



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

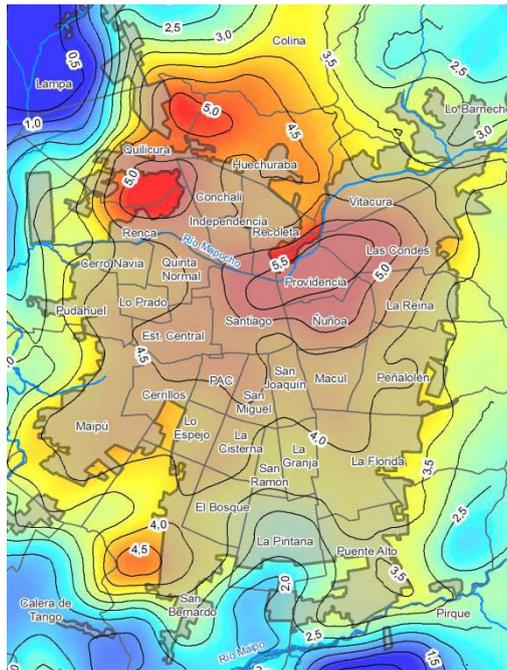
Pablo Sarricolea Espinoza

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

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

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

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



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

Director de tesis: Dr. Javier Martín-Vide

Barcelona-España, Julio 2012

Citar como:

Sarricolea, P. (2012). La isla de calor urbana de superficie y sus factores condicionantes: El caso del área metropolitana de Santiago. Tesis doctoral. Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional. Universidad de Barcelona 227. Pág.

DATOS GENERALES DE LA TESIS DOCTORAL

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

Línea de investigación: Sistemas naturales y cambio global

Área de conocimiento: Geografía física (430)

Códigos de la UNESCO:

Geografía física (2505.07)

Microclimatología (2502.04)

Descriptor y palabras claves:

Climatología urbana, isla de calor urbana, imágenes de satélite, modelos de regresión

Director de la Tesis: Dr. Javier Martín Vide

Agradecimientos

A los que han hecho posible y más fecundo el desarrollo de este trabajo de investigación:

Al gobierno de Chile, que me concedió la Beca Presidente de la República para realizar mis estudios de doctorado en la Universitat de Barcelona. Sin la beca mi estancia durante estos cuatro años en Barcelona, y, realizar dos máster, hubiese sido imposible.

A la Universidad de Chile que me ha mantenido por cuatro años en comisión de estudios, y me espera, para investigar y dictar docencia en el Departamento y Escuela de Geografía. Al Laboratorio de Medio Ambiente y Territorio que lidera mi colega y amigo, Hugo Romero.

A los amigos y compañeros que han sido parte del proceso. No todos pueden ser mencionados, pero citaré a los más cercanos en estos cuatro años: Óliver, Pamela, Edinson, Jaime, Filipe, Jorge Luis, Elena, Rosa, Daniel, Pablo, Camila, Maria, Eduardo, Midreth, Andrés, Jorge, Jonathan, Mari Carmen, Francisco y tantos otros.

Agradezco a Javier Martín-Vide, director de esta Tesis, y, el gran responsable de motivarme en seguir trabajando en estas temáticas en el futuro. Y además, por brindarme un espacio de trabajo en el Laboratorio y hacerme miembro del Grupo de Climatología. Espero seguir vinculado al grupo, y también, investigar juntos en el futuro.

A Xavi Úbeda, por la amistad que hemos construido, y por todos los buenos momentos que compartimos juntos.

A los profesores del Máster de Planificación Territorial y Gestión Ambiental y del Máster de Climatología Aplicada de la Universitat de Barcelona, pues de todos ellos adquirí conocimientos que se han plasmado en este trabajo.

A mi amada esposa Magdalena, por compartir tantos buenos momentos, y hacer más llevaderos los tristes y los de frustración. Sin duda, sin su compañía y apoyo esto no hubiera sido posible. Mi orgullo, amor y gratitud hacia ella es infinito.

A mis hermanas, sobrinos, cuñados y padres de mi esposa. Cada uno de ellos me ha animado constantemente a superar este desafío académico.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO 1

<u>INTRODUCCIÓN.....</u>	<u>3</u>
1.1. Motivaciones.....	3
1.2. Estado del asunto.....	6
1.3. El problema.....	13
1.4. Objetivos.....	16
1.4.1. <i>Objetivo general</i>	16
1.4.2. <i>Objetivos específicos</i>	16
1.5. Hipótesis de investigación.....	17
1.6. Área de estudio.....	19
1.6.1. <i>Situación regional de Santiago</i>	19
1.6.2. <i>Características fisiográficas del área metropolitana de Santiago</i>	20
1.6.3 <i>Características climáticas del área de estudio</i>	22
1.6.4 <i>Carácterísticas socio-demográficas del área de estudio</i>	28
1.6.5 <i>Características ambientales del área de estudio</i>	30
1.6.6 <i>Delimitación física del área de estudio</i>	32
1.7. Bibliografía.....	35

CAPÍTULO 2

<u>LA CLIMATOLOGÍA URBANA.....</u>	<u>44</u>
2.1. Apunte histórico sobre las raíces de la Climatología urbana.....	44
2.2. La importancia de las diferencias térmicas entre la ciudad y su periferia en Climatología urbana.....	45
2.3. El método de los transectos en Climatología urbana.....	46
2.4. La consolidación de la Climatología urbana.....	48
2.5. La Climatología urbana y la teledetección.....	57
2.6. Aportaciones de la Climatología urbana a la planificación territorial y la gestión ambiental.....	65
2.7. Bibliografía.....	72

CAPÍTULO 3

LA ISLA DE CALOR URBANA DEL AMS A PARTIR DE DIFERENCIAS TÉRMICAS DE LOS OBSERVATORIOS DE TALAGANTE Y CERRILLOS.....79

3.1. Resumen.....	79
3.2. Introducción.....	80
3.3. Materiales y métodos.....	82
3.4. Resultados	85
3.5. Discusión.....	95
3.6. Bibliografía.....	98

CAPÍTULO 4

LA ISLA DE CALOR URBANA DE SUPERFICIE DEL AMS CON IMÁGENES TERRA MODIS.....103

4.1. Resumen.....	103
4.2. Introducción.....	104
4.3. Materiales y métodos.....	106
4.4. Resultados	111
4.4.1. Resultados termométricos y mapas de diferencias térmicas.....	111
4.4.2. Síntesis del análisis de los mapas estandarizados.....	121
4.4.3. Síntesis del análisis de componentes principales de los mapas estandarizados.....	128
4.5. Discusión.....	142
4.6. Bibliografía.....	147

CAPÍTULO 5

MODELACIÓN DE LA ICUs MEDIANTE UN CONJUNTO DE VARIABLES EXPLICATIVAS.....153

5.1. Resumen.....	153
5.2. Introducción.....	154
5.3. Materiales y métodos.....	156
5.3.1 conjunto de variables explicativas.....	158
5.3.2 la modelación por regresión múltiple.....	167
5.4. Resultados	169
5.4.1. Descripción y representación espacial de las variables explicativas de la ICUs.....	169
5.4.2. Modelos de regresión múltiple por pasos para explicar la ICUs.....	173
5.4.3. Sensibilidad de las ecuaciones de regresión múltiple por pasos para explicar la ICUs.....	180
5.5. Discusión.....	183
5.6. Bibliografía.....	188

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES.....194

6.1. Capítulo 1	196
6.2. Capítulo 2	197
6.3. Capítulo 3	198
6.4. Capítulo 4	200
6.5. Capítulo 5	202
6.6. Conclusiones principales.....	203

ANEXO DIGITAL (CD ROM)

Análisis de las imágenes Terra MODIS.....332

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Algunos parámetros de las zonas bioclimáticas presentes en el área de estudio.....	27
Tabla 2.1. Áreas climáticas urbanas.....	54
Tabla 2.2. Propiedades térmicas de distintas cubiertas.....	58
Tabla 2.3. Características comparadas entre las islas de calor urbanas de superficie y atmosféricas.....	63
Tabla 2.4. Alteración de algunos elementos del clima producidas por la ciudad, comparando sus efectos con su entorno rural.....	67
Tabla 3.1. Resumen estadístico anual de la temperatura de las estaciones de Cerrillos y Talagante.....	86
Tabla 3.2. Días en que la ICU supera 6°C según estación del año y tipos sinópticos de Jenkinson y Collison (J&C).....	90
Tabla 3.3. Resultado del modelo general de regresión múltiple de la ICU...	93
Tabla 3.4. Respuesta o sensibilidad de los cambios en las variables de los modelos de la Intensidad de la Isla de Calor Urbana del AMS...	95
Tabla 4.1. Capas analizadas del producto MOD11A1.....	107
Tabla 4.2. Media y desviación estándar de las imágenes Terra MODIS analizadas.....	108
Tabla 4.3. Resumen estadístico de la ICUs promedio a nivel comunal, tanto anual como estacional.....	112
Tabla 4.4. Comunalidades de las imágenes de los 53 días de análisis.....	130
Tabla 4.5. Varianza explicada del ACP, rotadas con el método varimax.....	132
Tabla 4.6. Matriz de carga factorial o pesos de los componentes.....	133
Tabla 4.7. Matriz de coeficientes para el cálculo de las puntuaciones en los factores.....	134
Tabla 5.1. Promedios y diferencias porcentuales de las variables explicativas de las ICUs entre áreas urbanas y rurales en el AMS.....	170
Tabla 5.2. Resultado del modelo general de regresión lineal múltiple de la ICUs anual.....	174
Tabla 5.3. Resultado del modelo de regresión lineal múltiple de la ICUs de verano.....	175

Tabla 5.4. Resultado del modelo de regresión lineal múltiple de la ICUs de otoño.....	177
Tabla 5.5. Resultado del modelo de regresión lineal múltiple de la ICUs de invierno.....	178
Tabla 5.6. Resultado del modelo de regresión lineal múltiple de la ICUs de primavera.....	179
Tabla 5.7. Respuesta o sensibilidad de los cambios en las variables de los modelos de la Isla de Calor Urbana de superficie del AMS.....	181

ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1.1. Mapa de situación de la región.....	20
Figura 1.2. Mapa fisiográfico del área de estudio.....	21
Figura 1.3. Climodiagrama de temperatura y precipitación mensual para el período 1981–2010.....	22
Figura 1.4. Tendencias de las temperaturas máximas y mínimas de Quinta Normal desde 1950.....	23
Figura 1.5. Precipitación en Quinta Normal en el período 1901–2010.....	24
Figura 1.6. Humedad relativa media mensual en el período 1981–2010.....	25
Figura 1.7. Nubosidad media mensual en el período 1981–2010.....	25
Figura 1.8. Mapa de zonas bioclimáticas.....	26
Figura 1.9. Mapa de niveles socioeconómicos de la población urbana.....	29
Figura 1.10. Emisión de gases contaminantes y material particulado en el AMS.....	31
Figura 1.11. Mapa físico administrativo del área de estudio.....	34
Figura 2.1. Método de los transectos aplicados en Londres siguiendo el patrón de tela de araña.....	47
Figura 2.2. Relaciones hipotéticas entre las áreas urbanas, de influencia urbana y rural.....	51
Figura 2.3. Esquema de las escalas climáticas y de las capas aerológicas verticales donde se encuentran los efectos de modificación de las áreas urbanas.....	53
Figura 2.4. Ejemplos del cálculo del SVF.....	56
Figura 2.5. Relación entre el SVF y la máxima diferencia de temperatura urbana-rural.....	56
Figura 2.6. Imagen de las temperaturas superficiales, obtenida desde el sensor infrarrojo NOAA. El 28 de julio de 1977.....	61
Figura 2.7. Esquemas de las temperaturas superficiales.....	62
Figura 2.8. Relaciones entre las ICU de superficie y atmosféricas.....	64
Figura 2.9. Diseños urbanos y sus efectos sobre la rugosidad y las sombras....	66
Figura 2. 10. Diseños urbanos y sus efectos sobre los vientos.....	66

Figura 2.11. Diferentes efectos del diseño de las calles y los edificios en el valor del factor de visión de cielo.....	67
Figura 2.12. Hipótesis, problemas y variables explicativas de la relación entre Climatología y planificación territorial.....	69
Figura 2.13. Variables, limitaciones y conclusiones claves encontradas para atender al problema de baja consideración de la Climatología en la planificación territorial.....	70
Figura 2.14. Esquema de las variables controlables y no controlables en el clima urbano y en la generación de la isla de calor.....	71
Figura 3.1. Mapa de localización de las estaciones meteorológicas.....	83
Figura 3.2. Variables que componen la modelación de la isla de calor urbana del AMS.....	85
Figura 3.3. Densidades suavizadas de las temperaturas medias diarias de Talagante y Cerrillos durante el año 2010.....	86
Figura 3.4. Intensidad promedio de la isla de calor de AMS según estaciones del año 2010.....	87
Figura 3.5. Máxima intensidad de la isla de calor de AMS según estaciones del año 2010.....	88
Figura 3.6. Histograma de la intensidad de la ICU para el año 2010.....	89
Figura 3.7. Número y porcentaje de días según meses y categorías de isla de calor urbana del año 2010.....	90
Figura 3.8. Total porcentual en que la ICU supera 6°C según estación del año (izquierda) y tipos Jenkinson Collison (derecha).....	91
Figura 3.9. Máxima intensidad pronosticada para la ICU de Santiago según el tipo de ciudad y sus montos de población.....	96
Figura 4.1. Día de la semana y estación del año de las imágenes trabajadas.....	110
Figura 4.2. Temperaturas promedio y diferencias térmicas entre áreas urbanas y rurales según estaciones del año.....	111
Figura 4.3. Promedio de la ICUs a nivel comunal, considerando como área rural a la comuna Pirque.....	112
Figura 4.4. Mapa de la isla de calor urbana de Santiago de Chile (verano)...	115
Figura 4.5. Mapa de la isla de calor urbana de Santiago de Chile (otoño)...	116

Figura 4.6. Mapa de la isla de calor urbana de Santiago de Chile (invierno).....	117
Figura 4.7. Mapa de la isla de calor urbana de Santiago de Chile (primavera).....	118
Figura 4.8. Mapa de la isla de calor urbana de Santiago de Chile (anual)....	119
Figura 4.9. Mapa de detalle de la isla de calor urbana de Santiago de Chile (anual).....	120
Figura 4.10. Mapa promedio estandarizado de las temperaturas de la estación de verano.....	123
Figura 4.11. Mapa promedio estandarizado de las temperaturas de la estación de otoño.....	124
Figura 4.12. Mapa promedio estandarizado de las temperaturas de la estación de invierno.....	125
Figura 4.13. Mapa promedio estandarizado de las temperaturas de la estación de primavera.....	126
Figura 4.14. Mapa promedio estandarizado de las temperaturas anuales.....	127
Figura 4.15. Matriz de correlación entre los 53 mapas estandarizados.....	129
Figura 4.16. Mapa del factor 1 derivado del análisis de componentes principales.....	138
Figura 4.17. Mapa del factor 2 derivado del análisis de componentes principales.....	139
Figura 4.18. Mapa del factor 3 derivado del análisis de componentes principales.....	140
Figura 4.19. Mapa del factor 4 derivado del análisis de componentes principales.....	141
Figura 4.20. Temperatura de emisión superficial a las 0:00 a. m. del día 28/04/2006, en Sarricolea (2010) usando sensor Terra ASTER.....	143
Figura 4.21. Esquema hipotético de días de débil ó nula ICU en la ciudad y sector poniente más cálido.....	144
Figura 4.22. Dirección y velocidad del viento del 11 de abril de 2012 a las 0:00 a m. Dominio de mayor detalle para Chile Central..	145

Figura 4.23. Número de días analizados con Terra MODIS según tipo de tiempo de J&C y categorías de ICUs.....	146
Figura 5.1. Respuesta espectral de la vegetación según el porcentaje de reflectividad.....	161
Figura 5.2. Albedos de los diferentes elementos urbanos.....	163
Figura 5.3. Red de triángulos irregulares.....	165
Figura 5.4. Transformación de una TIN en un Raster.....	165
Figura 5.5. Modelo para explicar la isla de calor urbana de superficie del AMS, signos de correlación hipotéticos y clasificación de variables según posibilidad de control en áreas urbanas y urbanizables...	168
Figura 5.6. Mapas de las variables explicativas de la isla de calor urbana de superficie del AMS.....	172
Figura 5.7. Mapas de la ICUs observada y de la estimación de los modelos de la ICUs para verano, otoño, primavera, invierno y anual, considerando 42 imágenes del año 2010.....	182

Acrónimos y siglas

Ciencia

ACP	: Análisis de Componentes principales
ACU	: Área Climática Urbana
ADV	: Circulación atmosférica advectiva
AMS	: Área Metropolitana de Santiago
ANT	: Circulación atmosférica anticiclónica o con vorticidad negativa
APSO	: Anticiclón del Pacífico Sur oriental
AR4	: Cuarto Informe de Evaluación del IPCC
ASTER	: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
CBD	: Central Business District o Downtown
CBPP	: Cinturón de bajas presiones subpolares
CYC	: Circulación atmosférica ciclónica o con vorticidad positiva
ICN UHS	: Isla de calor negativa o Urban Heat Sink
ICU	: Isla de calor urbana del aire captada por termómetros
ICUs	: Isla de calor urbana de superficie, captada por imágenes de satélite
IPCC	: Panel (Grupo) Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático
IRC	: Infrarrojo Cercano
DW	: Método de Durbin-Watson

J&C	: Método de Jenkinson y Collison
LAI	: Leaf Area Index o índice de superficie foliar
LANDSAT	: Land Remote-Sensing Satellite
LST	: Land surface temperature
MAE	: Error absoluto medio
MDT	: Modelo Digital de Terreno
MM5	: Modelo meteorológico de mesoescala de quinta generación
MODIS	: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
msnm	: Metros sobre el nivel medio del mar
NDVI	: Normalized Difference Vegetation Index
PBL	: Planetary Boundary Layer
RBL	: Rural Boundary Layer
SIG	: Sistema de Información Geográfica
SPSS	: Statistical Product and Service Solutions
SVF	: Sky view factor
TIN	: Triangular Irregular Network
TM	: Thematic Mapper (Landsat)
UBL	: Urban Boundary Layer
UCL	: Urban Canopy Layer
UTC	: Universal Time Coordinate
UTM	: Universal Transversa de Mercator

Instituciones

CENMA	:	Centro Nacional del Medioambiente
CONICYT	:	Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica
DMC	:	Dirección Meteorológica de Chile
EPA	:	Agencia de Protección del Ambiente de Estados Unidos de América
ESRI	:	Environmental Systems Research Institute
FAU	:	Facultad de Arquitectura y Urbanismo
FONDECYT	:	Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico
INE	:	Instituto Nacional de Estadísticas
MIDEPLAN	:	Ministerio de Planificación Nacional
NASA	:	National Aeronautics and Space Administration (Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio)
NCEP/ NCAR	:	National Center for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research
NOAA	:	National Oceanic and Atmospheric Administration
OMM / WMO	:	Organización Meteorológica Mundial
PAC	:	Municipio de Pedro Aguirre Cerda
PRMS	:	Plan Regulador Metropolitano de Santiago
UAB	:	Universitat Autònoma Barcelona
UB	:	Universitat de Barcelona
UCh	:	Universidad de Chile

USGS : United States Geological Survey

Unidades de medida

C : Celsius, centígrado
hPa : Hectopascal
K : Kelvin, temperatura termodinámica
km : Kilómetro
km² : Kilómetro cuadrado
m : Metro
m² : Metro cuadrado
µm : Micrómetro

Compuestos químicos

CO₂ : Dióxido de carbono
NO : Óxido de nitrógeno
O₃ : Ozono
PM₁₀ : Particulate Matter de 10 micrómetros (partículas torácicas)
PM_{2,5} : Particulate Matter de 2,5 micrómetros (partículas respirables)
SO₂ : Dióxido de azufre