



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO
ESCUELA DE POSTGRADO

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN GEOGRAFÍA CON
MENCION EN RECURSOS TERRITORIALES**

**ANÁLISIS DE LA SUSTENTABILIDAD DEL CRECIMIENTO
URBANO DE LA CIUDAD DE SANTIAGO Y SUS EFECTOS
SOBRE LA CONFIGURACIÓN DE LAS TEMPERATURAS
SUPERFICIALES**

PABLO ANDRÉS SARRICOLEA ESPINOZA

Director de Tesis: Dr. Hugo Romero Aravena

Santiago - Chile

ABRIL 2008

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Chile y al Departamento de Geografía, especialmente al profesor y Doctor en Geografía Hugo Romero Aravena, quien guío y corrigió con gran dedicación y aportes teóricos y metodológicos este estudio en el marco del proyecto Fondecyt N° 1050423, del cual es investigador responsable. A los profesores Fernando Pino, Alvaro Mauro, Enrique Zarate, Margarita Riffo y todos quienes me apoyaron en el desarrollo de esta tesis. También a Carmen Cornejo, que también fue un gran apoyo.

A todos los amigos y amigas que me acompañaron durante el desarrollo de esta tesis, especialmente a Marcelo Mondino (mi gran amigo) y mis compañeros de magister, Osvaldo Sepúlveda, Suikee Kong, Yurina Cifuentes y los demás. A Jocelyn Arriagada, mis compañeros de pregrado y los ayudantes y compañeros de labores, Pamela Castro y Alexis Vázquez. Como no mencionar al grupo del Laboratorio de Medio Ambiente y Territorio, particularmente a Melandra Molina. También, a Maurix Suarez y Max Elmes, que también han sido valiosos compañeros y amigos.

A mi pequeña y amada familia, mis hermanas Jany y Paola, a Julio, mis queridos sobrinos Maxi y Diego y mi padre, así como también la familia Fuentealba Landeros (Arturo, Malena, Rodrigo y David). Todos ellos motivan mi desarrollo personal y académico, y me hacen más fuerte cada día.

Finalmente, a Magdalena Fuentealba (Male), mi novia y apoyo fundamental, gracias por estar y querer seguir estando conmigo, dándome cariño, amor y grandes consejos.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Páginas
INDICE	3
1. INTRODUCCIÓN	8
1.1 Estado del asunto	8
1.2 Problemática	10
1.3 Objetivos	16
1.3.1 Objetivo general	16
1.3.2 Objetivos específicos	16
1.4 Hipótesis de trabajo.....	17
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
2.1 Definición del en área de estudio.....	18
2.2 Metodología general.....	19
2.2.1 Análisis y explicación del crecimiento urbano de la ciudad de Santiago entre 1975 y el 2004 y su proyección futura	22
2.2.2 Análisis y explicación de la distribución espacial de las temperaturas superficiales de 1998 y 2004 a través de un modelo de regresión múltiple.....	33
2.2.3 Relaciones existentes entre las temperaturas de superficie y las coberturas y usos de suelo de los años 1998 y 2004.....	40
2.2.4 Relaciones existentes entre las temperaturas de superficie y los niveles socioeconómicos a través de un modelo de regresión logarítmico.....	42
3. RESULTADOS	45
3.1 Análisis y explicación del crecimiento urbano de la ciudad de Santiago entre 1975 y el 2004 y su proyección futura.....	45
3.1.1 Crecimiento de la ciudad de Santiago entre 1975 y el 2004.....	45
3.1.2 Variables explicativas del crecimiento urbano.....	47
3.1.3 Modelación del crecimiento urbano observado de Santiago	57
3.1.4 Estimación del crecimiento urbano de Santiago para el año 2020.....	63
3.2 Análisis y estimación de la distribución espacial de las temperaturas superficiales de la ciudad de Santiago.....	69
3.2.1 Análisis de la configuración espacial de las temperaturas superficiales el año 2004.....	69

3.2.2 Análisis de las variables explicativas de la distribución espacial de las temperaturas superficiales	73
3.2.3 Modelo explicativo de la distribución espacial de las temperaturas superficiales de Santiago	82
3.3 Relaciones espaciales entre las temperaturas de superficie y las diferentes coberturas y usos de suelo en los años 1998 y 2004.....	85
3.3.1 Análisis de las temperaturas superficiales entre 1998 y el 2004 en la ciudad de Santiago.....	86
3.3.2 Análisis de la distribución espacial de los usos y coberturas de suelo	89
3.3.3 Análisis de las temperaturas superficiales según usos de suelo de la ciudad de Santiago	91
3.4 Relaciones entre las temperaturas de superficie y los niveles socioeconómicos a través de un modelo de regresión logarítmica.....	93
3.4.1 Análisis de los niveles socioeconómicos de la ciudad de Santiago.....	93
3.4.2 Relaciones entre los niveles socioeconómicos y las temperaturas superficiales.....	96
4. DISCUSIÓN.....	99
4.1 Modelo de crecimiento de la ciudad y sus tendencias futuras	99
4.2 Modelo explicativo de las temperaturas superficiales.....	101
4.3 Relaciones entre las temperaturas y los usos de y coberturas de suelo	104
4.4 Relaciones entre las temperaturas y los niveles socioeconómicos.....	106
5. CONCLUSIONES	108
6. BIBLIOGRAFIA	112

ÍNDICE DE TABLAS

	Páginas
Tabla 1. Rangos de valoración del índice Kappa según la fuerza de concordancia de las imágenes comparadas.....	31
Tabla 2. Matriz de clasificación socioeconómica de los hogares de Santiago.	43
Tabla 3. Características de los niveles socioeconómicos del Gran Santiago.....	43
Tabla 4. Crecimiento de la superficie urbana de Santiago entre 1975 y 2004.	46
Tabla 5. Superficies urbanizadas en las comunas cercanas a Puente Alto y San Bernardo entre 1975 y 2004.....	50

Tabla 6. Matriz de correlación entre las variables explicativas del crecimiento urbano de Santiago.....	58
Tabla 7. Correlación entre las variables explicativas del crecimiento urbano y la variable dependiente.....	59
Tabla 8. Modelos resultantes para estimar el crecimiento urbano de Santiago.	60
Tabla 9. Coeficientes aplicados a la ecuación de regresión múltiple para estimar el crecimiento urbano de Santiago.	61
Tabla 10. Matriz de probabilidad de cambios de usos de suelo entre 1975 y 1998.	64
Tabla 11. Matriz de probabilidad de cambios de usos de suelo entre 1989 y 1998.	64
Tabla 12. Matriz de probabilidad de cambios de usos de suelo entre 1998 y el 2004.	67
Tabla 13. Temperaturas superficiales (°C) medias, mínimas y máximas y desviación estándar de las mismas en áreas urbanas y rurales de Santiago.	70
Tabla 14. Temperaturas superficiales promedios (°C) según comunas del Gran Santiago el año 2004.	72
Tabla 15. Promedios de las variables explicativas de las temperaturas.....	73
Tabla 16. Regresión múltiple entre las temperaturas y diferentes factores urbanos de Santiago.....	83
Tabla 17. Resultados del modelo 4 de regresión múltiple para Santiago.....	84

ÍNDICE DE FIGURAS

	Páginas
Figura 1. Área de estudio.	19
Figura 2. Croquis de una manzana urbana del Censo de Población y Vivienda 2002.	23
Figura 3. Cálculo de las distancias euclidianas	26
Figura 4. Anillos de crecimiento de la ciudad de Chicago	26
Figura 5. Esquema metodológico para explicar el crecimiento urbano basado en el porcentaje de área urbanizada observada.....	28
Figura 6. Tipos de vecinos en la aplicación de Autómatas Celulares.....	30
Figura 7. Esquema metodológico para modelar el crecimiento urbano futuro de la ciudad de Santiago hacia el 2020.	32
Figura 8. Comportamiento y respuesta espectral de la vegetación según el porcentaje de reflectividad	35
Figura 9. Red de triángulos irregulares para generar un modelo de elevaciones	37
Figura 10. Transformación de las elevaciones desde TIN a Raster.....	37

Figura 11. Esquema metodológico para explicar las temperaturas superficiales del 2004 basado en un conjunto de variables explicativas de carácter urbano-geográfico.	39
Figura 12. Usos de suelo relacionados con las temperaturas superficiales medias de Singapur, según CHEN <i>et al.</i> 2001.	42
Figura 13. Relaciones entre los niveles socioeconómicos de la población y las temperaturas superficiales en Phoenix, según PRASHAD, 2004.	44
Figura 14. Crecimiento de la mancha urbana de Santiago entre 1975 y el 2004.	46
Figura 15. Distancias euclidianas al centro de Santiago.	49
Figura 16. Distancias euclidianas al centro de Puente Alto.	51
Figura 17. Distancias euclidianas al centro de San Bernardo.	52
Figura 18. Distancias euclidianas al límite urbano de Santiago de 1975.	53
Figura 19. Distancias euclidianas a los ejes viales de la ciudad.	54
Figura 20. Número de habitantes de la ciudad de Santiago.	55
Figura 21. Densidad de población de la ciudad de Santiago.	56
Figura 22. Distribución de los porcentajes de área urbanizada de Santiago, calculada y estimada por el modelo de regresión múltiple.	62
Figura 23. Cambios en la superficie urbanizada de Santiago entre 1975 y 2004.	63
Figura 24. Tabla de aplicación del índice Kappa para validar la imagen modelada del año 2004 a partir de los usos y coberturas 1989 y 1998.	65
Figura 25. Superficie ocupada por la ciudad de Santiago el año 2020 a partir de la situación observada entre 1989 y 1998.	66
Figura 26. Superficie ocupada por la ciudad de Santiago el año 2020 a partir de la situación observada entre 1998 y 2004.	68
Figura 27. Distribución de las temperaturas superficiales de Santiago. 2004.	71
Figura 28. Distribución de la Productividad vegetal (NDVI) en la ciudad de Santiago en Diciembre del año 2004.	75
Figura 29. Distribución promedio del NDVI según comuna.	75
Figura 30. Densidad de población.	76
Figura 31. Distribución de la densidad de población promedio según comuna.	77
Figura 32. Distancia euclidiana a los cursos de agua.	78
Figura 33. Distribución de la distancia a los cursos de agua según comuna.	78
Figura 34. Rugosidad de suelo de Santiago 2004.	80
Figura 35. Distribución promedio del número de pisos según comuna.	80
Figura 36. Modelo Digital de Terreno (MDT) de la ciudad de Santiago.	81

Figura 37. Relación entre las temperaturas y los diferentes factores urbano-geográficos.....	82
Figura 38. Distribución de las temperaturas superficiales de Santiago. 1998 y 2004.....	87
Figura 39. Distribución de las temperaturas superficiales promedios de 1998 y 2004 según comuna.	88
Figura 40. Distribución de los usos y coberturas de suelo en 1998 y 2004.....	89
Figura 41. Comparación entre los usos y coberturas de suelo entre 1998 y 2004.	90
Figura 42. Distribución de las temperaturas superficiales promedios de 1998 y 2004 según usos y coberturas de suelo.	91
Figura 43. Distribución espacial de los niveles socioeconómicos de la ciudad de Santiago. ...	94
Figura 44. Relación entre el porcentaje de área ocupada por cada NSE y las temperaturas superficiales.	96
Figura 45. Relación entre niveles socioeconómico de la población y temperaturas superficiales a nivel de manzanas urbanas.	97
Figura 46. Regresión logarítmica entre las temperaturas superficiales y los niveles socioeconómicos de la población de Santiago.....	98

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Estado del asunto

La urbanización es una de las acciones humanas que más altera los sistemas naturales. La construcción de las ciudades implica la generación de islas de calor debido a que los materiales que la componen, absorben, almacenan y emiten la energía radiante; modifica la rugosidad del terreno, principal característica que condiciona la circulación de los vientos a nivel de superficie (OKE, 1987, CHEN y WONG, 2006); reemplaza las coberturas vegetales del suelo por superficies impermeables que reducen irreversiblemente la evapotranspiración y con ello, la capacidad de enfriamiento del aire (YUAN y BAUER, 2007); desmejora la calidad del aire y, desde luego modifica el balance hídrico de los territorios. Todas estas modificaciones, entre otras, hacen posible sostener que las ciudades generan un nuevo ecosistema, que es definido según ROMERO et al. (2001) como medio ambiente urbano. Ello involucra que las ciudades son responsables de sus propias condiciones ambientales, en las que destacan sus efectos sobre el clima, especialmente el campo térmico.

Las ciudades chilenas han experimentado en las últimas décadas un proceso de explosivo crecimiento espacial, consiguiendo, en el caso de Santiago, triplicar su superficie entre 1975 y 2004 (ROMERO et al., 2007). En este contexto, de crecimiento físico ilimitado y rápido de las ciudades, se ha establecido que dicho proceso ha tenido profundos efectos sobre la sustentabilidad ambiental. Ello ha repercutido en la pérdida de servicios ambientales y en el apareamiento de islas de calor, pérdida de vegetación y humedad y malas condiciones de ventilación al interior y en el borde de las ciudades (ROMERO, 2004).

Esto se ha visto mayormente agravado debido a que las ciudades latinoamericanas de tipo compacto se han transformado en los últimos 20 años (especialmente las metrópolis) en ciudades de tipo disperso. El proceso ligado a este tipo de urbanización se denomina “urban sprawl”, lo cual implica un crecimiento periférico discontinuo, al decir de ORTIZ y ESCOLANO (2005) y una metropolización expandida (DE MATTOS, 1999). Sus consecuencias significan altos costos sociales y ambientales. Los costos sociales se observan en el aumento de viajes diarios, las distancias recorridas entre residencia, trabajo y/o estudio y el creciente número de automóviles por hogar. Ello va acompañado de la progresiva segregación socioespacial de sus habitantes y del policentrismo de las funciones urbanas, todo lo cual aumenta las necesidades de movilidad de la población de las metrópolis. El aumento de los viajes y distancia de los recorridos implica un mayor consumo de combustible, un aumento indiscriminado de las tasas de automovilización y de las áreas de congestión de tránsito. Los costos ambientales así generados incluyen aumento en la contaminación del aire, el agua y los suelos, destacando la pérdida de terrenos agrícolas de alta calidad; la impermeabilización, que deriva en aumento del escurrimiento laminar al interior de la ciudad y la pérdida de servicios ambientales tales como las islas frías, infiltración de agua en el suelo y 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 aumento de las temperaturas urbanas respecto a su entorno inmediato de carácter rural (OKE, 1987). Este aumento artificial de las temperaturas produce discomfort térmico y aumenta la ocurrencia de enfermedades relacionadas con el calor, especialmente durante los días más calurosos de verano. Además, aumenta la ocurrencia de enfermedades

respiratorias, debido a que el exceso de calor favorece la formación de Ozono (O_3) y conlleva un alza en la demanda energética destinada a sistemas de refrigeración y aire acondicionado, agravando la emisión de contaminantes atmosféricos (CO_2 , NO , SO_2 , PM_{10} y $PM_{2.5}$) desde las plantas eléctricas. Para la sociedad y los gobiernos (PEÑA y ROMERO, 2005) implica un gasto de dinero adicional, producto del mayor consumo energético, mientras que a nivel planetario contribuye al calentamiento global, debido a que fomenta la emisión de gases de efecto invernadero (GORSEVSKI et al, 2000; STONE y RODGERS, 2001; VOOGT, 2004).

1.2 Problemática

Los patrones espaciales asociados al crecimiento urbano disperso, implican altos costos sociales y ambientales. Es por ello, que se han realizado tanto en el país como en el extranjero, análisis estadísticos multivariados destinados a identificar y ponderar las variables explicativas del crecimiento espacial de las superficies totales urbanizadas. Es así como SUDHIRA et al. (2004), analizaron estadísticamente en ciudades de la India la relación entre el porcentaje de áreas urbanizadas (variable dependiente) con la cantidad y densidades de población, distancia a los caminos y a los centros urbanos (variables explicativas), mediante la aplicación de análisis de regresión lineal, cuadrática, exponencial, logística y logarítmica. Concluyeron que el crecimiento sobre las áreas de borde de alta densidad construida, la menor distancia a los centros de ciudades conurbadas y la densidad de población eran las variables que contribuyen mayormente a explicar espacialmente las zonas de expansión de las ciudades.

El fenómeno de urbanización altera artificialmente las condiciones climáticas a través del aumento de las temperaturas de superficie y del aire, lo cual favorece la generación y consolidación de islas de calor urbana (ICU). Ellas 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. 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 dejan de recibir y emiten proporcionalmente la radiación acumulada, especialmente durante la noche.

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. La ICU 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 cabe esperar rasgos térmicos más marcados y específicos para cada uso y cobertura de suelos. Las correlaciones espaciales entre las islas de calor de superficie y del aire son altas en general (ARNFIELD, 2003 y PRASHAD, 2004), por lo que se puede 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, justamente debido al funcionamiento de mecanismos de equilibrio en el caso de la atmósfera.

Algunas mediciones realizadas de las islas de calor urbanas del aire y de superficie señalan que se incrementan en verano, alcanzando 12°C de diferencia con el entorno rural en la ciudad de Lodz (KLYSIK y FORTUNIAK, 1999). Según

MORRIS et al. (2001), en ciudades metropolitanas la menor velocidad de viento producida en verano acrecienta el fenómeno de isla de calor.

Referido a la intensidad de la isla de calor urbana se ha detectado que ella es más notoria durante la noche; UNWIN (1980) señala que las condiciones sinópticas nocturnas favorecen la concentración de calor, al igual que SCHMIDLIN (1989) y JAUREGUI (1997); este último autor detectó que en ciudad de México el 75% de las condiciones de máxima isla de calor ocurría en la noche, con diferencias de temperatura urbana-rural de 7,8°C.

Respecto a la morfología e intensidad de las islas de calor, se ha establecido que están condicionadas, entre otros factores, por la distribución y composición 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, mientras que MORENO (1994) señala que las áreas verdes modifican y alteran la forma de la isla de calor urbana. Es por ello que CHEN y WONG (2006) señalan los beneficios térmicos que presentan en las ciudades los parques urbanos, generando áreas de influencia que enfrían el aire en la dirección de los vientos.

Se han establecido también relaciones importantes entre las islas de calor urbanas y la topografía, tal como lo señalan BERAL-GUYONNET (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. Otras investigaciones han dado cuenta de las relaciones entre la isla de calor urbana y la geometría de las calles (ELLIASON, 1994).

Según la autora, la orientación longitudinal de las calles y el poco cielo visible (sky view factor) dentro del cañón urbano (urban canyon), influyen sobre la intensidad de las islas de calor.

No obstante, a todo lo señalado, se debe indicar que las relaciones más modeladas corresponden a aquellas que comparan la intensidad de la isla de calor con su entorno rural a partir de los tamaños poblacionales y estructura espacial de las ciudades. Así OKE (1982, 1987) ha establecido relaciones que establecen las diferencias de las temperaturas urbanas y rurales ($\Delta u-r$) en función de logaritmos de la población, encontrando distintos resultados en la relación para grupos de ciudades europeas de tipo compacto y las fragmentadas ciudades de carácter disperso. Por otra parte, YAMASHITA et al. (1986) destacaron que la densidad y la rugosidad de las ciudades influye fuertemente en el sky view factor, aumentando la intensidad de las temperaturas del aire, lo cual resulta similar a lo señalado por HOGAN y FERRICK (1988) y JÁUREGUI (2005) para ciudades mexicanas.

Sin embargo, la configuración espacial que adquiere la isla de calor urbana no es estable y su variabilidad temporal puede ser muy importante, estando relacionados estos cambios con la dinámica atmosférica regional y por determinadas condiciones meteorológicas, como lo han puesto de relieve LOWRY (1977), LANDSBERG (1981) y OKE (1987) al relacionar las diferentes formas de la isla de calor con los flujos de viento y las condiciones sinópticas de calma y cielo despejado.

Relacionado con los usos de suelo y las temperaturas urbanas, CHEN et al., (2001), establecen que los usos de suelo industrial concentran mayor temperatura, lo cual resulta muy similar en las recientes indagaciones de

SARRICOLEA y ROMERO (2006) y MOLINA y ROMERO (2007 a y b) para el caso de Santiago.

El conocimiento de la configuración y 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 islas de calor superficiales que en muchos casos no fueron significativas (YOKENS, 2001, PEÑA y ROMERO, 2005), como para conocer las variables explicativas de las temperaturas superficiales, y así proponer medidas de mitigación a través de la planificación urbana ambientalmente sustentable. Las relaciones entre patrones espaciales y temperaturas urbanas obtenidas mediante transectas móviles (MOLINA Y ROMERO, 2007 a y b) sólo corresponden a algunos días de las estaciones de verano e invierno lo que limita su extrapolación espacio-temporal. Con el fin de contribuir a especificar estas relaciones este trabajo aplica un Modelo de Regresión Múltiple Por Pasos Sucesivos (Stepwise Regression Analysis), que a través de la incorporación sistemática y sucesiva de las variables propias de la urbanización, pretende explicar el fenómeno de la isla de calor urbana de superficie, en la ciudad de Santiago.

Finalmente, respecto a las relaciones entre variables que representan al medio ambiente urbano y socioeconómico de la ciudad, existen investigaciones recientes que correlacionan espacialmente para el Gran Santiago los niveles socioeconómicos con la vegetación urbana y con otros componentes tales como las tasas de impermeabilización (ESCOBEDO et al., 2006; MOLINA, 2007; VÁSQUEZ y ROMERO, 2007b), estableciendo que aquellas comunas o sectores de las mismas, de niveles socioeconómicos más altos poseen mayor porcentaje de superficies verdes y con mayor diversidad de especies que las comunas o

zonas de niveles socioeconómicos medios y bajos. Respecto a las relaciones entre temperatura de emisión, vegetación urbana y niveles socioeconómicos, PRASHAD (2004), ha establecido para la ciudad de Phoenix, que la población de altos ingresos posee mejores condiciones ambientales en ambos parámetros ambientales, lo cual es contrastado con las altas temperaturas y escasa vegetación que presentan las localizaciones de población de bajos ingresos.

Recientes aportes de VÁZQUEZ y ROMERO (2007a y 2007b) y MOLINA y ROMERO (2007a y b) indican la existencia de diferencias significativas de las temperaturas del aire, relacionadas con la presencia, densidad y diseño de las áreas urbanizadas y verdes, que se observan al interior de las comunas y barrios de Santiago. Como los diseños y densidades urbanas dependen del nivel socioeconómico de los habitantes, es posible indicar la existencia de patrones de segregación socioambientales equivalentes a los de segregación social entre los habitantes de las ciudades chilenas (VÁZQUEZ y ROMERO, 2007a y b; MOLINA y ROMERO, 2007a MOLINA y ROMERO, 2007b; ROMERO et. al, 2007); Este trabajo pretende profundizar el análisis de relaciones espaciales similares, considerando a las temperaturas de superficie como variable que representan al medio ambiente urbano, y contribuir mediante su conocimiento a proponer acciones destinadas a disminuir la segregación socioambiental entre sus habitantes.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Contribuir a la planificación ambiental de las ciudades chilenas teniendo en cuenta el reciente proceso acelerado de crecimiento de sus áreas urbanas, evidenciando usos y coberturas de suelo que controlen y mitiguen la generación, difusión y los efectos ambientales directos e indirectos de las islas de calor urbanas de superficies. Se intenta considerar y proyectar hacia el futuro, los resultados observados en las últimas décadas y las áreas de crecimiento reciente, con el fin de predecir las condiciones futuras de las temperaturas urbanas sobre la base de las relaciones significativas que se han observado entre las temperaturas y un conjunto de variables explicativas.

1.3.2 Objetivos específicos

- a. Proponer modelos estadísticos para la ciudad de Santiago que permitan explicar su crecimiento espacial observado en las últimas décadas y así, predecir hacia el futuro las áreas de crecimiento de las superficies construidas.
- b. Generar un modelo estadístico explicativo para la distribución espacial de las temperaturas superficiales de la ciudad de Santiago que facilite la predicción de sus valores, y así formular recomendaciones para la planificación ambiental de las áreas de expansión urbana y para la gestión de los espacios construidos.
- c. Proporcionar evidencias empíricas sobre las relaciones entre las temperaturas superficiales y las coberturas y usos de suelo observados para la ciudad en los años 1998 y 2004.

- d. Establecer las relaciones espaciales recíprocas existentes entre las variables que representan al medio ambiente urbano y socioeconómico de la ciudad, con el fin de contribuir a la elaboración de propuestas de gestión y planificación de sus espacios que disminuyan la segregación socioambiental entre sus habitantes.

1.4 Hipótesis de trabajo

- I. El actual modelo de crecimiento espacial de la metrópolis de Santiago, de tipo disperso y fragmentado, se asocia, entre otras causas, con la distribución de las densidades de población, las redes de transporte (especialmente carreteras de alta velocidad), distancia al centro de la misma y a otros centros urbanos cercanos. Los valores de crecimiento estimados estadísticamente permiten extrapolar el crecimiento espacial de la ciudad y sus efectos ambientales negativos. Los valores residuales no explicados representan esencialmente a la segregación social y cambios en los patrones de poblamiento.
- II. La configuración de las temperaturas superficiales de las ciudades y la conformación de las islas de calor urbanas de superficie (ICUs) se explicarían tanto por los factores de crecimiento espacial de las ciudades como por factores adicionales tales como la concentración de población, distancia a fuentes húmedas, topografía de la cuenca y existencia de áreas verdes al interior de la ciudad.
- III. Las temperaturas superficiales medidas a través de sensores remotos y las coberturas y los usos de suelo deberían estar estrechamente

correlacionados. Así, aquellos usos de carácter industrial deberían poseer mayores temperaturas que las áreas comerciales, servicios y residenciales.

- IV. Las condiciones socioeconómicas de los hogares de la ciudad de Santiago influyen fuertemente en la generación y características de las islas de calor debido a que controlan las densidades edificadas, la localización topográfica dentro de la cuenca y la existencia y superficie de las áreas verdes.

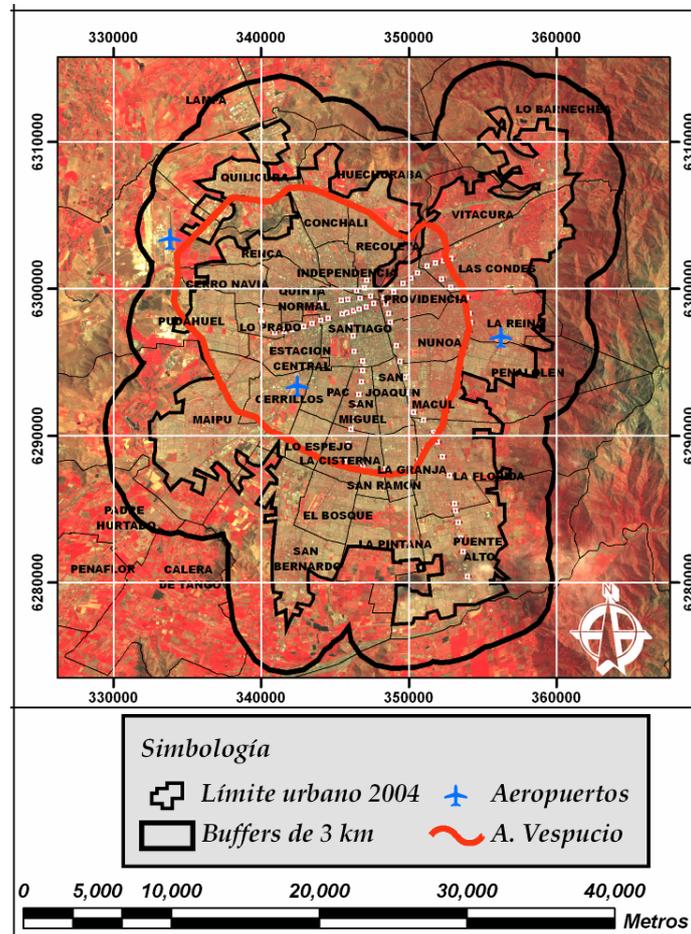
2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Definición del en área de estudio

El área de estudio corresponde a la ciudad de Santiago y comprende las superficies urbanizadas al año 2004, incluyendo a las 34 comunas que componen el Gran Santiago (32 comunas de la Provincia de Santiago, más las comunas de San Bernardo y Puente Alto, pertenecientes a las provincias de Maipo y Cordillera, respectivamente).

Según los cálculos realizados sobre las imágenes satelitales, esta área posee una superficie urbanizada de 56.745,23 hectáreas. En este estudio, se contempló ampliar esta área urbana incluyendo su entorno rural más próximo, contemplando el trazado de un radio de 3 km por sobre el límite urbano, debido a que se pretende observar el estado actual de ese territorio con el fin de entregar antecedentes sobre la posible área de expansión de la ciudad; esta superficie rural agregada alcanza las 51.971,33 hectáreas. De este modo, la superficie afecta a análisis posee un total de 108.716,56 has, 52% de carácter urbano y 48% de condiciones rurales, tal como lo muestra la siguiente figura.

Figura 1. Área de estudio.



Fuente: Elaboración propia

2.2 Metodología general

Este trabajo utilizó principalmente información y datos desplegables para ser analizados mediante herramientas y técnicas de teledetección ambiental, Sistemas de Información Geográfica y estadística multivariada, las cuales en conjunto se complementan para dar respuesta a los objetivos y propósitos planteados.

En primer lugar, la teledetección ambiental es entendida como aquella técnica que permite obtener información a distancia de los objetos ubicados en la superficie terrestre (CHUVIECO, 2002), utilizando para ello satélites de observación que permitan diagnosticar y evaluar el estado de los recursos territoriales. En este sentido, se aplicaron análisis visuales sobre las imágenes de satélite (identificación del límite urbano y coberturas y usos de suelo) y aplicación e interpretación de procesos digitales realizados sobre ellas, tales como obtención de temperatura superficial e índices de vegetación, como el Índice Normalizado de Diferencias Vegetacionales (NDVI en su sigla en inglés).

Los Sistemas de Información Geográfica (S.I.G) permiten capturar, ingresar, analizar y desplegar información proveniente de sensores remotos, cartografía digital y otros planos y mapas, realizar análisis espaciales y correlacionar variables obtenidas de forma censal ó muestral; además, de proyectar hacia el futuro usos y coberturas de suelo (HENRIQUEZ, 2005). Los programas computacionales utilizados fueron Idrisi Kilimanjaro para el análisis de imágenes de satélite y ArcGis 9.1 para análisis de proximidad a caminos, cursos y cuerpos de agua, análisis temporal, cálculo de densidades de población usando filtros kernel y unión de la información en una única base de datos para realizar análisis de regresión múltiple.

Respecto al análisis multivariado, específicamente la utilización de la Regresión Múltiple paso a paso, se utilizó el software especializado en análisis y procesos estadísticos SPSS (Statistical Product and Service Solutions) en su versión 13.0, el cual permite analizar la relación entre una única variable dependiente (criterio) y varias variables independientes (predictores). El objetivo es predecir cambios en la variable dependiente en respuesta a transformaciones en varias de las variables independientes, lo cual será realizado tanto para evaluar el

crecimiento urbano de Santiago como la configuración las temperaturas superficiales de ciudad. Los procedimientos para aplicar las regresiones múltiples por etapas (paso a paso ó stepwise) son los siguientes:

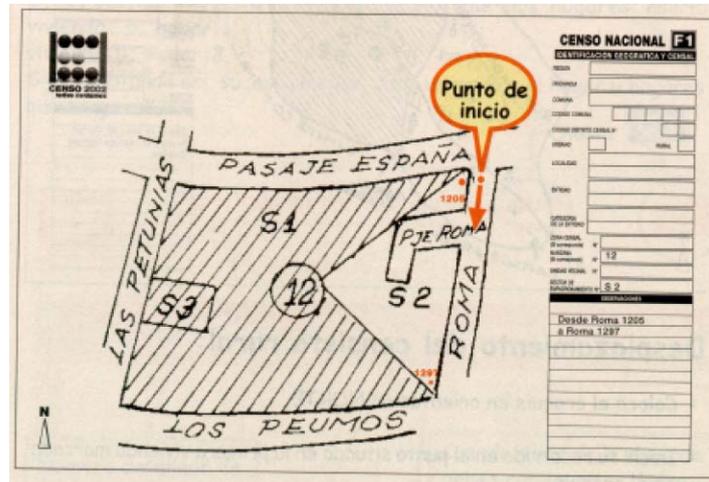
- 1) Elaboración de un modelo estadístico de regresión, seleccionando las variables independientes que alcancen la mayor correlación con la variable dependiente.
- 2) Examen de coeficientes de correlación parcial para encontrar una variable adicional que disminuya el error ó variación no explicada que permanece después de la aplicación de la primera ecuación de regresión
- 3) Nuevo cálculo de la ecuación de regresión utilizando dos variables independientes, y examinando el valor parcial del estadístico F de la variable original del modelo para evaluar si todavía realiza una contribución significativa. El test F define la probabilidad de aceptación o rechazo de cada una de las variables que ingresa al modelo de regresión múltiple en función de las varianzas de cada una de ellas). El valor de aceptación del estadístico F es 0,05 y de rechazo 0,1.
- 4) Continuación de este procedimiento con todas las variables independientes restantes para ver si deberían incluirse en la ecuación de mejor explicación del comportamiento de la variable dependiente. Si se incluye alguna, hay que examinar las variables previamente incluidas para juzgar si deben mantenerse.

2.2.1 Análisis y explicación del crecimiento urbano de la ciudad de Santiago entre 1975 y el 2004 y su proyección futura

Para explicar estadísticamente el proceso de crecimiento urbano, se utilizó el Análisis de Regresión Múltiple paso a paso, asumiendo que la interrelación entre variables es lineal, aplicándolo al crecimiento urbano de la ciudad de Santiago observado entre los años 1975 y 2004, obteniéndose una función que permite estimar las tendencias futuras. Las variables a analizar son densidades de población, distancia a sub-centros (San Bernardo y Puente Alto), distancia al centro de Santiago (Plaza de Armas), distancia al límite urbano de 1975 y población total. Las razones, formas de cálculo y utilización de las variables seleccionadas, se presentan a continuación:

Cantidad de Población: Variable relacionada estrechamente y de manera positiva, con el porcentaje de suelo residencial urbanizado. Esencialmente, un mayor número de población utiliza más suelo. No obstante, existe una alternativa de localización que puede alterar dicho supuesto, causado con la intensificación del uso del suelo urbano por aumento de las densidades residenciales, verticalización y a un hacinamiento de la población, lo cual corresponderá a varianza no explicada en el modelo. Para estos fines se emplean los datos proveídos por el Censo de Población y Vivienda del año 2002 a nivel de manzanas, la cual corresponde a una superficie comúnmente cuadrada (de una cuadra por lado), delimitada por ejes viales de diferente jerarquía (autopistas, avenidas, calles o pasajes) y que es utilizada como unidad espacial censal mínima en las áreas urbanas por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE, 2001), sin perjuicio que en su interior existan sectores específicos para que cada censista realice la encuesta, tal como se observa en la siguiente figura.

Figura 2. Croquis de una manzana urbana del Censo de Población y Vivienda 2002.



Fuente: Guía del censista del 2001, Instituto Nacional de Estadísticas.

Debido que las manzanas no son homogéneas en sus superficies, para efectos de este estudio los cálculos se realizan a nivel de una unidad espacial homogénea de 200 por 200 metros denominada grilla.

Densidad de población: es un indicador fundamental de la sustentabilidad urbana, y su incremento selectivo contribuye a la conformación de ciudades sustentables (ESCOLANO, 2002). En este sentido, Escolano (op.cit) señala que los argumentos a favor de la ciudad compacta están más sólidamente corroborados por los hechos. No obstante, los modelos puros raramente se dan en la realidad, y lo más extendido es una suerte de **concentración dispersa** (BLOWERS, 1993; BREHENY, 1992 y 1996; JENKS *et al.*, 1996; MCLAREN, 1992; NEWMAN, 1992; NAREDO, 1998a y b; y RUEDA, 1998 y 1999). Es una variable que indica la intensidad de ocupación de suelo y su forma de cálculo es a través del cociente población y unidad espacial seleccionada (km² y hectáreas son las más utilizadas). La densidad de población está correlacionada con variables

como la distancia al centro de la ciudad, los tamaños demográficos de los núcleos, el consumo de energía y la contaminación (SHUKLA y PARIKH, 1992) y otras relativas al diseño del espacio urbano (GOODCHILD, 1994). La distribución de la densidad de población residencial en el espacio urbano manifiesta un gradiente decreciente desde el centro hacia la periferia, según un modelo de función exponencial o potencia negativa de la distancia desde el centro urbano (BATTY y SIK, 1992; BATTY y XIE, 1994). Esta generalización descriptiva presenta algunas anomalías como el “cráter” originado por la despoblación de los centros de las ciudades y, según ESCOLANO (2002) aparece como una simplificación abusiva de la estructura espacial de la densidad. Hace ya más de cuatro décadas (ALONSO, 1964) fundamentó esta distribución en la teoría microeconómica de los usos de suelo.

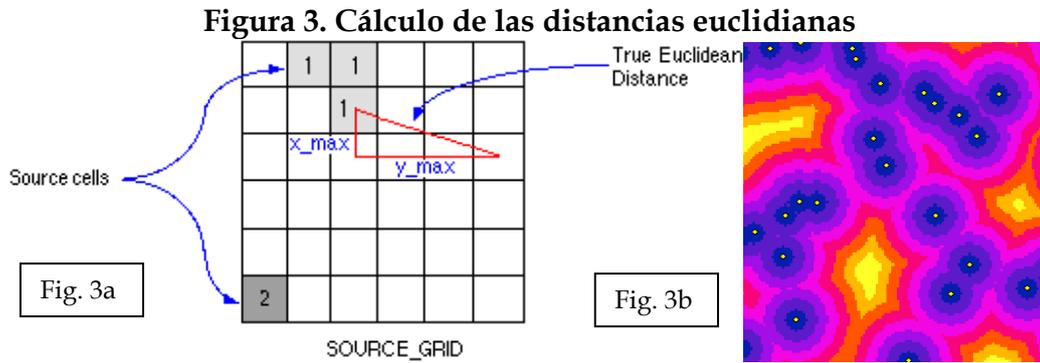
La forma de cálculo de la densidad de población fue a través de los datos del Censo de Población y Vivienda del año 2002 a nivel de manzanas, utilizando filtros *Kernel*, los cuales permiten obtener distribuciones que reducen la variabilidad de los datos reteniendo la estructura espacial de los mismos. Más que localizaciones precisas de los fenómenos, el método revela las configuraciones espaciales articuladas por áreas sobresalientes y deprimidas en la superficie de densidades que genera (ESCOLANO, 2002).

La transformación se inicia a partir de datos localizados en puntos (población en los centroides de las manzanas censales), sobre los que el filtro obtiene datos espacialmente continuos de la densidad de población. El método permite eliminar problemas de estructura administrativa, dado que calcula la densidad efectiva a nivel de píxeles o grillas regulares de tamaño homogéneo, que para este caso son de 200 x 200 m., en función a filtros circulares, que consideran la población en un radio de 750 m.

Distancias a los centros de la ciudad de Santiago, Puente Alto y San Bernardo:

Corresponde a la consideración de las distancias euclidianas a dichos centros urbanos. Derivado de la teoría microeconómica de los usos de suelo (ALONSO, 1964), se establecen relaciones que indican que los centros urbanos, principalmente el Central District Business (CDB), registra precios de suelo más altos, que disminuyen en función de la distancia, lo cual condiciona la distribución de los usos de suelo y la intensidad de ocupación de ellos al interior de la ciudad, generando una estructura concéntrica. No obstante, la estructura urbana de Santiago es más compleja que lo señalado, dado que posee sectores de mayor intensidad de ocupación, entre los cuales se cuenta el cono sectorial de las comunas tradicionales de estratos socioeconómicos altos y actividades de comercio y servicio; así como también, suelos de bajo valor destinados a vivienda social hacia la periferia.

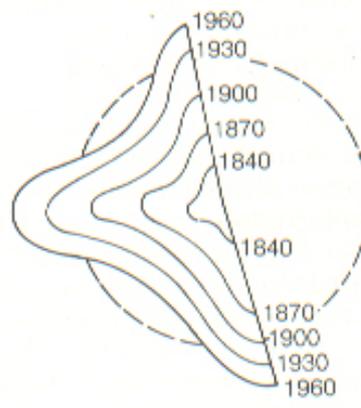
La forma de cálculo consistió en la construcción espacial de una superficie o manto continuo de distancias euclidianas al centro de Santiago, Puente Alto y San Bernardo respectivamente, utilizando las herramientas de análisis espacial de Arc-Gis. En este sentido, cada grilla posee una distancia euclidiana en función a la hipotenusa del centro de la grilla (Figura 3a), y se obtienen como resultados distancias en forma de anillos para cada centro urbano (Figura 3b).



Fuente: Elaboración propia a partir de ESRI 2006a, Manual de Análisis Espacial de Arc-Gis 9.2.

Distancia al Límite urbano de 1975: Las ciudades crecen por acreción de bordes, es decir desde un límite urbano hacia superficie no urbanizadas, conformando anillos de crecimiento como los detectados por RESS (1968, en HAGGETT, 1988) para el caso de la ciudad de Chicago. En este trabajo se ha seleccionado el año 1975 como límite urbano inicial del período de análisis, en virtud de la disposición de información satelital a contar de esa fecha.

Figura 4. Anillos de crecimiento de la ciudad de Chicago



Fuente: Elaboración propia, a partir de HAGGETT 1988, página 401.

Para la ciudad de Santiago se ha establecido el límite urbano del año 1975, mediante fotointerpretación de los usos del suelo observados en la imagen

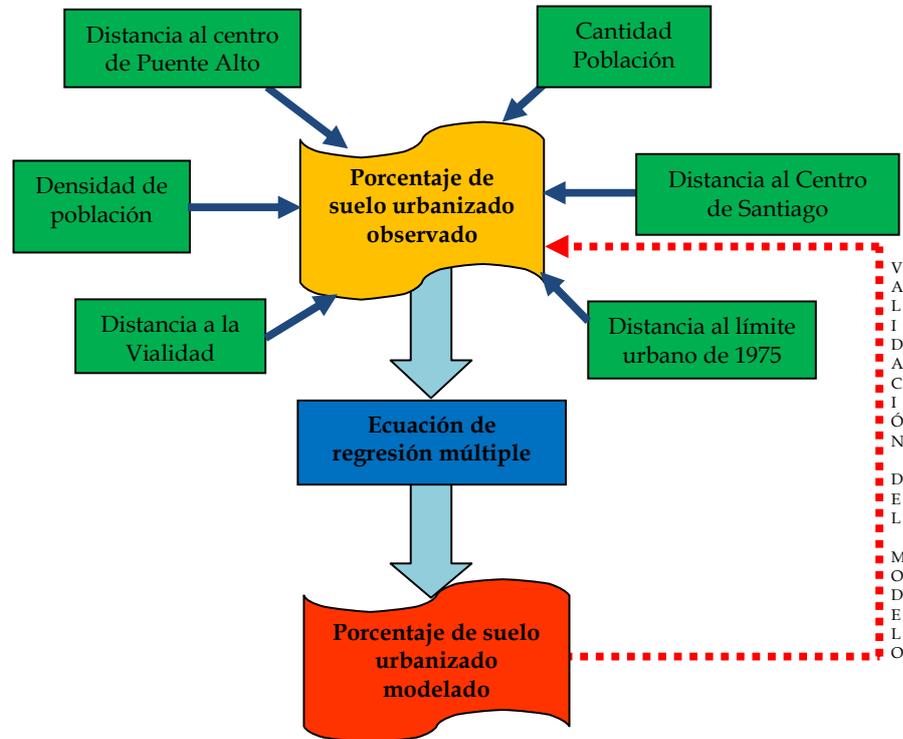
satelital Landsat MSS de marzo de ese año. A partir de dicho límite, se realizan anillos de crecimiento euclidianos que permiten proyectar hacia el futuro el crecimiento urbano, y además, las distancias de las áreas ya urbanizadas de la ciudad.

Distancia a la vialidad urbana: Esta variable define la conectividad y la accesibilidad entre los espacios urbanos actuales y potenciales, pues el desarrollo vial propicia, direcciona o restringe el crecimiento urbano. Los sistemas de transporte posibilitan la reducción de las distancias físicas y generan la conectividad del sistema urbano, reduciendo los tiempos de viajes y provocando desplazamientos de mayor alcance espacial. Frente a estos hechos, AZOCAR *et al.* (2003) señalan que es una variable muy relevante de considerar en el crecimiento de las ciudades, debido que, explica en gran medida los nuevos patrones urbanos de crecimiento.

Se estima que, en su conjunto, las variables seleccionadas para predecir la superficie urbanizada, deben explicar de manera significativa el crecimiento urbano de la ciudad, incluyendo también los cambios de los patrones de expansión de la ciudad de Santiago observados más recientemente.

Para representar la superficie construida de la ciudad se utilizó el porcentaje de área urbanizada (variable dependiente) que cubría cada una de las grillas de 200 por 200 metros. Las bases de información para generar las variables explicativas (predictores) fueron el Censo de Población y Vivienda del 2002, la red de ejes viales, los centros de Santiago, Puente Alto y San Bernardo e imágenes satelitales Landsat MSS 1975 y TM 2004. El esquema metodológico del modelo de predicción de la superficie urbanizada de la ciudad de Santiago se presenta en la siguiente figura.

Figura 5. Esquema metodológico para explicar el crecimiento urbano basado en el porcentaje de área urbanizada observada.



Fuente: Elaboración propia.

Es importante destacar, que para la validación del modelo que explica estadísticamente la evolución de las superficies urbanas construidas, se examinan conjuntamente los coeficientes de correlación, las pruebas del test estadístico F y el coeficiente de determinación. La aceptación final del modelo permitirá conocer las variables y sus relaciones espaciales como explicación del proceso de crecimiento urbano.

Para proyectar hacia el futuro el crecimiento observado de la ciudad de Santiago, se utilizarán simultáneamente Cadenas de Markov (CM) y Autómatas Celulares (AC), tal como ha sido realizado para Chillán y los Ángeles por

HENRIQUEZ (2005). Las Cadenas de Markov permiten estimar la probabilidad de los cambios de uso de los suelos que serían ocupados por la urbanización en el futuro a partir de la consideración de los patrones espaciales de comportamiento obtenidos de las situaciones observadas. Las Cadenas de Markov proporcionan una matriz de probabilidad de cambio de usos del suelo y una matriz de superficies proyectadas de ser ocupadas por cada uno de ellos. Los Autómatas Celulares, por su parte, se usan para establecer el arreglo espacial futuro, a escala de pixel, de los usos del suelo, a partir del ordenamiento espacial de los usos de suelo observados.

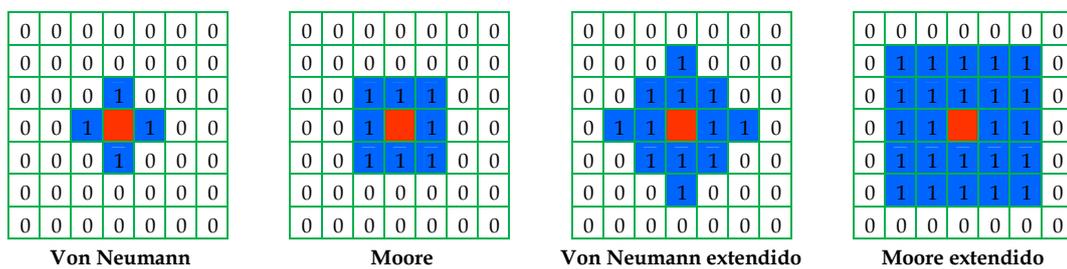
Esta herramienta fue creada por VON NEUMANN (1966), y la primera aplicación urbana fue realizada por TOBLER (1979). Según HENRIQUEZ (2005, página 90), *“se trata de un modelo heurístico que permite simular un proceso espacial complejo, mostrando las transformaciones de las estructuras espaciales como parte de dinámicas no-lineales, como por ejemplo la segregación espacial de grupos socio económicos, que tienden a agruparse en sectores bien definidos y en momentos específicos del desarrollo de las ciudades, reconociendo el rol cambiante de los factores”*.

En este sentido, el uso futuro del suelo asignado a cada pixel depende de su estado actual y de la evolución observada tanto individualmente como respecto a sus vecinos. El uso del suelo de los pixeles vecinos condiciona grandemente, el estado y reglas que definen el estado de la celda en análisis para el próximo período o estado.

Se distinguen cuatro tipos de vecinos que condicionan el comportamiento de la celda seleccionada, dependiendo de la cantidad de celdas vecinas consideradas (figura 6): **Von Neumann** (cuatro celdas vecinas, superior, inferior, izquierda y derecha); **Moore** (las cuatro celdas de Von Neumann más las cuatro celdas

diagonales); **Von Neumann extendido** (Las ocho celdas de Moore más las cuatro celdas más allá de las inmediatamente adyacentes a la celda central, superior, inferior, izquierda y derecha); y **Moore extendido** (equivalente al vecino Moore pero incluye celdas vecinas más allá de las celdas vecinas adyacente a la celda central), tal como se observa en la siguiente figura.

Figura 6. Tipos de vecinos en la aplicación de Autómatas Celulares



Fuente: Elaboración Propia, celda central en rojo y sus vecinos en azul

Para efectos de esta investigación, se ha utilizado el vecino “Von Neumann extendido”, debido a que corresponde al implementado en Idrisi Kilimanjaro. La clasificación de los diferentes tipos de uso de suelo asignado a los píxeles se confeccionó a partir de cuatro categorías generales, las cuales de manera agregada, permiten conocer los patrones de cambio observados y futuros. Ellas corresponden a:

1. **Uso de suelo Urbano:** Mancha urbana de Santiago, sin distinción de los usos de suelo existentes al interior, tales como, residencial, comercio, industria, vialidad y otros.
2. **Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez:** Corresponde al principal aeropuerto nacional, el cual ha tenido un claro crecimiento en los últimos 30 años, y su consolidación e importancia podría significar crecimiento futuro.

3. **Uso de suelo Rural:** Terrenos agrícolas (frutales y cultivos) los cuales por presión inmobiliaria pueden ser urbanizados en el futuro.
4. **Terrenos en pendiente:** Son todos aquellos accidentes topográficos que poseen pendientes que impiden su urbanización actual y futura, sobre los piedemontes y cerros de la ciudad y su entorno. Su elección se debe a que se espera que, no serán urbanizados y por ello representan la máxima restricción de ocupación.

Dichos usos de suelo fueron clasificados sobre imágenes satelitales correspondientes a 1975, 1989, 1998 y 2004, con una resolución espacial de 100 metros; posteriormente se procesaron mediante el programa IDRISI Kilimanjaro para aplicar los análisis de Cadenas de Markov, Autómatas Celulares y validaciones de las predicciones de cambios observados de los usos de suelo.

Las validaciones fueron realizadas mediante la aplicación del índice Kappa de Concordancia entre los usos del suelo observados y estimados (HENRIQUEZ, 2005), el cual varía de +1 a 0, indicando el grado de similaridad existente entre ambos tipos de usos del suelo. Si ambos usos del suelo son completamente similares en todos los píxeles examinados, el valor se acerca a +1, y si son completamente diferentes, el valor se acerca a 0 (EASTMAN *et al.*,1995). Para la validación de modelos a través del índice Kappa (index k), ALTMAN (1991) propone los siguientes rangos de valores.

Tabla 1. Rangos de valoración del índice Kappa según la fuerza de concordancia de las imágenes comparadas.

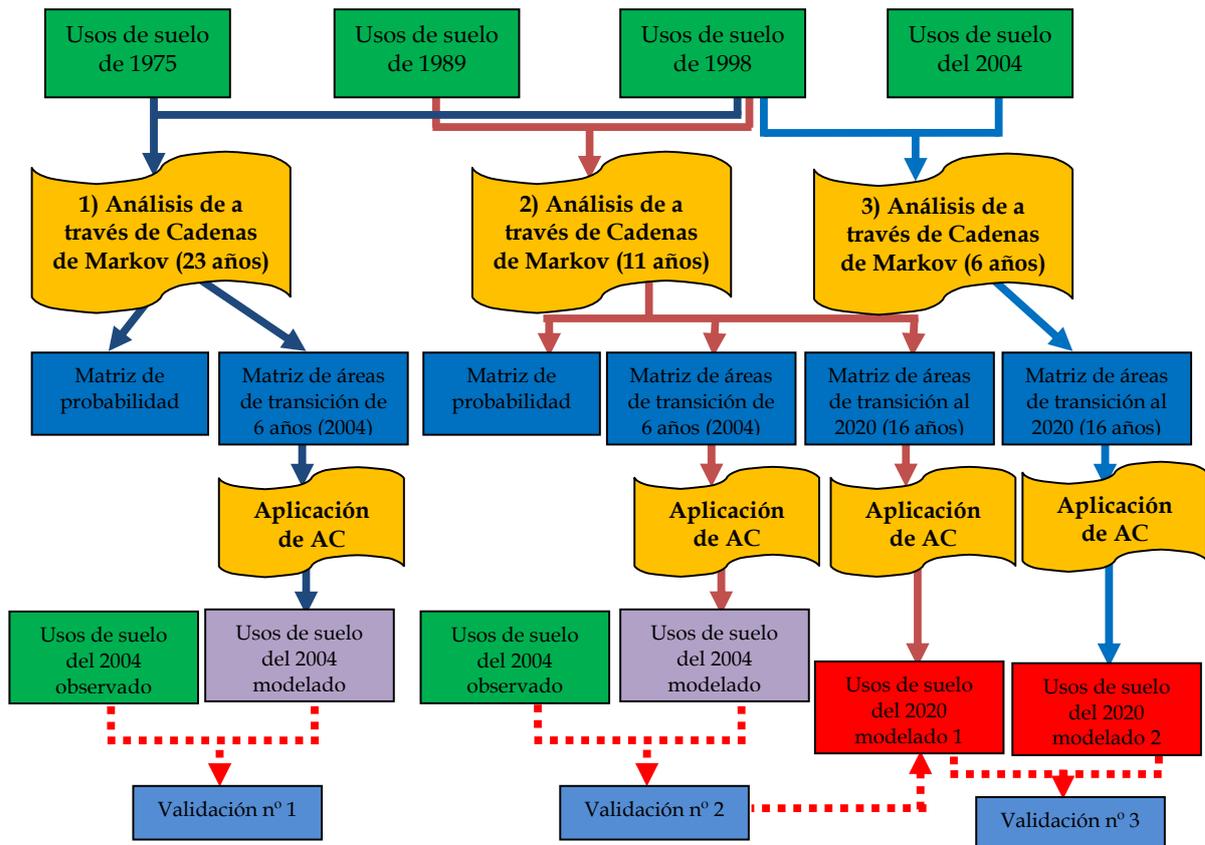
Valor de índice de Kappa	Fuerza de la concordancia
< 0,20	Pobre
0,21 - 0,40	Débil
0,41 - 0,60	Moderada

Valor de índice de Kappa	Fuerza de la concordancia
0,61 – 0,80	Buena
0,81 – 1,00	Muy buena

Fuente: Elaboración propia a partir de ALTMAN 1991.

Se ha seleccionado como año de referencia futuro el 2020, lo cual se debe a que gran parte de las proyecciones de población del INE alcanzan dicho horizonte temporal y corresponde a un horizonte de tiempo similar al utilizado por HENRIQUEZ (2005) para Chillán y Los Ángeles. La siguiente figura representa la modelización del crecimiento futuro de la ciudad de Santiago y sus respectivas validaciones a través del índice de Kappa.

Figura 7. Esquema metodológico para modelar el crecimiento urbano futuro de la ciudad de Santiago hacia el 2020.



Fuente: Elaboración propia.

La aplicación sucesiva de Cadenas de Markov, para distintos cortes temporales (Nº1: entre 1975 y 1998; y Nº2: entre 1989 y 1998) se efectuó con el fin de alcanzar la mayor correlación y similaridad de sus resultados con los usos de suelo observados el año 2004. La Cadena de Markov Nº3 (correspondiente a los años 1998 y 2004) se calculó para reducir problemas de errores en el modelado futuro.

2.2.2 Análisis y explicación de la distribución espacial de las temperaturas superficiales de 1998 y 2004 a través de un modelo de regresión múltiple

El análisis y procesamiento de imágenes satelitales mediante Sistemas de Información Geográfica se ha transformado en una de las principales herramientas para el tratamiento de los problemas ambientales que existen en las ciudades latinoamericanas, debido a la escasa información disponible y a la precariedad de los sistemas de monitoreo y observación de los cambios ambientales (ROMERO y SARRICOLEA, 2006). Se utiliza una imagen satelital LANDSAT TM captada el 31 de diciembre del 2004. La fecha seleccionada se justifica debido a que la mayoría de los autores (KLYSIK y FORTUNIAK, 1999; MORRIS et al, 2001; PRASHAD, 2004; YUAN Y BAUER, 2007) señalan que las diferencias de temperaturas superficiales entre la ciudad y su entorno rural se observan más nítidamente en la estación de verano.

La energía radiada por la superficie terrestre es la causa principal de las islas de calor, particularmente cuando los procesos de advección y turbulencia, que favorecen los intercambios de calor entre la superficie y la atmósfera cercana a la superficie, se ven inhibidos como consecuencia de la capa límite urbana. Por ello, la ocurrencia, intensidad y desarrollo de la ICU, pueden ser observadas a

través de imágenes satelitales que codifican la radiación emitida por la superficie terrestre en la dimensión del infrarrojo térmico del espectro electromagnético (temperaturas superficiales). La función aplicada a las imágenes Thematic Mapper para obtener la temperatura superficial desde el infrarrojo térmico es la siguiente:

$$T = \frac{K_2}{L_\lambda \ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)}$$

Donde,

T = Temperatura efectiva medida por el satélite, o temperatura de brillo aparente medida en Grados Kelvin.

K_2 = Constante de calibración 1.260,56

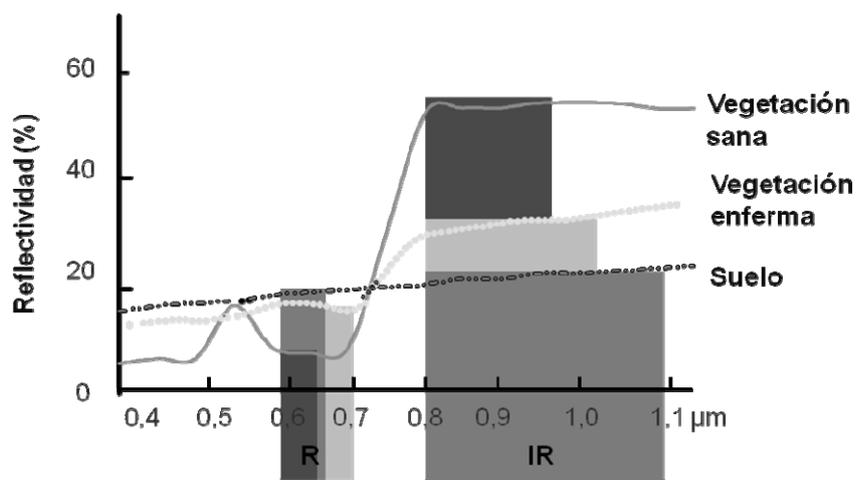
K_1 = Constante de calibración 60,776

L_λ = Número digital de la radiancia

Aplicando modelos de Regresión Múltiple *paso a paso*, se propone incorporar sucesivamente las variables explicativas hasta cubrir la mayor parte posible de la varianza total y conseguir el menor error estándar posible. De esta manera, se logra construir una ecuación que representa el mejor ajuste posible de la distribución de las temperaturas superficiales, respecto al comportamiento espacial de variables tales como la densidad de población urbana, coberturas vegetales, elevación, rugosidad de las edificaciones existentes al interior de la ciudad y distancia a los cursos y cuerpos húmedos, las cuales se explican a continuación.

- 1. Densidad de población:** Variable construida a partir de los filtros *Kernel* y la población a nivel de manzanas INE, lo cual fue explicado en esta metodología (ver sección 2.2.1).
- 2. Coberturas vegetales:** Esta variable está estrechamente relacionada y en forma inversa (función negativa), con las temperaturas superficiales. Es decir, con una mayor cobertura vegetal se debe esperar una menor temperatura superficial (OKE, 1987; YUAN y BAUER, 2007). La forma de cálculo es a través de la construcción del índice denominado NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) sobre la imagen Landsat TM 2004. Este índice fue diseñado por ROUSE *et al.* (1974) a partir del comportamiento espectral de la vegetación en las regiones del rojo e infrarrojo, a través del concepto de reflectividad vegetal (CHUVIECO, 2002), la cual se define como la fracción del espectro electromagnético donde la vegetación posee un comportamiento diferenciado de las demás cubiertas existentes y con la menor cantidad de factores perturbadores, tal como lo indica la siguiente figura:

Figura 8. Comportamiento y respuesta espectral de la vegetación según el porcentaje de reflectividad



Fuente: Extraído de Chuvieco, 2002.

Como se observa en la figura anterior, el espectro visible Rojo (R: entre los 0,63 y 0,69 μm) entrega la mínima reflectividad vegetal debido a que esta banda corresponde a la absorción de clorofila (ROUSE *et al.*, 1974), y el espectro del Infrarrojo Cercano (IRC: entre los 0,76 y 0,90 μm) muestra la máxima reflectividad vegetal debido a las dispersiones múltiples de la radiación por el interior de la estructura celular, el que es controlado por el LAI (Leaf Area Index o índice de superficie foliar), según ROUSE *et al.* (1974). El NDVI se calcula a partir de los valores digitales de los píxeles, codificados entre 0 y 255, en una imagen de 8 bit (CHUVIECO, 2002), a través de la siguiente ecuación.

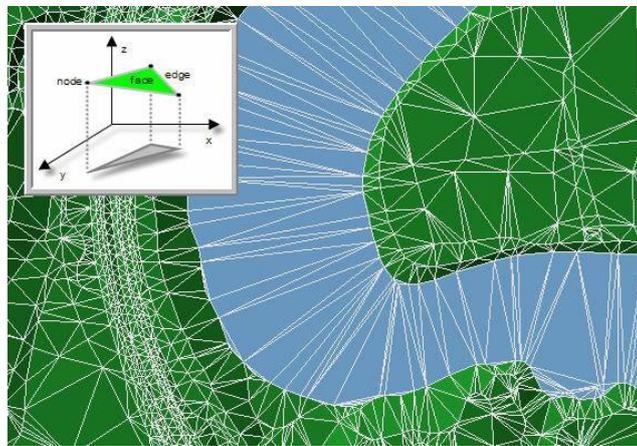
$$\text{NDVI} = (\text{IRC} - \text{R}) / (\text{IRC} + \text{R})$$

El índice entrega valores entre 1 y -1, donde los valores positivos indican alta productividad vegetal y los negativos la mínima y nula productividad vegetal.

- 3. Elevación topográfica:** Se define como la distancia vertical sobre, o bajo, una superficie de referencia. La elevación del terreno se expresa con relación a la altitud media del nivel del mar. Esta variable está estrechamente relacionada y con una función negativa, con las temperaturas superficiales (JO *et al.*, 2001), donde, a mayor altura, menor temperatura. La ciudad de Santiago posee en su interior, diferencias de altura sobre el nivel medio del mar de hasta 300 metros, y considerando sus cerros puede alcanzar diferencias relativas de 1.200 metros. La posición y elevación topográfica de los territorios ejercen influencias sobre las temperaturas, aumentando o disminuyendo ella en algunos grados Celsius, y esta relacionada con la topoclimatología urbana (ROMERO y VINAGRE, 1985). Para considerar esta variable se

utilizaron curvas de nivel de equidistancia 50 metros, generando sobre ellas una Red Irregular de Triángulos (TIN, Triangulated Irregular Network), que corresponde a una estructura de datos vectorial para lograr una representación continua de la elevación. Un TIN se compone de triángulos, nodos y arcos en las dimensiones x , y , z (ESRI, 2006b), tal como se muestra en la siguiente figura.

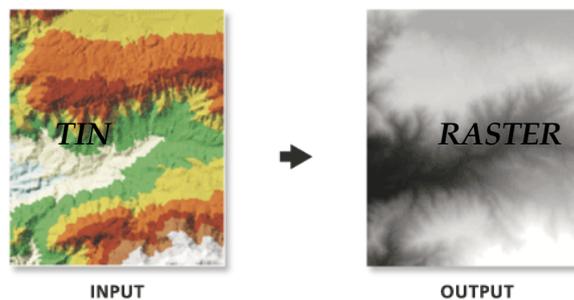
Figura 9. Red de triángulos irregulares para generar un modelo de elevaciones



Fuente: Elaboración propia a partir de ESRI 2006b, Manual de Análisis 3D de Arc-Gis 9.2.

Posteriormente, se transforma la información de las elevaciones de los triángulos irregulares a la grilla raster de análisis de 120 metros, tal como muestra la siguiente figura.

Figura 10. Transformación de las elevaciones desde TIN a Raster



Fuente: Elaboración propia a partir de ESRI 2006b, Manual de Análisis 3D de Arc-Gis 9.2.

4. Rugosidad de construcciones: Esta variable está estrechamente relacionada y en forma directa (con funciones positivas), con las temperaturas, tanto atmosféricas como superficiales. En este sentido, OKE (1987) señala que existe una relación (H/W) entre la altura de los edificios (H) y ancho de los corredores (W) de las calles. Cuando existe una semejanza entre el ancho de las calles y la altura de las fachadas de los edificios no se espera que se generen climas específicos. De ser mayor la altura de las fachadas se generan cañones urbanos caracterizados por la acumulación de calor y la disminución de la ventilación.

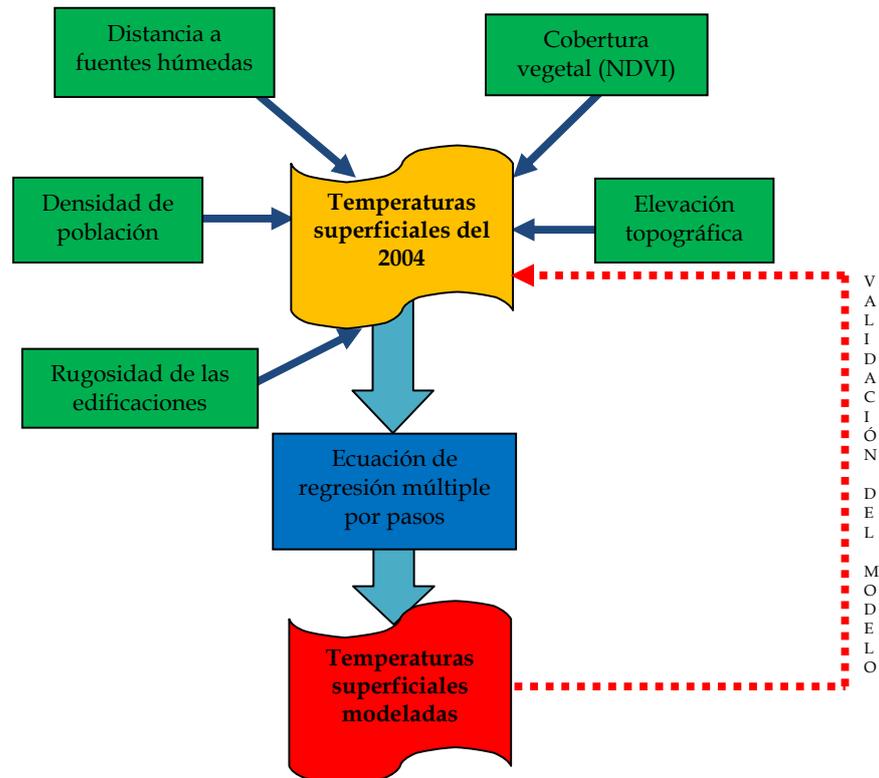
La rugosidad de las construcciones se refiere a la altura en metros de los edificios urbanos (casas y departamentos), las cuales reducen la circulación de los vientos y el cielo visible (CUADRAT *et al.*, 2005), concentrando calor entre ellas debido que la radiación es atrapada entre los edificios (OKE, 1987; MORENO, 1994). La ciudad de Santiago posee una escasa rugosidad de construcciones debido al predominio de construcciones de un o dos pisos y las bajas densidades prevalecientes. No obstante, la concentración de edificios altos en algunas comunas como Providencia y Las Condes debiera modificar la temperatura superficial, aumentándola. Esta variable se obtiene a partir de una base de datos de edificios georeferenciados a nivel de manzanas, donde se calcula la altura promedio de ellos a nivel de píxeles de 120 por 120 metros.

5. Distancia a cursos y cuerpos húmedos: Corresponde a una variable que está relacionada con brisas e influencia de la humedad como regulador térmico. Las fuentes de humedad son representadas por las redes de drenaje natural de la ciudad (ríos, quebradas y canales) y cuerpos de agua (lagunas y tranques), los cuales favorecen la circulación de los vientos, concentrando frío en ellos y sus alrededores más próximos

(ROMERO y VINAGRE, 1985). La ciudad de Santiago posee una red importante de dichas fuentes de humedad, representadas por los ríos Mapocho y Maipo principalmente.

La Figura 11 representa el esquema metodológico confeccionado para modelar las temperaturas superficiales de la ciudad. Se espera conocer las variables que más influyen en la distribución espacial de las temperaturas superficiales de la ciudad de Santiago y los efectos de su crecimiento sobre la alteración de las variables explicativas.

Figura 11. Esquema metodológico para explicar las temperaturas superficiales del 2004 basado en un conjunto de variables explicativas de carácter urbano-geográfico.



Fuente: Elaboración propia.

2.2.3 Relaciones existentes entre las temperaturas de superficie y las coberturas y usos de suelo de los años 1998 y 2004

Para el cálculo de las temperaturas superficiales de 1998 se utilizó la imagen satelital del sensor Landsat TM del 25 de enero de ese año, procediéndose metodológicamente de la misma manera que para la imagen del 2004, explicada en el punto 2.2.2

La distribución espacial de las temperaturas superficiales fue contrastada con la distribución de los usos de suelo catastrados de la ciudad de Santiago para ambas fechas. Las clases de usos del suelo a escala de manzanas urbanas fueron las siguientes:

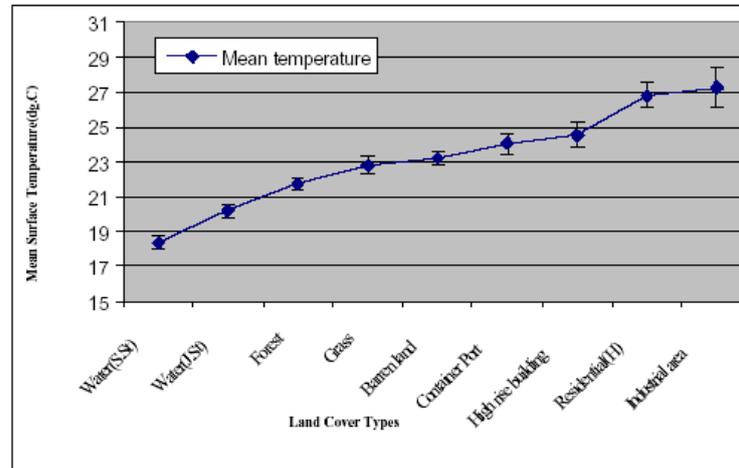
- 1) Aeropuertos
- 2) Uso comercial
- 3) Uso educacional
- 4) Uso industrial
- 5) Uso de servicios
- 6) Uso residencial de baja densidad: Menor a un coeficiente de ocupación de suelo de 0.5, entendido como la relación entre la planta de las edificaciones y el terreno existente.
- 7) Uso residencial de alta densidad: Mayor a un coeficiente de ocupación de suelo de 0.5.
- 8) Otros usos de suelo

A partir de dicha clasificación de usos de suelo se procuró aumentar el nivel de detalle para cada uno de los edificios individuales, los cuales no eran cartográficos. Con ello se logró comparar las temperaturas superficiales y los distintos usos de suelo utilizando las siguientes categorías:

- 1) Uso comercial
- 2) Uso educacional
- 3) Uso industrial
- 4) Uso de servicios
- 5) Uso residencial (Casa): construcciones de dicho uso de tamaño menor o igual a 2 pisos.
- 6) Uso residencial (Depto. bajo): Construcciones de 3 y 4 pisos de altura.
- 7) Uso residencial (Depto. mediano): Construcciones de 5 a 8 pisos de altura.
- 8) Uso residencial (Depto. alto): Construcciones mayores o iguales a 9 pisos de altura.
- 9) Otros usos de suelo: cementerios, usos de culto y áreas verdes entre otros.

Diversas investigaciones (CHEN *et al.*, 2001; SARRICOLEA Y ROMERO, 2006; MOLINA Y ROMERO, 2007) señalan que los usos de suelo de tipo industrial concentran mayor temperatura que las coberturas de áreas verdes y fuentes húmedas, tal como se observa en la siguiente figura.

Figura 12. Usos de suelo relacionados con las temperaturas superficiales medias de Singapur, según CHEN *et al.* 2001.



Fuente: Extraído de CHEN *et al.* 2001

2.2.4 Relaciones existentes entre las temperaturas de superficie y los niveles socioeconómicos a través de un modelo de regresión logarítmico

En lo referido a la definición de niveles socioeconómicos (NSE) se procederá a utilizar la misma metodología propuesta por ADIMARK (2004), extrayendo del censo variables que definan dos dimensiones del hogar: nivel de educación del jefe de hogar y tenencia de una batería de bienes. Conceptualmente ellas se relacionan con el ingreso, el nivel cultural y con el stock de riquezas acumulado por un grupo familiar. El resultado que se ha obtenido, luego de realizar análisis multivariados y comprobación en terreno, ha sido un modelo simple que se observa en la siguiente tabla.

Tabla 2. Matriz de clasificación socioeconómica de los hogares de Santiago.

NIVEL DE EDUCACIÓN	CANTIDAD DE BIENES DEL HOGAR (Ducha+TV Color+Refrigerador+Lavadora+Calefont+Microondas+TV Cable o Satelital+PC+Internet+Vehículo)										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sin estudios	E	E	E	E	E	D	D	D	D	C3	C3
Básica incompleta	E	E	E	E	E	D	D	D	C3	C3	C3
Básica completa	E	E	D	D	D	D	D	C3	C3	C3	C3
Media incompleta	D	D	D	D	D	D	D	C3	C3	C3	C2
Media completa	D	D	D	D	C3	C3	C3	C3	C2	C2	C2
Técnica incompleta	C3	C3	C3	C3	C3	C2	C2	C2	C2	C2	ABC1
Técnica completa o universitaria incompleta	C3	C3	C3	C3	C3	C2	C2	C2	C2	ABC1	ABC1
Universitaria completa o más	C3	C3	C3	C3	C3	C2	C2	C2	ABC1	ABC1	ABC1

Fuente: Elaboración propia en base a Adimark 2004.

Las características de estos grupos socioeconómicos según ADIMARK (2004) son los que se describen a continuación en la siguiente tabla.

Tabla 3. Características de los niveles socioeconómicos del Gran Santiago.

Grupo socioeconómico	Nombre del GSE	Porcentaje hogares del Gran Santiago	Comunas predominantes	Años de estudio promedio Jefe del hogar	Nº de bienes promedio del hogar	Nivel de ingreso en pesos (\$)
ABC1	Alto ó Elite	11,3%	Vitacura, Las Condes y Lo Barnechea	16,2	9,2	Entre \$3.500.000 y \$1.700.000
C2	Medio Alto	20,1%	Ñuñoa, San Miguel y Macul	14	7,2	Entre \$1.200.000 y \$600.000
C3	Medio	25,6%	Independencia, Estación Central y Quilicura	11,6	5,7	Entre \$500.000 y \$400.000
D	Bajo	34,5%	Recoleta, Pudahuel y Conchalí	7,7	4,4	Entre \$300.000 y \$200.000

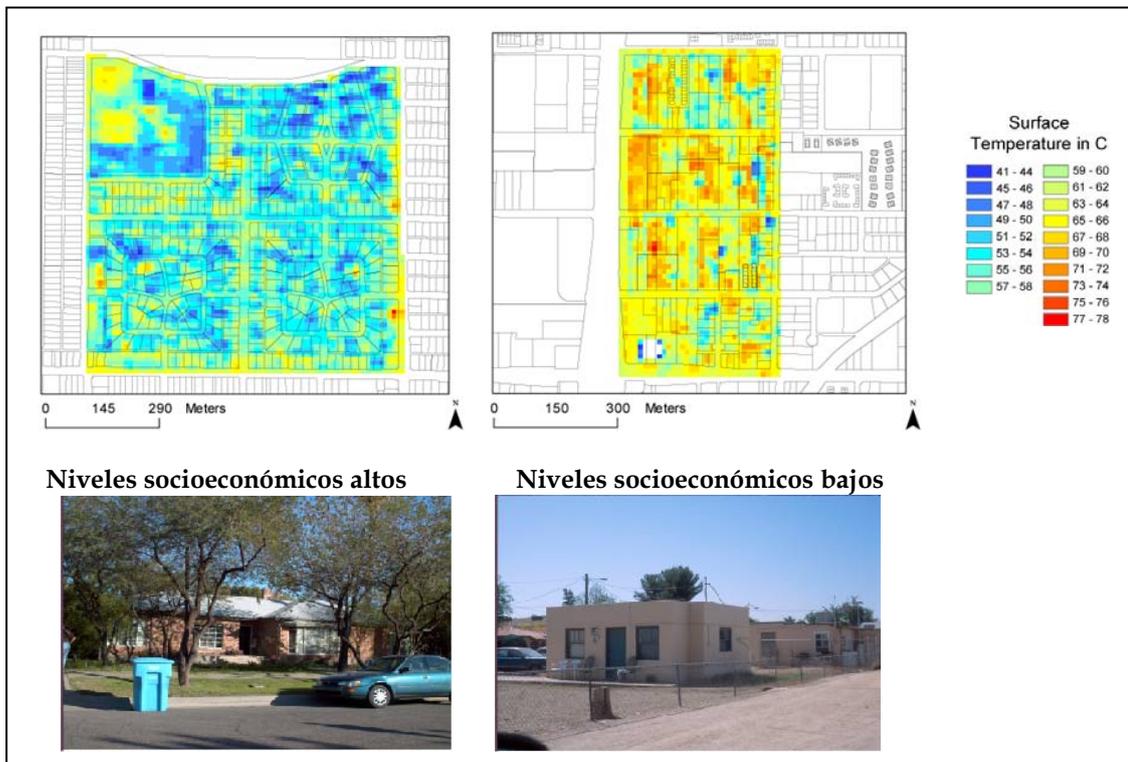
ANÁLISIS DE LA SUSTENTABILIDAD DEL CRECIMIENTO URBANO DE LA CIUDAD DE SANTIAGO Y SUS EFECTOS SOBRE LA CONFIGURACIÓN DE LAS TEMPERATURAS SUPERFICIALES

Grupo socioeconómico	Nombre del GSE	Porcentaje hogares del Gran Santiago	Comunas predominantes	Años de estudio promedio Jefe del hogar	Nº de bienes promedio del hogar	Nivel de ingreso en pesos (\$)
E	Muy Bajo	8,5%	Cerro Navia, La Pintana y Lo Espejo	3,7	2,3	Menos de \$160.000

Fuente: Elaboración propia en base a Adimark 2004.

Estos niveles socioeconómicos fueron correlacionados con las temperaturas superficiales, lo cual ha sido realizado por PRASHAD (2004) en Phoenix, Estados Unidos, demostrando que los niveles socioeconómicos altos poseen menor temperatura y que en los sectores más bajos las temperaturas de superficie son más elevadas, tal como se grafica en la siguiente figura.

Figura 13. Relaciones entre los niveles socioeconómicos de la población y las temperaturas superficiales en Phoenix, según PRASHAD, 2004.



Fuente: Elaboración propia a partir de PRASHAD, 2004.

3. RESULTADOS

3.1 Análisis y explicación del crecimiento urbano de la ciudad de Santiago entre 1975 y el 2004 y su proyección futura

Los propósitos de este capítulo son básicamente tres. El primero ellos ha sido delimitar y analizar el crecimiento espacial de la ciudad de Santiago observado entre los años 1975 y 2004 mediante imágenes satelitales Landsat MSS y TM. El segundo objetivo fue la generación de un modelo estadístico multivariado que permita explicar, analizar y proyectar, a través de variables propias de la geografía urbana, las áreas de crecimiento de la ciudad de Santiago y los tipos de usos y coberturas de los suelos comprometidos. Ello con la finalidad de estimar los efectos ambientales adversos provocados por el crecimiento espacial de la ciudad, tales como la generación de islas de calor, y considerar sus posibles medidas de control y mitigación. Finalmente, el último objetivo es proyectar la situación futura del crecimiento urbano de Santiago hacia el año 2020.

3.1.1 Crecimiento de la ciudad de Santiago entre 1975 y el 2004

La ciudad de Santiago en los últimos treinta años ha duplicado su superficie urbana, lo cual no ha sido acompañado por un crecimiento similar en su población. La supremacía del crecimiento espacial sobre el demográfico evidencia el consumo de suelos a un gran ritmo, el cual se ha acentuado en la década reciente hasta alcanzar cerca de 2.000 hectáreas cada año, lo que se muestra en la siguiente tabla.

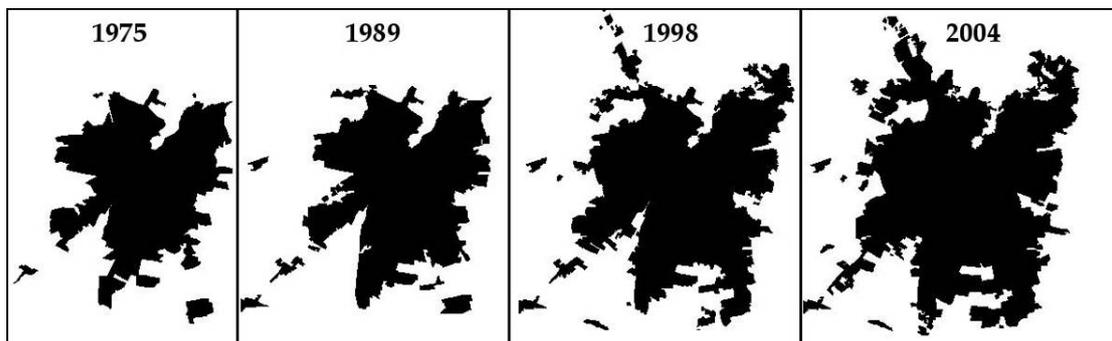
Tabla 4. Crecimiento de la superficie urbana de Santiago entre 1975 y 2004.

Años	Superficie urbana (has)	Crecimiento inter-periodo (anual)
1975	33.685	-
1989	39.542	418
1998	51.735	1.355
2004	62.235	1.750

Fuente: Elaboración propia en base a imágenes de satélite Landsat.

La tabla anterior muestra que entre los años 1975 y 1989 el ritmo de crecimiento espacial de la ciudad fue muy lento, incluso en la periferia discontinua, manteniendo casi constante la superficie urbana. Entre 1989 y 1998 la superficie urbana creció a un ritmo acelerado, absorbiendo áreas y ciudades externas al límite urbano (Puente Alto) y creciendo hacia el oriente hacia el piedemonte andino así como también hacia el poniente a las comunas de Maipú y Quilicura, tal como se observa en la Figura N° 14. Sin embargo, el periodo de mayor aumento de superficie urbana se observa entre los años 1998 y 2004, donde la mancha urbana continua crece a tasas promedio de 1.750 hectáreas por año.

Figura 14. Crecimiento de la mancha urbana de Santiago entre 1975 y el 2004.



Fuente: Elaboración propia en base a imágenes de satélite Landsat.

Dichas tendencias observadas en el periodo, permiten proyectar un crecimiento futuro a tasas similares. Es así como, manteniendo la tendencia de expansión física de la ciudad observada entre 1998 y el 2004, y una tasas de crecimiento de 1.750 hectáreas al año, es de esperar que en el año 2020 la ciudad posea cerca de 96.000 hectáreas construidas, lo cual significa que en sólo 16 años (entre 2004 y 2020) la ciudad agregará a su superficie actual unas 33.000 hectáreas, lo que equivale a la superficie que cubría Santiago el año 1975.

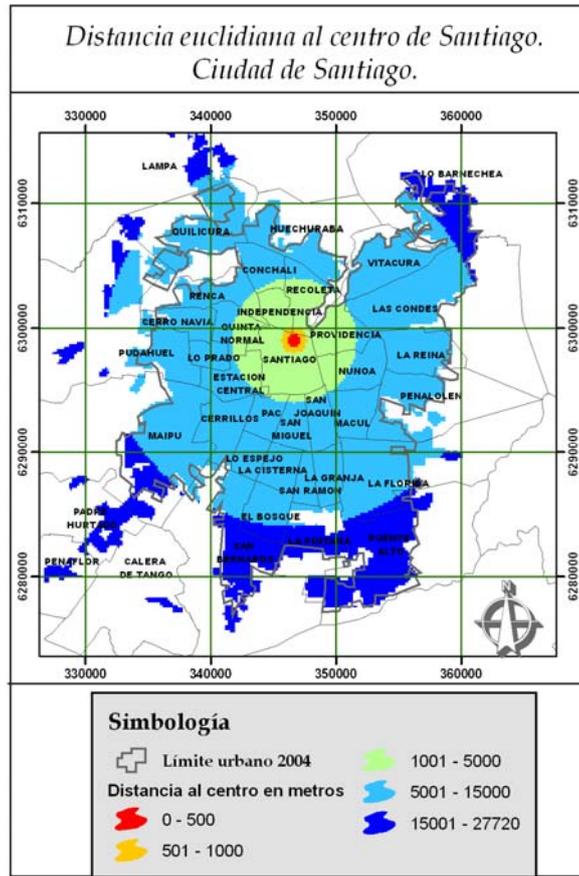
3.1.2 Variables explicativas del crecimiento urbano

Como se ha señalado anteriormente, la ciudad de Santiago en los últimos treinta años ha crecido de manera muy acelerada, calculándose para el periodo comprendido entre 1975 y 2004 una duplicación de su área urbana. Este crecimiento obedece a múltiples factores que se pueden dividir en tres grandes aspectos. Uno de ellos se refiere a la presión sobre suelos por parte de las inmobiliarias y el Estado a través de políticas habitacionales, lo cual deriva en un aumento de superficie urbanizada de la ciudad. El otro aspecto corresponde al social y cultural, debido a que la población y sus transformaciones socioeconómicas ejercen presión por viviendas, equipamiento y actividades que requieren cada vez más espacio, de acuerdo a sus niveles económicos, representada por montos y densidades de población. Finalmente se encuentra el aspecto ligado al transporte de la ciudad, que se ha transformado en un factor que reduce las distancias físicas y permite que los habitantes dispongan de posibilidades de trasladarse por crecientes distancias entre sus hogares y los centros de servicios y trabajo, así como absorber centros urbanos cercanos que dependen funcionalmente de Santiago, quedando conurbados, como es el caso de las ciudades de Puente Alto y San Bernardo.

Para explicar el crecimiento urbano de Santiago se aplicó un modelo de Regresión Múltiple Lineal que consideró como variables explicativas la cantidad de población, densidad de población, distancia euclidiana a Puente Alto, distancia euclidiana a San Bernardo, distancia a la red vial, distancia euclidiana al centro de la ciudad y distancia al límite urbano de 1975.

Respecto a la distancia al centro de Santiago (Figura N° 15), se puede señalar que las comunas ubicadas a menos de 5.000 metros del centro, incluida la comuna de Santiago, son Recoleta, Conchalí, Independencia, Renca, Quinta Normal, Lo Prado, Estación Central, Pedro Aguirre Cerda, San Miguel, San Joaquín, Ñuñoa y Providencia, las cuales se encontraban totalmente urbanizadas en 1975. Entre las comunas de crecimiento reciente y periférico, localizadas a más de 15.000 metros del centro de Santiago, destacan Lo Barnechea, Lampa, Pudahuel, Maipú, Padre Hurtado, San Bernardo, La Pintana y Puente Alto. Estas últimas, aún presentan superficie disponible para usos urbanos.

Figura 15. Distancias euclidianas al centro de Santiago.



Fuente: Elaboración propia

Respecto a la distancia al centro de Puente Alto y San Bernardo (Figuras N° 16, y N° 17 respectivamente), se puede señalar que las comunas a menos de 15.000 metros a dichos centros, son La Florida, Maipú, El Bosque, La Pintana, Cerrillos, Lo Espejo, La Granja y Macul, San Miguel, San Joaquín, La Cisterna y San Ramón. Cabe destacar que dichas comunas entre 1975 y el 2004 incrementaron su superficie urbana (a excepción de las comunas peri-centrales, al interior del anillo Américo Vespucio), tal como se observa en la tabla N°5.

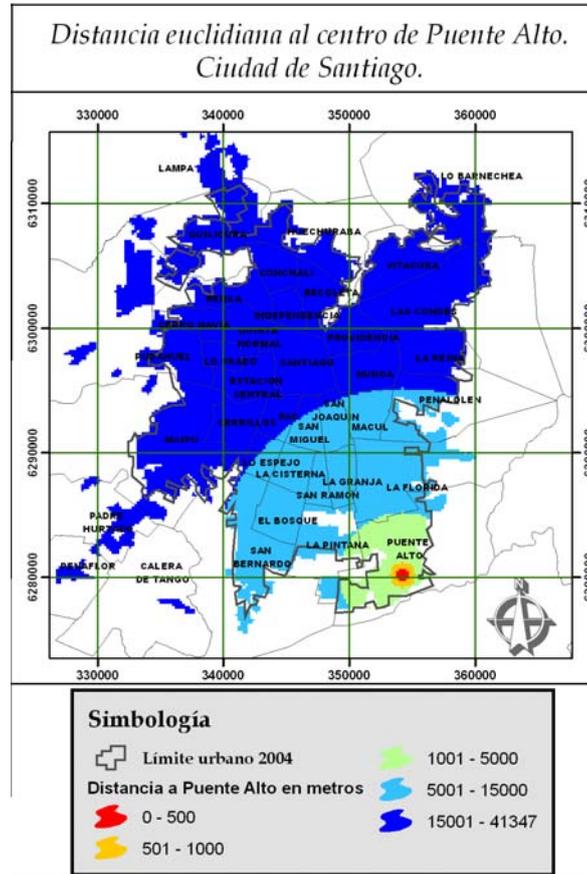
Tabla 5. Superficies urbanizadas en las comunas cercanas a Puente Alto y San Bernardo entre 1975 y 2004.

Comunas	Superficie urbana (has) 1975	Superficie urbana (has) 2004	Incremento
Maipú	1.460	4.559	3.099
Puente Alto	747	3.801	3.054
La Florida	1.372	3.698	2.326
San Bernardo	977	3.073	2.096
La Pintana	357	1.587	1.230
El Bosque	1.125	1.429	304
La Granja	770	1.003	233
San Ramón	562	626	64
Lo Espejo	799	829	30
La Cisterna	1.003	1.003	0
Macul	1.282	1.282	0
San Joaquín	992	992	0
San Miguel	963	963	0
Total de incremento de superficie urbanizada de las comunas a 15 km de San Bernardo y Puente Alto			12.436

Fuente: Elaboración propia en base a imágenes de satélite Landsat.

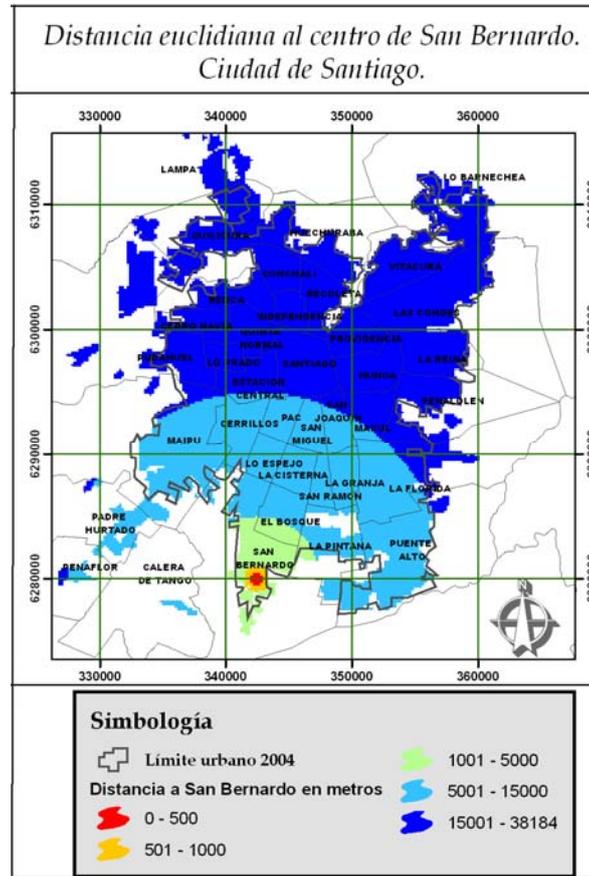
Las comunas de Maipú, Puente Alto, La Florida y San Bernardo incrementaron fuertemente sus superficies urbanas, aportando a la ciudad 10.000 hectáreas urbanizadas entre 1975 y 2004, lo cual revela su importancia como áreas de atracción de residencias y de actividades de carácter urbano así como la existencia de disponibilidad de suelo para ello.

Figura 16. Distancias euclidianas al centro de Puente Alto.



Fuente: Elaboración propia

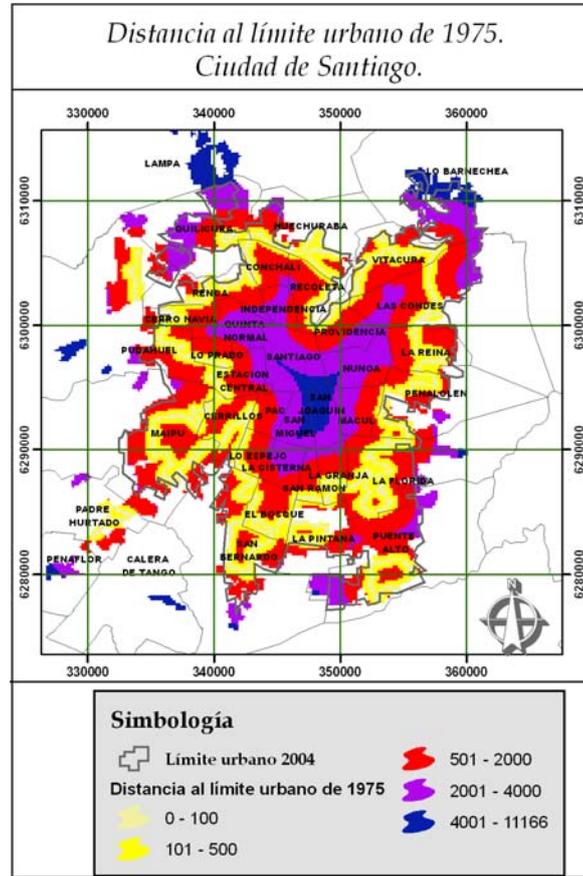
Figura 17. Distancias euclidianas al centro de San Bernardo.



Fuente: Elaboración propia

Respecto a la distancia euclidiana medida a partir del contorno del límite urbano existente y fotointerpretado para el año 1975 (Figura N° 18), se puede señalar que las comunas centrales de la ciudad (Santiago, Ñuñoa, San Joaquín y San Miguel) son las que más distan de dicho límite, y por sobre los 4.000 metros, al igual que algunas áreas de comunas más periféricas, tales como Lampa, Lo Barnechea, Pudahuel, Peñaflor, Calera de Tango, San Bernardo y Puente Alto.

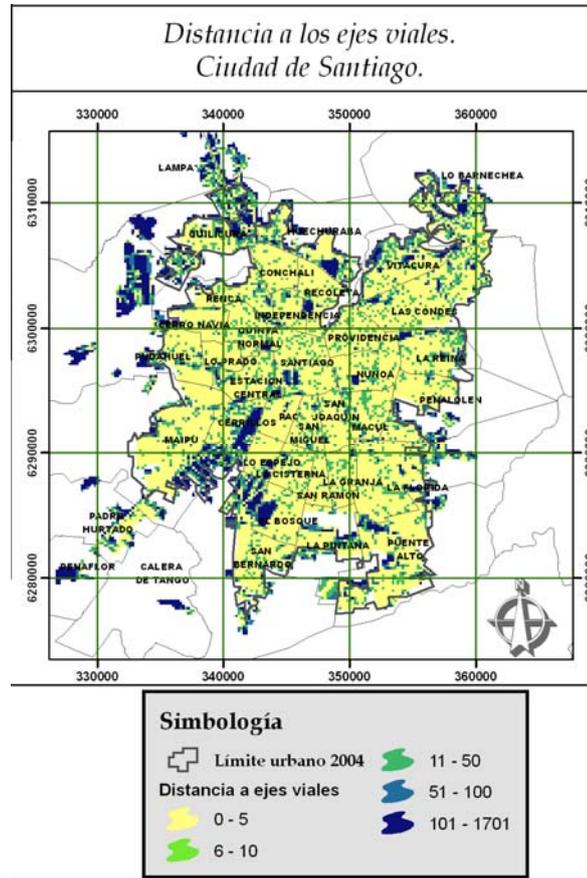
Figura 18. Distancias euclidianas al límite urbano de Santiago de 1975.



Fuente: Elaboración propia

En relación a la distancia euclidiana a los ejes viales de la ciudad (Figura N° 19), se tiene que al interior del límite urbano del 2004 es muy homogénea, ya que la mayoría de ellas esta por debajo de los 50 metros, y sólo hay lugares aislados cuyas distancias máximas alcanzan los 1.700 metros. Los sitios más aislados desde esta perspectiva de análisis, sólo corresponden a grandes predios y manzanas que albergan usos y actividades muy específicas de la ciudad, tales como parques urbanos, estadios, hipódromos, aeródromos y cementerios, principalmente.

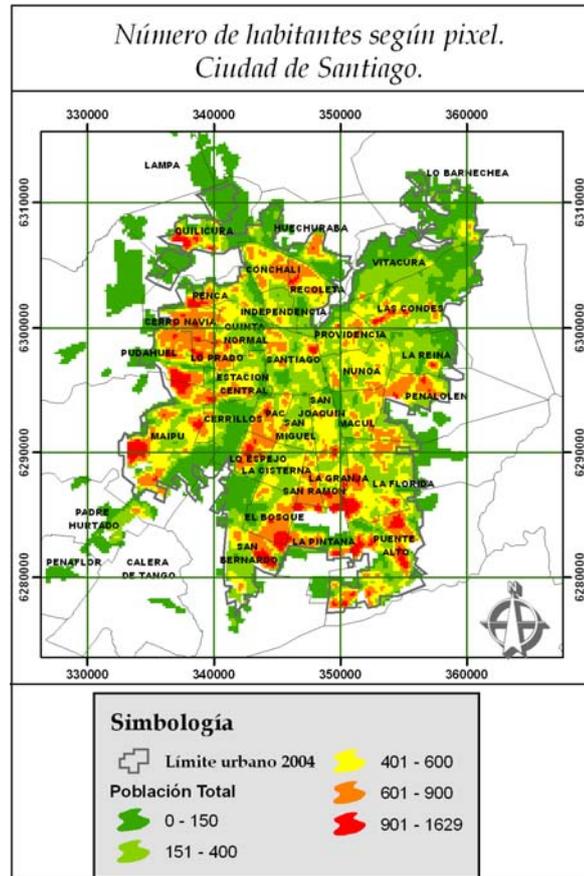
Figura 19. Distancias euclidianas a los ejes viales de la ciudad.



Fuente: Elaboración propia

En relación a la cantidad de población localizada en la ciudad a nivel de pixel de 200 metros (Figura N° 20), se puede señalar que, las áreas que más concentran población en la ciudad se localizan en algunos nodos de crecimiento, principalmente en barrios residenciales de las diferentes comunas de la ciudad de Santiago, en las que destacan Maipú, Puente Alto, La Florida, Quilicura y San Bernardo, todas ellas comunas periféricas, mientras las comunas centrales y de altos ingresos (Santiago, Providencia, Las Condes, Vitacura, La Reina y Lo Barnechea) poseen menor población.

Figura 20. Número de habitantes de la ciudad de Santiago.

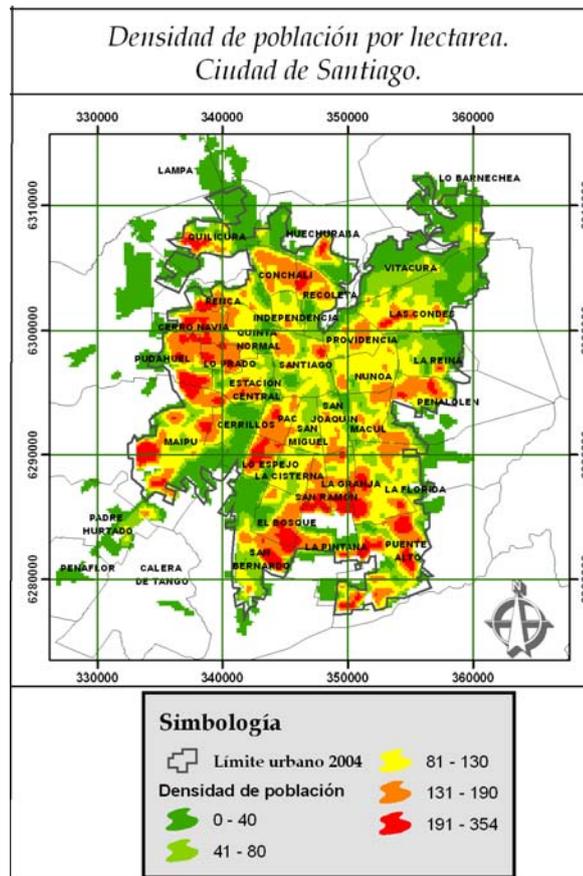


Fuente: Elaboración propia

Algo muy similar a lo señalado anteriormente ocurre con la densidad de población (Figura N° 21). Las áreas más densamente pobladas se localizan hacia la periferia, y siguiendo ejes viales importantes de barrios residenciales consolidados. Gran parte de la ciudad posee densidades menores a 100 habitantes por hectárea, lo cual indica que es una ciudad poco densa, y aquello explicaría la gran extensión espacial que ha mostrado la ciudad en los últimos años. Los sectores más densos, sólo alcanzan densidades máximas de hasta 400 habitantes por hectáreas, y principalmente en áreas destinadas a vivienda social

localizados en la periferia y en sectores de renovación urbana ubicados en el centro y peri-centro de la ciudad.

Figura 21. Densidad de población de la ciudad de Santiago.



Fuente: Elaboración propia

Cada una de las variables analizadas, referidas en particular a volumen y densidad de población, así como la consideración de las distancias euclidianas, muestran que el crecimiento de la ciudad de Santiago ha seguido patrones similares a la mayoría de las ciudades metropolitanas de Latinoamérica (ORTIZ y ESCOLANO, 2005), las cuales presentan un crecimiento ilimitado por acreción de bordes de los límites urbanos pre-existentes, vialidad urbana que estructura la expansión urbana, centros urbanos periféricos de comercio y servicios (como

los Mall) y una dinámica demográfica con alta movilidad por migraciones internas.

3.1.3 Modelación del crecimiento urbano observado de Santiago

Para conocer, estimar y analizar el crecimiento urbano de la ciudad de Santiago, registrado entre los años 1975 y 2004, se han definido un grupo de variables independientes que explican dicho proceso, la mayoría de las cuales corresponde a variables propias del desarrollo de las ciudades y métrica del territorio (SUDHIRA et al, 2004). Dichas variables fueron justificadas en la metodología, y descritas, explicadas y analizadas en el punto 3.1.2 de este capítulo.

El método seleccionado para modelar el crecimiento urbano fue la aplicación de una ecuación de regresión lineal múltiple por pasos. Uno de los resultados propios de este método es la matriz de correlación de las variables seleccionadas. Los resultados indican (Tabla N°6) que la correlación bi-variada entre variables es la siguiente:

Tabla 6. Matriz de correlación entre las variables explicativas del crecimiento urbano de Santiago.

Correlaciones	Cantidad de población	Densidad de población	Distancia a Puente Alto	Distancia a San Bernardo	Distancia a ejes viales	Distancia al Centro	Distancia al límite urbano de 1975
Cantidad de población	1,000	0,994	0,632	0,629	0,084	0,663	0,461
Densidad de población	0,994	1,000	0,647	0,645	0,094	0,675	0,471
Distancia a Puente Alto	0,632	0,647	1,000	0,966	0,418	0,805	0,734
Distancia a San Bernardo	0,629	0,645	0,966	1,000	0,376	0,793	0,742
Distancia a ejes viales	0,084	0,094	0,418	0,376	1,000	0,439	0,373
Distancia al Centro	0,663	0,675	0,805	0,793	0,439	1,000	0,658
Distancia al límite urbano de 1975	0,461	0,471	0,734	0,742	0,373	0,658	1,000

Fuente: Elaboración propia

Las relaciones entre las variables explicativas alcanzan un alto coeficiente de correlación entre: cantidad de población y densidad de población ($r= 0,994$); distancias euclidianas entre los centros de Puente Alto, San Bernardo y Santiago, además de la distancia al límite urbano de 1975 (r entre $0,996$ y $0,734$). La distancia a la vialidad urbana presenta las menores correlaciones con las otras variables utilizadas.

Las variables explicativas son también correlacionadas con la variable dependiente del modelo, que en este caso, corresponde al porcentaje de área urbanizada a escala de pixeles de 200 por 200 metros. Las correlaciones entre ellas indican (Tabla N°7) que tanto la cantidad como la densidad de población existente el año 2002 se asocian en un alto grado el porcentaje de área urbanizada ($r=0,846$ y $0,855$ respectivamente), seguidas en forma decreciente por las distancias a los centros de San Bernardo, Puente Alto y Santiago y al límite de Santiago de 1975 (r entre $0,666$ y $0,550$). Finalmente, la vialidad urbana muestra una nula correlación con el porcentaje de área urbanizada.

Tabla 7. Correlación entre las variables explicativas del crecimiento urbano y la variable dependiente.

Correlación	Cantidad de población	Densidad de población	Distancia a Puente Alto	Distancia a San Bernardo	Distancia a ejes viales	Distancia al Centro	Distancia al límite urbano de 1975
Porcent. Área Urbanizada	0,846	0,855	0,666	0,694	0,088	0,591	0,550

Fuente: Elaboración propia

Se aplicaron a continuación los modelos de regresión lineal múltiple paso a paso, que permiten integrar las variables y alcanzar el mayor nivel de explicación del crecimiento urbano de Santiago observado en las últimas décadas (Tabla N° 8). El modelo reconoce que el primer predictor del área construida de la ciudad de Santiago corresponde a la distribución espacial de la densidad de población, seguido por la distancia a San Bernardo, distancia al centro de Santiago, distancia al límite urbano de 1975, distancia a Puente Alto y, finalmente cantidad de población. La elección del modelo de mejor ajuste debe cumplir con las condiciones de mayor coeficiente de determinación (R^2) y menor

error estándar, tal como se ha señalado en la sección de metodología. En este caso, el modelo seleccionado es el 7, que incorpora todas las variables independientes y alcanza el menor error.

Tabla 8. Modelos resultantes para estimar el crecimiento urbano de Santiago.

Modelo	R	R ² (a)	R ² Ajustado	Error Std. estimado	Cambios en el R ²
Modelo 1	0,855(b)	0,731	0,731	11,036	0,731
Modelo 2	0,875(c)	0,766	0,766	10,293	0,035
Modelo 3	0,885(d)	0,783	0,783	9,917	0,017
Modelo 4	0,889(e)	0,790	0,790	9,752	0,007
Modelo 5	0,891(f)	0,795	0,795	9,653	0,004
Modelo 6	0,892(g)	0,795	0,795	9,633	0,001
Modelo 7	0,892(h)	0,796	0,796	9,624	0,000

Fuente: Elaboración propia

a Coeficiente de determinación de las variables explicativas y la variable dependiente de porcentaje de área urbanizada

b Predictores: Densidad de población

c Predictores: Densidad de población, Distancia a San Bernardo

d Predictores: Densidad de población, Distancia a San Bernardo, Distancia al Centro

e Predictores: Densidad de población, Distancia a San Bernardo, Distancia al Centro, Distancia al límite urbano de 1975

f Predictores: Densidad de población, Distancia a San Bernardo, Distancia al Centro, Distancia al límite urbano de 1975, Distancia a Puente Alto

g Predictores: Densidad de población, Distancia a San Bernardo, Distancia al Centro, Distancia al límite urbano de 1975, Distancia a Puente Alto, Distancia a ejes viales

h Predictores: Densidad de población, Distancia a San Bernardo, Distancia al Centro, Distancia al límite urbano de 1975, Distancia a Puente Alto, Distancia a ejes viales, Cantidad de población

El modelo proporciona los coeficientes que se deben aplicar a las variables explicativas para estimar los porcentajes de superficie urbanizada de Santiago. La tabla 9 muestra los coeficientes beta sin estandarizar y estandarizados.

Tabla 9. Coeficientes aplicados a la ecuación de regresión múltiple para estimar el crecimiento urbano de Santiago.

Modelo 7	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados
	B	Error Std.	Beta
Densidad de población (DENS)	0,1900	0,0070	0,9400
Distancia a San Bernardo (SNBER)	0,0005	0,0000	0,5110
Distancia al Centro (CENTRO)	-0,0004	0,0000	-0,2140
Distancia al límite urbano de 1975 (LIM1975)	0,0014	0,0000	0,1390
Distancia a Puente Alto (PTALTO)	-0,0002	0,0000	-0,2380
Distancia a ejes viales (VIAL)	-0,0064	0,0010	-0,0360
Cantidad de población (POB)	-0,0087	0,0020	-0,1790

Fuente: Elaboración propia

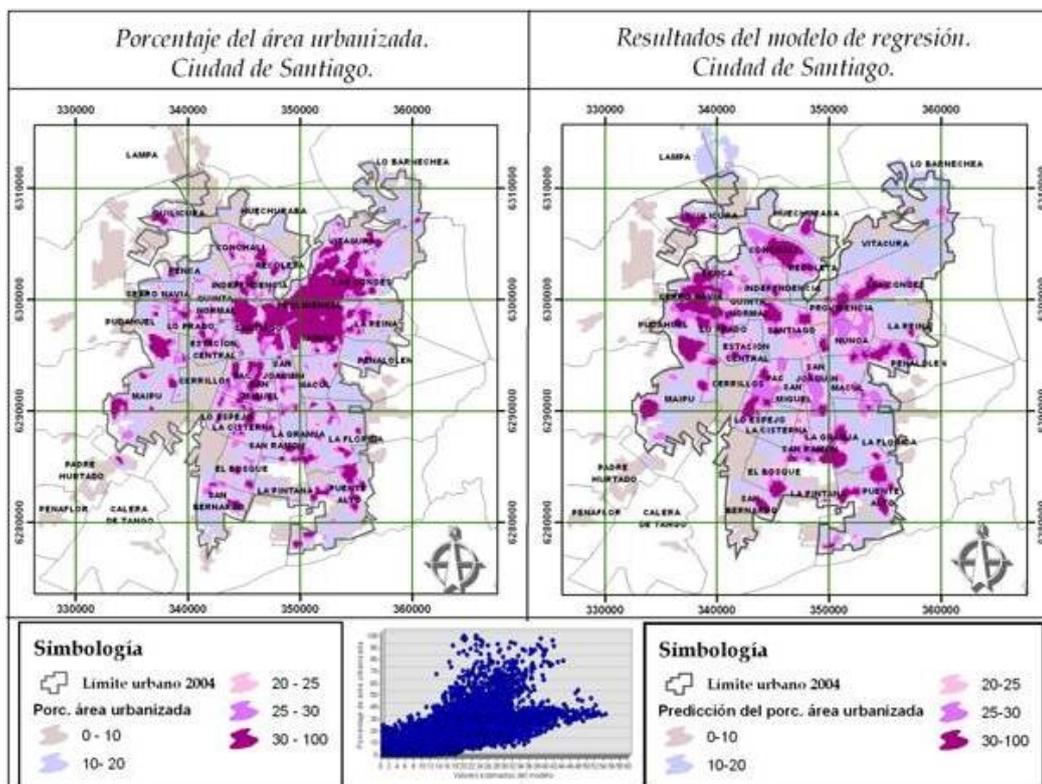
Así, la ecuación resultante con valores no estándar es:

$$\text{Porcentaje de área urbanizada} = 0,1900 * \text{DENS} + 0,0005 * \text{SNBER} - 0,0004 * \text{CENTRO} + 0,0014 * \text{LIM1975} - 0,0002 * \text{PTALTO} - 0,0064 * \text{VIAL} - 0,0087 * \text{POB}$$

Al comparar la distribución de la superficie urbanizada observada y estimada empleando las variables y coeficientes obtenidos por la regresión múltiple, se

aprecia que se alcanza un buen nivel de ajuste entre ambas en gran parte de la ciudad, con excepción de las comunas del sector donde habitan los sectores de más altos ingresos (comunas de Providencia, Las Condes, Vitacura y Lo Barnechea). La relación entre las superficies estimadas y observadas se presenta como lineal y directa hasta cerca del 30% de superficie urbanizada, porcentaje desde donde la tendencia se divide en dos nubes de puntos: una, que mantiene la tendencia original y otra que se separa por una mayor pendiente, tal como se muestra en el gráfico de dispersión ubicado en la parte inferior de la figura 22.

Figura 22. Distribución de los porcentajes de área urbanizada de Santiago, calculada y estimada por el modelo de regresión múltiple.

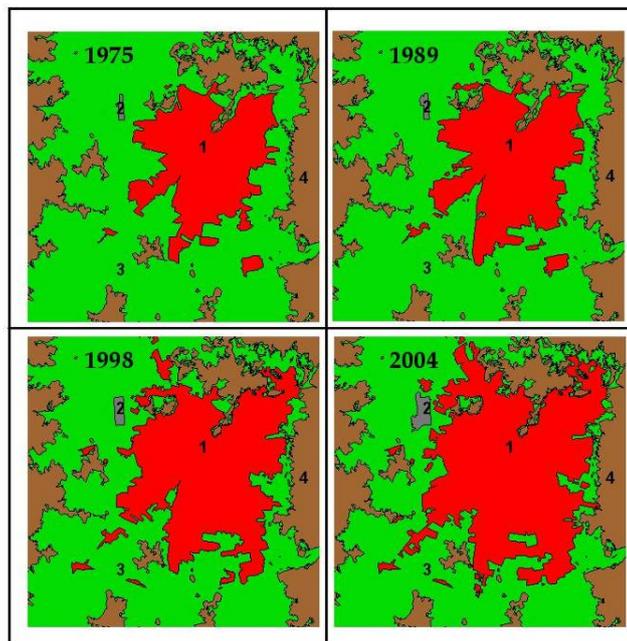


Fuente: Elaboración propia

3.1.4 Estimación del crecimiento urbano de Santiago para el año 2020

Para predecir el crecimiento futuro se utilizaron conjuntamente los análisis de Cadenas de Markov y Autómatas Celulares, los cuales permiten estimar el crecimiento urbano para el año 2020 a partir de las situaciones observadas. La Figura 23 muestra las cuatro categorías de usos de suelo que serán sometidas al análisis, tal como se detalló en la metodología. Estas imágenes permiten derivar matrices de probabilidades de cambio de las categorías de usos del suelo y sus superficies, según el periodo definido. Para ello se comparan los usos del suelo estimados respecto a los observados para diversos períodos de tiempo, procediéndose a examinar estadísticamente sus coincidencias espaciales.

Figura 23. Cambios en la superficie urbanizada de Santiago entre 1975 y 2004



Fuente: Elaboración propia. 1= Urbano, 2=Aeropuerto, 3= Agrícola y 4= Montaña

El primer análisis estimó la superficie urbanizada el año 2004 considerando las tendencias observadas en el período de 23 años, comprendidos entre 1975 y 1998. Las probabilidades de cambio (Tabla N°10) consideradas sólo se refieren a los suelos agrícolas que fueron sustituidos por usos de suelo urbano y aeropuerto.

Tabla 10. Matriz de probabilidad de cambios de usos de suelo entre 1975 y 1998.

1975-1998	Urbano	Aeropuerto	Agrícola	Montaña
Urbano	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Aeropuerto	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000
Agrícola	0,0329	0,0006	0,9665	0,0000
Montaña	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000

Fuente: Elaboración propia.

En este periodo la superficie urbanizada creció 18.050 hectáreas, a una tasa anual de 784 hectáreas. La matriz de cambio estimó una superficie de 56.439 hectáreas construidas para el año 2004, lo cual es muy inferior al valor observado (62.235 hectáreas).

Ante esta subestimación de las superficies construidas, se procedió a reemplazar el período observado, por los 11 años comprendidos entre 1989 y 1998. Las probabilidades de cambio de usos de suelo entre estos años se observan en la tabla 11.

Tabla 11. Matriz de probabilidad de cambios de usos de suelo entre 1989 y 1998.

1989-1998	Urbano	Aeropuerto	Agrícola	Montaña
Urbano	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Aeropuerto	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000
Agrícola	0,0571	0,0012	0,9418	0,0000
Montaña	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000

Fuente: Elaboración propia.

En este periodo la superficie urbanizada creció 12.193 hectáreas, a una tasa de crecimiento anual de 1.108 hectáreas. La matriz de cambio de superficie estimó un área total construida de 58.383 hectáreas, que se acerca bastante a los valores observados el año 2004.

Mediante Autómatas Celulares se modeló el crecimiento de la ciudad de Santiago para el año 2004, sobre la base de los usos y coberturas de los años 1989 y 1998. Para validar los resultados se aplicó el índice de Kappa entre las imágenes del año 2004 observado y modelado, alcanzando un índice de 0,9462, valor que según ALTMAN (1991) es considerado como muy fuerte respecto a la concordancia de las imágenes comparadas. La tabla de la figura 24 muestra dichos resultados.

Figura 24. Tabla de aplicación del índice Kappa para validar la imagen modelada del año 2004 a partir de los usos y coberturas 1989 y 1998.

Model Type	Random	Yours	Perfect
% Correct	25.00%	95.96%	100.00%
Improvement	---	70.96%	4.04%

Kappa no : 0.9462

Fuente: Elaboración propia, empleando Idrisi Kilimanjaro.

Al realizar la predicción futura de áreas construidas para el año 2020, se obtuvo una superficie de 76.111 hectáreas, con la configuración espacial que se presenta en la Figura N°25. El efecto de “sal y pimienta” al decir de HENRIQUEZ (2005)

o de ruido sobre la imagen predicha es muy alto hacia la zona norte de la imagen.

Figura 25. Superficie ocupada por la ciudad de Santiago el año 2020 a partir de la situación observada entre 1989 y 1998.



Fuente: Elaboración propia, a partir de IDRISI Kilimanjaro, aplicando Autómatas Celulares.

La figura anterior pone en evidencia también los escasos cambios que se esperan ocurran con los suelos destinados al aeropuerto, dado que fue ampliado después de 1998. El lóbulo urbano de mayor crecimiento corresponde al área norte de la ciudad, hacia las comunas de Quilicura, Lampa y Colina, a lo largo de la Carretera Panamericana Norte. Además, dicha proyección espacial del crecimiento muestra que áreas urbanas de la periferia no compacta crecen a un ritmo muy acelerado, particularmente las comunas de Peñaflor y Calera de Tango, localizadas en el surponiente de la ciudad.

La proyección de crecimiento subestima los cambios en el área de Huechuraba poniente (av. Pedro Fontova), localizada en el sector nororiente de la ciudad, que ha crecido significativamente entre 1998 y 2004. Todas estas situaciones, pese al buen ajuste en la validación del modelo, obligan a aplicar una nueva Cadena de Markov en el último periodo observado, es decir entre 1998 y 2004. Las probabilidades de cambio de usos de suelo entre estos años se observan en la tabla 12.

Tabla 12. Matriz de probabilidad de cambios de usos de suelo entre 1998 y el 2004.

1998-2004	Urbano	Aeropuerto	Agrícola	Montaña
Urbano	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Aeropuerto	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000
Agrícola	0,1924	0,0102	0,7974	0,0000
Montaña	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000

Fuente: Elaboración propia.

En este periodo la superficie urbanizada creció más que en cualquier periodo observado con anterioridad, alcanzando a 10.500 hectáreas, a una tasa anual de crecimiento de 1.750 hectáreas. La matriz de cambio de superficie, estimó 90.235 hectáreas construidas para el año 2020, un 20% mayor al caso anterior.

Complementariamente se aplican los Autómatas Celulares para modelar los usos y coberturas del año 2020 (en base a los años 1998 y 2004 observados). Para validar los resultados se aplicó el índice de Kappa para el año 2020 del modelo base 1989 y 1998 y del modelo base 1998 y 2004. El índice alcanza un valor de 0,8968, valor que según ALTMAN (1991) es considerado como muy bueno. La situación proyectada posee la configuración espacial que se presenta en la Figura N°26.

Figura 26. Superficie ocupada por la ciudad de Santiago el año 2020 a partir de la situación observada entre 1998 y 2004.



Fuente: Elaboración propia, a partir de IDRISI Kilimanjaro, aplicando Autómatas Celulares.

En la figura anterior quedan en evidencia importantes cambios del uso de suelos que resultan de nuevas ampliaciones del aeropuerto internacional. Existen tres áreas urbanas de mayor crecimiento espacial en estas proyecciones, La primera corresponde al área norte, poniente y sur de la ciudad, incluyendo las comunas de Quilicura, Lampa, Colina, Padre Hurtado-Peñaflor y San Bernardo-Nos. Se estima también, que las áreas urbanas de la periferia no compacta crecen a un ritmo muy acelerado, particularmente la comuna de Calera de Tango. Se observa una buena estimación del crecimiento urbano de Huechuraba poniente (av. Pedro Fontova).

3.2 Análisis y estimación de la distribución espacial de las temperaturas superficiales de la ciudad de Santiago.

El propósito de este capítulo es analizar y generar un modelo estadístico explicativo de la distribución espacial de las temperaturas superficiales de la ciudad de Santiago el año 2004, considerando variables geográficas y urbanas que faciliten la predicción de sus valores. Esto permitirá formular recomendaciones para la planificación ambiental de las áreas de expansión urbana y para la gestión ambiental de los espacios construidos. Además, proporcionará conocimientos sobre el comportamiento espacial de las temperaturas urbanas, lo cual permitirá entender y comprender la conformación de áreas térmicamente más cálidas, definidas como islas de calor.

Cabe destacar, que la configuración espacial de las temperaturas superficiales depende de múltiples factores y variables, entre los cuales los ligados a la urbanización son los más relevantes. En este sentido, la sustentabilidad del crecimiento urbano es de gran importancia, puesto que ambientalmente puede generar islas de calor que desmejoran la calidad de vida de los habitantes de la ciudad, a través de discomfort térmico y mediante problemas de contaminación atmosférica, entre otros.

3.2.1 Análisis de la configuración espacial de las temperaturas superficiales el año 2004

Considerando, que el área de estudio posee áreas urbanas y rurales, se calcularon estadígrafos que permiten comparar inicialmente la distribución de las temperaturas superficiales. En la Tabla N° 13 se observa que las

temperaturas promedios son más altas sobre el área urbana de Santiago, alcanzando diferencias de +3,8°C respecto al área rural circundante de la ciudad. En cuanto a la distribución de las temperaturas extremas, la temperatura mínima de la ciudad es más elevada que la de su entorno rural en +0,3°C. Sin embargo, las temperaturas máximas son mayores en +2,9°C en el área rural. Esto último tendría como explicación la presencia de áreas de suelo desnudo con respuesta térmica muy similar al suelo urbano, que corresponden a las cineritas localizadas principalmente en el sector norponiente de la ciudad en la comuna de Pudahuel.

Tabla 13. Temperaturas superficiales (°C) medias, mínimas y máximas y desviación estándar de las mismas en áreas urbanas y rurales de Santiago.

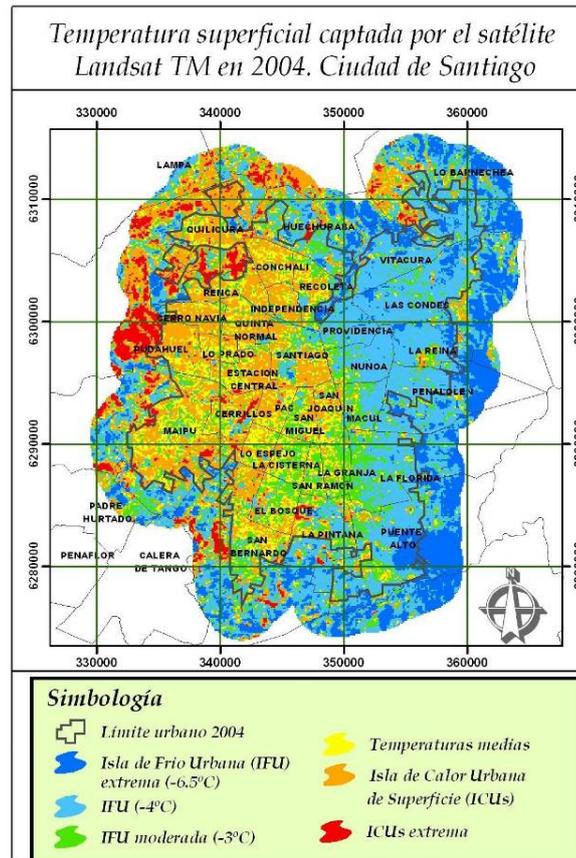
Posición	Temperatura Promedio	Temperatura Mínima	Temperatura Máxima	Desviación estándar
Urbana	23,4	10,6	30,5	1,7
Rural	19,6	10,3	33,6	3,0

Fuente: Elaboración propia.

En relación a la configuración espacial de las temperaturas superficiales, se evidencia la presencia de dos áreas bien definidas desde el punto de vista térmico: El área oriente de Santiago, desde el piedemonte andino hasta la avenida Vicuña Mackenna, posee temperaturas relativamente más frías, interrumpidas con algunos pequeños núcleos de mayor temperatura en sectores específicos de las comunas de La Reina (aeródromo de Tobalaba), Peñalolén, La Florida y Puente Alto. Por otra parte, el área poniente, es la que presenta temperaturas más cálidas e incluso extremadamente cálidas al exterior de la ciudad. Ello demuestra que, a la hora del paso del satélite (cercano a mediodía) no existe una presencia marcada de la Isla de Calor Urbana de Superficie (ICUs), sino más bien Archipiélagos de Calor Urbano de Superficie (ACUs) localizados hacia el norponiente de la ciudad de Santiago. También destaca la existencia de

Archipiélagos de Calor Rurales de Superficie (ACRs) ubicados en las comunas de Pudahuel, Quilicura y Lampa.

Figura 27. Distribución de las temperaturas superficiales de Santiago. 2004.



Fuente: Elaboración propia en base a imagen Landsat TM.

A nivel de las comunas del Gran Santiago, las temperaturas promedios más altas se registran en Quilicura, Pudahuel, Cerrillos, Cerro Navia y Renca; mientras que las temperaturas más bajas se concentran en las comunas de Puente Alto, Lo Barnechea, Vitacura, Las Condes, La Reina y Providencia (tabla 14).

Tabla 14. Temperaturas superficiales promedio (°C) según comunas del Gran Santiago el año 2004.

Comunas	Temperaturas en °C
Quilicura	24,1
Pudahuel	24,0
Cerrillos	23,9
Cerro Navia	23,8
Renca	23,8
Estación Central	23,8
Independencia	23,7
Conchalí	23,6
Quinta Normal	23,6
Lo Prado	23,6
Maipú	23,6
Pedro Aguirre Cerda	23,6
Lo Espejo	23,4
San Joaquín	23,3
San Bernardo	23,2
San Miguel	23,1
El Bosque	23,1
Santiago	23,1
La Cisterna	23,0
San Ramón	22,9
Recoleta	22,8
La Granja	22,8
La Pintana	22,6
Macul	22,2
Huechuraba	22,1
La Florida	21,8
Ñuñoa	21,6
Peñalolén	21,3
Providencia	21,1
La Reina	21,0
Las Condes	21,0
Vitacura	20,9
Lo Barnechea	20,9
Puente Alto	20,8

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2 Análisis de las variables explicativas de la distribución espacial de las temperaturas superficiales

Como se ha señalado anteriormente, la ciudad de Santiago posee en su interior y su entorno rural, archipiélagos térmicos que se deben a múltiples factores, tanto atmosféricos como relacionados con la configuración topográfica de la cuenca. Sin embargo, los factores más importantes en dicha distribución están dados por el crecimiento urbano, evidenciado por el reemplazo de las coberturas naturales de suelo por coberturas urbanas que concentran y almacenan calor. Estos factores son representados por variables explicativas, que se han señalado en la mayoría de las investigaciones de climatología urbana (BERAL-GUYONNET, 1997; CUADRAT *et al.*, 2003 y 2005; HOGAN y FERRICK, 1998), entre las que destacan las condiciones topográficas del sitio de emplazamiento de la ciudad, las distancias físicas a fuentes húmedas, las densidades de población, la altura de las edificaciones y las coberturas vegetales. Se puede señalar, que ninguna de estas causas explica por sí sola la distribución espacial de las temperaturas, lo que requiere que sean consideradas en conjunto. Las estadísticas promedios resultantes de las variables explicativas consideradas se observan en la tabla 15.

Tabla 15. Promedios de las variables explicativas de las temperaturas.

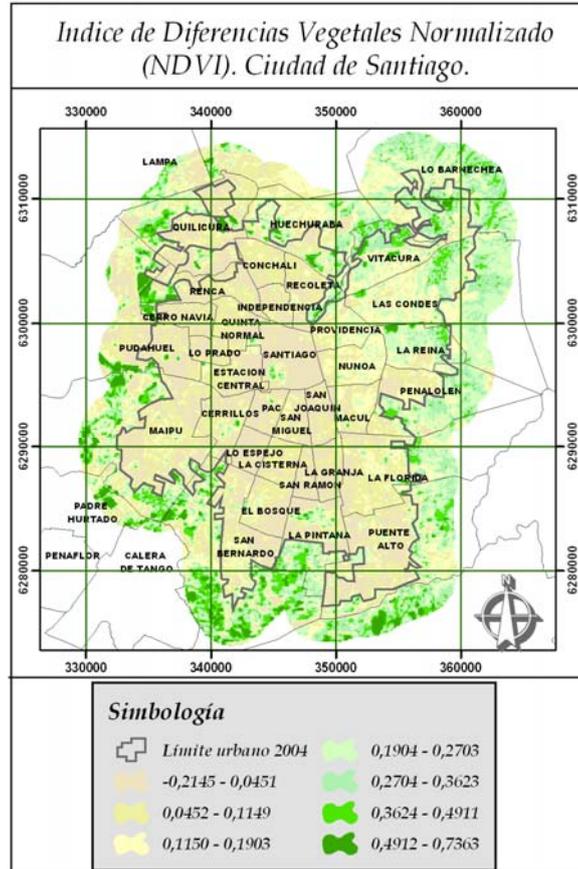
Variable	Promedio
Distancia a fuentes húmedas	726,37 metros
Elevación topográfica	650,89 metros
Rugosidad de las elevaciones	1,56 pisos
Densidad de población	49,01 hab./has
Índice de vegetación (NDVI)	0,16

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la distribución de la vegetación urbana, la Figura N°28 demuestra que al interior de la ciudad existen escasas áreas verdes, y más aún, el tamaño de ellas es reducido, con excepción de parches verdes de gran tamaño, que se localizan en parques y canchas de golf en el sector oriente. Hacia fuera del límite urbano la situación es inversa, existiendo una alta concentración de parches vegetales destinados a cultivos (sur, norte y poniente de la ciudad) y vegetación arbustiva en el sector del piedemonte andino.

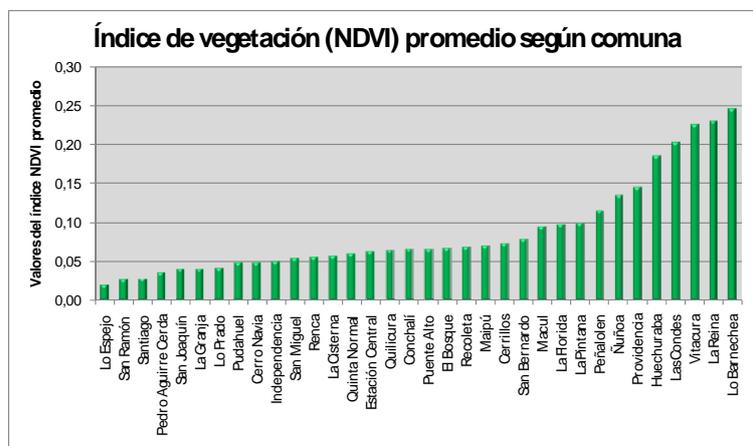
A escala comunal (Figura N°29), se observa que las comunas que poseen mayores coberturas vegetales son Lo Barnechea, La Reina, Vitacura, Las Condes, Huechuraba y Providencia, todas ellas, con excepción de un sector de Huechuraba, áreas en que tradicionalmente reside la población de más altos ingresos. Estas comunas poseen una alta frecuencia de áreas verdes y calles con arbolado, que hacen que ambientalmente sean más frescas, ya que ofrecen gran cantidad de sombra, en el caso de las zonas con árboles, y zonas con césped que permiten regular las temperaturas, dado que no reflejan un alto porcentaje de la energía recibida. Por otro lado, las comunas que presentan la menor concentración de áreas con vegetación son Lo Espejo, San Ramón, Santiago, Pedro Aguirre Cerda, San Joaquín, La Granja, Lo Prado y Pudahuel, todas ellas localizadas hacia el poniente desde el centro de la ciudad.

Figura 28. Distribución de la Productividad vegetal (NDVI) en la ciudad de Santiago en Diciembre del año 2004



Fuente: Elaboración propia en base a imagen Landsat TM de diciembre del 2004

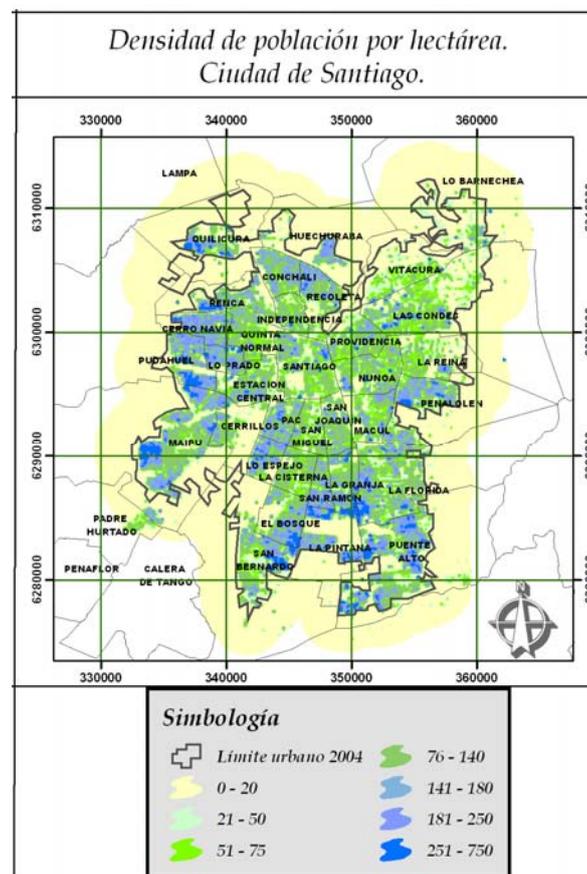
Figura 29. Distribución promedio del NDVI según comuna.



Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la distribución espacial de las densidades de población (Figura N°30) se observan en el mapa las mismas distribuciones espaciales descritas en la sección anterior de los resultados, existiendo múltiples núcleos de concentración demográfica en las zonas sur y poniente de Santiago, y principalmente fuera del anillo de circunvalación Américo Vespucio. El entorno rural posee las más bajas densidades observadas.

Figura 30. Densidad de población.

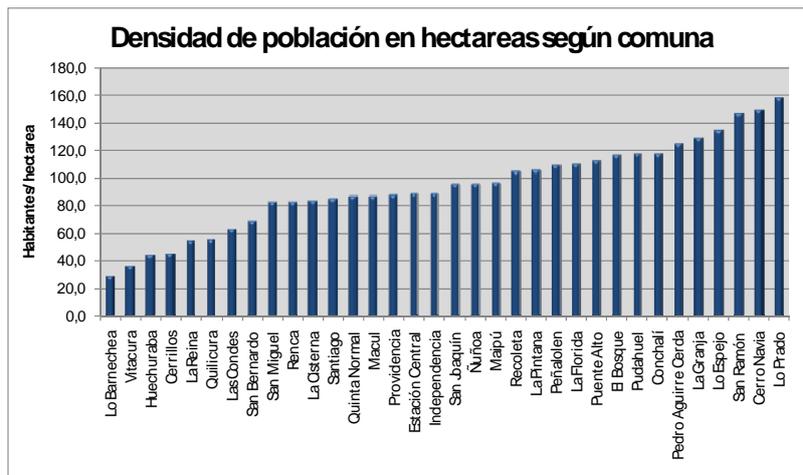


Fuente: Elaboración propia en base a Censo de Población y Vivienda 2002 a nivel de manzanas

Las comunas del Gran Santiago más densamente pobladas (Figura N°31) corresponden a Cerro Navia, Lo Prado, San Ramón, Lo Espejo, La Granja, Pedro Aguirre Cerda, Conchalí y Pudahuel; todas ellas, también poseen escasas áreas

verdes según lo indicado anteriormente. De este modo, las comunas menos densamente pobladas son las comunas de Lo Barnechea, Vitacura, Huechuraba, Cerrillos, La Reina y Quilicura.

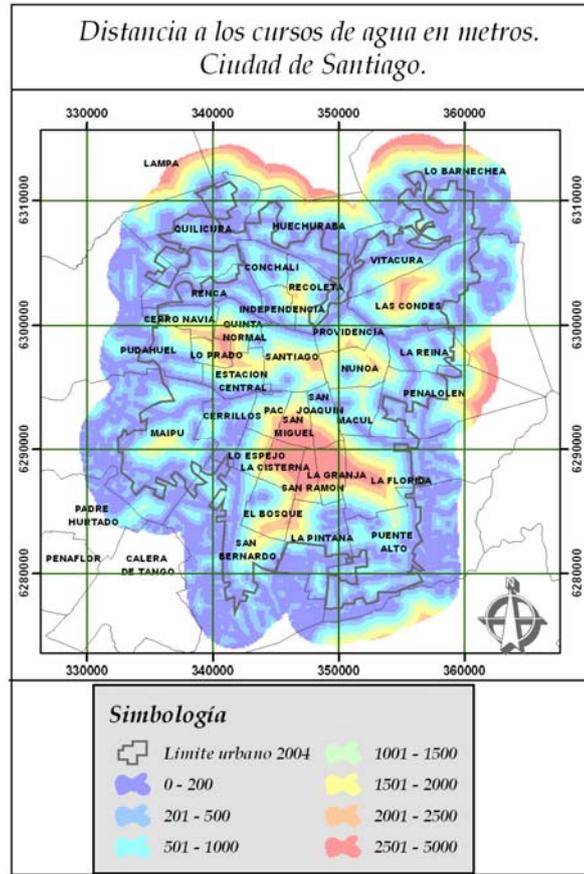
Figura 31. Distribución de la densidad de población promedio según comuna.



Fuente: Elaboración propia

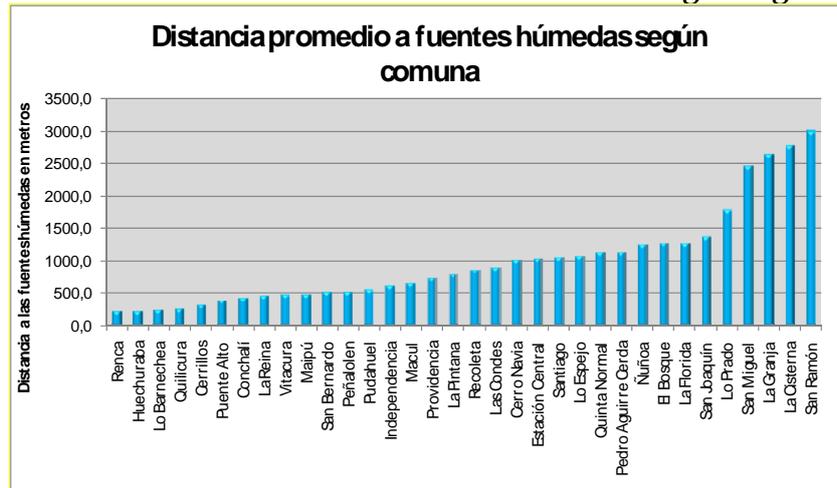
Respecto a la distancia euclidiana a fuentes húmedas (Figura N°32) se observa que gran parte del área de estudio se ubica a distancias iguales o inferiores a 1.500 metros de algún curso de agua o fuente húmeda, destacando los corredores naturales de Río Maipo y Mapocho como los que poseen la mayor importancia en el área de estudio. Los ríos mencionados son alimentados por quebradas y canales que configuran una cercanía importante a fuentes húmedas de la ciudad hasta los 1.500 metros mencionados. No obstante, existen al interior de Santiago, sectores muy alejados a las fuentes húmedas, tal como es el caso de las comunas de La Cisterna, San Miguel, La Granja y San Ramón (Figura N°33). Por otra parte, las comunas más cercanas en promedio, a las fuentes húmedas son Renca, Huechuraba, Lo Barnechea, Quilicura, Cerrillos y Puente Alto, todas ellas a menos de 500 metros de un curso o cuerpo de agua.

Figura 32. Distancia euclidiana a los cursos de agua



Fuente: Elaboración propia en base cartografía SAF 2003.

Figura 33. Distribución de la distancia a los cursos de agua según comuna.

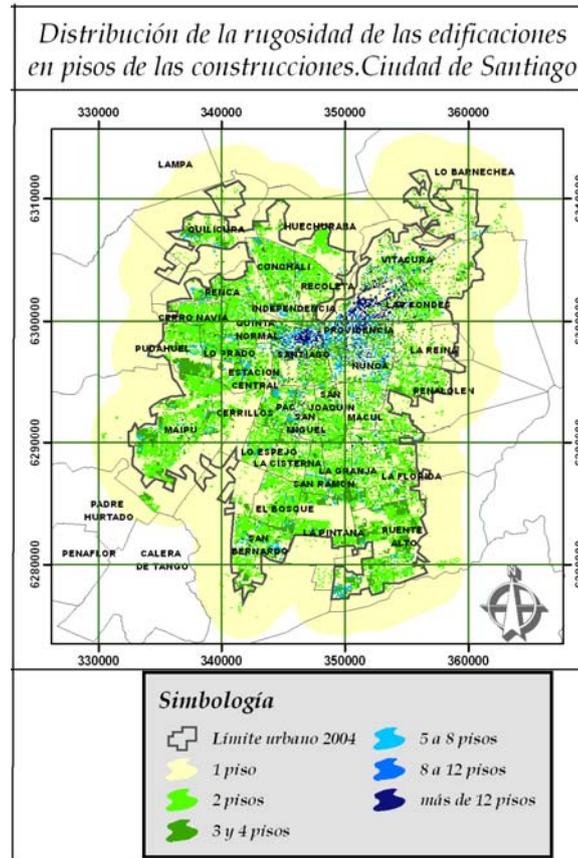


Fuente: Elaboración propia

En lo referido a la rugosidad urbana de la ciudad, medida a través de la altura de las edificaciones en número de pisos, se tiene que el Gran Santiago presenta en su mayoría construcciones de 1 y 2 pisos (Figura N°34), lo cual es una característica que indica la preferencia por el crecimiento en extensión de la ciudad, manteniendo bajas densidades poblacionales. Los sectores con edificaciones de mayor altura se localizan principalmente hacia el centro de la ciudad y las comunas del oriente, alcanzando alturas promedio de 12 pisos y más, en las cercanías de ejes viales como Libertador Bernardo O'Higgins (Alameda), Providencia-11 de Septiembre y Apoquindo. Esta distribución de los edificios en altura se explica por los precios de suelo, presencia de actividades no residenciales como oficinas profesionales y comercio y a las políticas de renovación urbana en el centro de Santiago (ORTIZ y ESCOLANO, 2005) . Lo anterior no excluye que se presenten crecientemente edificaciones en altura en algunos núcleos externos a la zona mencionada, en comunas como San Miguel, Ñuñoa y Lo Prado.

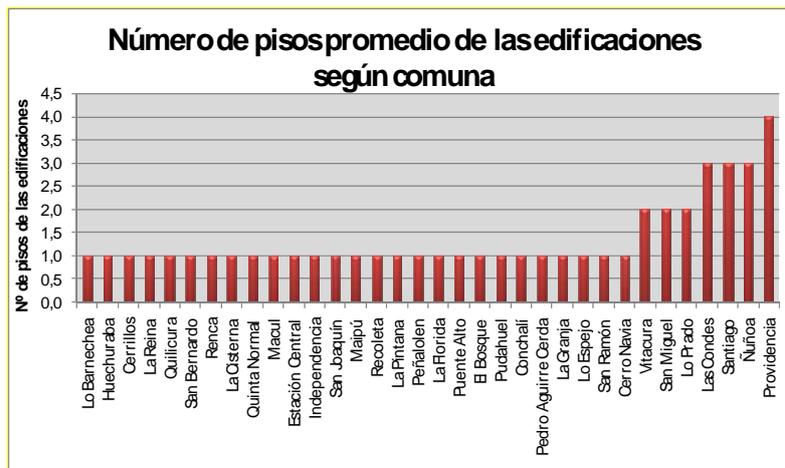
A nivel comunal, se tiene que en el Gran Santiago existen 31 comunas que presentan un solo piso como promedio de altura de las construcciones, entre las cuáles se encuentran Lo Barnechea, Huechuraba, Cerrillos, Renca, Quilicura y San Bernardo (Figura N°35). Las comunas en que las edificaciones alcanzan dos pisos como promedio corresponden a Vitacura, San Miguel y Lo Prado; con edificios de 3 pisos como promedio se encuentra Las Condes, Santiago y Renca. Finalmente, la comuna con mayor altura promedio de sus edificaciones es Providencia con 4 pisos como promedio.

Figura 34. Rugosidad de suelo de Santiago 2004



Fuente: Elaboración propia.

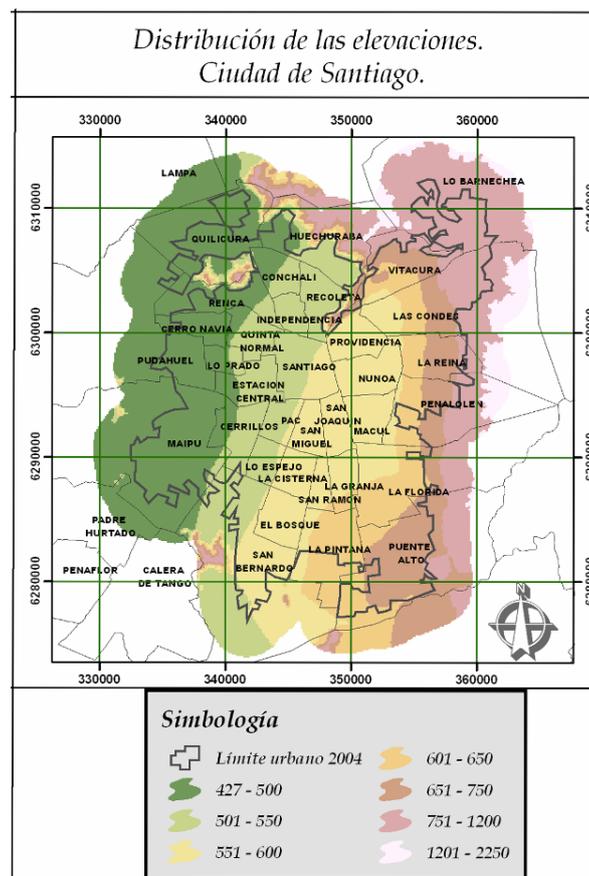
Figura 35. Distribución promedio del número de pisos según comuna.



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, respecto a la topografía del emplazamiento del área de estudio, se tiene que las diferencias altimétricas al interior de la ciudad sólo alcanzan los 250 metros, entre las áreas urbanizadas del piedemonte andino por el oriente y el límite urbano del poniente de la ciudad. La escasa diferencia de altura significa el predominio de pendientes suaves en la cuenca. El plano inclinado que se establece entre el oriente más alto y el poniente más bajo se ve interrumpido por la presencia de algunos cerros islas y estribaciones de la Cordillera de los Andes (Figura N°36), específicamente los cerros San Cristóbal, Renca y Chena. Dichos accidentes del relieve, afectan el clima interno de la ciudad, pues generan y bloquean la circulación de vientos de superficie.

Figura 36. Modelo Digital de Terreno (MDT) de la ciudad de Santiago.

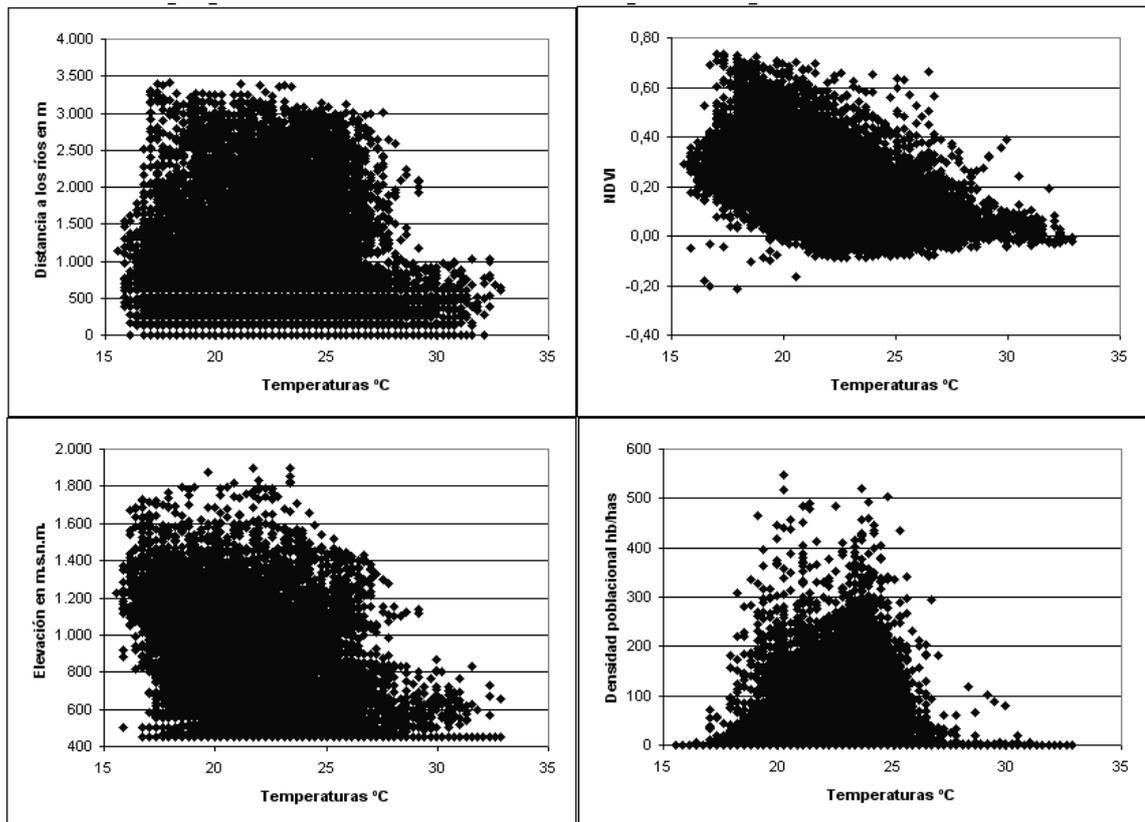


Fuente: Elaboración propia en base a curvas de nivel y cotas de altura del proyecto OTAS.

3.2.3 Modelo explicativo de la distribución espacial de las temperaturas superficiales de Santiago

Las relaciones estadísticas entre la distribución de las temperaturas superficiales y las variables explicativas individualmente consideradas se presentan en la Figura 36. Los coeficientes de correlación simple más altos relacionan en forma inversa a las temperaturas de emisión con los índices vegetales y en menor medida con la elevación. La correlación espacial entre las temperaturas superficiales y la densidad de población y entre la primera y la distancia a los ríos no son significativas.

Figura 37. Relación entre las temperaturas y los diferentes factores urbano-geográficos



Fuente: Elaboración propia.

Los rasgos urbanos-geográficos seleccionados como variables explicativas de la distribución de las temperaturas superficiales se ingresaron paulatinamente a modelos de Regresión Múltiple Por Pasos, lo que permitió determinar cómo influyen en su configuración espacial. Respecto a la relación estadística entre la distribución de las temperaturas superficiales y el conjunto de variables explicativas, los resultados confirman que la elevación es la variable con mayor peso, dado que por sí sola explica el 89% de la varianza total (Tabla 16), seguida de la densidad de población, la distancia a los ríos, los índices vegetales y la rugosidad del terreno. Si bien, la Tabla 16 muestra que la explicación de la varianza no presenta variaciones significativas a partir del modelo 2 (que considera juntos a la densidad de población con la elevación), si es importante la reducción del error estándar que ocurre hasta el modelo 4, al adicionar la distancia a los ríos y los índices vegetales. La variable rugosidad del terreno es excluida del análisis debido a su distribución más bien azarosa en el conjunto de la ciudad.

Tabla 16. Regresión múltiple entre las temperaturas y diferentes factores urbanos de Santiago

Modelo	R Múltiple	R ² Múltiple	R ² ajustado	Error Std.	Cambio en R ²
1	0,95	0,89	0,89	7,06	0,89
2	0,96	0,91	0,91	6,46	0,02
3	0,96	0,92	0,92	6,40	0,01
4	0,96	0,92	0,92	6,38	0,00
5	0,96	0,92	0,92	6,38	0,00

Fuente: Elaboración propia

Modelo 1 Predictores: Elevación

Modelo 2 Predictores: Elevación, Densidad de población

Modelo 3 Predictores: Elevación, Densidad de población, Distancia a los ríos

Modelo 4 Predictores: Elevación, Densidad de población, Distancia a los ríos , NDVI,

Modelo 5 Predictores: Elevación, Densidad de población, NDVI, Distancia a los ríos, Rugosidad

El modelo 4 seleccionado, entrega los coeficientes de la ecuación de regresión lineal múltiple que deben ser aplicados para estimar la temperatura de superficie. La siguiente tabla muestra los coeficientes beta sin estandarizar los datos y el error estándar alcanzado.

Tabla 17. Resultados del modelo 4 de regresión múltiple para Santiago

Modelo	Predictores	B	Error Std.
4	Elevación	0,02725136	0,00008
	Densidad de población	0,03577087	0,00038
	Distancia a los ríos	0,00121658	0,21622
	NDVI	4,30302669	0,00004

Fuente: Elaboración propia

Se concluye que la elevación es uno de los factores más influyentes en la distribución de las temperaturas en la ciudad de Santiago, junto con las densidades de población y el NDVI. Aplicando los resultados de la ecuación se puede decir que a la hora del paso del satélite:

- Al aumentar la altura de al interior de la ciudad en 50 metros, la temperatura disminuye en 1,3°C, por lo cual a mayor altura menor temperatura;
- El incremento de la vegetación, expresada en el NDVI en +0,5, se reduce la temperatura en 2,15°C, es decir a mayor vegetación menor temperatura;
- Si la densidad de población aumenta en 50 habitantes por hectárea, la temperatura se incrementa en 1,8°C, lo cual significa que a mayor densidad mayor temperatura;

- Cada 500 metros más distante de un curso de agua, la temperatura se incrementa en 0,6°C (a mayor distancia de un curso de agua mayor temperatura).

La varianza total explicada por estas variables alcanza al 92%, lo cual permite estimar la temperatura superficial con una alta precisión. A partir de la distribución de la temperatura superficial se espera correlacionar la temperatura del aire para tener un cuadro más completo del comportamiento de esta significativa variable ambiental y ecológica al interior de la ciudad.

Si bien clásicamente la rugosidad del terreno ha sido considerada una de las variables más interesantes para explicar la distribución de las temperaturas, en el presente trabajo eso no ha quedado demostrado.

3.3 Relaciones espaciales entre las temperaturas de superficie y las diferentes coberturas y usos de suelo en los años 1998 y 2004

En esta sección se indaga sobre las relaciones existentes entre la distribución espacial de las temperaturas superficiales y los usos y coberturas de suelo de la ciudad de Santiago. De este modo se pretende conocer cómo los distintos usos y coberturas de suelo “urbano” afectan la componente térmica de los territorios, para así, proponer formas de mejorar la situación actual. Con el propósito de saber cómo han evolucionado ambas variables en los últimos años, se trabaja con información de 1998 y 2004.

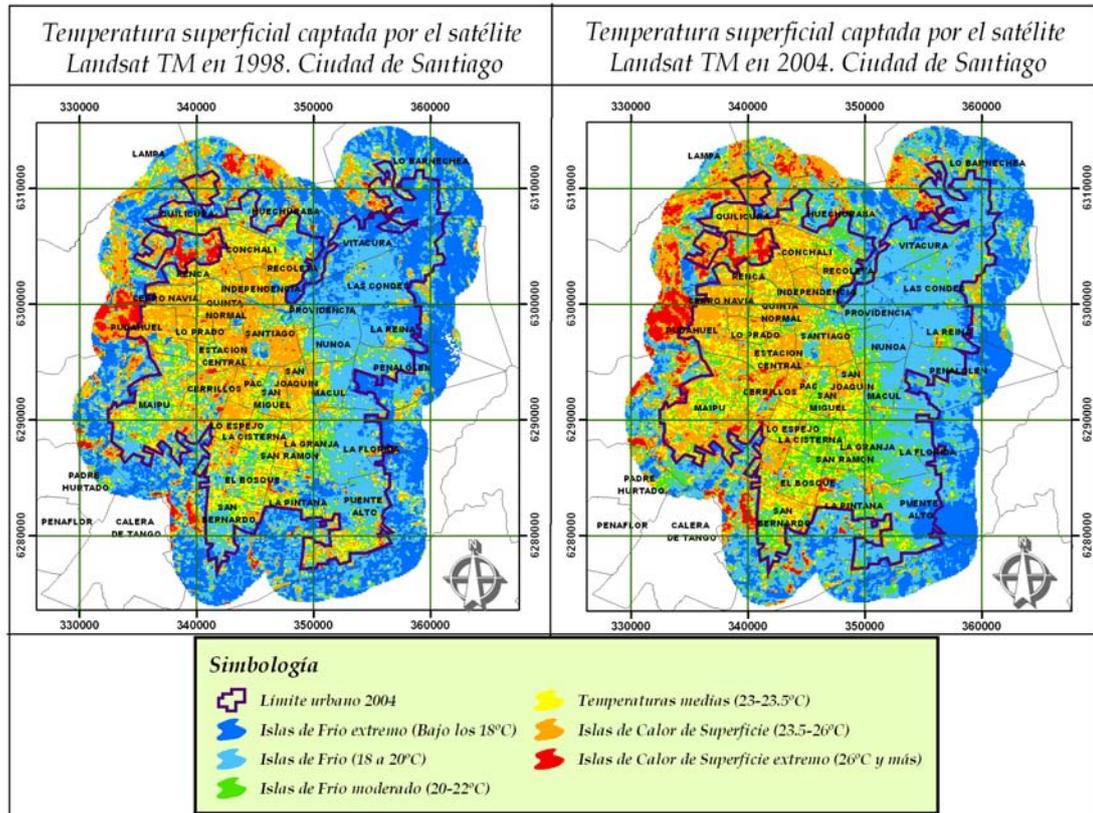
De esta manera, esta sección se divide en tres partes, la primera referida al análisis de las temperaturas en el periodo de observación seleccionado. Una

segunda parte muestra la distribución espacial de los usos de suelo. Finalmente, la tercera parte se hace cargo de establecer relaciones entre ambas variables.

3.3.1 Análisis de las temperaturas superficiales entre 1998 y el 2004 en la ciudad de Santiago

Las imágenes de satélite Landsat TM de verano de los años 1998 y 2004 no muestran grandes diferencias en sus patrones térmicos. Esencialmente se observa una ciudad que posee diferencias térmicas entre el piedemonte andino oriental y las condiciones del poniente. Se registran en ambas imágenes Islas de Calor No Urbanas, zonas de temperaturas altas localizadas hacia las comunas de Pudahuel y Cerro Navia (Figura N° 38). Las temperaturas registradas por el satélite Landsat TM muestran para los veranos de los años 1998 y 2004 un incremento térmico de $+2,8^{\circ}\text{C}$, lo cual querría decir que la ciudad de Santiago aumentó su temperatura promedio en $0,46^{\circ}\text{C}/\text{año}$, lo cual en gran medida se puede deber al reemplazo de usos y coberturas de suelo naturales por urbanas y el aumento de la población.

Figura 38. Distribución de las temperaturas superficiales de Santiago. 1998 y 2004.

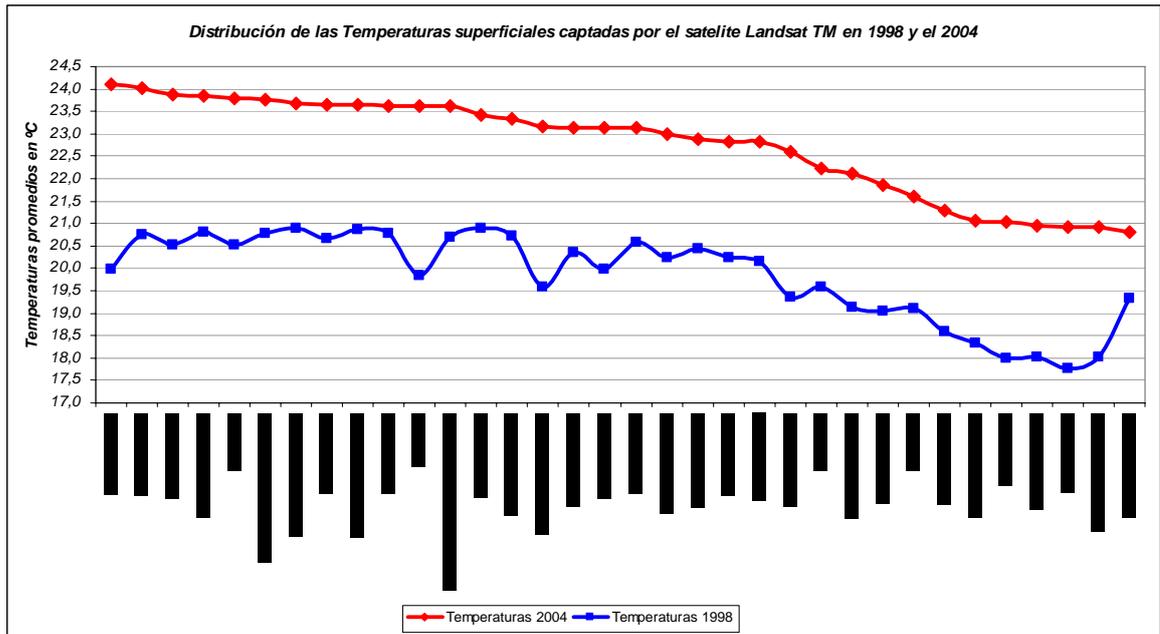


Fuente: Elaboración propia en base a imágenes Landsat TM.

La figura 39 permite observar que las diferencias de temperaturas superficiales varían entre +4°C y +1,5°C según las comunas. Las comunas del poniente son más cálidas que las del oriente, y las que mayor aumento presentaron son Quilicura, Maipú y San Bernardo, las cuales aumentaron su superficie urbana en el periodo. Llama la atención el caso de Puente Alto, comuna que presenta condiciones más frescas el año 2004. Este caso en particular, sin embargo, es resultado de la presencia de una nube atmosférica de pequeño tamaño, muy fría (según el satélite, mostrando temperaturas inferiores a 5°C), que hace descender

las temperaturas de esa comuna y que no pudo ser filtrada en su totalidad en la etapa de procesamiento de la imagen satelital.

Figura 39. Distribución de las temperaturas superficiales promedio de 1998 y 2004 según comuna.



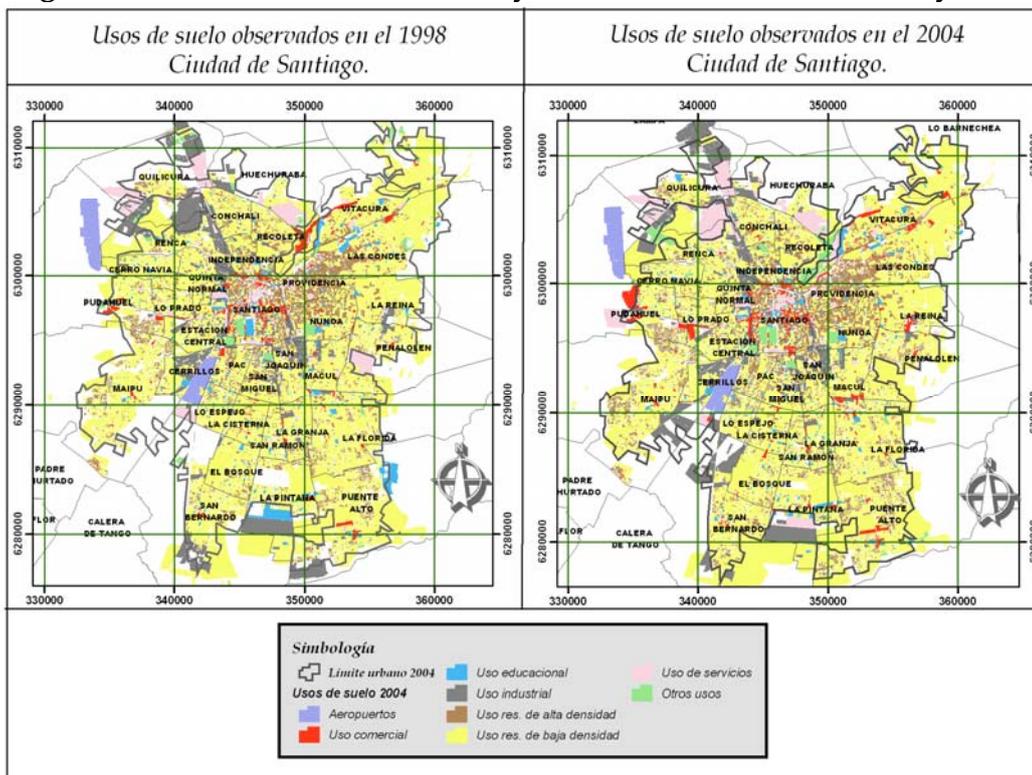
Fuente: Elaboración propia

La regularidad de la tendencia térmica del 2004 en comparación con la sinuosidad de la distribución de temperaturas comunales del 1998 se explica debido a que el avance de la cobertura urbana muestra comunas con un alto incremento de terrenos urbanos, destacando Quilicura, Maipú y San Bernardo. Dicho de otra manera, dichas comunas aumentaron en el periodo sus temperaturas superficiales más que otras comunas debido a la ocupación de terrenos agrícolas y abiertos.

3.3.2 Análisis de la distribución espacial de los usos y coberturas de suelo

Los usos de suelo de Santiago han presentado cambios muy localizados entre 1998 y 2004. Sólo se observa un aumento de las superficies urbanas hacia las comunas periféricas. Los cambios principales se observan en los usos del suelo destinados a comercio, industrias y residencias. Referido al comercio, se puede decir que la proliferación de centros comerciales tipo “mall” ha sido una tónica de los últimos años. Respecto al uso industrial se observa claramente que se ha hecho más periférico en los últimos años, dirigiéndose a zonas como las comunas de Quilicura, San Bernardo y Maipú. Finalmente, los usos residenciales han mostrado una densificación del centro de Santiago y un crecimiento de baja altura hacia las periferias (figura 40)

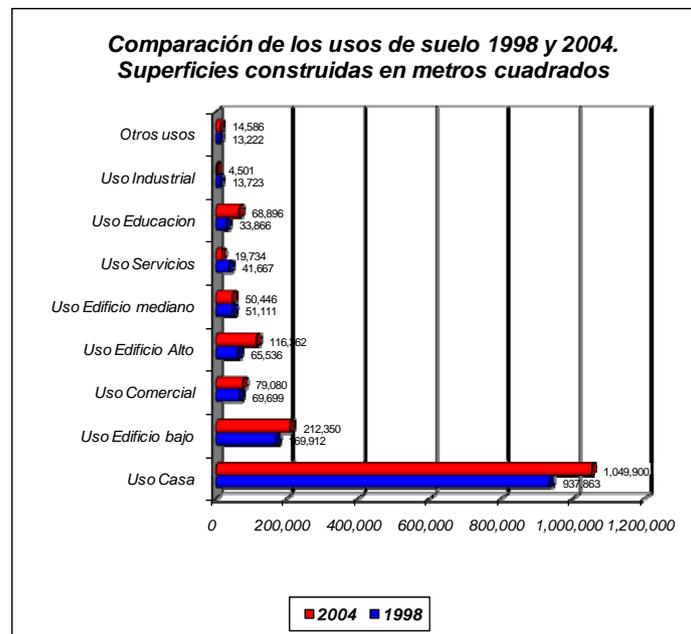
Figura 40. Distribución de los usos y coberturas de suelo en 1998 y 2004.



Fuente: Elaboración propia

Al comparar los usos y coberturas de suelo entre 1998 y 2004 se tiene que el uso residencial (casa, edificio bajo y alto) presenta el mayor crecimiento en los últimos años, seguido por las construcciones destinadas a educación y comercio. Terrenos destinados a uso industrial y servicios muestran un retroceso en el periodo, tal como se observa en la figura 41.

Figura 41. Comparación entre los usos y coberturas de suelo entre 1998 y 2004.



Fuente: Elaboración propia

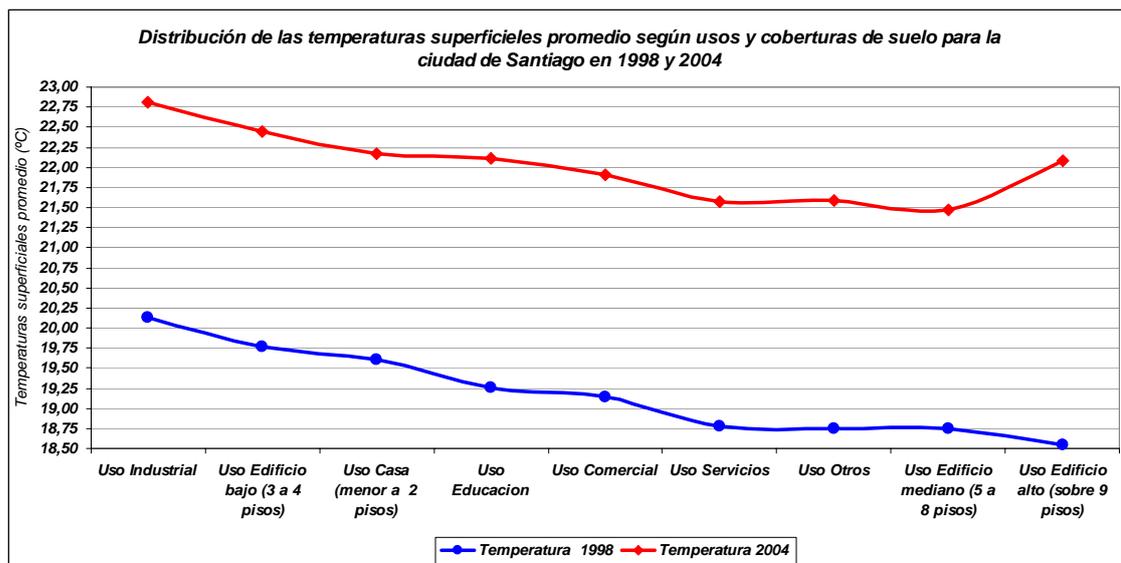
En definitiva, el cambio más importante de coberturas de suelo corresponde a la sustitución de coberturas de vegetación naturales (matorral) y rurales (cultivos) por suelo residencial y comercial, mientras que los usos urbanos que han retrocedido son industria y servicios. Estos últimos referidos a oficinas que hoy tienden a localizarse en edificios que reducen las superficies de sus terrenos.

3.3.3 Análisis de las temperaturas superficiales según usos de suelo de la ciudad de Santiago

Para realizar este análisis se cuenta por un lado con la información de las temperaturas de superficie de 1998 y 2004, representadas a nivel de píxeles de 120 metros. La otra entrada de datos corresponde a los usos y coberturas de suelo a nivel de predios individuales, representados por puntos. De esta manera se aplica un proceso de relación espacial entre las temperaturas y los usos de suelo, imputando a cada registro de uso de suelo su temperatura. Posteriormente a cada uso y cobertura de suelo se le calcula su temperatura promedio en grados Celsius.

De dicha manera, y a nivel agregado a escala de la ciudad, se conoce la temperatura promedio que posee cada uso y cobertura de suelo, tal como se observa en la figura 42.

Figura 42. Distribución de las temperaturas superficiales promedios de 1998 y 2004 según usos y coberturas de suelo.



Fuente: Elaboración propia

La figura anterior muestra que el uso de suelo que concentra mayor temperatura corresponde al industrial, localizado principalmente en Quilicura y San Bernardo, y que registra un aumento de $+2,6^{\circ}\text{C}$ en el periodo. Este uso es seguido térmicamente por edificios residenciales bajos (3 a 4 pisos) que en general corresponden a viviendas sociales con escasas áreas verdes y localizadas en el Sur y Nor-Poniente de la ciudad. Estas áreas registraron un aumento de $+2,6^{\circ}\text{C}$ en el periodo. El tercer uso de suelo que concentra mayor temperatura es el de vivienda baja (casas), con un aumento de $+2,5^{\circ}\text{C}$, distribuidas por toda la ciudad. Una menor temperatura registraron los usos de suelo correspondiente a instalaciones de educación, comercio y otros, que varían entre 18°C y 22°C , y con diferencias de temperatura de $+2,9^{\circ}\text{C}$. Ello se puede explicar por el hecho de que estos usos de suelo en general son acompañados por amplias áreas verdes. Muy similar a lo anterior ocurre con los edificios medianos y altos (mayores a 5 pisos), los cuales poseen las más bajas temperaturas de la ciudad, y se localizan actualmente en comunas como Santiago, Provincia, Ñuñoa, San Miguel, Las Condes y Vitacura. Las diferencias térmicas observadas, de $+2,7^{\circ}\text{C}$ en edificios hasta 8 pisos y $+3,5^{\circ}\text{C}$ en edificios mayores a 9 pisos, se pueden explicar por la existencia de menores espacios verdes en la co-propiedad o bien, a los efectos tempranos de la urbanización (limpieza de sitio, construcción, entrega del edificio, etc.) que han impedido el establecimiento de áreas verdes.

3.4 Relaciones entre las temperaturas de superficie y los niveles socioeconómicos a través de un modelo de regresión logarítmica

En esta sección se exploran las relaciones espaciales entre las temperaturas superficiales y los niveles socioeconómicos de la población, con el propósito de contribuir a la elaboración de propuestas de gestión y planificación de los espacios de la ciudad que disminuyan la segregación socioambiental entre sus habitantes.

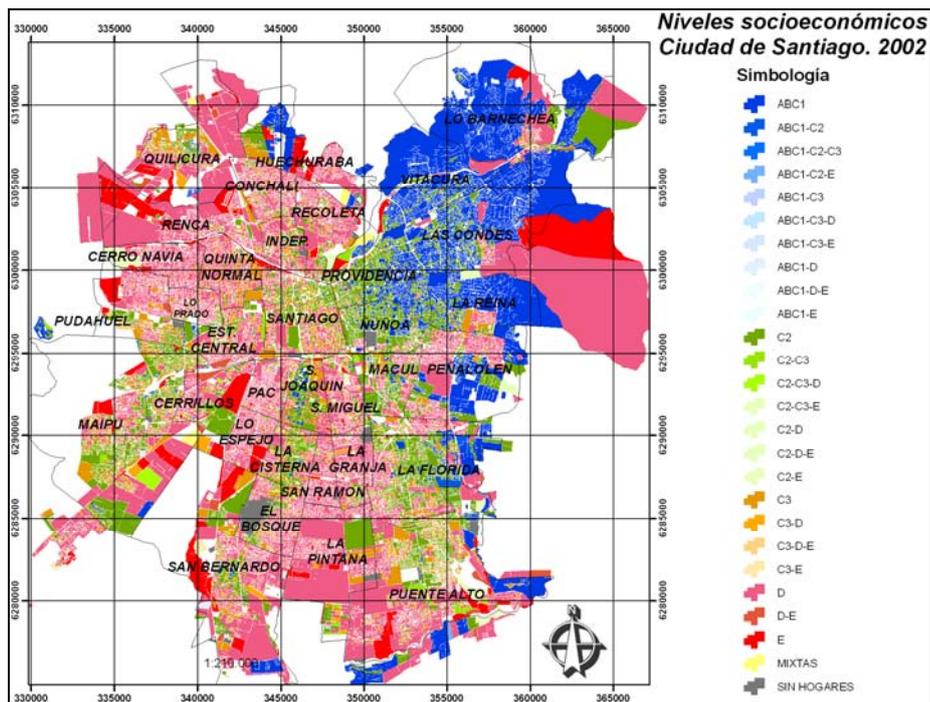
Para ello se establece la relación entre las temperatura de emisión de superficie medida con una imagen Landsat TM de diciembre del 2004 y los niveles socioeconómicos (NSE) calculados a partir del censo 2002 a nivel de manzanas INE, las cuales se relacionan a través de dos maneras. Una de ellas fue a través de la definición de tres categorías de temperaturas (alta, media y baja) y los estratos socioeconómicos de la población de Santiago clasificados en cinco niveles. La segunda de ellas fue relacionando los 5 niveles socioeconómicos con las temperaturas promedio de cada uno de ellos, obteniendo como resultado principal una ecuación de regresión bi-variada de tipo logarítmica.

3.4.1 Análisis de los niveles socioeconómicos de la ciudad de Santiago

Los niveles socioeconómicos fueron calculados a escala de manzanas, aplicando la matriz de ADIMARK (2004). Los resultados proporcionaron el número de hogares por manzanas pertenecientes a los cinco estratos socioeconómicos propuestos por esta clasificación. La distribución socio económica de los hogares al interior de las manzanas puede presentar una alta homogeneidad donde predomina netamente un estrato socioeconómico, o bien situaciones de mezcla,

en que en una misma manzana se localizan hogares de diversos estratos socioeconómicos. En este último caso se han clasificado las manzanas como diversas, en cuyo interior se presentan entre dos y tres estratos, y como manzanas mixtas, cuando registran la presencia de cuatro y más estratos socioeconómicos. Ello entrega una combinatoria de niveles socioeconómicos a nivel de manzanas que alcanza a 25 (5 tipos de manzanas homogéneas, es decir con un grupo social predominante, 19 tipos de manzanas de mezcla de grupos sociales y 1 tipo de manzana sin hogares), tal como se muestra en la siguiente figura.

Figura 43. Distribución espacial de los niveles socioeconómicos de la ciudad de Santiago.



Fuente: Elaboración propia

La figura anterior muestra que los estratos de altos ingresos (ABC1) se localizan preferentemente hacia las comunas de Providencia, Las Condes, Vitacura, La

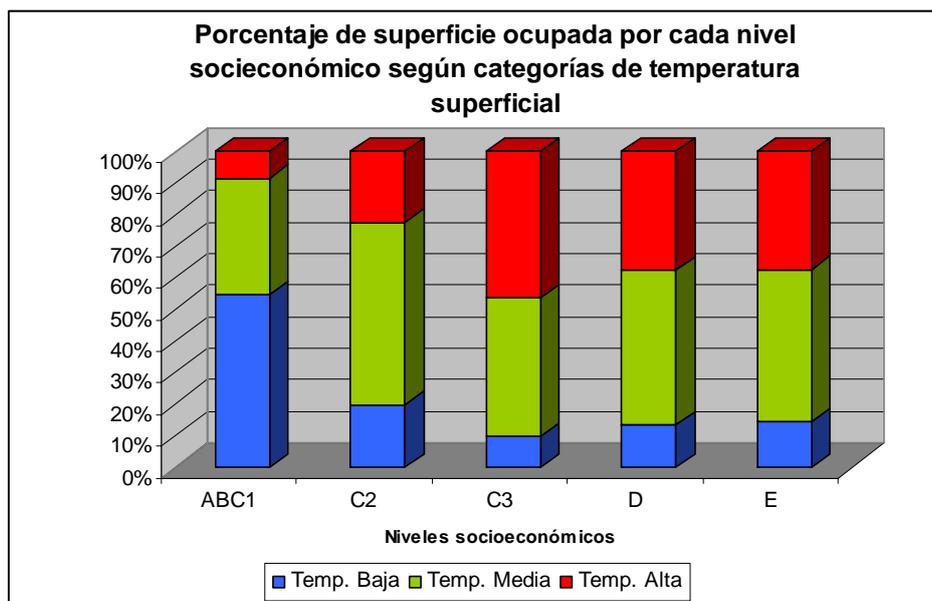
Reina y Lo Barnechea, abarcando además parte de las comunas de Ñuñoa y Huechuraba. En forma de islas se localizan en el piedemonte de Santiago, por sobre el canal San Carlos, parte sur de Puente Alto y San Bernardo, Lomas de Lo Aguirre en Pudahuel y Pedro Fontova en Huechuraba. En las áreas centrales destaca la localización de este grupo hacia San Miguel, en el barrio el Llano, pero en condiciones más diversas. Los hogares de estrato socioeconómico medio-alto (C2) se emplazan en barrios del oriente de la ciudad (desde Vicuña Mackenna), algunos sectores de Gran Avenida y Pajaritos. Los hogares de condiciones de ingresos medios (C3) prácticamente coexisten con el resto de los estratos en la misma manzana, destacando en comunas tales como Quilicura, Maipú y La Florida. Los niveles bajos (D) se presentan en gran parte de las comunas del poniente, alcanzando la mayor representación espacial y destacando fuertemente en algunas manzanas de Renca, Pudahuel y La Pintana, y algunos “bolsones de pobreza” en Peñalolén, La Reina, Las Condes y Lo Barnechea. Esta última situación se repite, pero de manera más aguda y localizada en los estratos socioeconómicos muy bajos (E).

Lo anterior permite confirmar que esta ciudad está altamente segregada socialmente, tal como lo señala SABATINI et al. (2005), lo que se advierte esencialmente entre los grupos de ingresos altos y muy bajos (ABC1 y E), los cuales ocupan áreas definidas como “bolsones de riqueza y pobreza”. El resto de los grupos socioeconómicos son más permeables a coexistir sobre un mismo espacio.

3.4.2 Relaciones entre los niveles socioeconómicos y las temperaturas superficiales

En primera instancia se clasifica las temperaturas superficiales en tres clases: temperaturas bajas (menores a 20°C), temperaturas medias (20° a 23,31°C, ± 1 desviación estándar en torno a la media) y temperaturas altas (mayores a 23,31°C), cuyos patrones espaciales de distribución son correlacionados con la distribución espacial de los estratos socioeconómicos de la población, para conocer su frecuencia (figura 44).

Figura 44. Relación entre el porcentaje de área ocupada por cada NSE y las temperaturas superficiales.

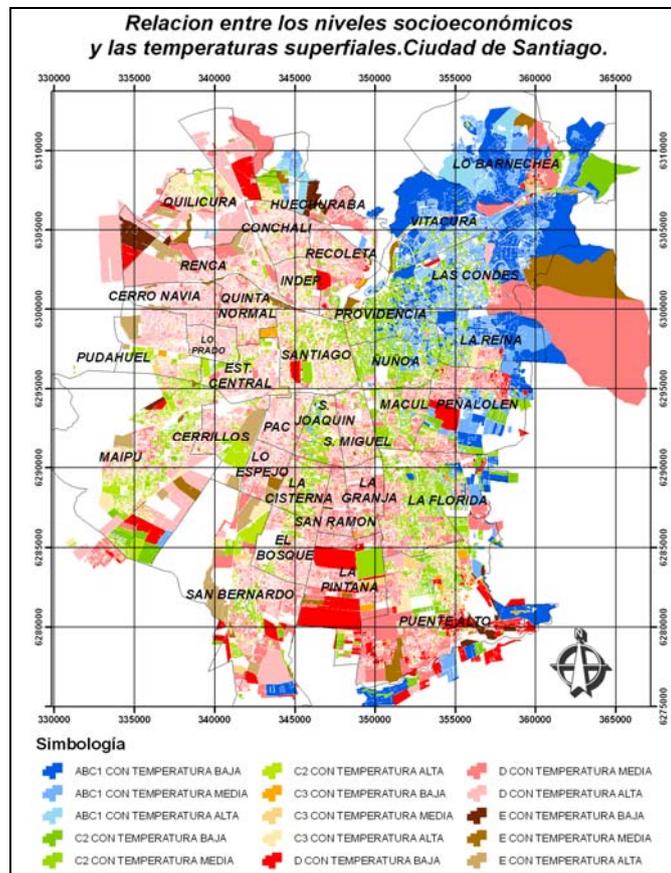


Fuente: Elaboración propia

La figura anterior muestra que las diversas clases de temperaturas se registran en las áreas de residencia de todos los grupos socioeconómicos. Sin embargo, en términos de frecuencia espacial, los niveles de altos ingresos (ABC1) poseen cerca del 50% de sus superficies en áreas de temperaturas bajas, mientras que los

otros estratos socioeconómicos sólo registran el 15% de las temperaturas menores a 20°C. Por otra parte, las áreas de temperaturas altas se concentran espacialmente en las áreas residenciales de los estratos medios, bajos y muy bajos. Esta misma relación se puede observar en la figura 45 a nivel de manzanas urbanas.

Figura 45. Relación entre niveles socioeconómico de la población y temperaturas superficiales a nivel de manzanas urbanas.



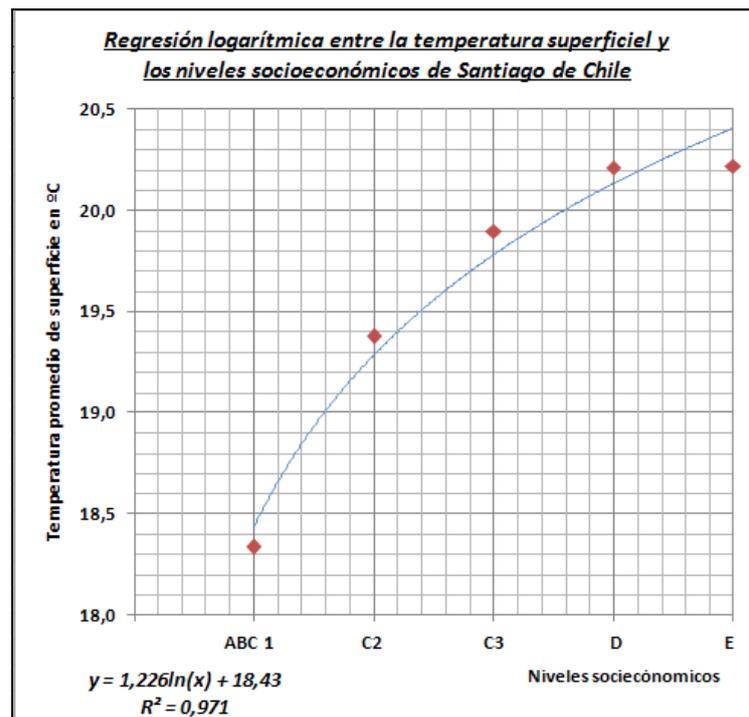
Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior destaca el hecho que existen áreas de residencia de la población de estratos socioeconómicos bajos (E), que poseen condiciones térmicas moderadas, y que se localizan cerca de parques urbanos y áreas verdes

de gran tamaño (Club Hípico, La Platina, zonas de cultivo cercanos al aeropuerto Arturo Merino Benítez y Parque Cousiño Macul).

Finalmente, con el fin de analizar la relación estadística entre los niveles socioeconómicos de la población de Santiago y la distribución de las temperaturas superficiales a nivel de temperaturas promedio, se estableció una función logarítmica entre ellas. La ecuación alcanza una varianza explicada (R^2) de 0,97 (la cual es muy alta) y sólo se alcanzan errores de 0,2°C entre el valor calculado y esperado, tal como se observa en la figura 46.

Figura 46. Regresión logarítmica entre las temperaturas superficiales y los niveles socioeconómicos de la población de Santiago.



Los niveles socioeconómicos se representan por valores numéricos de 1 a 5 (ABC1 igual 1, hasta E igual 5). El modelo de regresión logarítmica alcanza el 97,1% de explicación de varianza, mostrando que las áreas urbanas dónde se

localiza la población de más altos ingresos registran las menores temperaturas superficiales.

El análisis anterior permite concluir que la ciudad de Santiago no es sólo altamente segregada desde el punto de vista social sino que lo es también ambientalmente, y las elite ocupan (o recuperan) las áreas con las mejores condiciones ambientales de la ciudad, mientras que los niveles sociales medios, bajos y muy bajos no poseen buenas condiciones ambientales desde el punto de vista térmico. Es posible entonces hablar de una segregación socioambiental para referirse a las características del medio ambiente urbano, que representa las diferencias y controles sociales como el hecho más relevante.

4. DISCUSIÓN

4.1 Modelo de crecimiento de la ciudad y sus tendencias futuras

El crecimiento urbano observado para la ciudad de Santiago ha sido muy acelerado entre los años 1975 y 2004, duplicando su superficie, y acentuándose en el último periodo (1998-2004). Sobre dicho crecimiento DE MATTOS (1999) explica que este presenta características comunes en América Latina, principalmente a través de la metropolización, y destacando en ella el crecimiento periférico de Santiago (ORTIZ y ESCOLANO, 2005).

Las variables explicativas del crecimiento urbano de Santiago corresponden en orden decreciente de importancia a la cantidad y densidad de población, distancia al subcentros urbanos (Puente Alto y San Bernardo) y al centro de la ciudad, muy similar al análisis realizado por SUDHIRA et al.(2004), evidenciando la estrecha relación entre los porcentajes de área urbanizada y las

densidades de población a nivel global de la ciudad. Sin embargo, la ciudad de Santiago presenta una alta movilidad espacial de la población para propósitos laborales y de estudio, en áreas altamente densas desde el punto de vista de la construcción (Comuna de Santiago, Providencia y Las Condes) y presentando bajas densidades de población (ORTIZ y ESCOLANO, 2005), lo cual hace necesario que, para nuevos estudios de esta índole, su consideración sea relevante para entender mejor el comportamiento del crecimiento urbano.

El modelo de regresión múltiple resultante muestra una alta correlación y ajuste para explicar el crecimiento urbano que ocupa hasta un 30% de la superficie de la grilla (200 x 200 m), y dos tendencias a partir de dicho porcentaje, lo cual podría ser atribuible a la segregación residencial de Santiago (SABATINI et al., 2006) que muestra hacia la periferia diferentes niveles de ocupación de suelo según el nivel socioeconómico de la población, sin seguir las características radiales de las variables utilizadas con distancias euclidianas a centros y subcentros urbanos. En este sentido, el sector que muestra una baja explicación de su crecimiento por el modelo corresponde justamente a aquella comprendida por las comunas de Providencia, Las Condes y Vitacura, las cuales poseen a la población de los mayores ingresos de la ciudad.

Respecto al crecimiento urbano esperado para Santiago en las próximas décadas, se puede decir que continuarán las tendencias de sustitución de coberturas naturales y agrícolas en favor de usos urbanos, y fundamentalmente para residencias con diversas ocupaciones de suelo (ROMERO et al., 2006), manteniendo ritmos de hasta 2.000 hectáreas cada año. Esto resulta extremadamente preocupante si se considera que dicha sustitución de cubiertas trae consigo en urbanizaciones de poblaciones de bajos ingresos exposición a pésimas condiciones térmicas, y un agudizamiento de la intensidad de la isla de

calor urbana de Santiago expresada a través de archipiélagos de calor. Según HENRIQUEZ (2005), los modelos predictivos de cambios de estados de Markov, como la modelación del arreglo espacial a través de Autómatas Celulares, entregan un buen marco de referencia para plantear políticas y planes que ayuden a hacer más sustentable el crecimiento acelerado que se espera en el futuro, y con posibles efectos en la reducción de servicios ambientales (ROMERO, 2004) tales como las áreas verdes e islas de frío.

De esta manera, se valida parcialmente la hipótesis planteada, debido que se pueden diferenciar dos ciudades al interior de Santiago; una que se asocia más fuertemente a la distribución de las densidades de población, las redes de transporte (especialmente carreteras de alta velocidad), distancia al centro de la ciudad y otros centros urbanos conurbados; y otra que se explicaría más por el nivel de ingreso de la población de las comunas de Providencia, Las Condes y Vitacura, que pese a poseer alta ocupación de suelo, poseen bajas densidades de población, variable que justamente corresponde a más relevante para explicar el crecimiento urbano. Los valores de crecimiento predichos estadísticamente permiten extrapolar espacialmente el crecimiento espacial de la ciudad y sus efectos ambientales negativos. La incorporación de otras variables como movilidad laboral y de estudios, actividades económicas y los precios de suelo permitiría entender mejor la expansión de la ciudad.

4.2 Modelo explicativo de las temperaturas superficiales

El conocimiento de las variables más influyentes sobre el campo térmico de las ciudades ha sido asunto permanente de la climatología urbana; en primera instancia OKE (1987) plantea que la intensidad de las diferencias de temperatura

entre la ciudad y su entorno rural depende de los tamaños poblacionales, ajustando su modelo a ciudades europeas como norteamericanas. Sin embargo, no se debe desconocer que existen otras variables que intervienen en las temperaturas, como la topografía de la ciudad (CUADRAT et al., 2003 y 2005), la humedad del aire y de la superficie (PEÑA y ROMERO, 2006) la presencia de vegetación (YUAN y BAUER, 2007; ROMERO y SARRICOLEA, 2006) y la distribución de las densidades de población (CUADRAT et al., 2005; CHEN et al., 2001). En este sentido, se puede señalar que los análisis de OKE (1987) suponen una ciudad compacta, regular y homogénea, en que las densidades y los usos del suelo disminuyen su intensidad en forma sistemática y regular desde el centro a la periferia. La ciudad latinoamericana es un mosaico complejo y desordenado en que varían caóticamente las variables explicativas de las islas de calor, predominando los archipiélagos de calor antes que la forma de domo típica.

Los resultados indican para Santiago (a la hora de paso del satélite Landsat) que un aumento de la altura del terreno en 50 metros disminuye la temperatura en 1,3°C, lo cual significa que la posición altimétrica dentro de la cuenca es un factor diferenciador del tipo de clima a que se expone la población, tal como ya han señalado ROMERO y VINAGRE (1985) en su estudio de topoclimatología de la cuenca del Mapocho. Sin embargo, se debe precisar que dichos valores son válidos al interior de la ciudad, y no extrapolables por sobre los 1.000 metros sobre el nivel del mar.

Otra evidencia importante indica que un incremento del NDVI en 0,5 reduce la temperatura en 2,15°C, siendo el factor más influyente sobre ellas y en la mitigación de las islas de calor urbanas y de superficie. Ello significa que planes de reverdecimiento de la ciudad a partir de parques urbanos, localizados en las

comunidades con menores coberturas de vegetación tendría un efecto importante en la reducción de las temperaturas, siendo áreas prioritarias aquellas del sector poniente debido a que se poseen poca vegetación y se encuentran en la zona más baja altitudinalmente dentro de la cuenca, lo cual compensaría su posición topográfica.

Por otra parte, si bien un aumento de la densidad de población en 50 habitantes por hectárea incrementaría la temperatura en $1,8^{\circ}\text{C}$, ello no ocurre necesariamente en áreas con desarrollo vertical de las edificaciones, sino más bien en aquellas áreas densas que típicamente se observan en la ciudad, correspondientes a conjuntos habitacionales de baja altura y con una trama urbana densa, tal como se observa en Cerro Navia, Maipú, Puente Alto y Lo Espejo. Por ello, se requiere profundizar más en los tipos de tramas urbanas que específicamente en las densidades de población desde el punto de vista de la planificación ambiental, debido a que, este resultado se contrapone fuertemente con el desarrollo urbano.

Parece ser menos relevante desde el punto de vista de su impacto es el hecho cierto que un aumento de 500 metros de distancia a un curso de agua la temperatura se incrementa en $0,6^{\circ}\text{C}$. No obstante, la falta de cuidado de los corredores fluviales de Santiago, su entubamiento por los malos olores y la baja calidad ambiental de sus entornos explicarían esta afirmación, ya que sólo se destaca su efecto como corredores de ventilación. Se deberá entonces, potenciar sus funciones reguladoras de las temperaturas con diseños de riberas parques a lo largo de los cauces urbanos, sobretodo en las áreas más cálidas de la ciudad.

De todas las variables explicativas el que resultaría más adecuado intervenir es la vegetación al interior de la ciudad (expresada en el índice NDVI), obteniendo

una importante regulación en las temperaturas a través del enfriamiento de ellas y compensando así las zonas más cálidas, tal como concluyeron para ciudades europeas CUADRAT et al. (2003 y 2005) y KLYSIK y FORTUNIAK (1999); y corroborado por YUAN y BAUER (2007) utilizando imágenes Landsat.

Por lo tanto, se valida la hipótesis planteada, la cual afirma que, la configuración de las temperaturas superficiales de las ciudades y la conformación de las islas de calor urbanas de superficie (ICUs) se explicarían tanto por el crecimiento espacial de la Santiago, la concentración de la población, la distancia a fuentes húmedas, la configuración topográfica de la cuenca y presencia de áreas verdes al interior de la ciudad. Debido a que las mediciones fueron realizadas en verano, valdría la pena realizar los mismos análisis para otras estaciones del año, particularmente, durante el invierno, puesto que se modifica el patrón térmico de la temperatura del aire (MOLINA, 2007), y por ende, también las temperaturas superficiales y de la vegetación urbana.

4.3 Relaciones entre las temperaturas y los usos de y coberturas de suelo

Las investigaciones que abordan el tema de las relaciones entre los usos de suelo y las temperaturas han sido recientes, pues las primeras indagaciones en este sentido tenían su foco en el comportamiento radiativo de los materiales que componen la ciudad (cemento, asfalto, ladrillo, etc.), tal como señala MORENO (1994). No obstante, actualmente el análisis plantea conocer sinergeticamente las formas de hacer ciudad, a lo cual OKE (1995) ha denominado distritos climáticos, los cuáles han clasificados según la forma tridimensional de las

edificaciones, materialidad, entorno y régimen de vientos. En este sentido, existen métodos menos sofisticados de lograr estas unidades de gestión a través de los usos de suelo (CHEN et al, 2001). Para Santiago se han encontrado diferencias de temperatura según usos de suelo de 2°C, entre aquellas áreas más frías (residencias de más de 5 pisos) y las zonas más cálidas (Industrias). En el caso de Singapur, CHEN et al. (2001) detectó situaciones similares a las encontradas para Santiago de Chile a nivel global de la ciudad. Complementariamente a ello, MOLINA (2007) ha comprobado en el caso de las temperaturas del aire diferencias significativas al interior de áreas con un mismo uso de suelo urbano, lo cual se debe a los diseños urbanos, y que permiten observar a otra escala el problema de micro- islas de calor en Santiago.

Los patrones temporales de las temperaturas entre 1998 y el 2004 muestran un aumento de 2,8°C al interior del límite urbano del 2004. Ello puede significar que las ciudades en general están aumentando sus temperaturas, y así contribuyendo al calentamiento global, lo cual ya ha sido concluido por JAUREGUI (2005) para ciudades mexicanas, a través de una observación sistemática de la variación de las temperaturas. Los resultados obtenidos para Santiago, sólo permiten que la afirmación planteada de aumento de las temperaturas superficiales entre 1998 y el 2004 deba ser validada en un horizonte de tiempo de un mínimo de 10 años, tal como lo realizado en México.

Por lo tanto, se valida la hipótesis planteada que afirma que, las temperaturas superficiales y las coberturas y los usos de suelo deberían estar estrechamente correlacionados, y que los usos de carácter industrial deberían poseer mayores temperaturas que las áreas comerciales, servicios y residenciales.

4.4 Relaciones entre las temperaturas y los niveles socioeconómicos

Los resultados indican que las áreas donde predominan las residencias de las familias con mayor nivel de ingreso económico poseen una mejor condición ambiental, desde el punto de vista de las temperaturas superficiales, y que, en cambio, las temperaturas superficiales más cálidas se registran en las áreas de residencia de los estratos socioeconómicos de menores ingresos. La relación entre temperatura de emisión y condición socioeconómica es de tipo logarítmica y con un ajuste de R^2 de 0,97.

En la literatura internacional destaca el caso analizado por PRASHAD (2004) para la ciudad de Phoenix, la cual alcanza resultados comparables con los de esta tesis, pues compara las temperaturas y áreas verdes con los niveles socioeconómicos de la población. También para Santiago, ESCOBEDO et al. (2006) concluye que las comunas de mayor ingreso poseen mejores y más diversa áreas verdes públicas que las comunas más pobres de la ciudad. Sin embargo, ambos trabajos difieren en las escalas de observación, MOLINA (2007) ha demostrado en el caso de Santiago que las diferencias presentan forma de micro-islas de calor, y dependen de cambios en la densidad habitacional y en los diseños urbanos. VAZQUEZ y ROMERO (2007) señalan que la recuperación de sitios urbanizados no depende de la edad de la villa o centro residencial como se ha indicado para ciudades norteamericanas, sino más bien de la capacidad adquisitiva de las familias residentes para intervenir su medio ambiente. Los sectores de menores ingresos de la ciudad reciben medios ambientes urbanos de peor calidad que los sectores más acomodados en el momento de instalarse en la ciudad. Al cabo de veinte años, los medio ambientes de los habitantes de menores ingresos han disminuido su calidad

mientras que los de los sectores más acomodados los han mejorado substancialmente, aumentando la brecha entre unos y otros. A ello, se puede agregar que según OKE (1987), la vegetación arbórea es mejor regulador térmico que la vegetación de baja altura o rasa. En nuestro estudio se observa que la mayoría de las calles importantes de las comunas de altos ingresos poseen árboles con amplio dosel, dado que en dichos las calles son anchas y con presencia de antejardines, y que son cuidadas y mantenidas por los propios habitantes

Ello valida la hipótesis planteada, que señala que las condiciones socioeconómicas de los hogares de la ciudad de Santiago influyen fuertemente en la generación y características de las islas de calor debido a que controlan las densidades edificadas, la localización topográfica dentro de la cuenca y la existencia y superficie de las áreas verdes.

5. CONCLUSIONES

La superficie ocupada por la ciudad de Santiago ha aumentado en 30.000 hectáreas en los últimos treinta años, sustituyendo cubiertas superficiales de vegetación densa y dispersa y suelos agrícolas, alterando significativamente las temperaturas superficiales, lo cual se explica debido a que las áreas vegetadas poseen menores temperaturas que aquellas áreas construidas. El crecimiento de la ciudad se ha realizado especialmente por acreción de bordes de áreas urbanas, aproximándose a los centros de las ciudades satelitales y alejándose del centro histórico de la ciudad, todo lo cual explica la extensión y magnitud de las islas y archipiélagos de calor.

El periodo de mayor crecimiento de la superficie urbana se observó entre los años 1998 y 2004, alcanzando a 1.750 ha/año, y orientándose hacia las comunas periféricas de Maipú, Puente Alto, La Florida, San Bernardo y Quilicura. Las variables que contribuyen a explicar dicho crecimiento corresponden directamente a las densidades de población y distancia a San Bernardo, e inversamente a las distancias al centro de Santiago, Puente Alto y la distancia a la vialidad urbana. Ello permite concluir que existe un gradiente de disminución de superficie ocupada cuando se incrementa la distancia al centro de Santiago, del centro de Puente Alto y a la vialidad urbana; así como también, se puede señalar que al aumentar la distancia al centro de San Bernardo aumenta la superficie urbana, lo cual ocurre de igual modo con el incremento de las densidades de población. Sin embargo, todo ello es cierto para una parte de la ciudad Santiago, exceptuando las comunas del cono de mayores ingresos de la población, correspondiente a las comunas de Providencia, Las Condes y Vitacura, debido a que ellas no ven explicada su superficie construida por las

densidades de población, sino más bien por la presión de suelo para actividades económicas. Por ello, se estima conveniente tratarlas como un área que debe ser modelada con otras variables explicativas.

Respecto a la predicción de superficie urbana de Santiago hacia el año 2020, se estima que ella tendrá notables efectos sobre la sustentabilidad ambiental futura, pues aumenta entre los años 2004 y 2020 cerca de 30.000 hectáreas la extensión urbana, lo cual implicaría por reducción de superficies naturales y vegetadas una mayor dimensión y magnitud de las temperaturas de las islas y archipiélagos de calor, y con ello, la reducción de espacios abiertos que favorezcan la ventilación del aire de la cuenca de Santiago. Se recomienda que el crecimiento urbano se oriente a evitar mayor expansión espacial y se limite a ocupar terrenos ya urbanizados, para disminuir la posibilidad cierta de replicar el crecimiento modelado para el año 2020; o bien, proponer medidas compensatorias para aprobar proyectos urbanos fuera del límite actual de la ciudad, obligando a forestar áreas equivalentes a las superficies urbanizadas, pues ellas reducen las temperaturas urbanas según los resultados obtenidos.

Las temperaturas superficiales de la ciudad de Santiago en el año 2004 a la hora de paso del satélite Landsat son en promedio 3,8° Celsius más cálida que su entorno rural, pese a que los núcleos de mayor temperatura se localizan en suelos no urbanos de Pudahuel, de cenizas volcánicas, y denominadas islas de calor no urbanas. Respecto a las variables explicativas de la distribución de las temperaturas superficiales, se determinó que ellas se relacionan inversamente con la elevación topográfica de la ciudad y con la productividad vegetal, siendo las comunas del sector oriente las favorecidas por dicha relación, pues presentan una ubicación geográfica privilegiada al poseer mayor nivel de altitud y mayores niveles de vegetación, que otras áreas de la ciudad, lo cual resulta

llamativo si a ello se agrega que la población de mayores ingresos se localiza preferentemente en dicho sector.

La distancia a los ríos o la rugosidad de las edificaciones son menos relevantes para explicar las temperaturas superficiales, en la medida que no manifiestan variaciones espaciales significativas. La asociación espacial entre temperaturas superficiales, vegetación y elevación; y la relación entre éstas, y la división social del espacio urbano, representa la importancia de la segregación socio-espacial sobre las condiciones ambientales de la ciudad latinoamericana. La continuación de los procesos ilimitados de crecimiento de las áreas urbanas debiera acentuar la presencia y magnitud de las islas de calor de superficie y con ello, los efectos adversos sobre la salud y bienestar de la población en general y de los estratos de menores ingresos en particular.

Si bien, clásicamente la rugosidad de las edificaciones ha sido considerada una de las variables explicativas más importante en la distribución de las temperaturas al interior de las ciudades, debido al efecto de cañón urbano que produce el encierro de calor entre las estructuras construidas, esta tesis reconoce, que esta variable a la hora del paso del satélite Landsat, no es relevante, debido a su alcance meso-escalar y además, que en la mañana, los materiales que componen la ciudad comienzan a absorber lentamente calor, el cual es acumulado y liberado algunas horas luego de la puesta de sol. Esto, sólo descarta la importancia de la rugosidad de las edificaciones en la mañana y no durante las noches, pues esto último no ha sido analizado para Santiago.

En relación con la evolución temporal de las temperaturas entre las imágenes de los años 1998 y el 2004 se evidencia un aumento de 2,8° Celsius, pese a la disminución del área construida para el uso industrial en la ciudad de Santiago,

que paso de 13.723 m² a 4.501 m² en dicho periodo. Cabe destacar que el uso de suelo industrial es el que más concentra temperaturas y genera micro-islas de calor al interior de la ciudad. Entonces, el aumento de las temperaturas en el periodo 1998 y 2004 se debe al incremento de las superficies de otros usos de suelo, tales como residencial (bajo 5 pisos de altura), educacional y comercial. Los usos de suelo que poseen menores temperaturas superficiales al paso del satélite corresponden a usos residenciales en altura (sobre 5 pisos), los cuales poseen en general áreas verdes. Cabe señalar que esto funciona a meso-escala (nivel agregado para toda la ciudad), pues a nivel de micro-escala las diferencias internas un mismo uso de suelo son notables y tratadas por MOLINA (2007) en el caso de Santiago.

Finalmente, la población correspondiente a los niveles socioeconómicos más altos se emplazan en las áreas que poseen las mejores condiciones ambientales, tanto desde el punto de vista térmico (bajas temperaturas en verano, lo cual las hacen más confortables) y de vegetación urbana (áreas verdes privadas y públicas), mientras que la población de los estratos sociales siguientes (C2, C3, D y E) se localizan en las áreas que presentan mayores temperaturas y menores áreas verdes, tanto públicas como privada. Por ello, se concluye que, al intervenir la vegetación en las áreas más cálidas, asociados a población de clase media y pobres se puede atenuar las condiciones térmicas de su medio ambiente, reduciendo así la brecha ambiental de los habitantes de Santiago.

6. BIBLIOGRAFIA

ADIMARK, 2004. Mapa socioeconómico de Chile. Nivel socioeconómico de los hogares de Chile basados en datos del Censo de Población y Vivienda 2002. 23pp. www.adimark.cl/medios/estudios/Mapa_Socioeconomico_de_chile.pdf consultada el 19 de Octubre del 2006.

ALTMAN, D., 1991. Practical statistics for medical research. New York: Chapman and Hall.

ALONSO, W. 1964. Location and land use: toward a general theory of land rent. Harvard University Press, Cambridge.

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.

AZOCAR, G., R. SANHUEZA y C. HENRIQUEZ, 2003. Cambio en los patrones de crecimiento en una ciudad intermedia: el caso de Chillán en Chile Central. *EURE (Santiago)*, ago. 2003, vol.29, no.87, p.79-82. ISSN 0250-7161.

BATTY, M., P. LONGLEY, 1994. Fractal Cities. A Geometry of Form and Function. Academic Press, London.

BATTY, M., Y. XIE, 1994. Urban analysis in a GIS environment: population density modelling using ARC/INFO, in Spatial Analysis and GIS. S. Fotheringham and P. Rogerson eds. Taylor&Francis, Londres, pp. 189-219.

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

BLOWERS, A, 1993. Planning for a sustainable environment. A report by Town and County Planning Association. Earthscan, Londres

BREHENY, M, 1992. The compact City: an Introduction. *Built Environment*, 18:4, pp. 241-46

BREHENY, M, 1996. Centrists, Decentrists and Compromisers: Views on the Future of Urban Form. In *The Compact City: A Sustainable Urban Form?* A. Jenks, I Burton and R Williams eds. E&FN Spon, Londres.

CHEN, P., S. LIEW, L. KWON, 2001. Dependence of urban temperature elevation on land cover types. 22nd Asian conference on remote sensing. Singapore. 5 pp.

CHEN, Y. and N. WONG, 2006. Thermal benefits of city parks. *Energy and Buildings* 38:105-120.

CHUVIECO, E., 2002. Teledetección ambiental, la observación de la tierra desde la tierra. Impreso en España por Ariel Ciencia. 586 pp

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., S. VICENTE-SERRANO y M. SAZ, 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.º 40 - 2005, págs. 311-327.

DE MATTOS, C., 1999. Santiago de Chile, globalización y expansión metropolitana: lo que existía sigue existiendo. Revista Eure. 76:29-56.

EASTMAN, J., J. MCKENDRY, M. FULK, 1995. Change and Time Series Analysis. United Nations Institute for Training and Research/Clark Labs for Cartographic Technology and Geographic Analysis, Clark University, Worcester, MA 01610, USA.

ELLIASSON, I.,1994. Urban-suburban-rural air temperature differences related to street geometry. Physical Geography, 15: 1-22.

ESCOBEDO, F., D. NOWAK, J. WAGNER, C. DE LA MAZA, M. RODRIGUEZ, D. CRANE, J. HERNANDEZ, 2006. The socioeconomics and management of Santiago de Chile's public urban forests. Urban Forestry & Urban Greening 4:105-114.

ESRI 2006a. Arcgis Spatial Analyst Tutorial. Printed in the United States of America, ESRI, Author Jill Willison. 64 p.p.

ESRI 2006b. Arcgis 3D Analyst Tutorial. Printed in the United States of America, ESRI, Author: Nathan Shepard, Clayton Crawford, Steve Bratt, Bob Booth. 82 p.p.

ESCOLANO, S. 2002. Densidad de población y sustentabilidad en la ciudad de Zaragoza, en Longares Alardeen, L. A. y Peña Monné, J. L. (Ed.): Aportaciones geográficas en memoria del profesor L. Miguel Yetano Ruiz. Zaragoza, Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza, pp. 173-182.

GOODCHILD, B., 1994. Housing design, urban form and sustainable development. Reflections on the future residential landscape. *Town Planning Review*, 65:(2), pp. 143-57.

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.

HAGGETT, P., 1988. Geografía, una síntesis moderna. Editorial Omega. Barcelona España.

HENRIQUEZ, C., 2005. Modelación, impacto ambiental y sustentabilidad del crecimiento urbano en las ciudades intermedias de Chillán y Los Ángeles. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias Ambientales, Universidad de Concepción. pp.310.

HOGAN, A., M. FERRICK, 1988. Observations in nonurban heat islands. *Journal of Applied Meteorology* 37: 232-236

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICAS (INE), 2001. Guía del censista de población y vivienda 2002.

JAUREGUI, E., 1997. Heat island development in Mexico City. *Atmospheric Environment* 31: 3821-383

JAUREGUI, E., 2005. Possible impact of urbanization on the thermal climate of some large cities in México. *Atmósfera* 18: 247-252.

JENKS, A., I. BURTON, R. WILLIAMS, 1996. *The Compact City: A Sustainable Urban Form?* E&FN Spon, Londres

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.

KLYSIK, K., K. FORTUNIAK, 1999. Temporal and spatial characteristics of urban heat island of Łódź, Poland. *Atmospheric Environment* 33: 3885-3895

LANDSBERG, H., 1988. *The Urban Climate.* Academic Press: New York.

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

MCLAREN, D. 1992. Compact or Dispersed? Dilution is No Solution. *Built Environment*, 18:4, pp. 268-84.

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 para optar al título de Geógrafo, Universidad de Chile. 118 pp.

MOLINA, M. y H. ROMERO, 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, Octubre del 2007, Valparaíso.

MOLINA, M. y H. ROMERO, 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. En XXVIII Congreso Nacional y XIII Internacional de Geografía, 2007. Santiago Chile (En prensa).

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

MORRIS C., I. SIMMONDS, N. PLUMMER, 2001. Quantification of the influences of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city. *Journal of Applied Meteorology* 40: 169-182.

NAREDO, J., 1998a. Sobre la insostenibilidad de las actuales conurbaciones y el modo de paliarla. pp.14. <http://habitat.aq.upm.es/cs/p2/a007.html> consultada el 14 de Enero del 2007.

NAREDO, J., 1998b. Sostenibilidad, diversidad y movilidad horizontal en los modelos de uso del territorio. pp. 5. <http://habitat.aq.upm.es/cs/p2/a006.html> consultada el 09 de Enero del 2007.

NEWMAN, P., 1992. The Compact City: An Australian Perspective. *Built Environment*, 18:4, pp. 285-300.

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

OKE, T., 1987. *Boundary Layer Climates*. Segunda Edición. London, Routledge.

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

ORTIZ, J., S. ESCOLANO, 2005. Crecimiento periférico del Gran Santiago. ¿Hacia la desconcentración funcional de la ciudad? *Scripta Nova*. Revista electrónica de geografía y ciencias sociales. Barcelona: Universidad de Barcelona. Vol. IX, núm. 194 (04).

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

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.

ROMERO, H y J. VINAGRE, 1985. Topoclimatología de la cuenca del río Mapocho. *Informaciones Geográficas* N° 32, Pag 3-31.

ROMERO, H., X. TOLEDO, F. ORDENES, A. VASQUEZ, 2001. Ecología urbana y gestión ambiental sustentable de las ciudades intermedias chilenas. *Ambiente y desarrollo*, volumen XVII, 4: 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. y P. SARRICOLEA, 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 *Clima, Sociedad y Medio Ambiente*. Editado por J.M. Cuadrat, M.A. Saz, S.M Vicente, S. Lanjeri, M. de Luis Arrillaga y J.C. González-Hidalgo. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología, Serie A N°5 pp.827-837.

ROMERO, H.; M. MOLINA, C. MOSCOSO, P. SARRICOLEA, P. SMITH y A. VASQUEZ. 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. "Reconfiguración Metropolitana y Movilidad Espacial en Santiago", Carlos de Mattos y Rodrigo Hidalgo (Eds.), Instituto de Estudios Urbanos y Territoriales e Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.

ROMERO, H.; M. MOLINA y P. SARRICOLEA, 2007. Justicia ambiental y la relación espacial entre la concentración de contaminantes atmosféricos y la

condición socio económica de los habitantes de la ciudad de Santiago. Presentado en el Congreso de la Agrupación interamericana de ingeniería sanitaria y ambiental (AIDIS). Septiembre del 2007, Santiago.

ROUSE, J., R. HAAS, J. SCHELLI, and D. DEERING, 1974. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with Ert. Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium- Volume I: Technical Presentations. NASA SP-351, compiled and edited by Stanley C. Freden, Enrico P. Mercanti, and Margaret A. Becker, 1994 pages, published by NASA, Washington, D.C., 1974, p.309.

RUEDA, S., 1998. La ciudad compacta y diversa frente a la conurbación difusa. pp.12. <http://habitat.aq.upm.es/cs/p2/a009.html> consultada el 25 de Marzo del 2007.

RUEDA, S., 1999. Complejidad de los paisajes y sistemas urbanos. Bases para su reconversión hacia la sostenibilidad. IX Jornadas sobre el paisaje: 13-28. Asociación para el Estudio del Paisaje, Segovia.

SABATINI, F., G. WORMALD, C. SIERRALTA, P. PETERS, 2006. Segregación residencial en Santiago de Chile 1992-2002 y efectos vinculados con su escala geográfica. Presentado en la Conferencia "Spatial Differentiation on the Americas", University of Texas at Austin. Estados Unidos. pp. 33.

SARRICOLEA, P y H. ROMERO, 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. Anales de la Sociedad chilena de ciencias geográficas 2006. Págs. 207-210.

SCHMIDLIN, T., 1989. The urban heat island at Toledo, Ohio. *Ohio Journal of Science* 89: 38-41

SHUKLA, V. y K. PARIKH, 1992. The environmental consequences of urban growth: cross-national perspectives on economic development, air pollution, and city size. *Urban Geography*, 13:5, pp. 422-49.

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

SUDHIRA, H., T. RAMACHANDRA, K. JAGADISH, 2004. Urban sprawl: metrics, dynamics and modelling using GIS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 5:29-39.

TOBLER, W. 1979. Cellular Geography. En S. Gale y Olsson, G. (Eds.), *Philosophy in Geography*. Reidel, Dordrecht: 379-386.

UNWIN, D. 1980. The synoptic climatology of Birmingham's heat island. *Weather* 35: 43-50

VAZQUEZ, A. y H. ROMERO, 2007a. Vegetación urbana y desigualdades socio-económicas en la comuna de Peñalolén, Santiago de Chile. Una perspectiva de justicia ambiental. En XXVIII Congreso Nacional y XIII Internacional de Geografía, 2007. Santiago Chile (En prensa).

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

VOOGT, J., T. OKE, 2003. Thermal Remote Sensing of Urban Climates. Remote Sensing of Environment. 86: 370 - 384.

VOOGT, J., 2004. Urban Heat Islands: Hotter Cities. Washington D.C. American Institute of Biological Sciences.

VON NEUMANN, J., 1966. Theory of Self-reproducing Automata. Illinois, University of Illinois Press.

YAMASHITA, S., K. SEKINE, M. SHODA, K. YAMASHITA, Y. HARA, 1986. On relationships between heat island and sky view factor in the cities of Tama River basin, Japan. Atmospheric Environment 20: 681-686.

YOKENS, C., 2001. Evolución espacial del patrón térmico superficial y su relación con las coberturas espaciales de uso de suelo y cobertura vegetal. Memoria para optar al título de Geógrafo, Universidad de Chile. 125 pp.

YUAN, F., M. BAUER, 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.