. 351-363.

EASTMAN, J. 2006. IDRISI ANDES. Guide to GIS and Image Processing. Worcester, MA: Clark Labs, Clark University.

ELIASSON I., 1999. The use of climate knowledge in urban planning. *Elsevier, Landscape and urban planning* N° 48, pág. 31 – 44.

FARÍAS, G.; DESSI, A.; MASELLI, F. y CROTTI, C. 2007. *Integración de series de datos satelitales y climáticos para la definición de áreas climáticamente homogéneas en el centro –nordeste de Argentina*.

FOUNDA, D. & GIANNAKOPOULOS, C. 2009. The exceptionally hot summer of 2007 in Athens, Greece – A typical summer in the future climate?. *Global and planetary change*, 67: 227 – 236.

GONZÁLEZ, B. 2006. La prueba de Shapiro & Wilk para verificar la normalidad de un conjunto de datos proveniente de muestras pequeñas. Área de Estadística, Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales. Universidad Rafael Landívar. Guatemala C.A. En: http://byrong.50g.com/estadistica/estadap/shapiro_wilks_byrong.pdf

GORSEVSKI. V., H. TAHA, D. QUATTROCHI, J. LUVALL. 2000. Air Pollution Prevention through Urban Heat Island Mitigation: An Update on the Urban Heat Island Pilot Project. Washington DC. U.S Environmental Protection Agency. 10 p.

GROSS, P. 2005. Medio ambiente y desarrollo sustentable. En: *Gestión ambiental a nivel local*. Ediciones Surambiente, Corporación Ambiental del Sur. Patricio Gross, Jessica Ulloa y Rodrigo Arru (Editores). P. 15 – 40.

GUERRA, L. 2009. Evaluación ambiental de la tierra vacante del Área Metropolitana del Gran Santiago y su relación con los grupos socioeconómicos de la población y el valor del suelo. Memoria para optar al Título Profesional de Geógrafo. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Universidad de Chile. P. 83.

IRARRÁZAVAL, F. 2011. Clasificación y evaluación ambiental de zonas termales en el transecto entre las comunas de Pudahuel y Las Condes y su relación con el mercado inmobiliario. Memoria para optar al Título Profesional de Geógrafo. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Universidad de Chile.

JO, M., K. LEE, B. JUN, B. KWON and Y. JO. 2001. The spatial topographic of urban surface temperature using remotely sensed data and GIS. 22nd Asian conference on remote sensing. Singapore. 5 pp.

HARTKAMP, A.D., K. DE BEURS, A. STEIN, and J.W. WHITE. 1999. Interpolation Techniques for Climate Variables. NRG-GIS Series 99-01. Mexico, D.F.: CIMMYT.

HONJO T, NARITA K-I, SUGAWARA H, MIKAMI T, KIMURA K & KUWATA N, 2003. Observation of cool island effect in urban park (Shinjuku Gyoen). 15^a Conferencia Internacional de Clima Urbano, Sept. 1- 5. Polonia.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, IPCC. (1995) *Climate change*. Second report, Ginebra, Suiza.

MANTUA, N. HARE, S. ZHANG, Y. WALLACE, J. y FRANCIS, R. (1997) *A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production*. Revista Bulletin of the American Meteorological Society N°78. Washington, Estados Unidos, 1069 – 1079.

MOLINA, M. 2007. Efectos de los tipos de urbanización asociados al crecimiento urbano del área Metropolitana del Gran Santiago sobre la generación y comportamiento de micro islas de calor. Memoria para optar al Título Profesional de Geógrafo. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Universidad de Chile. P. 118.

MOLINERO, L. 2002. Construcción de modelos de regresión multivariantes. Asociación de la sociedad española de la hipertensión. 10 p. En: www.ccp.ucr.ac.cr/~icamacho/bioest103/contenido/regresion1.pdf

MOREIRA, J.M.; CORZO, M.; PITA, M.; GUERRERO, C. 2006. *El clima, una herramienta para la gestión de la información climatológica en Andalucía*. Comunización 272, tecnimap, Sevilla. 1-8 p. En: www.administracionelectronica.gob.es/recursos/pae_000002499.pdf

NOWAK, D. Y MCPHERSON, E. G. 1993. "Cuantificación del impacto ambiental de los árboles en Chicago". *Unasylva*. 44(173).

NYUK, W. & KARDINAL, S. 2008. *GIS-based greenery evaluation on campus master plan*. *Journal Landscape and Urban Planning* 84: 166 – 182.

OKE, T., 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 108: 1-24.

OKE, 1987. The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 19, N°. 11, 2085 – 2104.

OKE, T. R. 1995. The heat island of the urban boundary layer: Characteristics, causes and effects. In J. E. Cermak, A. G. Davenport, E. J. Plate, & D. X. Viegas (Eds.), *Wind climate in cities* (pp. 81–107). Dordrecht: Kluwer Academic.

OLIVOS, P. y PEDRONI, G. 2005. La Gestión Ambiental Local: conceptos, experiencias y alcances desde la Gestión Ambiental Regional. En: *Gestión ambiental a nivel local*. Ediciones Surambiente, Corporación Ambiental del Sur. Patricio Gross, Jessica Ulloa y Rodrigo Arru (Editores). P. 41 – 56.

ONU, Organización de las Naciones Unidas. 2005. Datos de Población Urbana Mundial, Latinoamericana y de Chile 2005-2030 en, www.un.org, visitada el lunes 16 de enero de 2006.

OSÉS, R. & SAURA, G. 2004. *Homogenización y pronósticos de series de Temperaturas Decenales*. Presentado en las XXVIII Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española. 11 – 13 de Febrero, 2004.

PAULEIT, S.; ENNOS, R.; and GOLDING, Y. 2005. Modeling the environmental impacts of urban land use and land cover change – a study in Merseyside, UK. *Landscape and Urban Planning* 71: 295-310.

PEÑA, M. y ROMERO, H. 2006. Relación espacial y estadística entre las islas de calor de superficie, las coberturas vegetales, la reflectividad y el contenido de humedad del suelo, en la ciudad de Santiago y su entorno rural. *Anales de la Sociedad de Ciencias Geográficas de Chile* 2005. Pp. 107 – 117.

POTCHTER, O, COHEN, P, and BITAN, A. 2006. Climatic behavior of various urban parks during hot and humid summer in the Mediterranean city of Tel Aviv, Israel *International Journal of Climatology* 26, 1695-1711

PRASHAD, L., 2004. Urban Materials and Temperature in Phoenix: Connecting Land Use, Socioeconomics, and Vegetation and Relating Ground and Air Variables. M.S. Thesis Defense, Arizona State University, May 14, 2004.

RIAÑO, D.; SALAS, J.; CHUVIECO, E. 2000. Corrección Atmosférica y Topográfica, Información Multitemporal y Auxiliar Aplicadas a la Cartografía de Modelos de Combustibles con Imágenes Landsat-TM. Tecnologías Geográficas para el Desarrollo Sostenible. Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá, 2000: 222-239.

RODRÍGUEZ, L; RODRÍGUEZ, G & BRAVO, A. 2005. Hidrología Urbana: Una aproximación transdisciplinaria hacia la reestructuración de las ciudades hídricas. Síntesis Tecnológica, Volumen 2 N° 1. Páginas 37 – 45. Valdivia, Chile.

ROHINTON E., 1999. Urban Heat Island & Cooling Load: The case of an Equatorial City, *Architecture, Energy & Environment*, 16:1-16:8

ROMERO, H. 2001. Ecología urbana y gestión ambiental sustentable de las ciudades intermedias chilenas. *Ambiente y Desarrollo*, Dic. 2001, vol XVII, no 44, p. 45-51

ROMERO, H., 2004. Crecimiento Espacial de Santiago entre 1989 y 2003 y la Pérdida de Servicios Ambientales. *Hacer Ciudad*, Editor Patricio Tupper, Centro Chileno de Urbanismo, Santiago: 179-201.

ROMERO, H.; VÁSQUEZ, A. Y ÓRDENES, F. 2003. Ordenamiento territorial y desarrollo sustentable a escala regional, ciudad de Santiago y ciudades intermedias en Chile. Figueroa, E. y J. Simonetti (eds.), *Globalización y biodiversidad: oportunidades y desafíos para la sociedad chilena*. Santiago: Editorial Universitaria, 167-224.

ROMERO, H., MOLINA, M., MOSCOSO, C., SARRICOLEA, P. Y A. VÁSQUEZ. 2008. Cambio climático y sustentabilidad urbana de las metrópolis chilenas. *II Coloquio Chile Metropolitano*, Universidad del BíoBío, Concepción, 20 – 21 Noviembre, 2008.

ROMERO, H.; MOSCOSO, C. y SMITH, P. 2009. *Lecciones y conclusiones sobre la falta de sustentabilidad ambiental del crecimiento espacial de las ciudades chilenas*. Serie GEOlibros N°12 Colección EURE-Libros. Instituto de Geografía e Instituto de Estudios Urbanos y Territoriales. Hidalgo, R., De Mattos, C., Arenas, F. (Eds.) p. 89 – 110.

ROMERO, H.; IRARRÁZAVAL, F.; OPAZO, D.; SALGADO, M. y SMITH, P. 2010. Climas urbanos y contaminación atmosférica en Santiago de Chile. Revista Latinoamericana de Estudios Urbano Regionales, EURE. Pontificia Universidad Católica de Chile, vol. 36, N°109: 35 – 62.

SABATINI, F.; WORMALD, G.; SIERRALTA, C. y PETER, P. 2007. Segregación residencial en Santiago: tendencias 1992 – 2002 y efectos vinculados con su escala geográfica. Documento de trabajo N°37, Instituto de Estudios Urbanos y Territoriales. Santiago, Chile.

SARRICOLEA, P. 2008. Análisis de la sustentabilidad del crecimiento urbano de la ciudad de Santiago y sus efectos sobre la configuración de las temperaturas superficiales. Tesis para optar al grado de Magíster en Geografía con mención en Recursos Territoriales. Universidad de Chile.

SECRETARÍA REGIONAL MINISTERIAL, REGIÓN METROPOLITANA DE SANTIAGO. 2009. Cambios demográficos 1990 – 2020: Análisis Proyecciones de Población INE.

SIERRALTA, C. 2008. Efectos de la segregación residencial socioeconómica y los jóvenes de la extracción popular en Santiago de Chile (1992 – 2002). Tesis presentada para optar al grado de Magíster en Desarrollo Urbano. Santiago, Chile.

SLUITES, R. 2009. *Interpolation methods for climate data. Literature Review.* Intern rapport; IR 2009-04.

SMITH, P. Y ROMERO, H. 2009. Efectos del crecimiento urbano del Área Metropolitana de Concepción sobre los humedales de Rocuant-Andalién, Los Batros y Lengua. Revista de Geografía Norte Grande, 43:81-93. (ISI)

STEWART, I.D. AND OKE, T. 2009. *Classifying urban climate field sites by “local climate zones”: The case of Nagano, Japan. IN: Preprint, Seventh International Conference on Urban Climate, 29 June -3 July, Yokohama.*

SUDHIRA, H.S.; RAMACHADRA, T.V. AND JAGADISH, K.S. 2004. Urban sprawl: metrics, 115merica115 and 115merica115 using GIS. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 5. Págs. 29-39.

TAGESTAD, J. 2000. Radiometric standardization of adjacent Landsat Thematic Mapper Image for multi-scene mosaics. Master of science, Utah State University, Logan, Utah.

IHL THESSMAN, M; ACUÑA C y SMITH, R. 1999. Cambios en los balances naturales de una ciudad (clima, aire, suelo, agua, flora y fauna): el caso de Santiago, Chile. Anales de la Sociedad Chilena de Ciencias Geográficas año 1999. Páginas 63 – 70.

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

VILLARROEL, C. ROSENBLUTH, B. y ACEITUNO, P. 2006. *Climate change along the extratropical west coast of south 116merica (Chile): daily max/min temperatures*. Proceedings of 8° Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography (ICSHMO), Foz de Iguazu, Brasil, 487 – 489.

VILLATORO, M; HENRÍQUEZ, C. y SANCHO, F. 2008. *Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de Pn, CA, CICE y P del suelo*. Revista de Agronomía Costarricense 32(1).

VOOGT, J. A. AND OKE, T.R., 2003. Thermal remote sensing of urban climates, Remote Sensing of Environment, 86, pp. 370-384.

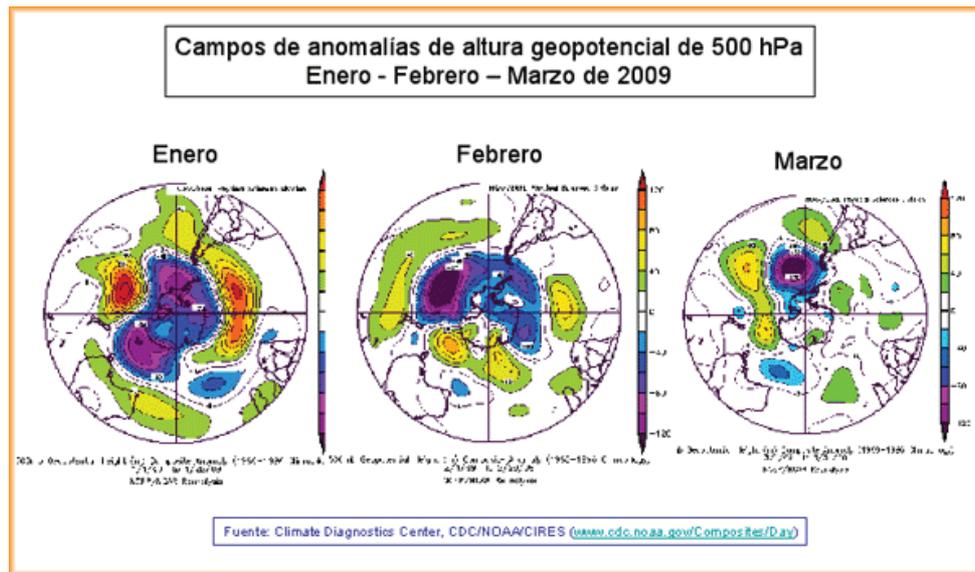
WOLF, J.; ADGER, N.; LORENZONI, I.; ABRAHAMSON, V.; RAINE, R. 2010. Social capital, individual responses to heat waves and climate change adaptation: An emprirical study of two UK cities. Global Environmental Chage 20: 44 – 52.

WONG, M.; NICHOL, J. & KAWOK, K. 2009. The urban heat island in Hong Kong: causative factors and scenario analysis. Urban remote sensing joint event. 7 p. En: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=05137468>.

XIAN, G. AND CRANE, M. 2005. Assessments of urban growth in the Tampa Bay watershed using remote sensing data. Remote Sensing of Environment 97: p. 203 – 215.

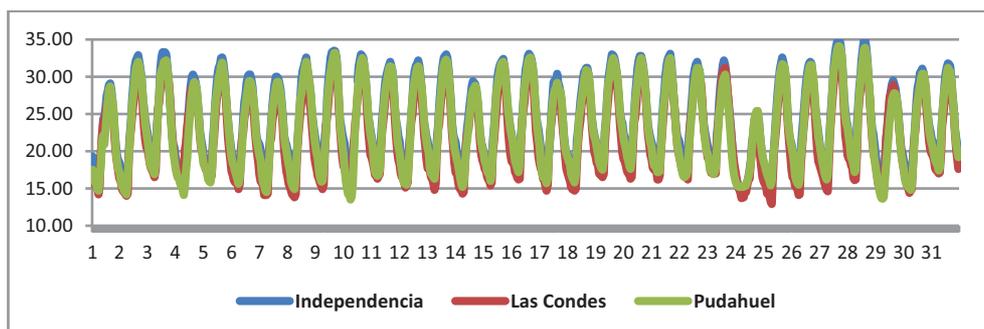
CAPITULO VIII. ANEXOS

Anexo 1.



Anexo 2. Valores Horarios Temperatura.

Enero 2009

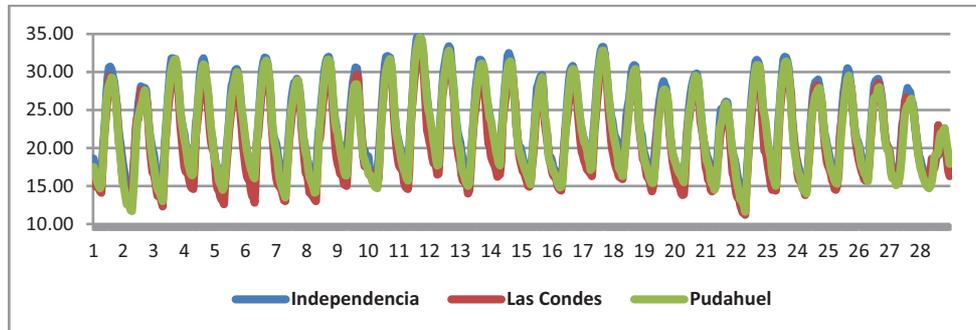


Distribución termal intraurbana en Santiago de Chile. Aporte a la gestión ambiental de la ciudad a partir de la construcción de un modelo que permita generar un mapa térmico de verano.

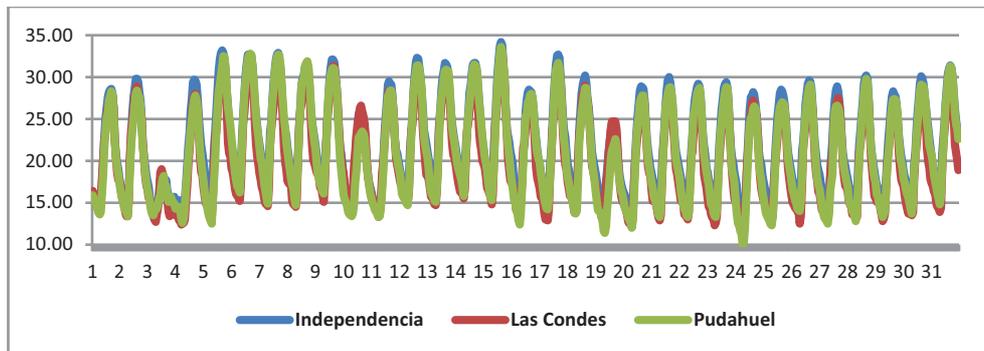
Magíster en Gestión y Planificación Ambiental

Pamela Smith Guerra

Febrero 2009

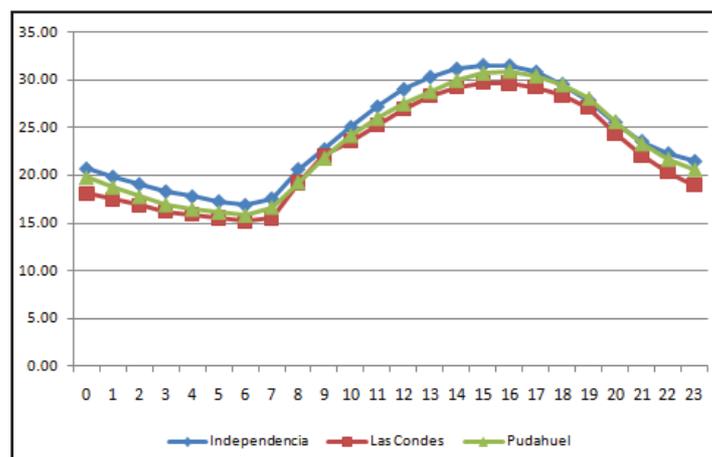


Marzo 2009



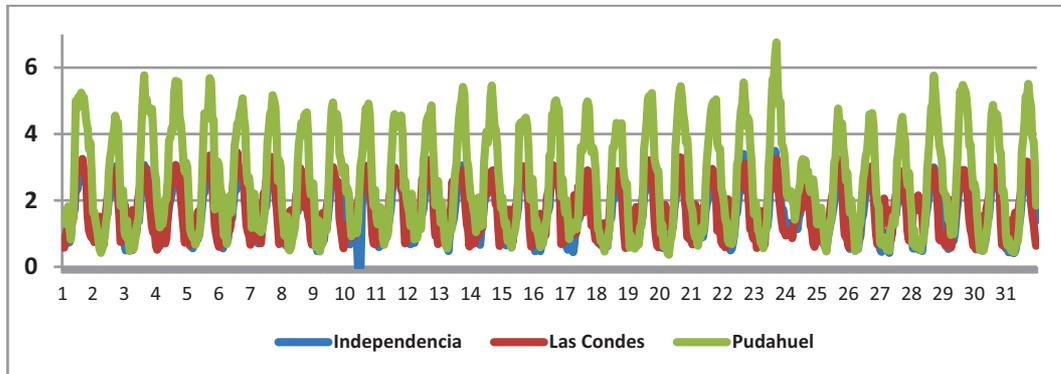
Fuente: Elaboración propia a partir de datos Red MACAN, 2009.

Anexo 3. Ciclos diarios promedios mensuales temperatura mes de enero 2009



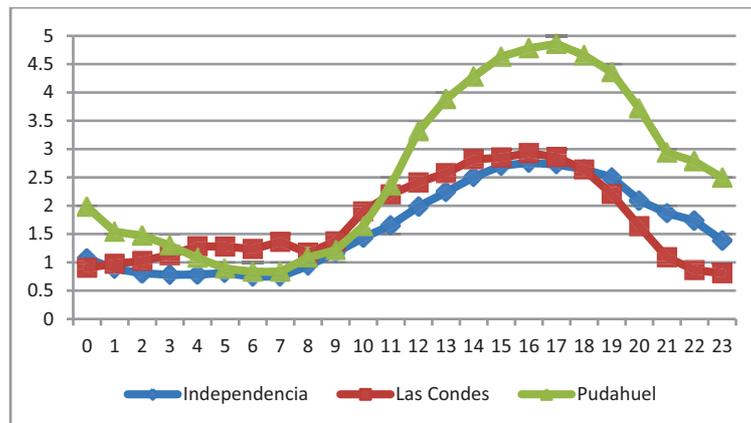
Fuente: Elaboración propia a partir de datos Red MACAN, 2009

Anexo 4. Valores horarios de velocidad del viento (m/seg) enero 2009.



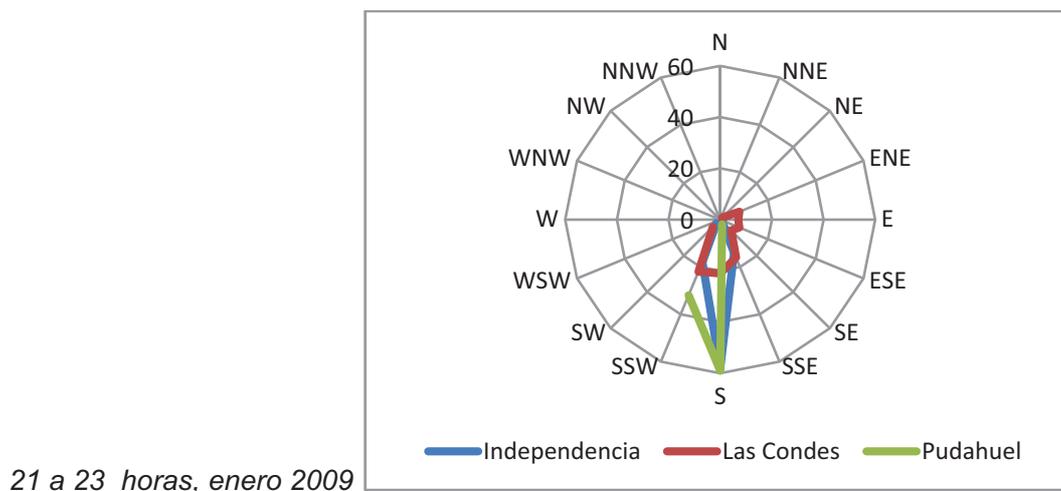
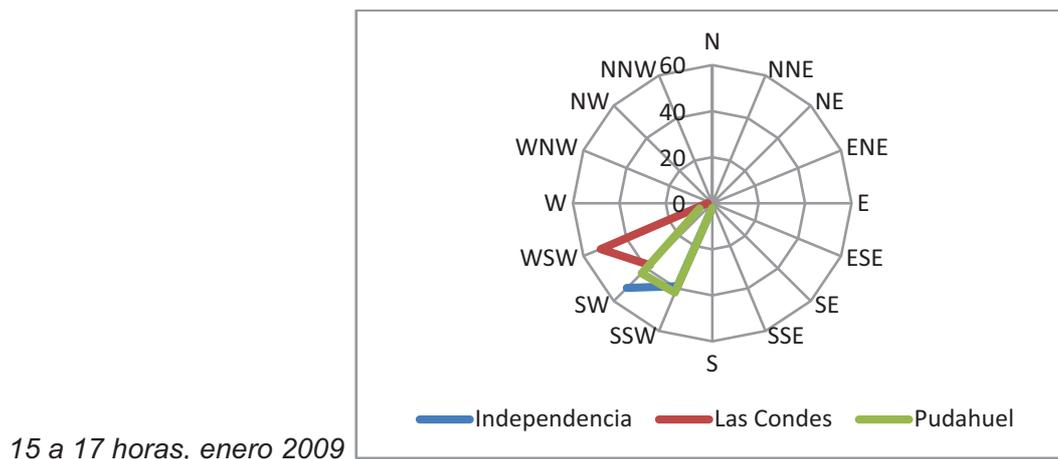
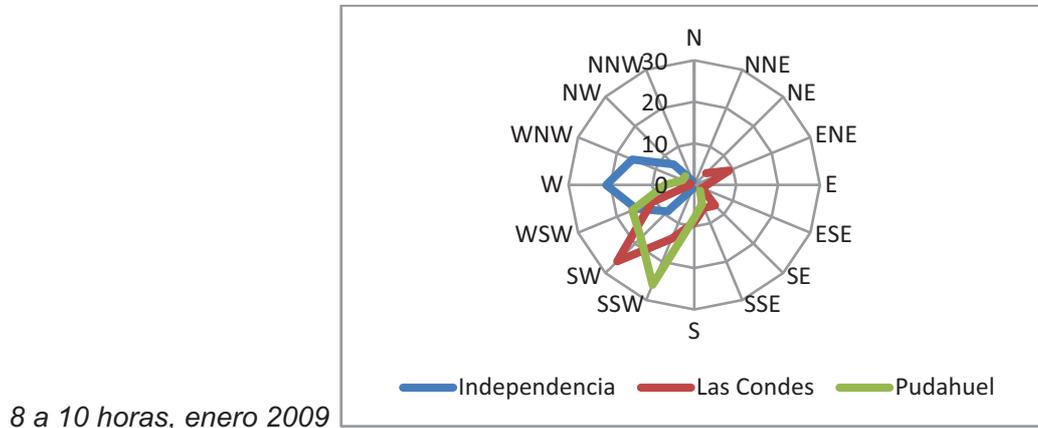
Fuente: Elaboración propia a partir de datos Red MACAN, 2009

Anexo 5. Ciclos diarios promedio mensuales velocidad del viento, enero 2009.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos Red MACAN, 2009

Anexo 6. Rosa direcciones predominantes del viento, enero 2009.



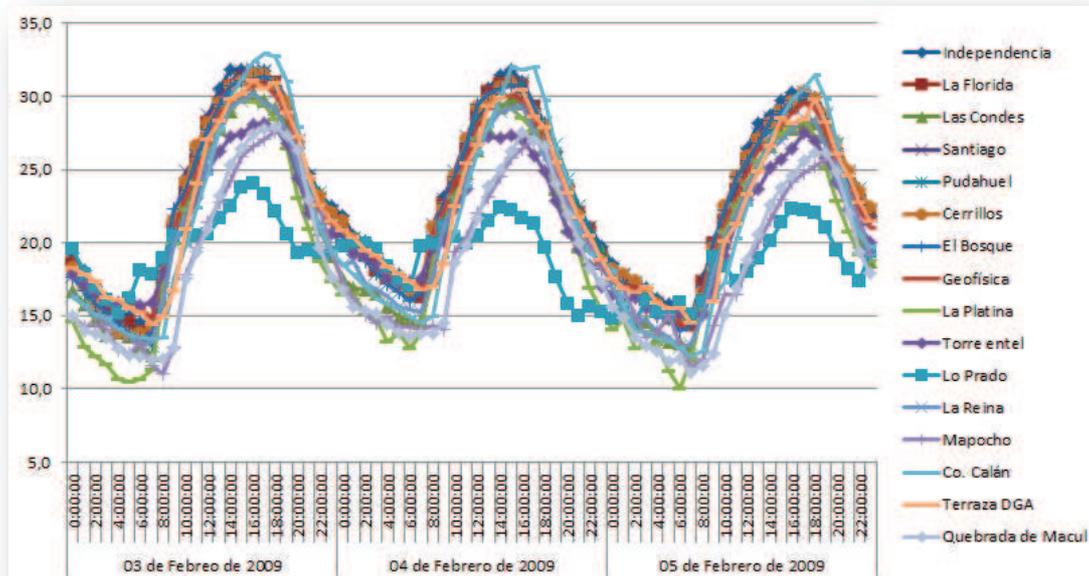
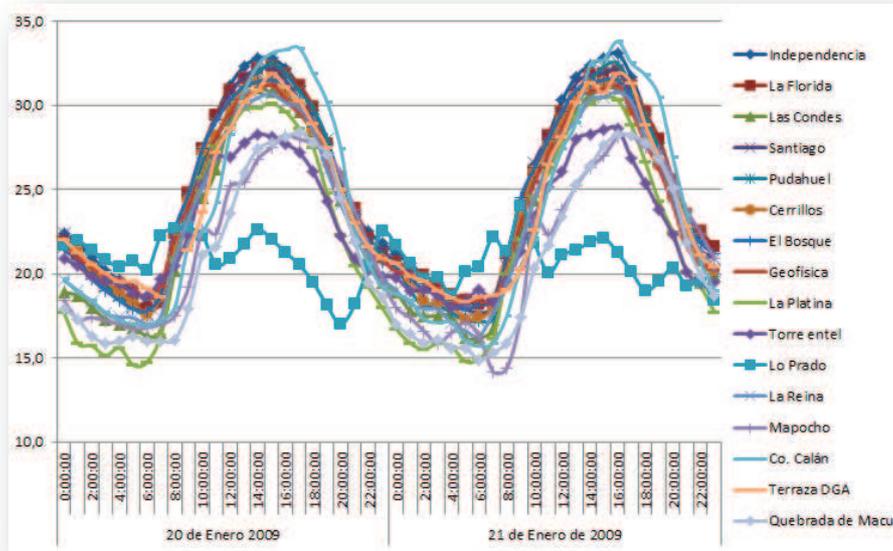
Fuente: Elaboración propia a partir de datos Red MACAN, 2009

Distribución termal intraurbana en Santiago de Chile. Aporte a la gestión ambiental de la ciudad a partir de la construcción de un modelo que permita generar un mapa térmico de verano.

Magíster en Gestión y Planificación Ambiental

Pamela Smith Guerra

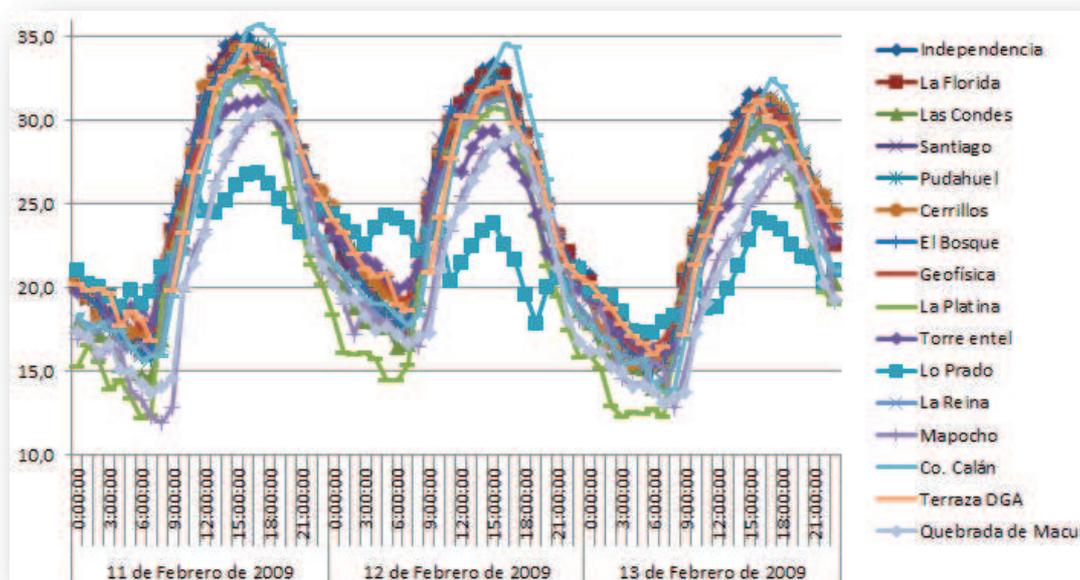
Anexo 7. Comportamiento temperatura atmosférica en Santiago, días 20 y 21 de enero y 04 y 12 de febrero.



Distribución termal intraurbana en Santiago de Chile. Aporte a la gestión ambiental de la ciudad a partir de la construcción de un modelo que permita generar un mapa térmico de verano.

Magíster en Gestión y Planificación Ambiental

Pamela Smith Guerra



Fuente: Elaboración propia a partir de la serie de datos de temperatura atmosférica del 2009 construida a partir de la información proporcionada por las diferentes instituciones que poseen estaciones meteorológicas fijas.

Anexo 8. Diagnóstico modelo de regresión mañana del 21 de enero.

Puntos Transecta	Datos Observados	Datos Kriging	Diferencia Observados - Kriging	Datos Regresión	Diferencia Observados -Regresión
CEQ pto 6	29,9	28,27	1,63	29,16	0,74
CEQ pto 5	27,5	28,44	-0,94	29,71	-2,21
CEQ pto 4	27,5	27,44	0,06	28,01	-0,51
CEQ pto 3	26,5	27,44	-0,94	28,9	-2,4
CEQ pto 2	25,89	27,2	-1,31	28,2	-2,31
CEQ pto 1	28,03	27,3	0,73	28,2	-0,17
SBC pto 8	27,9	27,54	0,36	28,43	-0,53
SBC pto 7	27,5	27,64	-0,14	28,88	-1,38
SBC pto 6	26,5	27,97	-1,47	29,38	-2,88
SBC pto 5	28,8	27,97	0,83	29,01	-0,21
SBC pto 4	26,3	27,45	-1,15	27,96	-1,66
SBC pto 3	25,93	27,1	-1,17	27,2	-1,27
SBC pto 2	25,85	27,07	-1,22	27,4	-1,55
SBC pto 1	25,93	26,77	-0,84	26,9	-0,97
PCL pto 1	25,36	26,06	-0,7	26,06	-0,7

Distribución termal intraurbana en Santiago de Chile. Aporte a la gestión ambiental de la ciudad a partir de la construcción de un modelo que permita generar un mapa térmico de verano.

Magíster en Gestión y Planificación Ambiental

Pamela Smith Guerra

PCL pto 2	27,01	26,01	1	26,33	0,68
PCL pto 3	27,04	26,01	1,03	26,76	0,28
PCL pto 4	25,6	26,04	-0,44	26,48	-0,88
PCL pto 5	26,6	26,24	0,36	26,55	0,05
PCL pto 6	27,8	26,63	1,17	27,23	0,57
PCL pto 7	28,9	27,59	1,31	28,68	0,22
PCL pto 8	28,73	27,69	1,04	28,93	-0,2
PCL pto 9	28,55	27,77	0,78	28,88	-0,33
CLB pto 1	26,65	27,65	-1	28,44	-1,79
CLB pto 2	28,05	27,58	0,47	28,05	0
CLB pto 3	27,59	27,57	0,02	28,14	-0,55
CLB pto 4	27,23	27,53	-0,3	27,9	-0,67
CLB pto 5	29,3	27,01	2,29	27,45	1,85
CLB pto 6	27,1	27,26	-0,16	27,83	-0,73
CLB pto 7	28,3	27,33	0,97	27,7	0,6
CLB pto 8	27,4	26,67	0,73	27,3	0,1
ELF pto 9	24,9	25,66	-0,76	25,04	-0,14
ELF pto 8	26,75	25,9	0,85	25,61	1,14
ELF pto 7	23,3	26,05	-2,75	26,1	-2,8
ELF pto 6	27,3	26,48	0,82	26,69	0,61
ELF pto 5	27,25	26,55	0,7	26,9	0,35
ELF pto 4	27,8	26,65	1,15	26,96	0,84
ELF pto 3	26,59	26,68	-0,09	26,75	-0,16
ELF pto 2	28,5	27,38	1,12	28,9	-0,4
ELF pto 1	28,6	27,43	1,17	28,3	0,3
LRI pto 1	25,4	25,64	-0,24	25,46	-0,06
LRI pto 2	25,8	26,07	-0,27	26,06	-0,26
LRI pto 3	26,7	26,21	0,49	26,14	0,56
LRI pto 4	25,8	26,49	-0,69	26,82	-1,02
LRI pto 5	25,9	26,47	-0,57	26,47	-0,57
LRI pto 6	27,2	26,77	0,43	27,45	-0,25
LRI pto 7	27,1	27,04	0,06	27,5	-0,4
LRI pto 8	29,1	27,4	1,7	28,36	0,74

Fuente: Elaboración Propia.

Nota: En amarillo se destacan las diferencias superiores a 2°C.

Distribución termal intraurbana en Santiago de Chile. Aporte a la gestión ambiental de la ciudad a partir de la construcción de un modelo que permita generar un mapa térmico de verano.

Magíster en Gestión y Planificación Ambiental

Pamela Smith Guerra

Anexo 9. Diagnóstico modelo de regresión tarde del 21 de enero.

Puntos Transecta	Datos Observados	Datos Kriging	Diferencias Datos Observados - Kriging	Datos Regresión	Diferencia Datos Observados-Regresión
CEQ pto 6	35.58	34.65	0.93	36.01	-0.43
CEQ pto 5	34.33	35.17	-0.84	36.43	-2.1
CEQ pto 4	34.05	32.51	1.54	33.12	0.93
CEQ pto 3	32.84	32.06	0.78	32.52	0.32
CEQ pto 2	31.83	31.72	0.11	32.08	-0.25
CEQ pto 1	31.8	31.37	0.43	31.58	0.22
SBC pto 8	31.92	31.4	0.52	31.6	0.32
SBC pto 7	31.6	31.36	0.24	31.6	0
SBC pto 6	32.06	31.47	0.59	31.78	0.28
SBC pto 5	31.16	31.46	-0.3	31.79	-0.63
SBC pto 4	30.8	30.53	0.27	30.6	0.2
SBC pto 3	30.16	30.11	0.05	30.14	0.02
SBC pto 2	30.08	30.05	0.03	29.96	0.12
SBC pto 1	29.76	29.69	0.07	29.5	0.26
PCL pto 1	30.2	30.24	-0.04	30.4	-0.2
PCL pto 2	32.8	30.25	2.55	30.38	2.42
PCL pto 3	30.58	30.26	0.32	30.41	0.17
PCL pto 4	30.77	30.31	0.46	30.44	0.33
PCL pto 5	30.38	30.53	-0.15	30.8	-0.42
PCL pto 6	30.97	30.84	0.13	31.09	-0.12
PCL pto 7	31.89	31.51	0.38	31.91	-0.02
PCL pto 8	32.02	31.58	0.44	31.96	0.06
PCL pto 9	32.38	31.6	0.78	32.1	0.28
CLB pto 1	31.84	31.57	0.27	31.96	-0.12
CLB pto 2	34.6	31.52	3.08	31.97	2.63
CLB pto 3	32.7	31.53	1.17	31.9	0.8
CLB pto 4	32.73	31.54	1.19	31.88	0.85
CLB pto 5	31.15	31.38	-0.23	31.72	-0.57
CLB pto 6	32	33.23	-1.23	32.8	-0.8
CLB pto 7	33.1	32.83	0.27	33.64	-0.54
CLB pto 8	31.8	32.11	-0.31	32.87	-1.07
ELF pto 9	30.98	30.77	0.21	30.9	0.08
ELF pto 8	30.18	30.73	-0.55	30.77	-0.59

Distribución termal intraurbana en Santiago de Chile. Aporte a la gestión ambiental de la ciudad a partir de la construcción de un modelo que permita generar un mapa térmico de verano.

Magíster en Gestión y Planificación Ambiental

Pamela Smith Guerra

ELF pto 7	31.1	30.73	0.37	30.81	0.29
ELF pto 6	31.04	30.91	0.13	30.99	0.05
ELF pto 5	31.76	30.95	0.81	31.06	0.7
ELF pto 4	31.7	31.12	0.58	31.27	0.43
ELF pto 3	31.9	31.42	0.48	31.58	0.32
ELF pto 2	31.64	31.98	-0.34	32.43	-0.79
ELF pto 1	32.2	32.01	0.19	32.5	-0.3
LRI pto 1	31.43	30.38	1.05	30.64	0.79
LRI pto 2	31.01	30.63	0.38	30.88	0.13
LRI pto 3	30.82	30.74	0.08	31.03	-0.21
LRI pto 4	32.3	31.04	1.26	31.4	0.9
LRI pto 5	29.67	31.05	-1.38	31.3	-1.63
LRI pto 6	31.88	31.32	0.56	31.61	0.27
LRI pto 7	32.04	31.52	0.52	31.92	0.12
LRI pto 8	31.1	31.79	-0.69	32.22	-1.12
X Dif.			0.3575		0.05

Fuente: Elaboración Propia.

Nota: En amarillo se destacan las diferencias superiores a 2°C.

Anexo 10. Diagnóstico modelo de regresión noche del 21 de enero.

Puntos Transecta	Datos Observados	Datos Kriging	Diferencias Datos Observados - Kriging	Datos Regresión	Diferencia Datos Observados-Regresión	Datos Regresión 2	Diferencia Regresión - Observados 2
CEQ pto 6	21.35	21.19	0.16	21.21	0.14	21.47	-0.12
CEQ pto 5	21	21.48	-0.48	21.47	-0.47	22.2	-1.2
CEQ pto 4	21.16	21.26	-0.1	21.28	-0.12	22	-0.84
CEQ pto 3	21.79	20.89	0.9	20.86	0.93	23.16	-1.37
CEQ pto 2	20.9	20.68	0.22	20.66	0.24	22.4	-1.5
CEQ pto 1	22.5	20.24	2.26	20.18	2.32	21.03	1.47
SBC pto 8	19.75	20.41	-0.66	20.34	-0.59	21.76	-2.01
SBC pto 7	20.4	20.3	0.1	20.23	0.17	21.67	-1.27
SBC pto 6	20.4	20.06	0.34	19.99	0.41	21.6	-1.2
SBC pto 5	20.6	20.01	0.59	19.97	0.63	21.97	-1.37
SBC pto 4	20.8	18.78	2.02	18.75	2.05	21.08	-0.28
SBC pto 3	20.8	17.46	3.34	17.4	3.4	20.83	-0.03
SBC pto 2	20.7	17.42	3.28	17.2	3.5	20.12	0.58
SBC pto 1	22.6	15.35	7.25	15.22	7.38	16.25	6.35

Distribución termal intraurbana en Santiago de Chile. Aporte a la gestión ambiental de la ciudad a partir de la construcción de un modelo que permita generar un mapa térmico de verano.

Magíster en Gestión y Planificación Ambiental

Pamela Smith Guerra

PCL pto 1	26.4	15.95	10.45	15.86	10.54	19.9	6.5
PCL pto 2	22.9	16.35	6.55	16.25	6.65	22.85	0.05
PCL pto 3	24.35	16.51	7.84	16.39	7.96	22.8	1.55
PCL pto 4	21.9	16.74	5.16	16.65	5.25	22.04	-0.14
PCL pto 5	20.89	17.71	3.18	17.58	3.31	21.09	-0.2
PCL pto 6	20.37	18.8	1.57	18.78	1.59	21.42	-1.05
PCL pto 7	21.08	20.72	0.36	20.61	0.47	22.64	-1.56
PCL pto 8	20.87	20.78	0.09	20.77	0.1	22.47	-1.6
PCL pto 9	20.61	20.79	-0.18	20.76	-0.15	22.56	-1.95
CLB pto 1	23.04	20.85	2.19	20.82	2.22	22.45	0.59
CLB pto 2	23.6	20.85	2.75	20.86	2.74	22.3	1.3
CLB pto 3	22.3	20.84	1.46	20.84	1.46	22.48	-0.18
CLB pto 4	21.8	20.79	1.01	20.77	1.03	22.43	-0.63
CLB pto 5	21.48	20.94	0.54	20.95	0.53	22.33	-0.85
CLB pto 6	21.12	21.28	-0.16	21.28	-0.16	22.98	-1.86
CLB pto 7	21.4	21.09	0.31	21.13	0.27	22.32	-0.92
CLB pto 8	19.8	20.42	-0.62	20.47	-0.67	21.49	-1.69
ELF pto 9	19.7	20.27	-0.57	20.28	-0.58	20.55	-0.85
ELF pto 8	19.89	20.18	-0.29	20.18	-0.29	20.79	-0.9
ELF pto 7	20.88	20.17	0.71	20.03	0.85	20.91	-0.03
ELF pto 6	21.16	20.5	0.66	20.51	0.65	20.71	0.45
ELF pto 5	21.5	20.58	0.92	20.59	0.91	20.76	0.74
ELF pto 4	23.3	21.23	2.07	21.24	2.06	21.71	1.59
ELF pto 3	22.5	21.62	0.88	21.65	0.85	21.78	0.72
ELF pto 2	23.49	20.8	2.69	20.75	2.74	23.62	-0.13
ELF pto 1	24.1	20.81	3.29	20.77	3.33	24.31	-0.21
LRI pto 1	23.6	19.98	3.62	20.02	3.58	20.96	2.64
LRI pto 2	21.97	20.53	1.44	20.54	1.43	21.44	0.53
LRI pto 3	21.06	20.66	0.4	20.66	0.4	21.9	-0.84
LRI pto 4	22.2	20.84	1.36	20.86	1.34	22.1	0.1
LRI pto 5	21.43	20.85	0.58	20.86	0.57	22	-0.57
LRI pto 6	21.4	20.97	0.43	20.98	0.42	22.25	-0.85
LRI pto 7	21.2	21	0.2	21.02	0.18	22.41	-1.21
LRI pto 8	22.36	20.86	1.5	20.83	1.53	23.02	-0.66
X Dif.			1.70		1.73		-0.10

Fuente: Elaboración Propia.

Nota: La regresión n° 2 incluye modificaciones (se agregan tres puntos de las transectas). En amarillo se destacan las diferencias superiores a 2°C.

Distribución termal intraurbana en Santiago de Chile. Aporte a la gestión ambiental de la ciudad a partir de la construcción de un modelo que permita generar un mapa térmico de verano.

Magíster en Gestión y Planificación Ambiental

Pamela Smith Guerra

Anexo 11. Información Zonas Climáticas.

Tipología	CODIGO	Área	9 am.			16 pm.			22 pm.		
			X	Min.	Max.	X	Min.	Max.	X	Min.	Max.
Alta densidad de gran altura	B1	259,89	21,74	21,08	22,69	32,12	30,59	33,29	21,25	20,57	21,73
Alta densidad de media y gran altura	B1/B2	278,38	21,55	20,79	21,97	31,84	29,2	33,29	21,22	19,69	21,93
Alta densidad de media altura	B2	862,07	21,65	20,79	22,69	31,97	29,9	33,29	21,07	19,69	21,73
Alta densidad de baja y media altura	B2/B3	377,97	21,45	20,79	22,69	31,8	28,53	34,14	21,13	19,69	21,73
Alta densidad de baja altura	B3	4741,06	21,52	19,54	22,69	31,93	28,53	34,14	21,12	19,69	21,73
Baja densidad de gran altura	B4	496,61	21,28	20,49	21,97	31,52	29,93	33,29	21,07	20,57	21,73
Baja densidad de gran y media altura	B4/B5	22,27	21,45	20,79	21,97	30,95	29,93	32,53	20,96	20,57	21,04
Baja densidad de media altura	B5	1161,21	21,01	19,19	22,69	31,44	27,79	34,14	20,94	18,65	21,73
Baja densidad de media y baja altura	B5/B6	223,24	21,12	20,49	21,64	30,96	29,93	31,86	21,04	21,04	21,04
Baja densidad de baja altura	B6	3628,51	20,33	17,81	21,97	30,74	27	33,29	20,59	17,92	21,73
Extensivo de baja altura	B7	1436,58	21,36	19,19	22,69	32	28,53	34,14	21,01	18,65	21,73
Urbanización dispersa	B9	1623,31	20,32	18,73	22,69	30,23	27	34,14	20,32	17,92	21,73
Industrial	B10	9,78	21,32	21,08	21,64	32,83	32,53	33,29	21,73	17,92	21,73
Cob arbórea compacta	N1	18,09	19,47	19,19	19,88	30,19	28,53	31,23	19,39	19,24	19,7
Cob arbórea dispersa	N2	457,54	21,31	19,55	22,69	31,54	28,53	34,14	20,98	19,69	21,73
Matorral y arbusto	N3	407,66	19,8	18,73	21,97	30,41	27,79	33,29	19,69	17,92	21,04
Cob vegetal rasante	N4	718,15	21,11	19,9	22,69	31,31	27,79	34,14	20,63	18,65	21,73
Suelo desnudo	N5	1379,31	20,89	19,19	22,69	31,88	27,79	34,14	20,65	18,65	21,73

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de Irrázaval (2011) y los modelos de regresión de temperatura atmosférica.

Distribución termal intraurbana en Santiago de Chile. Aporte a la gestión ambiental de la ciudad a partir de la construcción de un modelo que permita generar un mapa térmico de verano.

Magíster en Gestión y Planificación Ambiental

Pamela Smith Guerra

Anexo 12. Diferencias entre zonas climáticas, resultados del post test C de Dunnet

Cód.	Tipología ZCT	Hora	B1	B1/B2	B2	B2/B3	B3	B4	B4/B5	B5	B5/B6	B6	B7	B9	B10	N1	N2	N3	N4	N5	
B1	Alta densidad de gran altura	9:00 16:00 22:00	█																		
B1/B2	Alta densidad de media y gran altura	9:00 16:00 22:00	█	█																	
B2	Alta densidad de media altura	9:00 16:00 22:00	█	█	█																
B2/B3	Alta densidad de baja y media altura	9:00 16:00 22:00	█	█	█	█															
B3	Alta densidad de baja altura	9:00 16:00 22:00	█	█	█	█	█														
B4	Baja densidad de gran altura	9:00 16:00 22:00	█	█	█	█	█	█													
B4/B5	Baja densidad de gran y media altura	9:00 16:00 22:00	█	█	█	█	█	█	█												
B5	Baja densidad de media altura	9:00 16:00 22:00	█	█	█	█	█	█	█	█											
B5/B6	Baja densidad de media y baja altura	9:00 16:00 22:00	█	█	█	█	█	█	█	█	█										
B6	Baja densidad de baja altura	9:00 16:00 22:00	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█									
B7	Extensivo de baja altura	9:00 16:00 22:00	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█								
B9	Urbanización dispersa	9:00 16:00 22:00	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█							
B10	Industrial	9:00 16:00 22:00	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█						
N1	Cobertura arbórea compacta	9:00 16:00 22:00	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█					
N2	Cobertura arbórea dispersa	9:00 16:00 22:00	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█				
N3	Matorral y arbusto	9:00 16:00 22:00	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█			
N4	Cobertura vegetal rasante	9:00 16:00 22:00	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█		
N5	Suelo desnudo	9:00 16:00 22:00	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█

Fuente: Elaboración propia

Nota: el color rojo indica que existe diferencia entre las zonas climáticas.