

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

Flávio Henrique Mendes
Hugo Romero

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, conseqüentemente, 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.



CHANGES IN THE LAND USE AND OCCUPATION AND THEIR INFLUENCE IN THE URBAN CLIMATE OF MEDIUM-SIZED CITIES GREEN-INFRASTRUCTURE

Flávio Henrique Mendes
Hugo Romero

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.



CAMBIOS EN EL USO Y OCUPACIÓN DEL SUELO Y SUS INFLUENCIAS EN EL CLIMA URBANO DE CIUDADES MEDIAS GREEN-INFRASTRUCTURE

Flávio Henrique Mendes
Hugo Romero

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) geoprocetamiento 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.



INTRODUÇÃO

A urbanização implica em mudanças e transformações nos usos e coberturas naturais dos solos, aumentando as temperaturas e as taxas de impermeabilização. Conseqüentemente, causa a redução das fontes de umidade atmosférica e reduz a ventilação pelos efeitos de rugosidade das edificações. Por conseqüência, 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 (BLAL 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 contribuir 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 ambien-

tal), 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 socio-ambiental, 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.

MATERIAL E MÉTODOS

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, apre-

sentando 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.

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.

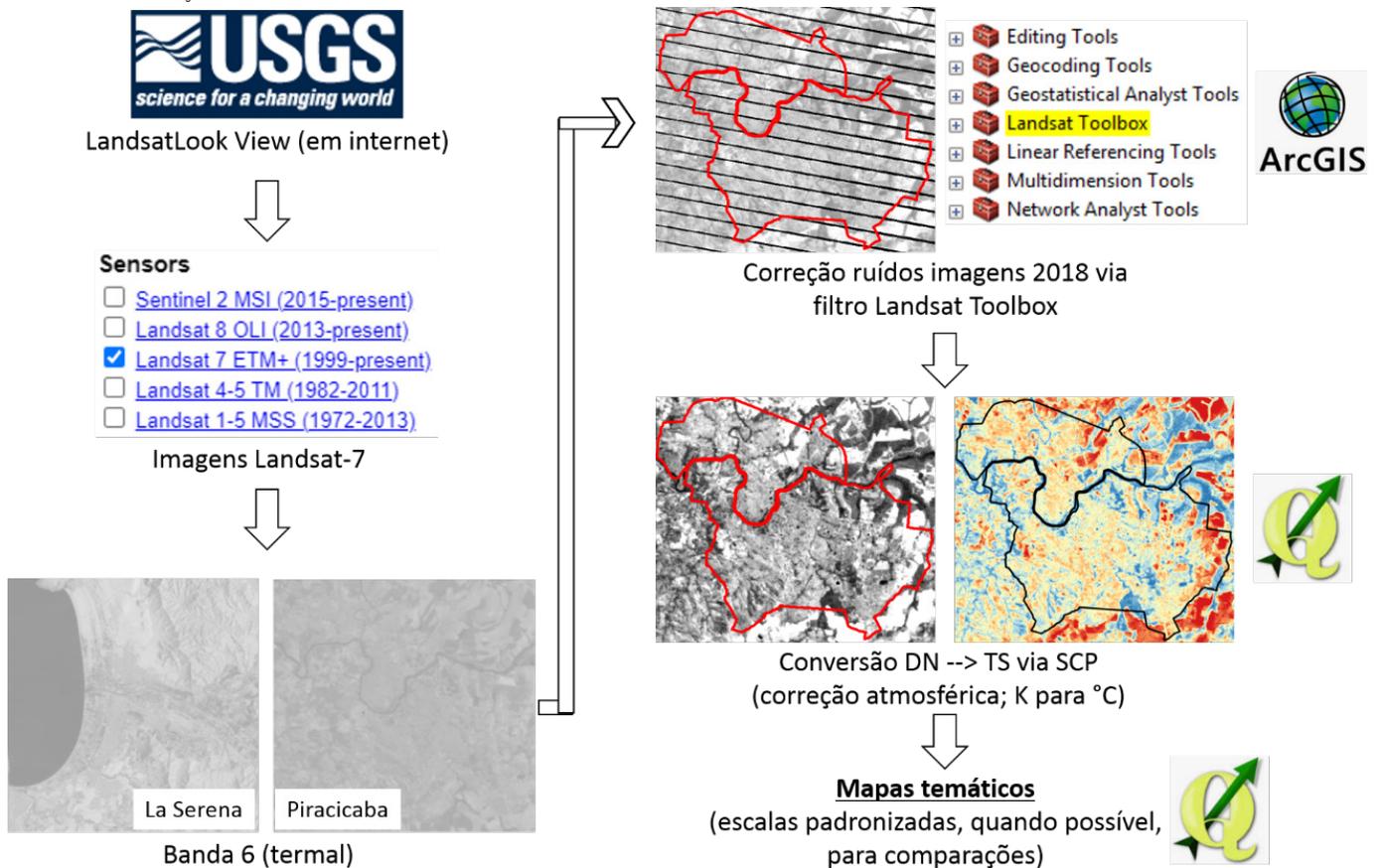
Então, um modo de corrigir esses ruídos é aplicar o filtro Landsat Toolbox (ferramenta Fix Landsat 7 Scanline Errors) via ArcGIS (DANIELS, 2012), cujo procedimento pode levar alguns minutos para processar cada cena, dependendo da capacidade computacional. Caso a área esteja ao meio da cena, não apresentará 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, represen-

tando 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, consequentemente, 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 1.

FIGURA 1: Esquema de trabalho para obtenção da TS via imagem de satélite.
Fonte: Produção dos autores



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.

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: l1 (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 2.

FIGURA 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:Produção dos autores.



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 esforçar-se 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.

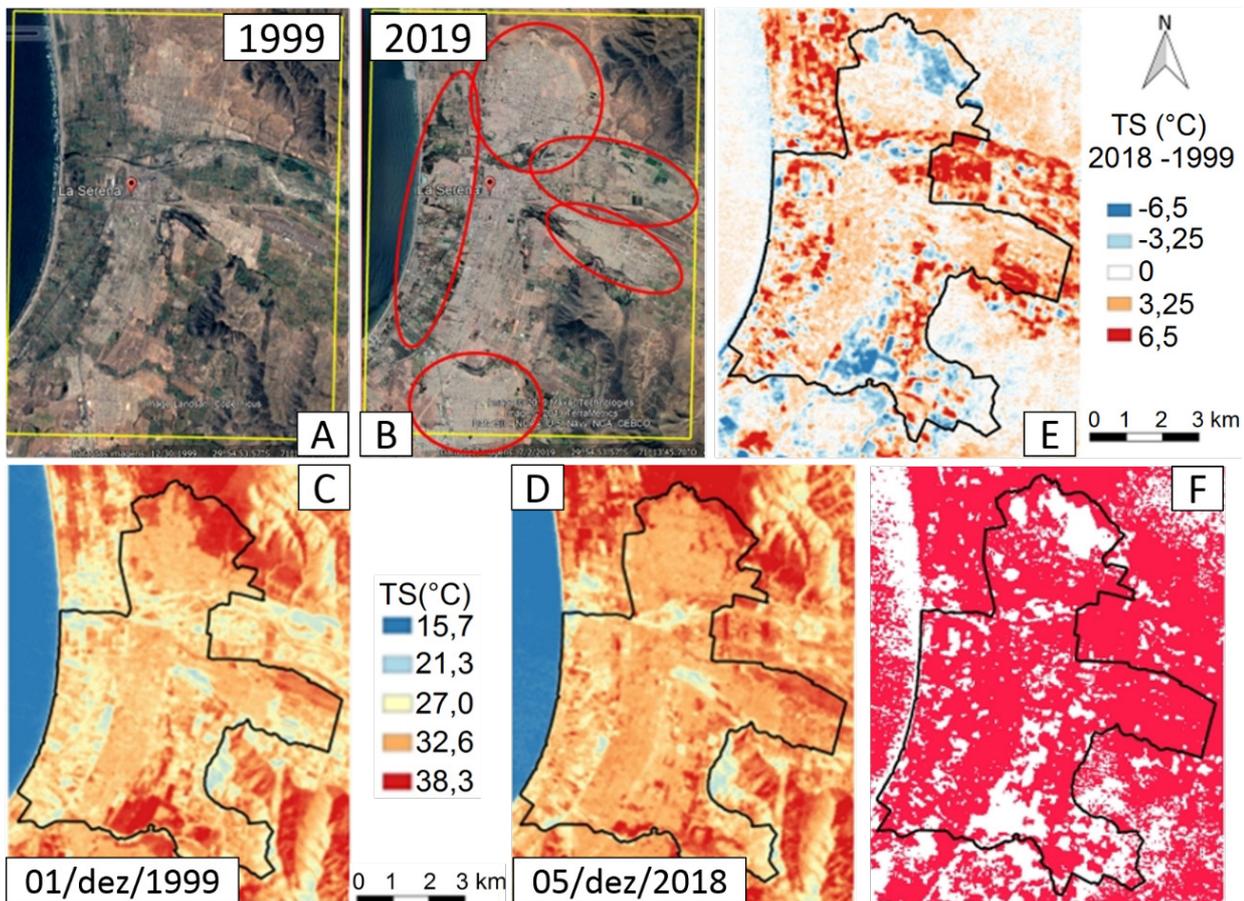
Os valores de TS provenientes das imagens do satélite Landsat-7 indicaram um aumento dos valores em ambas as áreas, sendo mais acentuada em La Serena, que teve 68% de seu limite urbano mais quente, ante 42% em Piracicaba, entretanto, com comportamentos diferentes, visto que a cidade chilena teve maior 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 3), contra 27,0°C a 29,5°C em Piracicaba (Figura 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°C a cada cinco anos, sendo este um aumento mais acentuado do que o encontrado na capital chilena Santiago, de 1°C a cada sete anos (MENDES; ROMERO; SILVA FILHO, 2020). Quanto às medições in loco, a Figura 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.

FIGURA 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: Produção dos autores.



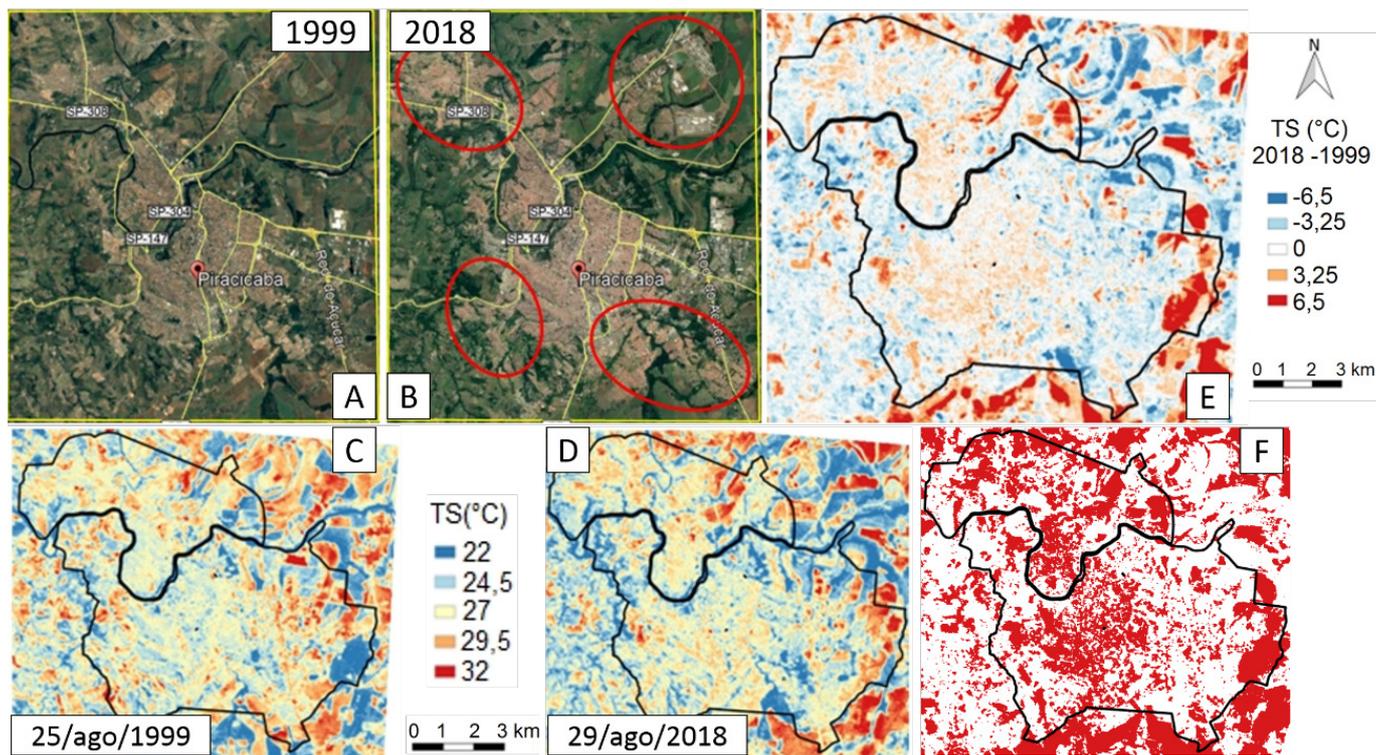


FIGURA 4: Acompanhamento das mudanças no uso do solo em Piracicaba, sendo: A) imagem de satélite em 1999 via Google Earth; B) imagem de satélite em 2018 via Google Earth com elipses indicando novas áreas urbanizadas; C) temperatura de superfície em 1999 no limite da área urbana; D) temperatura de superfície 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: Produção dos autores.

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.

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.

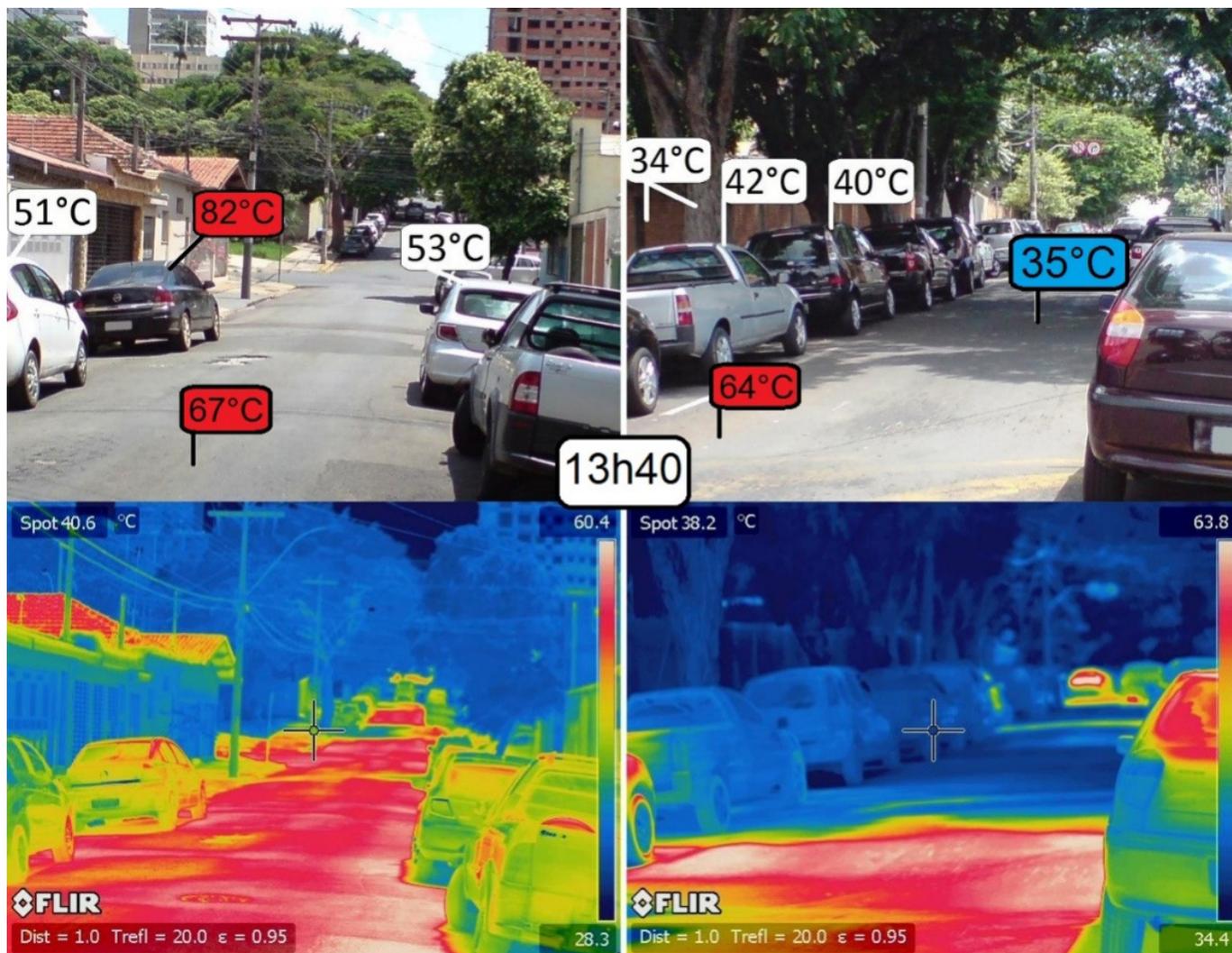


FIGURA 5: Valores de TS na Rua Visconde do Rio Branco, 1537 (à esquerda, sem árvores) e 1662 (à direita, com árvores), registradas às 13h40 hora local, em 23 de janeiro de 2019, verão.
Fonte: Produção dos autores.

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 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).

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.

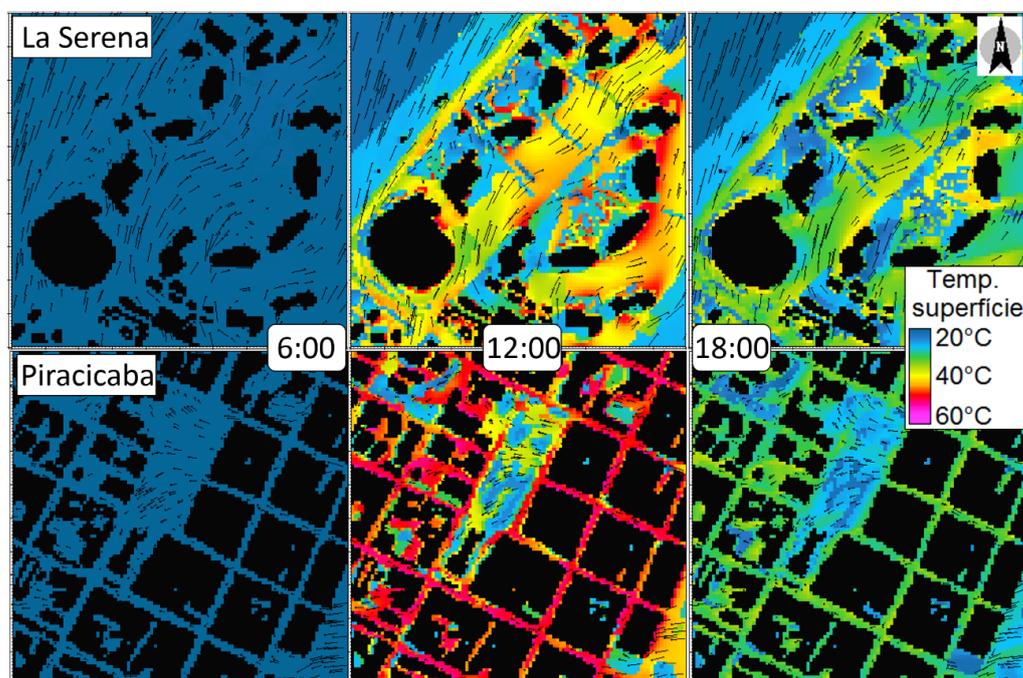


FIGURA 6: Variação das temperaturas superficiais ao longo do dia em La Serena e Piracicaba, às 6h00, 12h00 e 18h00. Fonte: Produção dos autores.

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.

ba. 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 7).

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.

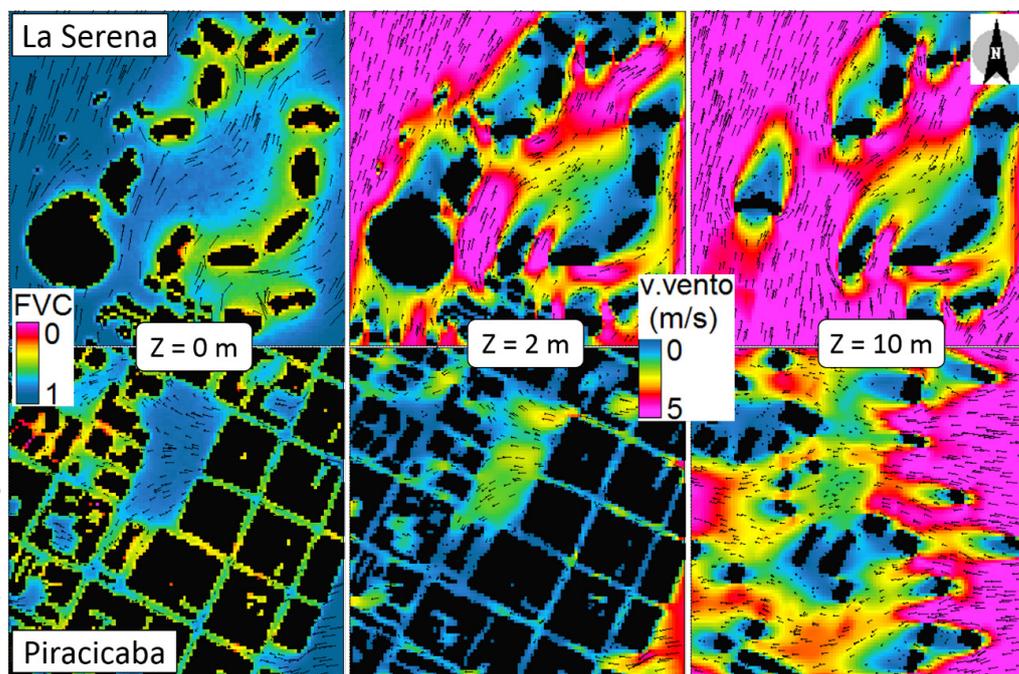


FIGURA 7: Fator de Visão do Céu e sua influência na ventilação das duas áreas estudadas, com cortes a 2 m e 10 m de altura.
Fonte: Produção dos autores.

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 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.

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.

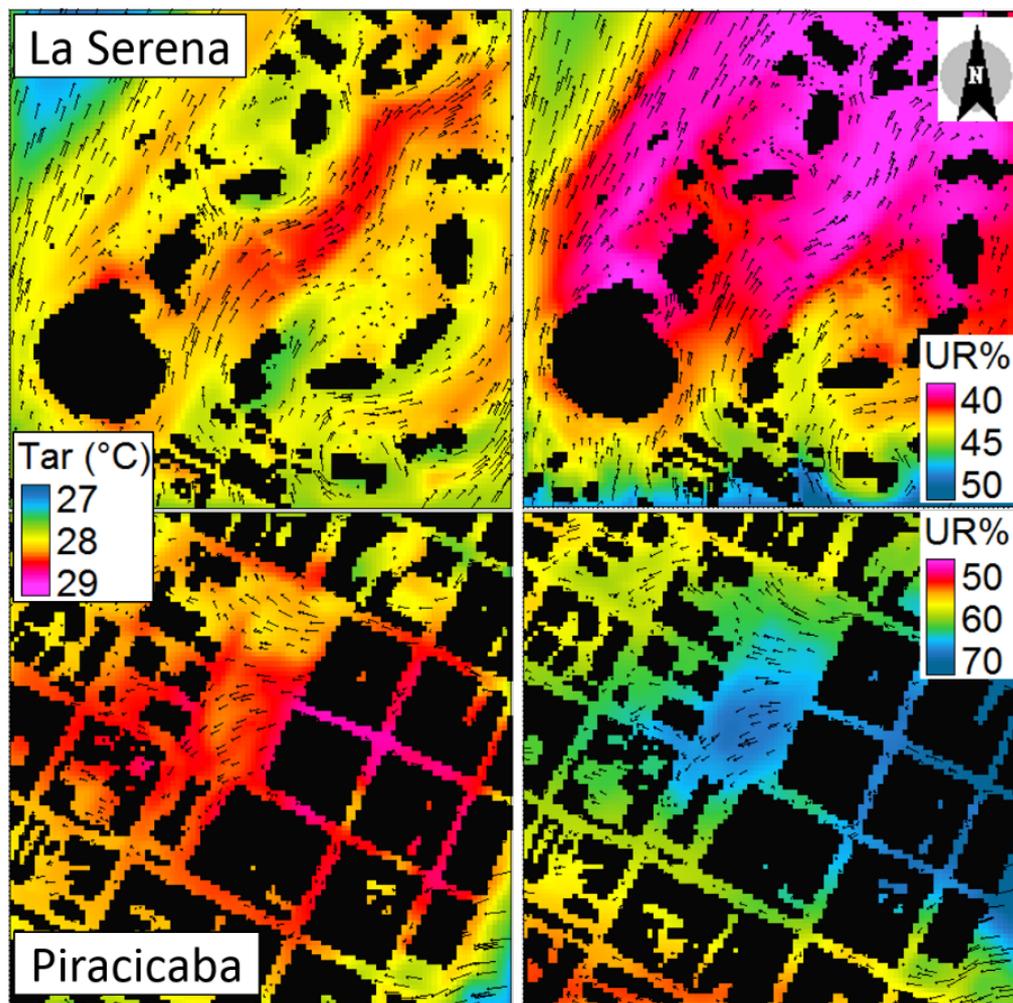


FIGURA 8: Temperatura do ar e umidade relativa do ar ao nível do pedestre, às 15h00, nas áreas estudadas, com cortes ao nível do pedestre, ou seja, 2 m de altura.
 Fonte: Produção dos autores.

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 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.

CONCLUSÃO

Ambas as cidades analisadas, La Serena e Piracicaba, apresentaram aumento na temperatura superficial, sendo a chilena com maior im-

pacto, 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.

IRARRÁZVAL, 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. Acesso em: 5 maio 2020.

MENDES, F.H.; ZANLORENZI, H.C.P.; DOBBERT, L.Y.; PRATA-SHI-MOMURA, 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, C.A.F.; MENDONÇA, F. **Clima Urbano.** São Paulo: Editora Contexto, 2003.

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, 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.

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 Arbola-

do 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.; IRARRÁZVAL, 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.

AHERN, J. **Greenways as a planning strategy.** Landscape and Urban Planning, Amsterdam, v. 33, n. 1-3, p. 131-155, 1995.

ARAUJO, R. S. **Micro bacia do Ribeirão Cambé-Londrina-PR: levantamento ambiental utilizando técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto.** 2004. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geografia) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2004.

BALLAROTTI, C. R. **Parque Municipal Arthur Thomas em Londrina-PR: conflitos políticos e socioambientais em um território de diversidade**

(1975-2009). Dissertação (Mestrado em História Social) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2010.

BARROS, M. V. F *et al.* **Atlas Ambiental de Londrina**. Londrina: Grupo de Pesquisa IMAP&P, 2008. Disponível em: <http://www.uel.br/revistas/atlasambiental/>. Acesso em: 19 set. 2019.

CORMIER, N. S.; PELLEGRINO, P. R. M. **Infra-estrutura verde: uma estratégia paisagística para a água urbana**. *Paisagem e Ambiente*, São Paulo, n. 25, p. 127-142, 2008.

FÁBOS, J. G. **Greenway planning in the United States: its origins and recent case studies**. *Landscape and Urban Planning*, Amsterdam, v. 68, n. 1-2, p. 321-342, 2004.

FORMAN, R. **Land mosaics: the ecology of landscapes and regions**. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

FORMAN, R. T. T.; GODRON, M. **Landscape ecology**. New York: Wiley, 1996.

Flávio Henrique Mendes

Engenheiro Florestal e Licenciado em Ciências Agrárias, Doutorando em Recursos Florestais, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ), Universidade de São Paulo (USP);

e-mail: friquemendes@usp.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7628-4850>

Hugo Romero

Geógrafo, Professor Doutor, Facultad de Arquitectura y Urbanismo (FAU), Universidad de Chile (UCHile)

e-mail: hromero@uchilefau.cl

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1005-0269>

Recebido em: 20/12/2021

Aceito em: 02/04/2024