

Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Quantificação dos serviços ecossistêmicos da arborização urbana

**Flávio Henrique Mendes**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em  
Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em:  
Conservação de Ecossistemas Florestais

Piracicaba  
2021

Flávio Henrique Mendes  
Engenheiro Florestal e Licenciado em Ciências Agrárias

## Quantificação dos serviços ecossistêmicos da arborização urbana

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:  
Prof. Dr. **DEMÓSTENES FERREIRA DA SILVA FILHO**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em: Conservação de Ecossistemas Florestais

Piracicaba  
2021

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Mendes, Flávio Henrique

Quantificação dos serviços ecossistêmicos da arborização urbana /  
Flávio Henrique Mendes. - - versão revisada de acordo com a resolução  
CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2021.

127 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de  
Queiroz”.

1. Clima urbano 2. Microclima 3. Geoprocessamento 4. ENVI-met 5.  
COVID-19 I. Título

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Agradeço a Deus e à Nossa Senhora por guiarem-me de um modo tão incrível em mais essa etapa de minha vida;

À toda minha família, base para o desenvolvimento de meu doutorado, em especial meus pais e minha namorada, por estarem sempre comigo, fornecendo uma ótima infraestrutura e valiosos conselhos;

À *alma mater* Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), Universidade de São Paulo (USP), considerada uma das melhores Universidades do mundo, com todo seu encanto, capaz de inspirar pessoas a qualquer momento;

Ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Florestais (PPGRF) e ao Laboratório de Silvicultura Urbana (LSU), em especial ao meu orientador, professor Demóstenes Ferreira da Silva Filho, que, em março de 2011, possibilitou iniciar um estágio na área de Silvicultura Urbana, por compartilhar seu conhecimento e suas sugestões, sendo uma das principais referências acadêmicas na área; e ao técnico Jefferson Lordello Polizel, sempre disposto a ajudar, com um vasto conhecimento em informática;

Ao amigo Alex Bovo, biólogo, xvzista, pessoa com um caráter espetacular, que esbanja empatia e carisma, assim como o Daniel Oliveira, engenheiro florestal;

Al chileno Hugo Romero, un profesor fantástico, uno de los más grandes y más importantes geógrafos del mundo, por todas tus enseñanzas, confianza y amistad desde el principio, a quien tuve el privilegio de conocer y escribir muchos artículos científicos en conjunto, a través de Magda Lombardo (otra gran geógrafa, pero brasileña) y su hija Amanda. Solo aquí podría escribir un libro... Chi-chi-chi, le-le-le, ¡Viva Chile!

A todos los de Chile: Igor Pinilla y su familia, Edgar Piñango, Lendy Martínez y Miguel (los del 141), Javier, José Caldera y Alberto Cabezón, Helena (¡muy amable, un ejemplo de empatía!), Massiel y Dueña Cristina, Luis, Sixto, Victor y José, Manuelito y Andrea, Pinchulef Cristian y su esposa, parceriño Jeff y Tito, Mirella y, especialmente, a Amanda Sousa, por todo su apoyo en la logística preliminar y en la economía de muchas luca. Agradezco, también, a todos los de la UChile: Pablo Sarricolea, Pamela Smith, Enrique Aliste, Camila Carvajal y Laura Olgúin;

Ao português António Manuel Saraiva Lopes, um professor diferenciado, exemplo de pessoa, outra referência mundial na Geografia, amigo de longa data, por todos seus conselhos e apoio, que sempre estás a acordar um bocado mais cedo por estar no Fuso UTC (UTC +0);

Aos professores Hilton Thadeu Zarate do Couto e Maria de Assunção Ribeiro Franco, pela participação em meu Exame de Qualificação, juntamente com Luciana Cavalcante Pereira;

Às professoras Léa Yamaguchi Dobbert e Alessandra Rodrigues Prata Shimomura, pelas parcerias científicas e pelo aceite como suplente em minha banca de doutorado;

À secretária do Programa de Pós-Graduação em Recursos Florestais (PPGRF), Giovana. É a chamada camisa 10 da Seleção, onde qualquer jogada passa pelos seus pés, pessoa fundamental para a gestão do PPG;

Ao COC Piracicaba, coordenado pela Marta Zago, por acreditar em meu potencial;

Ao Santander Universidades e à Red de Macrouiversidades de América Latina y el Caribe, pelo auxílio e oportunidade em expandir meus conhecimentos além das fronteiras;

A todos que contribuíram direta ou indiretamente na pesquisa.

## BIOGRAFIA

Formado em Engenharia Florestal e Licenciatura em Ciências Agrárias, com mestrado em Ciências Florestais, MBA em Marketing e MBA em Agronegócios, todas pela Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo (ESALQ/USP). Autor de 1 livro, 3 capítulos de livro e 80 trabalhos científicos em português, inglês e espanhol, sendo 24 artigos em revistas científicas (7 no mestrado e 17 no doutorado) e 56 em congressos nacionais e internacionais, além de comentários na mídia, de interesse social. Em 2013 realizou intercâmbio de um semestre na Universidade de Lisboa, Portugal, ao estudar queda de árvores e, em 2019, um semestre na Universidad de Chile, Santiago, sobre o clima urbano da capital, ambos utilizando geotecnologias aplicadas à área ambiental, como geoprocessamento em SIG (ArcGIS, QGIS e Global Mapper), sensoriamento remoto, imagens de satélite, banco de dados, GNSS e mapas. Vencedor do Concurso “Desafio Consumo Consciente” na ESALQ - categoria Frases (“A fome do próximo é do tamanho do seu desperdício”). Cadastrou mais de 17,6 mil árvores para gestão urbana. Tem experiência na prática docente, com três monitorias de um semestre e 71 orientações de MBA.

- CV Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3191612135327796>
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7628-4850>
- Google Acadêmico: <https://scholar.google.com.br/citations?user=9E0HIkoAAAAJ>

*“Você não melhorará seus resultados ao retirar as flores e regar as ervas daninhas”*

*Peter Lynch (2019)*

## SUMÁRIO

RESUMO .....	9
ABSTRACT .....	10
1. INTRODUÇÃO À TESE .....	11
1.1. Hipótese .....	13
1.2. Justificativa .....	13
1.3. Objetivos .....	14
Referências .....	14
2. PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE ALTAS TEMPERATURAS DO AR E CHUVAS INTENSAS EM PIRACICABA/SP.....	15
Resumo .....	15
Abstract.....	15
Resumen .....	16
2.1. Introdução .....	16
2.2. Material e Métodos .....	17
2.3. Resultados e Discussão.....	19
2.4. Conclusões.....	25
Referências .....	26
3. THERMAL BEHAVIOR OF DIFFERENT URBAN SURFACES DURING A HOT SUMMER DAY .....	29
Abstract.....	29
Resumen .....	29
3.1. Introduction .....	30
3.2. Method.....	30
3.3. Results and Discussion .....	31
3.4. Conclusions .....	34
References .....	35
4. CAMBIO CLIMÁTICO ADVERSO PROVOCADO POR LA URBANIZACIÓN SIN PLANIFICACIÓN NI EVALUACIÓN AMBIENTAL EN SANTIAGO DE CHILE.....	37
Resumen .....	37
Abstract.....	37
4.1. Introducción.....	38
4.2. Material y Métodos.....	43



4.3. Resultados y Discusión .....	46
4.4. Conclusiones .....	56
Referencias.....	57
5. MUDANÇAS NO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E SUAS INFLUÊNCIAS NO CLIMA URBANO DE CIDADES MÉDIAS .....	61
Resumo.....	61
Abstract .....	61
Resumen.....	62
5.1. Introdução .....	62
5.2. Material e Métodos .....	65
5.3. Resultados e Discussão .....	69
5.4. Conclusão.....	78
Referências.....	79
6. LA GENTRIFICACIÓN DE LOS CLIMAS URBANOS Y SU INFLUENCIA SOBRE LAS TEMPERATURAS DE LA SUPERFICIE TERRESTRE Y EL COVID-19 DURANTE EL AÑO 2020 EN SANTIAGO DE CHILE .....	83
Resumen.....	83
Abstract .....	83
6.1. Introducción .....	83
6.2. Materiales y Métodos.....	89
6.3. Resultados .....	91
6.4. Discusión y Conclusiones .....	98
Bibliografía .....	102
7. VALORAÇÃO MONETÁRIA DA ARBORIZAÇÃO URBANA BASEADA NA MAGNITUDE DA COPA EM PIRACICABA/SP/BRASIL.....	107
Resumo.....	107
Abstract .....	107
Resumen.....	1078
7.1. Introdução .....	108
7.2. Material e Métodos .....	112
7.3. Resultados e Discussão .....	115
7.4. Conclusão.....	122
Referências.....	123
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	126

## RESUMO

### Quantificação dos serviços ecossistêmicos da arborização urbana

Os problemas provenientes das mudanças climáticas são cada vez mais evidenciados, sejam eles sociais, ambientais ou econômicos. A arborização urbana, por sua vez, desempenha importantes serviços ecossistêmicos, mitigando-os. No entanto, principalmente em cidades latino-americanas, é comum que ela seja considerada um elemento secundário da infraestrutura, na qual extensas superfícies cinzentas predominam na paisagem, em desarmonia com algumas poucas manchas de vegetação que aparecem de modo desigual no território. Dessa forma, o objetivo desta tese foi analisar e quantificar a influência da arborização urbana no clima urbano, relacionando-a com os serviços ecossistêmicos. A metodologia englobou o uso de diversas ferramentas, como dados da Estação Meteorológica da ESALQ/USP (Piracicaba/SP/Brasil) e do Aeroporto de Pudahuel (Santiago/Chile), simulações microclimáticas com o modelo ENVI-met, câmera termal, termômetro infravermelho digital, geoprocessamento em SIG (ArcGIS, QGIS e Global Mapper), sensoriamento remoto, imagens de satélite, imagens termais, banco de dados, informes epidemiológicos da COVID-19, GNSS, fotos hemisféricas e mapas, tendo como locais de estudo uma cidade de médio porte (Piracicaba) e outra de grande porte (Santiago). Os resultados mostraram que a partir da década de 1980, em Piracicaba, houve aumento da quantidade de dias quentes (a partir de 30°C) e chuvas intensas (a partir de 35 mm), sendo mais críticos durante o verão. Quanto ao monitoramento do comportamento térmico de diferentes superfícies urbanas, o destaque ficou para o teto de um carro escuro, que atingiu temperatura superficial de 95°C na hora mais quente do dia, seguido pelo asfalto a pleno sol (65°C), porém, quando sombreado por árvores, diminuiu para 34°C, valor próximo das superfícies foliares. O estudo de caso em Santiago revelou diferenças climáticas e injustiças socioambientais entre duas comunas analisadas, Estación Central e Vitacura. A primeira é conhecida pelos “Guetos Verticales”, com edifícios de mais de 100 m de altura, pouca vegetação e zonas mortas de ventilação. A segunda, chamada de “Sanhattan”, possui o maior poder aquisitivo do país, com ruas e calçadas largas e bem vegetadas. As mudanças no uso e ocupação do solo, assim como em Piracicaba, ocasionaram um aumento na temperatura superficial de 1°C a cada cinco anos. O clima urbano local, quando relacionado com a evolução das taxas de incidência da COVID-19, apresentou correlação positiva, revelando as condições de injustiças socioambientais que ocorrem em Santiago, ou seja, começou em comunas ricas e foi se espalhando por toda cidade, até atingir a população mais vulnerável. Por fim, a criação de um novo método de valoração monetária da arborização urbana indicou que Piracicaba apresenta um patrimônio arbóreo estimado em R\$ 40.899.373,00 ao ano. Dessa forma, a arborização urbana pode ser considerada como uma variável capaz de expressar as diferenças sociais, ambientais e econômicas que ocorrem nas cidades, servindo de parâmetro para a implementação de novas políticas públicas.

Palavras-chave: Clima urbano, Microclima, Geoprocessamento, ENVI-met, COVID-19

## ABSTRACT

**Quantification of ecosystem services by urban forestry**

The problems arising from climate change are increasingly evident, whether social, environmental or economic. Urban forestry, in turn, performs important ecosystem services, mitigating them. However, especially in Latin American cities, it is common for it to be considered a secondary element of infrastructure, in which extensive gray surfaces predominate in the landscape, in disharmony with a few patches of vegetation that appear unevenly in the territory. Thus, the objective of this thesis was to analyze and the influence of urban forestry on the urban climate, relating it to ecosystem services. The methodology included the use of several tools, such as data from the ESALQ/USP Meteorological Station (Piracicaba/SP/Brazil) and the Pudahuel Airport (Santiago/Chile), microclimatic simulations with the ENVI-met model, thermal camera, infrared thermometer digital, geoprocessing in GIS (ArcGIS, QGIS and Global Mapper), remote sensing, satellite images, thermal images, database, epidemiological reports from COVID-19, GNSS, hemispheric photos and maps, having as study sites a city of medium-sized (Piracicaba) and a large one (Santiago). The results showed that from the 1980s, in Piracicaba, there was an increase in the number of hot days (since 30°C) and heavy rains (since 35 mm), being more critical during the summer. As for the monitoring of the thermal behavior of different urban surfaces, the highlight was the roof of a dark car, which reached a surface temperature of 95°C in the hottest hour of the day, followed by asphalt in full sun (65°C), however, when shaded by trees, decreased to 34°C, a value close to the leaf surfaces. The case study in Santiago revealed climatic differences and socio-environmental injustices between two communes analyzed, Estación Central and Vitacura. The first is known as the “Vertical Ghettos”, with buildings over 100 m high, with little vegetation and dead zones for ventilation. The second, called “Sanhattan”, has the highest purchasing power in the country, with wide and well-vegetated streets and sidewalks. Changes in land use and occupation, as well as in Piracicaba, caused an increase in surface temperature of 1°C every five years. The local urban climate, when related to the evolution of the incidence rates of COVID-19, showed a positive correlation, revealing the conditions of socio-environmental injustices that occur in Santiago, that is, it started in rich communes and spread throughout the city, until reach the most vulnerable population. Finally, the creation of a new method of monetary valuation of urban forestry indicated that Piracicaba has an estimated arboreal heritage of BRL 40,899,373.00 per year. Thus, urban forestry can be considered as a variable capable of expressing the social, environmental and economic differences that occur in cities, serving as a parameter for the implementation of new public policies.

Keywords: Urban climate, Microclimate, Geoprocessing, ENVI-met, COVID-19

## 1. INTRODUÇÃO À TESE

O cultivo das árvores nas cidades remonta as cidades antigas, na qual chineses, gregos, egípcios, fenícios, persas e romanos as utilizavam para fins estéticos, embora pouco se sabe como isso de fato ocorreu. Os Jardins Suspensos da Babilônia, por exemplo, podem ser considerados como uma das primeiras experiências de silvicultura urbana, no século VI a.C., cuja prática ganhou maior profundidade na Europa há cerca de 300 anos, expandindo-se para a América no final do século XVIII, sendo o termo “Silvicultura Urbana” (em inglês, *Urban Forestry*) criado em 1965, pelo Professor Erik Jorgensen, da Universidade de Toronto (Canadá), como o título de uma tese de pós-graduação, definido como “um ramo especializado da silvicultura (que) tem como objetivo o cultivo e manejo de árvores para o seu presente e potencial contribuições para o bem-estar fisiológico, sociológico e econômico da sociedade urbana” (GERHOLD, 2007).

Desde então, várias pesquisas científicas foram feitas sobre o tema silvicultura urbana, principalmente nos EUA. Escobedo et al. (2019) apresentaram essa evolução por meio da análise de quatro conceitos: primeiro, “Floresta Urbana” (*Urban Forest*), termo pioneiro nas pesquisas científicas, que aborda a presença das árvores no meio urbano de um modo amplo; depois, os “Serviços Ecossistêmicos” (*Ecosystem Services*) como uma metáfora surgida em 2006 referente às “múltiplas funções naturais que podem se beneficiar tanto a natureza quanto os humanos”; após, Infraestrutura Verde (*Green Infrastructure*), originado em 2007, remetendo ao “padrão espacial e a conectividade da rede natural” e, mais recentemente (2015), Soluções baseadas na Natureza (*Nature-based Solutions*), termo esse que busca englobar também as questões sociais, políticas e ecológicas para resolver a questão da rápida urbanização e densificação que as cidades vêm passando, ocasionando as Mudanças Climáticas.

Franco et al. (2013) destacam a importância que a Infraestrutura Verde tem na resiliência urbana quanto ao combate às Mudanças Climáticas, cujas árvores representam uma das principais alternativas para mitigar as ilhas de calor urbano e o aquecimento global. Os autores listam algumas recomendações, tais como o planejamento ambiental, a conectividade entre as áreas verdes e seus habitantes, o concílio da vegetação com demais mobiliários urbanos, a recuperação dos rios e várzeas, o compromisso de longo prazo entre os agentes sociais (governo, iniciativa privada, organizações não governamentais e sociedade), legislação específica, consideração do balanço hídrico e climático regional, criação (ou adaptação) de um órgão governamental responsável pela gestão e, principalmente, a conscientização ambiental, visando a conservação e a proteção da vida sob a perspectiva ecológica.

Burden (2006) destaca ao menos 22 benefícios (“Serviços Ecosistêmicos”) proporcionados, tais como diminuição na temperatura do ar, atenuação da precipitação e radiação solar direta, filtragem de poluentes, criação de ambientes esteticamente mais agradáveis, melhoras na saúde emocional e psicológica, sombreamento, entre outros, sendo a sombra o principal benefício percebido pela população (MOSKELL; ALLRED, 2013). No Brasil, os primeiros estudos sobre silvicultura urbana foram feitos na década de 1980, pelo professor Hilton Thadeu Zarate do Couto, na Escola Superior de Agricultura “Luiz Queiroz”, Universidade de São Paulo (ESALQ/USP), em Piracicaba/SP, que posteriormente tiveram continuidade pelo professor Demóstenes Ferreira da Silva Filho.

As constantes alterações no uso e ocupação do solo urbano exigem planejamento e acompanhamento das atividades ao longo do tempo. Extensas superfícies cinzentas de asfalto e concreto criam diferentes microclimas urbanos (STEWART; OKE, 2012), resultantes de um planejamento ausente ou inadequado, que traz como consequência problemas e desigualdades socioambientais.

Neste contexto, a arborização urbana aparece como elemento fundamental na paisagem. Sob a temática da importância dos serviços ecosistêmicos provenientes da arborização, sobretudo relacionado ao clima urbano, a tese foi composta por oito capítulos (sendo um introdutório, seis aplicados e um conclusivo), a saber:

- (i) Refere-se a este capítulo Introdutório à tese, resumindo o que foi abordado em cada capítulo, bem como a hipótese, a justificativa e os objetivos pretendidos;
- (ii) “Probabilidade de ocorrência de altas temperaturas do ar e chuvas intensas em Piracicaba/SP” foi desenvolvido durante a disciplina LEB5019 - Estatística Climatológica, sob coordenação da professora Sônia Maria de Stefano Piedade. Encontra-se publicado na Revista Geografia em Atos (ISSN: 1984-1647), na Edição Especial “Dia Mundial da Água”;
- (iii) “Thermal behavior of different urban surfaces during a hot summer day” foi apresentado no XL Congreso Nacional y XXV Internacional de Geografía, em Temuco (Chile), e convidado à publicação na Revista Geográfica de Valparaíso (ISSN: 0718-9877), na Edição Especial preparada pela Sociedad Chilena de Ciencias Geográficas (SOCHIGEO);
- (iv) “Cambio Climático adverso provocado por la urbanización sin planificación ni evaluación ambiental en Santiago de Chile” foi realizado na Universidad de Chile, em Santiago (Chile), sob tutoria do professor Hugo Iván Romero Aravena. Encontra-se publicado na Revista de Geografía Norte Grande (ISSN:

0718-3402), no Dossier "Políticas y prácticas de planificación y ordenamiento territorial en América Latina";

- (v) “Mudanças no uso e ocupação do solo e suas influências no clima urbano de cidades médias” foi realizado também na Universidad de Chile, em complementação ao planejamento proposto inicialmente. Encontra-se submetido à uma revista científica;
- (vi) “La gentrificación de los climas urbanos y su influencia sobre las temperaturas de la superficie terrestre y el Covid-19 durante el año 2020 en Santiago de Chile” também foi um capítulo extra, desenvolvido em plena pandemia da Covid-19. Encontra-se publicado na Revista Geographicalia (ISSN: 2386-3021), no Monográfico “Clima, Sociedad y Medio Ambiente”;
- (vii) “Valoração monetária da arborização urbana baseada na magnitude da copa em Piracicaba/SP/Brasil” foi desenvolvido com pesquisadores de três diferentes países: Brasil, Chile e Portugal. Encontra-se publicado na Revista LABVERDE (ISSN: 2179-2275), no Dossier “Soluções baseadas na Natureza (SbN) para a resiliência urbana na América Latina”;
- (viii) Considerações Finais.

### **1.1. Hipótese**

A tese tem como hipótese que a arborização urbana transforma o clima urbano e promove importantes serviços ecossistêmicos às cidades, sendo capaz de expressar as diferenças sociais, ambientais e econômicas.

### **1.2. Justificativa**

Durante o planejamento urbano, a arborização costuma ser um elemento secundário na paisagem, e não como mais um componente da infraestrutura como um todo; dessa forma, cada vez mais acentuam-se os problemas relacionados às Mudanças Climáticas, riscos hidrológicos, altas variações térmicas, ilhas de calor urbano, desconforto térmico, poluição do ar, problemas de saúde, perda de biodiversidade etc. Consequentemente, faz-se necessário analisar e quantificar como as árvores urbanas podem mitigar esses efeitos, servindo, inclusive, de subsídio para a implementação de novas políticas públicas.

### 1.3. Objetivos

#### 1.3.1. Geral

Analisar e quantificar a influência da arborização urbana no clima urbano, relacionando-a com os serviços ecossistêmicos.

#### 1.3.2. Específicos

- Verificar as probabilidades de ocorrência de altas temperaturas do ar (a partir de 30°C) e intensa precipitação (a partir de 35 mm) em Piracicaba/SP;
- Analisar o comportamento térmico de diferentes superfícies urbanas durante um dia quente de verão em uma cidade tropical;
- Analisar a evolução climático-ambiental da urbanização de Santiago do Chile;
- Analisar as mudanças no uso e ocupação do solo e, conseqüentemente, a influência no clima urbano de duas cidades de médio porte, La Serena (Chile) e Piracicaba (Brasil);
- Analisar a relação entre o clima urbano e as taxas de incidência da COVID-19 em Santiago do Chile;
- Desenvolver um modelo simplificado de valoração monetária da arborização urbana.

### Referências

BURDEN, D. **Urban Street Trees: 22 Benefits Specific Applications**. Orlando: Glatting Jackson and Walkable Communities Inc., 2006.

ESCOBEDO, F.J.; GIANNICO, V.; JIM, C.Y.; SANESI, G.; LAFORTEZZA, R. Urban forests, ecosystem services, green infrastructure and nature-based solutions: Nexus or evolving metaphors? **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 37, p. 3-12, 2019.

FRANCO, M.A.R.; OSSE, V.C.; MINKS, V. Infraestrutura verde para as mudanças climáticas no C40. **LABVERDE**, n. 6, p. 220-235, 2013.

GERHOLD, H.D. Origins of Urban Forestry. In: KUSER, J.E. (Ed.). **Urban and Community Forestry in the Northeast**. Dordrecht: Springer, 2007. chap. 1, p. 1-23.

MOSKELL, C.; ALLRED, S.B. Residents' beliefs about responsibility for the stewardship of park trees and street trees in New York City. **Landscape and Urban Planning**, v. 120, p. 85-95, 2013.

STEWART, I.D.; OKE, T.R. Local climate zones for urban temperature studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, n. 12, p. 1879-1900, 2012.

## 2. PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE ALTAS TEMPERATURAS DO AR E CHUVAS INTENSAS EM PIRACICABA/SP

### Resumo

Os Serviços Ecosistêmicos proporcionados pela natureza são fundamentais para a manutenção da vida na Terra. Entretanto, nas cidades, nem sempre a vegetação é valorizada e muitas vezes compete o espaço por metro quadrado disponível. O objetivo desta pesquisa foi verificar as probabilidades de ocorrência de altas temperaturas do ar (a partir de 30°C) e intensa precipitação (a partir de 35 mm) em Piracicaba/SP, sob a justificativa das áreas verdes e da arborização urbana serem importantes meios na criação de microclimas mais agradáveis e aumentarem a infiltração da água no solo. A partir de dados registrados pela Estação Meteorológica da ESALQ/USP, de 1917 a 2017, utilizou-se a Distribuição Normal para a temperatura do ar e a Distribuição Binomial Negativa Truncada para a precipitação. Os resultados mostraram que temperaturas desconfortáveis ocorrem numa frequência de 38% dos casos, ou seja, média de 138 dias por ano, enquanto que as chuvas intensas tiveram média de 7,7 casos por ano, sendo mais críticas durante o verão. Para ambas as distribuições, os ajustes foram bons (teste de qui-quadrado). Isso demonstra a necessidade de políticas públicas que valorizem a presença da vegetação nas cidades, sobretudo em grandes centros urbanizados, para mitigar as altas temperaturas e prevenir enchentes, alagamentos e transtornos.

**Palavras-chave:** Serviços ecossistêmicos; Microclima; Alagamentos; Distribuição normal; Distribuição binomial negativa truncada.

### Abstract

Ecosystem Services provided by nature are fundamental to the maintenance of life on Earth. However, in cities, vegetation is not always valued and often competes the space for available square meter. The objective of this research was to verify the probability of occurrence of high air temperatures (since 30°C) and intense precipitation (since 35 mm) in Piracicaba/SP/Brazil, under the justification of green areas and urban forestry to be important means to create more pleasant microclimates and increase the infiltration of water into the soil. From the data recorded by the ESALQ/USP Meteorological Station, from 1917 to 2017, was used Normal Distribution for the air temperature and Truncated Negative Binomial Distribution for the precipitation. The results showed that uncomfortable temperatures occur at a frequency of 38% of cases, i.e., average of 138 days per year, while heavy rains averaged 7.7 cases per year, being more critical during the summer. For both distributions, the adjustments were good (chi-squared test). This demonstrates the need of public policies that value the presence of vegetation in cities, especially in large urban centers, to mitigate high temperatures and prevent floods, inundations and disorders.

**Keywords:** Ecosystem services; Microclimate; Flooding; Normal distribution; Truncated negative binomial distribution.



## Resumen

Los Servicios Ecosistémicos proporcionados por la naturaleza son fundamentales para el mantenimiento de la vida en la Tierra. Sin embargo, en las ciudades, no siempre la vegetación es valorada y muchas veces compite con el espacio por metro cuadrado disponible. El objetivo de esta investigación fue verificar las probabilidades de ocurrencia de altas temperaturas del aire (a partir de 30°C) e intensa precipitación (a partir de 35 mm) en Piracicaba/SP, bajo la justificación de las áreas verdes y de la arborización urbana ser importantes medios en la creación de microclimas más agradables y aumentar la infiltración del agua en el suelo. A partir de datos registrados por la Estación Meteorológica de ESALQ/USP, de 1917 a 2017, se utilizó la Distribución Normal para la temperatura del aire y la Distribución Binomial Negativa Truncada para la precipitación. Los resultados mostraron que las temperaturas incómodas ocurren en una frecuencia del 38% de los casos, es decir, promedio de 138 días al año, mientras que las lluvias intensas tuvieron una media de 7,7 casos al año, siendo más críticas durante el verano. Para ambas distribuciones, los ajustes fueron buenos (prueba de chi-cuadrado). Esto demuestra la necesidad de políticas públicas que valoren la presencia de la vegetación en las ciudades, sobre todo en grandes centros urbanizados, para mitigar las altas temperaturas y prevenir inundaciones, inundaciones y trastornos.

**Palabras clave:** Servicios ecosistémicos; Microclima; Inundaciones; Distribución normal; Distribución binomial negativa truncada.

### 2.1. Introdução

Os benefícios que as pessoas obtêm da natureza, direta ou indiretamente, a fim da manutenção da vida no planeta, denomina-se “Serviços Ecosistêmicos” ou “Serviços Ambientais” (O ECO, 2014). De acordo com a Organização das Nações Unidas - ONU, esses serviços dividem-se em provisão (alimentos, fibras, produtos bioquímicos, água doce), regulação (qualidade do ar, recursos hídricos, controle climático), cultural (recreação, educacional, estético) e suporte (ciclagem de nutrientes, formação de solo) (REID et al., 2005). Em Nova York (EUA), os benefícios anuais da arborização chegam a 153 milhões de dólares (NOWAK et al., 2018). Neste âmbito, as áreas verdes, com destaque para a arborização urbana, apresentam-se como elementos essenciais para a regulação microclimática, pois amenizam as altas temperaturas e facilitam a infiltração da água no solo (BURDEN, 2006).

A árvore é o meio mais eficiente para reduzir a temperatura do ar e gerar conforto microclimático (SHASHUA-BAR; PEARLMUTTER; ERELL, 2009). Apesar da vegetação herbácea e os gramados também contribuirão para a infiltração da água no solo, estes amortizam o calor ao nível dos pedestres em menor impacto, se comparado com aquela (NG et al., 2012).

Com aproximadamente um terço da área urbana coberta por árvores é possível reduzir a temperatura do ar em torno de 1°C (NG et al., 2012). Num contexto social, a sombra proveniente da arborização urbana é o principal benefício percebido pela população, conforme verificado em Santa Maria/RS (ROPPA et al., 2007), Uberlândia/MG (RIBEIRO, 2009) e Ubá/MG (PIZZIOLO et al., 2014). Quando a temperatura do ar atinge valores superiores a 30°C, o corpo humano experimenta sensações de desconforto (GOMES; AMORIM, 2003). Referente à precipitação, quando esta supera os 35 mm diários, podem causar desastres significativos, como alagamentos (SANCHES et al., 2018).

O objetivo foi verificar as probabilidades de ocorrência de altas temperaturas do ar (a partir de 30°C) e intensa precipitação (a partir de 35 mm) em Piracicaba/SP, sob a justificativa das áreas verdes e da arborização urbana serem importantes meios na criação de microclimas mais agradáveis e aumentarem a infiltração da água no solo, respectivamente.

## 2.2. Material e Métodos

Foram utilizados dados da Estação Meteorológica Convencional da ESALQ/USP, dos anos de 1917 a 2017, porém, devido a falhas no banco de dados (superiores a uma semana sem registro), excluíram-se os anos de 1971 a 1974, 1978 e 1988, totalizando 95 anos de série histórica, ou seja, 1140 meses.

A Estação situa-se em Piracicaba/SP, coordenadas geográficas 22° 42' 30" S e 47° 38' 00" W, clima tipo Cwa (conforme classificação de Köppen-Geiger), a 546 m de altitude e precipitação média de 1300 mm por ano (ENGENHARIA DE BIODIVERSIDADE, 2018). Os registros em Piracicaba/SP tiveram início em 1917, entretanto, as instalações passaram por uma reforma entre novembro de 1972 e março de 1973, ocasionando interrupções na coleta de dados (ASSIS; VILLA NOVA, 1995).

As variáveis consideradas foram: temperatura máxima do ar a partir de 30°C (GOMES; AMORIM, 2003) e precipitação diária a partir de 35 mm (SANCHES et al., 2018). Desse modo, pela programação em *Visual Basic for Applications* (VBA), a série histórica foi descarregada para a compilação e processamento em MS Excel 2013.

Para cada variável fez-se uma tabela com a distribuição de frequências, sendo aplicada a Distribuição Normal para dados de temperatura e a Distribuição Binomial Negativa Truncada para a precipitação, sendo esta recomendada em análise de dados climatológicos para variáveis

discretas em que a variância é maior que a média, como o número de dias com chuva de elevada intensidade, desde que sem a classe zero (ASSIS; ARRUDA; PEREIRA, 1996).

A função densidade de probabilidade (fdp) da Distribuição Normal é dada por:

$$f(x) = \{1/[\sigma * \sqrt{2\pi}] \} * e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (\text{Equação 2.1})$$

Considerando um conjunto de dados com  $n > 80$ , a quantidade e o tamanho das classes foram calculados de acordo com a fórmula de Sturges (1926):

$$c = 1 + 3,322 * \log(n) \quad (\text{Equação 2.2})$$

A função densidade de probabilidade (fdp) da Distribuição Binomial Negativa Truncada é dada por:

$$p(x) = \left[ \frac{w^k}{1-w^k} \right] * \left\{ \frac{[(k+x-1)!]}{(k-1)!x!} \right\} * (1-w)^x \quad (\text{Equação 2.3})$$

onde  $x = 1, 2, 3...$

Essa distribuição possui dois parâmetros,  $w$  e  $k$ , obtidos pelos dois primeiros momentos, calculados por:

$$w = \left( \frac{\bar{x}}{s^2} \right) * \left( 1 - \frac{f}{n} \right) \quad (\text{Equação 2.4})$$

$$k = \frac{w\bar{x} - \frac{f}{n}}{1-w} \quad (\text{Equação 2.5})$$

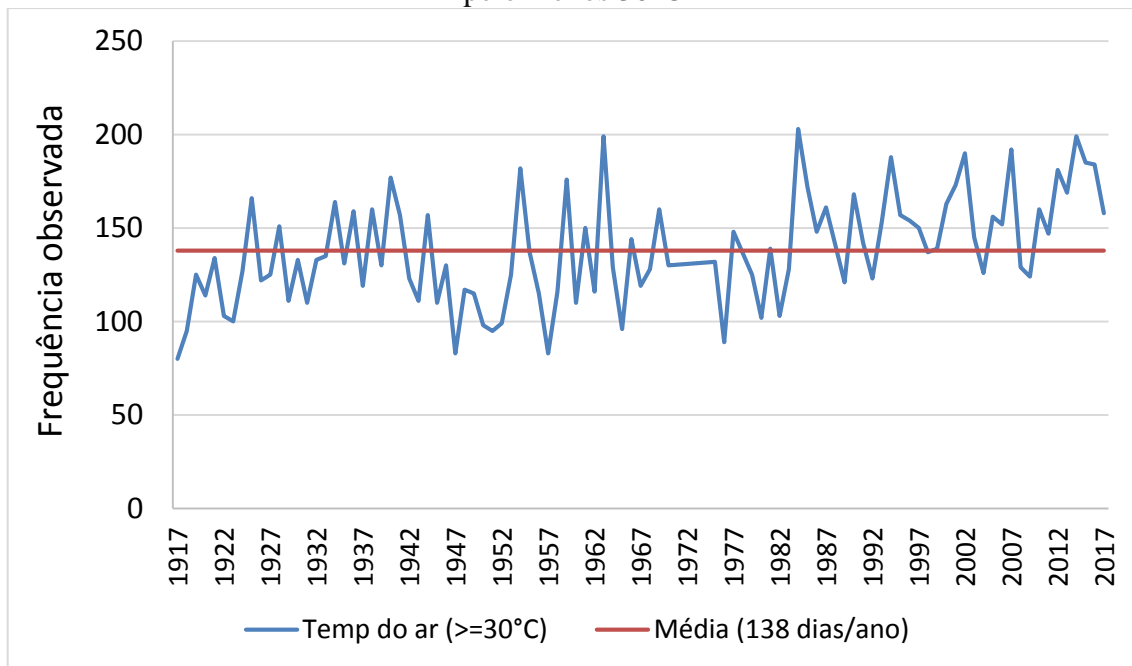
onde  $\bar{x}$  = média,  $s^2$  = variância,  $f$  = frequência do primeiro valor de  $x$ ,  $n$  = soma das frequências.

Na sequência, aplicou-se o teste de aderência (qui-quadrado), para verificar se os ajustes foram bons. Para complementar a pesquisa, referente à variável precipitação, elaborou-se o mapa de altimetria da cidade, a fim de analisar a geografia local com as cotas, a partir do radar ALOS-PALSAR, resolução espacial de 12,5 m.

### 2.3. Resultados e Discussão

Nessa série histórica de Piracicaba/SP, para a temperatura do ar maior ou igual a 30°C, a frequência observada variou de 80 a 203 dias por ano, apresentando média de 138 dias que podem ser considerados desconfortáveis termicamente, percebendo uma tendência do aumento da quantidade de dias quentes no ano a partir da década de 1980 (Figura 2.1).

**Figura 2.1.** Frequência observada para a quantidade de dias por ano com temperatura do ar de pelo menos 30°C



**Fonte:** Estação da ESALQ/USP.

Desde a divulgação do primeiro relatório, em 1990, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, sigla em inglês), órgão vinculado à ONU, vem acompanhando as mudanças climáticas. Em seu mais recente relatório, o *Special Report 15 (SR15)*, de outubro de 2018, revelou uma elevação de 1,5°C na temperatura do ar (IPCC, 2018). Entretanto, este fato não é consenso: Ribeiro (2010), há nove anos, já destacava as incertezas quanto às reais consequências desse aquecimento global, tanto na temperatura quanto nos regimes de chuvas. Quanto ao posicionamento das pessoas, por meio da mídia, Carneiro e Toniolo (2012), ao compilarem 676 notícias, descobriram haver dualidade de pensamentos entre a concordância plena de que as causas sejam exclusivamente antrópicas e sua completa negação, ou seja, se o aquecimento global realmente tem origem antrópica.

A Tabela 2.1 mostra as classes de frequências observadas, esperadas e o cálculo das probabilidades de ocorrência de dias quentes, sendo  $N = 95$ ;  $c = 8$  classes; amplitude ( $a$ ) = 15;

média = 138 dias; variância = 839,82 e desvio padrão = 28,98. As probabilidades foram calculadas por meio da Equação 2.1, enquanto que a quantidade de classes (c), pela Equação 2.2.

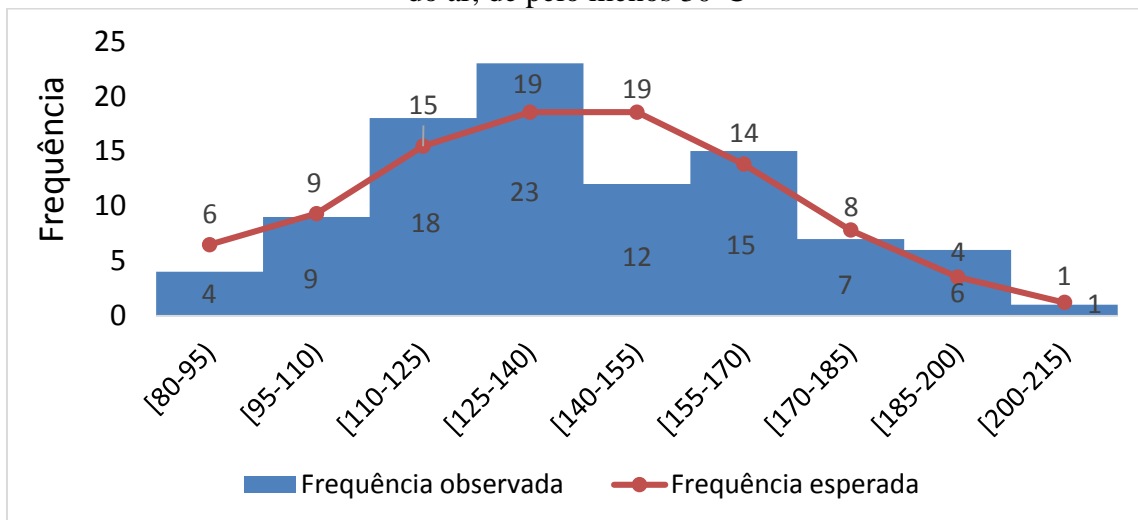
**Tabela 2.1.** Cálculo das probabilidades de ocorrência de dias quentes, sendo “x” o intervalo da classe, “f obs” a frequência observada, “f(xi)” a probabilidade de ocorrência e “f esp” a frequência esperada

x	f obs	f(xi)	f esp
80  --- 95	4	0,0681	6
95  --- 110	9	0,0979	9
110  --- 125	18	0,1627	15
125  --- 140	23	0,1952	19
140  --- 155	12	0,1951	19
155  --- 170	15	0,1453	14
170  --- 185	7	0,0820	8
185  --- 200	6	0,0371	4
200  --- 215	1	0,0126	1
Total	95	1,00	95

**Fonte:** Os próprios autores.

A representação gráfica pode ser visualizada na Figura 2.2.

**Figura 2.2.** Representação gráfica para a distribuição normal, referente à variável temperatura do ar, de pelo menos 30°C



**Fonte:** Estação da ESALQ/USP.

Para verificar se o ajuste foi bom, calculou-se o Teste de Aderência (qui-quadrado), considerando  $\alpha = 0,05$ ;  $n = 8$  (cujos valores acima de 3 foram agrupados);  $p = 2$ ; graus de

liberdade = 5 (n-p-1), obtendo-se  $X^2$  calculado <  $X^2$  tabelado (6,029 < 11,070) (Tabela 2.2). Desse modo, não rejeita-se  $H_0$ ; portanto, o ajuste foi bom e os dados têm Distribuição Normal.

**Tabela 2.2.** Teste de Aderência para a temperatura do ar

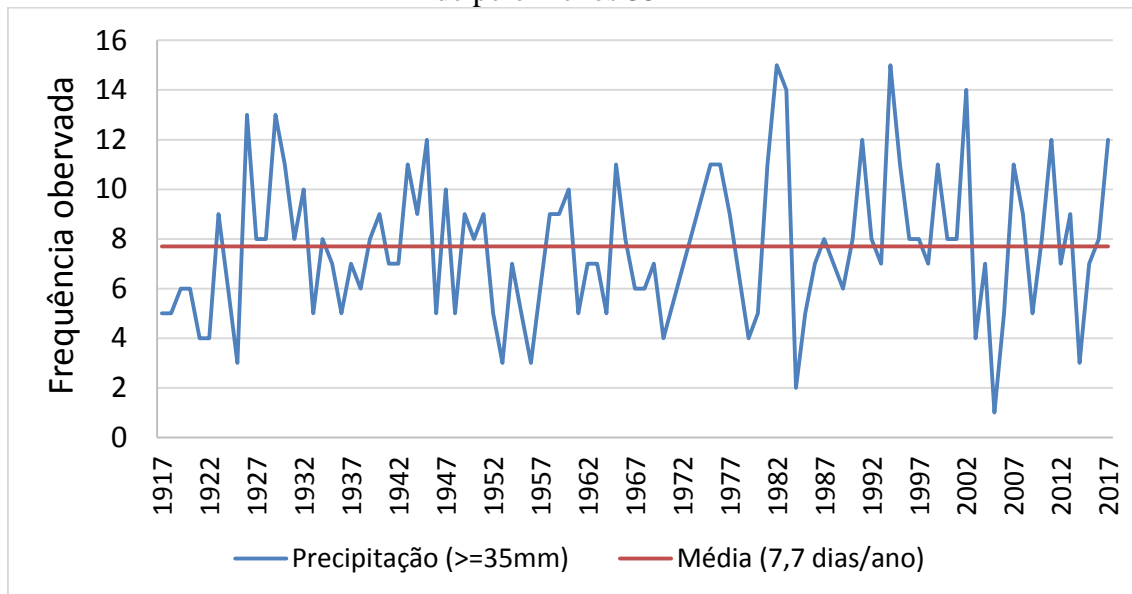
ni	f obs	f esp	(f obs - f esp) <sup>2</sup> /f esp
1	4	6	0,943
2	9	9	0,010
3	18	15	0,419
4	23	19	1,071
5	12	19	2,304
6	15	14	0,104
7	7	8	0,080
8	7	5	1,100
			6,029

**Fonte:** Os próprios autores.

Quanto à precipitação intensa (a partir de 35 mm), variou de 1 a 15 dias por ano, com média de 7,7 casos anuais (Figura 2.3), capazes de gerar possibilidades de alagamentos e demais transtornos. Como limitação desta pesquisa, precipitações menores que 35 mm também podem causar transtornos, se ocorrerem num curto espaço de tempo (questão de minutos ou poucas horas), conforme verificado pelas notícias da mídia local, o que aumentaria a média de ocorrências ao ano, mas tal dado não está disponível na Estação Meteorológica Convencional da ESALQ/USP, apenas na Automática, com dados a partir de 1997.

Assim como observado para a variável temperatura máxima do ar, a partir da década de 1980, houve aumento da quantidade de casos com chuvas intensas no ano, sendo a frequência mínima (um evento - 2005) e a máxima (15 eventos - 1982 e 1994) registradas durante esse período da série histórica. A estação mais crítica foi o verão, marcada pelos altos índices de pluviosidade para Piracicaba/SP, sobretudo os meses de dezembro, janeiro e fevereiro, responsáveis por 55,8% das ocorrências.

**Figura 2.3.** Frequência observada para a quantidade de dias por ano com precipitação intensa, de pelo menos 35 mm



**Fonte:** Estação da ESALQ/USP.

No Brasil, o regime de chuvas tropicais intensas no verão do Sudeste e inverno do Nordeste representa um desafio para a drenagem das cidades, cujas ruas impermeáveis e solos compactados contribuem para o escoamento superficial (BEZERRA; FERNANDES, 2000). Para Nicodemo e Primavesi (2009), como consequência do aquecimento global, é esperado um aumento na intensidade de chuvas, o que exigirá uma estrutura urbana mais eficiente para a drenagem da chuva, a fim de evitar enchentes mais destruidoras. Nessa linha de raciocínio, em pesquisa feita por Silva e colaboradores (2010), espécies de grande porte, como a sibipiruna (*Poincianella pluviosa* (DC.) L. P. Queiros) e a tipuana (*Tipuana tipu* (Benth.) Kuntze), encontradas comumente na arborização urbana de cidades brasileiras, assim como em Piracicaba/SP, são capazes de reter até 60% da chuva nas primeiras duas horas, apresentando, segundo os autores, grande potencial de redução de enchentes e consequente alagamentos nas cidades. De igual modo, Xiao and McPherson (2002) encontraram valores entre 15% (*Jacaranda mimosifolia*) e 66% (*Tristania conferta*) de interceptação da chuva, a depender do tamanho e da densidade de copa. Ademais, uma árvore de médio porte é capaz de interceptar aproximadamente 10 mil litros de precipitação por ano (CUFR, 2002). Reter grande volume de chuva, sobretudo no início do evento, que costuma ser de maior intensidade, é essencial para o equilíbrio hidrológico urbano e controle do escoamento superficial nas cidades, uma vez que, em vias públicas, este escoamento pode chegar a 80% (PAULEIT; DUHME, 2000).

A Tabela 2.3 mostra as classes de frequências observadas, esperadas e o cálculo das probabilidades da ocorrência de chuvas intensas, sendo  $n = 95$ ; média = 7,7 dias; variância =

8,7; parâmetro  $w = 0,8775$  e parâmetro  $k = 54,9365$ . As probabilidades foram calculadas por meio da Equação 2.3, tomando por base os parâmetros  $w$  e  $k$  das Equações 4 e 5, respectivamente.

**Tabela 2.3.** Cálculo das probabilidades de ocorrência de chuvas intensas, sendo “xi” a quantidade de dias, “f obs” a frequência observada, “p(xi)” a probabilidade de ocorrência e “f esp” a frequência esperada

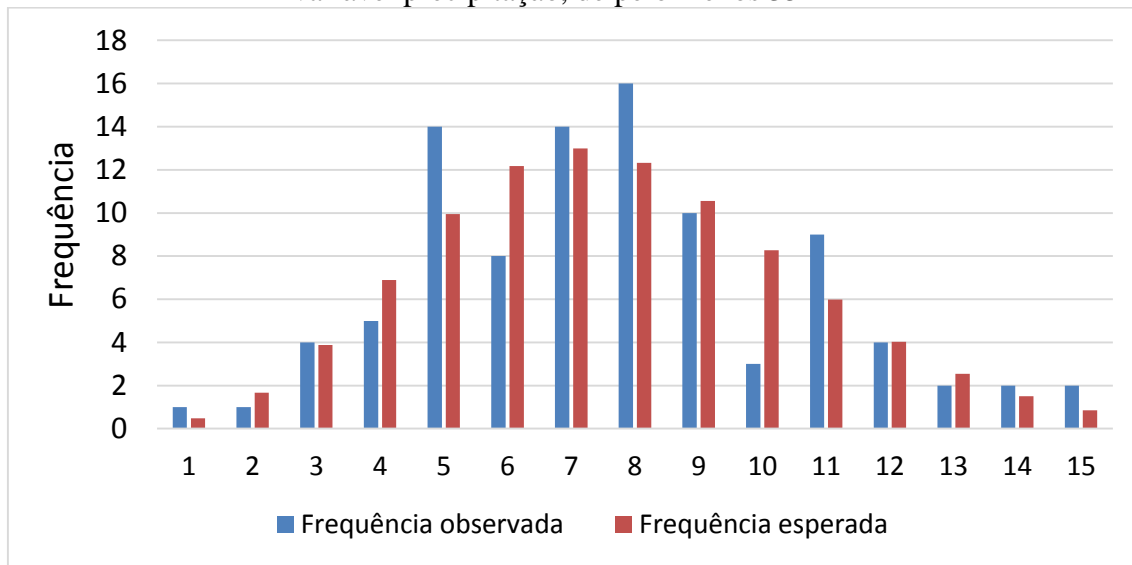
xi	f obs	p(xi)	f esp
1	1	0,0051	0
2	1	0,0176	2
3	4	0,0408	4
4	5	0,0725	7
5	14	0,1047	10
6	8	0,1282	12
7	14	0,1367	13
8	16	0,1297	12
9	10	0,1111	11
10	3	0,0871	8
11	9	0,0630	6
12	4	0,0424	4
13	2	0,0268	3
14	2	0,0159	2
15	2	0,0090	1
Total	95	0,9905	95

**Fonte:** Os próprios autores.

A representação gráfica pode ser visualizada na Figura 2.4.



**Figura 2.4.** Representação gráfica para a distribuição binomial negativa truncada, referente à variável precipitação, de pelo menos 35 mm



**Fonte:** Estação da ESALQ/USP.

Para verificar se o ajuste foi bom, calculou-se o Teste de Aderência (qui-quadrado), considerando  $\alpha = 0,05$ ;  $n = 10$  (cujos valores acima de 3 foram agrupados);  $p = 2$ ; graus de liberdade = 7 ( $n-p-1$ ), obtendo-se  $X^2$  calculado <  $X^2$  tabelado ( $5,292 < 14,067$ ) (Tabela 2.4). Desse modo, não rejeita-se  $H_0$ ; portanto, o ajuste também foi bom, cujo conjunto de dados foi adequado para a Distribuição Binomial Negativa Truncada.

**Tabela 2.4.** Teste de Aderência para a precipitação intensa

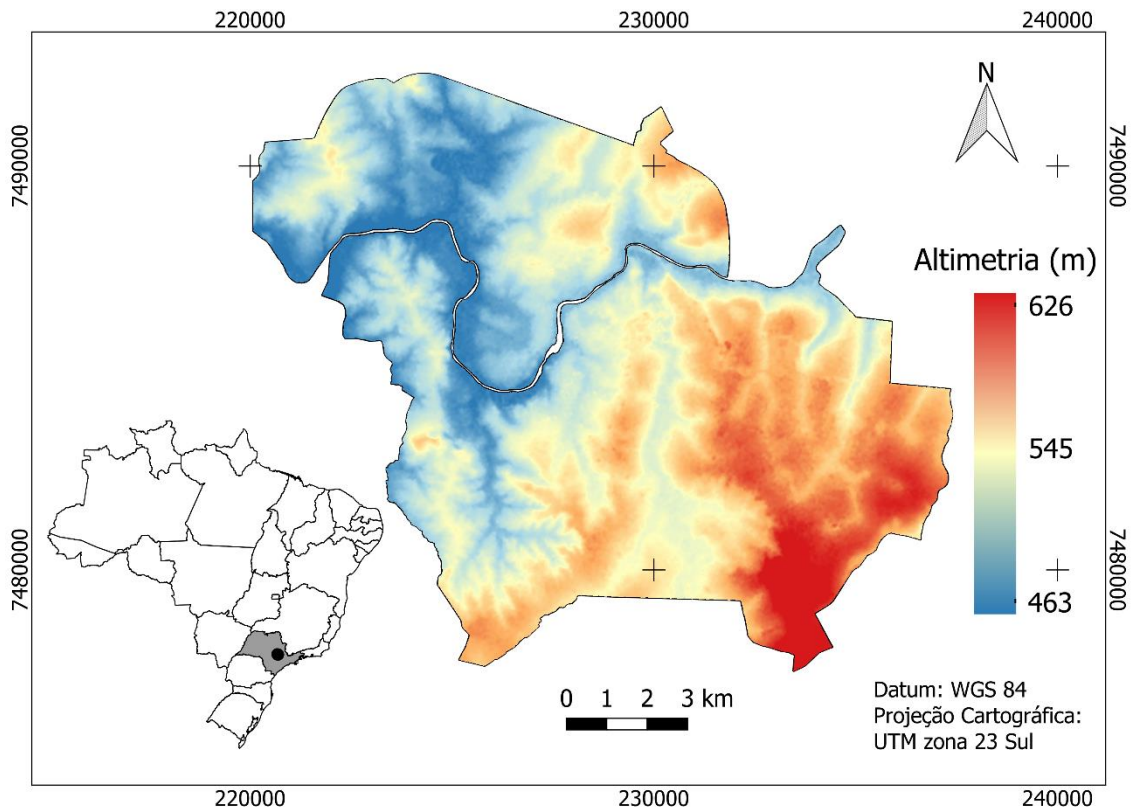
ni	f obs	f esp	$(f \text{ obs} - f \text{ esp})^2 / f \text{ esp}$
1	6	6	0,000
2	5	7	0,571
3	14	10	1,600
4	8	12	1,333
5	14	13	0,077
6	16	12	1,333
7	10	11	0,091
8	12	14	0,286
9	4	4	0,000
10	6	6	0,000
			5,292

**Fonte:** Os próprios autores.

O conhecimento da geografia é fundamental para o planejamento urbano. Por meio do radar ALOS/PALSAR foi possível identificar as áreas mais altas em Piracicaba/SP. Esta informação é importante uma vez que estes locais são estratégicos para a gestão das áreas verdes

e da arborização urbana, pois promovem a interceptação da água da chuva e sua consequentemente infiltração, evitando que o escoamento superficial siga para as áreas mais baixas e cause enchentes, alagamentos e transtornos. A Figura 2.5 destaca, em vermelho, que estas áreas concentram-se nas zonas leste e sul.

**Figura 2.5.** Mapa de altimetria de Piracicaba/SP, com cotas variando de 463 m a 626 m



**Fonte:** Elaborado no programa QGIS 2.18, a partir do radar ALOS/PALSAR.

## 2.4. Conclusões

Na série histórica estudada, a frequência de ocorrência de dias desconfortáveis para Piracicaba/SP foi de pouco mais de um terço (38%), quando a temperatura máxima do ar ultrapassou 30°C. Quanto às intensas precipitações (a partir de 35 mm), por se tratar de um evento climático mais raro, ocorre numa frequência média de 7,7 casos por ano, variando de 1 a 15 eventos anuais, ou seja, todo ano ocorre a possibilidade de alagamentos, que vai depender da quantidade de superfície impermeável.

Independentemente de quem seja o responsável pelo aquecimento global e se este realmente estiver ocorrendo ou não, é fato que a partir da década de 1980, em Piracicaba/SP, houve aumento da quantidade de dias quentes e de chuvas intensas no ano. Isso demonstra a

necessidade de políticas públicas que valorizem a presença da vegetação nas cidades, sobretudo em grandes centros urbanizados, a fim de amenizar as altas temperaturas e prevenir enchentes, alagamentos e transtornos.

### Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os autores também agradecem ao colega Luiz Augusto Leite Ribeiro pela tabulação dos dados.

### Referências

ASSIS, F.N.; VILLA NOVA, N.A. Modelagem da ocorrência e da quantidade de chuva em Piracicaba. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 52, n. 1, 1995.

ASSIS, F.N.; ARRUDA, H.V.; PEREIRA, A.R. **Aplicações de estatística à climatologia: teoria e prática**. Pelotas: UFPel, 1996.

BEZERRA, M.C.L.; FERNANDES, M.A. **Cidades sustentáveis: subsídios à elaboração da Agenda 21 brasileira**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2000.

BURDEN, D. **Urban Street Trees: 22 Benefits Specific Applications**. Orlando: Glatting Jackson and Walkable Communities Inc., 2006.

CARNEIRO, C.D.R.; TONIOLO, J.C. A Terra 'quente' na imprensa: confiabilidade de notícias sobre aquecimento global. **História, Ciências, Saúde-Manguinhos**, v. 19, n. 2, p. 369-389, 2012.

CENTER FOR URBAN FOREST RESEARCH (CUFR). **Fact Sheet 4: Control Stormwater Runoff with Trees**. 2002. Disponível em: <[https://www.fs.fed.us/psw/topics/urban\\_forestry/products/CUFR\\_182\\_UFfactsheet4.pdf](https://www.fs.fed.us/psw/topics/urban_forestry/products/CUFR_182_UFfactsheet4.pdf)>. Acesso em: 12 fev. 2019.

ENGENHARIA DE BIODIVERSIDADE. **Série de Dados Climatológicos do Campus Luiz de Queiroz de Piracicaba, SP**. Disponível em: <<http://www.leb.esalq.usp.br/leb/postocon.html>>. Acesso em: 25 nov. 2018.

GOMES, M.A.S.; AMORIM, M.C.C.T. Arborização e conforto térmico no espaço urbano: estudo de caso nas praças públicas de Presidente Prudente (SP). **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 7, n. 10, p. 94-106, 2003.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Global Warming of 1.5°C. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/sr15/>>. Acesso em: 11 fev. 2019.

NG, E; CHEN, L.; WANG, Y.; YUAN, C. A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong. **Building and Environment**, v. 47, p. 256-271, 2012.

NICODEMO, M.L.F.; PRIMAVESI, O. **Por que manter árvores na área urbana?** São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2009.

NOWAK, D. et al. **The urban forest of New York City**. Resource Bulletin NRS-117. Newtown Square: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station. 2018. <https://doi.org/10.2737/NRS-RB-117>.

O ECO. **O que são Serviços Ambientais**. 2014. Disponível em: <<https://www.oeco.org.br/dicionario-ambiental/28158-o-que-sao-servicos-ambientais/>>. Acesso em: 26 nov. 2018.

PAULEIT, S; DUHME, F. Assessing the environmental performance of land cover types for urban planning. **Landscape and Urban Planning**, v. 52, n. 1, p. 1-20, 2000.

PIZZIOLO, B.V.; TOSTES, R.; SILVA, K.; ARRUDA, V.M. Arborização urbana: Percepção ambiental dos moradores dos bairros Bom Pastor e Centro da cidade de Ubá/MG. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 18, n. 3, p. 1162-1169, 2014.

REID, W.V. et al. Millennium Ecosystem Assessment. **Ecosystems and human well-being: Synthesis**. Washington: World Resources Institute, 2005.

RIBEIRO, F.A.B.S. Arborização urbana em Uberlândia: percepção da população. **Revista da Católica**, Uberlândia, v. 1, n. 1, p. 224-237, 2009.

RIBEIRO, W.C. Impactos das mudanças climáticas em cidades no Brasil. **Parcerias Estratégicas**, Brasília, v. 13, n. 27, p. 297-322, 2010.

ROPPA, C.; FALKENBERG, J.R.; STANGERLIN, D.M.; BRUN, F.G.K.; BRUN, E.J.; LONGHI, S.J. Diagnóstico da percepção dos moradores sobre a arborização urbana na Vila Estação Colônia – Bairro Camobi, Santa Maria – RS. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, v. 2, n. 2, p. 11-30, 2007.

SANCHES, R.G.; NEVES, G.Z.F.; SANTOS, B.C.; SILVA, M.S.D.; PEREIRA, D.N.B.; TECH, A.R.B. Intense Rainfall in São Carlos/SP: Determination of Threshold Values Using Climate Indices and Their Spatio-Temporal Repercussion. **American Journal of Climate Change**. v. 7, n. 3, p. 388-401, 2018.

SHASHUA-BAR, L.; PEARLMUTTER, D.; ERELL, E. The cooling efficiency of urban landscape strategies in a hot dry climate. **Landscape and Urban Planning**, v. 92, n. 3-4, p. 179-186, 2009.

SILVA, L.F.; LIMA, A.M.L.P.; SILVA FILHO, D.F.; COUTO, H.T.Z. Interceptação da chuva por duas espécies arbóreas em áreas verdes urbanas. **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 4, p. 547-555, 2010.

STURGES, H.A. The choice of a class interval. **Journal of the American Statistical Association**, v. 21, n. 153, p. 65-66, 1926.

XIAO, Q.; McPHERSON, E.G. Rainfall interception by Santa Monica's municipal urban forest. **Urban Ecosystems**, v. 6, n. 4, p. 291-302, 2002.

### 3. THERMAL BEHAVIOR OF DIFFERENT URBAN SURFACES DURING A HOT SUMMER DAY

#### Abstract

Climate change, urban climate, urban heat island (UHI), thermal comfort and changes in land use and occupation are common terms especially in large urban centers, which have high concentrations of asphalt and concrete, but few green areas. It is in this context that this research aimed to analyze the thermal behavior of different urban surfaces during a hot summer day in a tropical city, with hourly data collected from 6:00 a.m. to 8:00 p.m., in order to assist urban planners and managers in their decision making, given the importance of vegetation for microclimatic regulation. Tree leaf (canopy), grass, asphalt in full Sun and asphalt shaded by trees were the surfaces studied with the Raytek MiniTemp infrared digital thermometer, while with a FLIR SC660 thermal camera, landscape clippings with and without vegetation were analyzed. The results showed the asphalt in full Sun with the highest thermal amplitude, reaching 65°C, while the same surface shaded by trees did not exceed 34°C, both at 12:00 p.m. The highest surface temperature occurred in the roof of a dark car (82°C) at 1:45 p.m. In the warmer hours of the day, the vegetation (tree leaf and grass) kept stable temperatures in the range of 30 to 46°C, because they contain water in their compositions, showing to be a fundamental element in the microclimate regulation during the tropical summer.

**Keywords:** surface temperature; urban climate; land use and occupation; thermal images; urban green areas.

#### Resumen

Cambio climático, clima urbano, isla de calor urbano (ICU), confort térmico y cambios en el uso y la ocupación del suelo son términos comunes especialmente en los grandes centros urbanos, que tienen altas concentraciones de asfalto y concreto, pero pocas áreas verdes. En este contexto, esta investigación tuvo como objetivo analizar el comportamiento térmico de diferentes superficies urbanas durante un caluroso día de verano en una ciudad tropical, con datos horarios recopilados de 6:00 a 20:00, para ayudar a los planificadores y agentes a tomar decisiones teniendo en cuenta la importancia de la vegetación para la regulación de los microclimas urbanos. El follaje (dosel), césped, asfalto a pleno sol y asfalto sombreado fueron las superficies estudiadas con el termómetro infrarrojo digital Raytek MiniTemp, mientras se usaba una cámara térmica FLIR SC660, para registrar recortes de paisajes con y sin vegetación. Los resultados mostraron que el asfalto a pleno sol tuvo la amplitud térmica más alta, alcanzando los 65°C, mientras que la misma superficie, pero sombreada por los árboles de la calle, no superó los 34°C, ambos a las 12:00. La temperatura superficial más alta ocurrió en el techo de un automóvil de color oscuro (82°C), a las 13:45. En las horas cálidas del día, la vegetación (hojas de árboles y césped) mantuvo temperaturas estables en el rango de 30 a 46°C, debido al agua contenida en sus tejidos, demostrando ser un elemento clave en la regulación de microclimas durante el verano tropical.

**Palabras clave:** temperatura de superficie; clima urbano; uso de la tierra y ocupación; imágenes térmicas; zonas verdes urbanas.

### 3.1. Introduction

In large urban centers, verticalized gray masses predominate in the landscape with little or no vegetation, which can be a problem because trees are primarily responsible for microclimate regulation (Zhou, Huang & Cadenasso, 2011); while herbaceous vegetation and lawns also help, but with less impact, as they do not promote cooling at pedestrian height (Ng, Chen, Wang & Yuan, 2012).

Understanding surface temperature is essential in urban climatology. It modifies lower air (canopy) layers of the urban atmosphere, contributing to the occurrence of an urban heat island (UHI) phenomenon, characterized by the temperature differences between urban and peripheral rural areas (Voogt & Oke 2003). The first survey relating urban surface heat islands to surface temperature was made 41 years ago, in the USA, mapping 50 different locations, verifying differences of up to 6.5°C between urban-rural zones, in Louisville/KY, with the aid of NOAA 5 satellite and Very High Resolution Radiometer (VHRR) thermal sensor, with 1 km spatial resolution (Matson, McClain, McGinnis Jr. & Pritchard, 1978).

Remote sensing appears as an important tool for the knowledge of natural and anthropogenic phenomena, i.e., remote surface analysis using Geographic Information Systems (GIS), satellite imagery, geostatistics, GPS, topography etc. For example, with high resolution aerial thermal images (overflight) it is possible to map the thermal field of the urban surface, identifying comfort and discomfort zones, being asphalt in full Sun the main component of the highest surface temperature values (Mendes, Polizel, Hamamura, Baptista & Silva Filho, 2015).

The objective of this research was to analyze the thermal behavior of different urban surfaces during a hot summer day in a tropical city.

### 3.2. Method

About 40% of the world's population (equivalent to three billion people) is estimated to reside in tropical zones (Tropical Countries Population, 2019). The study area of this research is located in Piracicaba/SP/Brazil (22° 42' S and 47° 38' W), under climate type Cwa (according to Köppen-Geiger classification) – with a subtropical dry winter and hot and rainy summer (annual average precipitation of 1300 mm, at 546 m altitude; Biosystems Engineering, 2019).

The fieldwork was done in two days, following the weather forecast of clear skies, to avoid high cloudiness and consequent precipitation, since these later weather conditions are frequent during the local summer. In the first day, on January 23, 2019, two records were made

with the FLIR SC660 thermal camera (Figure 3.1), considering landscapes with and without vegetation. This is a portable camera, equipped with the standard 24° lens, large high resolution 5.6" flip-out LCD, weight of 1.8 kg, 640 x 480 pixels infrared resolution, 3.2 Mpixel, auto focus,  $\pm 1^\circ\text{C}$  accuracy and standard temperature range  $-40^\circ\text{C}$  to  $1500^\circ\text{C}$  (FLIR, 2009). On the second day, the temperature of different urban surfaces was monitored, such as tree leaf/crown (*Licania tomentosa* (Benth.) Fritsch.), grass (*Paspalum notatum* Flügge), asphalt in full Sun and asphalt shaded by trees. The air temperature, which was recorded by a local Meteorological Station (Biosystems Engineering, 2019), 4 km away from the measurements was also recorded. Both tree and grass are native to Brazil. Measurements were taken from 6:00 a.m. to 8:00 p.m., hourly, with a tolerance of  $\pm 15$  min, using the Raytek MiniTemp digital infrared thermometer (Figure 3.1). This thermometer measures the surface temperature of a given point. Although it is not possible to obtain a thermal image like the FLIR SC660, it is more portable and is available at a more affordable price (approximately USD 70). It works in the range of  $-18^\circ\text{C}$  to  $400^\circ\text{C}$  (0 to  $750^\circ\text{F}$ ), also with  $1^\circ\text{C}$  accuracy (Raytek, 2019).



Figure 3.1. FLIR SC660 thermal camera and Raytek MiniTemp infrared thermometer, respectively. Source: FLIR (2009) and Raytek (2019)

### 3.3. Results and Discussion

Infrared thermographies have been studied in recent surveys with the FLIR SC660 Infrared Camera to map thermal comfort zones (Mendes et al., 2015), analyze concrete deterioration (Huh et al., 2016), track environmental contamination (Lega et al., 2012), agricultural monitoring (Garcia-Tejero et al., 2018), animal health (Soerensen, Clausen, Mercer & Pedersen, 2014) and muscle pain intensities in humans (Al-Nakhli, Petrofsky, Laymon &



Berk, 2012), which demonstrate the possibilities of use not only in geography, but also in engineering, agronomy and medicine.

Warmer surfaces tend to be impermeable, dark, low reflectance and may exceed 65°C under the summer Sun (Gartland, 2010). In our case study, the highest surface temperature occurred on the upside of a dark colored car (82°C, measured with Raytek MiniTemp) at 1:45 p.m., followed by asphalt in full Sun (65°C), while the vegetation was in the range of 30 to 40°C (Figure 3.2). The maximum air temperature was 31.2°C, at 2:00 p.m.

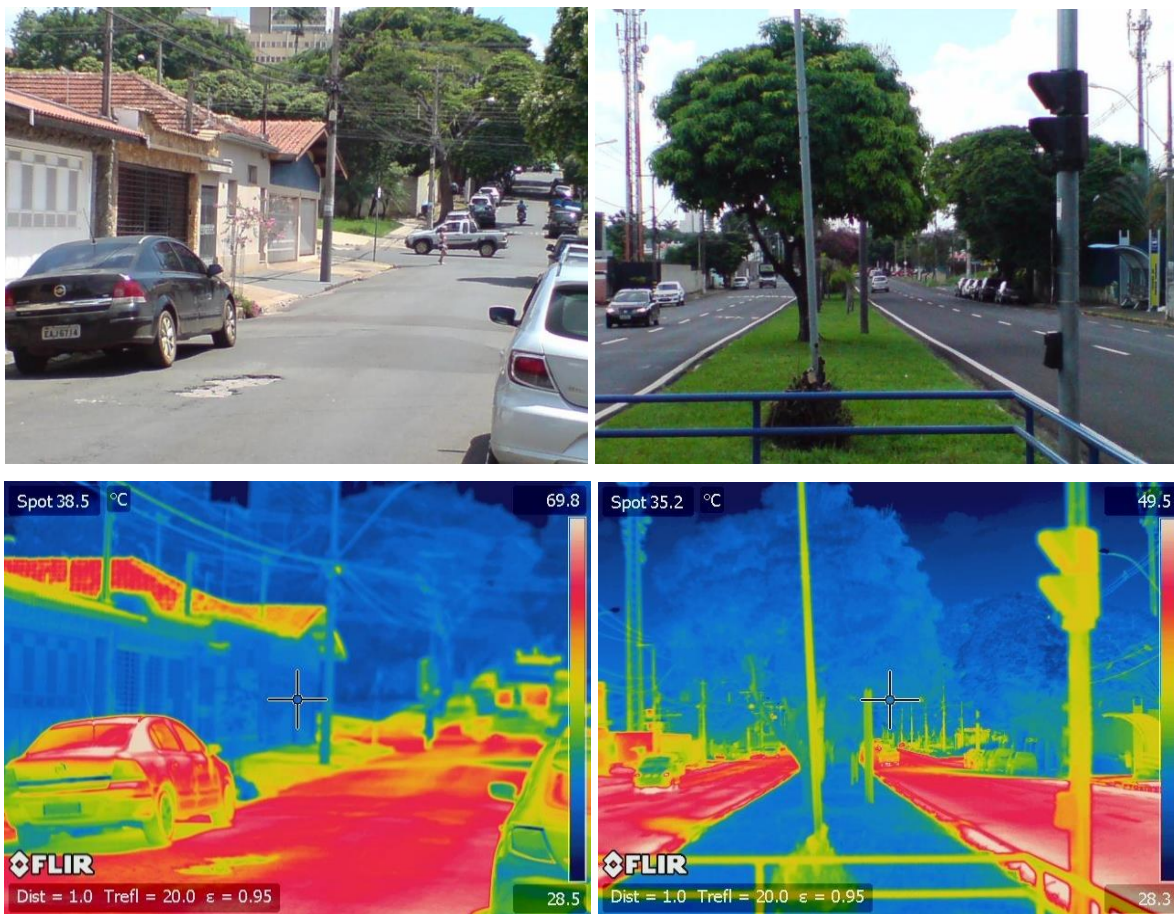


Figure 3.2. Thermal image of two different landscapes taken at 1:45 p.m. (Rua Visconde do Rio Branco, 1537) and at 2:30 p.m. (Rua Cássio Pascoal Padovani, 1315), respectively. Source: the authors

Hourly measurements indicated that the asphalt in full Sun had the highest thermal amplitude (40°C), ranging from 25°C at 6:00 a.m. to 65°C at 12:00 p.m., while the same surface, but shaded by nearby trees on sidewalks, did not exceed 34°C, at the same time. In the warmer hours of the day (afternoon), the vegetation (tree leaf and grass) maintained stable temperatures in the range of 30 to 46°C (Figure 3.3).

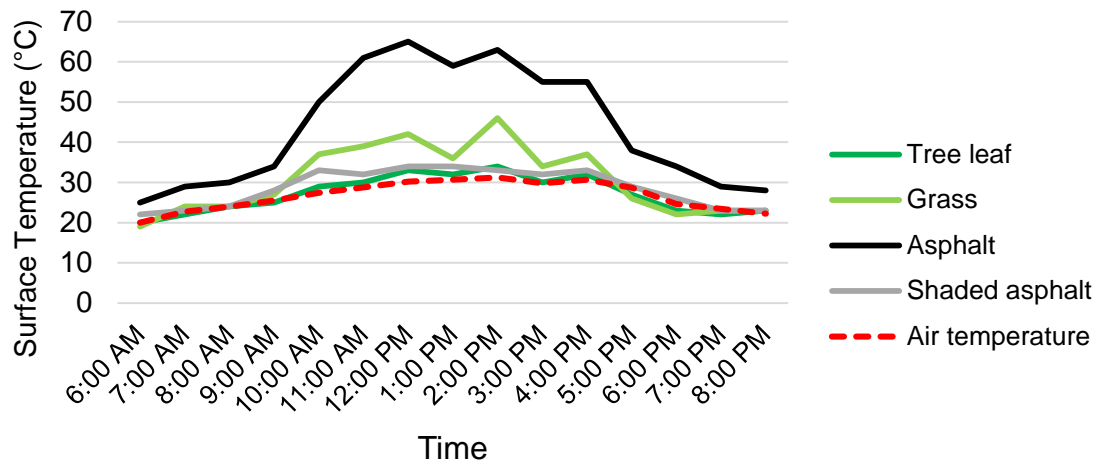


Figure 3.3. Hourly thermal behavior of different surfaces in the urban environment, recorded during a tropical summer day. Source: the authors

It can be seen from Figure 3.3 that there is no smooth curve for asphalt and grass. This can be explained by passing clouds for a few minutes, cooling these surfaces. As mentioned earlier, the local summer is characterized by high temperatures associated with high cloud cover, with the consequent occurrence of rainfall. Thus, the values recorded here may be even more extreme. On this day there were two moments of rain: at 4:30 p.m. and 6:30 p.m., uniformizing surface temperatures. The peak in air temperature occurred at 2:00 p.m., with 31.2°C (Biosystem Engineering, 2019).

Comparing grass and tree leaf temperature performance, it is noticed more stable values in the later, because it contains more water than the former. Since the specific heat of the water is high (1 cal/g.°C), it takes a longer time to change its temperature, increasing or decreasing, which guaranteed such stability. The grass is a type of C4 plant and the tree (*Licania tomentosa*), C3, which differ in the carbon fixation process during the photosynthetic process. At high temperatures, stomata close mainly in grass (C4), reducing transpiration without affecting carbon fixation during the day. C3 plants occurring mainly in humid tropical regions and do not have adaptations to reduce photorespiration and fix carbon only by the Calvin Cycle, producing as a final product 3-phosphoglyceric acid; while C4 plants, adapted to the conditions of arid environments, also fix carbon by the C4 pathway, producing oxaloacetate. This pathway is an adaptive mechanism that such plants have that allows greater self-control under environmental conditions, enabling them to be more economical than C3, since they lose less water during photosynthesis, because warming their surfaces more (Sage & Monson, 1999), i.e., in short, the grass transpires at night, opening its stomata and consequently becoming cooler than trees; during the day, the opposite happens: the tree gets fresher because transpiration.

In Basel, Switzerland, Leuzinger, Vogt & Körner (2010) analyzed the temperature of tree tops of 10 distinct species, often planted on the streets of central European cities, and found values between 24 and 29°C, being air temperature at 25°C. The coldest ones were in parks (as opposed to the ones in the streets), except conifers (*Pinus* spp.), which were close to the air temperature, verifying that the smaller leaves have smaller thermal amplitudes; on the other hand, the larger trees are generally more efficient in producing good shades, and they concluded that urban tree temperatures are species-specific and depend on many factors such as location, leaf size, stomatal conductance and canopy architecture.

### **3.4. Conclusions**

The vegetation, composed of trees and grass, proved to be a fundamental element in the microclimate regulation during the tropical summer, since it presented lower thermal amplitude in surface temperature (14°C), contrary to the asphalt in full Sun, which varied from 25°C to 65°C, with a range of 40°C. In addition, the asphalt shaded by the street trees was 12°C amplitude (22°C to 34°C), proving, thus, to be an alternative of cooling to urban planners.

Both used tools (Camera Thermal FLIR SC660 and Raytek MiniTemp Infrared Thermometer) presented satisfactory results in this investigation. Obviously, it will depend on the financial availability of stakeholders, but was shown here that it is possible to use them to propose improvements in the urban climate. We also have free satellite imagery (such as Landsat-8, thermal band 10) available to complement research like this, but, while the objective here was to analyze at the microclimatic level, the images allow us to analyze larger areas, but in less detail (like whole cities).

This study provides information for decision makers, to plan and manage urban landscapes, enabling them to reduce climate and environmental inequalities among residents, especially regarding thermal comfort, given the large amount of direct insolation received in tropical areas. Further research is needed to assess the potential and viability of using solar energy as an energy matrix.

### **Acknowledgements**

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001. The authors also thank Santander for

research assistance, and FAPESP (Process 2009/53931-6) for the purchase of the FLIR SC660 thermal camera.

## References

- Al-Nakhli, H.H., Petrofsky, J.S., Laymon, M.S., & Berk, L.S. (2012). The use of thermal infrared imaging to detect delayed onset muscle soreness. *JoVE (Journal of Visualized Experiments)*, (59), e3551.
- Biosystems Engineering. (2019). Climatic Data Series of *Campus Luiz de Queiroz de Piracicaba, SP*. Available at <http://www.leb.esalq.usp.br/posto/>
- FLIR SC660 specifications. (2009). *Online Manual*. Available at <http://ramiro.webs.uvigo.es/sc660datasheet.pdf>
- García-Tejero, I., Ortega-Arévalo, C., Iglesias-Contreras, M., Moreno, J., Souza, L., Tavira, S., & Durán-Zuazo, V. (2018). Assessing the crop-water status in Almond (*Prunus dulcis* Mill.) trees via thermal imaging camera connected to smartphone. *Sensors*, 18(4), 1050.
- Gartland, L. (2010). *Ilhas de calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas*. Oficina de Textos.
- Huh, J., Tran, Q.H., Lee, J.H., Han, D., Ahn, J.H., & Yim, S. (2016). Experimental study on detection of deterioration in concrete using infrared thermography technique. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016.
- Lega, M., Kosmatka, J., Ferrara, C., Russo, F., Napoli, R.M.A., & Persechino, G. (2012). Using advanced aerial platforms and infrared thermography to track environmental contamination. *Environmental Forensics*, 13(4), 332-338.
- Leuzinger, S., Vogt, R., & Körner, C. (2010). Tree surface temperature in an urban environment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(1), 56-62.
- Matson, M., McClain, E.P., McGinnis Jr., D.F., & Pritchard, J.A. (1978). *Satellite detection of urban heat islands*. *Monthly Weather Review*, 106(12), 1725-1734.
- Mendes, F.H., Polizel, J.L., Hamamura, C., Baptista, M.D., & Silva Filho, D.F. (2015). Potencialidades no uso de imagens termais aéreas de alta resolução da superfície urbana como ferramenta para mapear o campo térmico. *Scientia Plena*, 11(9).
- Ng, E., Chen, L., Wang, Y., & Yuan, C. (2012). A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong. *Building and Environment*, 47, 256-271.

- Raytek MiniTemp. (2019). Available at [https://www.raytek-direct.com/pdfs/cache/www.raytek-direct.com/raytek/ir\\_thermometer/raymt4u/datasheet/raytek\\_raymt4u\\_ir\\_thermometer\\_datasheet.pdf](https://www.raytek-direct.com/pdfs/cache/www.raytek-direct.com/raytek/ir_thermometer/raymt4u/datasheet/raytek_raymt4u_ir_thermometer_datasheet.pdf)
- Sage, R.F. & Monson, R.K. (Eds.). (1999). *C4 Plant Biology*. Academic Press.
- Soerensen, D.D., Clausen, S., Mercer, J.B., & Pedersen, L.J. (2014). Determining the emissivity of pig skin for accurate infrared thermography. *Computers and electronics in agriculture*, 109, 52-58.
- Tropical Countries Population. (2019). *World Population Review*. Available at <http://worldpopulationreview.com/countries/tropical-countries/>
- Voogt, J.A., & Oke, T.R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 370-384.
- Zhou, W., Huang, G., & Cadenasso, M.L. (2011). Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 102(1), 54-63.

#### 4. CAMBIO CLIMÁTICO ADVERSO PROVOCADO POR LA URBANIZACIÓN SIN PLANIFICACIÓN NI EVALUACIÓN AMBIENTAL EN SANTIAGO DE CHILE

##### Resumen

A pesar de modelos y evidencias científicas disponibles sobre el Cambio Climático a escala global, la planificación y gestión de los territorios urbanos en Latinoamérica no ha conseguido considerarlo por sobre sus restricciones económicas, sociales y políticas. Seleccionando la temperatura superficial y la ventilación como variables climáticas críticas se analiza el caso de Santiago de Chile como ejemplo de contradicciones entre políticas y declaraciones oficiales y las transformaciones reales de los climas urbanos, destacando el incremento generalizado de las temperaturas de superficie, representado por imágenes satelitales, debido a la ausencia de evaluaciones ambientales rigurosas de cambios de usos y coberturas de suelos que han acompañado la urbanización. Una simulación microclimática ha permitido estimar la reducción de velocidad y cambios en la dirección de los vientos, como consecuencia de la densificación y verticalización en la comuna de Estación Central. La generación de “zonas muertas” de ventilación se relaciona con diseños, topología y exposición de las edificaciones, afectando la calidad de vida de los habitantes. La mitigación y adaptación a lo Cambio Climático debe formar parte explícita de los objetivos, planes y proyectos que persigan la calidad y justicia territorial de los climas urbanos y, consiguientemente, del bienestar y confortabilidad de la sociedad.

**Palabras clave:** clima urbano, imágenes Landsat-7, temperatura de superficie, ventilación, ENVI-met.

##### Abstract

Despite available models and scientific evidence on climate change on a global scale, the planning and management of urban territories in Latin America has failed to consider it above its economic, social and political constraints. By selecting surface temperature and ventilation as critical climate variables, the case of Santiago de Chile is analyzed as an example of the contradictions between policies and official declarations and the real transformations of urban climates, highlighting the widespread increase in surface temperatures, represented by satellite imagery, due to the absence of rigorous environmental assessments of changes in land uses and covers that have accompanied the urbanization. A microclimatic simulation has allowed estimating the reduction of speed and changes in the direction of the winds, such as consequence of the densification and verticalization in the Estación Central commune. The generation of ventilation "dead zones" relates to designs, topology and exposure of the buildings, affecting the quality of life of the inhabitants. Mitigation and adaptation to Climate Change should be an explicit part of the objectives, plans and projects that pursue the quality and territorial justice of urban climates and, consequently, the well-being and comfort of society.

**Keywords:** urban climate, Landsat-7 images, surface temperature, ventilation, ENVI-met.

#### 4.1. Introducción

Las ciudades constituyen el principal nicho ecológico de la humanidad, claramente afectada por la incertidumbre y pronósticos negativos asociados a las transformaciones ambientales causadas por un desarrollo inconsistente, frente a la constatación de datos empíricos y modelos de análisis del Cambio Climático y sus efectos sobre los espacios y sociedades urbanizadas que caracterizan la situación global contemporánea. Resulta incomprensible que, a pesar de la aceptación generalizada de que las ciudades son focos de generación y de concentración de los impactos del Cambio Climático, las evidencias existentes demuestran que no solo no se han aplicado medidas de mitigación y adaptación en forma permanente y sistemática en el diseño, planificación y gestión de los espacios geográficos urbanos, sino que, por el contrario, han aumentado y aumentan diariamente las transformaciones adversas al interior de las ciudades, tales como el incremento de las fuentes de calor fijas y móviles. Algo similar ocurre con la reducción de la humedad atmosférica debido a la desecación de humedales y el desaparecimiento de las áreas verdes y suelos saturados. De igual manera, el acceso de las masas de aire costeras o ribereñas se ve impedido crecientemente por la verticalización de las edificaciones de sus bordes. Adicionalmente, la ventilación, necesaria para mitigar el calor y depurar los contaminantes atmosféricos se reduce o desaparece como consecuencia de la obstrucción y encauzamiento de los flujos de aire causados por la altura y orientaciones de edificaciones que no consideran para nada la generación de cañones urbanos o zonas “muertas” a sotavento de las mismas. Las islas y olas de calor aumentan en vez de decrecer en las ciudades como consecuencia de las construcciones que almacenan la radiación solar y posteriormente la devuelven a las capas atmosféricas “límites” y de follaje o “canopia” urbano (Oke, 1978; Stewart & Oke, 2012).

El crecimiento urbano incluye la pavimentación e impermeabilización de paisajes naturales, que sustituyen bosques, matorrales, humedales y campos agrícolas y forestales, sin límite ni consideración alguna por la conservación de los servicios ecosistémicos que prestan. La homogeneización de las zonas de calor y carentes de humedad elimina los contrastes térmicos necesarios para generar brisas y vientos locales, explicando en parte los altísimos niveles de concentración de contaminantes atmosféricos que en la actualidad se registran en lugares específicos de las ciudades grandes y medianas. Pareciera que los conocimientos existentes y la tarea sistemática de la investigación científica por proveer de mejores y mayores datos sobre los climas urbanos no son suficientes para alterar decisiones de diseño y planificación de las ciudades, que continúan siendo lideradas por la rentabilidad económica y

las urgencias sociales. Consecuentemente, estas consideraciones no forman parte de las exigencias explícitas de conservar la calidad de los climas y del aire, ni de proponer acciones de justicia ambiental, confort y adecuada calidad de vida para sus habitantes (Romero, 2019).

Los objetivos específicos para contener el Cambio Climático no son parte de los instrumentos de planificación territorial y, en los casos en que se han generado redes de colaboración entre ciudades, terminan siendo totalmente efímeras, insignificantes e ineficaces frente a los requerimientos de los agentes económicos y políticos que controlan el desarrollo urbano. Barton (2009) realizó un detallado análisis de las propuestas, programas y proyectos internacionales sobre Cambio Climático que se habían presentado hasta fines de la primera década del siglo XXI, concluyendo que la resiliencia al clima debería ser el *sine qua non* de la planificación territorial de las regiones y las ciudades, debiéndose otorgar prioridad a la adaptación de los asentamientos humanos, en particular debido a la concentración espacial y vulnerabilidad de la mayoría de sus habitantes. Consideraba que el enfoque sectorial prevaleciente, orientado principalmente al fomento productivo y a las soluciones de infraestructura no era suficiente, siendo necesario que quienes toman decisiones en los centros urbanos dispusieran de la capacidad de coordinar respuestas adecuadas de corto, mediano y largo plazo a través de la planificación territorial y urbana, es decir, en casos sin planes de adaptación, como en la ciudad-región de Santiago de Chile, se puede notar el aumento de los riesgos asociados y de los costos para su reducción.

En el marco de la preparación de la Conferencia de las Partes del Programa Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (COP25) que se debería haber celebrado en noviembre de 2019 en Santiago de Chile, un Comité Científico establecido por el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación preparó el Informe “Ciudades y Cambio Climático en Chile: Recomendaciones desde la evidencia científica” (Muñoz *et al.*, 2019). Los objetivos de este documento fueron reunir informaciones sobre políticas públicas relacionadas con el tema, analizar la situación de las ciudades chilenas en temas de mitigación (entre ellos movilidad, edificación, equipamientos y energía), adaptación (frente a riesgos y desastres, desarrollo de infraestructura, espacios verdes y vulnerabilidad en términos de salud) y gobernanza. Se trataba de presentar propuestas de acción destinadas a reducir las emisiones de gases invernadero producidas en las ciudades y la vulnerabilidad de los asentamientos humanos ante los desastres y riesgos siconaturales. Estas dos últimas acciones han sido planteadas como prioritarias en todas las iniciativas oficiales respecto a la lucha contra el Cambio Climático en las ciudades chilenas, concebidas más bien como receptoras pasivas de sus impactos. De acuerdo a los autores, en Chile, las políticas y planes han sido pocas y de reciente promulgación,



como es el caso del Plan de Adaptación al Cambio Climático para Ciudades (PACC Ciudades), aprobado en 2018, pero que aún no se ha implementado (Muñoz *et al.*, 2019). A la vez, ha habido iniciativas realizadas a través de la Organización No Gubernamental (ONG) ADAPT-Chile y la Red de Municipios frente al Cambio Climático que han desarrollado procesos de concientización, identificación de amenazas y medidas locales de enfrentamiento; también, proyectos del Banco Interamericano de Desarrollo (Programa Ciudades Emergentes y Sostenibles), de la Fundación Rockefeller (Santiago Humano y Resiliente) y el proyecto Clima-Adaptación-Santiago (CAS), financiado por el gobierno alemán entre 2009 y 2012, que contó con la participación de académicos y autoridades del gobierno regional, y el proyecto MAPA con apoyo del CIDE de Canadá.

Según este documento oficial destinado a informar a los delegados internacionales ante la COP25, la disponibilidad de conocimientos científicos que sustenten las medidas para enfrentar el Cambio Climático en las ciudades no es suficiente si no existen mecanismos adecuados para la toma de decisiones, que superen acciones parciales y desarticuladas. Es necesario, ante esto, una gobernanza que incluya formas de participación en la formulación de decisiones e implementación de acciones, y la coordinación entre sociedad civil, sector privado y Estado en forma horizontal y vertical. Se reconoce que las iniciativas para crear estos mecanismos de gobernanza han sido pocas y fragmentadas, y sugiriendo una aproximación multiescalar, se postula que la creación de Comités Regionales de Cambio Climático, bajo el contexto de descentralización y del principio de subsidiariedad, serían un impulso clave, complementado con organismos locales, tales como Comités Ambientales Comunales, Juntas de Vecinos y empresas, para elaborar planes y proyectos coordinados, coherentes a nivel territorial, actualizados periódicamente, y con seguimiento y financiamiento que sustente su implementación (Muñoz *et al.*, 2019).

Chile ha elaborado el Plan de Acción Nacional de Cambio Climático (PANCC), que cuenta con dos versiones (PANCC I 2008-2012 y PANCC II 2017-2022). El primero aborda diferentes temáticas relacionadas con los problemas urbanos (transporte, contaminación del aire y agua, zonas costeras), pero sin profundizar las propuestas que consideran a las ciudades como unidades territoriales sistémicas e integradas. La segunda versión de este Plan, manteniendo su carácter sectorial, establece medidas generales de mitigación, adaptación y gobernanza que abarcan una significativa variedad de sugerencias relativas a movilidad, transporte, planificación del territorio, urbanización, edificación sustentable, infraestructura pública, uso de la energía y abastecimiento de agua y el fomento del uso de tecnologías limpias y renovables según acuerdos internacionales. El documento enfatiza la idea de que las ciudades son el motor

esencial de cambio para que el buen funcionamiento de las actividades se vincule de manera transversal con las propuestas de Cambio Climático (Muñoz *et al.*, 2019).

Por otro lado, en 2012 se presentó el primer “Plan de Acción Climática para la Región Metropolitana de Santiago”, que, de acuerdo a Romero-Lankao *et al.* (2013), significó que la planificación para el Cambio Climático urbano en aislamiento de otras instituciones generara un falso sentido de capacidad de respuesta institucional, en circunstancias que las políticas que orientaban el crecimiento económico tenían prioridad sobre la protección ambiental y la reducción de riesgos. Ello implica enfrentar desafíos, tales como la fragmentación de los arreglos de gobernanza, asimetrías en acceso a la información y tomas de decisiones tecnocráticas desde arriba hacia abajo. Para los autores, el Cambio Climático era y es aún un tema secundario comparado con otras prioridades del desarrollo, persistiendo una tensión entre las preocupaciones ambientales y las preferencias dadas al crecimiento urbano.

Como la totalidad de los componentes ambientales, el clima urbano se ha *comodificado* (Romero & Vásquez, 2005) y, por ello, solo tienen acceso a las zonas de mayor calidad y confort climático quienes puedan pagar un alto precio por habitar en un lugar dentro de la ciudad que garantice bienes y servicios ecosistémicos que resultan indelegables, tales como respirar un aire de calidad, saludable y seguro. La mayoría de la población, debido a sus menores ingresos económicos, debe residir permanentemente en medio de una atmósfera contaminada o de “territorios de sacrificio climático” que registran temperaturas máximas y mínimas extremas, sequedad permanente, falta de vientos y brisas y elevadas concentraciones de contaminantes. Los sufrimientos climáticos, representados por olas e islas de calor y frío, no se distribuyen homogéneamente al interior de las ciudades. Más aún, la residencia en un área de adecuada calidad y seguridad climática se ha tornado crecientemente un bien escaso, aumentando con ello su valor en el mercado inmobiliario, contribuyendo de esta forma a la injusticia y falta de equidad territorial que lamentablemente afecta a la casi totalidad de las ciudades chilenas.

Conocer y comprender la climatología urbana es, entonces, un factor esencial para planificar ciudades sostenibles. En general, las ciudades grandes y medianas de América Latina continúan creciendo a un ritmo muy rápido, cambiando las condiciones climáticas y generando incertidumbre sobre su comportamiento temporal y espacial futuro, lo que impide, entre otros factores, su consideración en los planes de desarrollo urbano (Gallardo *et al.*, 2012; Romero, 2019). Los estudios iniciales del clima urbano solo diferenciaban entre los espacios rurales y urbanos (o entre centro y periferia de las ciudades), replicando modelos de análisis aplicables a países que planifican y controlan estrictamente el crecimiento y distribución de sus espacios

urbanos, lo que no es el caso de las ciudades latinoamericanas. En estas, la falta de regulaciones y el poblamiento espontáneo han generado un complejo y fragmentado mosaico de numerosos patrones distintos de uso y ocupación de la tierra y, consecuentemente, creado diferentes Zonas Climáticas Locales (Stewart & Oke, 2012), además de islas, islotes, corredores y puntos de calor y frío extremos.

La diferenciación socioespacial de las condiciones ambientales dentro de las ciudades impide cualquier generalización sobre su climatología urbana, como resultado de las condiciones locales que generan entornos complejos y distintos para cada vecindario. En la ciudad de São Paulo (Brasil), una de las urbes más grandes del mundo, un reciente estudio consideró en forma integrada condiciones y cambios de población, medio ambiente, delincuencia, vivienda, movilidad y expansión urbana, encontrando al menos ocho tipos de espacios urbanos locales fragmentados (Nery *et al.*, 2019) a la escala de la llamada Capa Límite Urbana (*Boundary Layer Climates*, de Oke, 1978). En la escala de la capa atmosférica localizada bajo la altura máxima de las edificaciones (*Canopy Layer*, según Oke, 1978), la temperatura de la superficie medida *in loco* superó los 80°C en el techo de un automóvil oscuro y en el asfalto puede alcanzar 65°C en un caluroso día de verano, mientras la vegetación puede mitigar estos rangos extremos, creando condiciones climáticas más agradables (Mendes *et al.*, 2019).

En Santiago de Chile, los proyectos inmobiliarios representan una de las principales inversiones económicas y, junto a las urgencias sociales, han reducido significativamente la comprensión y consideración de los vínculos entre sociedad y naturaleza, privatizando y comodificando los recursos, bienes y servicios ecosistémicos. Ello ha disuelto, consecuentemente, la noción de bien común aplicable al territorio, medio ambiente y clima de las ciudades y, por lo tanto, obstaculizado la implementación de políticas públicas destinadas a controlar la expansión urbana y asegurar el logro de objetivos ambientales explícitos tales como evitar los riesgos socionaturales, mitigar y adaptarse al Cambio Climático y conseguir mejores niveles de equidad territorial, justicia ambiental, calidad de vida y salud (Romero & Vásquez, 2005; Romero *et al.*, 2012; Inostroza *et al.*, 2016; Vásquez *et al.*, 2016; Barrera & Henríquez, 2017). Como consecuencia, se han encontrado islas de calor urbano por encima de 5°C en el área más densamente construida del centro de la ciudad y en comunas (“conjunto de barrios”) como Quilicura, ubicada al NW de la ciudad, donde alternan espacios industriales, residenciales de alta densidad y algunos remanentes de superficies agrícolas (Sarricolea Espinoza & Martín-Vide, 2014), lo que resulta en una mayor demanda de energía (Nuruzzaman, 2015).

El objetivo del presente trabajo ha sido analizar la evolución climático-ambiental de la urbanización de Santiago de Chile en un período de tiempo relativamente largo (2000 y 2019), con la finalidad de proporcionar antecedentes que permitan evaluar si el diseño y construcción de los espacios urbanos constituyen una contribución o, por el contrario, una oposición a los planes de lucha contra el Cambio Climático.

## **4.2. Material y Métodos**

### **4.2.1. Área de estudio**

Chile es un país con aproximadamente 18 millones de habitantes cuya capital, Santiago, es la ciudad más poblada, con más de cinco millones de habitantes, aunque la Región Metropolitana de Santiago supera los siete millones (INE, 2017). Se ubica en la parte central del país y, según la clasificación climática de Köppen-Geiger, el clima es de tipo mediterráneo (Csb), con verano cálido y seco, e invierno templado y lluvioso (Peel *et al.*, 2007), donde la contaminación atmosférica por material particulado (MP10 y MP2,5) emitida principalmente por los vehículos, las industrias y el consumo de leña es un riesgo ambiental crítico (Romero *et al.*, 2010).

Para comprender el proceso de Cambio Climático urbano causado por el crecimiento y densificación de Santiago, se llevaron a cabo dos análisis: el primero fue estudiar a escala de la Capa Límite Urbana la evolución de la temperatura de la superficie del suelo (TS) en un período de tiempo relativamente largo (2000 y 2019), mientras que el segundo, representativo de la escala de Canopia Urbana, consistió en una simulación microclimática para investigar cambios en el flujo del viento en un recorte urbano realizado en la comuna de Estación Central, sede de la instalación de los llamados “guetos verticales”, caracterizados por conjuntos de edificios de gran altura que concentran sectores sociales específicos.

### **4.2.2. Datos**

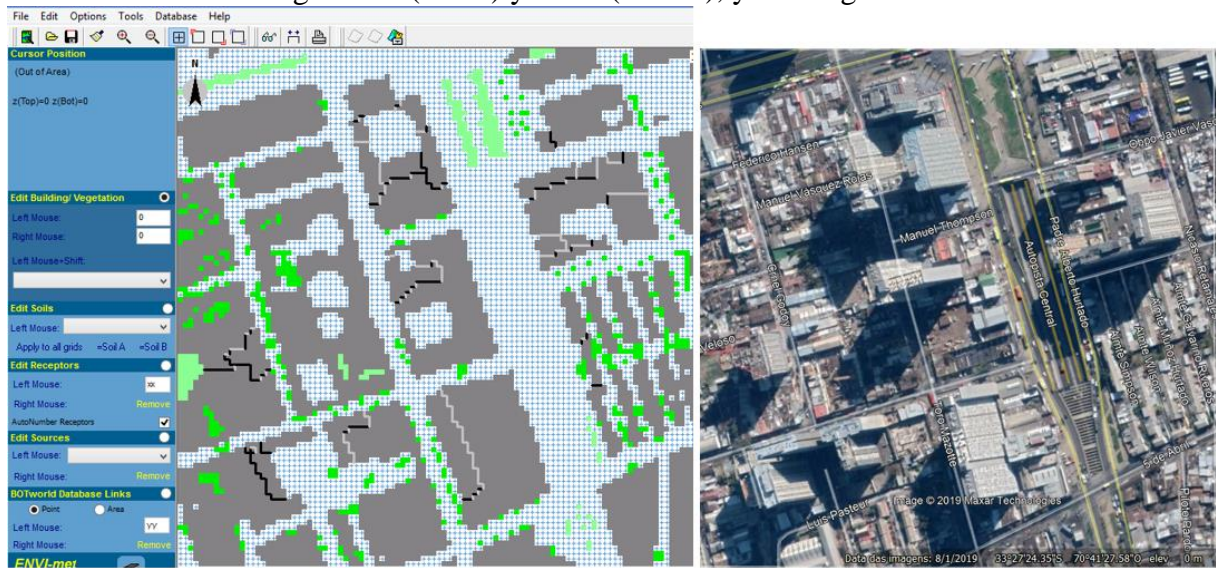
Para considerar la distribución espacial de la temperatura de la superficie del suelo en Santiago se utilizaron imágenes del satélite Landsat-7 (banda térmica 6), que fue lanzado por la NASA en abril de 1999, identificando áreas cálidas y frescas (con y sin vegetación). La metodología propuesta por Congedo (2014) se adoptó, a través del Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) para el *software* QGIS versión 2, que convierte el valor del *Digital*

*Number* (DN) en temperatura de superficie. Se compararon las imágenes del 27 de enero de 2000 y 31 de enero de 2019, correspondientes a la estación de verano (*Path*: 233; *Row*: 083). Por lo tanto, las imágenes elegidas representan una de las más antiguas y una de las más recientes disponibles para el verano austral. En Santiago, el paso del Landsat-7 se realiza por la mañana, alrededor de las 10.30 hora local (UTC-4), momento en el que las superficies comienzan a calentarse; de esta forma, las horas siguientes mostrarían diferencias aún mayores en las temperaturas superficiales, como el asfalto, en torno de las 12.00 o 13.00 hrs. La vegetación, por su parte, por cerrar sus estómas foliares para no perder agua frente a las altas temperaturas, alcanza sus mayores temperaturas al medio de la tarde (Mendes *et al.*, 2019).

Las imágenes de Landsat-7 han presentado ruido en sus bordes desde mayo de 2003 (Pires & Ferreira Jr., 2015); sin embargo, la ciudad de Santiago se encuentra en el medio de la escena 233083 y no se ha visto comprometida, por lo que dispone de suficiente información útil, ya que su banda térmica tiene una resolución espacial de 60 m, mientras que el Landsat-8, con una resolución espacial de 100 m, representa menores detalles. Además, Landsat-8 se lanzó solo en 2013 (INPE, 2019), lo que hace imposible comparar los veinte años de cambio aquí propuestos. Con respecto a la elección de la imagen, se consideraron dos requisitos: (i) la imagen (ciudad) no debe estar cubierta por nubes, lo que dificulta la identificación remota del objeto y (ii) evitar épocas del año entre mediados de otoño e invierno, porque la presencia de árboles caducifolios podría sesgar los datos.

Para la simulación del microclima se utilizó el modelo ENVI-met versión 3, capaz de realizar interacciones entre la superficie terrestre, las plantas y el aire. Esta versión gratuita requiere dos archivos de entrada: (i) extensión .in (Figura N°4.1), que corresponde al modelado del área, ubicando y caracterizando los diferentes elementos urbanos; consiste en la inserción de una imagen aérea (como de Google Earth, guardada en formato .bmp) para ayudar al operador con la localización de edificios y sus alturas (esto a través de Google Street View y verificación *in loco* - considerando cada piso de 3 m de altura), tipos de vegetación con su densidad de dosel, tipos de suelo y fuentes contaminantes; (ii) archivo de configuración de extensión .cf (Figura N°4.2), que contiene las variables climáticas de entrada, como dirección y velocidad del viento, temperatura potencial, humedad relativa y humedad específica. Se eligió una sección en la comuna de Estación Central (vecina del Centro), que ha mostrado muy rápido crecimiento urbano y verticalización incontrolada, lo que representa un potencial problema para el medio ambiente de la ciudad.

Figura N°4.1.  
Área modelada en el *software* ENVI-met, con asignación y caracterización de edificios (gris),  
vegetación (verde) y suelo (blanco), y su imagen aérea



Fuente: Elaboración propia y Google Earth, respectivamente

Figura N°4.2.  
Datos de microclima utilizados en la simulación

```

stgo.cf
% ---- Basic Configuration File for ENVI-met Version 3 ----
% ---- MAIN-DATA Block ----
Name for Simulation (Text):           =stgo
Input file Model Area                 =C:\ENVI\met31\input\stgo.in
Filebase name for Output (Text):      =stgo
Output Directory:                    =C:\ENVI\met31\output\
Start Simulation at Day (DD.MM.YYYY): =15.01.2019
Start Simulation at Time (HH:MM:SS):  =21:00:00
Total Simulation Time in Hours:       =48.00
Save Model State each ? min           =60
Wind Speed in 10 m ab. Ground [m/s]  =6
Wind Direction (0:N..90:E..180:S..270:W..) =193
Roughness Length z0 at Reference Point =0.1
Initial Temperature Atmosphere [K]    =303.3
Specific Humidity in 2500 m [g Water/kg air] =2.1
Relative Humidity in 2m [%]           =39
Database Plants                       =C:\programas\ENVI\met31\sys.basedata\Plants.dat
[SOURCES]
Name of component                     =PM10
Type of component                     =PM
Particle Diameter in [um] (0 for gas) =10
Particle Density [g/cm³]              =1
Update interval for emission rate [s] =600

( -- End of Basic Data --)
( -- Following: Optional data. The order of sections is free. --)
( -- Missing Sections will keep default data. --)
( Use "Add Section" in ConfigEditor to add more sections )
( Only use "=" in front of the final value, not in the description)
( This file is created for ENVI-met V3.0 or better )

```

Fuente: Estación Meteorológica del Aeropuerto de Pudahuel (855740) y Departamento de Ciencia Atmosférica de la Universidad de Wyoming, para promedios de enero/2019, a las 21.00 hrs local

En esta área verticalizada de la ciudad hay edificios de casi 100 m de altura, con 30 pisos construidos. Estos edificios alternan en el espacio urbano con casas antiguas, en su

mayoría de un solo piso, y que alcanzan aproximadamente 5 m de altura en promedio. Las especies arbóreas más abundantes en el sitio fueron acacio (*Robinia pseudoacacia*), liquidambar (*Liquidambar styraciflua*) y ciruelo (*Prunus cerasifera*), que también corresponden a las más abundantes en la ciudad de Santiago (Hernández & Villaseñor, 2018). Por lo tanto, de la base de datos disponible en ENVI-met, se utilizaron los códigos de vegetación: ds (árbol de 10 m de altura y copa distinta), H2 (arbusto denso de 6 m de altura), h (arbusto denso de 2 m altura) y g (pasto). La metodología de simulación adoptada fue propuesta por Mendes (2014). El corte espacial fue de 500 x 500 m (25 hectáreas). Para este modelo, se utilizó una cuadrícula (X; Y; Z) de 100 x 100 x 20, por lo tanto, cada cuadrícula  $dx = dy = 5,0$  m y  $dz = 10,0$  m, además de otras 5 cuadrículas de borde sugeridas por el modelo para evitar interferencias con los resultados. El procesamiento se realizó en una máquina virtual Intel® Xeon E7-2870 a 2,40 GHz (8 procesadores en clúster) con 32 GB de RAM, lo que requiere cinco días de simulación ininterrumpidos, descartando los resultados del primer día simulado para conseguir la estabilización del modelo ENVI-met.

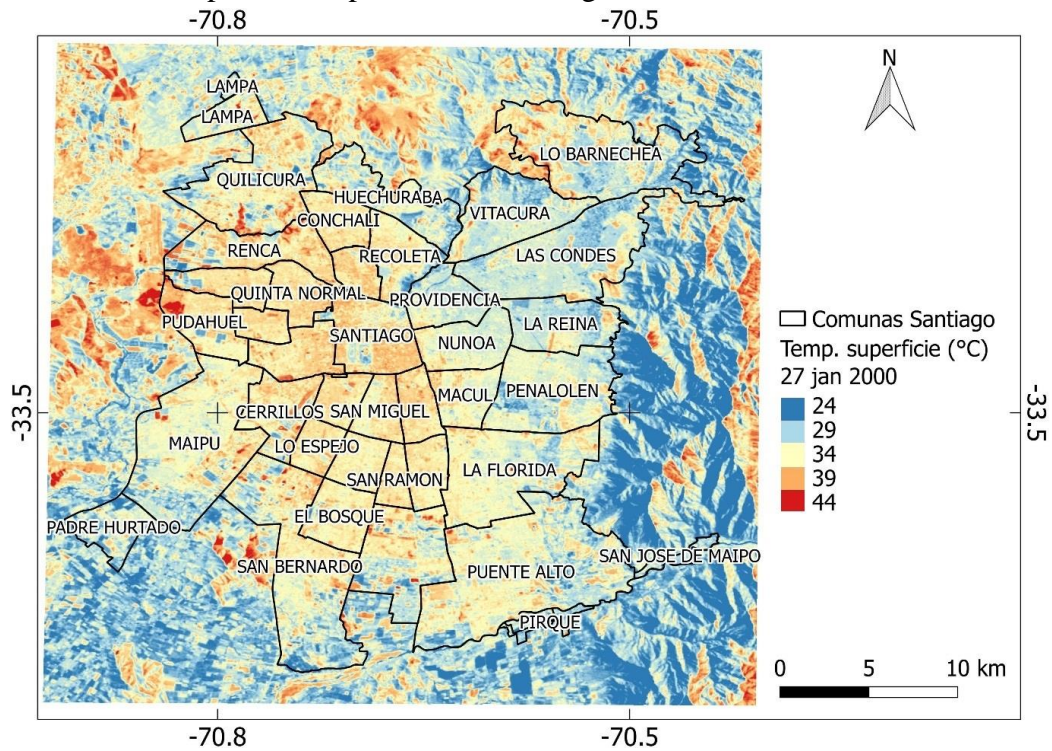
### 4.3. Resultados y Discusión

Toda la Región Metropolitana de Santiago y las ciudades chilenas han mostrado un crecimiento espacial muy rápido en las últimas décadas, reemplazando las áreas naturales y agrícolas por superficies urbanizadas, generando islas de calor y cambios en la humedad y ventilación. Debido a sus condiciones topográficas en medio de una cuenca rodeada de montañas, como la Cordillera de los Andes al oriente y la Cordillera de la Costa del Pacífico Sur al poniente, la ventilación en Santiago está aún más comprometida, especialmente con respecto a los contaminantes, los cuales terminan concentrándose en la ciudad, dificultando su dispersión (Romero *et al.*, 2010). La estabilidad atmosférica causada por las inversiones térmicas (aumento de temperatura con la altura) de subsidencia (descenso de masas de aire desde la alta atmósfera propia de los anticiclones o centros de alta presión), y de radiación (enfriamiento de la superficie del suelo en las estaciones de otoño e invierno que transfiere las bajas temperaturas a las capas de aire cercanas) termina intensificándose por la escasez de precipitaciones, del orden de 342 mm/año (Meteochile, 2019), que pueden caer en menos de diez días en un año seco y en cerca de cuarenta días en un año lluvioso, casi exclusivamente en los meses de mayo, junio, julio y agosto. La escasez e irregularidad de las lluvias y el escaso número de perturbaciones atmosféricas que acompañan su paso no ayudan a limpiar el aire,

favoreciendo el depósito de los contaminantes principalmente en los sectores más deprimidos topográficamente, localizados al poniente de la cuenca y en los barrios de la ciudad que también registran las mayores islas y archipiélagos de calor. Por otro lado, con la poca lluvia, no hay tantos problemas con la caída de árboles urbanos, en comparación con las ciudades de clima tropical, como Brasil, en el que el suelo con mucha agua puede comprometer la estabilidad de estos, causando daños (Mendes *et al.*, 2016). De esta manera, las áreas verdes, como arbolado urbano, plazas y bosques, aparecen como una alternativa para mitigar estos problemas ambientales (He *et al.*, 2019).

La ciudad de Santiago tiene actualmente 32 comunas urbanas bajo administración municipal, que albergan al 78% de la población regional (Santiago, 2019). Fue posible comparar la evolución de las temperaturas superficiales durante un período de casi 20 años, es decir, entre los años 2000 (Figura N°4.3) y 2019 (Figura N°4.4), así como determinar sus diferencias (Figura N°4.5), identificando las áreas de mayor temperatura (Figura N°4.6). Las clases de temperatura fueron estandarizadas a la misma escala para la preparación de mapas, lo que permitió conocer sus diferencias.

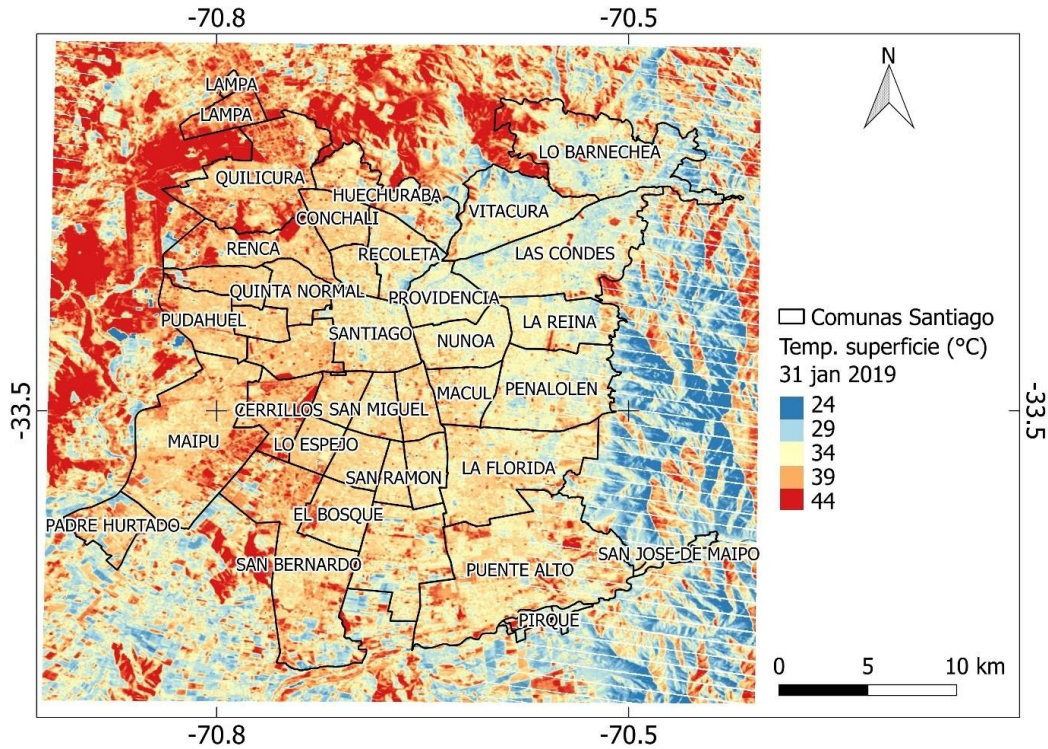
Figura N°4.3.  
Temperatura superficial en Santiago, en enero del año 2000



Fuente: Elaboración propia, desde la imagen térmica Landsat-7

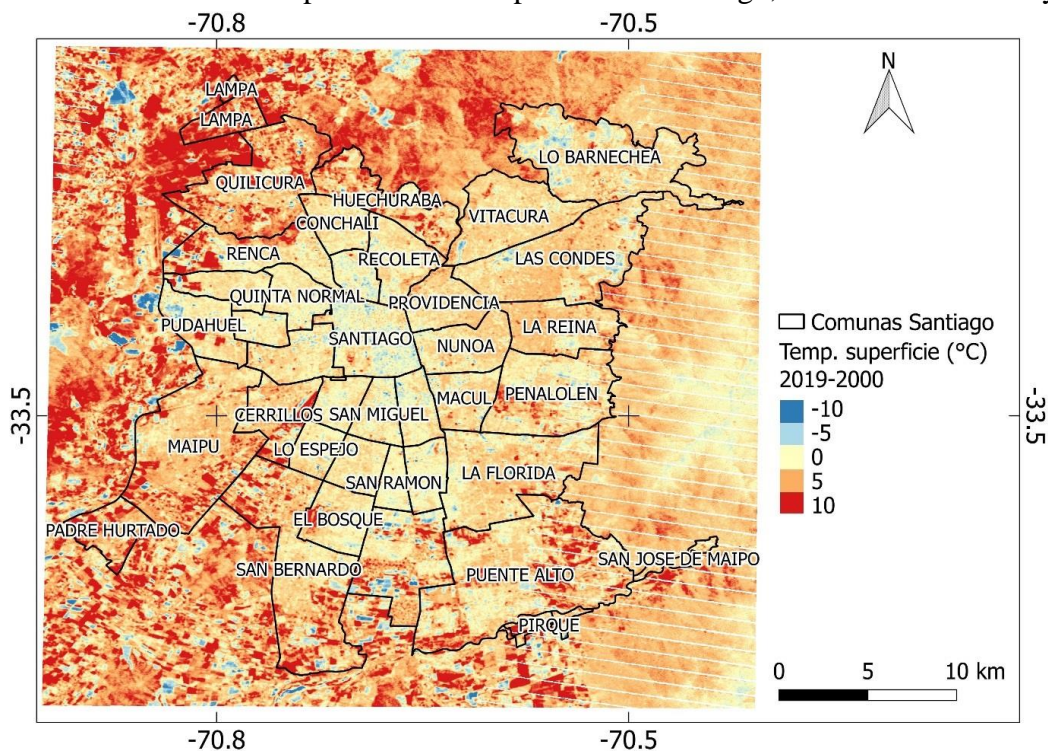


Figura N°4.4.  
Temperatura superficial en Santiago, en enero del año 2019



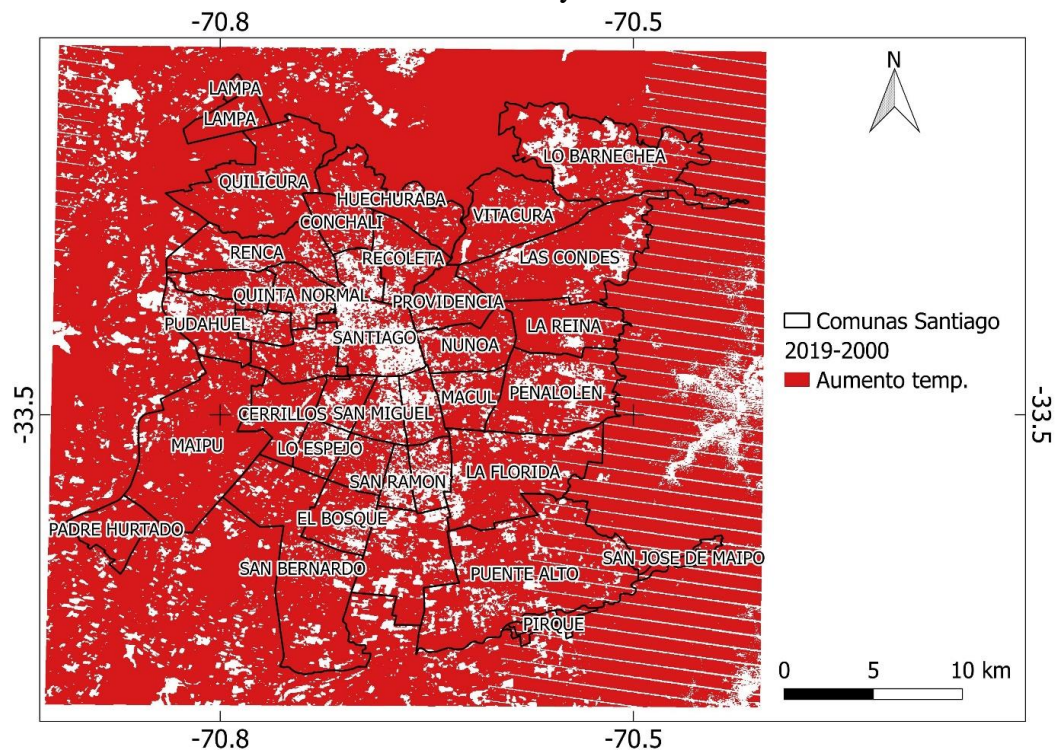
Fuente: Elaboración propia, desde la imagen térmica Landsat-7

Figura N°4.5.  
Evolución comunal de la temperatura de la superficie en Santiago, entre los años 2019 y 2000



Fuente: Elaboración propia, desde imágenes térmicas Landsat-7

Figura N°4.6.  
Análisis binario (sí - rojo / no - blanco) de las áreas que aumentaron su temperatura entre los años 2000 y 2019



Fuente: Elaboración propia, desde imágenes térmicas Landsat-7

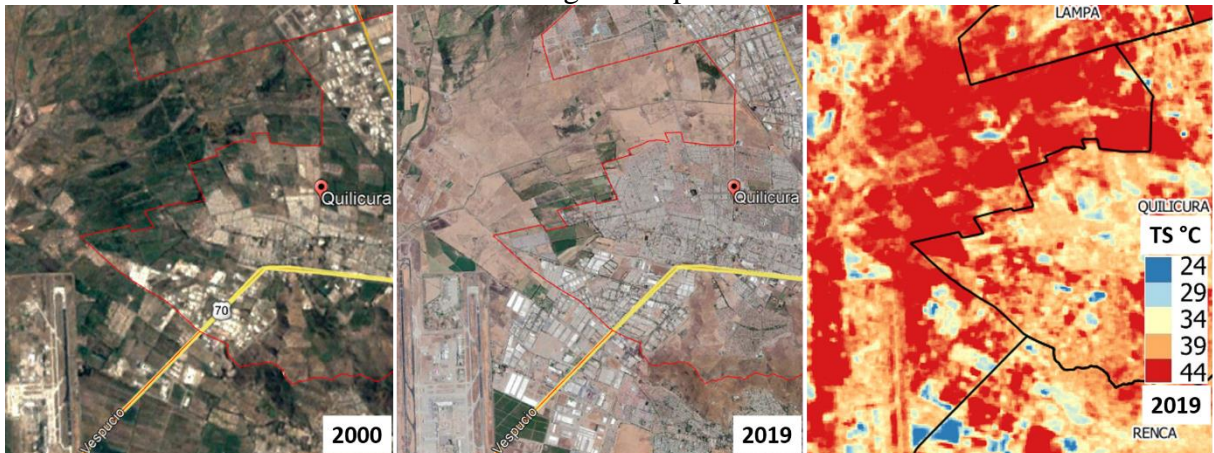
En general, se puede afirmar que Santiago de Chile aumentó considerablemente sus temperaturas superficiales (TS), sustituyendo usos y coberturas naturales por zonas impermeabilizadas y densificando sus superficies construidas (Figura N°4.6). En las áreas más frías ubicadas al interior de la ciudad, que cuentan con grandes áreas cubiertas de vegetación, las TS variaron entre 25 y 30°C, mientras que en las más cálidas, los suelos expuestos registraron hasta 50°C. Es decir, existe una diferencia de hasta 25°C en las temperaturas del suelo al interior del área urbana de Santiago. Además, como enero es un mes en que nunca se registran precipitaciones, la cantidad de agua en el suelo fue baja en ambos años analizados. La precipitación acumulada en los últimos tres meses anteriores a enero no superó los 5 mm, según datos de la Estación Meteorológica del Aeropuerto de Pudahuel. Consecuentemente, el aumento de las temperaturas superficiales y su altísima variación al interior de la ciudad se deberían relacionar mayormente con los cambios introducidos por la urbanización, debido a la carencia de instrumentos de evaluación ambiental que consideren las transformaciones climáticas. Paradójicamente, ello ocurre simultáneamente con el incremento aparente de la preocupación social por el Cambio Climático y por la adhesión del país a los acuerdos internacionales

destinados a conseguir la disminución de las temperaturas, la cual termina afectando la credibilidad de las instituciones y el escepticismo de la ciudadanía.

Las comunas ubicadas al oriente de la ciudad, como Vitacura, Las Condes y Lo Barnechea y la parte norte de Providencia, siguen siendo las más frescas (Figura N°4.4), debido a que cuentan con más áreas verdes y son ventiladas por los flujos valle-montaña. Aún así también han aumentado sus temperaturas entre 2000 y 2019. Por el contrario, la comuna de Santiago Centro, que en 2000 fue una de las más cálidas, logró reducir sus temperaturas del suelo, aunque todavía registra valores entre 30°C y 40°C en los meses de pleno verano. También se observa que las comunas de Quilicura y Cerrillos, correspondientes a las porciones noroeste y suroeste del recorte (Figura N°4.5), tuvieron un aumento considerable, por encima de 10°C, alcanzando en 2019 TS de hasta 50°C. Esto se justificaría por el cambio de suelos con vegetación a suelos desnudos o impermeabilizados (Figura N°4.7), como Sousa y Ferreira (2012) lo verificaron en los cambios de usos y coberturas de suelo de vegetados a desnudos en el Bioma Cerrado brasileño. Complementariamente, se deben analizar cuidadosamente las áreas montañosas que, por su parte, presentan una alta heterogeneidad en los valores de TS debido a factores topográficos (elevación, exposición y pendiente), cobertura vegetal y radiación solar, entre otros, que pueden variar en más de 16°C km<sup>-1</sup> entre las laderas de orientación de solana y umbría (He *et al.*, 2019). Este hecho no puede atribuirse exclusivamente a la urbanización del piedemonte andino, como ha ocurrido principalmente en la parte occidental de la ciudad (Cordillera de la Costa), y también más puntualmente en Cerro Calán (cerro localizado en la comuna de Las Condes al oriente de la ciudad) y en el antiguo Aeropuerto de Cerrillos (Figura N°4.8), revelando que cada caso debe analizarse por separado. El impacto ambiental de estos cambios se encuentra en Romero y Vásquez (2005) y Romero (2019).

Figura N°4.7.

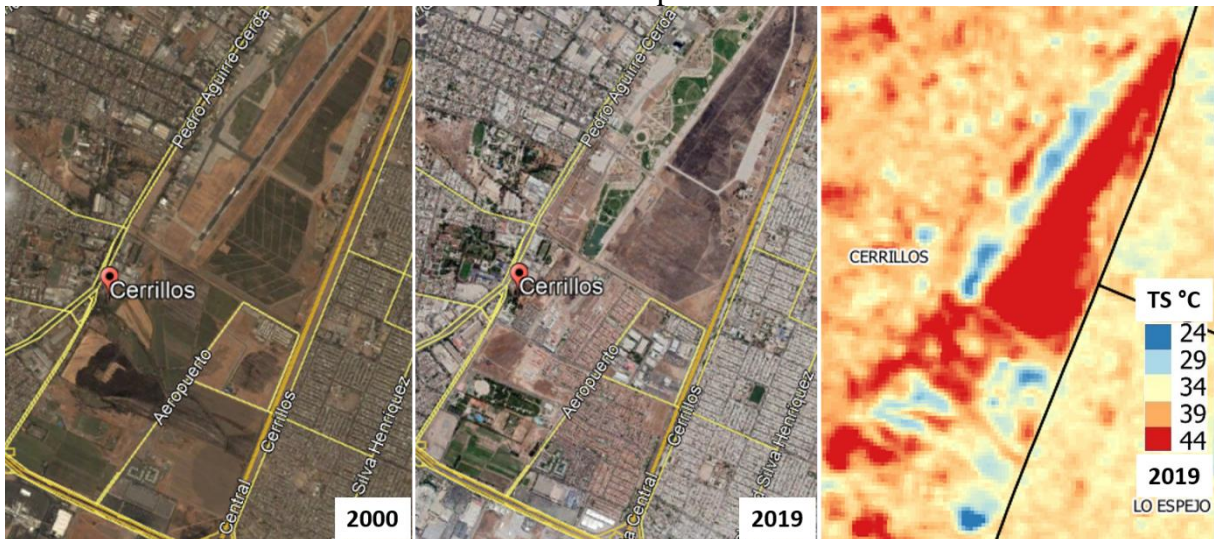
Cambios en los usos y coberturas de suelos y en las temperaturas superficiales en la comuna de Quilicura, entre los meses de enero de los años 2000 y 2019. Nótese los efectos de la sustitución de áreas agrícolas por suelos desnudos



Fuente: Google Earth (izquierda y centro) y elaboración propia (derecha)

Figura N°4.8.

Cambios en los usos y coberturas de suelos y en las temperaturas superficiales en el antiguo aeropuerto de Cerrillos, entre los meses de enero de los años 2000 y 2019. Nótese la sustitución de áreas verdes por suelos desnudos



Fuente: Google Earth (izquierda y centro) y elaboración propia (derecha)

A nivel del follaje o canopia urbana, la urbanización cuya planificación no tiene en cuenta los impactos ambientales, aumenta continuamente la temperatura y también puede dificultar la ventilación, un factor extremadamente importante en el equilibrio climático de las ciudades y especialmente en el control de las islas y olas de calor y de la contaminación del aire. En la comuna de Estación Central, vecina a Santiago Centro, la verticalización y

densificación de las construcciones llevadas a cabo durante los últimos años explican la presencia actual de los llamados "guetos verticales", un grupo socialmente diferenciado de más de dos mil departamentos distribuidos en edificios de más de 30 pisos, donde residen principalmente inmigrantes y grupos sociales de ingresos medio-bajos. En este caso, el obsoleto Plan Regulador Comunal de 1983 ha sido utilizado por el sector inmobiliario para instalar proyectos de altura desproporcionada (Miranda, 2017), aprovechando su localización en áreas de alta disponibilidad de transporte público, tales como metro y tren (Estación Central) y autobuses urbanos, interurbanos e internacionales (Terminal Sur), respondiendo a las demandas del mercado, sin realizar evaluación ambiental alguna. La altísima densidad demográfica y construida constituyen, en este caso, una fuente muy relevante de modificación de los climas urbanos previamente existentes debido a que las fachadas acumulan y reflejan la radiación solar entre las edificaciones, generando islotes y corredores de calor al mismo tiempo que eliminan las islas frías (jardines, parques y patios urbanos). Ello aumenta las concentraciones de contaminantes atmosféricos causadas por fuentes fijas y móviles y altera la topografía de los barrios, reemplazando las habitaciones unifamiliares de baja altura y con presencia de patios, por "cañones urbanos", formas que se reconocen cuando la altura de las edificaciones duplica a lo menos el ancho de calles y avenidas (Oke, 1978).

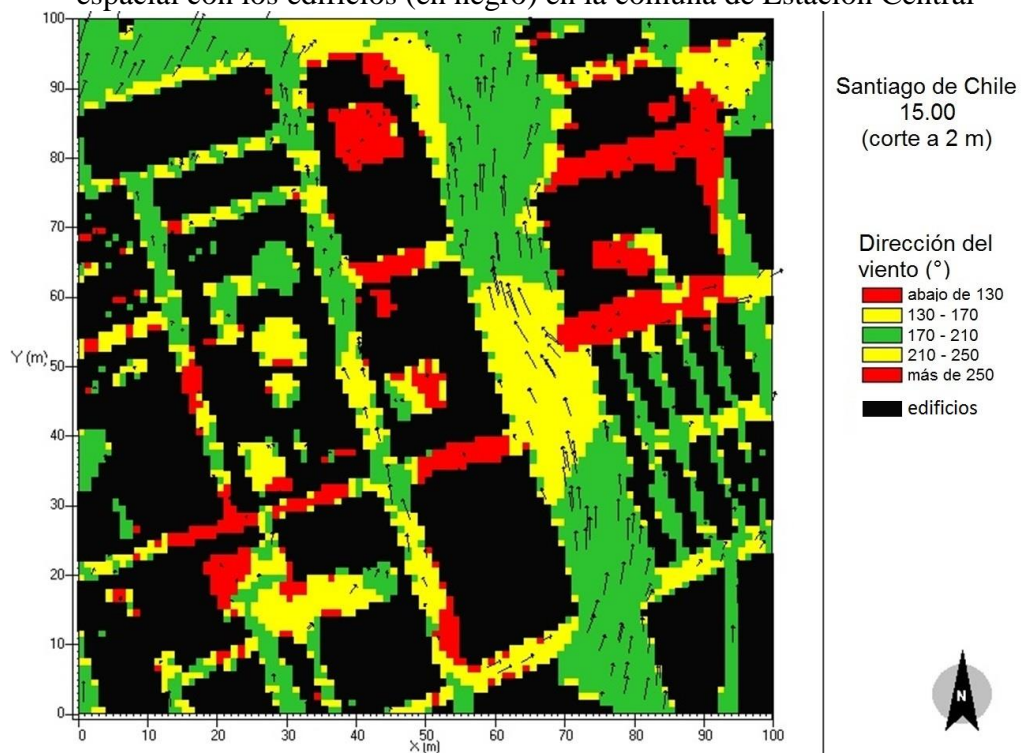
La simulación CFD (dinámica computacional de fluidos, en este caso el viento local), mostró que el diseño urbano actual en la comuna de Estación Central puede cambiar la dirección del viento original predominante del tercer cuadrante ( $193^\circ$  o viento sur en enero) en más de  $60^\circ$  (Figura N°4.9). Los estudios que han investigado los efectos de la reducción y encauzamiento de los vientos sobre la dispersión de contaminantes, como el realizado por Aristodemou *et al.* (2018), en Londres (UK), demuestran la necesidad de realizar cuidadosas evaluaciones ambientales tanto en el diseño como en la planificación de estas nuevas formas urbanas. Ello es especialmente válido para el caso de Santiago, donde la acumulación de calor y la contaminación atmosférica constituyen problemas ambientales crecientes. En el caso de Londres, los rascacielos de más de 150 m de altura han afectado los flujos de aire y los patrones de dispersión de contaminantes y calor, generando las llamadas "zonas muertas".

Como en la investigación mencionada anteriormente, este trabajo también encontró este tipo de "zonas muertas" en la comuna de Estación Central, en las cuales la velocidad del viento a una altura de 10 m y a sotavento (área protegida de los vientos predominantes) de los edificios, era muy baja, menos de 1 m/s (Figura N°4.10). Los mapas elaborados correspondieron a las 15.00 hrs, que fue el momento más caluroso del día, cuando las temperaturas simuladas del aire alcanzaron los  $37^\circ\text{C}$ , muy cercanas al valor real de  $36^\circ\text{C}$

encontrado por Smith y Romero (2016), para un día de verano en esta zona urbana. Las estimaciones de ventilación también se ejecutaron a 2 m de altura, debido a que se trata tanto del ambiente que acompaña a los peatones como a la circulación de automóviles, que lo hacen en una gran cantidad en la Autopista Central y Avenida Libertador General Bernardo O'Higgins (llamada paradójicamente "Alameda").

Figura N°4.9.

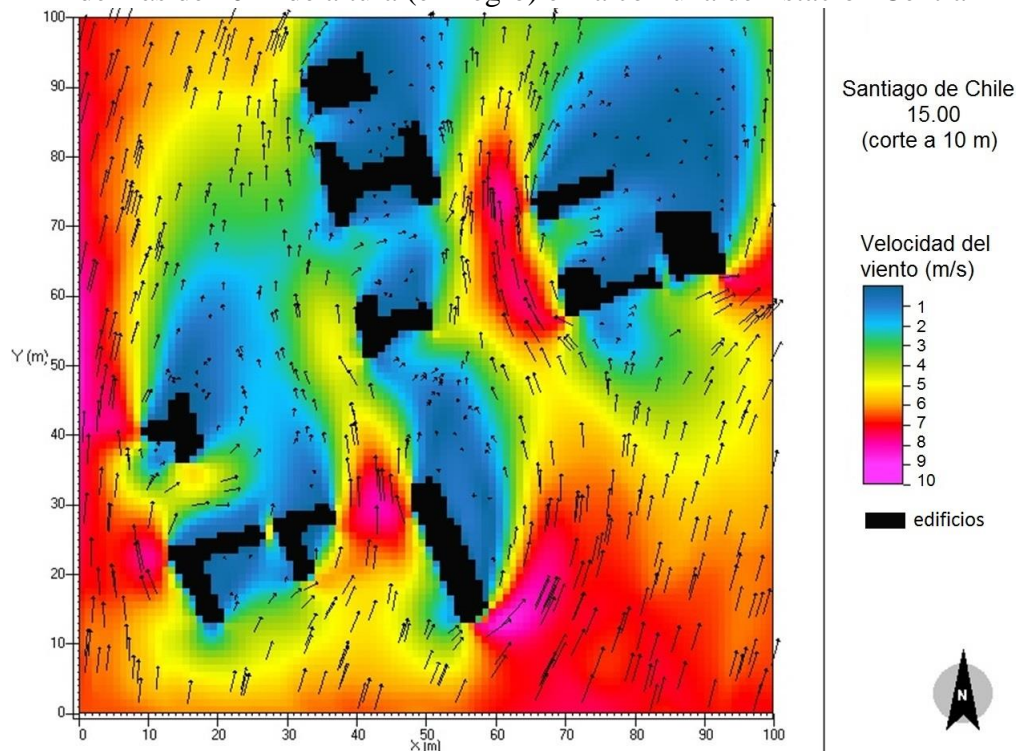
Cambios superiores a  $60^\circ$  en la dirección del viento predominante del sur ( $193^\circ$ ) y su relación espacial con los edificios (en negro) en la comuna de Estación Central



Fuente: Elaboración propia

Figura N°4.10.

Cambios espaciales en la velocidad inicial de un viento de 6 m/s, relacionados con edificios de más de 10 m de altura (en negro) en la comuna de Estación Central



Fuente: Elaboración propia

Para la totalidad de los problemas ambientales mencionados, la forestación se convierte en un elemento esencial para el mejoramiento de los climas urbanos: consume calor en el proceso de evapotranspiración y proporciona sombra (que en el caso de Santiago es una forma muy relevante de mitigar los efectos de la temperatura) y humidifica la atmósfera, controlando los valores extremos; ayuda a la adsorción de contaminantes en sus hojas y troncos (Burden, 2006) y recicla contaminantes como el  $\text{CO}_2$  transformándolo en oxígeno. En el caso de la vegetación nativa, estas transformaciones son únicas en comparación con los árboles exóticos que producen contaminantes (Préndez *et al.*, 2019); oferta refugios a la biodiversidad y brinda confortabilidad climática y espacios de alta valoración para el bienestar y salud humana.

Dado el deterioro climático analizado en ese trabajo, la pérdida de bosques, matorrales, humedales y superficies agrícolas y forestales, como consecuencia de la urbanización de la ciudad de Santiago, causa un daño ambiental significativo que acompaña a la transformación cotidiana de cada una de las hectáreas naturales por urbanizadas. El control y reducción de este daño y, por el contrario, la propuesta de una ciudad inmersa en una matriz natural, no ha formado parte de los principios de la planificación y gestión urbana en Chile y no se compadece

con los compromisos adquiridos internacionalmente relativos a la mitigación y adaptación ante el Cambio Climático.

Algunas especies recomendadas para el arbolado urbano son peumos (*Cryptocarya alba*), quillayes (*Quillaja saponaria*) y canelos (*Drimys winteri*), especies perennes (siempre verdes), nativas de Chile, que tienen hojas relativamente pequeñas y son resistentes a la escasez de agua, haciendo que sus superficies sean más rígidas. Estas características son interesantes en la medida que son funcionales ante los cambios estacionales: en verano, proporcionan sombra, mientras que en invierno pueden ayudar en la purificación del aire, adhiriendo contaminantes dispersos en el aire en sus superficies foliares (Préndez *et al.*, 2019). Sin embargo, se deben evitar los monocultivos, porque pueden comprometer la diversidad genética, dejando el arbolado urbano susceptible a las plagas, como la enfermedad del olmo holandés, que ocurrió por accidente en el este de los Estados Unidos a mediados del siglo XX, devastando millones de árboles (Sadava *et al.*, 2009).

El urbanismo y la geografía física deberían estar más correlacionados al planificar las ciudades. Las adversas transformaciones climáticas acá analizadas tienen que ver con los objetivos y propósitos del desarrollo urbano en su conjunto y no solo con medidas de mitigación y adaptación al Cambio Climático. Si bien los incrementos de temperatura, disminución de la humedad atmosférica y eliminación o decrecimiento de la ventilación son los resultados evidenciados por los cambios de coberturas y usos del suelo, de naturales a urbanizados, dichas transformaciones se relacionan, a su vez, con las políticas y planes territoriales y de desarrollo de las ciudades, e incluyen los sectores de transporte, vivienda, educación, salud, áreas verdes y la infraestructura urbana en su conjunto. Las regulaciones espaciales, territoriales y ambientales que se deben introducir para asegurar la sustentabilidad climática urbana, el bienestar y salud de la sociedad pueden contrariar los intentos por asignar al mercado la distribución de los bienes y servicios ecosistémicos en la ciudad. Recientemente, el 18 de octubre de 2019, ocurrió el llamado "estallido social", un relevante hecho histórico de gran impacto global, en el que la sociedad chilena protestó contra las políticas y el modelo seguido para desarrollar el país y sus ciudades, donde residen nueve de cada diez habitantes, mostrando su indignación ante la situación actual. El clima urbano requiere ser recomunalizado, es decir, recuperar su condición de bien libre, colectivo y componente fundamental de un medio ambiente de calidad equitativamente distribuido.

Los cambios en los climas urbanos de Santiago de Chile son una demostración del dinamismo adquirido por las transformaciones del medio ambiente en un país de absoluto predominio de la población urbana que encuentra en la ciudad su verdadero nicho ecológico.



La sociedad exige consistencia en los planes y medidas adoptadas y especialmente equidad e igualdad de oportunidades en las condiciones de habitabilidad de las ciudades. El clima y el aire deben dejar de ser bienes y servicios *comodificados* cuyo acceso depende de la capacidad adquisitiva de los compradores de inmuebles para recuperar sus características de bien común, como sucede con los bienes y servicios públicos que debiesen ofrecer las ciudades a la totalidad de sus habitantes. El estudio de caso realizado en la comuna de Estación Central muestra profundos errores e insuficiencias en la planificación y gestión ambiental de tales territorios, generando una evidente desproporción en el diseño urbano, con edificios de casi 100 m de altura, cuyas paredes acumulan una gran cantidad de calor, y que se localizan con orientación perpendicular a los vientos predominantes del sur y suroeste, lo que dificulta la moderación de las temperaturas y la dispersión de los contaminantes atmosféricos, creando cañones urbanos y efectos adversos sobre la calidad de vida de sus habitantes. Una simple consideración de esto haría recomendable no insistir en este tipo de urbanización en esa ni en ninguna otra comuna del país, o en caso de ser necesario, preferir posiciones más adecuadas de los edificios de altura, que alternen con avenidas anchas y parques urbanos, y que faciliten la ventilación, al ser paralelos y no perpendiculares a las direcciones predominantes del viento.

#### **4.4. Conclusiones**

La comparación de las imágenes satelitales de los años 2000 y 2019 permitió verificar un aumento de la temperatura de la superficie de los suelos en la mayor parte de la ciudad de Santiago, especialmente en aquellos terrenos desnudos y bajo alta insolación, que han llegado a registrar cerca de 50°C. Un trabajo posterior deberá identificar el porcentaje de calor que es transferido a la atmósfera y desplazado a otros lugares por medio de vientos y brisas que justamente compensan las diferencias de temperaturas. Las comunas ubicadas al noreste (Vitacura, Las Condes, Lo Barnechea y Providencia) continúan siendo las más frescas, aunque también han aumentado sus temperaturas. Por otro lado, la comuna de Santiago Centro fue la que más logró controlar los cambios de temperatura, debiéndose también identificar en un trabajo posterior la forma de conseguirlo.

Es evidente a través del incremento de las temperaturas superficiales y de los cambios en la dirección y velocidad de los vientos que la urbanización de la ciudad no ha estado contribuyendo a las expectativas de mitigar y adaptarse al Cambio Climático, a pesar de la preparación de diversos proyectos de investigación, políticas y planes nacionales y urbanos,

generales y sectoriales, así como de una supuesta adhesión a acuerdos y estrategias internacionales. Por el contrario, es notable la generación de un ambiente cada vez más árido y el predominio de las olas e islas de calor, al mismo tiempo que se eliminan las islas y archipiélagos de frío y los vientos refrescantes y depuradores de la calidad del aire. Parece haber llegado el momento para que la climatología urbana sea considerada adecuadamente en los planes de ordenamiento territorial a escala urbana, superando una ausencia que se observa no solo en el caso de Santiago, sino que también en la casi totalidad de las ciudades grandes y medianas del país y del resto de Latinoamérica.

### Agradecimientos

Este trabajo se llevó a cabo con el apoyo de Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, y Santander.

### Referencias

ARISTODEMOU, E.; BOGANEGRA, L.M.; MOTTET, L.; PAVLIDIS, D.; CONSTANTINOU, A.; PAIN, C.; ROBINS, A. & APSIMON, H. How tall buildings affect turbulent air flows and dispersion of pollution within a neighbourhood. *Environmental pollution*, 2018, vol. 233, p. 782-796.

BARRERA, F. & HENRÍQUEZ, C. Vegetation cover change in growing urban agglomerations in Chile. *Ecological Indicators*, 2017, vol. 81, p. 265-273.

BARTON, J. Adaptación al cambio climático en la planificación de ciudades-regiones. *Revista de Geografía Norte Grande*, 2009, N° 43, p. 5-30.

BURDEN, D. *Urban Street Trees: 22 Benefits Specific Applications*. Orlando: Glatting Jackson and Walkable Communities Inc., 2006.

CONGEDO, L. *Semi-Automatic Classification Plugin*. User Manual. 2014.

DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE (Meteochile). *Informe de Precipitaciones*. 2019. Disponible en Internet: [http://www.meteochile.gob.cl/PortalDMC-web/climatologia/inicio\\_climatologia/informe\\_precipitaciones.xhtml](http://www.meteochile.gob.cl/PortalDMC-web/climatologia/inicio_climatologia/informe_precipitaciones.xhtml). Acceso en: 27 dic. 2019.

GALLARDO, L.; ESCRIBANO, J.; DAWIDOWSKI, L.; ROJAS, N.; ANDRADE, M.F. & OSSES, M. Evaluation of vehicle emission inventories for carbon monoxide and nitrogen oxides for Bogotá, Buenos Aires, Santiago, and São Paulo. *Atmospheric Environment*, 2012, vol. 47, p. 12-19.

HE, J.; ZHAO, W.; LI, A.; WEN, F. & YU, D. The impact of the terrain effect on land surface temperature variation based on Landsat-8 observations in mountainous areas. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, vol. 40, N° 5-6, p. 1808-1827.

HERNÁNDEZ, H.J. & VILLASEÑOR, N.R. Twelve-year change in tree diversity and spatial segregation in the Mediterranean city of Santiago, Chile. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, vol. 29, p. 10-18.

INOSTROZA, L.; PALME, M. & BARRERA, F. A heat vulnerability index: spatial patterns of exposure, sensitivity and adaptive capacity for Santiago de Chile. *PLoS One*, 2016, vol. 11, N° 9. doi: 10.1371/journal.pone.0162464

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS DO CHILE (INE). *Resultados Censo 2017*. 2017. Disponible en Internet: <http://resultados.censo2017.cl/>. Acceso en: 26 dic. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). *Landsat*. 2019. Disponible en Internet: <http://www.dgi.inpe.br/documentacao/satelites/landsat>. Acceso en: 26 dic. 2019.

MENDES, F.H. *Tutorial para Iniciantes: software ENVI-met versão 3.1*. 2014. Disponible en Internet: [http://cmq.esalq.usp.br/wiki/lib/exe/fetch.php?media=publico:projetos:envi-met31\\_tutorial\\_iniciantes.pdf](http://cmq.esalq.usp.br/wiki/lib/exe/fetch.php?media=publico:projetos:envi-met31_tutorial_iniciantes.pdf). Acceso en: 16 dic. 2019.

MENDES, F.H.; POLIZEL, J.L. & SILVA FILHO, D.F. O efeito do vento nas quedas de árvores em Piracicaba/SP. *Ciência e Natura*, 2016, vol. 38, N° 3, p. 1523-1535.

MENDES, F.H., SOUSA-CAMILO, A.S., LOPES, A.M.S., POLIZEL, J.L., SILVA FILHO, D.F. & ROMERO, H. Comportamiento térmico de diferentes superficies urbanas durante un día cálido de verano. *Revista Geográfica de Valparaíso*, 2019, vol. 56, p. 1-8.

MIRANDA, F.M. ¿Ausencia de planificación urbana en Chile? Algunas reflexiones. *Cybergeo: European Journal of Geography*, 2017.

MUÑOZ, J.C.; BARTON, J.; FRÍAS, D.; GODOY, A.; BUSTAMANTE, W.; CORTÉS, S.; MUNIZAGA, M.; ROJAS, C. & WAGEMNN, E. *Ciudades y Cambio Climático en Chile: Recomendaciones desde la evidencia científica*. Santiago: Comité COP25. Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, 2019.

NERY, M.B.; SOUZA, A.A.L. & ADORNO, S. Os padrões urbano-demográficos da capital paulista. *Estudos Avançados*, 2019, vol. 33, N° 97, p. 5-36. <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2019.3397.002>

NURUZZAMAN, M. Urban heat island: causes, effects and mitigation measures-a review. *International Journal of Environmental Monitoring and Analysis*, 2015, vol. 3, N° 2, p. 67-73.

OKE, T.R. *Boundary Layer Climates*. London: Methuen and Co., 1978.

PEEL, M.C.; FINLAYSON, B.L. & MCMAHON, T.A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2007, vol. 4, N° 2, p. 439-473.

PIRES, E.G. & FERREIRA JR., L.G. Mapeamento da temperatura de superfície a partir de imagens termais dos satélites Landsat 7 e Landsat 8. En: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2015, João Pessoa. Proceedings... p. 7421-7428.

PRÉNDEZ, M.; ARAYA, M.; CRIOLLO, C.; EGAS, C.; FARIÁS, I.; FUENTEALBA, R. & GONZÁLEZ, E. Urban Trees and Their Relationship with Air Pollution by Particulate Matter and Ozone in Santiago, Chile. En: HENRÍQUEZ, C. & ROMERO, H. *Urban Climates in Latin America*. Cham: Springer International Publishing, 2019, p. 167-206.

ROMERO, H. Urban Climates and the Challenge of Sustainable Development of Chilean Cities. En: HENRÍQUEZ, C. & ROMERO, H. *Urban Climates in Latin America*. Cham: Springer International Publishing, 2019, p. 207-256.

ROMERO, H. & VÁSQUEZ, A. La comodificación de los territorios urbanizables y la degradación ambiental en Santiago de Chile. *Scripta Nova*, 2005, vol. 9, N° 194, p. 1-68.

ROMERO, H.; IRARRÁZAVAL, F.; OPAZO, D.; SALGADO, M. & SMITH, P. Climas urbanos y contaminación atmosférica en Santiago de Chile. *EURE (Santiago)*, 2010, vol. 36, N°109, p. 35-62.

ROMERO, H.; VÁSQUEZ, A.; FUENTES, C.; SALGADO, M.; SCHMIDT, A. & BANZHAF, E. Assessing urban environmental segregation (UES). The case of Santiago de Chile. *Ecological Indicators*, 2012, vol. 23, p. 76-87.

ROMERO-LANKAO, P.; ROSAS-HUERTA, A.; HUGHES, S.; BORQUEZ, R.; GNATZ, D.M. Institutional capacity for climate change responses: An examination of construction and pathways in Mexico City and Santiago. *Environmental and Planning C: Government and Policy*, 2013, vol. 31, p. 785-805.

SADAVA, D.; HELLER, H.C.; ORIAN, G.H.; PURVES, W.K. & HILLIS, D.M. *Vida: A Ciência da Biologia - Volume 2. Evolução, Diversidade e Ecologia*. 8ed. Porto Alegre: Artmed, 2009.

SANTIAGO. Gobierno Regional Metropolitano. *Datos Geográficos*. 2019. Disponible en Internet: <https://www.gobiernosantiago.cl/datos-geograficos/>. Acceso en: 27 dic. 2019.

SARRICOLEA ESPINOZA, P. & MARTÍN-VIDE, J. El estudio de la isla de calor urbana de superficie del área metropolitana de Santiago de Chile con imágenes terra-MODIS y análisis de componentes principales. *Revista de Geografía Norte Grande*, 2014, N° 57, p. 123-141.

SMITH, P. & ROMERO, H. Factores explicativos de la distribución espacial de la temperatura del aire de verano en Santiago de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 2016, N° 63, p. 45-62.

SOUSA, S.B. & FERREIRA, L.G. Análise da temperatura de superfície em ambientes urbanos: um estudo por meio de sensoriamento remoto no município de Goiânia, Goiás (2002–2011). *Confins*, 2012, N° 15.

STEWART, I.D. & OKE, T.R. Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, vol. 93, N° 12, p. 1879-1900.

VÁSQUEZ, A.; DEVOTO, C.; GIANNOTTI, E. & VELÁSQUEZ, P. Green Infrastructure Systems Facing Fragmented Cities in Latin America - Case of Santiago, Chile. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 161, p. 1410-1416.

## 5. MUDANÇAS NO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E SUAS INFLUÊNCIAS NO CLIMA URBANO DE CIDADES MÉDIAS

### Resumo

O desenvolvimento urbano possibilita que populações cada vez maiores ocupem novos espaços horizontais e verticais, cujas alterações no uso e ocupação do solo, por consequência, é um dos fatores que participam das chamadas Mudanças Climáticas, necessitando, assim, de estudos sobre a expansão das cidades. O objetivo foi analisar as mudanças no uso e ocupação do solo e, consequentemente, a influência no clima urbano de duas cidades de médio porte que estão passando por essas transformações, La Serena (Chile) e Piracicaba (Brasil). Para isso, foram utilizadas três ferramentas: (i) geoprocessamento de imagens termais do satélite Landsat-7, entre os anos 1999 (mais antigas da coleção) e 2018; (ii) câmera termal e termômetro digital infravermelho, capazes de verificar a temperatura de superfície (TS) a nível microclimático; (iii) modelo ENVI-met, responsável por simular interações entre superfície-planta-ar. Respectivamente, os resultados mostraram um aumento médio na TS estimado em 1°C a cada cinco anos, com maior impacto em La Serena, que teve mais de dois terços de sua área aquecida. As medições *in loco* revelaram a potencialidade da arborização urbana na mitigação de TS extremas, como 70°C do asfalto ou incríveis 95°C no teto de carros escuros, estabilizando-as na faixa entre 30°C e 40°C no horário mais quente do dia, ao reduzir em 1°C a temperatura do ar. Por fim, as simulações computacionais revelaram a necessidade da distribuição homogênea da arborização, tendo em vista que a influência da Praça Central em Piracicaba ficou restrito a um raio de 100 m. Ademais, as simulações auxiliaram a compreender como o desenho urbano altera o microclima, revelando os resultados de decisões adotadas por suas administrações públicas.

**Palavras-chave:** arborização urbana; crescimento de cidades; ENVI-met; Landsat-7; microclima; temperatura de superfície.

### Abstract

Urban development allows increasingly large populations to occupy new horizontal and vertical spaces, whose changes in land use and occupation, consequently, is one of the factors that cause the so-called Climate Changes, thus, requiring studies about the expansion of cities. The objective was to analyze the changes in land use and occupation and, consequently, the influence on the urban climate of two medium-sized cities who are going through these transformations, La Serena (Chile) and Piracicaba (Brazil). For this, we used three tools: (i) geoprocessing of thermal images from the Landsat-7 satellite, among years 1999 (oldest in the collection) and 2018; (ii) thermal camera and infrared digital thermometer, capable of verifying the surface temperature (TS) at the microclimate level; (iii) ENVI-met model, responsible for simulating interactions between surface-plant-air. Respectively, the results showed an average increase in TS estimated at 1°C every five years, with the greatest impact on La Serena, which had more than two thirds of its area heated. Measurements *in loco* revealed the potential of urban forest to mitigate extreme TS, such as 70°C of asphalt or an incredible 95°C on the roof of dark cars, stabilizing them in the range between 30°C and 40°C in the hottest time of the day, by reducing the air temperature by 1°C. Finally, the computer simulations revealed the need for homogeneous distribution of urban forest, since the influence of the Central Square in

Piracicaba was restricted to a radius of 100 m. In addition, the simulations helped to understand how urban design changes the microclimate, revealing the results of decisions taken by its public administrations.

**Keywords:** urban forestry; growth of cities; ENVI-met; Landsat-7; microclimate; surface temperature.

## Resumen

El desarrollo urbano posibilita que poblaciones cada vez mayores ocupen nuevos espacios horizontales y verticales, cuyos cambios de uso y ocupación del suelo, en consecuencia, son uno de los factores que participan en los llamados Cambios Climáticos, por lo que requieren estudios sobre la expansión de ciudades. El objetivo fue analizar los cambios en el uso y ocupación del suelo y, en consecuencia, la influencia en el clima urbano de dos ciudades medias que están atravesando estas transformaciones, La Serena (Chile) y Piracicaba (Brasil). Para eso, se usaron tres herramientas: (i) geoprocésamiento de imágenes térmicas del satélite Landsat-7, entre los años 1999 (más antiguo de la colección) y 2018; (ii) cámara térmica y termómetro digital infrarrojo, capaz de verificar la temperatura superficial (TS) a nivel del microclima; (iii) Modelo ENVI-met, responsable por simular interacciones entre superficie-planta-aire. Respectivamente, los resultados mostraron un aumento promedio de TS estimado en 1°C cada cinco años, con el mayor impacto en La Serena, que tenía más de dos tercios de su área calentada. Las mediciones *in loco* revelaron el potencial del arbolado urbano para mitigar la TS extrema, como 70°C del asfalto o increíbles 95°C en el techo de un coche oscuro, estabilizándolos en el rango entre 30°C y 40°C en el horario más cálido del día, reduciendo la temperatura del aire en 1°C. Finalmente, las simulaciones por computadora revelaron la necesidad de una distribución homogénea de los árboles, considerando que la influencia de la Plaza Central en Piracicaba estaba restringida a 100 m de radio. Además, las simulaciones ayudaron a comprender cómo el diseño urbano cambia el microclima, revelando los resultados de las decisiones tomadas por sus administraciones públicas.

**Palabras clave:** arbolado urbano; crecimiento de ciudades; ENVI-met; Landsat-7; microclima; temperatura de la superficie.

## 5.1. Introdução

A urbanização implica em mudanças e transformações nos usos e coberturas naturais dos solos, aumentando as temperaturas e as taxas de impermeabilização. Consequentemente, causa a redução das fontes de umidade atmosférica e reduz a ventilação pelos efeitos de rugosidade das edificações. Por consequência, as cidades desenvolvem espaços fragmentados compostos por ilhas, ilhotas e corredores de calor, umidade e ventilação (LABAKI et al., 2012; BUCKERIDGE, 2015; MENDES et al., 2019; ROMERO, 2019).

As cidades latino-americanas, essencialmente diversas e com elevados níveis de pobreza e de segregação socioambiental de seus habitantes, estão longe da regularidade e

homogeneidade espacial exibida pelos climas urbanos dos países desenvolvidos. Tanto no Brasil quanto no Chile as áreas urbanas são observadas como mosaicos complexos e caleidoscópicos de diferentes paisagens, ordenadas e caracterizadas por tipos de casas, edifícios, materiais, densidades e diversas infraestruturas verdes, diferenciadas especialmente em função dos níveis socioeconômicos de seus habitantes. Os climas urbanos das cidades não correspondem à definição clássica dos fenômenos atmosféricos, mas, sim, aos socioclimas (STEWART; OKE, 2012), dos quais dependem do conjunto de decisões estabelecidas pelos poderes políticos que controlam as cidades.

Sob modelos neoliberais que são aplicados de forma diferenciada na América Latina, os componentes do ambiente urbano, incluindo água, solos, vistas panorâmicas, espaços públicos, biodiversidade, clima e qualidade do ar, foram privatizados e comodificados, substituindo cada vez mais o conceito de bem comum que deveria caracterizar os espaços das cidades para bens privados, cujo acesso depende diretamente dos níveis de renda (ROMERO, 2019).

O resultado se traduz em segregações socioambientais que demonstram a existência de níveis significativos de injustiça climática nas urbes (MONTEIRO; MENDONÇA, 2003; ROMERO et al., 2010; ROMERO, FUENTES; SMITH, 2010; ROMERO; OPAZO, 2011; ROMERO et al., 2012). Os setores sociais mais vulneráveis são especialmente os afetados pelas ilhas e ondas de calor e frio, riscos de origem hidrometeorológica, elevados níveis de concentração de poluentes e efeitos significativos na saúde, em geral, e nas pandemias, em particular (BILAL et al., 2019; ROMERO; MENDES, 2020).

O planejamento, projeto, construção e gestão de espaços urbanos não estão levando em consideração sua contribuição para os acúmulos de calor atmosférico causados pelo armazenamento de energia solar em paredes, tetos, fachadas de edifícios, vias de circulação e superfícies desprovidas de vegetação, onde predominam o calor excessivo, desconforto climático e áreas de baixa resiliência ao risco. Também não parece haver grande preocupação com o aumento sustentado das fontes de calor antrópicas, estritamente urbanas, como residências e edifícios, sistemas de ar condicionado, fornos domésticos e industriais e, principalmente, uma frota automotiva em crescimento exponencial (MENDES; ROMERO; SILVA FILHO, 2020).

A construção de territórios urbanos e seus efeitos climáticos contribuem significativamente para relevantes mudanças em escala local e regional, cabendo aos planejadores e gestores urbanos contribuírem para a desaceleração das crescentes ilhas, ilhotas, corredores e pontos quentes extremos, que podem ser vistos em todas as escalas de análise,



desde habitações até grandes transformações causadas por densos agrupamentos de edifícios altos ou centros e núcleos comerciais (MENDES; ROMERO, SILVA FILHO, 2020). O mesmo acontece com o aumento da ocorrência de ondas de calor, cada vez mais frequente e de maior magnitude, afetando as cidades latino-americanas e ameaçando imitar o que acontece nas cidades europeias onde o estresse térmico se tornou uma importante fonte de patologias e mortes (ROMERO, 2019).

A eliminação da vegetação natural ou cultivada, das zonas úmidas e margens de rios, a pavimentação de solos e a interrupção aos fluxos de ar provenientes do rural, mar, lagos e rios implicam na dessecação da atmosfera, ação que requer intervenções principalmente em termos de proteção e aumento da infraestrutura verde por meio da natureza e de projetos urbanísticos adequados. O aumento da temperatura, da evaporação e a simultânea redução das fontes de umidade levam inevitavelmente à transformações negativas do campo térmico dos ambientes internos e periféricos das cidades, participando ativamente em mais um dos fatores que caracterizam as Mudanças Climáticas e que tem uma das suas origens mais relevantes novamente na forma inescrupulosa como os espaços urbanos se instalam, crescem e se desenvolvem.

Dessa forma, é necessário proteger fortemente as paisagens naturais remanescentes no interior e periferias das cidades. Vegetação, pântanos, solos saturados de umidade e corpos e fluxos de água consomem calor por meio dos processos de evapotranspiração, regulando o registro de temperaturas extremas. A vegetação absorve e armazena uma parte importante da radiação solar e, em combinação com as edificações, oferecem áreas, corredores e cones de sombra, os quais representam um dos serviços ecossistêmicos mais valorizados pela sociedade atual.

No Chile, não existe um verdadeiro e completo instrumento de ordenamento jurídico territorial (como o direito à cidade, à gestão integrada de bacias hidrográficas ou um autêntico serviço de proteção ambiental), como ocorre no Brasil, pelo menos retoricamente. Os chamados planos regulatórios comunais, únicos com força legal no Chile, apenas delimitam os territórios urbanizáveis e classificam os usos do solo permitidos dentro desses espaços e, geralmente, são obsoletos ou inexistentes em grande número de cidades (MENDES; ROMERO; SILVA FILHO, 2020).

Em geral, não contêm avaliações ambientais, sociais ou econômicas reais e rigorosas, o que, historicamente, facilitou a segregação socioambiental, gerando processos injustos contra os quais a sociedade chilena recentemente se levantou, de forma massiva, exigindo maior igualdade ambiental, social e econômica (JIMÉNEZ-YAÑEZ, 2020).

Assim, o objetivo desta pesquisa foi analisar as mudanças no uso e ocupação do solo e, conseqüentemente, a influência no clima urbano de duas cidades latino-americanas de médio porte, La Serena (Chile) e Piracicaba (Brasil), tendo em vista que a primeira passa por um rápido crescimento e a segunda está mais consolidada com suas ruas e edifícios definidos na parte central.

## **5.2. Material e Métodos**

### **5.2.1. Área de estudo**

Foram escolhidas áreas de maior fluxo de pessoas em duas cidades de médio porte: La Serena (Chile) e Piracicaba (Brasil).

A primeira situa-se a 29,95° S e 71,29° W, no litoral do oceano Pacífico, a 21 m de altitude, com população estimada em aproximadamente 220 mil habitantes, clima desértico (BWk, conforme a classificação climática de Köppen-Geiger), temperatura média anual de 15,1°C e pluviosidade média de 77 mm por ano, concentrada nos meses de inverno, entre junho e agosto (CLIMATE-DATA LA SERENA, 2020). Tem apresentado um rápido crescimento horizontal e vertical nos últimos anos, devido ao *boom* na produção de minerais de ferro e ouro para exportação, aliado à introdução dos agronegócios e, finalmente, à construção de edifícios e hotéis para turismo na faixa litorânea. Adicionalmente, a ocorrência de secas persistentes e medidas de resiliência inadequadas tem obrigado a população rural a emigrar do campo.

A segunda encontra-se a 22,73° S e 47,65° W, no interior do estado de São Paulo, a 533 m de altitude, população estimada em aproximadamente 400 mil habitantes, clima subtropical úmido (Cfa, conforme a classificação climática de Köppen-Geiger), temperatura média anual de 20,8°C e pluviosidade anual média de 1255 mm, sendo o maior volume no verão, entre os meses de dezembro e fevereiro (CLIMATE-DATA PIRACICABA, 2020). Tem seu maior movimento na área central, responsável sobretudo pelo comércio de produtos e serviços, apresentando crescimento em sua porção periférica, embora tenha alguns vazios urbanos, os quais a prefeitura costuma cobrar um imposto (Imposto Predial e Territorial Urbano - IPTU) relativamente mais alto que o normal para evitar tais incidências, forçando o proprietário a construir e ocupar o espaço, de modo a conter especulações imobiliárias para ganhos futuros. De um modo diferente da primeira cidade, a área aqui analisada correspondeu ao centro de Piracicaba, estando já estabelecida há décadas, sendo bem urbanizada e marcada pela heterogeneidade das alturas de seus edifícios.

### 5.2.2. Imagens de satélite

A coleção de imagens Landsat apresenta alta potencialidade para analisar alterações no uso e ocupação do solo, seja pela composição RGB (vermelho, verde, azul – cor verdadeira), IRGB (infravermelho, verde, azul – falsa cor, capaz de realçar a vegetação) ou ainda por meio das bandas termais.

Lançado em fevereiro de 2013, o Landsat-8 é o mais novo da coleção, com tamanho de pixel da banda termal (B10) igual a 100 m (equivalente ao tamanho médio de um quarteirão). Por outro lado, o Landsat-7, que foi lançado em abril de 1999, possui banda termal (B6) com resolução espacial de 60 m, permitindo um maior nível de detalhamento da superfície, mas desde o fim de maio de 2003 tem apresentado ruídos (falhas) nas bordas das cenas.

Então, um modo de corrigir esses ruídos é aplicar o filtro *Landsat Toolbox* (ferramenta *Fix Landsat 7 Scanline Errors*) via ArcGIS (DANIELS, 2012), cujo procedimento pode levar alguns minutos para processar cada cena, dependendo da capacidade computacional. Caso a área esteja ao meio da cena, não apresentará tais ruídos, como ocorreu com a cidade de La Serena, mas não para Piracicaba. Com o intuito de analisar um período próximo a 20 anos de mudanças no solo, necessariamente as imagens Landsat-7 apresentaram ser as mais adequadas, uma vez que, por ser mais novo, não há disponibilidade de imagens do Landsat-8.

Para analisar as alterações na temperatura de superfície (TS) utilizou-se dois *softwares* de Sistema de Informação Geográfica (SIG) para o geoprocessamento, sendo eles o ArcGIS versão 10.3 (correção dos ruídos) e o QGIS versão 2.18 (conversão matemática dos pixels em TS e elaboração dos mapas). As imagens foram provenientes do LandsatLook Viewer (<https://landsatlook.usgs.gov>), do United States Geological Survey (USGS). No caso de La Serena (*Path*: 001; *Row*: 081), as imagens foram dos dias 1 de dezembro de 1999 e 5 de dezembro de 2018, enquanto que em Piracicaba (*Path*: 220; *Row*: 076), elas corresponderam a 25 de agosto de 1999 e 29 de agosto de 2018, representando um dos maiores intervalos de tempo analisado, com algumas das imagens mais antigas e outras mais recentes desse satélite, cujo horário de imageamento foi entre 10h00 e 10h30 para ambos os casos, o que possibilita a comparação temporal.

A escolha do mês justifica-se pela grande presença de nebulosidade durante o verão na cidade brasileira, o que poderia enviesar os resultados e dificultar a visualização da superfície terrestre, ou seja, em agosto tem-se maior estabilidade climática em Piracicaba e, conseqüentemente, imagens mais limpas de nuvens, representando uma estação seca, assim como em La Serena. Uma vez descarregado o arquivo compactado (entre 200 e 300 MB de

tamanho, que pode triplicar ao ser descompactado), foram necessários dois arquivos: a banda 6 (correspondente à termal, em extensão .tiff) e os metadados (MTL, em extensão .txt), os quais foram inseridos no *plugin* Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) para QGIS versão 2, conforme metodologia proposta por Congedo (2014), que converte valores de *Digital Number* (DN) em TS, aplicando a correção atmosférica e convertendo os valores de K para °C. O esquema de trabalho ilustrativo para analisar a TS está mostrado na Figura 5.1.

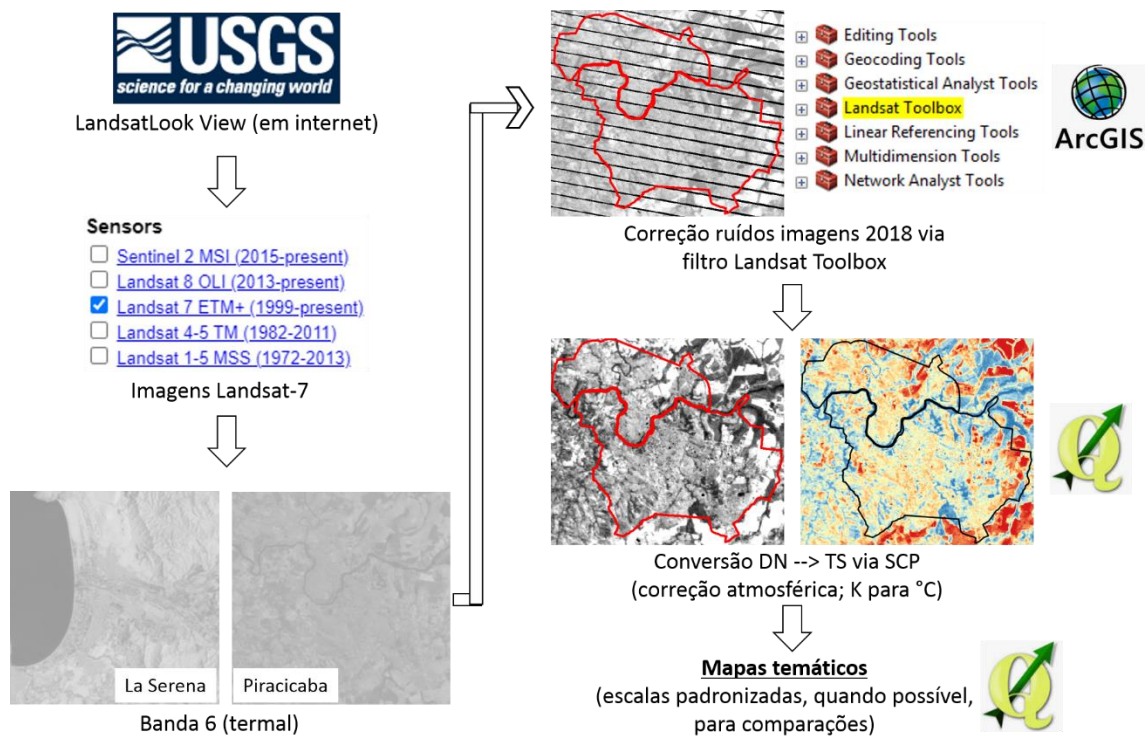


Figura 5.1 – Esquema de trabalho para obtenção da TS via imagem de satélite. Fonte: os autores.

### 5.2.3. Temperatura de superfície *in loco*

Para analisar o comportamento da temperatura de diferentes superfícies urbanas foram utilizados uma câmera termal FLIR SC660 calibrada (que analisa um recorte, uma foto na paisagem) e um termômetro digital infravermelho Raytek (que analisa a temperatura no ponto) em um dia de campo em Piracicaba, sendo 23 de janeiro de 2019, dia de muito calor, com temperatura do ar superior a 35°C, na qual estudou-se dois diferentes trechos de uma mesma rua, com e sem vegetação, isto é, Rua Visconde do Rio Branco, 1537 (desprovida de vegetação), e 1662 (arborizada), às 13h40 hora local. Vale destacar que esta parte foi realizada apenas em Piracicaba, devido à disponibilidade dos equipamentos de medição.

#### 5.2.4. Modelo ENVI-met

O ENVI-met é um modelo microclimático capaz de simular interações entre superfície-planta-ar, considerando a vegetação como um elemento vivo, o que o difere de outros *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Por meio dele realizaram-se simulações computacionais a fim de obter as seguintes variáveis climatológicas: temperatura de superfície, Fator de Visão do Céu, velocidade do vento ao nível do pedestre e a 10 m de altura, temperatura do ar e umidade relativa do ar ao nível do pedestre.

A metodologia de simulação foi adotada conforme proposto por Mendes (2014). Ambos os recortes foram referentes às áreas mais movimentadas das cidades, de 500 x 500 m (25 hectares), com quadrícula (X; Y; Z) de 100 x 100 x 20, ou seja,  $dx = dy = 5,0$  m e  $dz = 10,0$  m, além de outras 5 quadrículas sugerida pelo ENVI-met, para evitar o efeito de borda, interferindo nos resultados.

Da base de dados disponível no ENVI-met, para o modelo de La Serena, os edifícios mais altos apresentaram 66 m (22 pisos); para a vegetação, utilizou-se os seguintes códigos: 11 (palmeiras com 15 m de altura, com baixa densidade foliar), h (arbusto denso de 2 m altura) e g (gramado); o solo predominante foi o asfalto (s), com algumas manchas de areia (l), concreto (p) e água (w); para os poluentes (xx), alocados nas Avenidas Peñuelas Norte, Costanera e Los Pescadores.

No modelo de Piracicaba, o edifício mais alto também atingiu 66 m (22 pisos); para a vegetação, TH (árvores de 15 m de altura com copa densa, na Praça Central José Bonifácio), ds (árvore de 10 m de altura, na arborização viária) e g (gramado); o solo predominante também foi o asfalto, seguido pelo piso intertravado (kg) na Praça, e algumas manchas de areia e água. Quanto aos poluentes, estes foram alocados em todas as ruas da cidade, devido ao alto tráfego no centro da cidade. As alturas de cada piso igual a 3 m foram estimadas pelo Google Street View.

Embora seja necessário uma calibração com dados microclimáticos locais para obtenção de resultados mais fidedignos possível, a fim de verificar exatamente o efeito da urbanização no microclima (uso do solo e sua distribuição no espaço), as variáveis microclimáticas temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento foram adotadas padrão, conforme Mendes, Romero e Silva Filho (2020), permitindo, assim, analisar estritamente as diferenças do desenho urbano entre as cidades de La Serena e Piracicaba no microclima, alterando apenas a direção do vento predominante: em La Serena foi 193° (sul) e

Piracicaba foi 90° (leste), referentes à média de janeiro de 2019 (verão), ou seja, não sendo possível expandir os resultados à toda cidade, já que cada bairro tem seu microclima.

O processamento foi realizado em um computador com processador Intel Core i5-3210M CPU @ 2,50 GHz e 4GB de RAM, necessitando de aproximadamente 18 horas ininterruptas para simular cada área, ou seja, quase uma hora em vida real para cada hora simulada. Os modelos e a quantificação das classes de uso do solo, sendo esta realizada com o *software* MultiSpec versão 3.3, são apresentados na Figura 5.2.

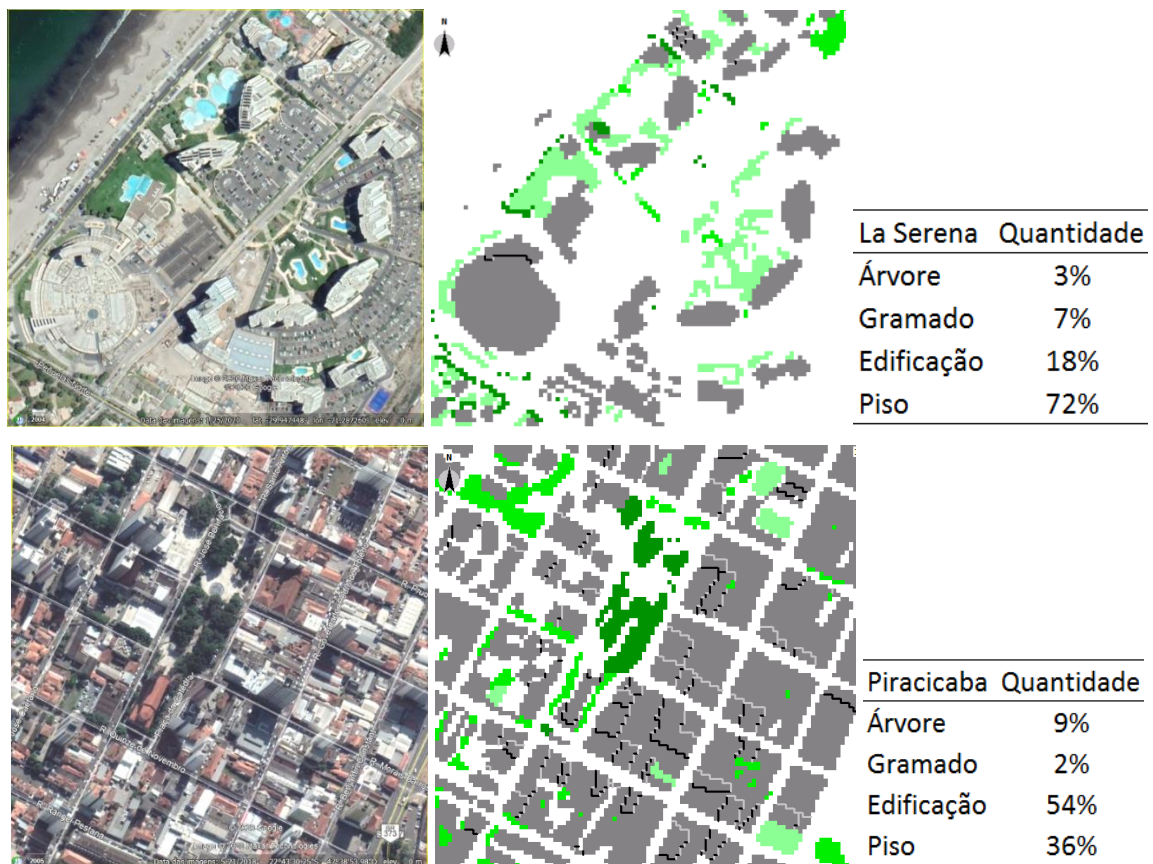


Figura 5.2 – Modelo microclimático dos recortes em La Serena/Chile e Piracicaba/Brasil, sendo os edifícios em cinza, os pisos em branco e a vegetação em verde; quanto mais intenso o verde, maior a densidade foliar da vegetação. Fonte: os autores.

### 5.3. Resultados e Discussão

Este trabalho comparou a situação de duas cidades médias posicionadas não apenas em paisagens naturais e condições climáticas muito distintas, mas também com diferentes tipos de administrações e, conseqüentemente, com resultados diferentes em suas paisagens urbanas.

Em La Serena, cidade localizada na costa do Oceano Pacífico, sobre a zona semiárida subtropical do Chile, a urbanização eliminou sistematicamente as ilhas de frescor e fontes de

umidade associadas aos cultivos agrícolas e remanescentes florestais, considerando o espaço geográfico e as paisagens naturais e culturais que conformam a cidade como objetos econômicos, em virtude do irrestrito seguimento do modelo neoliberal que tem caracterizado o desenvolvimento chileno nas últimas décadas (IRARRÁZAVAL, 2012). Diferentemente, Piracicaba, cidade situada na zona tropical, no interior do Estado de São Paulo, Brasil, legisla com algum êxito na proteção de suas áreas verdes, existindo hortas no perímetro urbano, as quais visam promover bens e serviços ambientais com alto valor ecológico, econômico e social (OLIVEIRA; KHATOUNIAN; MENDES, 2016).

Enquanto na cidade chilena a área urbana avança sem cessar, transformando relevantes coberturas agrícolas e naturais em territórios áridos, na cidade brasileira, sob chuvas mais abundantes e permanentes (embora concentradas no verão), as autoridades locais parecem esforçarem para manter a agricultura urbana com seus benefícios sociais, econômicos e ambientais.

Uma das variáveis climáticas que aparece como indicador de alterações ambientais provocadas pela urbanização é o acúmulo de calor no solo, sendo representada pela TS, a qual está diretamente relacionada à temperatura do ar numa proporção de 2:1, ou seja, cada 2°C na TS equivalem a 1°C na temperatura do ar (SOUZA; SILVA, 2005). Desta forma, é possível investigar as transformações urbanas pelas variações da TS em diferentes períodos, embora seja mais delicada uma análise comparativa entre as duas cidades por possuírem climas distintos.

Os valores de TS provenientes das imagens do satélite Landsat-7 indicaram um aumento dos valores em ambas as áreas, sendo mais acentuada em La Serena, que teve 68% de seu limite urbano mais quente, ante 42% em Piracicaba, entretanto, com comportamentos diferentes, visto que a cidade chilena teve maior aumento de temperatura rumo à periferia, enquanto que a cidade brasileira viu seus aumentos concentrados na parte central.

Em La Serena, a área urbanizada registrou TS entre 27,0°C e 32,6°C (Figura 5.3), contra 27,0°C a 29,5°C em Piracicaba (Figura 5.4), mas esta pode ter TS maiores com imagens do verão. La Serena teve maior amplitude (diferença de TS entre a máxima e mínima), atingindo quase 40°C em solos expostos situados na parte norte e sudeste do recorte; da mesma forma, porém em menores proporções, Piracicaba teve sua expansão urbana principalmente a noroeste, em direção à Rodovia SP-308 (bairro Santa Teresinha) e ao sudeste (bairros Campestre, CECAP e Taquaral). As manchas azuis e vermelhas encontradas na porção leste da cidade referem-se a áreas agrícolas com cultivo de cana-de-açúcar, uma cultura anual destinada à fabricação de etanol combustível e açúcar, que pode deixar o solo exposto após a colheita (altos valores de TS) ou coberto por vegetação, caso ainda não tenha sido colhida e ocorra o imageamento do

satélite (gerando baixos valores de TS). Ambas registraram um aumento médio estimado em  $1^{\circ}\text{C}$  a cada cinco anos, sendo este um aumento mais acentuado do que o encontrado na capital chilena Santiago, de  $1^{\circ}\text{C}$  a cada sete anos (MENDES; ROMERO; SILVA FILHO, 2020).

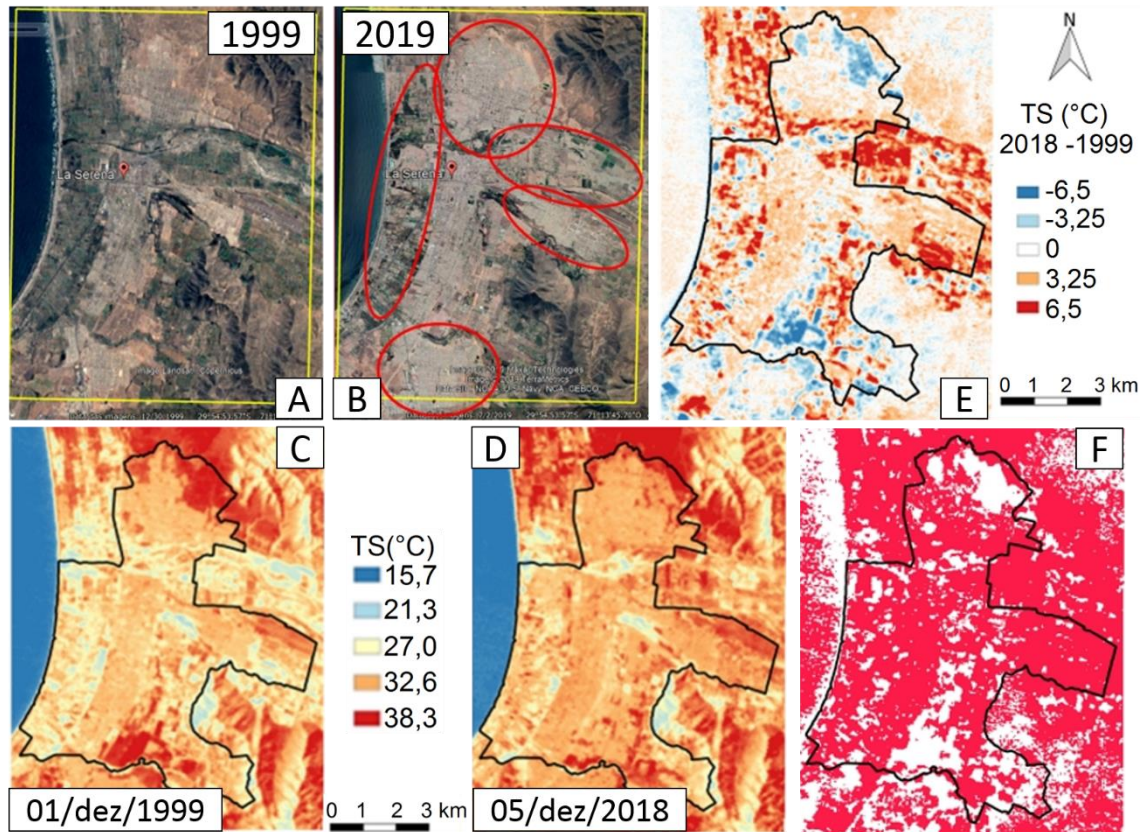


Figura 5.3 – Acompanhamento das mudanças no uso do solo em La Serena, sendo: A) imagem de satélite em 1999 via Google Earth; B) imagem de satélite em 2019 via Google Earth com elipses indicando novas áreas urbanizadas; C) temperatura de superfície em 1999 no limite da área urbana; D) temperatura de superfície em 2018; E) quantificação da variação dos valores de temperatura e F) imagem binária dos locais mais quentes (em vermelho) entre 1999 e 2018. Fonte: os autores.



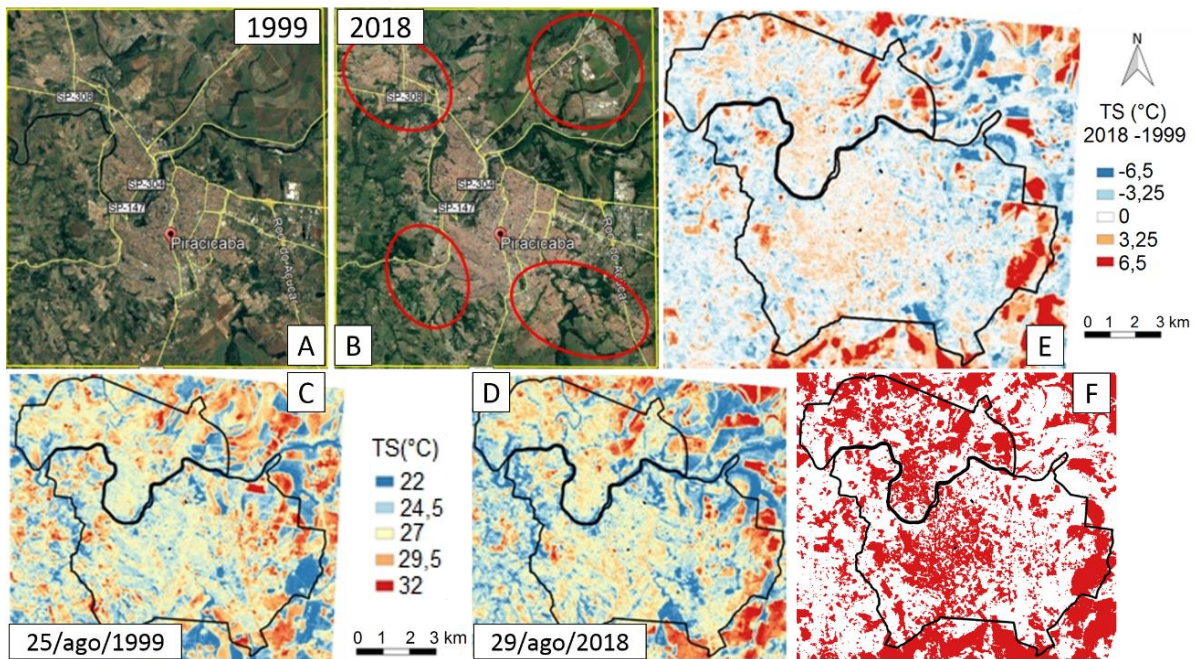


Figura 5.4 – Acompanhamento das mudanças no uso do solo em Piracicaba, sendo: A) imagem de satélite em 1999 via Google Earth; B) imagem de satélite em 2018 via Google Earth com elipses indicando novas áreas urbanizadas; C) temperatura de superfície em 1999 no limite da área urbana; D) temperatura de superfície em 2018; E) quantificação da variação dos valores de temperatura e F) imagem binária dos locais mais quentes (em vermelho) entre 1999 e 2018. Fonte: os autores.

Quanto às medições *in loco*, a Figura 5.5 evidencia a potencialidade da arborização urbana de mitigar as altas temperaturas, criando ambientes mais agradáveis termicamente, ao equalizar as superfícies na faixa dos 30 a 40°C nas horas mais quentes do dia, reduzindo a temperatura do ar em aproximadamente 1°C.

Em San Miguel de Tucumán (Argentina), Paolini e Gioia (2012) também encontraram valores semelhantes: estabilização das temperaturas de superfície entre 30 e 40°C e redução de 1°C na temperatura do ar, ao analisar, numa mesma rua, dois quarteirões distintos quanto à arborização. Monteiro (2018) argumenta que condições assim discrepantes podem reduzir a temperatura do ar em 1°C, equivalendo a uma sensação térmica superior a 10°C, dado o frescor proporcionado pela arborização. O asfalto, por exemplo, teve redução de 50% quando sombreado, reduzindo de 67°C no sol para 35°C à sombra.

Gartland (2010), em sua revisão sobre o tema, discute que esta superfície pode superar os 65°C no sol de verão, cujos pavimentos mais quentes costumam ser impermeáveis e de cor escura, com refletância abaixo de 25%. É a segunda superfície urbana que mais se aquece, atrás apenas dos telhados tradicionais. Ademais, ocasiona consequências diretas nos custos de manutenção, como se observa no trecho a pleno sol, a deterioração parcial ao meio da rua. A

maior temperatura ocorreu no teto de um carro escuro, atingido 82°C, mas durante o período de teste dos equipamentos, outro veículo registrou incríveis 95°C, às 12h00, período com maior radiação direta, dada a posição do sol.

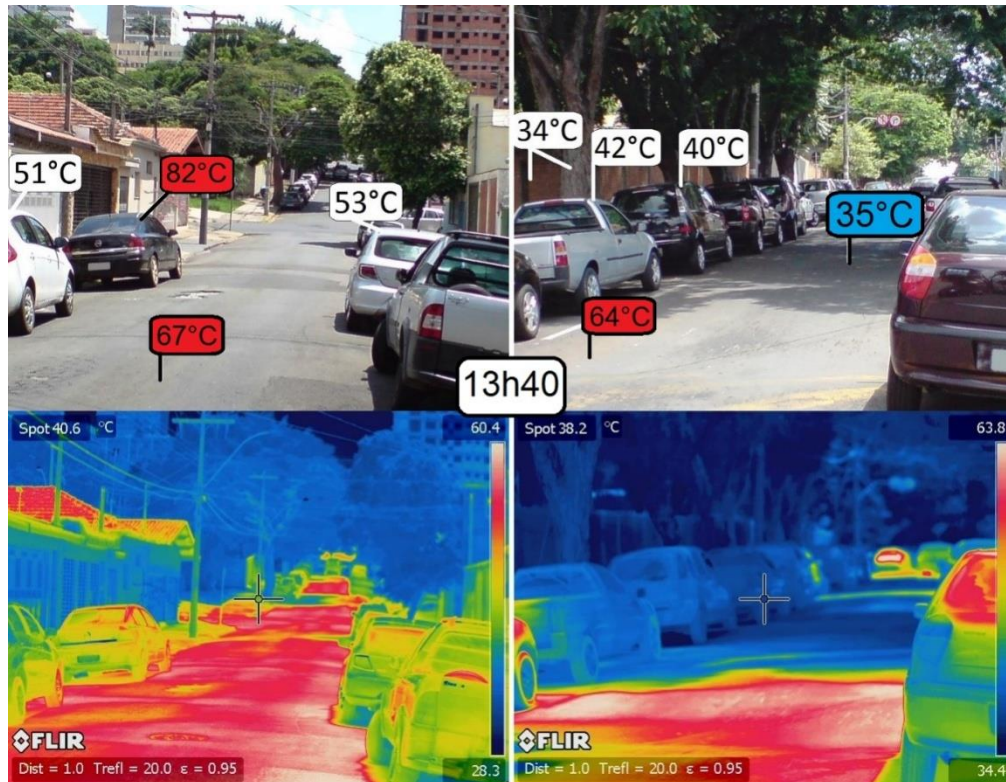


Figura 5.5 – Valores de TS na Rua Visconde do Rio Branco, 1537 (à esquerda, sem árvores) e 1662 (à direita, com árvores), registradas às 13h40 hora local, em 23 de janeiro de 2019, verão. Fonte: os autores.

Os mapas provenientes da simulação microclimática com o ENVI-met, referentes às TS em três horários distintos (6h00, 12h00 e 18h00), mostraram que, ao amanhecer, todas as superfícies estavam frescas, ambas as áreas estavam próximas de 20°C, entretanto, ao meio-dia, as temperaturas destoaram, sendo as mais altas correspondentes ao asfalto, com aproximadamente 45°C em La Serena e alguns pontos alcançando 50°C.

Em Piracicaba, praticamente todas as ruas atingiram 50°C ou mais nesse horário. Ao entardecer, porém, as ruas e os estacionamentos particulares referentes aos prédios de La Serena foram as que apresentaram os maiores valores, próximos aos 40°C, enquanto que Piracicaba ficou na faixa dos 30°C (Figura 5.6). Por ser uma área central, bem verticalizada, com ruas geométricas marcada por cânions urbanos, Piracicaba sofre mais desvios em sua ventilação do que La Serena. Um importante fator que minimiza esse impacto é a presença da Praça José Bonifácio, uma área bem vegetada, com árvores entre 10 e 15 m de altura, contribuindo para a

regulação microclimática, ao evitar valores extremos de temperatura (MENDES et al., 2015; MENDES et al., 2019).

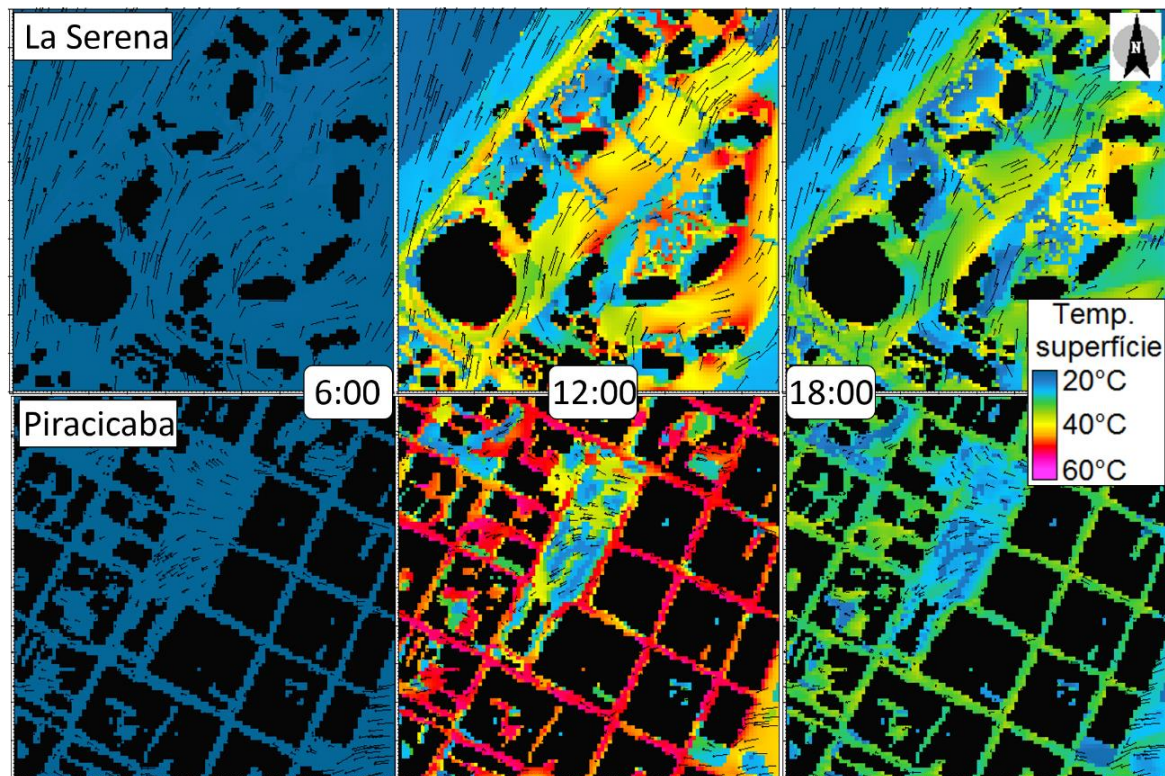


Figura 5.6 – Variação das temperaturas superficiais ao longo do dia em La Serena e Piracicaba, às 6h00, 12h00 e 18h00. Fonte: os autores.

Outro parâmetro interessante obtido pelo ENVI-met ao modelar os elementos urbanos, como construções e larguras de ruas, foi o Fator de Visão do Céu (FVC – ou *Sky View Factor*, em inglês), representando a parcela do céu visível a partir de um determinado ponto fixo. Tem seus valores variando entre 0 (obstrução total) e 1 (totalmente livre). Seus baixos valores são capazes de modificar a rugosidade da área e, conseqüentemente, o fluxo de vento, o qual é responsável pela regulação microclimática, criando melhores condições de conforto e auxiliando na dispersão de poluentes dispersos no ar.

Por ser uma área mais consolidada que La Serena e por ser o centro da cidade, correspondendo à área mais verticalizada do município, Piracicaba apresentou menores valores de FVC, ou seja, próximos a 0,3 e 0,4 em alguns cânions urbanos, caracterizados pela relação de altos edifícios com ruas estreitas, enquanto em La Serena foi desde 0,6 em sua maior parte, cujas estimativas foram feitas com o ENVI-met a partir da altura do solo (0 m), tendo em vista a proporção entre prédios e ruas, sem as árvores.

Referente à circulação do vento, nota-se que os edifícios mais altos dificultam a ventilação em ambos os casos: ao nível do pedestre (2 m), as velocidades são baixas, sobretudo nas ruas perpendiculares à direção original do vento, com menos de 1 m/s, sendo mais crítico em Piracicaba. Conforme aumenta a altura do corte de análise ( $Z$ ), verifica-se que a ventilação vai tornando-se mais homogênea, porém, mesmo com  $Z = 10$  m, Piracicaba distorce mais o trajeto do fluido por ter mais prédios que superam essa altura (Figura 5.7).

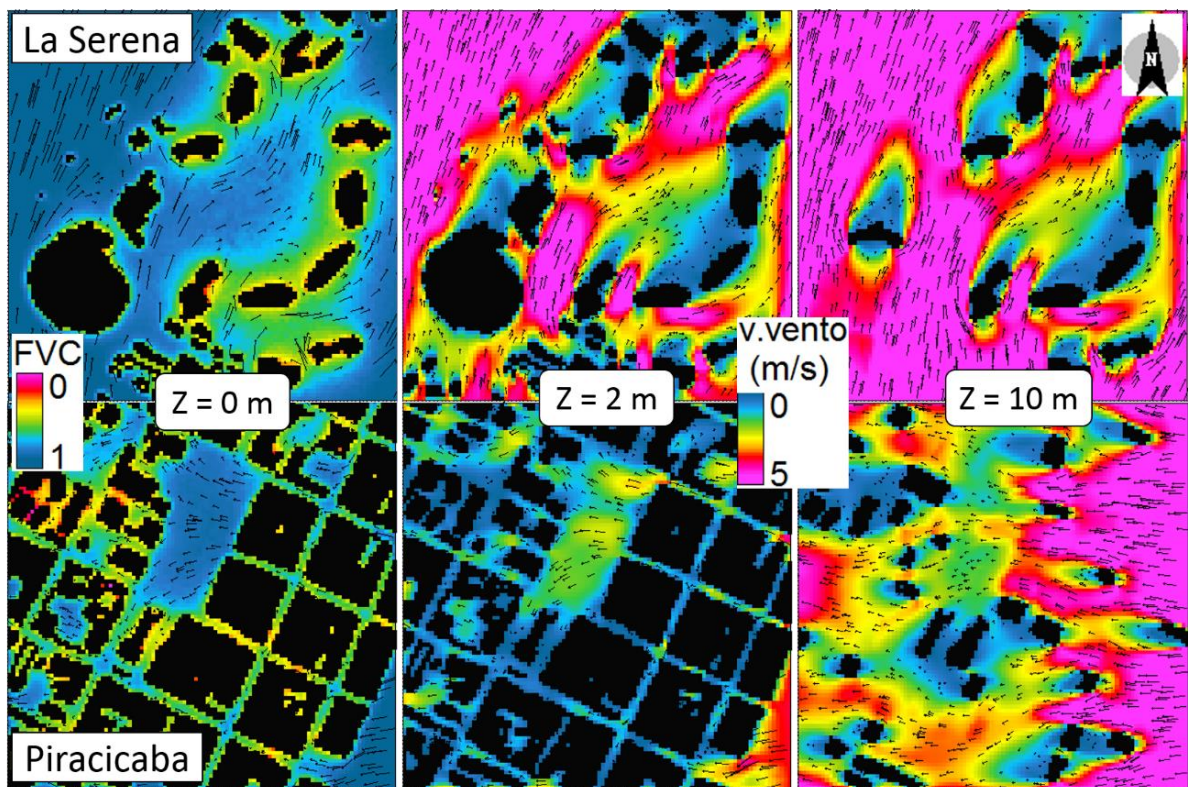


Figura 5.7 – Fator de Visão do Céu e sua influência na ventilação das duas áreas estudadas, com cortes a 2 m e 10 m de altura. Fonte: os autores.

Por sua localização litorânea, La Serena apresentou uma ventilação melhor que Piracicaba, mas pode inverter-se em a curto prazo se não houver o adequado planejamento urbano, dado o rápido crescimento que a cidade chilena tem vivenciado, tendo em vista a crescente verticalização de seus edifícios sobre a borda costeira, principalmente.

A vegetação lenhosa é o principal meio para reduzir as temperaturas e a secura ambiental e, conseqüentemente, minimizar o efeito das ilhas de calor (ZHOU; HUANG; CADENASSO, 2011); entretanto, é necessário um grande esforço em sua distribuição homogênea para diminuir 1°C a temperatura do ar ao nível do pedestre: em Hong Kong, NG et al. (2012), recomendaram 33% de cobertura arbórea na área urbana para atingir essa meta, e

Huang e Chen (2020), em Taiwan, propuseram 26% da área. Bowler et al. (2010) fizeram uma revisão sistemática de publicações e constataram que densas massas verdes, como parques urbanos, são capazes de resfriar aproximadamente 1°C em suas proximidades.

Apesar disso, a sensação térmica de frescor e o conforto térmico são índices mais perceptíveis pelas pessoas (MONTEIRO; ALUCCI, 2012), na qual a faixa de temperatura do ar entre 18°C e 26°C costumam indicar a sensação de conforto térmico (LABAKI et al., 2012). Considerando apenas as características do desenho urbano e os mesmos dados de entrada no modelo (arquivo de configuração), a fim de isolar cada variável microclimática e estudar sua influência, as duas cidades apresentaram períodos de desconforto térmico, apresentando uma diferença média de aproximadamente 0,5°C na temperatura do ar e 15% na umidade relativa do ar entre elas, sendo os menores valores para La Serena.

Por situar-se no litoral e ter mais espaços abertos, há melhor ventilação em La Serena, com menores temperaturas, contudo, a umidade foi maior em Piracicaba, por esta ter mais árvores capazes de promover a evapotranspiração, mas há uma ressalva: este resultado da umidade relativa do ar pode representar uma limitação do modelo microclimático ao não considerar que a cidade chilena localiza-se na costa, cujos valores reais podem ser maiores que os simulados em virtude das brisas e ventos úmidos provenientes do mar, necessitando, assim, de mais investigações.

Os mapas foram feitos às 15h00, horário mais crítico, com altas temperaturas e baixas umidades (Figura 5.8). La Serena e Piracicaba apresentaram aproximadamente 10% de vegetação em seus recortes, entretanto, desse total, La Serena tem apenas 3% de cobertura arbórea, ao passo que Piracicaba tem três vezes mais graças à Praça José Bonifácio, com árvores que alcançam 15 m de altura, além da arborização viária com árvores de 10 m, em média. Mesmo concentrando grande parte das árvores do recorte, a Praça tem sua influência restrita a menos de 100 m, revelando a importância de ter-se uma boa distribuição da infraestrutura verde em toda a malha urbana. Não obstante, os dois casos ficam abaixo do recomendado pela literatura, que oscila entre 20% e 40%, a depender do tipo de área, se é industrial, comercial ou residencial (AMERICAN FORESTS, 2009), sendo que o parâmetro de 30% corresponde à meta de muitas cidades dos EUA para os próximos anos, representando, logo, um valor referência para que as pessoas usufruam dos benefícios da arborização.

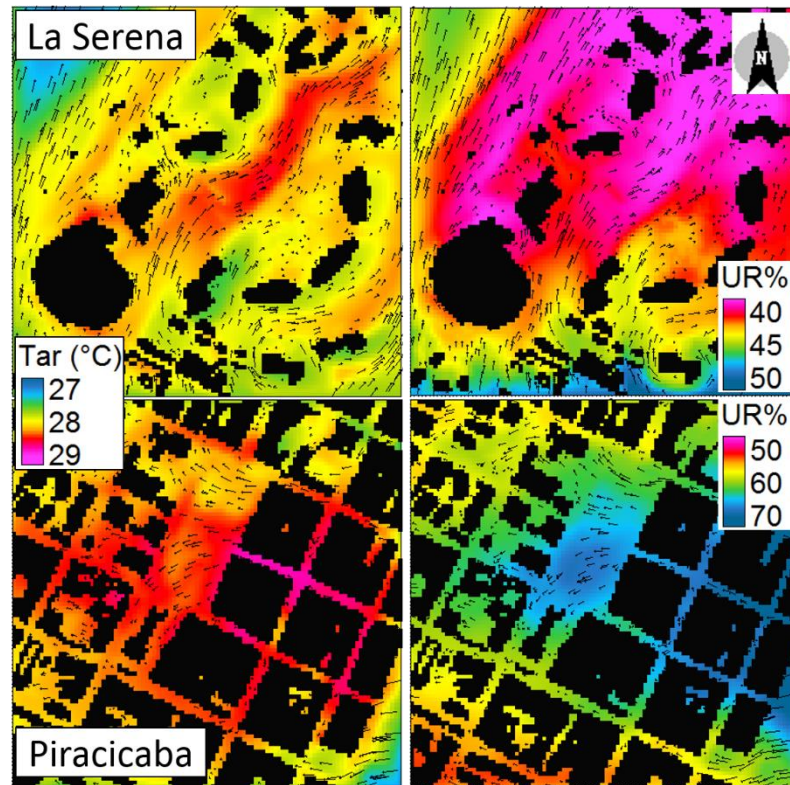


Figura 5.8 – Temperatura do ar e umidade relativa do ar ao nível do pedestre, às 15h00, nas áreas estudadas, com cortes ao nível do pedestre, ou seja, 2 m de altura. Fonte: os autores.

As mudanças no uso e ocupação do solo são reflexos das administrações passadas de cada cidade. La Serena está administrada sob um conceito de livre mercado, assim como praticamente todo o Chile, expandindo-se sobre áreas agrícolas e naturais, impermeabilizando áreas ambientalmente sensíveis a ameaças e riscos naturais como enchentes e tsunamis. O rápido crescimento pode tornar a infraestrutura verde como um elemento secundário na paisagem.

Em Piracicaba, por outro lado, parece existir maiores regulações e esforços da população para manter tais áreas naturais, promovendo maior bem-estar humano, não só em novas áreas, mas também nas já existentes. Um exemplo disso é a concentração de árvores na Praça Central, importante para o microclima local, embora não seja suficiente para refrescar o bairro todo, tampouco a cidade. Buckeridge (2015) ressalta a importância que a evapotranspiração da arborização urbana pode proporcionar às cidades, relacionando-a com rios voadores, como no estudo de caso que fez para São Paulo/SP, na qual encontrou uma equivalência de um rio de até  $3 \text{ m.s}^{-1}$  de vazão somente pelas árvores viárias. Dessa forma, uma arborização bem distribuída é sugerida como uma alternativa complementar mitigadora das altas temperaturas de superfície e dos cânions urbanos.

#### **5.4. Conclusão**

Ambas as cidades analisadas, La Serena e Piracicaba, apresentaram aumento na temperatura superficial, sendo a chilena com maior impacto, uma vez que esta teve mais de dois terços seu território aquecido. Para um estudo mais robusto, pode-se considerar o geoprocessamento de um maior número de imagens de satélites.

A manutenção das áreas verdes aparece como potencial alternativa mitigadora das mudanças nos padrões espaciais de temperatura, ao manter as superfícies com menor variação térmica, na faixa entre 30°C e 40°C nas horas mais quentes do dia. Entender o comportamento das variáveis climáticas, como temperatura do ar, umidade relativa do ar, temperatura de superfície, ventilação e fator de visão do céu, pode permitir que gestores ambientais e tomadores de decisão embasem melhor suas ações visando cidades mais resilientes, em face das variabilidades climáticas e suas vulnerabilidades socioambientais urbanas.

Além dos objetivos ambientais e políticos frequentemente anunciados, a verdade é que as cidades latino-americanas continuam a contribuir de forma significativa, crescente e permanente para a transformação negativa de seus climas urbanos. Apesar dos acordos e programas globais, em consequência da ineficiência da regulamentação e seus instrumentos de ordenamento do território, as fontes de calor multiplicam-se constantemente, ao mesmo tempo que as fontes de frescor, umidade e ventilação são eliminadas, sendo urgente resolver esse problema não só do clima urbano, mas também elevar os níveis de qualidade de vida, saúde pública e equidade socioambiental de seus habitantes.

O conjunto de ferramentas disponíveis para compreender o clima urbano e planejar cidades mais sustentáveis abrangem a disponibilidade gratuita de imagens de satélite, geoprocessamento em ambiente SIG, sensoriamento remoto, temperatura de superfície, mudanças no uso e ocupação do solo, alterações nos fluxos de vento e simulações microclimáticas, conforme as potencialidades do ENVI-met aqui exploradas.

#### **Agradecimentos**

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, do Santander, e da Dirección de Investigación y Creación (DIC) de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo (FAU) de la Universidad de Chile (UCHile) - Concurso de Proyectos de Investigación Interdisciplinar FAU 2019. Os autores também agradecem ao Dr. Jefferson Lordello Polizel pelo auxílio com as imagens câmera termal FLIR SC660.

## Referências

- AMERICAN FORESTS. **Setting urban tree canopy goals**. 2009. Disponível em: <http://www.americanforests.org/resources/urbanforests/treedeficit.php>. Acesso em: 13 maio 2020.
- BILAL, U.; ALAZRAQUI, M.; CAIAFFA, W.T.; LÓPEZ-OLMEDO, N.; MATÍNEZ-FOLGAR, K.; MIRANDA, J.J.; RODRÍGUEZ, D.A.; VIVES, A.; DIEZ-ROUX, A. Inequalities in life expectancy in six large Latin American cities from the SALURBAL study: an ecological analysis. **The Lancet Planetary Health**, v. 3, n. 12, p. e503-e510, 2019.
- BOWLER, D.E.; BUYUNG-ALI, I.; CAVALEIRO, T.M.; PULLIN, A.S. Urban Greening to Cool Towns and Cities: a systematic review of the empirical evidence. **Landscape and Urban Planning**, v. 97, n. 3, p. 147-155, 2010.
- BUCKERIDGE, M. Árvores urbanas em São Paulo: planejamento, economia e água. **Estudos Avançados**, v. 29, n. 84, p. 85-101, 2015.
- CLIMATE-DATA. **Clima La Serena**. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/americado-sul/chile/iv-region-de-coquimbo/la-serena-939/>. Acesso em: 5 maio 2020.
- CLIMATE-DATA. **Clima Piracicaba**. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/americado-sul/brasil/sao-paulo/piracicaba-748/>. Acesso em: 5 maio 2020.
- CONGEDO, L. **Semi-Automatic Classification Plugin**. User Manual. 2014.
- DANIELS, R.C. Using ArcMap to Extract Shorelines from Landsat TM Data. In: ESRI International Users Conference, 32.; **Proceedings...** San Diego: ESRI UC, 2012.
- GARTLAND, L. **Ilhas de Calor: Como Mitigar Zonas de Calor em Áreas Urbanas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- HUANG, J.M.; CHEN, L.C. A Numerical Study on Mitigation Strategies of Urban Heat Islands in a Tropical Megacity: A Case Study in Kaohsiung City, Taiwan. **Sustainability**, v. 12, n. 10, p. 3952-3973, 2020.
- IRARRÁZAVAL, F.I. El imaginario “verde” y el verde urbano como instrumento de consumo inmobiliario: configurando las condiciones ambientales del área metropolitana de Santiago. **Revista INVI**, v. 27, n. 75, p. 73-103, 2012.
- JIMÉNEZ-YAÑEZ, C. # Chiledespertó: causas del estallido social en Chile. **Revista Mexicana de Sociología**, v. 82, n. 4, p. 949-957, 2020.
- LABAKI, L.C. FONTES, M.S.G.C.; BUENO-BARTHOLOMEI, C.L.; DACANAL, C. Conforto térmico em espaços públicos de passagem: estudos em ruas de pedestres no estado de São Paulo. **Ambiente Construído**, v. 12, n. 1, p. 167-183, 2012.
- MENDES, F.H. **Tutorial para Iniciantes: software ENVI-met versão 3.1**. 2014. Disponível em: [http://cmq.esalq.usp.br/wiki/lib/exe/fetch.php?media=publico:projetos:envi-met31\\_tutorial\\_iniciantes.pdf](http://cmq.esalq.usp.br/wiki/lib/exe/fetch.php?media=publico:projetos:envi-met31_tutorial_iniciantes.pdf). Acesso em: 5 maio 2020.



MENDES, F.H.; ZANLORENZI, H.C.P.; DOBBERT, L.Y.; PRATA-SHIMOMURA, A.R.; SILVA FILHO, D.F. Alterações microclimáticas na Praça José Bonifácio em Piracicaba (SP). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARBORIZAÇÃO URBANA, 19., 2015, São Paulo. **Anais...** São Paulo: CBAU, 2015. 11p.

MENDES, F.H.; SOUSA-CAMILO, A.S.; LOPES, A.M.S.; POLIZEL, J.L.; SILVA FILHO, D.F.; ROMERO-ARAVENA, H. Comportamiento térmico de diferentes superficies urbanas durante un día cálido de verano. **Revista Geográfica de Valparaíso**, v. 1, n. 56, p. 1-8, 2019.

MENDES, F.H.; ROMERO, H.; SILVA FILHO, D.F. Cambio Climático adverso provocado por la urbanización sin planificación ni evaluación ambiental en Santiago de Chile. **Revista de Geografía Norte Grande**, v. 77, p. 191-210, 2020.

MONTEIRO, L.M. **Conforto térmico em espaços urbanos abertos**: verificações modelares como aportes à exploração de abordagens. Tese (Livre-Docência). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

MONTEIRO, L.M.; ALUCCI, M.P. Modelo adaptativo de conforto para avaliação *in loco* de espaços urbanos abertos. **Ambiente Construído**, v. 12, n. 1, p. 61-79, 2012.

MONTEIRO, C.A.F.; MENDONÇA, F. **Clima Urbano**. São Paulo: Editora Contexto, 2003.

NG, E.; CHEN, L.; WANG, Y.; YUAN, C. A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong. **Building and Environment**, v. 47, p. 256-271, 2012.

OLIVEIRA, D.; KHATOUNIAN, C.A.; MENDES, F.B.G. Diagnóstico de hortas urbanas do município de Piracicaba, e seus entraves para a conversão para o sistema orgânico de produção. **Cadernos de Agroecologia**, v. 10, n. 3, p. 1-6. 2016.

PAOLINI, L.; GIOIA, A. Arbolado y calentamiento en el Gran San Miguel de Tucumán. In: GRAU, A.; KORTSARZ, M. (eds.). **Guía de Arbolado de Tucumán**, Tucumán, Argentina, 2012.

ROMERO, H.; FUENTES, C.; SMITH, P. Ecología política de los riesgos naturales y de la contaminación ambiental en Santiago de Chile: necesidad de justicia ambiental. **Scripta Nova**, v. 52, n. 331, 1-14, 2010.

ROMERO, H.; IRARRÁZAVAL, F.; OPAZO, D.; SALGADO, M.; SMITH, P. Climas urbanos y contaminación atmosférica en Santiago de Chile. **EURE (Santiago)**, v. 36, n. 109, p. 35-62, 2010.

ROMERO, H.; OPAZO, D. Ecología política de los espacios urbanos metropolitanos: Geografía de la injusticia ambiental. **Revista Geográfica de América Central**, v. 2, n. 47E, p. 1-16, 2011.

ROMERO, H.; VÁSQUEZ, A.; FUENTES, C.; SALGADO, M.; SCHMIDT, A.; BANZHAF, E. Assessing urban environment segregation (UES). The case of Santiago de Chile. **Ecological Indicators**, v. 23, p. 76-87, 2012.

ROMERO, H. Urban Climates and the Challenge of Sustainable Development of Chilean Cities. In: HENRÍQUEZ, C.; ROMERO, H. **Urban Climates in Latin America**. Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 207-256.

ROMERO, H.; MENDES, F.H. El avance del COVID-19 en Santiago de Chile y su relación con las vulnerabilidades socio-ambientales urbanas. **Espiral, revista de geografías y ciencias sociales**, v. 2, n. 4, p. 69-78, 2020.

SOUZA, J.D.; SILVA, B.B. Correção atmosférica para temperatura da superfície obtida com imagem TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 23, n. 4, p. 349-358, 2005.

STEWART, I.D.; OKE, T.R. Local climate zones for urban temperature studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, n. 12, p. 1879-1900, 2012.

ZHOU, W.; HUANG, G.; CADENASSO, M.L. Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes. **Landscape and Urban Planning**, v. 102, n. 1, p. 54-63, 2011.



## 6. LA GENTRIFICACIÓN DE LOS CLIMAS URBANOS Y SU INFLUENCIA SOBRE LAS TEMPERATURAS DE LA SUPERFICIE TERRESTRE Y EL COVID-19 DURANTE EL AÑO 2020 EN SANTIAGO DE CHILE

### Resumen

Las investigaciones exploratorias sobre el comportamiento espacial del COVID-19 se han concentrado en las correlaciones entre las tasas de morbilidad y mortalidad y sus determinantes socio-económicos. Reconociendo la indudable importancia de las condiciones climáticas y sus cambios estacionales en los brotes y difusión de la pandemia, se han correlacionado también, con resultados diversos, con informaciones climáticas a escala de ciudades, países y regiones globales, sin explorar las características diferenciales de los climas al interior de las ciudades y su relación espacial con las tasas de incidencia del COVID-19. El clima urbano de Santiago de Chile, representado en este caso por la distribución espacial de las Temperaturas de la Superficie Terrestre (TST) a través del año 2020, se asocia con las tasas de incidencia de la pandemia a escala de comunas o conjuntos de barrios, observando condiciones de injusticias socioambientales que son urgentes de resolver.

**Palabras clave:** Comodificación y gentrificación de los climas urbanos, Temperaturas de la Superficie Terrestre, tasas de incidencia del COVID-19 por comunas, coronavirus, pandemia.

### Abstract

Exploratory research on the spatial behavior of COVID-19 has focused on correlations between morbidity and mortality rates and their socio-economic determinants. Recognizing the undoubted importance of climatic conditions in outbreaks and the spread of the pandemic, they have been also correlated, with diverse results, with climatic information at the level of cities, countries and global regions, without, however, considering the differential characteristics of climates within the city and their spatial relationship with COVID-19 incidence rates. Santiago de Chile's urban climate, represented in this case by the spatial distribution of Land Surface Temperatures (LST) through 2020, is associated with the incidence rates of the pandemic at the level of communes or sets of neighborhoods, observing conditions of socio-environmental injustices that are urgent to resolve.

**Keywords:** Urban climates comodification and gentrification, Land Surface Temperature, neighborhood incidence rates of COVID-19, coronavirus, pandemic.

### 6.1. Introducción

La Pandemia de COVID-19 ha afectado severamente a los países y ciudades latinoamericanas; se han multiplicado las investigaciones epidemiológicas que permiten explicar las situaciones registradas y, por sobre todo, que intentan predecir y gestionar la evolución futura de esta y otras amenazas a la salud pública. Los contagios se han concentrado

en las ciudades, en especial en las capitales de los países, como Santiago en el caso de Chile, donde se localiza el mayor número de habitantes (sobre el 36% de la población nacional) y de los enfermos y muertos causados por la pandemia (Minsal, 2021).

Los estudios sobre las relaciones espacio-temporales entre los contagios y sus factores explicativos al interior de las ciudades se han referido especialmente a los determinantes socio-económicos que, en el caso de Chile, al igual que en toda la región latinoamericana, destacan por el predominio de elevados niveles de desigualdad social entre sus diversos barrios. Las significativas diferencias que se observan al interior de las ciudades involucran relevantes condiciones de injusticia, que no se reducen solo a las características sociales y económicas, sino que también incluyen grandes desigualdades ambientales, entre las cuales destacan las contrastadas condiciones climáticas urbanas. Sin embargo, estas últimas no se han considerado mayormente en los análisis realizados hasta ahora, lo que constituye el objetivo principal de esta aproximación preliminar y limitada por la falta de información concluyente acerca de un proceso aun en desarrollo.

La publicación reciente del libro sobre Climatología Urbana de América Latina (Henríquez y Romero, 2019) presenta en forma selectiva algunos de los más importantes progresos experimentados por esta disciplina en el subcontinente, incluyendo capítulos referidos a islas de calor, sustentabilidad urbana, riesgos socio-naturales y rol ambiental de la vegetación para enfrentar el Cambio Climático y la contaminación atmosférica. El libro constituye también un reconocimiento y homenaje a científicos latinoamericanos, como los profesores Ernesto Jáuregui y Carlos Augusto de Figueiredo Monteiro, que hace más de treinta años contribuyeron a fundar este tipo de estudios en la región, conscientes que se trataba de un tema fundamental para garantizar niveles de seguridad y confortabilidad a la creciente población urbana, que se concentraba ilimitadamente en megalópolis en medio de profundas desigualdades e injusticias socio-ambientales. Los mencionados profesores fueron a su vez mentores y educadores de una amplia generación de discípulos y continuadores de su obra, que han generado a su vez, innumerables avances en la climatología urbana de la casi totalidad de los países latinoamericanos, al mismo tiempo que han alentado la formación de laboratorios y núcleos de investigación que, a través de numerosos y diversos programas de postgrado, han fortalecido los conocimientos especializados en este campo en toda la región.

En esta pléyade de orientadores e impulsores de la climatología latinoamericana también han estado presente profesores españoles, destacando principalmente los académicos José María Cuadrat y Javier Martín Vides. La mayoría de los investigadores que trabajan en la actualidad en climatología urbana en Latinoamérica han recibido, en forma directa o indirecta,

las contribuciones de dichos académicos. En nuestro caso, uno de los autores de este trabajo tuvo al Profesor Cuadrat como Director de Tesis de Doctorado en la Universidad de Zaragoza y, como, a su vez, este académico chileno ha contribuido a formar otros tantos especialistas, se puede decir que la impronta del Profesor Cuadrat no solo se ha manifestado en las generaciones actuales, sino que además debe proyectarse hacia las del futuro.

En el diseño e implementación de un futuro urbano sustentable, que brinde equidad territorial y justicia socio-ambiental a todos los habitantes de las ciudades de la región, es necesario colocar a la climatología urbana como un pilar fundamental. No es posible estar de acuerdo con las situaciones de injusticia climática que la pandemia ha desnudado tan dramáticamente en todas las ciudades latinoamericanas, las que se han sumado a unos estados permanente de sufrimiento ante las condiciones de frío o calor excesivo al interior y exterior de las viviendas, así como a la ocurrencia frecuente y generalizada de desastres hidro-climáticos que afectan a la mayoría de los ciudadanos. La climatología urbana debe ser definitivamente considerada en los diseños, planes y modelos de gestión de las ciudades latinoamericanas, dejando de ser un objetivo reclamado, pero lejos aún de ser implementado adecuadamente, especialmente cuando en todo el mundo se advierten los principales efectos adversos del Cambio Climático, a los cuáles las ciudades, bajo sus actuales formas de funcionamiento, contribuyen significativamente.

En los estudios sobre las correlaciones espaciales entre la morbilidad y mortalidad de la pandemia y sus factores causales que circulan en Santiago de Chile actualmente, no se menciona al clima urbano; en caso que ello ocurra se trata de la comparación de datos e informaciones meteorológicos promedios obtenidos para ciudades localizadas en diferentes regiones de los países y continentes, que parten del supuesto que las temperaturas, la humedad y la ventilación son homogéneas al interior de las ciudades, lo que está muy distante de la realidad prevaleciente en Latinoamérica. En estas ciudades, el clima de los diferentes barrios refleja esencialmente los usos y coberturas de suelos, densidades de ocupación del territorio, tipos y materiales del medio ambiente construido y, por lo tanto, los niveles socioeconómicos de sus habitantes (Mendes, Romero y Silva Filho, 2020; Romero y Mendes, 2020a).

Si reconocemos las desigualdades socio-climáticas como uno de los principales rasgos ambientales distintivos de las ciudades latinoamericanas, podremos aproximarnos de mejor manera a la constelación de relaciones espaciales que explican la permanente injusta distribución de la salud ambiental y su agudización bajo la actual pandemia. Desde luego y tal como nos ha enseñado la geografía física crítica (Lave et al., 2014; Lave, Biermann y Lane, 2018), no se trata de separar al clima urbano de los determinantes sociales y económicos, sino

que, por el contrario, apreciar en forma ponderada los procesos atmosféricos de carácter global y aquellos que se desarrollan al interior de las ciudades, en combinación con la actuación de los factores socioeconómicos, cuyas interacciones permiten comprender las tan diversas situaciones que se han registrado en el espacio y el tiempo de la geografía de la pandemia.

Los estudios sobre las relaciones entre climas urbanos en general y de sus componentes específicos (radiación solar, temperaturas, humedad atmosférica y ventilación), con los indicadores socioeconómicos de los habitantes de las ciudades, y de ambos sobre la salud pública, se han fortalecido y precisado durante los últimos años (Tang, Di, Xiao, Lu y Zhou, 2017; Chakraborty, Hsu, Manya y Sheriff, 2019), comprendiendo también las relaciones entre los usos y coberturas de los suelos con la generación de formas climáticas típicas de las ciudades, como las islas de calor urbano causadas principalmente por la impermeabilización de la superficie de los suelos y el desaparecimiento de la vegetación (Sun, Lü, Yang y Cheng, 2019), coincidiendo todos ellos en la existencia de climas muy diferentes según se trata de áreas ocupadas por habitantes ricos o pobres.

Mientras en las ciudades de los países desarrollados los grupos sociales más vulnerables son considerados minorías, en las ciudades latinoamericanas constituyen incuestionablemente una mayoría que no tiene necesariamente incorporada en sus formas de vida cotidiana el disfrutar de climas agradables, aire limpio, seguridad ante las amenazas naturales y confortabilidad climática al interior y exterior de sus hogares. La climatología urbana no corresponde solo a los atributos químicos o físicos que caracterizan a la atmósfera sobre un determinado lugar y bajo condiciones asociadas a los diferentes tipos de tiempo, sino que se trata más bien de un componente del espacio producido y reproducido socialmente, en función de los objetivos y recursos disponibles de los grupos sociales diferenciados en virtud de su poder adquisitivo. El clima urbano, consecuentemente, se encuentra “comodificado” (Castree, 2003; Romero y Mendes, 2020b; Thornes; Randalls, 2007), como cualquier otro bien o servicio al interior de la ciudad, y, para acceder a sitios de temperaturas y humedad más moderadas, adecuadamente ventilados, con menores concentraciones de contaminantes e instalados en sitios capaces de enfrentar riesgos hidro-meteorológicos como heladas, inundaciones, aluviones o sequías, se tiene que disponer de los suficientes recursos económicos para comprar un clima, que cada vez es más difícil de encontrar en el mercado, como consecuencia de los cambios globales y de sus elevados niveles de escasez, justamente como resultado de una urbanización desaprensiva e interesada solo en su comercialización. Los climas urbanos son ofertados como atributos fundamentales de la calidad ambiental de los

paisajes y proyectos urbanos, lo que implica que el aire no es más un bien libre y ha perdido su carácter de bien común al interior de las ciudades:

“La atmósfera es una parte esencial de la vida en la Tierra, pero cada vez más, la atmósfera y la información sobre ella están siendo transformadas de ser consideradas como parte de los comunes globales, para serlo como una mercadería para ser comprada y vendida. (Thornes y Randalls, 2007, p. 273)

“Las actividades de muchos gobiernos e industrias han desafiado cada vez más el concepto de la atmósfera como un ‘bien público’, caracterizado por su consumo sin exclusividad y sin rivalidad” (Elling, 1989, *apud* Thornes y Randalls, p.274).

El Estado y el mercado se han asociado en ciudades como Santiago no solo para demarcar mediante la planificación urbana los sitios de mejor calidad climática, sino que además han dividido sus actuaciones entre aquellas que implican omisión y las que, por el contrario, significan comisión. Esta última intervención consiste en la ejecución de un proceso de gentrificación climática, por el cual se realizan planes y proyectos por parte del sector público y privado para mejorar los climas urbanos degradados y transformarlos en atractivos para los habitantes de mayor poder adquisitivo.

Extensas remodelaciones urbanas, que han expulsado a los habitantes originarios de menores ingresos, se estructuran mediante el diseño y ejecución de obras destinadas a mejorar la calidad del aire y de los climas, tales como control de densidades y alturas de las edificaciones, trazado de avenidas anchas que no reduzcan el factor de visibilidad de los cielos y, por sobre todo, instalación de áreas verdes y conexión con los remanentes de paisajes naturales (Shokry, Connolly y Anguelovski, 2020). Otras veces se autorizan proyectos inmobiliarios en medio de paisajes naturales que inmediatamente pasan a ser comodificados y ofertados por el mercado a precios elevados. De manera opuesta, cuando no se hace nada para mejorar la calidad del aire y de los climas en los barrios más desposeídos, se trata de una omisión que deja en manos de los actores privados la posibilidad de controlar y mejorar las condiciones ambientales de sus barrios, ya afectados por la precaria calidad de las viviendas que acompañan el poblamiento espontáneo de los habitantes con mayor urgencia social o las construcciones públicas de grandes conjuntos de habitaciones carentes de servicios y equipamientos comunitarios. En Santiago de Chile se aprecian las bondades y perjuicios de la gentrificación climática al comparar las temperaturas, humedad, coberturas vegetales y niveles de ventilación entre sus barrios y comunas ricas y pobres (Irarrázaval, 2012; Smith y Romero, 2016; Mendes et al., 2020; Romero y Mendes, 2020b).



Conceptualmente, la gentrificación climática en las ciudades latinoamericanas forma parte de la llamada gentrificación ecológica, una suerte de respuesta de la planificación urbana ante el proceso de Cambio Climático, que se presenta como un devenir apocalíptico, que para ser enfrentado, hace necesario adquirir la fantasía de la inmunidad, comprando y practicando un modo de vida eco-amistoso. Este modo de vida vacía de significado a la naturaleza y a la sustentabilidad, que actúan en la planificación urbana como “combustible para dar la apariencia de estar haciendo algo acerca del cambio global y el medio ambiente cuando en efecto se trata de despliegues destinados a mantener la prioridad del crecimiento económico para el logro de la competitividad global” (Harper, 2019, p.64).

Respecto a la distribución espacial de la pandemia de COVID-19 en Santiago de Chile, Vergara-Perucich, Correa-Parra y Aguirre-Núñez (2020), han analizado los contagios mediante el desarrollo de un modelo de regresión múltiple que relaciona el aumento de casos experimentado entre el 30 de marzo y el 22 de mayo de 2020 como variable dependiente, seleccionando como variables explicativas el hacinamiento de habitantes por vivienda, la precariedad de sus construcciones, el nivel educacional de los jefes de hogar y el precio de las casas. Esta última resultó ser la variable que mejor explica el aumento de la pandemia por comunas y consiguientemente, las tasas de morbilidad y mortalidad al interior de la ciudad.

En Santiago de Chile hay viviendas que no tienen ningún valor para el mercado, en un extremo, y en el otro, aquellas que superan los US\$ 5.000 por m<sup>2</sup> construido. Los valores promedios por rangos fluctúan entre US\$ 100 y 2.500/m<sup>2</sup>; es decir, en promedio las diferencias de precios de las casas pueden alcanzar hasta 25 veces por metro cuadrado construido. Para los autores, el precio de las viviendas, dada la segregación territorial prevaleciente al interior de la ciudad, representa la interpretación económica por parte del mercado inmobiliario de un conjunto sistémico de atributos comodificados, tales como localización de los terrenos, tamaño de las viviendas, densidad de ocupación de los suelos, accesibilidad a los centros de bienes y servicios, materialidad de las construcciones, existencia y tamaño de las áreas verdes, estatus social de los habitantes de los barrios, seguridad ciudadana ante la delincuencia creciente, menor ocurrencia de amenazas naturales y, en síntesis, todos aquellos bienes y servicios que conforman el espacio urbano y son transados en el mercado formal. En el caso de los extensos barrios informales, donde predomina la autoconstrucción de viviendas o de conjuntos sociales, estos se localizan generalizadamente en las áreas de mayores riesgos naturales y sociales, con alta densidad y tasas de hacinamiento, espacios reducidos, carencia de espacios públicos, ausencia de áreas verdes, altas tasas de criminalidad, precariedad y falta de aislamiento de las viviendas y ausencia de servicios adecuados, incluyendo los de atención de la salud pública.

Debido al estricto modelo neoliberal de desarrollo seguido por Chile durante más de cuarenta años, todos estos atributos del espacio urbano se adquieren libremente en el mercado y su accesibilidad constituye la principal forma de segregación socio-económica. En términos de salud, son los principales factores o determinantes de las tasas generales de morbilidad y mortalidad de sus habitantes. En el caso de Santiago, la ciudad fragmentada implica que la esperanza de vida de las mujeres que habitan en las comunas socialmente más vulnerables del sector poniente sea ocho años menos que la de quienes habitan en las comunas ricas del sector oriente (Bilal et al., 2019).

Las temperaturas superficiales registradas por los suelos y captadas por las imágenes satelitales no solo permiten identificar las islas de calor urbano y otros rasgos de los climas locales, sino que además, representan las condiciones socio-ambientales de sus barrios. Las comunas ricas registran menores oscilaciones diarias y variaciones estacionales y mensuales de sus temperaturas, en comparación con las comunas de menores ingresos. Corresponde examinar, entonces, la relación que puede existir entre la distribución mensual de las Temperaturas de la Superficie Terrestre (TST) y las tasas de incidencia de COVID-19, observadas durante el año 2020 en las diferentes comunas de Santiago, con la finalidad de poder sugerir medidas de planificación, diseño y gestión de los espacios que recuperen el valor de los climas urbanos como un bien común y permitan proponer intervenciones que aseguren su distribución equitativa y justa.

## **6.2. Materiales y Métodos**

El área de estudio fue la ciudad de Santiago de Chile, que se localiza a 33° 26' S y 70° 39' W, a 570 m de altitud media en relación al nivel del mar y que forma parte de la Región Metropolitana de Santiago (RMS), donde viven más de 7 millones de habitantes (INE, 2017) o 43% de la población nacional, distribuida en 38 comunas (Figura 6.1). Esta región registra veranos (diciembre-marzo) cálidos y secos, e inviernos (junio-agosto) frescos y lluviosos, característicos del tipo de clima Mediterráneo Csb, según la clasificación de Köppen-Geiger (Peel, Finlayson y McMahon, 2007).

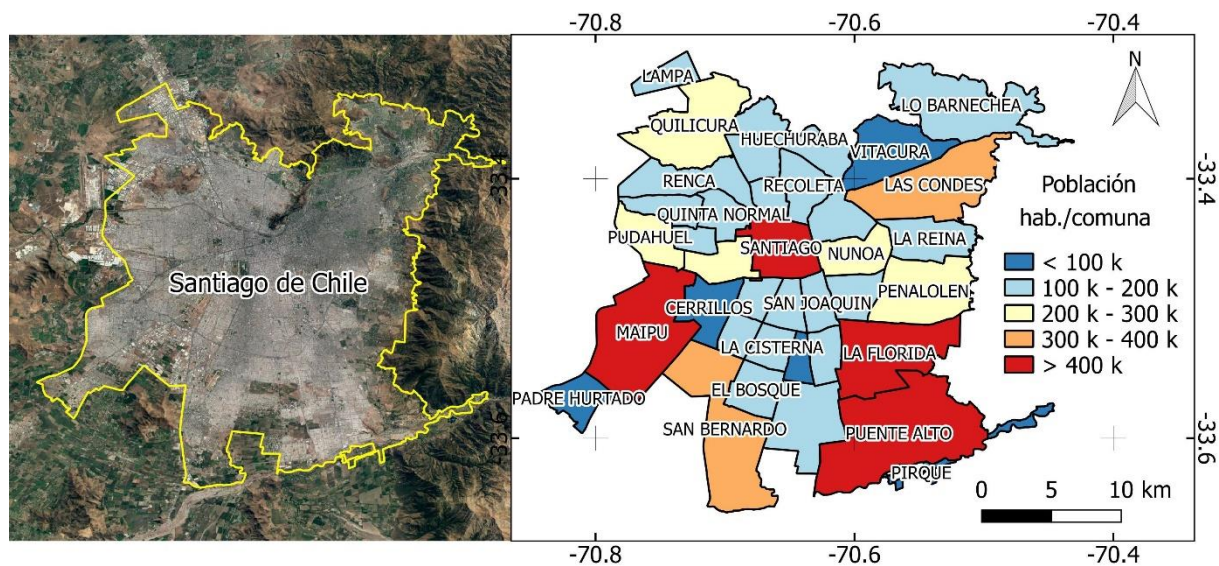


Figura 6.1. Vista aérea de Santiago de Chile y población residente en cada una de las 38 comunas en que se divide política y administrativamente. Fuente: Elaboración propia, desde Google Earth e informaciones oficiales del INE (2017).

Para comprender el comportamiento espacial del COVID-19 en Santiago de Chile, fueron correlacionadas sus tasas de incidencia (número de casos cada 100 mil hab.) con la TST media de cada una de las 38 comunas existentes en la RMS en diferentes meses del año 2020. Las tasas de incidencia representan la cantidad de infectados por el virus, mientras la TST corresponde al calor almacenado en el suelo, pudiendo ser esta variable climática un indicativo de vulnerabilidad socio-ambiental.

Los datos de contagios del virus tuvieron como fuente los Informes Epidemiológicos del Ministerio de Salud chileno (Minsal, 2021). El Minsal monitorea los contagios y difunde los Informes oficiales cada tres o cuatro días, en promedio; aunque pueden ocurrir subnotificaciones de casos, especialmente en períodos de monitoreo muy cortos, con personas asintomáticas. En esta investigación se analizaron registros de los Informes de los días 07 de abril (5° Informe) y 03 de mayo (14° Informe), correspondientes a la estación de otoño; 23 de julio (36° Informe), que representa a la estación de invierno; 13 de septiembre (51° Informe), correspondiente a inicios de la primavera, y 03 de diciembre (74° Informe), emitido a inicio del verano, todos del año de 2020. Estas fechas son cercanas a los días en que se encuentran disponibles imágenes satelitales: 07 de abril, 09 de mayo, 28 de julio, 14 de septiembre y 03 de diciembre de 2020. Para determinar las tasas de incidencia en cada comuna bastó dividir la cantidad de infectados (casos absolutos) por su población (INE, 2017) y multiplicar por 100.000.

Las tasas de incidencia fueron clasificadas cualitativamente en bajas, medias, altas, muy altas y críticas, basadas en los valores promedios acumulados para cada periodo analizado:

abril (mín. 0; máx. 118; promedio 31), mayo (mín. 89; máx. 418; promedio 166), julio (mín. 1494; máx. 5546; promedio 3432), septiembre (mín. 1717; máx. 5984; promedio 3846) y diciembre (mín. 2020; máx. 6594; promedio 4232 contagios/100.000 hab. - equivalente al 4,2% de toda la población de Santiago). La relativización de estos números permitió realizar la comparación espacial entre las diferentes comunas y meses, dado su crecimiento exponencial (Romero y Mendes, 2020a).

El satélite elegido para obtener las medias de las TST fue el Landsat-7 (sensor ETM+ C1 Level-1), en su banda 6 (térmica), y píxel de 60 m de tamaño, cuya escena de Santiago es *WRS Path: 233; WRS Row: 083*. Estas imágenes representan imágenes adquiridas cada 16 días, cruzando el cielo de Santiago siempre cerca de las 10.00 hrs de la mañana (hora local). Disponer de imágenes sin nubes en el otoño e invierno limita la disponibilidad de informaciones. Las imágenes fueron descargadas por el enlace LandsatLook Viewer (<https://landlook.usgs.gov/landlook/viewer.html>), pero también se puede utilizar el Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), ya que los dos pertenecen al USGS (United States Geological Survey). En la secuencia, es necesario descomprimir el archivo, obteniendo dos archivos de la carpeta: la banda térmica en formato .tif y los metadatos en formato .txt. Las cinco imágenes satelitales fueron procesadas en el *software* QGIS, según la metodología propuesta por Luca Congedo (2014), cuyo Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) convierte matemáticamente los niveles de grises en TST, aplicando la corrección atmosférica y convirtiendo valores en Kelvin para grados Celsius.

### 6.3. Resultados

En la fecha de preparación de este artículo, había pasado un año desde que la Organización Mundial de la Salud (OMS) decretó el estado de pandemia por COVID-19 el 11 de marzo de 2020. Desde entonces, al 24 de febrero de 2021, el mundo había registrado más de 112 millones de contagios, destacando entre los países más afectados los Estados Unidos (28 millones de casos), India (11 millones), Brasil (10 millones), Rusia (4 millones) y Reino Unido (4 millones), todos países con grandes poblaciones que, juntos, contabilizaron más de 50% de los casos totales. En totalidad, se habían registrado más de 2,5 millones de muertes, lo que significaba una tasa global de incidencia de 1,4% y una letalidad de 2,2% (JHU, 2021). En Latinoamérica, Brasil, Argentina y Colombia presentaban las mayores tasas de incidencia, mientras que México, Ecuador y Bolivia alcanzaban las mayores tasas de letalidad. Además,

estos ocho países alcanzan valores por encima de los promedios mundiales. Sin embargo, muchos países europeos se encontraban igualmente en situación crítica (como Reino Unido, Italia, España y Portugal) presentando las más altas tasas de incidencia, al menos hasta fines de febrero de 2021 (Tabla 6.1).

Tabla 6.1. Número de casos y de muertes, tasa de incidencia y tasa de letalidad por COVID-19 en Latinoamérica y otros países del mundo, registrados al 24 de febrero de 2021

Posición del país respecto al total de la población mundial	País	Casos	Muertes	Población total	Tasa de incidencia	Tasa de letalidad
2°	India	11.047.000	156.705	1.380.004.385	3,3%	1,4%
3°	EUA	28.377.000	507.153	331.002.651	2,1%	1,8%
6°	Brasil	10.324.463	249.957	212.559.417	4,9%	2,4%
9°	Rusia	4.154.000	83.044	145.934.462	2,8%	2,0%
10°	México	2.060.908	182.815	128.932.753	1,6%	8,9%
21°	Reino Unido	4.157.000	121.979	67.886.011	6,1%	2,9%
23°	Italia	2.849.000	96.666	60.461.826	4,7%	3,4%
29°	Colombia	2.237.542	59.260	50.882.891	4,4%	2,6%
30°	España	3.171.000	68.468	46.754.778	6,8%	2,2%
32°	Argentina	2.085.411	51.650	45.195.774	4,6%	2,5%
43°	Perú	1.300.799	45.683	32.971.854	3,9%	3,5%
63°	Chile	812.344	20.310	19.116.201	4,2%	2,5%
67°	Ecuador	278.779	15.634	17.643.054	1,6%	5,6%
80°	Bolivia	245.719	11.547	11.673.021	2,1%	4,7%
89°	Portugal	800.586	16.136	10.196.709	7,9%	2,0%
235°	Global	112.841.807	2.503.055	7.805.657.500	1,4%	2,2%

Fuente: Elaboración propia, desde JHU (2021) y Worldometer (2021).

En agosto de 2020 (es decir en pleno invierno), Chile registró la mayor tasa de incidencia entre los países latinoamericanos, alcanzando al 2,0% de su población (Romero y Mendes, 2020a). A la fecha de escribir este artículo (28 de febrero de 2021), la situación de salud pública continuaba siendo crítica, especialmente en los estratos más vulnerables de la población.

### 6.3.1. Distribución espacial de las Temperaturas de la Superficie Terrestre

Las TST pueden registrar un valor que duplique a la temperatura del aire (Souza y Silva, 2005). De esta forma, la TST no solo condiciona en gran medida a esta última, sino que, a su vez, está directamente influida por la cantidad de vegetación y tasas de impermeabilización de los suelos, así como con la materialidad de las construcciones e infraestructura urbana

(Mendes et al., 2020). Chile se divide en 16 regiones político-administrativas, de las cuales la Región Metropolitana de Santiago se ubica en la zona central del país (Figura 6.2A). En abril (Figura 6.2B), a comienzos del otoño, el promedio de la TST en las 38 comunas de Santiago fue 24,3°C, siendo las comunas ricas del sector oriente de la ciudad (Vitacura, Las Condes, Lo Barnechea y Providencia) cerca de 2 a 3°C más frescas que el resto, debido a su mayor altitud, menores densidades construidas y extensas áreas verdes. Por el contrario, las comunas de Lampa, Quilicura y Cerrillos (del sector poniente) fueron las más cálidas, debido al predominio de alta densidad de viviendas, sectores industriales, suelos desnudos o impermeabilizados y ausencia de vegetación. De esta manera, se configura una distribución espacial típica de los climas urbanos de Santiago, que diferencian permanentemente al sector oriente, vecino a la Cordillera de los Andes, del sector poniente, localizado en el sector más bajo de la cuenca de los ríos Maipo y Mapocho, en cuyo interior se ha desarrollado la capital de Chile.

En mayo (Figura 6.2C), cuando comenzó a manifestarse el frío local como consecuencia de la llegada del invierno, la TST registrada fue de 16,0°C, y las comunas ricas quedaron con temperaturas cerca de este valor promedio, demostrando una baja desviación estándar. El sector oriente presentó fragmentos con valores más elevados y se observó una franja de temperaturas más elevadas en el piedemonte andino, asociada seguramente a la mayor dinámica de las masas de aire que descienden desde las montañas, que superan los 3.000 m de altura e impiden el estancamiento de los flujos y la concentración de las bajas temperaturas, que por el contrario, se estabilizan en los sectores más bajos de la cuenca, como en la franja fría de aproximadamente 12°C que se observa en el sector poniente. En el mes de julio (Figura 6.2D), en pleno invierno, se registró 5,8°C como TST promedio para la ciudad, y las comunas más ricas presentaron valores encima de este parámetro. Por el contrario, las comunas del sector poniente, concentraban el frío en zonas de gran vulnerabilidad social, como las comunas de La Pintana, San Ramón y Quilicura, que registraron valores de TST entre cero y 1,0°C, con todo el discomfort climático y los mayores riesgos para la salud pública que ello implica.

En el mes de septiembre, comienzos de la primavera (Figura 6.2E), el promedio de las temperaturas superficiales ascendió a 19,8°C, y las comunas ricas presentaron un comportamiento similar al observado en mayo, mientras que las comunas del poniente quedaron encima del promedio, registrando incluso valores extremos, superiores a 25°C en las áreas del NW y SW de la ciudad. Por fin, en diciembre (Figura 6.2F), la TST promedio alcanzó los 30,5°C y se restituyó en plenitud la diferenciación oriente-poniente, por la cual las comunas de Lo Barnechea, Vitacura, Las Condes, Providencia y La Reina alcanzaron temperaturas

superficiales hasta 10°C más bajas que los extremos cálidos registrados en las comunas del NW (Lampa, Quilicura) y del SW (Cerrillos, El Bosque, San Ramón).

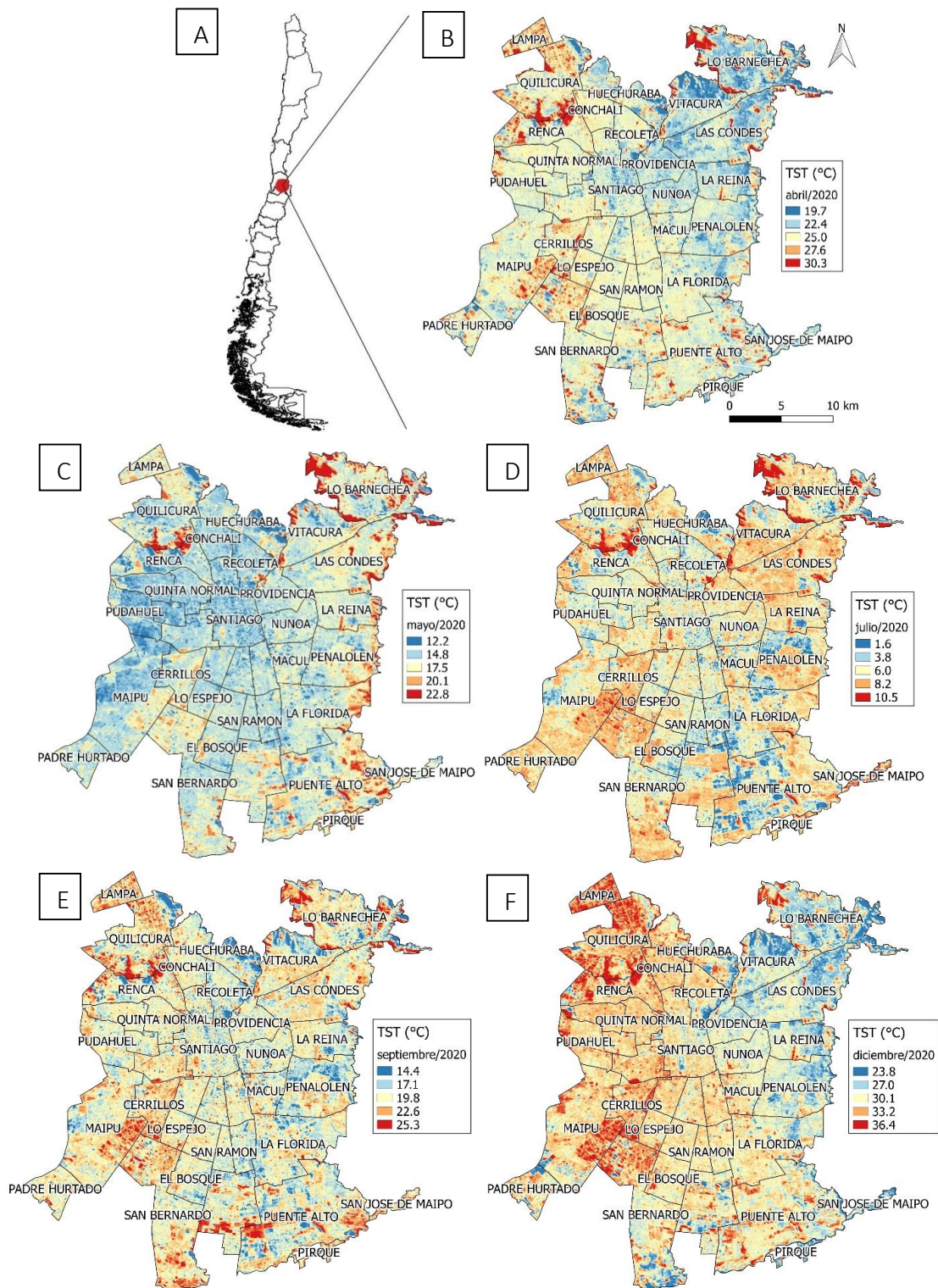


Figura 6.2. (A) Ubicación de Santiago entre las 16 regiones político-administrativas en que se divide Chile y distribución de las Temperaturas de la Superficie Terrestre en los días seleccionados de los meses de (B) abril, (C) mayo, (D) julio, (E) septiembre y (F) diciembre, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

### 6.3.2. Distribución espacial de las tasas de incidencia de la pandemia

El análisis de las variaciones espaciales de las tasas de incidencia de COVID-19 durante el año 2020 (Figura 6.3) indica que en el mes de abril las cifras más altas se registraron en las comunas más ricas y con temperaturas templadas del NE de la ciudad y en unas cuantas del centro de la ciudad, que concentran algunos de los principales mercados y servicios públicos y privados. Si bien el sector poniente alcanzaba cifras menores de enfermos, algunas comunas de alta vulnerabilidad social, como El Bosque y San Ramón comenzaban a destacar por sus elevados números.

En mayo, los niveles más críticos de contagio avanzaron hacia el centro y comunas peri-centrales de la ciudad, como Santiago, Recoleta y Quinta Normal, al mismo tiempo que se registraban elevadas tasas en las comunas de Cerrillos y San Ramón, localizadas al poniente. En el mes de julio y en medio de las rigurosas condiciones que caracterizan a las temperaturas del invierno, especialmente en las comunas instaladas en los sectores más deprimidos de la cuenca, se advierte no solo un dramático cambio en los espacios urbanos afectados, sino que también la concentración de las mayores cifras observadas en el año en superficies y corredores localizados en las comunas de mayor vulnerabilidad social y ambiental.

En septiembre, con el arribo de la primavera y sus temperaturas más cálidas, las tasas de incidencia mejoraron notoriamente en forma generalizada, aunque se mantuvieron altas en comunas puntuales del norponiente y centro de Santiago. El mejoramiento de las cifras y el convencimiento de que se replicarían las condiciones más favorables asociadas a la llegada del verano en el Hemisferio Norte, aumentó las expectativas de haber superado las condiciones más críticas de contagio. Sin embargo, el incremento de la movilidad debido a las celebraciones de las fiestas de fin de año, así como la reapertura del comercio y de los servicios, y la imperiosa necesidad de trabajo que enfrentaba la sociedad, implicaron la generación de una segunda ola de contagios que se acentuó a partir de los meses de enero y febrero de 2021, esta vez en las comunas de mayor población, como Puente Alto (29 mil casos), Maipú (18 mil casos), Santiago (18 mil casos) y La Florida (16 mil casos). Adicionalmente, los contagios se concentraron en comunas de considerable vulnerabilidad social, como La Granja, Renca, La Pintana y San Ramón, todas con más de 6,0% de su población infectada. Según la Secretaría Regional Ministerial de Desarrollo Social y Familia (2019), las comunas de La Granja y Renca, por ejemplo, registran unos niveles medios de prioridad social, mientras que La Pintana y San Ramón se posicionan como la primera y la cuarta, respectivamente, entre las zonas que presentan los mayores Índices de Prioridad Social (IPS) superior a 80,00. Con fines



comparativos se puede indicar que las comunas de Vitacura, Las Condes, Providencia, Lo Barnechea, La Reina y Ñuñoa (comunas del sector oriente) registran IPS inferiores a 38,00.

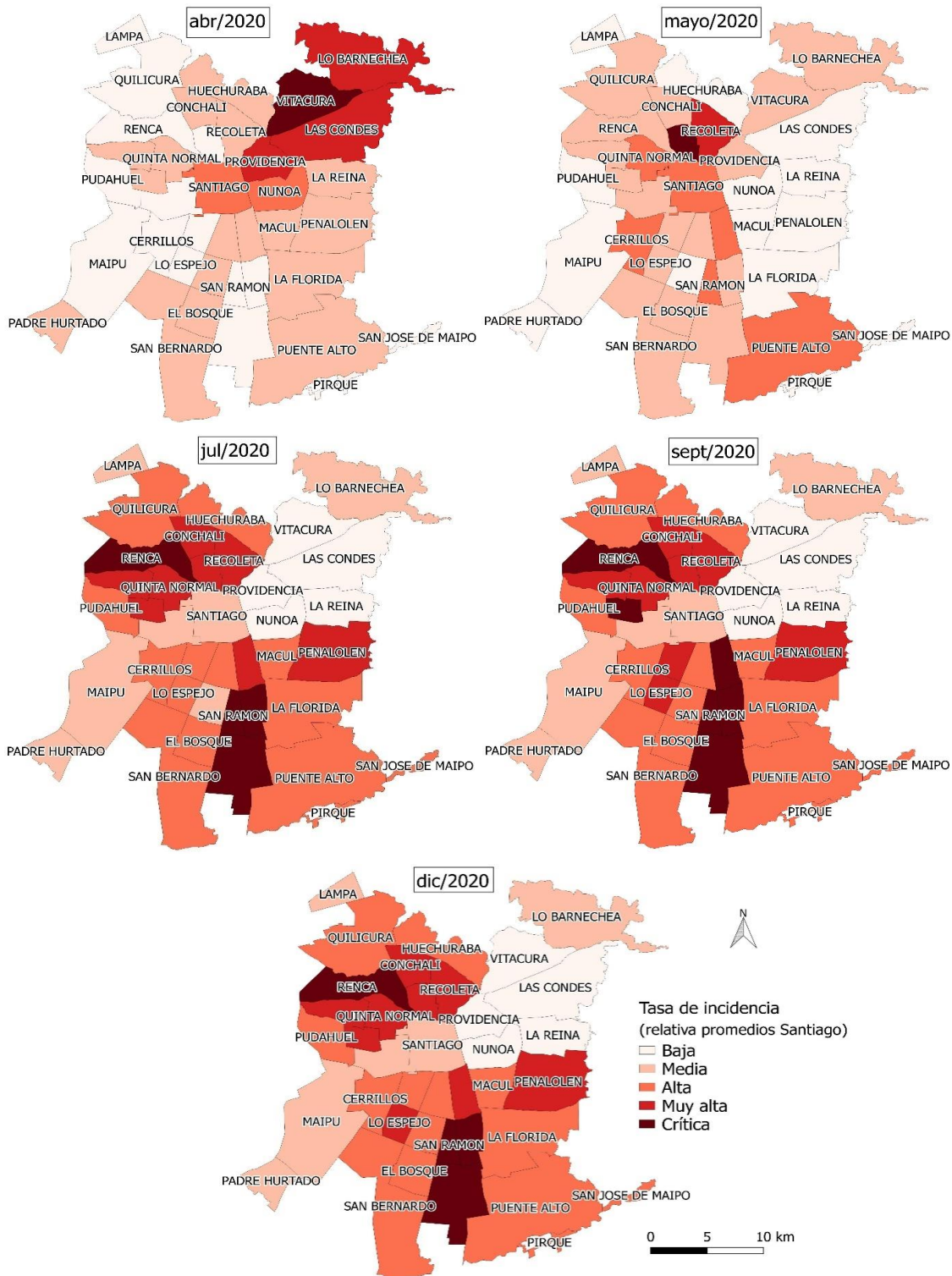


Figura 6.3. Evolución de las tasas de incidencia (contagios por 100.000 habitantes) del COVID-19 durante el año de 2020 en Santiago de Chile. Fuente: Elaboración propia, sobre la base de informes oficiales de Minsal (2021).

### **6.3.3. Relaciones espaciales entre Temperaturas de la Superficie Terrestre y las tasas de incidencia de la pandemia**

Las correlaciones negativas entre las condiciones de TST y las tasas de incidencia de COVID-19 predominaron en todas las estaciones climáticas durante el año 2020, excepto en el mes de diciembre. Las comunas más frías concentraron los contagios en los meses de invierno y primavera (Figura 6.4). En el mes de abril, las aún bajas tasas de incidencia surgieron espacialmente en las comunas con TST en el rango de 24-26°C. Al mes siguiente, el significativo descenso térmico estacional generalizó la distribución de la pandemia por toda la ciudad junto con una distribución más dispersa de los contagios, tornando poco significativa la relación entre ambas variables al interior de la ciudad. En julio nuevamente las mayores tasas de incidencia se ubicaron en las comunas más frías, principalmente en La Pintana (TST promedio 0,1°C), San Ramón (0,5°C) y Quilicura (0,7°C), que son al mismo tiempo algunas de las áreas socialmente más vulnerables de la ciudad. A partir del mes de septiembre se observó una tendencia de estabilización bajo la cual permanecieron las comunas más críticas.

En diciembre, el patrón espacial, social y climáticamente diferenciado entre las comunas del poniente y oriente tendió más bien a incorporar comunas del sur y suroriente de la ciudad, que registraron las más altas tasas de incidencia, tales como La Granja, Renca, La Pintana y San Ramón, comunas que aún en la estación cálida mantenían sus altas concentraciones de enfermos, por encima de 6,0% de sus poblaciones. Por el contrario, las comunas de mayores ingresos del noreste presentaron una situación completamente diferente, con las menores tasas de incidencia: Vitacura, Las Condes, Providencia, Ñuñoa y La Reina, todas ellas entre 2,0% y 2,8%, por debajo del promedio de la ciudad hasta fines del año de 2020 (4,2%).

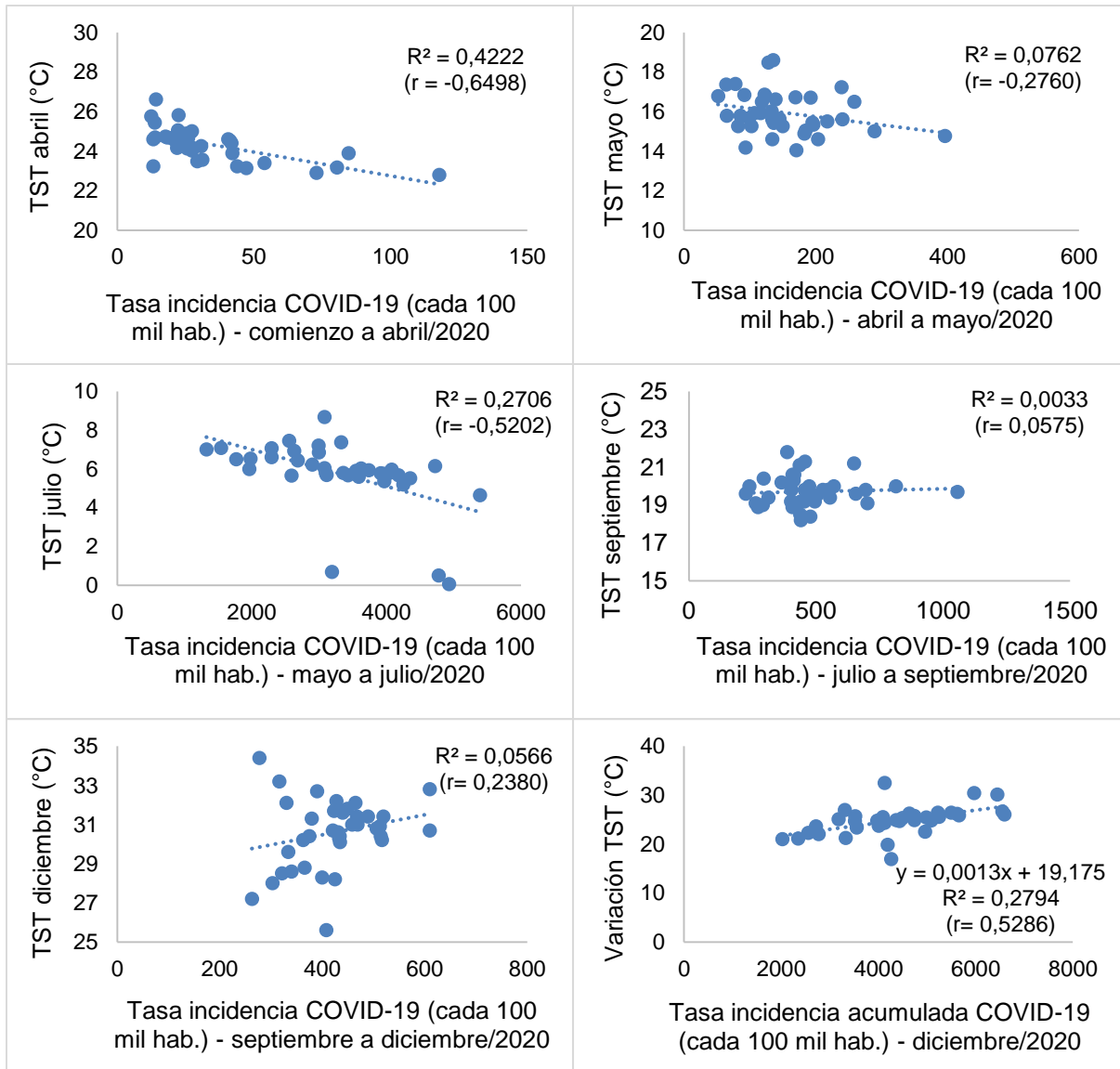


Figura 6.4. Correlación entre TST y las tasas de incidencia de COVID-19 (por cada 100 mil hab.) en los períodos de abril, abril a mayo, mayo a julio, julio a septiembre, y septiembre a diciembre de 2020. Además, el último gráfico presenta la situación de las tasas de incidencia acumuladas hasta el mes de diciembre de 2020 en relación a la variación de TST entre julio (mes más frío) y diciembre (el más cálido). Fuente: Elaboración propia, sobre información oficial de Minsal (2021).

#### 6.4. Discusión y Conclusiones

En un informe preliminar, Mena et al. (2021) analizaron la incidencia y mortalidad atribuidas a la pandemia y su asociación con el status demográfico y socioeconómico de las comunas de Santiago de Chile, a partir de los excesos en las cifras de muertes y las tasas de mortalidad causadas por la pandemia. Las desigualdades entre las comunas respecto al sistema de cuidado de la salud fueron ratificadas a través de la consideración de la menor capacidad de testeo de la enfermedad y mayores retrasos para conocer sus resultados en las zonas socialmente

más vulnerables. Las desigualdades socioeconómicas explican una gran parte la variación de las muertes, así como la sub-estimación de sus cifras en los informes oficiales distribuidos. Hasta fines de agosto de 2020, Santiago de Chile, que contiene el 36% de la población nacional, había concentrado el 55% de los casos confirmados de COVID-19 y el 65% de las muertes atribuidas a la pandemia. En términos de disparidad comunal, Vitacura, con el máximo status socioeconómico de la ciudad y del país (Índice de Desarrollo Socio Económico (SES) de 93,7) alcanzó la cifra de 22,6 casos por 10.000 habitantes como tasa máxima de incidencia a mediados de mayo de 2020, mientras que La Pintana, con el más bajo indicador de desarrollo de la ciudad (17,0), registró 76,4 por 10.000 habitantes en la primera semana de junio de 2020.

En mortalidad se apreciaban cifras igualmente representativas de la profunda segregación socio-ambiental existente al interior de la ciudad. En este caso, la comuna de San Ramón, clasificada entre las de menor desarrollo social (SES 19,7) registraba 4,4 muertes semanales en la segunda semana de junio, mientras que la de Vitacura alcanzaba menos de una muerte en igual período. Para Mena et al. (2021), además de los determinantes sociales, la movilidad urbana durante los períodos de confinamiento decretado por las autoridades sanitarias, ratifican la segregación socio-económica. Las comunas de mayor nivel, la redujeron en 61% mientras que las más pobres solo alcanzaron un 40%, lo que indicaría que los habitantes de estas últimas, no pudieron financiar estar en sus casas durante los confinamientos.

En términos de exceso de muertes, alcanzaron a 1,7 veces del valor esperado, entre mayo y junio de 2020, con un *peak* de 2110 muertes en la primera semana de junio (pleno invierno en el hemisferio sur), en relación a un valor esperado de 802. Las tasas de incidencia informadas en los meses de marzo y abril fueron menores en las comunas de menores ingresos debido a la realización de menos testeos, lo que habría influido en una tardanza para enfrentar la pandemia en dichas áreas urbanas. Por el contrario, las comunas más ricas realizaron más testeos, obteniendo sus resultados en menores tiempos, lo que facilitó la adopción de medidas de aislamiento, que pudieron ser cumplidas en mayor medida puesto que sus habitantes practicaban el teletrabajo en sus trabajos más formales. Las tasas de mortalidad para gente joven fueron igualmente, significativamente mayores en las áreas más pobres.

Tal como se ha indicado, los modelos de correlaciones espaciales que permitan conocer el rol de los factores causales sobre los contagios y muertes provocados por el COVID-19 en la población de Santiago, han concluido que el precio de la vivienda, ha resultado ser la variable que mejor explica las diferencias de comportamiento de la enfermedad entre los diversos sectores de la ciudad. Se trata de una cifra que sintetiza la comodificación por parte

del mercado inmobiliario de la totalidad de los atributos que determinan el valor de los hogares y los barrios, incluyendo tácitamente entre ellos, la calidad del aire y de los climas.

Por otro lado, estudios como los de Smith y Romero (2016), Mendes et al. (2019), Romero (2019) y Romero y Mendes (2020) coinciden en que las tasas de impermeabilización y los índices de productividad de biomasa son la principal causa que determina la distribución espacial y temporal de las temperaturas y de sus principales rasgos urbanos, correspondientes a islas, archipiélagos, corredores y puntos extremos de calor y de frío. En las ciudades latinoamericanas ambas variables se relacionan directamente con el nivel socioeconómico de las poblaciones, concentrándose los valores extremos en las comunas donde residen los grupos de menores ingresos. Las áreas verdes son muy indicativas de las injusticias socioambientales al interior de la ciudad, dado que por la condición semi-árida de Santiago solo el riego artificial permite su presencia y mantención, algo que resulta imposible de afrontar económicamente por parte de los municipios de menores ingresos.

Estudios anteriores (Gutiérrez-Hernández y García, 2020; Sajadi et al., 2020) han indicado que el COVID-19 alcanzó su máxima dispersión espacial en los meses secos y fríos en las zonas de climas subtropicales y de tipo mediterráneo del Hemisferio Norte, pero, por el contrario, que en las regiones tropicales esto ocurrió bajo condiciones cálidas y húmedas. Como Chile es un país muy largo, extendiéndose por más de 4.500 km entre las latitudes 18 y 56°S, posee una alta variedad zonal en sus climas, cuyas tasas de incidencia de la pandemia han variado considerablemente en el transcurso del año entre las regiones del norte, centro y sur del país (JHU, 2021). Las regiones más australes, como Magallanes, Los Ríos, Los Lagos y La Araucanía, en que el invierno se prolonga hasta fines de año y las bajas temperaturas se registran aun en verano, han sido las más afectadas por los contagios, debiendo soportar prolongadas cuarentenas, lo que ha sido un tanto menor en el caso de las regiones centrales del país.

Reconociendo la importancia de la estacionalidad climática en la ocurrencia de la enfermedad y sus resultados fatales, se debería suponer que las regiones del norte, en la vecindad del Trópico de Capricornio, deberían haber registrado anticipada y permanentemente las menores tasas de incidencia. Sin embargo, las regiones más septentrionales, si bien registran por lo general temperaturas más elevadas que el centro y sur de Chile, reciben gran cantidad de trabajadores conmutantes que laboran en las faenas mineras, así como elevados números de migrantes internacionales que ingresan al país en forma legal e ilegal, contribuyendo a transmitir los contagios.

Las investigaciones que han examinado las correlaciones espaciales entre la pandemia de COVID-19 y los determinante socioeconómicos han señalado la profunda injusticia que ha

acompañado el surgimiento y difusión de la enfermedad, así como los indicadores de morbilidad y mortalidad que han diferenciado notablemente sus efectos sobre las comunidades más pobres y vulnerables de nuestras ciudades. Sin embargo, no se ha prestado mayor atención a las condiciones ambientales y entre ellas a la climatología urbana, no obstante que los estudios existentes en Chile y el extranjero señalan con claridad no solo la influencia de las variaciones temporales y espaciales de los climas sobre la salud pública, sino que también la estrecha relación que existe entre éstas y las condiciones socio-económicas de los habitantes de la ciudades. Concentrada en aclarar la complejidad de los sistemas naturales, mediante métodos y modelos estadísticos cada vez más sofisticados, la climatología urbana no concedió igual importancia a la modificación del aire de las ciudades, olvidando su carácter de bien común y componente fundamental sobre la salud y bienestar de las sociedades en su totalidad. A lo menos en Chile, el clima se compra y vende a precio de mercado, como todos los bienes y servicios que oferta la ciudad contemporánea, estando incluido en el valor total de las viviendas; por lo tanto, para acceder a un clima y aire de calidad es necesario disponer de suficientes recursos económicos como para instalarse en un barrio caracterizado por temperaturas moderadas, presencia de áreas verdes, adecuada ventilación y bajas concentraciones de contaminantes atmosféricos, de todo lo cual depende a su vez, la salud de las personas y los ecosistemas.

La gentrificación ecológica o mejoramiento de las condiciones climáticas y ambientales de ciertos barrios para atraer hacia ellos a los sectores de mayor poder adquisitivo, ha dejado de lado a los grupos sociales más vulnerables y aumentado las desigualdades climáticas, al punto de que Santiago se divide a lo menos en dos climas urbanos principales que se corresponden con la tradicional división socio-económica de la ciudad, desde la Avenida Vicuña Mackenna hacia el oriente o desde ésta hacia el poniente, así como en innumerables zonas climáticas locales, que corresponden cada una de ellas a la residencia preferente de un determinado grupo social.

Familiarizados con el concepto de que el clima es un fenómeno natural, la pandemia ha desmentido dramáticamente este supuesto y los contagiados y fallecidos se han localizado preferentemente en barrios diferenciados por sus condiciones ambientales, climáticas y socio-económicas. Desde luego que ninguna de estas características explica por sí sola el comportamiento temporo-espacial de la pandemia. Si bien en el caso de Santiago es indudable la influencia de la estacionalidad climática y las condiciones ambientales específicas de las diferentes comunas y barrios sobre la salud pública, la ponderación de su accionar continua

siendo una interrogante. Cuando se esperaba un verano más favorable, el aumento de la movilidad, principalmente en las comunas más populosas, implicó una nueva ola de contagios.

Chile recibió las primeras 10 mil dosis de la vacuna el 24 de diciembre de 2020 y, en febrero de 2021, comenzó la vacunación masiva de su población, esperando alcanzar la inmunidad colectiva (80% de la población vacunada) a fines del mes de junio de 2021. Esta medida, sin embargo, no puede permitir que se olviden las deficiencias estructurales de nuestras ciudades y los elevados niveles de desigualdad que explican sus problemas socioambientales, socioeconómicos y socioclimáticos, que deben ser superados incrementalmente para devolver a la ciudadanía conceptos de bienestar, seguridad y salubridad, que se han demostrado claramente limitados, no solo desde esta pandemia, sino que como componentes consustanciales de las formas de planificar, diseñar, gestionar y habitar el medio ambiente urbano.

Concebida en Chile la vacunación como una tarea colectiva, oportuna, gratuita y justa (brindada a todos por igual sin discriminación de clase social, etnia, género o edad), han renacido las esperanzas de que la equidad socio-ambiental y la justicia climática sean posibles. La climatología urbana debe contribuir a afianzar este objetivo proporcionando las informaciones y conocimientos, que transmitidos eficientemente a la ciudadanía, la doten de herramientas para exigir una ciudad realmente al servicio de las comunidades humanas.

## **Agradecimientos**

El presente trabajo fue realizado con apoyo de la Coordinación de Perfeccionamiento de Personal de Nivel Superior -Brasil (CAPES) - Código de Financiamiento 001.

## **Bibliografía**

- Bilal, U., Alazraqui, M., Caiaffa, W.T., Lopez-Olmedo, N., Martinez-Folgar, K., Miranda, J.J., Rodriguez, D.A., Vives, A. y Diez-Roux, A.V. (2019). Inequalities in life expectancy in six large Latin American cities from the SALURBAL study: an ecological analysis. *The Lancet Planetary Health* 3 (12), pp. e503-e510. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(19\)30235-9](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(19)30235-9)
- Castree, N. (2003). Commodifying what nature. *Progress in Human Geography* 27 (3), pp. 273-297. <https://doi.org/10.1191/0309132503ph428oa>

- Chakraborty, T., Hsu, A., Manya, D. y Sheriff, G. (2019). Disproportionately higher exposure to urban heat in lower-income neighborhoods: a multi-city perspective. *Environmental Research Letters* 14 (10), pp. 10503. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab3b99>
- Congedo, L. (2014). Semi-Automatic Classification Plugin User Manual. *Technical Report*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1219.3524>
- Gutiérrez-Hernández, O. y García, L.V. (2020). ¿Influyen tiempo y clima en la distribución del nuevo coronavirus (SARS CoV-2)? Una revisión desde una perspectiva biogeográfica. *Investigaciones Geográficas* 73, pp. 31-55. <https://doi.org/10.14198/INGEO2020.GHVG>
- Harper, E. (2019). Ecological Gentrification in Response to Apocalyptic Narratives of Climate Change. The Production of an Immune Political Fantasy. *International Journal of Urban and Regional Research* 44 (1), pp. 55-71. <https://doi.org/10.1111/1468-2427.12842>
- Henríquez, C., Romero, H. (2019). *Urban Climates in Latin America*. Springer International Publishing. Berlin: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-97013-4>
- Instituto Nacional de Estadísticas do Chile – INE. (2017). *Resultados Censo 2017*. Recuperado el 22 de febrero de 2020 de <http://resultados.censo2017.cl/>
- Irarrázaval, F. (2012). El imaginario “verde” y el verde urbano como instrumento de consumo inmobiliario: configurando las condiciones ambientales del área metropolitana de Santiago. *Revista INVI* 27 (75), pp. 73-103. <https://doi.org/10.4067/S0718-83582012000200003>
- Johns Hopkins University – JHU. (2021). *Coronavirus COVID-19 Global Cases by Center for Systems Science and Engineering*. Recuperado el 24 de febrero de 2021 de <https://gisanddata.maps.arcgis.com/apps/opsdashboard/index.html#/bda7594740fd40299423467b48e9ecf6>
- Lave, R., Wilson, M.W., Barron, E.S., Biermann, C., Carey, M.A., Duvall, C.S., Johnson, L., Lane, K.M., McClintock, N., Munroe, D., Pain, R., Proctor, J., Rhoads, B.L., Robertson, M.M., Rossi, J., Sayre, N.F., Simon, G., Tadaki, M. y Van Dyke, C. (2014). Intervention: Critical Physical Geography. *The Canadian Geographer* 58 (1), pp. 1-10. <https://doi.org/10.1111/cag.12061>
- Lave, R., Biermann, C. y Lane, S.N. (2018). *The Palgrave Handbook of Critical Physical Geography*. London: Palgrave Macmillan.
- Mena, G., Martínez, P.M., Mahmud, A.S., Marquet, P.A., Buckee, C.O. y Santillana, M. (2021). Socioeconomic status determines COVID-19 incidence and related mortality in Santiago, Chile. *Preprint MedRxivS*. <https://doi.org/10.1101/2021.01.12.21249682>
- Mendes, F.H., Sousa-Camilo, A.S., Lopes, A.M.S., Polizel, J.L., Silva Filho, D.F. y Aravena, H.R. (2019). Comportamiento térmico de diferentes superficies urbanas durante un día cálido de verano. *Revista Geográfica de Valparaíso* 56, pp. 1-8.



- Mendes, F.H., Romero, H. y Silva Filho, D.F. (2020). Cambio Climático adverso provocado por la urbanización sin planificación ni evaluación ambiental en Santiago de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande* 77, pp. 191-210. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022020000300191>
- Ministerio de Salud – Minsal (2021). *Informe Epidemiológico COVID-19*. Recuperado el 24 de febrero de 2021 de <https://www.minsal.cl/nuevo-coronavirus-2019-ncov/informe-epidemiologico-covid-19/>
- Peel, M.C., Finlayson, B.L. y McMahon, T.A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 4 (2), pp. 439-473. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Romero, H. y Mendes, F.H. (2020a). El avance del COVID-19 en Santiago de Chile y su relación con las vulnerabilidades socio-ambientales urbanas. *Espiral, revista de geografías y ciencias sociales* 2 (4), pp. 69-78. <https://doi.org/10.15381/espinal.v2i4.19534>
- Romero, H. y Mendes, F.H. (2020b). Comodificação dos climas urbanos e criação de injustiças socioclimáticas em Santiago do Chile. *Entre-Lugar* 11 (22), pp. 40-56. <https://doi.org/10.30612/el.v11i22.12868>
- Sajadi, M.M., Habibzadeh, P., Vintzileos, A., Shokouhi, S., Miralles-Wilhelm, F. y Amoroso, A. (2020). Temperature and latitude analysis to predict potential spread and seasonality for COVID-19. *SSRN*. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3550308>
- Secretaría Regional Ministerial de Desarrollo Social y Familia (2019). *Índice de Prioridad Social de Comunas 2019. Seremi de Desarrollo Social y Familia Metropolitana*. Recuperado el 09 de abril de 2021 de [http://www.desarrollosocialyfamilia.gob.cl/storage/docs/INDICE.\\_DE\\_PRIORIDAD\\_SOCIAL\\_2019.pdf](http://www.desarrollosocialyfamilia.gob.cl/storage/docs/INDICE._DE_PRIORIDAD_SOCIAL_2019.pdf)
- Smith, P. y Romero, H. (2016). Factores explicativos de la distribución espacial de la temperatura del aire de verano en Santiago de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande* 63, pp. 45-62. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022016000100004>
- Souza, J.D. y Silva, B.B. (2005). Correção atmosférica para temperatura da superfície obtida com imagem TM - Landsat 5. *Revista Brasileira de Geofísica* 23 (4), pp. 349-358. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2005000400002>
- Shokry, G., Connolly, J.JT. y Anguelovski, I. (2020). Understanding climate gentrification and shifting landscapes of protection and vulnerability in green resilient Philadelphia. *Urban Climate* 31, pp. 1000539. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100539>
- Sun, R., Lü, Y., Yang, X. y Cheng, L. (2019). Understanding the variability of urban heat islands from local background climate and urbanization. *Journal of Cleaner Production* 208, pp. 743-752. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.178>
- Swyngedouw, E. 2018. Politizando las ecologías políticas urbanas. *Investigaciones Geográficas* 56, pp. 163-167. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2018.51996>

- Tang, J., Di, L., Xiao, J., Lu, D. y Zhou, Y. (2017). Impacts of land use and socioeconomic patterns on urban heat Island. *International Journal of Remote Sensing* 38 (11), pp. 3445-3465. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1295485>
- Thornes, J.E. y Randalls, S. (2007). Commodifying the atmosphere ‘pennies from heaven’? *Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography* 89 (4), pp. 273-285. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0459.2007.00326.x>
- Vergara-Perucich, F., Correa-Parra, J. y Aguirre-Nuñez, C. (2020). The Spatial Correlation between the Spread of COVID-19 and Vulnerable Urban Areas in Santiago de Chile. *Critical Housing Analysis* 7 (2), pp. 21-35. <https://doi.org/10.13060/23362839.2020.7.2.512>
- Worldometer. (2021). *Countries in the world by population* (2021). Recuperado el 24 de febrero de 2021 de <https://www.worldometers.info/world-population/population-by-country/>



## 7. VALORAÇÃO MONETÁRIA DA ARBORIZAÇÃO URBANA BASEADA NA MAGNITUDE DA COPA EM PIRACICABA/SP/BRASIL

### Resumo

A arborização urbana proporciona importantes serviços ecossistêmicos, porém, cada vez mais ela compete pelo espaço com grandes superfícies cinzentas, o que a pode tornar um elemento secundário no planejamento das cidades. A valoração monetária das árvores urbanas aparece, então, como mais uma alternativa capaz de mostrar a relevância desses seres vivos. Existem diversos métodos que realizam este cálculo, entretanto, são complexos e não estão ao alcance da população, que almeja melhores condições climáticas. O objetivo desta pesquisa foi desenvolver um método simplificado de valoração baseado na relação entre a área da copa, o Índice de Área Foliar (IAF) e um parâmetro médio R\$/m<sup>2</sup> de copa encontrado na literatura, ou seja, na magnitude da copa, uma vez que a maior parte dos serviços ecossistêmicos provém dela. O IAF pode ser estimado por meio de lentes olho de peixe a um preço razoável (menos que R\$ 25,00), enquanto que a área de copa medida *in loco* (ou calibrada no passo). O presente estudo foi realizado em Piracicaba/SP/Brasil, na qual as 60.146 árvores urbanas podem retornar aproximadamente R\$ 41 milhões (USD 8,2 milhões) por ano em serviços ecossistêmicos. Investigações como esta, as chamadas Soluções baseadas na Natureza (SbN), poderão auxiliar no planejamento, gestão e formulação de políticas públicas, e até como pagamento por serviços ambientais (descontos em IPTU) aos moradores que possuam árvores em frente à sua casa.

**Palavras-chave:** Índice de Área Foliar; resiliência urbana; serviços ecossistêmicos; infraestrutura verde; Soluções baseadas na Natureza.

### Abstract

Urban forestry provides important ecosystem services, however, it increasingly competes for space with large gray surfaces, which can make it a secondary element in the city planning. The monetary valuation of urban trees appears, then, as one more alternative capable of showing the relevance of these living beings. There are several methods that perform this calculation, however, they are complex and are not within reach of the population, which aims for better weather conditions. The objective of this research was to develop a simplified method of valuation based on the relationship between the area of the crown, the Leaf Area Index (LAI) and an average parameter BRL/m<sup>2</sup> of crown found in the literature, that is, on the magnitude of the crown, since most ecosystem services come from it. The LAI can be estimated using fisheye lenses at a reasonable price (less than BRL 25.00), while the canopy area can be measured *in loco* (or ground truth calibration). The present study was carried out in Piracicaba/SP/Brazil, in which the 60,146 urban trees can return approximately BRL 41 million (USD 8.2 million) per year in ecosystem services. Investigations like this, the so-called Nature-based Solutions (NbS), may assist in urban planning, management and formulation of public policies, and even as payment for environmental services (Urban Property and Land Tax discounts) to residents who have trees in front of their house.

**Keywords:** Leaf Area Index; urban resilience; ecosystem services; green infrastructure; Nature-based Solutions.

## Resumen

El arbolado urbano proporciona importantes servicios ecosistémicos, sin embargo, compite cada vez más por el espacio con grandes superficies grises, lo que puede convertirlo en un elemento secundario en la planificación urbana. La valoración monetaria de los árboles urbanos aparece, entonces, como otra alternativa capaz de mostrar la relevancia de estos seres vivos. Existen varios métodos que realizan este cálculo, pero son complejos y no están al alcance de la población, que busca mejores condiciones climáticas. El objetivo de esta investigación fue desarrollar un método de valoración simplificado basado en la relación entre el área de copa, el Índice de Área Foliar (IAF) y un parámetro promedio de BRL/m<sup>2</sup> de copa encontrado en la literatura, o sea, en la magnitud de la copa, ya que la mayoría de los servicios ecosistémicos provienen de ella. El IAF se puede estimar usando lentes de ojo de pez a un precio razonable (menos de BRL 25,00), mientras que el área del dosel se mide *in loco* (o calibrado en paso). El presente estudio se realizó en Piracicaba/SP/Brasil, en el que los 60.146 árboles urbanos pueden devolver aproximadamente BRL 41 millones (USD 8,2 millones) por año en servicios ecosistémicos. Estimaciones como esta, llamadas Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN), pueden ayudar en la planificación, gestión y formulación de políticas públicas, e incluso como pago por servicios ambientales (descuentos en el Impuesto Predial e Territorial Urbano) a los residentes que tienen árboles frente a su casa.

**Palabras clave:** Índice de Área Foliar; resiliencia urbana; servicios ecosistémicos; infraestructura verde; Soluciones basadas en la Naturaleza.

### 7.1. Introdução

Os serviços ecossistêmicos (também conhecidos como serviços ambientais) correspondem aos benefícios da natureza obtidos pela sociedade, de modo direto ou indireto, visando a sustentabilidade da vida no planeta e o combate às Mudanças Climáticas. Floresta Urbana, Serviços Ecossistêmicos (desde 2006), Infraestrutura Verde (desde 2007) e Soluções baseadas na Natureza (desde 2015) são alguns dos termos utilizados nas pesquisas científicas sobre esta temática. Embora utilizados muitas vezes como sinônimos, são conceitos distintos, que derivam da Floresta Urbana.

A Infraestrutura Verde remete ao padrão espacial e conectividade da vegetação urbana com o ambiente natural, os Serviços Ecossistêmicos diz respeito às funções naturais em que se beneficiam natureza e humanos, e as Soluções baseadas na Natureza, por sua vez, às aplicações para resolver problemas ambientais urbanos e desafios sociais, políticos e ecológicos (ESCOBEDO et al., 2019). Serviços ecossistêmicos e Soluções baseadas na Natureza, inclusive, são os termos utilizados no relatórios mais recentes da World Wildlife Fund (WWF, 2020).

A vegetação urbana é responsável pela regulação dos ciclos climáticos, hidrológicos e da biodiversidade nas cidades, além de oferecer tranquilidade, espaços públicos e locais de lazer

que elevam os padrões de vida, aumentam o conforto e contribuem para a coesão social dos habitantes. A existência de bairros vulneráveis e sem vegetação suficiente pode ser um sinal de injustiça ambiental em muitas cidades latino-americanas (MENDES; ROMERO; SILVA FILHO, 2020; ROMERO; MENDES, 2021).

É desejável que as áreas verdes no interior das cidades e seus serviços ecossistêmicos sejam distribuídos de forma que favoreçam também os setores mais vulneráveis, e não como ocorrem atualmente, concentrando-se em áreas ricas, na qual bens e serviços são “comodificados” pelo poder público, visando a especulação imobiliária (ROMERO; MENDES, 2020).

No ambiente urbano, por exemplo, a cidade de Vancouver, no Canadá, conseguiu se tornar a mais sustentável do mundo, com expressivos investimentos em áreas verdes e arborização urbana, por meio de uma política pública adotada em julho de 2011, denominada *Greenest City 2020 Action Plan* (GCAP), a qual aproximou a acessibilidade de quase todos os seus habitantes à alguma área verde em menos de 10 minutos a pé, sendo o grande destaque o Stanley Park, o maior parque urbano do país, com aproximadamente 400 ha de tamanho, superando em mais de seis vezes o Central Park dos EUA (CITY OF VANCOUVER, 2012; AFFOLDERBACH; SCHULZ, 2017).

No Brasil, um dos maiores exemplos nessa questão é a cidade de Maringá, no estado do Paraná, a qual possui entre duas a três árvores urbanas por habitante (MENDES, 2021), mais do que o dobro sugerido pela Sociedade Brasileira da Arborização Urbana (SBAU, 1996), de no mínimo uma árvore para cada cinco habitantes, ou seja, o equivalente a 15 m<sup>2</sup> de cobertura arbórea por habitante. Aqui cabe uma ressalva: há artigos científicos que utilizam a Organização das Nações Unidas (ONU) como referência, preconizando 12 m<sup>2</sup>/hab., porém, nenhum deles aponta onde encontrar esse valor, convergindo a uma bola de neve (citações e *apuds* equivocados), o que torna essa referência obscura, conforme discutido por Macedo (1995).

Em termos qualiquantitativos, Mendes (2021) criou quatro faixas para auxiliar as prefeituras quanto aos primeiros passos na gestão da arborização urbana, sendo elas Muito Crítico, Crítico, Parcialmente Satisfatório e Muito Satisfatório, a depender da quantidade de árvores a cada 1000 habitantes. Em complementação, Oliveira e Gandara (2021) romperam o paradigma da correlação linear entre vegetação e renda, encontrando uma relação semelhante a uma parábola com concavidade para cima, ou seja, as classes baixa e alta são as que apresentam maior permeabilidade do solo em suas propriedades, ao passo que a classe média costuma cimentar a maior parte de suas áreas, mas há uma diferença marcante entre as classes baixa e

alta: na primeira há o predomínio de plantas medicinais, alimentícias e árvores frutíferas, enquanto que a segunda a função principal é ornamental e paisagística.

Tendo em vista a necessidade de aproximar a teoria da prática, isto é, a quantificação dos benefícios ecossistêmicos, na década de 1960 começaram a surgir os primeiros modelos matemáticos para valoração da arborização urbana (SILVA FILHO; TOSETTI, 2010). Os diversos modelos existentes levam em consideração vários fatores, tais como características dendrométricas (altura, diâmetro à altura do peito - DAP, área da copa, área foliar), diversidade de espécies (abundância, frequência), condição fitossanitária (ruim, regular, boa), condições ambientais (remoção da poluição do ar, sequestro de carbono, efeitos de energia de construção) e valores de propriedade (cultural, histórico, sentimental), sendo os métodos mais comuns os de valoração hedônica (baseiam-se na valorização do imóvel), contingente (baseiam-se na disposição em pagamentos e recebimentos) e fórmula (baseiam-se nos custos de implantação e manutenção) (VIANA et al., 2012).

Em 2006, foi desenvolvido pelo *USDA Forest Service* o *i-Tree*, um pacote (*suite*) gratuito de ferramentas para análise e gestão da arborização urbana e rural, baseado no modelo Urban Forest Effects (UFORE), quantificando os serviços ecossistêmicos proporcionados pelas árvores, sendo os pacotes *i-Tree Streets* e *i-Tree ECO* os mais recomendados, respectivamente, para a arborização viária e a floresta urbana (I-TREE, 2020), cujos cálculos podem ser verificados em Nowak et al. (2008). Os próprios autores apresentam como vantagens as medições *in loco* e a revisão dos dados por pares, o que traz maior fidelidade aos resultados da simulação, mas também discutem que as dificuldades na obtenção das variáveis em campo e o valor estrutural (diferentes custos municipais no manejo e estimativa do custo da terra) podem representar uma limitação, a qual tenta ser ajustada pelo algoritmo do modelo.

Utilizando esta metodologia do *i-Tree*, em Hutto/Texas (EUA), cidade situada a 200 m acima do nível do mar, clima Cfa (quente e temperado), segundo a classificação proposta por Köppen-Geiger, com quase 1000 mm de pluviosidade anual, Hilde e Paterson (2014) verificaram que os principais benefícios ecossistêmicos foram o aumento no valor da propriedade / estética (47%), a interceptação da água da chuva (34%) e a economia de energia elétrica (14%), totalizando USD 635 mil (BRL 3,2 milhões) / ano com um inventário amostral de 5% das árvores de arruamento. Considerando a estimativa de 129.300 árvores, resulta num benefício líquido (descontando os custos de manutenção) anual aproximado de USD 100 (BRL 500) por árvore.

Na mesma linha, Wang et al. (2018), em Dalian (China), cidade ao nível do mar, de clima Cwa (subtropical, com 650 mm de pluviosidade anual), encontraram economia de energia

e aumento no valor da propriedade como os principais serviços, numa relação custo-benefício de 1:3,2, gerando um benefício líquido anual estimado em USD 59 (BRL 295) por árvore, os quais variaram entre USD 44 (BRL 220) (árvore de pequeno porte) e USD 140 (BRL 700) (grande porte), parecido com os valores discutidos por McPherson, van Doorn e Goede (2016) para o estado da Califórnia (EUA), com um retorno de 1:5,8, ou seja, aproximadamente USD 92 (BRL 460) por árvore.

Em Londres (UK), os serviços ecossistêmicos de cada árvore foram estimados em GBP 16 (BRL 112) por ano (ROGERS et al., 2015), ao passo que, em Lisboa (Portugal), USD 159 (BRL 795) por árvore por ano (SOARES et al., 2011) e, no Brasil, R\$ 580,00 por árvore por ano (MENDES; OLIVEIRA, 2019). Considerando um período de 40 anos, McPherson et al. (2010) encontraram diferentes benefícios líquidos anuais, a depender do porte da árvore: entre USD 29 e 41 (BRL 145 a 205) para pequeno porte, USD 42 a 60 (BRL 210 a 300) para médio porte, USD 101 a 122 (BRL 505 a 610) para grande porte, e USD 142 a 146 (BRL 710 a 730) para coníferas, o que gera um valor médio de USD 85 (BRL 425) por árvore por ano. Neste artigo, essas sete referências científicas foram utilizadas para estimar o valor econômico por m<sup>2</sup> de copa.

No entanto, apesar do *i-Tree* ser utilizado frequentemente em pesquisas em diversos locais do mundo (MCPHERSON et al., 2010; SOARES et al., 2011; HILDE; PATERSON, 2014; ROGERS et al., 2015; MCPHERSON; VAN DOORN; GOEDE, 2016; WANG et al., 2018), ele foi calibrado inicialmente para árvores de clima temperado, como EUA e Europa, necessitando, assim, de novos *inputs* para árvores tropicais, representando, dessa forma, uma lacuna a ser explorada.

Considerando que a protagonista desta narrativa dos serviços ecossistêmicos é a própria sociedade, a qual não dispõe de recursos avançados para uma simulação computacional na ótima ferramenta que é o *i-Tree*, o objetivo desta pesquisa foi desenvolver um modelo simplificado de valoração monetária baseado na magnitude da copa, a fim de possibilitar as pessoas leigas a estimarem o valor das árvores que as cercam, percebendo a importância da arborização urbana na criação de cidades mais resilientes, e, ademais, auxiliar os gestores ambientais na elaboração de políticas públicas, para que os critérios de remoção, plantio e incentivo não sejam subjetivos. Por fim, aplicou-se o método em um estudo de caso numa cidade de clima tropical.



## 7.2. Material e Métodos

A pesquisa foi realizada em Piracicaba/SP/Brasil, cidade a qual se encontra a Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo (ESALQ/USP). Situa-se nas coordenadas geográficas 22° 42’ S e 47° 38’ W, na transição dos biomas Mata Atlântica e Cerrado (nas cotas mais elevadas), composta predominantemente pela floresta estacional semidecidual no domínio da Depressão Periférica Paulista, com árvores perenifólias e decíduas (RODRIGUES, 1999), cujo clima, segundo a classificação de Köppen-Geiger, é Cfa com transição para o Cwa, definido como subtropical, com invernos frios e secos, e verões quentes e chuvosos, temperatura média anual de 22°C, 546 m de altitude em relação ao nível do mar e precipitação média de 1300 mm por ano (ENGENHARIA DE BIODIVERSIDADE, 2021).

Mendes (2021) propôs um método que estima a quantidade de árvores urbanas baseado na população do município. Em outras palavras, uma árvore a cada seis habitantes, em média. Piracicaba, com população estimada em 364.571 habitantes (Censo 2010), possui 60.146 árvores no sistema viário (ROLLO, 2014), sendo que as sete mais abundantes correspondem a aproximadamente metade da arborização urbana. São elas, em ordem decrescente: *Murraya paniculata* (L.) Jack (falsa-murta), *Licania tomentosa* (Benth.) Fritsch (oiti), *Cenostigma pluviosum* (DC.) L.P. Queiroz (sibipiruna), *Lagerstroemia indica* L. (resedá), *Schinus molle* L. (falso-chorão ou aroeira-salsa), *Magnolia champaca* (L.) Baill. ex Pierre (magnólia) e *Handroanthus chrysotrichus* (Mart. ex DC.) Mattos (ipê-amarelo).

Encomendado pela Prefeitura Municipal de Piracicaba (2020) a um valor estimado de R\$ 196.286,67 (Edital: 0085/2019, N° Processo: 57.817/2019, com valor fechado em R\$ 66.500,00), foi realizado um estudo atualizado, o qual estimou 96.448 árvores no sistema viário (530.094 no perímetro urbano); todavia, como não foram identificadas as espécies, esta pesquisa adotará os dados do inventário amostral de Rollo (2014), a qual amostrou 9,6% dos quarteirões existentes no município.

O método de valoração aqui proposto baseou-se majoritariamente na magnitude da copa, uma vez que a maior parte dos serviços ecossistêmicos na área urbana são provenientes dela (SILVA; PIMENTEL, 2019). Fez-se uma interação de três variáveis: (i) área da copa, em m<sup>2</sup>; (ii) índice de área foliar (IAF, ou Leaf Area Index – LAI, em inglês), número adimensional e (iii) parâmetro R\$/m<sup>2</sup> de copa. Para a obtenção de cada variável, tem-se:

- (i) Estimada utilizando uma trena ou a calibração dos passos, calculado pela fórmula matemática:  $A = \pi \cdot r^2$ , onde A = área,  $\pi = 3,1416$  e r = raio; se a copa da

árvore for ovalada, basta aplicar a fórmula da elipse:  $A = \pi.R.r$ , onde R = raio maior e r = raio menor;

- (ii) Correspondente à razão entre a área foliar do dossel e sua respectiva projeção sobre o solo (WATSON, 1947). Conceitualmente, difere-se entre LAI efetivo e LAI verdadeiro, sendo que o efetivo pode ser aproximadamente 50% menor que o verdadeiro. Isso ocorre devido à aglutinação das folhas, ou seja, a distribuição espacial das folhas na copa acontece de modo aleatório. Cada um tem a sua aplicação: enquanto o LAI verdadeiro representa melhor as atividades fotossintéticas, como taxa de fotossíntese e evapotranspiração, o LAI efetivo é mais voltado às análises de interceptação da radiação e regime radiativo dentro e abaixo da copa (SHINZATO et al., 2015). Neste modelo, portanto, adotou-se o valor do LAI verdadeiro, multiplicando o valor estimado do LAI efetivo por 1,5. Foi considerado o conceito do *Gap Fraction* (arranjo geométrico das aberturas das folhas na copa – ou porcentagem de céu aberto) como método não destrutivo indireto para estimativa do LAI efetivo, evitando-se imagens com muitos troncos e galhos para não sobrestimar os valores (NORMAN; CAMPBELL, 1989), por meio de fotografias hemisféricas tiradas com lentes do tipo olho de peixe (*fisheye*) acopladas a um smartphone (no caso, Motorola 2ª Geração – Android 6.0) e posterior processamento com o programa gratuito *Gap Light Analyzer* (GLA) versão 2.0 (FRAZER et al., 1999). O processamento GLA (Figura 7.1) consiste em, basicamente, cinco etapas, respectivamente: primeiro, carregar a imagem .bmp ou .jpg; segundo, registrar a imagem com a área circular de interesse; terceiro, ajustar as configurações (ou adotar padrão); quarto, classificação da imagem por meio da função *Threshold...*, convertendo os pixels em um arquivo binário (preto e branco), onde o preto indica copa e o branco indica céu aberto; quinto, calcular os resultados da estrutura do dossel, tais como abertura de copa (em porcentagem) e LAI efetivo. Destaca-se que as lentes *fisheye* podem ser obtidas a um preço relativamente acessível, ao valor de R\$ 25,00. Tomou-se como base o inventário de Rollo (2014) para valoração do patrimônio arbóreo de Piracicaba;
- (iii) O parâmetro R\$/m<sup>2</sup> de copa foi estimado a partir de uma revisão bibliográfica com trabalhos sobre a temática. Este ponto pode representar uma limitação desta pesquisa, uma vez que o comportamento fisiológico das árvores mudam conforme cada localidade, sobretudo em clima tropical. Além disso, o uso de

diferentes moedas fiduciárias com câmbio flutuante ao longo do tempo dificultam a padronização deste parâmetro.

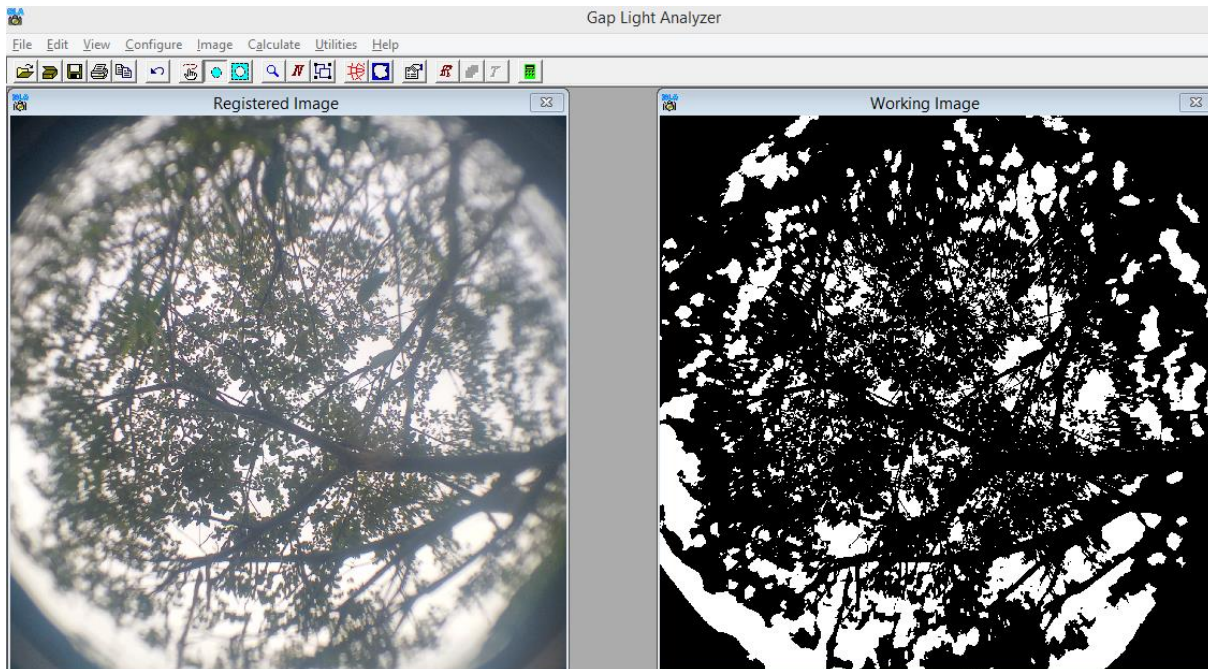


Figura 7.1. Processamento GLA para análise da estrutura da copa (no exemplo, ipê amarelo), adotando no *Threshold...* o valor do pixel igual a 192 como limiar de separação do preto/branco, valor este que representou adequadamente a foto hemisférica. Fonte: os autores

Assim, a fórmula de valoração proposta foi (Equação 7.1):

$$V = C.L.P \quad (7.1)$$

onde V = valor monetário, C = área da copa, L = *Leaf Area Index* e P = parâmetro

As medições de campo foram feitas em fevereiro de 2020, das 18h00 às 19h00, hora em que a radiação difusa é mais intensa, ou seja, uma lacuna um pouco menor que uma hora antes do pôr do sol, com preferência por dias nublados, evitando que a radiação direta interferisse nas estimativas. Foram avaliadas as sete espécies de maior representatividade na cidade, com cinco repetições para cada espécie, sendo todas em calçadas, coletando os diâmetros de copa, área foliar (das folhas, folíolos ou foliólulos) e as fotos hemisféricas.

Para fins estatísticos de cada espécie adotou-se a variável mediana ao invés da média, para evitar que algum exemplar *outlier* viesasse as estimativas. Houve duas dificuldades para a execução deste campo: (i) o trânsito neste horário, que exige constante atenção para evitar acidentes e (ii) interferências dos exemplares com mobiliários urbanos e outras árvores

vizinhas, o que poderia enviesar os resultados, sendo necessário encontrar outros indivíduos para a amostragem. O período correspondeu ao verão no hemisfério sul, época em que as árvores estavam com elevado vigor fotossintético em virtude da abundância de chuvas.

A Figura 7.2 mostra estimativas dos LAIs em todo o mundo, sendo os maiores valores próximos a 7, correspondente às florestas tropicais. O Brasil, de um modo geral, fica com média de 3,72, embora seu território, se detalhado a nível de estado, varie entre 0,56 na caatinga em Sergipe (mais baixo) até 4,97 na Amazônia em Amazonas (mais alto).

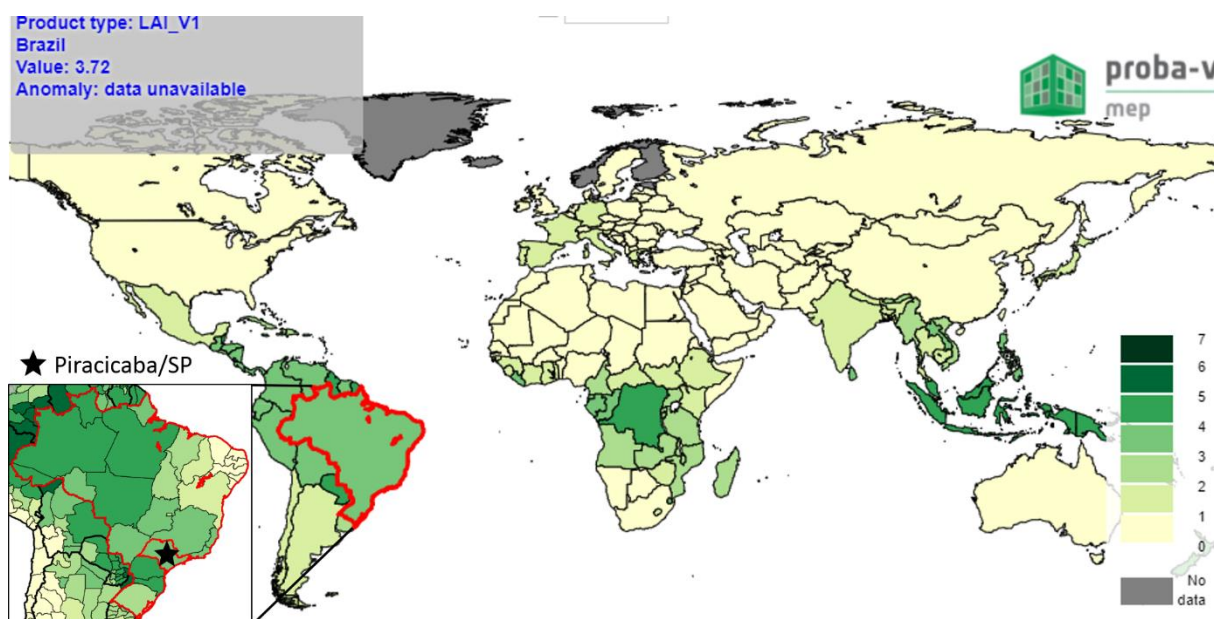


Figura 7.2. Estimativas do LAI para os países do mundo, com destaque para Piracicaba/SP (3,61). Fonte: Copernius Global Land Service, hospedado por VITO (2021)

Todos os nomes científicos foram extraídos do site oficial Flora do Brasil 2020, e o câmbio baseado no Banco Central do Brasil (2021), considerando a cotação em junho de 2021, ou seja, USD 1 equivalente a BRL 5, EUR 1 equivalente a BRL 6, e GBP 1 equivalente a BRL 7.

### 7.3. Resultados e Discussão

A Figura 7.3 mostra a comparação das sete espécies estudadas com suas respectivas estruturas de copa, sendo estas captadas com a lente tipo olho de peixe.



Figura 7.3. Respectivamente, falsa-murta, oiti, sibipiruna, resedá, falso-chorão, magnólia e ipê-amarelo. Fonte: os autores

O conhecimento do tamanho e a estrutura da copa é necessário na proposição desta metodologia de valoração monetária da árvore. Dessa forma, encontraram-se altos valores de Correlação de Pearson: (i) positiva entre o LAI verdadeiro e a Área foliar ( $R^2 = 0,7814$ ), ou seja, quanto maior o tamanho da folha, maior o valor do LAI e, conseqüentemente, maiores serão os serviços ecossistêmicos; (ii) negativa entre o LAI e a Abertura da copa, isto é, quanto mais aberta a copa (maior visualização do céu aberto sob a copa), menor o valor do LAI ( $R^2 = 0,9284$ ) (Figura 7.4), alinhado com o que foi encontrado por Silva e Pimentel (2019).

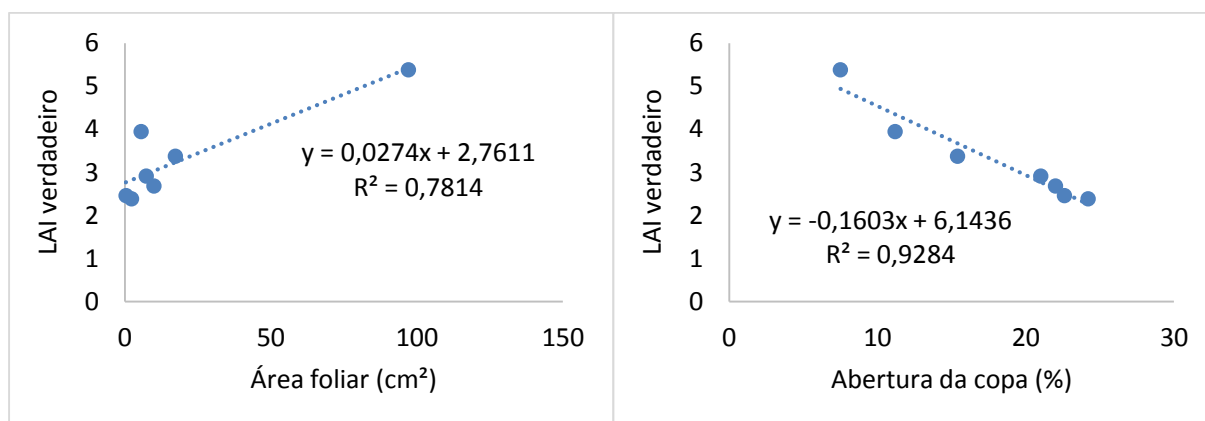


Figura 7.4. Correlação de Pearson entre o LAI verdadeiro e a Área foliar, e o LAI verdadeiro e a Abertura de copa. Fonte: os autores

A revisão bibliográfica com sete pesquisas recentes desde 2010 sobre o tema, em diferentes locais do mundo, apontou média e mediana com valores próximos, ou seja, saldo

líquido anual de R\$ 6,1/m<sup>2</sup> de copa (mediana) e R\$ 6,0/m<sup>2</sup> de copa (média), o equivalente a USD 1.2 (considerando a cotação de junho de 2021), considerando uma árvore típica com 5 m de raio (logo, 10 m de diâmetro e 75 m<sup>2</sup> de área projetada) (Tabela 7.1).

Tabela 7.1. Pesquisas sobre valoração monetária de árvores e sua conversão para encontrar o parâmetro “P” (R\$/m<sup>2</sup> de copa).

Fonte	Ano	Título	Saldo líquido/ árv/ano	Conversão BRL	“P” R\$/m <sup>2</sup>
McPherson et al.	2010	Northern California coast community tree guide: benefits, costs, and strategic planting	USD 85	BRL 425	5,7
Soares et al.	2011	Benefits and costs of street trees in Lisbon, Portugal	USD 159	BRL 795	10,6
Hilde e Paterson	2014	Integrating ecosystem services analysis into scenario planning practice: Accounting for street tree benefits with i-Tree valuation in Central Texas	USD 100	BRL 500	6,7
Rogers et al.	2015	Valuing London’s Urban Forest: Results of the London i-Tree Eco Project	GBP 16	BRL 112	1,5
McPherson, van Doorn e Goede	2016	Structure, function and value of street trees in California, USA	USD 92	BRL 460	6,1
Wang et al.	2018	Street trees in a Chinese forest city: Structure, benefits and costs	USD 59	BRL 295	3,9
Mendes e Oliveira	2019	Percepção da arborização urbana por estudantes de marketing	BRL 580	BRL 580	7,4

Fonte: os autores

Dessa forma, uma vez obtido o parâmetro “P”, o estudo de caso referente à arborização urbana de Piracicaba apontou a sibipiruna madura como uma das espécies mais importantes na cidade. Isso se deve ao relevante tamanho da copa, que pode ultrapassar 10 m de diâmetro. Originária da Mata Atlântica, semidecídua, com floração na primavera, entre fim de agosto e meados de novembro, pode chegar a 16 m de altura, sendo uma das principais espécies utilizadas na arborização urbana do centro-sul do Brasil (LORENZI, 1992).

Em tupi, “sibipiruna” significa “casca preta”, justificando seu tronco escamoso. De modo geral, está nas ruas piracicabanas há pelo menos 50 ou 60 anos, cujo plantio foi realizado predominantemente nas décadas de 1950 e 1960, devido à Lei do habite-se de 1942, uma lei municipal que exigia que cada morador plantasse uma árvore em sua calçada para direito ao certificado de residência. Como Piracicaba não tinha viveiro municipal nesta época, as mudas vieram da cidade vizinha, Rio Claro/SP, que dispunha de grandes quantidades dessa espécie.

O oiti, por sua vez, foi outra espécie de destaque, com mais de R\$ 1.000,00 por ano de benefícios, com características de ocorrência e altura semelhantes à sibipiruna, porém, perenifólia, sendo uma das espécies mais abundantes no oeste do estado de São Paulo (MENDES, 2021). A mediana da valoração monetária de cada árvore foi de um benefício

estimado em R\$ 415,00 / ano, valor este muito próximo do praticado no mercado de comércio de árvores, que é de R\$ 4.000,00 por árvore com cerca de 10 anos de idade (FÁBRICA DE ÁRVORES, 2021). A valoração de praticamente metade da arborização urbana de Piracicaba, correspondente à somatória das sete espécies analisadas, contabilizou R\$ 20.449.687,00. Baseado neste valor, pode-se inferir que a cidade tem um patrimônio arbóreo anual estimado em R\$ 40.899.373,00, equivalente a USD 8.179.875,00 milhões (Tabela 7.2).

Tabela 7.2. Valoração monetária do patrimônio arbóreo de Piracicaba/SP, sendo Ø copa = diâmetro de copa, C = área da copa, AF = área foliar, LAI efet. = LAI efetivo, e LAI verd. = LAI verdadeiro, com as respectivas valoração individual e valoração total.

Espécie	Ø copa (m)	C (m <sup>2</sup> )	AF (cm <sup>2</sup> )	LAI efet.	LAI verd.	Abertura copa (%)	Quantidade	Parâmetro P (R\$/m <sup>2</sup> )	Valoração individual	Valoração total
Falsa-murta	4	13	5,5	2,63	3,9	11,2	9.780	6,1	R\$ 304	R\$ 2.973.588
Oiti	9	64	17,2	2,25	3,4	15,4	6.231	6,1	R\$ 1.317	R\$ 8.205.627
Sibipiruna	11	95	0,3	1,64	2,5	22,6	3.873	6,1	R\$ 1.434	R\$ 5.553.919
Resedá	5	20	7,2	1,94	2,9	21	3.861	6,1	R\$ 350	R\$ 1.353.198
Falso-chorão	6	28	2,2	1,59	2,4	24,2	1.883	6,1	R\$ 414	R\$ 778.625
Magnólia	4	13	97,0	3,59	5,4	7,5	1.834	6,1	R\$ 415	R\$ 761.375
Ipê-amarelo	6	28	9,9	1,79	2,7	22	1.768	6,1	R\$ 466	R\$ 823.355

Fonte: os autores

Neste estudo de caso, em específico, uma árvore urbana chama a atenção: a sapucaia (*Lecythis pisonis* Cambess.). Também conhecida como Sapucaia da Moraes (em virtude da Rua Moraes Barros, local em que se encontra) ou Sapucaia do XV (devido à localização próxima ao Estádio Municipal do Esporte Clube XV de Novembro de Piracicaba), foi plantada em 1918 pela família Caprânico para celebrar o fim da Primeira Guerra Mundial, tornando-se uma árvore símbolo da cidade, tombada pelo Patrimônio Histórico e Cultural. Possui 12 m de altura, 4,80 m de CAP (Circunferência à Altura do Peito), 450 m<sup>2</sup> de copa, e LAI verdadeiro estimado em 3,0. Aplicando-se a metodologia proposta, tem-se:  $V = C.L.P \rightarrow V = 450 \times 3,0 \times 6,1 \rightarrow R\$ 8.158,00$  em serviços ecossistêmicos ao ano. Além disso, tem toda a questão do valor histórico, o qual pode ser difícil de estimar por causa da subjetividade, o que poderia agregar um valor ainda maior (Figura 7.5).



Figura 7.5. Exemplar centenário da majestosa sapucaia em área urbana. Fonte: os autores

A discussão de um outro ponto é essencial: a existência de espécies invasoras, seja no ambiente rural ou urbano, como a leucena (*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit), originária na América Tropical, de rápido crescimento, a qual foi trazida ao Brasil para servir de alimento na pecuária. Embora possa trazer algum serviço ecossistêmico imediato, seu valor (assim como qualquer outra espécie invasora) deve ser zero, visto que a potencialidade de danos futuros supera os benefícios. Ocupando praticamente toda a margem dos rios, ela possui um efeito chamado alelopatia, responsável por liberar compostos químicos no solo, evitando que outra planta se desenvolva e, portanto, deve ser erradicada (PREFEITURA MUNICIPAL DE PIRACICABA, 2020).

Não necessariamente o simples fato de uma espécie ser exótica deve zerar a sua valoração, conforme foi mostrado nos estudos apresentados na Tabela 7.1, onde todos consideraram ambas (nativa e exótica) para a valoração. Em Santiago do Chile, por exemplo, cidade de clima tipo mediterrâneo (Csb), 86% da arborização urbana é exótica (HERNÁNDEZ; VILLASEÑOR, 2018).

No caso da leucena, suas sementes são danosas à construção civil, uma vez que caem nos rios, misturam-se com a areia e, conseqüentemente, prejudicam a qualidade de contrapisos e rebocos, podendo emergir das camadas superficiais (de até 1 cm) quando aquecida pela junção do impermeabilizante com a água da chuva, ocasionando trincas (Figura 7.6).



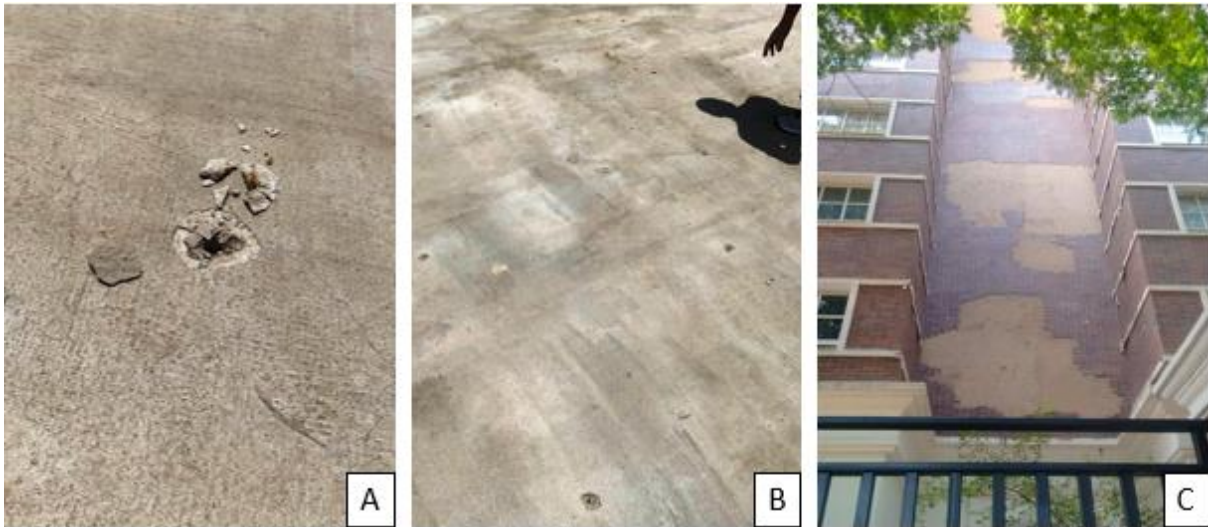


Figura 7.6. Danos causados pela leucena no contrapiso (A e B) e no reboco (C), espécie considerada invasora, que tem comportamento agressivo. Fonte: Arquivo pessoal de Sílvia Bonato (A e B) e Flávio Mendes (C) (2021)

Desde 1970 a Pegada Ecológica da Terra ultrapassou a marca da sustentabilidade, precisando, atualmente, de 1,56 planeta Terra para suprir as necessidades humanas; se continuar neste ritmo, em meados de 2030 é possível que o sistema natural entre em colapso, quando a demanda pelos recursos será o dobro do que a Terra poderá oferecer (WWF, 2020).

Neste contexto, a arborização urbana aparece como um dos fatores capazes de mitigar esse efeito. Contudo, as dificuldades para o plantio de novas árvores nas cidades são diversas, desde financeiras até a rejeição do morador, sob a justificativa de sujeiras das folhas, entupimento de calhas, conflitos com fiação elétrica e queda de árvores e galhos (MENDES; OLIVEIRA, 2019), os quais podem ser minimizados quando realizado um acompanhamento frequente das condições fitossanitárias, sobretudo das que apresentam elevado risco de queda, apesar das árvores com riscos intermediário e baixo serem difíceis de prever a queda (KOESER et al., 2020). Essa conjuntura resume bem o acrônimo norte-americano NIMBY (“*not-in-my-backyard*”), na qual as pessoas desejam ambientes sustentáveis, floresta urbana, serviços ecossistêmicos, infraestrutura verde etc., contanto que não comprometam os objetivos pessoais, ou seja, a aceitação das árvores parece ser quase que unânime, desde que não seja em frente à minha casa.

Uma alternativa para suprir esta lacuna pode ser incentivando a sociedade quanto à importância de novos plantios e da preservação do patrimônio existente, baseado no modelo de valoração monetária aqui proposto; havendo sinergia entre poder público e sociedade seria possível construir ambientes mais verdes por meio da criação do IPTU Verde (Imposto Predial e Territorial Urbano), na qual o morador teria um desconto neste imposto anual por conservar

uma árvore em sua calçada ou área impermeável no quintal, como já ocorre em Araraquara/SP, São Carlos/SP, Curitiba/PR e Vila Velha/ES, mas divergem entre si quanto aos critérios adotados (CUNHA; MARTINEZ; NOSSA, 2013). No caso de Piracicaba/SP, tomando como base o valor médio de R\$ 415,00/ano/árvore, um desconto de 5% equivaleria a R\$ 20,75. Se considerar que a cidade tem 60.146 árvores para os 207.359 imóveis registrados, seria um investimento de R\$ 1.248.030,00 para a Prefeitura, perante os R\$ 41 mi de benefícios líquidos anuais estimados. Ademais, a Lei Orçamentária Anual (LOA) do município é de R\$ 128 mi, logo, o desconto de 5% corresponderia a 0,98% do total previsto na arrecadação.

Por fim, de modo a engajar a sociedade na temática, são apresentadas duas possibilidades:

- A primeira, levando em consideração o uso cada vez mais frequente da tecnologia, com a criação de um aplicativo na qual os próprios moradores voluntários, previamente capacitados por meio de treinamentos em cursos e palestras, cadastrariam as árvores próximas de sua vivência, levando em consideração as características quali-quantitativas, tais como identificação da espécie, endereço, altura, diâmetro de copa, DAP, condição fitossanitária etc. Uma vez de posse dos resultados obtidos, o Poder Público municipal teria uma visão mais ampla de onde atuar na gestão da arborização urbana, sobretudo quanto ao risco de queda;
- A segunda seria estimar e disponibilizar o valor monetário de algumas árvores urbanas estratégicas (como a sapucaia centenária), em placas com *QRCode*, para disseminar a ideia, por exemplo, como foi realizado em Lisle (Illinois/EUA), indicando o retorno anual dos serviços ecossistêmicos (Figura 7.7).



Figura 7.7. Placa com *QRCode* indicando o quanto uma determinada árvore pode retornar em serviços ecossistêmicos; em inglês, “Esta árvore devolve \$ \_\_\_ em benefícios para o nosso meio ambiente no próximo ano”. Fonte: The Morton Arboretum (2021).

#### 7.4. Conclusão

O método simplificado de valoração monetária da arborização urbana indicou que o valor das árvores em Piracicaba/SP/Brasil pode ser estimado em R\$ 40.899.373,00 ao ano, na qual o estreitamento das relações entre prefeitura e cidadãos poderá melhorar o ecossistema urbano e, assim, a qualidade de vida. Entender o contexto de um problema e as lacunas a serem preenchidas é fundamental para a proposição das soluções, na qual o método aqui proposto pode servir de parâmetro para políticas públicas municipais.

Não existe um método perfeito, o que há são aproximações da realidade, por isso, é importante reconhecer as limitações de cada modelo, ressaltando que os serviços ecossistêmicos prestados pela arborização urbana não são exclusivamente econômicos, mas também uma questão de igualdade social e de distribuição geoespacial. Estudos futuros poderão buscar a confecção de uma lista contendo dados primários sobre as estimativas do LAI efetivo e verdadeiro das espécies mais frequentes utilizadas na arborização urbana, a fim de servir de base para novas valorações.

#### Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## Referências

AFFOLDERBACH, J.; SCHULZ, C. Positioning Vancouver through urban sustainability strategies? The Greenest City 2020 Action Plan. **Journal of Cleaner Production**, v. 164, p. 676-685, 2017.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Cotação**. 2021. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/>>. Acesso em: 02 jul. 2021.

CITY OF VANCOUVER. **Greenest City 2020 Action Plan**. 2012. Disponível em: <<https://vancouver.ca/files/cov/Greenest-city-action-plan.pdf>>. Acesso em: 28 jun. 2021.

CUNHA, D.S.A.; MARTINEZ, A.L.; NOSSA, V. Incentivos fiscais verdes e tributação extrafiscal: estudo sobre o IPTU verde no município de Vila Velha (ES) comparativamente a outros municípios. **Revista Razão Contábil & Finanças**, v. 4, n. 1, p. 79-98, 2013.

ENGENHARIA DE BIOSISTEMAS. **Série de Dados Climatológicos do Campus Luiz de Queiroz de Piracicaba, SP**. 2021. Disponível em: <<http://www.leb.esalq.usp.br/leb/postocon.html>>. Acesso em: 02 jul. 2021.

ESCOBEDO, F.J.; GIANNICO, V.; JIM, C.Y.; SANESI, G.; LAFORTEZZA, R. Urban forests, ecosystem services, green infrastructure and nature-based solutions: Nexus or evolving metaphors? **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 37, p. 3-12, 2019.

FÁBRICA DE ÁRVORES. 2021. Disponível em: <<https://www.fabricadearvores.com.br/>>. Acesso em: 23 maio 2021.

FLORA DO BRASIL 2020. **Jardim Botânico do Rio de Janeiro**. Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/>>. Acesso em: 02 jul. 2021.

FRAZER, G.W.; CANHAM, C.D.; LERTZMAN, K.P. **Gap Light Analyzer (GLA): Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs, users manual and program documentation**. Burnaby, Millbrook: Simon Fraser University, Institute of Ecosystem Studies. 1999. 36 p.

HERNÁNDEZ, H.J.; VILLASEÑOR, N.R. Twelve-year change in tree diversity and spatial segregation in the Mediterranean city of Santiago, Chile. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 29, p. 10-18, 2018.

HILDE, T.; PATERSON, R. Integrating ecosystem services analysis into scenario planning practice: Accounting for street tree benefits with i-Tree valuation in Central Texas. **Journal of Environmental Management**, v. 146, p. 524-534, 2014.

I-TREE. **About**. 2020. Disponível em: <<https://www.itreetools.org/about>>. Acesso em: 29 jun. 2021.

KOESER, A.K.; SMILEY, E.T.; HAUER, R.J.; KANE, B.; KLEIN, R.W.; LANDRY, S.M.; SHERWOOD, M. Can professionals gauge likelihood of failure? – Insights from tropical storm Matthew. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 52, p. 126701, 2020.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras**: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. Nova Odessa: Plantarum, 1992. 382 p.

MCPHERSON, E.G.; SIMPSON, J.R.; PEPPER, P.J.; CROWELL, A.M.N.; XIAO, Q. **Northern California coast community tree guide**: benefits, costs, and strategic planting. General Technical Report PSW-GTR-228. Albany: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station. 2010. 118 p.

MACEDO, S.S. Espaços livres. **Paisagem Ambiente Ensaios**, n. 7, p.15-56, 1995.

MCPHERSON, E.G.; VAN DOORN, N.; GOEDE, J. Structure, function and value of street trees in California, USA. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 17, p. 104-115, 2016.

MENDES, F.H.; OLIVEIRA, R.L.Z. Percepção da arborização urbana por estudantes de marketing. **South American Development Society Journal**, v. 5, n. 14, p. 189-205, 2019.

MENDES, F.H.; ROMERO, H.; SILVA FILHO, D.F. Cambio Climático adverso provocado por la urbanización sin planificación ni evaluación ambiental en Santiago de Chile. **Revista de Geografía Norte Grande**, n. 77, p. 191-210, 2020.

MENDES, F.H. Estimativa da quantidade de árvores urbanas a partir de modelo estatístico e criação do Índice Mendes de Arborização Urbana. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, v. 16, n. 1, p. 81-93, 2021.

NORMAN, J.M.; CAMPBELL, G.S. Canopy structure. In: PEARCY, R.W.; EHLERINGER, J.; MOONEY, H.A.; RUNDEL, P.W. (org.). **Plant Physiological Ecology**: Field methods and instrumentation. London: Chapman and Hall, 1989. p. 301-325.

NOWAK, D.J.; CRANE, D.E.; STEVENS, J.C.; HOEHN, R.E.; WALTON, J.T.; BOND, J. A ground-based method of assessing urban forest structure and ecosystem services. **Aboriculture & Urban Forestry**, v. 34, n. 6, p. 347-358, 2008.

OLIVEIRA, D.A.M.; GANDARA, F.B. Diagnóstico dos quintais permeáveis urbanos em função da autonomia de renda em seis bairros no município de Piracicaba. **Revista Brasileira de Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v. 1, n. 1, p. 200-218, 2021.

PREFEITURA MUNICIPAL DE PIRACICABA. **Plano Municipal de Arborização Urbana**. Piracicaba: Secretaria de Defesa do Meio Ambiente, 2020. 307 p.

RODRIGUES, R.R. A vegetação de Piracicaba e municípios do entorno. **Circular Técnica IPEF**, n. 189, p. 1-17, 1999.

ROGERS, K.; SACRE, K.; GOODENOUGH, J.; DOICK, K. **Valuing London's Urban Forest: Results of the London i-Tree Eco Project**. Watford: Hill & Garwood Printing Limited, 2015. 84 p.

ROLLO, L.C.P. **Metodologias de quantificação de áreas verdes urbanas**: mapeamento da cobertura arbórea e inventário florestal de árvores de rua em cidades do Estado de São Paulo. 2014. 103p. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

ROMERO, H.; MENDES, F.H. Comodificação dos climas urbanos e criação de injustiças socioclimáticas em Santiago do Chile. **ENTRE-LUGAR**, v. 11, n. 22, p. 40-56, 2020.

ROMERO, H.; MENDES, F.H. La gentrificación de los climas urbanos y su influencia sobre las temperaturas de la superficie terrestre y el Covid-19 durante el año 2020 en Santiago de Chile. **Geographicalia**, n. 73, p. 155-176, 2021.

SHINZATO, P.; YOSHIDA, D.F.O.; DUARTE, D. O impacto da vegetação nos microclimas urbanos: Estimativa do Índice de Área Foliar - IAF pelo método de fotos hemisféricas. In: ENCONTRO NACIONAL, 13.; ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9, 2015, Sumaré. **Anais...** Sumaré: ENCAC, ELACAC, 2015. p. 1-8.

SILVA FILHO, D.F.; TOSETTI, L.L. Valoração das árvores no Parque do Ibirapuera-SP: Importância da infraestrutura verde urbana. **LABVERDE**, n. 1, p. 11-25, 2010.

SILVA, L.H.G.; PIMENTEL, R.M.M. Estrutura morfológica foliar da arborização urbana na manutenção do conforto térmico. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 4, n. 1, p. 104-109, 2019.

SOARES, A.L.; REGO, F.C.; MCPHERSON, E.G.; SIMPSON, J.R.; PEPPER, P.J.; XIAO, Q. Benefits and costs of street trees in Lisbon, Portugal. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 10, n. 2, p. 69-78, 2011.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE ARBORIZAÇÃO URBANA (SBAU). Carta a Londrina e Ibiporã. **Boletim Informativo**, v. 3, n. 5, p. 1-3, 1996.

VIANA, S.M.; TOSETTI, L.L.; ROLLO, L.C.P.; SILVA FILHO, D.F. Valoração monetária: Pesquisas em floresta urbana. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, v. 7, n. 1, p. 76-88, 2012.

VITO. **PROBA-V Mission Exploitation Platform**. 2021. Disponível em: <<https://proba-v-mep.esa.int/applications/time-series-viewer/app/app.html>>. Acesso em: 04 jul. 2021.

WANG, X.; YAO, J.; YU, S.; MIAO, C.; CHEN, W.; HE, X. Street trees in a Chinese forest city: Structure, benefits and costs. **Sustainability**, v. 10, n. 3, p. 674, 2018.

WATSON, D.J. Comparative physiological studies on growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. **Annals of Botany**, v. 11, p. 41-76, 1947.

WORLD WILDLIFE FUND (WWF). Living Planet Report 2020. Gland: WWF, 2020. 159 p.

## 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Em Piracicaba/SP, o clima urbano tem alterado seu padrão desde 1980, com aumento na frequência observada de dias quentes (a partir de 30°C), além da maior irregularidade na distribuição das chuvas volumosas (a partir de 35 mm). A nível microclimático, as árvores foram capazes de reduzir a temperatura do ar em 1°C nas horas mais quentes, mantendo as superfícies sombreadas na faixa entre 30 e 40°C. A valoração do patrimônio arbóreo na cidade foi estimada em R\$ 40.899.373,00 ao ano, em serviços ecossistêmicos, na qual os cinco primeiros capítulos aplicados desta tese serviram para embasar o capítulo da valoração arbórea.
- O estudo de caso em Santiago do Chile mostrou as diferenças climáticas e as injustiças socioambientais na cidade, com destaque para duas comunas contrastantes: Estación Central e Vitacura. A primeira possui um dos maiores adensamentos populacionais de Santiago, com edifícios que superam 100 m de altura, pouca vegetação e zonas mortas de ventilação, caracterizando-a como “Guetos Verticales”. A segunda, por sua vez, chamada de “Sanhattan”, detém o maior poder aquisitivo do país, cujas ruas e calçadas largas convivem de modo harmônico com edifícios e vegetação. Essas diferenças expressas pelo clima urbano local explicaram a evolução da COVID-19 em Santiago, cuja doença iniciou-se nas comunas mais ricas, com pessoas voltando de viagem do exterior e, com o tempo, alastrou-se por toda cidade, atingindo a população mais vulnerável.
- Tendo em vista as Mudanças Climáticas que vêm ocorrendo nas cidades latino-americanas, a Infraestrutura Verde aparece como uma alternativa fundamental na mitigação da problemática, cujas árvores urbanas devem ser tratadas como patrimônio da cidade, e não como um elemento secundário na paisagem.
- O conhecimento científico aplicado é a base para a tomada de decisão dos gestores, na qual os mapas e os resultados quali-quantitativos expressos nesta tese poderão servir como fomento para novas políticas públicas e iniciativas privadas que considerem a arborização urbana como uma infraestrutura de saúde pública;
- Os investimentos em arborização urbana parecem estar cada dia menores, visto que muitas vezes relacionam-se ao nível de renda de cada bairro que, conseqüentemente, são social, ambiental e economicamente desiguais entre si, sendo urgente resolver esta questão. Nesse contexto, apenas uma pequena parcela privilegiada da sociedade dispõe de um microclima adequado capaz de garantir melhor qualidade de vida;

- Tão importante quanto a quantidade de árvores é o seu tipo e suas características (porte, fenologia e morfologia), que vão depender do objetivo desejado, seja ele fornecimento de sombra, retenção de material particulado, aumento da umidade relativa do ar ou aumento do valor de propriedade. A quantificação dos serviços ecossistêmicos, utilizando as ferramentas e metodologias aqui exploradas, pode justificar às prefeituras a importância da arborização urbana, como ocorreu em muitas cidades da Califórnia, nos EUA, as quais aumentaram seus aportes após pesquisas como esta;
- A arborização urbana pode ser considerada um indicador de qualidade de vida; dessa forma, é importante educar a sociedade sobre quais benefícios a vegetação lenhosa pode trazer, estimulando um maior engajamento dos cidadãos a partir de capacitações, palestras e inventário florestal.