



# La isla de calor urbana de superficie y sus factores condicionantes: El caso del área metropolitana de Santiago

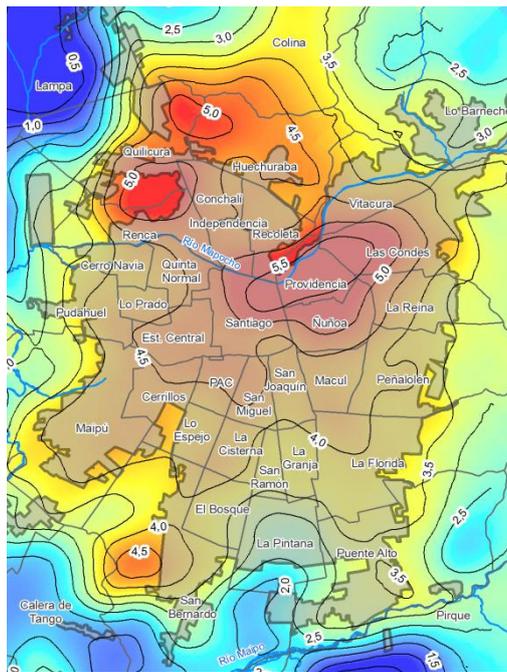
Pablo Sarricolea Espinoza

**ADVERTIMENT.** La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX ([www.tdx.cat](http://www.tdx.cat)) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

**ADVERTENCIA.** La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR ([www.tdx.cat](http://www.tdx.cat)) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

**WARNING.** On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX ([www.tdx.cat](http://www.tdx.cat)) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.

# La isla de calor urbana de superficie y sus factores condicionantes: El caso del área metropolitana de Santiago



Memoria presentada por  
**Pablo Sarricolea Espinoza**  
para optar al grado de Doctor

Director de tesis: Dr. Javier Martín-Vide

Barcelona-España, Julio 2012



# *Capítulo 1*

## Introducción



## *INTRODUCCIÓN*

### *1.1. Motivaciones*

Son muchas las razones que me han llevado a realizar esta investigación doctoral. Entre ellas se encuentra que desde el año 2005, durante la realización del Magíster en Geografía de la Universidad de Chile, conocí más cercanamente al Dr. Hugo Romero Aravena, quien explicando la metodología de la investigación científica realizó un ejemplo aplicado a la isla de calor, lo cual sin duda me generó curiosidad, debido a la novedad de este problema desde el punto de vista de la Geografía y el medio ambiente. Pese a que no fue la primera vez que supe algo sobre la isla de calor (en el año 2004 como ayudante del curso de Climatología dictado por el Dr. Andrés Rivera, un grupo de estudiantes realizó un trabajo sobre la relación de la isla de calor con la topografía de Santiago), fue sin duda lo que me motivó a investigar sobre la Climatología urbana.

En los primeros meses del año 2006, y gracias al acceso a imágenes Landsat TM de Santiago de Chile de los años 1998 y 2004, me propuse realizar mi tesis de Magíster en Geografía, titulada «Análisis de la sustentabilidad del crecimiento urbano de la ciudad de Santiago y sus efectos sobre la configuración de las temperaturas superficiales» (Sarricolea, 2008)<sup>1</sup>, en la Universidad de Chile. El objetivo era establecer las variables más relevantes que influyen y condicionan la distribución de las temperaturas en la ciudad de Santiago con el propósito de estimar sus valores. Cabe destacar que este trabajo fue inspirado por un artículo de

---

<sup>1</sup> Puede accederse al documento extenso desde  
[http://www.cybertesis.uchile.cl/tesis/uchile/2008/aq-sarricolea\\_pa/html/index-frames.html](http://www.cybertesis.uchile.cl/tesis/uchile/2008/aq-sarricolea_pa/html/index-frames.html)

Cuadrat *et al.* (2005) sobre «Los efectos de la urbanización en el clima de Zaragoza (España): la isla de calor y sus factores condicionantes»<sup>2</sup>.

Desde aquel momento, leí con bastante interés un amplio número de artículos de revistas, libros y Tesis doctorales, de las cuales destaca el trabajo de Moreno (1994) referido al «Estudio del clima urbano de Barcelona: la isla de calor», entre otros (Oke, 1987; Landsberg, 1981, Voogt, 2004, etc.).

Mi tesis de Magíster en Geografía fue concluida en mayo de 2008, unos meses después de que me concedieran la beca Presidente de la República para continuar mis estudios de doctorado en la Universitat de Barcelona. Desde un comienzo mi intención fue especializarme en Climatología urbana, por lo que contacté con el Dr. Javier Martín-Vide para que él dirigiera mi Tesis, que acepto muy amablemente.

No obstante, primero había que realizar una tesina en el Máster de Planificación Territorial y Gestión Ambiental, la cual dirigió el Dr. Javier Martín-Vide. Este trabajo fue bastante similar a mi tesis de Magíster anterior, con la gran ventaja en esta ocasión de contar con una imagen nocturna del sensor Terra ASTER. Este simple hecho me permitió observar el problema de la isla de calor de la ciudad de Santiago en su máxima dimensión (ya que antes sólo trabajé con imágenes diurnas, que mostraban el fenómeno inverso a la isla de calor). En la sustentación de la tesina, que fue bien valorada, aparecieron críticas muy elocuentes y acertadas referidas a los alcances de mi trabajo y sus conclusiones, principalmente por el especialista invitado, Dr. Albert Pèlachs de la Universitat Autònoma de Barcelona, quien me planteó trabajar con un mayor número de imágenes satelitales para que mis resultados fueran más significativos.

---

<sup>2</sup> Publicada en el Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles nº40 del año 2005, y disponible online en <http://www.boletinage.com/40/13-LOS%20EFECTOS.pdf>

A partir de lo señalado anteriormente debía resolver el cómo abordar la Tesis, además de compatibilizar mis tiempos con la realización de un nuevo máster, el de Climatología Aplicada de la Universitat de Barcelona, que coordina mi director de Tesis. Seguí aprendiendo y conocí a más personas que estudian la isla de calor, así como especialistas en teledetección aplicada al clima. Entonces, de acuerdo con el Dr. Martín-Vide, decidimos estudiar la isla de calor de la ciudad de Santiago de Chile con imágenes que posean una regularidad diaria de detección de las temperaturas, y seleccionamos para tales fines al sensor Terra MODIS, que corresponde al sensor que reemplaza a las imágenes NOAA.

Con el instrumento de análisis seleccionado y los procesamientos realizados en las imágenes de verano e invierno hemos observado que los resultados de la tesina de máster, con sólo una imagen nocturna, son consistentes con los resultados que hemos obtenido en la Tesis doctoral. Esto ha sido muy gratificante porque ahora hemos dispuesto de un número de observaciones que ha permitido llegar a mejores conclusiones, apoyadas en productos estadísticamente significativos.

Además de las motivaciones antes señaladas, y ahora desde una perspectiva, debo decir que espero seguir manteniendo relaciones con los profesores y amigos que han sido parte del aprendizaje adquirido. También espero publicar lo que todavía no se ha publicado en revistas científicas y escribir un libro (ya sea como editor o único autor) de Climatología urbana de Chile. También pretendo incorporarme a la Universidad de Chile para trabajar con mis colegas en Climatología y Geografía a diferentes escalas.

Por último, la gran motivación de mi vida académica ha sido aprender de mis maestros y enseñar a mis alumnos. Esto es algo que verdaderamente me motiva y puedo asegurar que cada día tengo una profunda necesidad de aprender algo nuevo, y espero, no dejar de sentir esto.

### *1.2. Estado del asunto*

La Climatología urbana se refiere al estudio de las modificaciones que las ciudades producen sobre el clima local. Como en todos los estudios climáticos, el referido al clima urbano no puede ser visto de manera aislada, pues es el resultado de los promedios estadísticos de los tipos de tiempo que ocurren en un territorio. Además, el clima urbano está en continuo intercambio y condicionado con otros niveles: meso-escalar, sinóptico y planetario. De las modificaciones más significativas que ejercen las ciudades sobre el clima se encuentran las alteraciones de las cubiertas terrestres (sustitución de usos de suelo), el albedo (menor reflectividad de sus materiales) y la rugosidad de la superficie.

El proceso de urbanización conduce a cambios radicales en los territorios y su atmósfera. Altera los balances de radiación, las características y propiedades térmicas de la superficie, la humedad y los vientos, y, por lo tanto, se rompen los equilibrios naturales, tanto de balances de energía como hidrológico.

Según el cuarto informe (*Fourth Assessment Report*, en adelante AR4) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, en adelante IPCC), las ciudades han contribuido entre 1905 y 2005 en un 8,1% al calentamiento global (valor calculado mediante la proporción de los 0,74°C/100 años de cambio climático y los 0,06°C/100 años del efecto urbano), lo cual, sólo expresa el forzamiento radiativo de los cambios de usos de suelo (IPCC, 2007). No obstante, en las ciudades habita más del 50% de los siete mil millones de seres humanos del planeta, y son *hot spots* (puntos calientes) de la producción, el consumo y la generación de residuos. Según las Naciones Unidas (Ash *et al.*, 2008), las ciudades son responsables del 75% del consumo energético mundial y del 80% de las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, Ash *et al.* (2008), señalan que sin una inversión y una

cuidadosa planificación, las ciudades se verán abrumadas de crecientes problemas ambientales. Por lo tanto, las repercusiones de las ciudades en el cambio climático, sobrepasará con creces a los que poseen otros ecosistemas terrestres.

El tamaño o magnitud de cualquier «efecto urbano» sobre la Climatología local, resulta a menudo difícil de estimar. Lo ideal y deseable es poseer un amplio conjunto de mediciones del clima de la región en condición pre-urbana, para contrastar las observaciones con la condición urbana, y con ello hacer comparaciones. Sólo en raras ocasiones ello es posible. En cambio, es común fundamentar los estudios en la comparación de los datos meteorológicos del centro de un área urbana con los de las zonas rurales (o no urbanas). Estas comparaciones urbano / rural sólo suministran una aproximación de la modificación urbana.

Los cambios en la rugosidad del terreno por parte de las ciudades alteran la circulación de los vientos a nivel de superficie (Oke, 1987; Chen y Wong, 2006), pues las estructuras urbanas obstaculizan y canalizan los vientos; el reemplazo de las coberturas de suelo de características permeables por superficies de características impermeables provocan la reducción y supresión de la evapotranspiración, y con ello, la natural capacidad de enfriamiento del aire mediante calor latente (Yuan y Bauer, 2007); las urbes también desmejoran la composición de la atmósfera, opacando la capa de aire próxima a la superficie, y, desde luego, alteran el balance hídrico de los territorios, principalmente por la eficacia de sus sistemas de drenaje y alcantarillado. Todas estas modificaciones, además de otras no mencionadas, permiten afirmar que las ciudades generan un nuevo ecosistema, definido según Romero *et al.* (2001) como «medio ambiente urbano». Ello significa que las ciudades reproducen los impactos ambientales de la planificación y ordenación del territorio, en los que destacan sus efectos sobre el clima, especialmente el campo térmico.

## Introducción

---

Las ciudades chilenas (al igual que el sistema urbano mundial) han experimentado en las últimas décadas un proceso de explosivo crecimiento espacial. En el caso de Santiago, se ha triplicado su superficie artificializada entre 1975 y 2004 (Romero *et al.*, 2007). Y este crecimiento físico ilimitado y rápido de las ciudades provoca profundos efectos sobre la sustentabilidad ambiental, lo que ha repercutido en la pérdida de los servicios ambientales y en la consolidación de las islas de calor, la pérdida de vegetación y de humedad y las malas condiciones de ventilación en el interior y en el borde de las ciudades (Romero, 2004). Además, todos estos cambios ambientales se han visto agravados por otra circunstancia: la transformación de las ciudades latinoamericanas de tipo compacto (especialmente la metrópoli) en ciudades de tipo disperso en los últimos veinte años. Este tipo de urbanización se denomina «*urban sprawl*», lo que implica un crecimiento periférico discontinuo, según Ortiz y Escolano (2005), y una metropolización expandida, según De Mattos (1999). Sus consecuencias conllevan altos costos sociales y ambientales.

Los costos sociales se observan en el rápido crecimiento de la movilidad diaria, es decir, las distancias (tiempo y euclidianas) recorridas entre residencia, trabajo o estudio, han aumentado, igualmente que el creciente número de automóviles por hogar. Esto ha causado una progresiva segregación socioespacial de sus habitantes y un policentrismo aparente de las funciones urbanas, todo lo cual incrementa las necesidades de desplazamientos en transporte público y privado por parte de la población de la metrópoli. Los costos ambientales implican una mayor contaminación del aire, de las aguas y los suelos, destacando las situaciones de alerta ambiental por contaminación atmosférica en la ciudad, la pérdida de terrenos agrícolas ahora ocupados por viviendas en las áreas de expansión urbano, y, así, una evidente impermeabilización de los suelos (lo cual se traduce en más inundaciones por aguas pluviales) y la pérdida de servicios ambientales tales como las islas de frío, la infiltración de agua en el suelo y la presencia de hábitats de vida silvestre asociados a la existencia de parches y corredores de vegetación.

Entre las consecuencias inadvertidas del crecimiento de las ciudades se encuentra el incremento de las temperaturas en la urbe respecto a su entorno inmediato de carácter rural (Oke, 1987). Este aumento de las temperaturas produce *discomfort* térmico y acrecienta el número de enfermedades relacionadas con el calor, especialmente durante los días más calurosos de verano, incluso, en los países expuestos a olas de calor, se llega incluso a la muerte de miles de personas, tal como fue el caso de Europa en el año 2003 (Martínez *et al*, 2004). Además, propicia la aparición de enfermedades respiratorias por el exceso de calor, exceso que favorece la contaminación del aire por formación de ozono (O<sub>3</sub>). Más calor en nuestras ciudades de clima mediterráneo conlleva un alza en la demanda energética destinada a sistemas de refrigeración y aire acondicionado, agravando así la emisión de gases contaminantes (CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub>) desde las plantas eléctricas. Para la sociedad y los gobiernos estas realidades de la metrópoli acarrearán un gasto adicional de dinero (Peña y Romero, 2005), producto de un mayor consumo energético<sup>3</sup>, al tiempo que contribuye al calentamiento global, ya que fomenta la emisión de gases de efecto invernadero (Gorsevsky *et al.*, 2000; Stone y Rodgers, 2001; Voogt, 2004).

La urbanización altera artificialmente las condiciones climáticas mediante el incremento de las temperaturas de superficie y del aire respecto a su entorno inmediato (especialmente durante la noche), causando la generación y la consolidación de la isla de calor urbana (ICU). En cuanto a esta isla de calor, su estudio puede ser abordado desde tres perspectivas diferentes. Por una parte, hay

---

<sup>3</sup> En el informe del Servicio Nacional del Consumidor y la Comisión Nacional de Energía de 2005 (<http://www.sernac.cl/download.php?id=1372&cn=1>) se demuestra que el crecimiento económico de Chile y Santiago medido con el Producto Interno Bruto está directamente relacionado con el aumento progresivo de consumo de electricidad entre 1970 y 2005, situación que los países desarrollados modificaron en 1977 mediante medidas de eficiencia energética.

dos tipos de islas de calor del aire: bajo los tejados, es decir al interior de la capa del palio (dosel) urbano, y otra sobre los tejados, en la capa de mezcla y capa límite urbana, es decir perimetral. Ambas dan cuenta de la mayor temperatura que registra la capa de aire cercana y que cubre la ciudad como consecuencia de la transmisión hacia ella del calor acumulado por las estructuras y cuerpos que la componen, tales como paredes de las edificaciones, viario, sitios eriazos, polígonos industriales y estacionamientos. Todas estas superficies se caracterizan por estar construidas con materiales que almacenan y conducen gran cantidad de calor cuando reciben la insolación directa durante el día y que devuelven a la atmósfera, cuando la dejan de recibir, y emiten una mayor proporción de la radiación acumulada durante la noche que las áreas rurales. En general nos referiremos a la ICU del palio urbano. La tercera perspectiva es la siguiente: la isla de calor urbana de superficie (ICUs), que se define por las mayores temperaturas de emisión que alcanzan las diferentes estructuras y cuerpos urbanos y que son captadas por sensores infrarrojos, tales como los que disponen los satélites de observación terrestre. La ICUs no está sometida directamente a las compensaciones térmicas que realizan los flujos de aire, desde las superficies más frías a las más cálidas y que regulan la temperatura del aire de las ciudades, por lo que causa rasgos térmicos más marcados y específicos para cada uso y cobertura de suelo. No existe consenso pleno en las correlaciones espaciales entre las islas de calor de superficie y del aire, pero muchos autores señalan que estas correlaciones son especialmente altas de noche (Arnfield, 2003) y (Prashad, 2004), por lo que se puede afirmar que los patrones de distribución espacial de ambas son semejantes en un alto grado, incluso en lo que respecta a la temperatura registrada.

Con respecto a la estacionalidad de la máxima intensidad de la isla de calor urbana en sus dos modalidades, no existe un consenso claro. Para la ICU la mayoría de los autores indica que es más intensa en invierno, producto del mayor consumo energético para calefacción (Moreno, 1993), incluso en un estudio en Tokio se demostró que la intensidad de la isla de calor oscilaba desde los 2°C en

verano a los 5°C en invierno (Yamashita, 1996). En el caso de la ICUs algunas investigaciones sugieren que la isla de calor es más intensa en verano (Eliasson, 1994; Klysik y Fortuniak, 1999; Kolokotroni y Giridharan, 2008). No obstante, otros han encontrado bi-estacionalidad, con máximos entre otoño-verano (Yagüe *et al.*, 1991; Gedzelman *et al.*, 2003) y otoño-invierno (Kim y Baik, 2002). Esto demuestra que la estacionalidad de la máxima intensidad de ICUs depende de las condiciones propias de localización geográfica del emplazamiento de la ciudad y su entorno (Sarricolea *et al.*, 2008).

En cuanto a la morfología e intensidad de la isla de calor, se ha establecido que está condicionada por la forma y extensión de la ciudad, la localización geográfica y las actividades que se desarrollan en ella. Los factores que más destacan son la densidad de las edificaciones y la presencia de parques (Fernández *et al.*, 2004). A ello Yuan y Bauer (2007) añaden la importancia de la composición forestal de las grandes áreas verdes, las cuales aparecen como zonas relativamente frías en comparación con las superficies construidas de su entorno. En este sentido, Oke (1995) señala que la capa límite urbana (*urban boundary layer*) se diluye hasta desaparecer en las áreas verdes, generando brisa de parque (especialmente con coberturas arbóreas), mientras que Moreno (1993) detecta para la ciudad de Barcelona que las áreas verdes modifican y alteran la forma de la isla de calor urbana.

Se han encontrado además relaciones estrechas entre la isla de calor urbana y la topografía, tal como señalan Beral-Guyonnet (1997), Cuadrat *et al.* (2003 y 2005), y Romero y Sarricolea (2006). Dichos autores concuerdan en que las relaciones entre ambas variables son positivas y se acentúan hacia el interior de las ciudades, lo que se debe al menor dominio de los vientos, y se transforma así en una variable que explica significativamente la ICU. Adicionalmente, Eliasson (1994) ha avanzado en establecer las relaciones existentes entre la isla de calor urbana y la geometría de las calles, concluyendo que la orientación longitudinal de las calles

(Norte-Sur) y con un bajo factor de visión del cielo (*sky view factor*, SVF) dentro del cañón urbano (*urban canyon*) incrementan la isla de calor.

No obstante, a todo lo señalado se debe indicar que los modelos más frecuentes son los que comparan la intensidad de la isla de calor con su entorno rural a partir de los tamaños poblacionales y la estructura espacial de las ciudades. De esta forma, Oke (1987) ha propuesto relaciones que establecen las diferencias de las temperaturas urbanas y rurales ( $\Delta t = t_U - t_R$ ) en función de logaritmos de la población, y ha descubierto así diferencias entre grupos de ciudades europeas de tipo mediterráneo (compactas) y las fragmentadas y extensas ciudades de carácter anglosajón. No obstante, Moreno (1993) señala que aún no está suficientemente explicada la diferente magnitud de la isla de calor entre ciudades compactas y difusas, pero apunta a los mayores consumos energéticos y las tipologías edificadas como posibles causas.

Por otra parte, Yamashita *et al.* (1986) destacan que la densidad edificada y la rugosidad de las ciudades influyen fuertemente en el factor de visión del cielo, pues provocan el aumento de la intensidad de las temperaturas del aire y especialmente de superficie. Esto resulta similar a lo señalado por Bello (1994) cuando correlaciona intensidades de la isla de calor y la densidad edificada, para distintas situaciones de estabilidad atmosférica.

Sin embargo, la configuración espacial que adquiere la ICU no es estable y su variabilidad temporal puede ser importante, lo cual puede estar relacionado con los cambios en la dinámica atmosférica regional y con determinadas condiciones meteorológicas, como lo han puesto de relieve Lowry (1977), Landsberg (1981) y Oke (1987) al señalar las diferentes formas de la isla de calor en función de los flujos de viento y las condiciones sinópticas. Una manera tradicional de establecer una Climatología de tipos de tiempo es la aplicación de una clasificación subjetiva. Lamb (1972) desarrolló una clasificación subjetiva que contaba con 27 tipos, la

cual fue adaptada de manera objetiva por El-Dessouky y Jenkinson (1975) y luego por Jenkinson y Collison (1977) para las Islas Británicas, siendo estos autores los que dan el nombre definitivo a esta clasificación sinóptica objetiva. El método de Jenkinson y Collison (J&C en adelante) es en la actualidad una de las clasificaciones objetivas más utilizadas, y ello se debe a la sencillez y eficacia que posee en la generación de series de tipos de tiempo.

En relación con los usos de suelo y las temperaturas urbanas, Chen *et al.* (2001) han hallado que los usos de suelo industrial concentran mayor temperatura, lo cual resulta muy similar a las recientes indagaciones de Sarricolea y Romero (2006), Molina (2007), y Molina y Romero (2007a y b) para el caso de Santiago de Chile.

En resumen, la isla de calor urbana es la constatación de la Climatología urbana más estudiada y evidente, y ella depende de un gran número de factores, los cuales en general se repiten en las distintas ciudades, pero no así sus aportes en la distribución e intensidad. Cada urbe posee características propias que hacen necesario el estudio particular de sus variables explicativas. Por ello se propone realizar esta investigación en la ciudad de Santiago de Chile.

### ***1.3. El problema***

La metrópolis de Santiago acoge a un alto porcentaje de la población de Chile, un 35,9%, que supone cerca de 7 millones de habitantes. Con un crecimiento demográfico de un 1,6% anual en las últimas décadas, se ha expandido físicamente en 1.750 hectáreas/año (2,9% anual). Es decir, la expansión física supera a la poblacional, lo cual acentúa la dispersión urbana y aumenta las necesidades de viajes diarios. Esto ha sido posible por medio de una doble vía de crecimiento. Una de ellas es el Plan Regulador Metropolitano de Santiago (PRMS), que fija los

límites de la ciudad y que plantea expandir el límite unas 10.000 hectáreas. La segunda vía es el Decreto Ley 3.516, que permite los predios rústicos, es decir, condominios y parcelas de agrado que son, en definitiva, urbanizaciones fuera de los límites urbanos pero que en realidad son parte funcional de la ciudad. Por ello, es necesario conocer los efectos que podría tener seguir expandiendo la ciudad, y de la manera en que ello se lleva a cabo.

Es más, la ciudad de Santiago posee menos de 4 m<sup>2</sup> de áreas verdes por habitante y escasas áreas públicas de ese tipo, sobre todo en los municipios más pobres. Esto inicialmente se percibe como un problema urgente, pues son las áreas verdes las que mitigan los efectos de la isla de calor. Si bien, el nuevo PRMS pretende revertir este problema, no se hace con una visión ecosistémica, ni pensando en la población, pues localiza áreas verdes en zonas de inundación y sin ocupación residencial próxima.

Hasta ahora, el conocimiento de la configuración y las transformaciones del patrón térmico de la ciudad y la conformación de islas de calor urbana en Santiago es un problema aún no resuelto completamente, pues sólo se han establecido relaciones estadísticas parciales aplicadas a las temperaturas superficiales diurnas, y que en muchos casos no fueron significativas. Además, únicamente se han alcanzado resultados para imágenes diurnas de Landsat TM (Romero y Sarricolea, 2006; Sarricolea, 2008; Peña, 2008) y nocturna de Terra ASTER (Sarricolea, 2010), que resultan insuficientes para poder proponer medidas de mitigación que se incorporen a la planificación urbana. Por ello se considera primordial profundizar y aprovechar la oportunidad de procesar y conocer la distribución de la ICUs mediante imágenes nocturnas, donde Terra MODIS posee grandes ventajas por su gran cobertura temporal desde el año 2001.

Las relaciones entre patrones espaciales y temperaturas urbanas obtenidas mediante transectos móviles sólo corresponden a algunos pocos días de las

estaciones de verano e invierno, lo que limita su extrapolación espacio-temporal. Con el fin de contribuir a especificar estas relaciones, el presente trabajo aborda el tema de la ICU (por medio de dos observatorios) y la ICUs mediante imágenes satelitales nocturnas, y aplica modelos de regresión múltiple por pasos sucesivos (*stepwise regression analysis*), que, mediante la incorporación sistemática y sucesiva de las variables propias de la urbanización, pretende explicar el fenómeno de la isla de calor urbana en la ciudad de Santiago, y para las 4 estaciones astronómicas del año: Se han analizado 53 imágenes Terra MODIS del año 2010 y los datos meteorológicos de dos observatorios a una resolución horaria (Talagante y Cerrillos). Si bien sólo se considera un año, el fenómeno de la isla de calor es de carácter estructural, por lo cual su distribución espacial deberá ser homogénea en cuanto a la localización del máximo y su forma.

## *1.4. Objetivos*

### *1.4.1. Objetivo general*

El propósito de la investigación es doble:

1. Por un lado conocer la hora, estación del año y tipos de tiempo que favorecen la mayor magnitud de la isla de calor;
2. Además, se pretende determinar la distribución de las temperaturas de emisión superficial urbanas durante noches despejadas y de calma (idóneas para el análisis del fenómeno de la isla de calor urbana de superficie o ICUs) para establecer los patrones espaciales resultantes y las condiciones que favorecen una mayor intensidad de la ICUs, seleccionando para ello variables que explican y condicionan su configuración (lo cual se realiza mediante teledetección).

### *1.4.2. Objetivos específicos*

1. Caracterizar a partir de dos observatorios la máxima intensidad de la isla de calor en el área metropolitana de Santiago (AMS), analizando sus valores a una resolución horaria y según las estaciones del año, nubosidad, viento, presión y los tipos de tiempo del método de Jenkinson y Collison (J&C).
2. Generar una base de datos que contenga las temperaturas de emisión superficial de suelo obtenidas a partir de imágenes satelitales equipadas con espectroradiómetro de moderada resolución espacial (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*, en siglas MODIS) para diagnosticar y analizar la ICUs con los distintos tipos de tiempo de J&C, análisis de componentes principales y con un conjunto de variables que permitan explicar su configuración y sus valores.

3. Determinar la máxima intensidad de la ICUs a la hora de paso del satélite Terra MODIS para la ciudad de Santiago y en las diferentes estaciones astronómicas del año y tipos de tiempo J&C.
4. Proponer un modelo estadístico para explicar la máxima intensidad de la isla de calor urbana de superficie (MIICUs) mediante un conjunto de variables explicativas (albedo, radiación solar, topografía, densidad edificada, índice normalizado de diferencias vegetales o NDVI, densidad de población y distancias euclidianas al centro, la costa y los ríos y esteros) que facilite la predicción de sus valores.
5. Formular recomendaciones para la planificación territorial y la gestión ambiental de las áreas de expansión urbana y además, para la gestión de los espacios construidos.

### *1.5. Hipótesis de investigación*

1. La isla de calor urbana del aire de Santiago debería alcanzar según su población una máxima intensidad comprendida entre 9,6°C y 13,6°C, dependiendo de su morfología urbana y el tipo de tiempo de Jenkinson y Collison (J&C).
2. La isla de calor urbana tendrá una mayor magnitud unas pocas horas después de la puesta de Sol, y en aquellos días de calma, cielo despejado y circulación anticiclónica.

3. Las variables meteorológicas que mejor explican la isla de calor urbana del aire (ICU) deberán ser la intensidad del viento, la nubosidad, la presión atmosférica, la humedad relativa, y, en segundo lugar, las horas de sol y el día de la semana.
4. El uso de la teledetección a una resolución espacial moderada es un procedimiento adecuado para el análisis y la caracterización espacial y temporal de la isla de calor urbana de superficie (ICUs).
5. Las temperaturas de emisión superficial nocturnas de suelo del AMS bajo condiciones de calma y cielo despejado deberían conformar en las áreas más densamente construidas de Santiago una marcada isla de calor de superficie (ICUs), debido a que los materiales de construcción absorben radiación de onda corta durante el día para luego, durante las primeras horas de la noche, comenzar a liberar energía, conservándose así más cálidas que el entorno rural.
6. Como las áreas más densamente construidas de Santiago poseen un mayor número de áreas verdes, la ICUs es en gran parte mitigada en estos barrios, donde reside la población de mayores ingresos económicos.
7. Los factores que explican mejor los patrones térmicos nocturnos de la ciudad (y por ende la ICUs) son el albedo, la densidad construida y de población, la topografía de la cuenca, la existencia de áreas verdes, y, en segundo lugar, la radiación solar y las distancias euclídeas al centro, la costa y los ríos y estero.

## *1.6. Área de estudio*

### *1.6.1. Situación regional de Santiago*

Santiago es la capital económica, demográfica, industrial, comercial y financiera de Chile, además de ser la capital de la Región Metropolitana. Esta, con una superficie de 15.403,2 km<sup>2</sup>, es la más pequeña de todas las regiones del país, y donde habitan más personas, con una población superior a los 7 millones de habitantes, siendo así la región más densamente ocupada.

La Región Metropolitana posee seis provincias: Santiago, Chacabuco, Cordillera, Maipo, Talagante y Melipilla (ver figura 1.1); éstas a su vez conforman 52 comunas. La región se localiza entre los meridianos 71°43'W y 69°48'W y los paralelos 32°55'S y 34°17'S. La Región Metropolitana de Santiago es una de las quince regiones en las que se encuentra dividido Chile. Limita al norte y al oeste con la V Región de Valparaíso, al sur con la VI Región del Libertador General Bernardo O'Higgins y al este con la República Argentina.

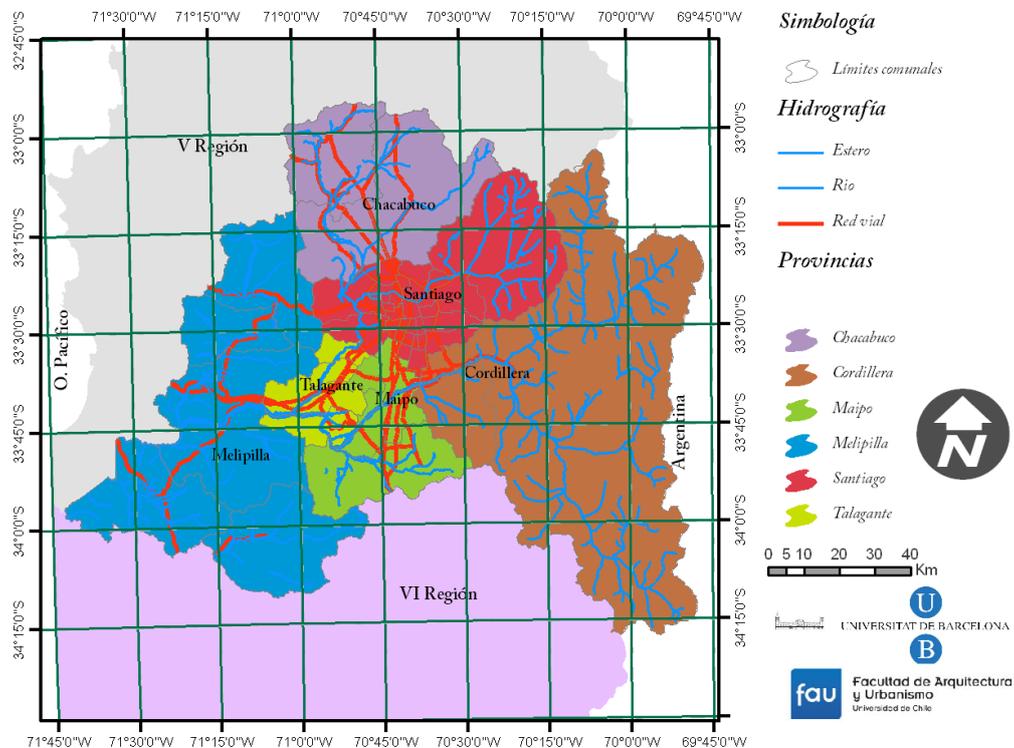


Figura 1.1. Mapa de situación de la región.

### 1.6.2. Características fisiográficas del área metropolitana de Santiago

El área de estudio está inserta en la unidad conocida como depresión central, la cual a su vez es encerrada por la cordillera de los Andes al oriente y la cordillera de la Costa por el poniente. Esta condición de cuenca cerrada por cadenas montañosas sólo se rompe al surponiente en el fondo de valle del Río Maipo al confluir con el Río Mapocho (este río cruza la ciudad de Santiago), generando una apertura de 8 km entre Loma Pan de Azúcar y cerro La Campana en el municipio de Peñaflor.

La depresión central es de origen tectónico, y está cubierta por distintos depósitos de materiales detríticos cuaternarios, en los que predominan los sedimentos aluviales en forma de grandes conos de deyección coalescentes, los

cuales conforman el Piedmont de Santiago. Posee una baja pendiente y algunos cerros isla quedan dentro de ella (ver figura 1.2). Estas condiciones fisiográficas dificultan la ventilación de la cuenca, favoreciendo los episodios de contaminación atmosférica, que presenta la ciudad en los meses invernales. Los ríos y quebradas son torrenciales, y la urbanización del piedmont y cercanías a los lechos favorece las inundaciones por aguas pluviales, incluso aluviones, lo cual ha sido mitigado a partir de piscinas que controlan la carga sedimentaria, específicamente de la Quebrada de Macul.

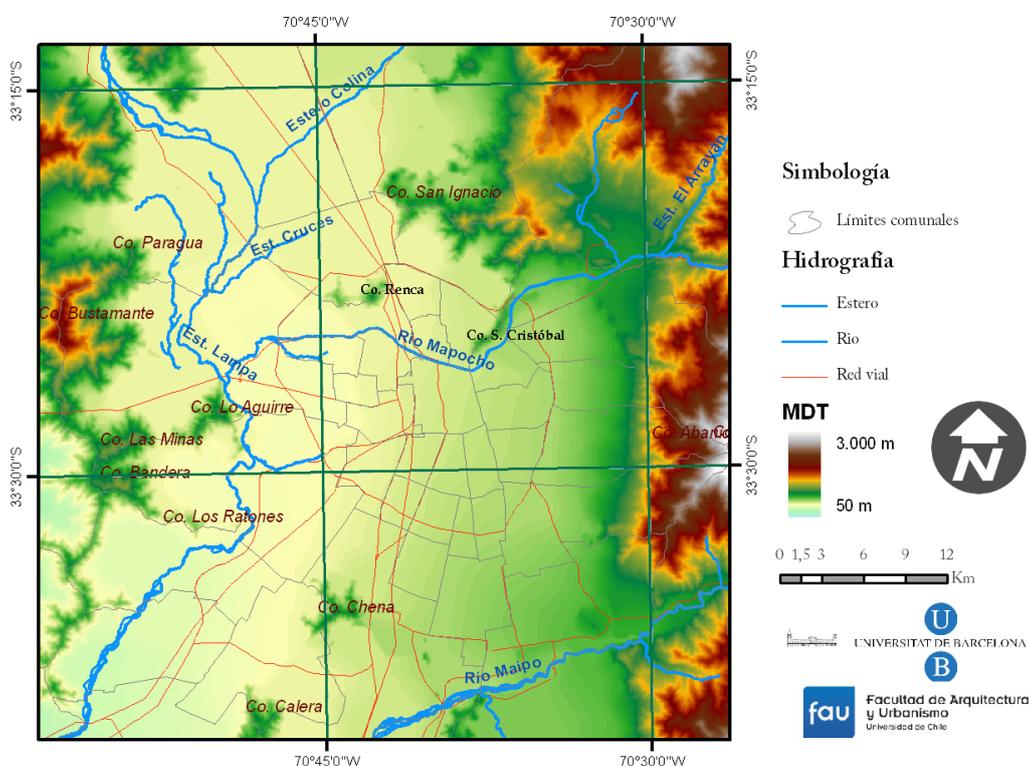


Figura 1.2. Mapa fisiográfico del área de estudio.

A su vez, las bajas pendientes de la depresión y su condición de piedmont sedimentario han generado excelentes suelos para los cultivos, los mejores del país. Predominan los suelos de clase I, II y III de las series Maipo y Mapocho. Esto hace aún más delicada la toma de decisión en relación a la expansión urbana.

### 1.6.3. Características climáticas del área de estudio

La principal característica que presenta el área metropolitana de Santiago es su clima de tipo «mediterráneo continental», el cual presenta una estación seca prolongada e inviernos lluviosos. Según la clasificación de Köppen presenta un clima templado de verano cálido (Csa).

Respecto a las temperaturas extremas para el período de referencia 1981-2010, el mes de enero alcanza 30,1°C como temperatura media de las máximas, mientras que julio registra de media de las mínimas unos 3,9°C, lo cual implica una oscilación térmica de 26,2°C. La temperatura media anual es de 14,7°C, enero es el mes más cálido, con una temperatura media de 21,2°C, y el mes más frío corresponde a julio con 8,2°C, siendo la amplitud térmica media de unos 13°C (ver figura 1.3).

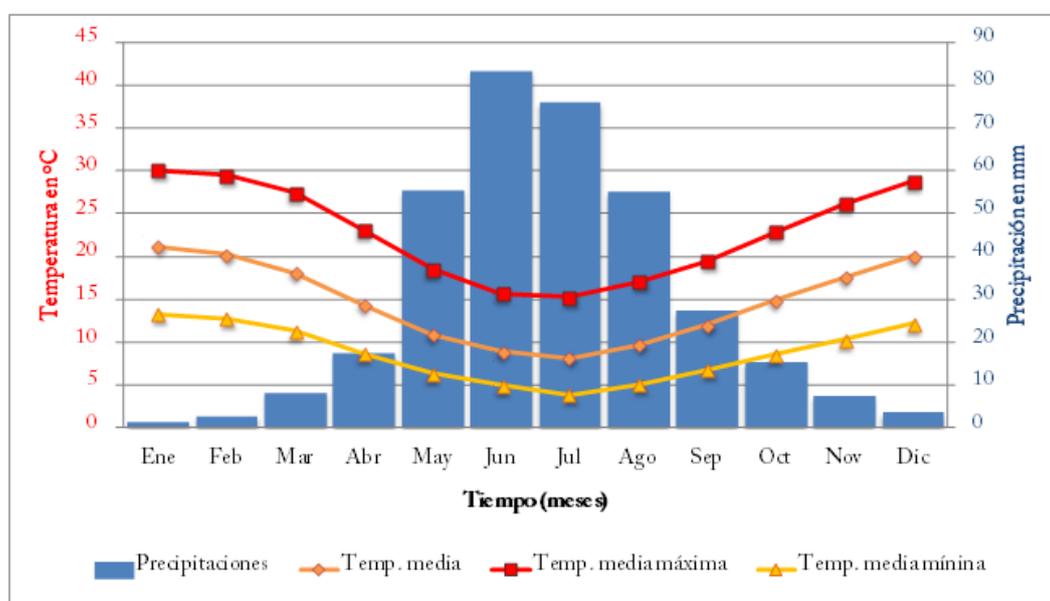


Figura 1.3. Climodiagrama de temperatura y precipitación mensual para el período 1981-2010.

Graficado según el índice xerotérmico de Gausson 1°C equivale a 2 mm.

Un asunto de interés es el progresivo aumento de las temperaturas máximas y mínimas año tras año que ha experimentado Santiago en su estación Quinta Normal. La temperatura media de las máximas ha aumentado más 1°C en los últimos 56 años, muy similar al aumento de la temperatura media de las mínimas, que subieron 0,83°C, tal como muestra la figura 1.4. Estas tendencias reflejan en alguna medida el calentamiento global, pero son producto del efecto de la isla de calor urbana.

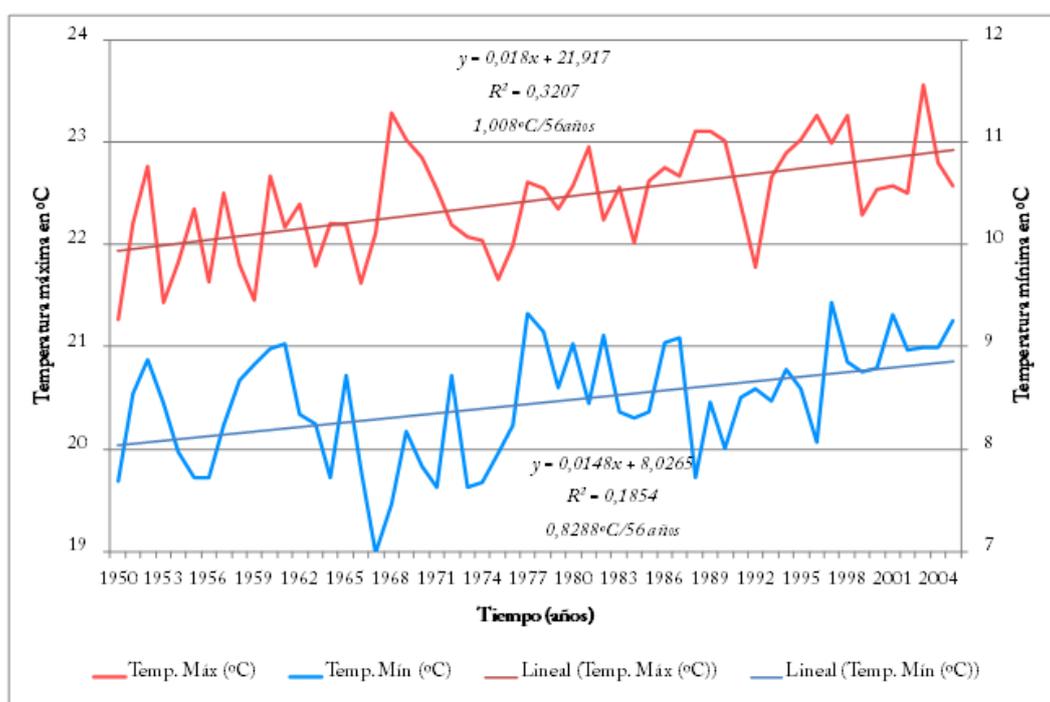


Figura 1.4. Tendencias de las temperaturas máximas y mínimas de Quinta Normal desde 1950.

El sello característico del clima regional lo constituyen las precipitaciones, con montos promedio bastante modestos (336,03 mm) y una alta variabilidad (ver figura 1.3). En el año más lluvioso entre 1981 y 2010 precipitaron 712,2 mm (1997), mientras que en el año más seco 89,3 mm (1998), lo que supone que la primera cantidad es 8 veces la segunda. No obstante, entre 1901 y 2010 el año más lluvioso recogió 11 veces la del año más seco, tal como se aprecia en la figura 1.5.

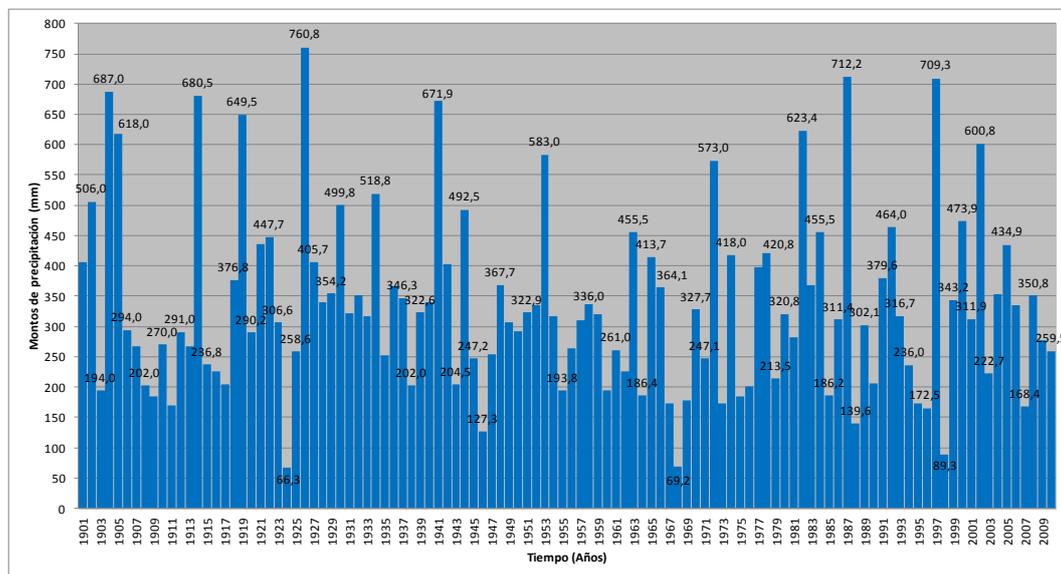


Figura 1.5. Precipitación en Quinta Normal en el período 1901–2010.

Las precipitaciones en general están sometidas al efecto orográfico, por lo que decrecen desde la costa hacia la depresión intermedia, para aumentar nuevamente en la cordillera de los Andes; originándose de esta manera líneas bioclimáticas generales de la región y de la zona central de Chile (Dirección Meteorológica de Chile o DMC, 2011). En el sector de Colina y en menor grado en la zona de Santiago existen climas más áridos y con mayores fluctuaciones térmicas, que reflejan la penetración del clima de estepa, hecho que se debe a la presencia de la cordillera costera, relativamente alta, que actúa como barrera, dificultando la penetración de las condiciones marítimas. La humedad relativa que se presenta en la cuenca de Santiago es apreciablemente menor que la de la costa. Santiago alcanza en el último período de 1981–2010 un 68% de humedad relativa media, siendo enero el mes más seco (53,6%) y junio el más húmedo, con un 81,2% (ver figura 1.6).

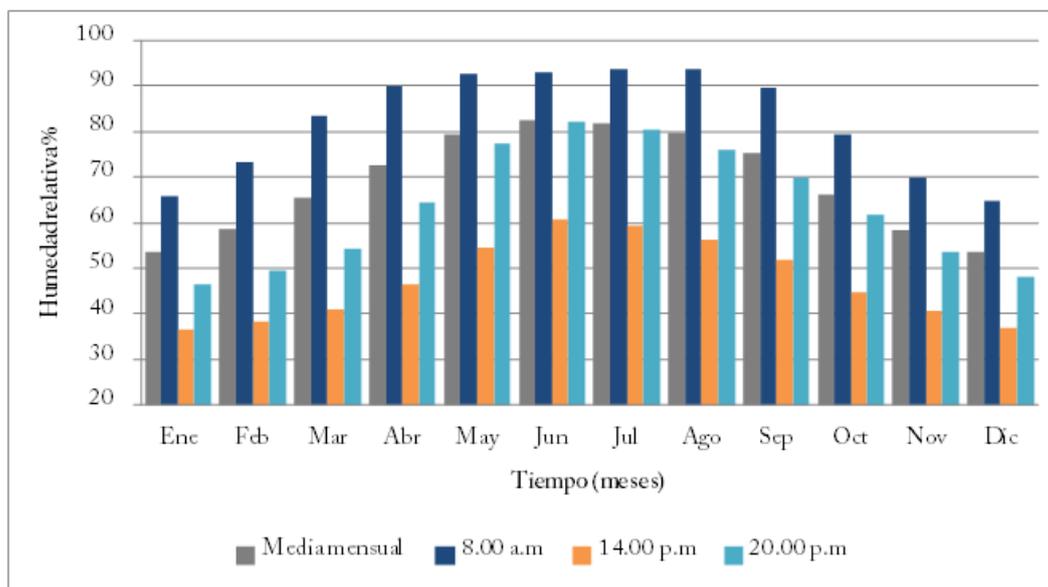


Figura 1.6. Humedad relativa media mensual en el período 1981-2010.

La nubosidad en la ciudad muestra una marcada estacionalidad (ver figura 1.7): inviernos muy nubosos con cerca del 60% de los días en dicha situación y veranos despejados y poco nubosos en casi un 90% de los días.

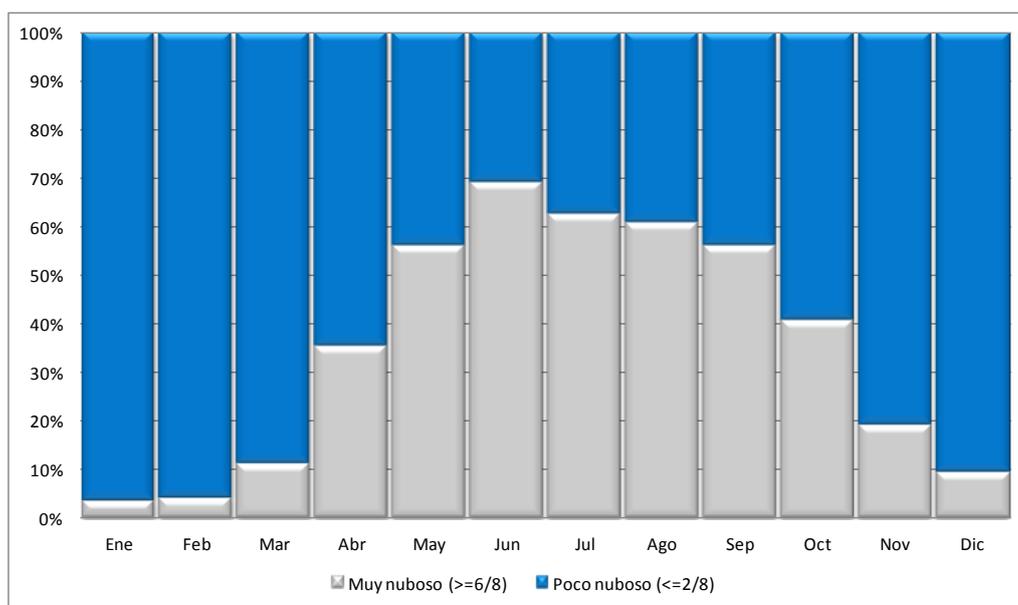


Figura 1.7. Nubosidad media mensual en el período 1981-2010.

## Introducción

Una característica decisiva en el clima del área de estudio la constituye la presencia de las cordilleras de los Andes y de la Costa y el alejamiento progresivo al Océano Pacífico, lo cual incide en una condición de continentalidad del clima de la región de Santiago. Dentro de los límites fijados para el área de estudio se distinguen al menos 5 unidades bioclimáticas: Santiago, Piedmont norte, Precordillera, Colina-Tilttil y Batuco (ver figura 1.8). Ellas se pueden reagrupar en dos unidades: Santiago, Batuco y Colina-Tilttil por un lado y Piedmont norte y Precordillera por otro, las que se diferencian principalmente por los atributos de la tabla 1.1.

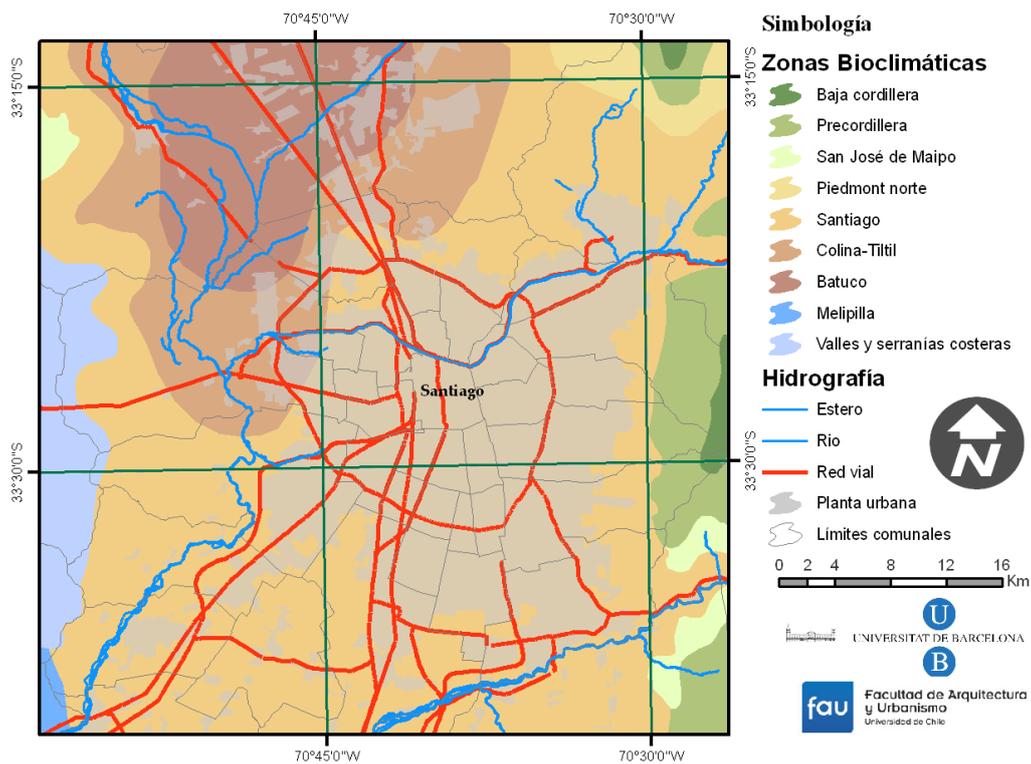


Figura 1.8. Mapa de zonas bioclimáticas.

La isla de calor urbana de superficie y sus factores condicionantes:

El caso del área metropolitana de Santiago

## Capítulo 1

Tabla 1.1. Algunos parámetros de las zonas bioclimáticas presentes en el área de estudio.

| Parámetros climáticos                | Santiago | Colina-<br>Tiltil | Batuco  | Piedmont<br>Norte | Precordillera |
|--------------------------------------|----------|-------------------|---------|-------------------|---------------|
| Temp. máx. media(°C)                 | 21,1     | 22,5              | 22,8    | 17,7              | 16,0          |
| Temp. mín . media (°C)               | 7,6      | 7,7               | 7,2     | 4,1               | 4,2           |
| Temp. media (°C)                     | 13,7     | 14,4              | 14,3    | 10,4              | 9,6           |
| Suma térmica (DG)                    | 1.606,0  | 1.856,0           | 1.895,0 | 953,0             | 724,0         |
| DG acumulados                        | 1.606,0  | 1.856,0           | 1.895,0 | 953,0             | 724,0         |
| Horas de frío -HF (Horas)            | 1.125,0  | 1.074,0           | 1.478,0 | 3.289,0           | 3.464,0       |
| HF acumuladas                        | 1.125,0  | 1.074,0           | 1.478,0 | 3.289,0           | 3.464,0       |
| Radiación solar (ly/día)             | 391,0    | 397,0             | 400,0   | 392,0             | 389,0         |
| Humedad relativa (%)                 | 72,0     | 68,0              | 70,0    | 59,0              | 57,0          |
| Precipitación (mm)                   | 418,9    | 348,0             | 307,9   | 585,1             | 715,0         |
| Evapotranspiración<br>potencial (mm) | 1.242,0  | 1.272,0           | 1.290,0 | 1.080,0           | 1.062,0       |
| Déficit hídrico (mm)                 | 975,5    | 1.019,6           | 1.049,4 | 810,7             | 770,6         |
| Excedente hídrico (mm)               | 152,4    | 95,6              | 67,3    | 315,8             | 423,6         |
| Índice de humedad (pp/etp)           | 0,3      | 0,3               | 0,2     | 0,5               | 0,7           |
| Heladas (días)                       | 10,6     | 11,0              | 25,9    | 79,0              | 68,2          |

Fuente: Elaboración propia en base a informe OTAS (1997).

En la tabla 1.1 es posible apreciar que en los montos de precipitación de zona bioclimática de Santiago, la más representativa de este estudio por extensión espacial, presenta valores de precipitación media anual (obtenida a partir de varios observatorios) de 418,9 mm, 13,7°C de temperatura media, 72% de humedad relativa y unos 10,6 días de heladas (mínimas bajo cero grados Celsius), mientras que Precordillera presenta 715 mm de precipitaciones, sólo 9,6°C de temperatura media, 57% de humedad relativa y casi 70 días de heladas. Lo anterior refleja que pese a la uniformidad de la ciudad, hay áreas donde precipita más, asociado a la Cordillera de Los Andes, la cual también aumenta las heladas y reduce por humedad del aire.

### *1.6.4. Características socio-demográficas del área de estudio*

La ciudad de Santiago, fundada en 1541 por Pedro de Valdivia, posee actualmente cerca de 6 millones de habitantes. Su expansión inicial sobre el plano de damero fue lenta, anexando territorio adyacente a sus límites. Esto cambió desde mitad del siglo XX, haciéndose cada vez más dispersa, incluso generando un núcleo conurbado con antiguas ciudades cercanas (Puente Alto y San Bernardo). Un aspecto interesante es la distribución de la población desde el punto de vista social. En Chile, para clasificar socioeconómicamente a los hogares se utiliza una segmentación agregada de 4 categorías, las cuales poseen las siguientes características y nomenclaturas:

- ABC1 (clase alta o elite): El jefe del hogar tiene en promedio 16 años de estudio como promedio, en muchos casos universitaria. El ingreso del hogar en promedio es de \$4.323.713 de pesos chilenos (7.200€).
- C2 (clase media-alta): En promedio el jefe del hogar ha estudiado unos 14 años, es decir, una profesión técnica. La familia obtiene un ingreso promedio de \$1.419.731 pesos chilenos (2.370€).
- C3 (clase media): El jefe del hogar ha terminado sus estudios secundarios y su familia alcanza un ingreso promedio de \$747.375 pesos chilenos (1.245€).
- D (clase baja): El jefe del hogar no ha acabado sus estudios secundarios y su familia percibe una renta promedio de \$389.475 pesos chilenos (650€).
- E (clase muy baja): El jefe del hogar en promedio sólo ha estudiado 7,7 años (sólo primaria incompleta), y su ingreso familiar promedio es de \$157.303 pesos chilenos (262€).

El AMS muestra una clara segregación espacial entre grupos ABC1 y C2 respecto a las clases bajas y muy bajas (D y E). Esto es bastante evidente al mirar

la figura 1.9, pues se observa que hacia el oriente de la ciudad se localiza la población ABC1 y C2, mientras que al poniente las familias de niveles D y E.

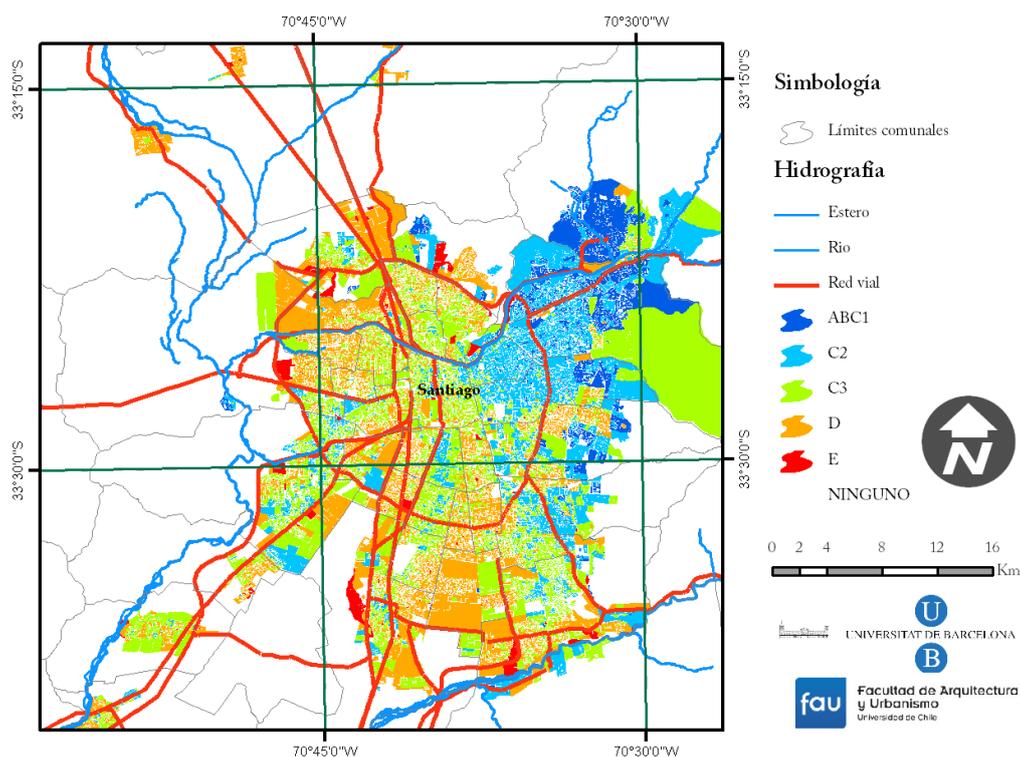


Figura 1.9. Mapa de niveles socioeconómicos de la población urbana.

Esto, además, coincide muy bien con la distribución del centro financiero, áreas verdes, oficinas y localización de empresas no contaminantes (figura 1.8 y 1.9). La mayoría de la población posee, no obstante, ingresos medios y bajos, quedando sólo el 8% como personas con niveles de ingreso alto.

*1.6.5. Características ambientales del área de estudio*

Son muy variadas las características ambientales que posee Santiago de Chile, que, toda ciudad, están afectadas por los impactos propios de la urbanización, lo cual perturba las matrices físicas y biológicas; a saber: aire, suelo, agua, flora y fauna.

Respecto al aire, el AMS es un área saturada por contaminantes, específicamente material particulado de 10  $\mu\text{m}$  (PM10) desde el año 1996. Además, en la mayoría de los gases atmosféricos nocivos para la salud humana (CO, NO<sub>x</sub>) presenta distribuciones concéntricas, pues el tránsito rodado es mayor en el centro de la ciudad, tal como muestra la figura 1.10.

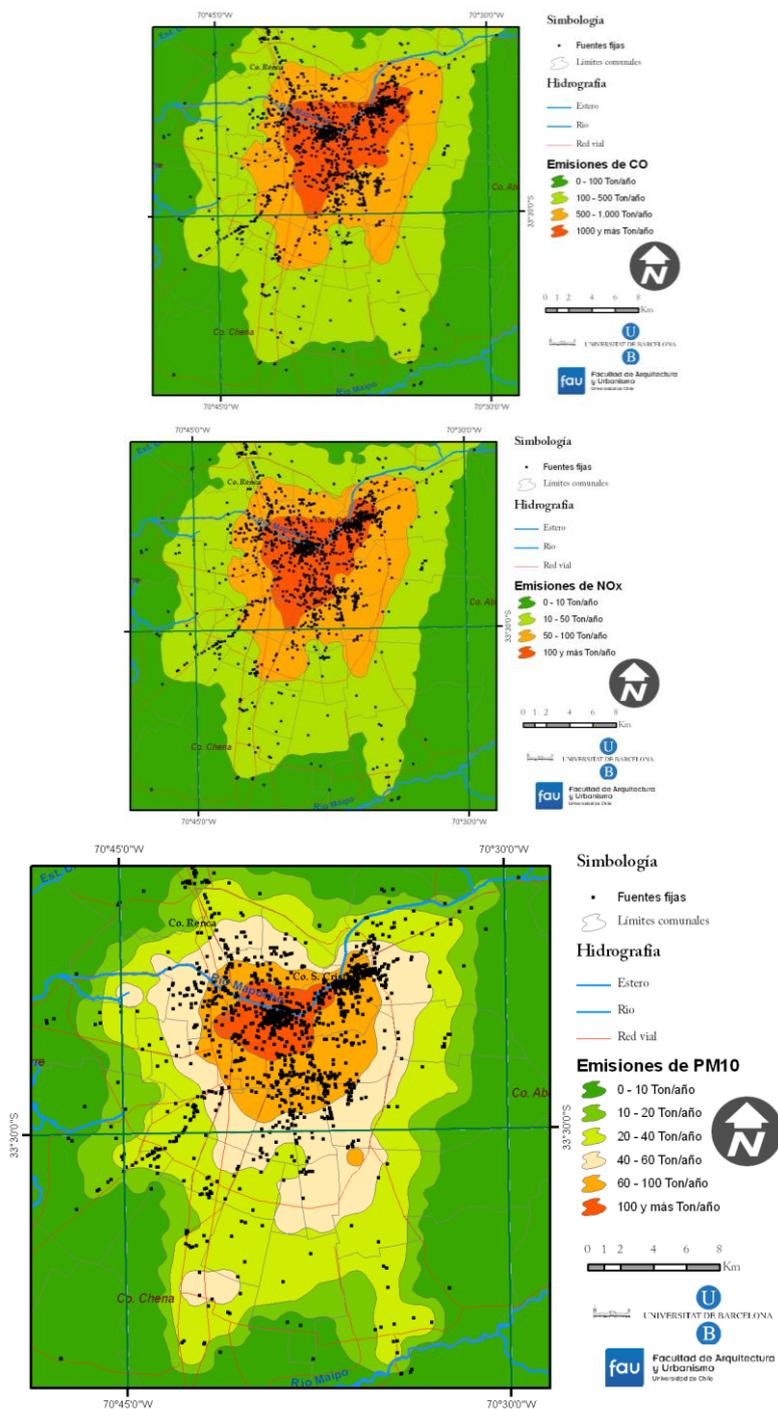


Figura 1.10. Emisión de gases contaminantes y material particulado en el AMS.

Los suelos del AMS han sido ocupados por urbanizaciones de baja densidad, pero aún así se considera que padecen una pérdida irreversible de soporte para la

actividad agrícola, especialmente vitivinícola. Esto ha sido debido a la especulación inmobiliaria, lo cual ha generado ganancias por los sucesivos cambios de uso de suelo en los últimos años en los límites urbanos de la ciudad. A partir de ese momento, el impacto sobre el suelo más importante ha sido su pérdida en superficie. Además, hay que señalar que también han aparecidos otras problemáticas relacionadas con metales pesados en los suelos y otras afectaciones urbanas.

Si bien los impactos sobre el agua han sido similares a los de los suelos, en los últimos años se ha optado por depuradoras de aguas residuales urbanas, lo cual ha implicado mejoras en su calidad. No obstante, el efecto positivo de la depuración de agua generó problemas de olores y lodos, los cuales nuevamente poseen metales pesados.

Finalmente, y como consecuencia de lo anterior, los impactos sobre flora y fauna en el AMS han sido importantes, con pérdidas significativas de efectivos y biodiversidad.

### *1.6.6. Delimitación física del área de estudio*

La ciudad de Santiago sobrepasa la provincia homónima, por lo que delimitar el área de estudio a partir de la provincia no resulta adecuado. De hecho, a partir de la década de 1980 se hace referencia al Gran Santiago. Bodini (1985) define al Gran Santiago como «*un área que comprende las comunas con espacio construido en torno a la comuna de Santiago*». Sin embargo, creemos que el área que responde a dicha definición es sobrepasada por las urbanizaciones discontinuas al conjunto urbano compacto. Para Bodini (1985), el Gran Santiago estaba compuesto por 34 comunas (las 32 comunas de la provincia de Santiago, más San Bernardo y Puente

Alto). Esta denominación de Gran Santiago se mantiene en muchos estudios, pero con el tiempo ha ido anexando comunas periféricas que se han conurbado con el núcleo principal. No obstante, los autores no siempre coinciden con el número de comunas y los límites de las demarcaciones, incluso en estudios de años simultáneos.

En nuestro caso y para evitar dicho problema, utilizaremos el concepto de área metropolitana de Santiago (AMS) para hacer referencia a la mancha urbana que abarca la ciudad. Esta mancha urbana, no siempre continua, comprende comunas de manera completa y en algunos casos de modo parcial.

Por otra parte, al tratarse de un estudio de Climatología urbana, delimitaremos el área adyacente a la ciudad (que puede corresponder a un área de influencia climática de la ciudad). Esta área colindante a la ciudad está compuesta por paisajes agrarios, naturales y semi-naturales. Para demarcar el límite de esta área de influencia o similar a la ciudad, se definen los siguientes criterios:

1. Que la altitud se encuentre entre los 400 y los 1.150 m.s.n.m. Esta condición deja fuera una parte del núcleo urbano de Peñaflor y un pequeño sector de Lo Barnechea.
2. Que las pendientes sean inferiores a 16,7° (30%), lo cual permite eliminar áreas que no están urbanizadas y sometidas a una insolación diferente al AMS. Con ello, se quedan fuera del estudio el Cordón los Ratones, Cerro Chena, Aguirre, Colorado, Renca, San Ignacio, La Región, San Cristóbal, Los Cordones y Quilhuica, entre otras de menor tamaño.

Con ello se generó un área de estudio que cubre 42 comunas y una superficie cercana a las 190.000 hectáreas, de la cual casi un tercio se encuentra urbanizada, tal como se observa en la figura 1.11.

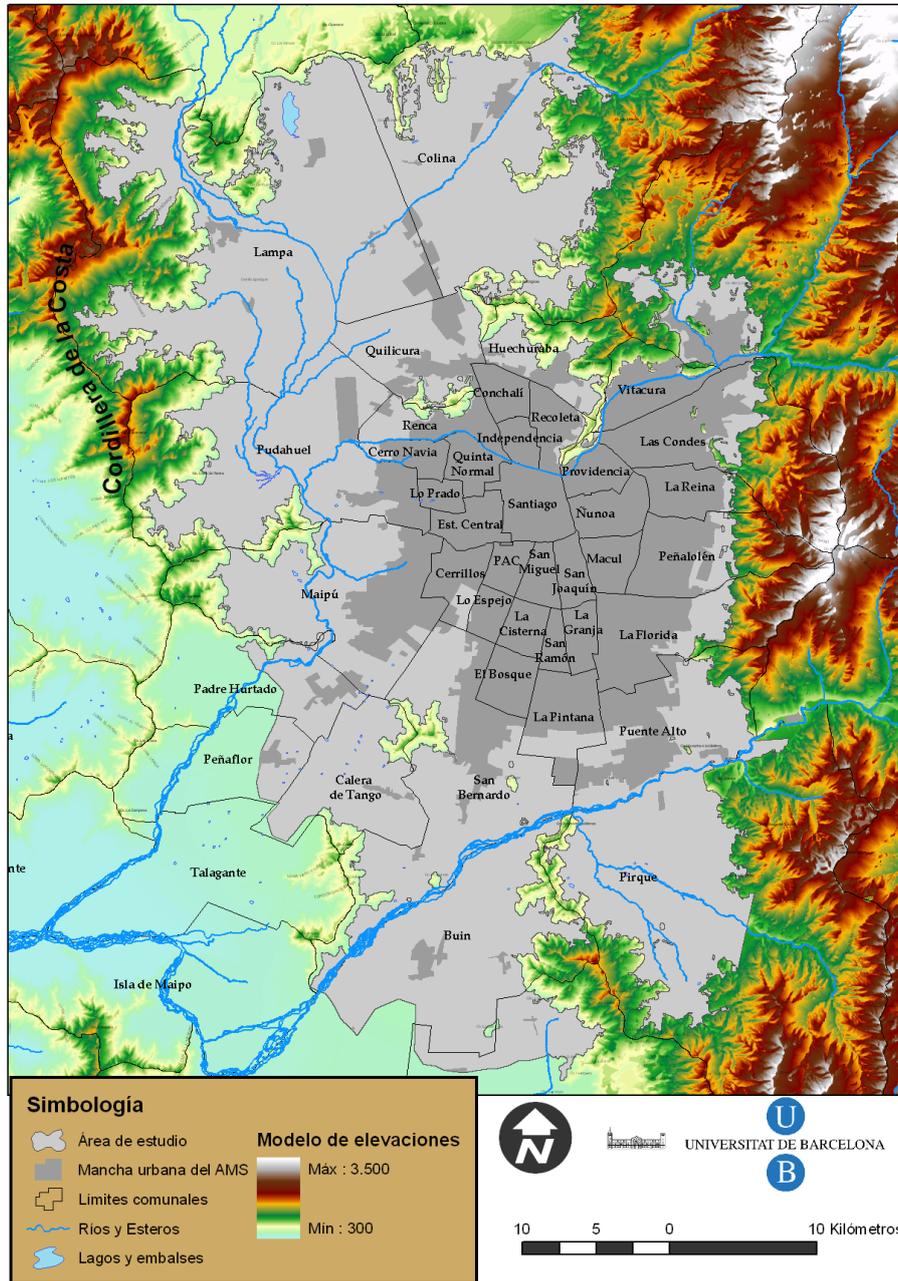


Figura 1.11. Mapa físico administrativo del área de estudio.

### **1.7. Bibliografía**

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*, 1 (23), 1-26.

Ash, C., Jasni, B., Roberts, L., Stone, R., & Sugden, A. (2008). Reimagining cities - Introduction. *Science*, 5864 (319), 739-739.

Bello, V. (1994). La isla de calor y los usos del suelo en Guadalajara. *Serie geográfica* (4), 83-97.

Beral-Guyonnet, I. (1997). Analyse spatiale des températures mensuelles dans l'agglomération lyonnais. *Revue de Géographie de Lyon* (72), 263-266.

Bodini, H. (1985). *Geografía de Chile, Tomo X. Geografía Urbana*. Santiago, Chile: Instituto Geográfico Militar (IGM).

Chen, P., Liew, S., & Kwon, L. (2001). Dependence of urban temperature elevation on land cover types. *22nd Asian conference on remote sensing*, (p. 5). Singapore.

Chen, Y., & Wong, N. (2006). Thermal benefits of city parks. *Energy and Buildings* (38), 105-120.

Cuadrat, J., Saz, M., & Vicente-Serrano, S. (2003). *Surface wind direction influence on spatial patterns of urban heat island in Zaragoza (Spain)*. *Geophysical Research Abstracts*, 5: 02592. *European Geophysical Society*. Retrieved Agosto 14, 2007, from <http://www.cosis.net/>

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.* (40), 311–327.

El-Dessouky T.M., Jenkinson A.F. (1975). An objective daily catalogue of surface pressure, flow and vorticity indices for Egypt and it's use monthly rainfall forecasting. *Synoptic Climatology Branch Memorandum nº 46*, Bracknell, Meteorological Office, London.

Eliasson, I. (1994). Urban-suburban-rural air temperature differences related to street geometry. *Physical Geography* (15), 1-22.

Fernández, F., Montálvez, J., González, J., & Valero, F. (2004). La estructura espacial de la isla térmica y la morfología urbana de Madrid. En J. García Codron, C. Diego Liaño, P. Fernández de Arróyabe, P. Garmendia, D. Rasilla, & A. E. Climatología (Ed.), *El clima entre el mar y la montaña* (Serie A nº4 ed., págs. 641-650). Santander: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria.

Gedzelman, S., Austin, S., Cermak, R., Stefano, N., Partridge, S., Quesenberry, S., y otros. (2003). Mesoscale aspects of the Urban Heat Island around New York City. *Theor. Appl. Climatol* (75), 29-42.

Gorsevski, V., Taha, H., Quattrochi, D., & Luvall, J. (2000). *Air Pollution Prevention through Urban Heat Island Mitigation: An Update on the Urban Heat Island Pilot Project*. Washington DC: Environmental Protection Agency.

IPCC. (2007). Climate Change 2007: Climate Change 2007. *The Physical Science Basis, IPCC Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report*

*of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge.

Jenkinson A.F., Collison P. (1977). An initial climatology of gales over the North Sea. Synoptic Climatology Branch Memorandum n° 62, Bracknell, Meteorological Office, London.

Kim, Y., & Baik, J. (2002). Maximum Urban Heat Island Intensity in Seoul. *Journal of Applied Meteorology* (41), 651-659.

Klysiak, K., & Fortuniak, K. (1999). Temporal and spatial characteristics of urban heat island of Łódź, Poland. *Atmospheric Environment* (33), 3885-3895.

Kolokotroni, M., & Giridharan, R. (2008). Urban heat island intensity in London: An investigation of the impact of physical characteristics on changes in outdoor air temperature during summer. *Solar Energy* (82), 986-998.

Lamb H.H. (1972). British Isles weather types and a register of daily sequence of circulation patterns, 1861-1971. *Geophysical Memoir* 116, HMSO, London, 85 pp.

Landsberg, H. (1981). *The Urban Climate* (First ed.). New York: Academic Press.

Lowry, W. (1977). Empirical estimation of urban effects on climate: a problem analysis. *Journal of Applied Meteorology* (36), 1377-1391.

Martínez, F., Simón-Soria, F., & López-Abente, G. (2004). Valoración del impacto de la ola de calor del verano de 2003 sobre la mortalidad. *Gaceta Sanitaria* (18 (supl 1)), 250-258.

Mattos, C. (1999). Santiago de Chile, globalización y expansión metropolitana: lo que existía sigue existiendo. *Eure* (76), 29–56.

Molina, M. (2007). *Efectos de los tipos de urbanización asociados al crecimiento urbano del área metropolitana de Santiago sobre la generación y comportamiento de micro islas de calor*. Memoria de título geografía, Universidad de Chile, Departamento de Geografía, Santiago.

Molina, M., & Romero, H. (2007a). Clima Urbano y Contaminación Atmosférica como Indicadores de Vulnerabilidad Humana en el Gran Santiago. *Presentado en Coloquio Internacional Construir la Resiliencia de los Territorios*. Valparaíso, Chile.

Molina, M., & Romero, H. (2007b). Tipos de urbanización asociados al crecimiento urbano del área metropolitana de Santiago entre 1989-2007, y sus efectos sobre la generación y comportamiento de micro islas de calor urbanas. *XXVIII Congreso Nacional y XIII Internacional de Geografía*. Santiago, Chile.

Moreno, M. (1993). *Estudio del clima urbano de Barcelona: la isla de calor*. Vilassar de Mar: Oikos-tau.

Moreno, M. (1994). Intensity and form of the urban heat island in Barcelona. *International Journal of Climatology* (14), 705-710.

Oke, T. (1987). *Boundary Layer Climates* (Second ed.). London: Routledge.

Oke, T. (1995). The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects. En J. Cermak, *Wind Climate in Cities*. Kluwer-Academic Publ. Norwell.

Ortíz, J., & Escolano, S. (2005). Crecimiento periférico del Gran Santiago. ¿Hacia la desconcentración funcional de la ciudad? *Scripta Nova. Revista electrónica de geografía y ciencias sociales.* , IX (194 (4)).

Peña, M. (2008). Relationships between remotely sensed surface parameters associated with the urban heat sink formation in Santiago, Chile. *International Journal of Remote Sensing* , 29 (15), 4385-4404.

Peña, M., & Romero, H. (2005). Relación espacial y estadística entre las islas de calor de superficie, coberturas vegetales, reflectividad y contenido de humedad del suelo, en la ciudad de Santiago y su entorno rural. *XXV Congreso Nacional y X Internacional de Geografía* (págs. 107-117). Santiago: Anales de la Sociedad Chilena de Ciencias Geográficas 2005.

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. May 14, 2004., Arizona State University, Arizona.

Romero, H. (2004). Crecimiento Espacial de Santiago entre 1989 y 2003 y la Pérdida de Servicios Ambientales. En P. Tupper, *Hacer Ciudad* (págs. 179-201). Santiago: Centro Chileno de Urbanismo.

Romero, H., & Sarricolea, P. (2006). Patrones y factores de crecimiento espacial de la ciudad de Santiago de Chile y sus efectos en la generación de islas de calor de superficie. En J. Cuadrat, M. Saz, S. Vicente, S. Lanjeri, M. Luis Arrillaga, & J. González-Hidalgo (Edits.), *Clima, Sociedad y Medio Ambiente* (págs. 827-837). Zaragoza, España: Publicaciones de la Asociación Española de Climatología.

Romero, H., Molina, M., Moscoso, C., Sarricolea, P., Smith, P., & Vásquez, A. (2007). Caracterización de los cambios de usos y coberturas de suelos causados por la expansión urbana de Santiago, análisis estadístico de sus factores explicativos e inferencias ambientales. En P. U. Instituto de Estudios Urbanos y Territoriales e Instituto de Geografía, C. Mattos, & R. Hidalgo (Edits.), *Reconfiguración Metropolitana y Movilidad Espacial en Santiago*. Santiago, Chile: Eure Libros & Geolibros.

Romero, H., Toledo, X., Ordenes, F., & Vásquez, A. (2001). Ecología urbana y gestión ambiental sustentable de las ciudades intermedias chilenas. *Ambiente y desarrollo*, XVII (4), 45-51.

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*. Universidad de Chile, Departamento de Geografía. Santiago: Inédita.

Sarricolea, P., & Romero, H. (2006). Cambios de uso y coberturas del suelo entre 1998 y 2004 y sus efectos sobre la configuración de la isla de calor urbana de superficie de Santiago. *XXVI Congreso Nacional y XI Internacional de Geografía* (págs. 207-210). Concepción: Anales de la Sociedad chilena de ciencias geográficas.

Sarricolea, P., Aliste, E., Castro, P., & Escobedo, C. (2008). Análisis de la máxima intensidad de la isla de calor urbana nocturna de la ciudad de Rancagua (Chile) y sus factores explicativos. *Revista de Climatología* (8), 71-84.

Sarricolea, P. (2010). *Climatología urbana mediante el uso de la teledetección: aportaciones a la planificación territorial y gestión ambiental del área metropolitana de Santiago*. Universitat de Barcelona, Departamento de Geografía Física y A.G.R. Barcelona: Inédita.

Sarricolea, P., Meseguer, O., & Martín-Vide, J. (2011). Aplicación de la clasificación automática de Jenkinson y Collison a Chile Central. *Conferencia Geográfica Regional de la Unión Geográfica Internacional (UGI)*, (p. 10). Santiago.

Stone, B., & Rodgers, M. (2001). Urban Form and Thermal Efficiency: How the Design of Cities Influences the Urban Heat Island. *Journal of the American Planning Association*, 2 (67), 186-198.

Voogt, J. (2004). Urban Heat Islands: Hotter Cities. Washington D.C. . *American Institute of Biological Sciences* .

Weng, Q. (2001). Weng, Q. 2001. A remote sensing-GIS evaluation of urban expansion and its impact on surface temperature in the Zhujiang Delta, China. *International Journal of Remote Sensing*, 10 (22), 1999-2014.

Yagüe, C., Zurita, E., & Martínez, A. (1991). Statistical analysis of the Madrid urban heat island. *Atmospheric Environment*, B (25), 327-332.

Yamashita, S., Sekine, K., Shoda, M., Yamashita, K., & Hara, Y. (1986). On relationships between heat island and sky view factor in the cities of Tama River basin, Japan. *Atmospheric Environment* (20), 681-686.

Yuan, F., & Bauer, M. (2007). Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment* (106), 375-386.