

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana

**INFLUÊNCIA DAS SAFRAS DE CANA DE AÇÚCAR NA
CONFIGURAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO EM ÁREAS
PERIURBANAS EM PIRACICABA, SP**

Bruno Sigolo Coury

ORIENTADOR: PROF. DR. ÉRICO MASIERO

SÃO CARLOS


2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Bruno Sigolo Coury (*in memoriam*), realizada em 14/05/2021:

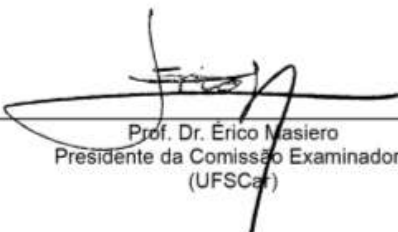


Prof. Dr. Érico Masiero
(UFSCar)

Profa. Dra. Camila Tavares Pereira
(UFSCar)

Profa. Dra. Kelen Almeida Dornelles
(USP)

Certifico que a sessão de defesa foi realizada com a participação à distância dos membros: Prof. Dr. Érico Masiero, Profa. Dra. Camila Tavares Pereira, Profa. Dra. Kelen Almeida Dornelles e, depois das arguições e deliberações realizadas, os participantes à distância estão de acordo com o conteúdo do parecer da comissão examinadora redigido no relatório de defesa do aluno Bruno Sigolo Coury.



Prof. Dr. Érico Masiero
Presidente da Comissão Examinadora
(UFSCar)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana.

APRESENTAÇÃO E AGRADECIMENTOS

É com profunda tristeza que manifesto minhas condolências aos familiares, amigos e colegas neste momento solene em homenagem ao Bruno Sigolo Coury.

Esta solenidade de defesa póstuma do trabalho de dissertação deste brilhante pesquisador não é apenas o cumprimento de uma formalidade burocrática, e sim, o instante para refletirmos sobre a brevidade da vida, sobre a necessidade de cumprirmos nossa missão e, principalmente, para oferecer visibilidade e perenidade ao conhecimento que foi desenvolvido com muita dedicação e responsabilidade até a sua partida em 04 de janeiro de 2021.

Sua passagem por esta Universidade permanecerá em nossas memórias marcada pelo companheirismo, simpatia, inteligência, entre tantas outras palavras positivas que eu poderia usar para descrevê-lo. No entanto, nenhum adjetivo atribuído a ele seria suficientemente capaz de resumir sua personalidade, tampouco para nos confortarmos de sua ausência.

Deus é sábio em suas ações e certamente tem planos mais ambiciosos para o Bruno lá no céu.

Destaco a importância deste trabalho pelo rigor científico com que foi conduzido, logo, jamais deve ser esquecido, tendo em vista que está contribuindo para a formação de futuras gerações de pesquisadores, estudantes, professores e entusiastas da ciência. O brilho nos olhos e o encantamento pela descoberta científica, características do Bruno, devem ser exaltados como exemplos para aqueles que aqui estão.

Agradeço à Rafaella Coury, aos pais, familiares e amigos que engrandecem este evento. Agradeço também aqueles que direta ou indiretamente contribuíram com este trabalho, entre eles a Prof. Camila Tavares Pereira, a Prof. Margarete Cristiane de Costa Trindade Amorim, a Prof. Kelen Almeida Dornelles, ao Prof. Erich Kellner, ao Alex do PPGEU, aos membros da CPGEU, aos amigos do Grupo de Pesquisa NUPA, Luccas, Maria Eugênia, Kowalski, Ângela, Vanize, Bianca, Orlando, Djanny, Geovana, Otávio, aos Professores do PPGEU e da Comissão de Pós Graduação da UFSCar que compreenderam a importância deste evento e votaram favoravelmente à sua realização.

Agradeço à oportunidade de ter convivido um breve período de intenso aprendizado e, principalmente, de colaborar com a divulgação do seu legado.

Érico Masiero, 05 de março de 2021.

APRESENTAÇÃO E AGRADECIMENTOS

Me disseram, citando bell hooks, que manter ou lutar pelo legado daqueles que já se foram é uma forma de amar além da morte. Isso define o amor como mais do que um sentimento; ele passa a ser uma ação, uma escolha, um fazer. Pessoalmente, é o que estou fazendo aqui ao garantir a conclusão desta pesquisa.

Em um certo momento da vida, meu irmão descobriu que seria professor. Eu costumo dizer que a profissão o escolheu, mais do que o contrário. Na prática, eu sabia que este era o seu caminho por sempre ter aprendido tanto com ele, mesmo sendo mais velha. O mestrado – e, quem sabe, um doutorado – era uma forma de alcançar ainda mais pessoas com seu amplo conhecimento.

Além de toda sua dedicação e esforço para fazer este trabalho acontecer, o Bruno sempre o realizou baseado em valores importantíssimos na sociedade em que vivemos. Sua busca sempre foi por um mundo mais justo e confortável para todos, e seu estudo também era dedicado a isso. O Bruno tentava mudar o mundo diariamente, seja na sala de aula, na pesquisa do mestrado e até em suas relações. Todos que tiveram a honra de conviver com ele, por cinco minutos que fosse, sentiram o poder da sua fala e a força e a bondade do seu coração.

Hoje, eu acredito ser nossa função, nosso objetivo, fazer com que essa voz e essa postura alcancem o mundo. Com a conclusão deste trabalho, espero que mais pessoas estudem possibilidades de conforto urbano, que levem estes conhecimentos adiante na expectativa de uma vida de maior qualidade para todos os cidadãos.

O Bruno sempre foi um professor. Nos ensinou todas as capitais do mundo com a mesma dedicação do que a ser uma pessoa mais gentil. Nos ensinou a diferença entre tempo e clima do mesmo jeito que nos incentivou a melhorar o mundo. A maior e melhor forma de agradecer por tudo isso – e muito mais – é manter seu legado vivo.

Eu sou e eternamente serei extremamente agradecida por ter dividido um terço da minha vida com o Bruno e levarei isso para sempre comigo. Tenho certeza, também, de que não sou a única que se sente assim.

Neste momento, agradeço a todos que contribuíram com a realização deste trabalho – e de todos os sonhos do meu irmão ao longo de sua linda trajetória. Agradeço ao Érico Masiero por ter feito este trabalho seguir. Agradeço às professoras da banca e à UFSCar pela oportunidade da conclusão deste texto. Agradeço à Marina Urizzi por todo auxílio dado a mim e ao meu irmão neste processo. Agradeço aos meus pais por terem me dado o privilégio de conhecer alguém tão incrível quanto o Bruno. Agradeço a todos que se fazem presentes neste momento tão duro. E, por fim, agradeço ao Bruno, meu irmãozinho, por tudo o que ele sempre me ensinou e por ser meu maior orgulho sempre. Sua voz viverá para sempre em mim, Bruninho.

Rafaella Coury, 31 de março de 2021.

“O geógrafo é, antes de tudo, um filósofo, e os filósofos são otimistas, porque
diante deles está a infinidade, não tem aquele limite, não tem aquelas
limitações”
Milton Santos

“I've been, I've been praying hard, said no more counting dollars, We'll be
counting stars
Yeah, we'll be counting stars”
OneRepublic

RESUMO

Este trabalho parte da premissa de que os espaços periurbanos, em geral negligenciados pelos tradicionais estudos climatológicos urbanos, também possuem ambientes alterados termicamente. Como consequência negativa observável para seus microclimas existe a formação das Ilhas de Calor Urbano (ICUs), já que estes também apresentam fatores antrópicos que contribuem para esse cenário. Além disso, é notável a influência que o meio rural circundante a estas áreas possui, cumprindo observar então de que maneira as atividades agrícolas próximas irão influenciar o clima destas regiões. Sendo assim, esta pesquisa propõe realizar uma visualização da influência que as variações espaciais das safras canavieiras possuem para bairros periurbanos do município de Piracicaba, uma cidade média do interior do estado de São Paulo, situação que não forma o centro tradicional das pesquisas climatológicas, mas que apresentou um processo de urbanização acelerado, típico do cenário brasileiro. Para isso, foram definidas duas fases de obtenção de dados climatológicos: após a colheita de cana-de-açúcar, com o solo exposto, e antes desta, momentos nos quais o solo rural apresenta diferentes condições de cobertura superficial. Na fase pós-colheita, foram instalados sensores de medição de temperatura e umidade do ar em uma área de canaviais e em dois bairros periurbanos limítrofes, os quais possuem diferentes configurações territoriais, além de outro sensor em um bairro centralizado, com maior grau de urbanização, para referência. Assim, pretendeu-se observar não apenas a influência do meio rural para estes ambientes periurbanos, mas também como as variações espaciais dentro de um mesmo espaço urbano podem contribuir para microclimas diferentes, como propõe a metodologia de Zonas Climáticas Locais (ZCLs) de Stewart e Oke (2012). Como prática adicional, foram realizados transectos móveis simultaneamente na área rural e em um dos bairros periurbanos, permitindo maior precisão para a comparação entre estes. Os resultados obtidos com a primeira fase de coleta possibilitaram visualizar uma diferença significativamente maior entre a temperatura do bairro central e da área rural, especialmente no final da madrugada, processo que se inverte no começo da manhã, devido ao aquecimento do solo rural exposto. Os bairros periurbanos apresentaram em geral maiores temperaturas do que a área rural, porém menores do que o bairro central, corroborando na contribuição que a densidade urbana possui para as temperaturas ao redor. Contudo, a configuração térmica destes variou de acordo com seus próprios arranjos espaciais, demonstrando que não só o meio agrícola possui relevância, mas também a configuração de cada ambiente periurbano para seu respectivo microclima.

Palavras-chave: Ilhas de Calor Urbano. Zonas Climáticas Locais (ZCLs). Ambientes Periurbanos. Microclimas.

ABSTRACT

This work comes from the premise that periurban spaces, in general neglected by the traditional climatological urban studies, also possesses altered environments, with observable negative consequences to their microclimates, like the formation of the Urban Heat Islands (UHIs), since they also present anthropic factors which contribute to this scenario. Besides, it is notable the influence that the surrounding rural environment possesses to these areas, complying to observe in which manner the agricultural activities nearby will influence the climate regions. Being so, this research proposes a visualization of the influence that the spatial variations have to periurban neighborhoods of the municipality of Piracicaba/SP, an interior medium size city, situation that doesn't make the traditional center of the climatological research, but has presented an accelerated urbanization process, typical of the Brazilian scenario. To this, two periods of obtaining climatological data were defined: before and after the sugarcane harvest, moments in which the rural soil presents bigger territorial differentiation. In the period after the harvest, it was installed measurement sensors in a sugarcane field and in two borderline periurban neighborhoods, which owns different territorial configurations, besides another sensor in a centralized neighborhood, with bigger urbanization, as a reference. So, it was pretended to observe not only the influence of the rural environment to the periurban spaces, but also how the spatial variations inside a same urban space can contribute to different microclimates, as proposes the Local Climate Zones (LCZs) methodology by Stewart & Oke (2012). As an additional practice, mobile transects were simultaneously realized in the rural area and in one of the periurban neighborhoods, allowing bigger comparison between these. The results obtained with the first stage of the collect made possible to visualize a significant bigger difference, between the temperatures of the central neighborhood and the rural area, especially in the final of the dawn, process which is reversed in the beginning of the morning, due to the warmth of the exposed rural soil. The periurban neighborhoods presented in general bigger temperatures than the rural area, although smaller than the central neighborhood, corroborating the contribution that the urban density possesses to the surrounding temperatures. However, the thermal configuration of them varied according to their own spatial arrangement, demonstrating that not only the agricultural environment is relevant, but also the configuration of each periurban area to their respective microclimate.

Keywords: Urban Heat Island (UHIs). Local Climate Zones (LCZs). Periurban environments. Microclimate.

Lista de Imagens

Imagem 1 – Representação esquemática do cânion urbano e da relação “H/W”	10
Imagem 2 – Exemplo de utilização de câmera “olho-de-peixe” para obtenção do FVC.....	12
Imagem 3 – Representação Esquemática das Camadas das Ilhas de Calor Urbanas.....	12
Imagem 4 – Área experimental de pavimentos em escala reduzida. Engenheiro Coelho/SP.....	16
Imagem 5 – Esquema de combinação de ZCLs para formação de subclasses.	36
Imagem 6 – Localização do município de Piracicaba.....	40
Imagem 7 – Limite entre Jardim Dona Luísa e área de canaviais.....	45
Imagem 8 – Localização do Bairro Santa Rosa próximo a canaviais.....	45
Imagem 9 – Panorama espacial do bairro Santa Rosa	46
Imagem 10 – Panorama espacial do bairro Jardim Dona Luísa.....	46
Imagem 11 – Fases do desenvolvimento da cana-de-açúcar.....	50
Imagem 12 – Vista dos canaviais utilizados para o estudo e o bairro Santa Rosa ao fundo	58
Imagem 13 – Sensor HOBO/ Pro V2 U23-001 e escudo protetor de PVC.....	61
Imagem 14 – Instalação da Estação Meteorológica nas fases inicial e final de obtenção de dados	62
Imagem 15 – Posicionamento do sensor termo-higrômetro em uma bicicleta.	65
Imagem 16 – FVCs de representação para os recortes de análise.....	68
Imagem 17 – Imagens de satélite para o período de 24/11 a 27/11.....	74
Imagem 18 – Imagens de satélite para o período de 07/12 a 10/12.....	75
Imagem 19 – Imagens de satélite para o dia 16/12/19.....	78
Imagem 20 – Imagens de satélite para os dias 28/09 e 30/09 de 2020.....	78

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Classificações das ZCLs de acordo com o tipo de construções e cobertura do solo.....	31
Tabela 2 – Descrição do recorte Santa Rosa 1.....	55
Tabela 3 – Descrição do recorte Santa Rosa 2.....	55
Tabela 4 – Descrição do recorte Jardim Dona Luísa 1.....	56
Tabela 5 – Descrição do recorte Jardim Dona Luísa 2.....	56
Tabela 6 – Descrição do recorte São Judas.....	57
Tabela 7 – Equipamentos da estação HOBO para a coleta de dados.....	61
Tabela 8 – Classificação dos locais de análise dentro da metodologia de Zonas Climáticas Locais.....	71
Tabela 9 – Condições meteorológicas médias para os dias 16/12/19, 28/09/20 e 30/09/20.....	79

Lista de Mapas

Mapa 1 – Localização dos bairros Santa Rosa e Jardim Dona Luísa	44
Mapa 2 – Porcentagem do uso da Terra em Piracicaba.....	49
Mapa 3 – Recortes territoriais de análise e posicionamento dos sensores nos bairros Santa Rosa, Jardim Dona Luísa e São Judas.....	59
Mapa 4 – Trajetos percorridos pelos transectos móveis na área rural e periurbana (bairro Santa Rosa).....	67
Mapa 5 – Delimitação do recorte de análise na área rural e suas superfícies de pavimentação, edificações e arborização/solo exposto.....	68
Mapa 6 – Delimitação do recorte de análise no bairro São Judas e suas superfícies de pavimentação, edificações e arborização/solo exposto.....	69
Mapa 7 – Delimitação do recorte 1 de análise no bairro Santa Rosa e suas superfícies de pavimentação, edificações e arborização/solo exposto.....	69
Mapa 8 – Delimitação do recorte 2 de análise no bairro Santa Rosa e suas superfícies de pavimentação, edificações e arborização/solo exposto.....	69
Mapa 9 – Delimitação do recorte 1 de análise no bairro Jardim Dona Luísa e suas superfícies de pavimentação, edificações e arborização/solo.....	70
Mapa 10 – Delimitação do recorte 2 de análise no bairro Jardim Dona Luísa e suas superfícies de pavimentação, edificações e arborização/solo.....	70

Lista de Gráficos

Gráfico 1 – Evolução da população urbana e rural no Brasil, em termos percentuais e absolutos (milhões de habitantes).....	24
Gráfico 2 – Crescimento da População de Piracicaba, em termos absolutos e percentuais.....	38
Gráfico 3 – Temperatura média (em °C) e Precipitação Média (em mm) mensais em Piracicaba (1917 – 2019)	41
Gráfico 4 – Temperaturas média mínima, máxima e anual, em °C, em Piracicaba (1920 – 2019)	42
Gráfico 5 – Temperatura do Ar e Umidade Relativa em Piracicaba/SP, período de 22/11 a 17/12.....	73
Gráfico 6 – Comparação de Temperatura e Umidade do Ar para três recortes temporais de análise	76
Gráfico 7 – Temperatura média diária, período de 27/09 a 03/10, de 2011 a 2020.....	77
Gráfico 8 – Diferença térmica entre a ZCL2/3 e a ZCLF, dias 24 a 26/11/19, fase inicial/pós-colheita	79
Gráfico 9 – Diferença térmica entre a ZCL2/3 e a ZCLF, dias 07 a 09/12/19, fase inicial/pós-colheita	80
Gráfico 10 – Diferença térmica entre a ZCL2/3 e a ZCLC, dias 23 a 25/12/20, fase final/pré-colheita	81
Gráfico 11 – Diferença térmica entre a ZCL2/3 e a ZCLC, dias 30/09 a 02/10/20, fase final/pré-colheita	82
Gráfico 12 – Umidade relativa do ar, área rural e bairro urbanizado, fase inicial/pós-colheita	83
Gráfico 13 – Umidade relativa do ar, área rural e bairro urbanizado, fase final/pré-colheita.....	83
Gráfico 14 – Direção do vento na área rural, fases pós-colheita e pré-colheita.....	84
Gráfico 15 – Velocidade do vento em quilômetros por hora, estação da ESALQ e estação HOBO (área rural), fase inicial de coleta.....	85
Gráfico 16 – Velocidade do vento em quilômetros por hora, estação da ESALQ e estação HOBO (área rural), fase final de coleta.....	85

Gráfico 17 – Diferença térmica entre as ZCLs 5, 8 e 3 e a ZCLF, dias 24/11 a 26/11/19, fase inicial/pós-colheita.....	86
Gráfico 18 – Diferença térmica entre as ZCLs 5, 8, 3 e 6 e a ZCLF, dias 07/12 a 09/12/19, fase inicial/pós-colheita.....	86
Gráfico 19 – Diferença térmica entre as ZCLs 5, 8, 3 e 6 e a ZCLC, dias 23/09 a 25/09/20, fase final/pré-colheita.....	88
Gráfico 20 – Diferença térmica entre as ZCLs 5, 8, 3 e 6 e a ZCLC, dias 30/09 a 02/10/20, fase final/pré-colheita.....	89
Gráfico 21 – Temperaturas registradas pelos transectos rural e periurbano, dia 16/12/19, fase inicial de coleta.....	89
Gráfico 22 – Temperaturas registradas pelos transectos rural e periurbano, dias 28/09/20 e 30/09/20, fase final de coleta.....	90

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.2. OBJETIVO GERAL	3
1.2.1 Objetivos específicos	3
2. AS ICUS E A DINÂMICA CLIMÁTICA EM AMBIENTES URBANOS	3
2.1. A CLIMATOLOGIA URBANA: ESTUDOS MICRO E MESOCLIMÁTICOS.....	3
2.2. ILHAS DE CALOR URBANO (ICUS)	7
2.2.1 Formação e intensidade das ICUs	8
2.2.2 Consequências das ICUs	13
2.2.3 Práticas de mitigação das Ilhas de Calor Urbano	15
2.3. AS ILHAS DE CALOR EM AMBIENTES PERIURBANOS.....	19
3. ESTUDOS MICROCLIMÁTICOS RELACIONADOS A EXPANSÃO E PLANEJAMENTO DOS ESPAÇOS URBANOS	22
3.1. BREVE CONTEXTO DE CRESCIMENTO URBANO NO BRASIL	23
3.2. CONFORTO AMBIENTAL URBANO.....	25
4. O MÉTODO DE ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS (ZCLS)	28
4.1. CLASSIFICAÇÃO	29
4.2. APLICAÇÕES PRÁTICAS	31
4.2.1 Diretrizes para a utilização do método de ZCLs	34
5. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-TERRITORIAL DE PIRACICABA E SUAS ÁREAS PERIURBANAS	36
5.1. EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO ESPAÇO URBANO DE PIRACICABA....	36
5.2. CONDIÇÕES FÍSICAS E ATMOSFÉRICAS DO MUNICÍPIO DE PIRACICABA	40
5.3. EXPANSÃO DA MALHA URBANA: OS BAIRROS SANTA ROSA E JARDIM DONA LUÍSA (VILA FÁTIMA).....	43
5.3.1 Aspectos socioeconômicos	47
5.4. CULTIVO CANAVIEIRO: SAZONALIDADES E CONFIGURAÇÃO HISTÓRICA EM PIRACICABA	48
6. MATERIAIS E MÉTODOS	53
6.1. CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO	54
6.1.2 Área rural	57
6.1.3 Recortes espaciais de análise	58
6.2. PROCEDIMENTO DE OBTENÇÃO DE DADOS	61
6.2.1 Elementos atmosféricos e especificações técnicas	60

6.2.2 Cálculos das ICUs	62
6.3. FASES DE OBTENÇÃO DE DADOS.....	63
6.3.1 Fase inicial: pós-colheita.....	63
6.3.2 Fase final: pré-colheita	64
6.4. TRANSECTOS MÓVEIS.....	65
7. ANÁLISES DE RESULTADOS.....	68
7.1. CARACTERIZAÇÃO DOS RECORTES ESPACIAIS DE ANÁLISE.....	68
7.2. CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS DA FASE INICIAL DE COLETA	73
7.3. CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS DA FASE FINAL DE COLETA	77
7.4. CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS DO TRANSECTO MÓVEL	78
7.5. ANÁLISE DAS ILHAS DE CALOR URBANO (ICUS): AMBIENTE URBANIZADO	80
7.6. ANÁLISE DAS ILHAS DE CALOR URBANO (ICUS): AMBIENTES PERIURBANOS.....	86
7.7. ANÁLISE DOS TRANSECTOS MÓVEIS.....	90
CONCLUSÕES	91
REFERÊNCIAS.....	93

1. INTRODUÇÃO

Os ambientes urbanos em geral apresentam diversas consequências da contínua atuação antrópica ao longo dos anos. Aponta-se como responsáveis por essa situação as muitas modificações historicamente realizadas pelo ser humano, tais como fontes de emissão de poluentes e calor antropogênico, impermeabilização do solo, canalização de cursos d'água, excessivo adensamento urbano e retirada da cobertura vegetal original nas áreas urbanas e rurais. Tais modificações do ambiente contribuem para alterações em macro e micro escalas climáticas e geralmente reduzem o bem-estar humano, como aponta He (2018).

Com base neste contexto, o conceito de Conforto Ambiental Urbano entendido como uma situação benéfica de neutralidade, ganhou destaque nas últimas décadas em estudos climatológicos, os quais buscam compreender os processos de amenização desses impactos. Assim, se faz importante que essa condição seja um objetivo a ser atingido na elaboração das práticas do planejamento urbano (MONTEIRO, 1976; ASHRAE, 2005; KATZSCHNER, 2006).

Nesta perspectiva, destaca-se a relevância da compreensão do fenômeno de Ilhas de Calor Urbano – ICU, o qual, de acordo com Oke (1973) e Stewart e Oke (2012), é entendido como uma significativa expressão das alterações humanas na atmosfera nas camadas intraurbanas. A elevação das temperaturas do ar nos ambientes urbanos é causada pelo uso intenso de materiais construtivos, pela retirada da vegetação original, pela canalização dos corpos d'água, dentre outros fatores que contribuem para alterar o balanço energético urbano (GARTLAND, 2010).

Assim, ressaltam-se dois pontos essenciais: primeiramente, como aponta Mills (2008), a necessidade urgente – e ainda pouco levada à prática de fato – de integração entre o planejamento urbano e os estudos climatológicos urbanos, para possibilitar ambientes mais adequados ao ser humano. Especialmente em nações em desenvolvimento, a aplicação de conceitos de climatologia urbana nos processos de planejamento e construção das cidades ainda são incipientes, e os impactos ambientais têm acarretado sérios prejuízos socioeconômicos, sobretudo na saúde da população e no consumo energético das edificações (GARTLAND, 2010).

Em segundo lugar, destaca-se, com Stewart e Oke (2012), o imperativo de que, nos estudos climatológicos urbanos, se observe os espaços urbanos como uma dinâmica complexa, dotada de variadas configurações e características internas, as quais possuirão diferentes consequências para o microclima. Assim, é necessário que seja ultrapassada a simples diferenciação entre o ambiente rural e o urbano na análise de ICUs, pois, assim, suas verdadeiras magnitude e origens poderão ser concebidas e, possivelmente, mitigadas, como ressaltam Martilli *et al.* (2020).

Essa mudança de perspectiva analítica se faz ainda mais relevante com a constatação de que os estudos climatológicos urbanos, de maneira geral e historicamente, tendem a voltar suas análises às regiões centrais das grandes cidades, as quais possuem maior concentração populacional e espaços antropicamente mais alterados, como apontam Geneletti *et al.* (2017).

Porém, partindo da concepção de que os espaços urbanos são complexos e dinâmicos, os ambientes periurbanos, normalmente ocupados por edificações habitacionais com baixa ou média densidade demográfica e com maiores vazios urbanos, podem e devem ganhar destaque (MILLS 2008). No contexto brasileiro de urbanização, tais áreas, principalmente das cidades pequenas e médias do interior do estado de São Paulo, apresentam configurações territoriais variadas, desigualdades socioespaciais, carência de infraestrutura e influências decorrentes do uso do solo do ambiente rural (MENDONÇA, 1995 e MASIERO & SOUZA 2018).

Em geral, as áreas periféricas urbanas tradicionalmente são relegadas pelos planejadores e climatologistas, mesmo que também sofram com alterações microclimáticas decorrentes de intervenções no espaço construído e do uso do solo rural, sobretudo em regiões em que predominam uma forte tradição agrícola voltada à monocultura.

Com isso, se faz importante observar não apenas as variadas configurações espaciais das áreas periurbanas, mas também seu contexto de implantação urbana e os espaços rurais circundantes, os quais podem ser decisivos para a qualidade microclimática destes ambientes.

Sendo assim, é fundamental entender como o uso do espaço rural pode ser relevante para o clima das áreas urbanas fronteiriças. Desta forma, esta pesquisa busca contribuir para o aprimoramento de critérios de ocupação

espacial de forma a aumentar o conforto térmico urbano, beneficiando a população que habita esses locais.

1.2. OBJETIVO GERAL

O objetivo desta pesquisa é compreender a influência da sazonalidade do cultivo semi-perene de cana-de-açúcar na formação de ICUs em áreas periurbanas localizadas no município de Piracicaba/SP.

1.2.1. Objetivos específicos

- Comparar a intensidade e as características das ICUs entre ambiente rural e centro urbano, com as ICUs entre ambiente rural e periurbano.
- Identificar a influência das diferentes etapas das safras da cana de açúcar na intensidade das ICUs em áreas periurbanas.

2. AS ICUS E A DINÂMICA CLIMÁTICA EM AMBIENTES URBANOS

Os fenômenos atmosféricos existentes em nosso planeta possuem uma relação intrínseca de causa e efeito entre si, na qual aspectos locais são influenciados por diversos fatores de origens e fontes variadas, em uma única dinâmica climática conectada globalmente. Para facilitar sua compreensão, como apontam Ayoade (1996) e Andrade (2005), a climatologia é dividida de acordo com sua escala de atuação (variando entre macro, meso e micro) ou seu foco de estudo, tais como tipos de fenômenos e séries históricas.

Para esta pesquisa, são relevantes os campos micro e mesoclimáticos pertinentes aos espaços urbanos e as alterações que a ação humana realiza na dinâmica climática dos mesmos, área de estudo classificada como “*climatologia urbana*” conforme apontam Monteiro (1976), Oke (1984), Monteiro e Mendonça (2003). Vale destacar que se faz necessária uma integração com a área designada como “climatologia aplicada” (AYOADE, 1996), campo responsável pelo estudo das condições temporais de um local em um período determinado, além dos fatores de influência em sua caracterização atmosférica.

2.1. A CLIMATOLOGIA URBANA: ESTUDOS MICRO E MESOCLIMÁTICOS

As alterações antrópicas na dinâmica climática possuem uma série de consequências em variadas escalas. Globalmente, estes impactos referem-se principalmente ao conceito de mudanças climáticas, afetando primeiramente a temperatura global, com uma série de implicações posteriores. Entretanto, é na escala local que estas alterações são diretamente perceptíveis, especialmente nos ambientes onde a interferência humana é ainda mais intensa: os espaços urbanos e suas áreas circundantes, como apontam Norton *et al.* (2015).

Desta maneira, o presente trabalho se dedica à compreensão de fenômenos microclimáticos, que compreendem uma pequena área, de alguns metros, tal qual alguns quarteirões, e mesoclimáticos, que abrangem o território de uma cidade e suas interrelações com a morfologia regional (MENDONÇA 1995).

Como assinala Monteiro (1976), em sua análise metodológica e teórica “Sistema Clima Urbano (SCU)”, as condições atmosféricas sobre os ambientes urbanizados são extremamente modificadas pela ação humana, apresentando propriedades distintas em relação a seus ambientes próximos, ou mesmo entre ambientes urbanos com caracterizações microclimáticas diferentes entre si.

Diversos fatores antrópicos contribuem para esta configuração (GRIMMOND & OKE, 1999a), tais como as formas de uso e de ocupação do solo, a verticalização urbana, características arquitetônicas e proximidade de construções, a existência ou não de áreas arborizadas, a pavimentação e impermeabilização dos solos e a redução da quantidade de água superficial disponível, com a canalização e/ou soterramento de cursos d’água.

Assim, observa-se, com Pereira (2020) e Pereira *et al.* (2021), que o desenho urbano apresenta quatro variáveis relevantes para análise: as climáticas, que se referem à caracterização atmosférica das cidades; as espaciais, com relação ao perfil morfológico destes ambientes; as sociais, com relação à atuação dos agentes econômicos nos espaços urbanos; e, por fim, as físicas, que se referem às propriedades dos materiais construídos. Todas essas condições combinadas contribuem para a formação das características atmosféricas encontradas em cada ambiente urbanizado.

De maneira geral, estes fatores alteram a dinâmica de ventos local – através da densidade construtiva –, reduzem processos de evapotranspiração, evaporação e resfriamento, intensificam ou diminuem a quantidade de radiação

solar incidente, além de alterar a capacidade reflexiva e as propriedades térmicas das superfícies. O uso de materiais com menor admissão térmica e/ou com cores mais escuras reduzem o albedo geral desses espaços. Estas condições alteram o balanço energético dos ambientes urbanos, tornando-os propícios a apresentar quadros de retenção de calor, condição conhecida como “Ilhas de Calor Urbano” – ICUs (OKE, 1973, 1982; CHANDLER, 1976).

De acordo com Nakata-Osaki (2016) e Stewart (2019), os primeiros estudos da interferência humana no clima urbano se iniciaram no séc. XIX, sendo que a análise de Luke Howard (1833) na cidade de Londres é considerada o marco inicial desse campo. Porém, é a partir da segunda metade do séc. XX (período marcado por intensa urbanização em escala mundial – ONU, 2015) que esta área começa a ganhar destaque, especialmente em nações desenvolvidas (STEWART, 2019). Contudo, ressalta-se, junto a Chandler (1976), Oke (1984), Assis (1997), Eliasson (2000) e Mills (2008), que, historicamente, houve uma expressiva desarticulação entre as áreas da climatologia e do planejamento urbano, especialmente nas práticas urbanísticas cotidianas, condição motivada por diversos fatores.

Primeiramente, destaca-se, juntamente com Maricato (1979) e Rolnik (2015), a dificuldade de utilização dos dados climáticos pelos planejadores, que historicamente priorizaram demandas relacionadas à mobilidade, à densidade construída e à exploração da terra como mercadoria, em processos de especulação imobiliária e regulação do espaço urbano por meio da atuação do capital (OTERO, 2016).

Em segundo lugar, Mills (2008) observou que estes dados, em diversas ocasiões, permanecem disponíveis apenas no meio científico, não sendo acessíveis aos executores do planejamento urbano de maneira geral, contribuindo para a formação de “caminhos paralelos” entre os dois. Concomitantemente, a produção climatológica urbana foi focada na descrição dos ambientes microclimáticos urbanos e seus fenômenos durante um longo período, sem que houvesse, de maneira geral, um detalhamento da empregabilidade dos dados que eram produzidos, visando a elaboração dos espaços urbanos (MONTEIRO e MENDONÇA, 2003; MILLS, 2008).

Majoritariamente, a partir das décadas de 1980 e 1990, e especialmente no séc. XXI, as produções científicas passaram a apresentar propostas de

intervenção para os ambientes urbanos, relacionando as análises realizadas às suas origens e consequências, além de mostrar meios para mitigar os efeitos negativos da ação antrópica, como se observa nos trabalhos de Hamin (2011) e de He (2018).

Apesar deste avanço, o espectro climatológico ainda é pouco considerado no processo de tomada de decisões para o meio urbano e a maioria das práticas existentes é encontrada em nações com maior grau de desenvolvimento socioeconômico, como é o caso da cidade de Toronto (Canadá), que apresentou um plano detalhado de ações e metas para reduzir os efeitos das mudanças climáticas em seu espaço (TORONTO, 2016).

No caso de nações subdesenvolvidas, pioneiramente destacam-se os trabalhos de Jauregui (1958, 1973) e de Monteiro (1976) por adequarem as práticas metodológicas existentes à realidade climática local e, a partir disso, lançarem uma base para que outros trabalhos pudessem se desenvolver – já que, até então, os estudos nestes países se limitavam a reproduzir a dinâmica metodológica de climas temperados –, servindo como marcos iniciais, como apontam Lima, Pinheiro e Mendonça (2012).

Contudo, ressalta-se, em conjunto com Chandler (1976), Roth (2007) e Rodriguez e D’Alessandro (2019), que significativa parcela dos estudos pertinentes à climatologia urbana e ao conforto térmico atualmente ainda se concentra em países desenvolvidos, localizados majoritariamente em regiões temperadas do globo, mesmo com o aumento das pesquisas realizadas em regiões subdesenvolvidas com climas tropicais.

Atualmente, pode-se encontrar uma série de análises nacionais relevantes contextualizadas às realidades urbana e climática brasileiras, como no estudo de Lima e Rueda (2018) realizado na região metropolitana de São Paulo e no estudo de Dorigon e Amorim (2019), em Paranaíba/PR, observando as condições tropicais típicas de grande parte do interior brasileiro. Mesmo assim, ainda é nítida, no cenário nacional, a separação existente entre climatologia urbana e planejamento, contribuindo para uma série de consequências negativas à população, especialmente àquelas em situação de vulnerabilidade territorial e socioeconômica, conforme relatam Pereira *et al.* (2021).

Como exemplo, temos o Plano Diretor de Piracicaba, o qual não apresenta quaisquer referências ou análises que considerem questões climatológicas urbanas ou as consequências das mudanças climáticas em sua versão mais recente (PREFEITURA DE PIRACICABA, 2018).

Desta forma, é ressaltada a necessidade de articulação entre esses dois campos de atuação, clima e planejamento, especialmente no cenário brasileiro. Devido ao fato de o processo de urbanização ter se desenvolvido de maneira desordenada e acelerada (SANTOS & SILVEIRA, 2001), severas consequências têm sido notadas não apenas no espectro ambiental, sobretudo na intensificação de efeitos climáticos indesejados, além dos resultados decorrentes da desigualdade socioeconômica, o que afeta especialmente populações de regiões mais vulneráveis.

Destaca-se também que a maior parte dos estudos climatológicos ainda prioriza grandes centros urbanos, como as regiões metropolitanas, por exemplo. Já as cidades pequenas e médias e suas regiões periféricas recebem menor atenção, mesmo apresentando problemas sociais urbanos ligados a seus processos de urbanização, e conseqüentemente, impactos ambientais e fenômenos de ICUs, como aponta Amorim *et al.* (2009).

2.2. ILHAS DE CALOR URBANO (ICUS)

Como já destacado, as ações humanas alteram intensamente a dinâmica atmosférica em níveis locais, trazendo uma série de implicações negativas, de maneira geral, para o meio natural e aos seres humanos. Dentre estas, o fenômeno mais analisado ao longo das últimas décadas é o das ICUs, como aponta Mills (2008).

A principal causa para esta condição se deve ao fato de que o processo de urbanização, na maneira intensa como ocorreu em escala global – com particularidades e contextos de cada região –, contribuiu diretamente para este fenômeno que é encontrado em praticamente todas as configurações. Assim, é possível identificar rapidamente uma relação entre a interferência antrópica e suas consequências ambientais por meio da formação de ICUs.

A primeira utilização do termo “Ilhas de Calor”, de acordo com Stewart e Oke (2012), foi realizada por Balchin e Pye em 1947. Desta forma, ao longo do séc. XX, em compasso com os avanços da climatologia urbana, os estudos de

ICUs aumentavam em quantidade e complexidade, como aponta Stewart (2019), contribuindo para que atualmente exista um grande conhecimento das causas e efeitos deste fenômeno e, especialmente, das possibilidades de sua mitigação.

As ICUs (ou UHI, da sigla em inglês “Urban Heat Island”) se referem, de maneira generalizada, às temperaturas do ar mais elevadas encontradas nos ambientes urbanos com relação aos espaços ao seu entorno, justificando o uso do termo “ilha”. Isto ocorre graças ao fato de que a densidade construtiva dos espaços urbanos altera seus balanços energéticos, fazendo com que a concentração de calor nos mesmos seja mais elevada.

Como trabalhos fundamentais desta área, destaca-se a atuação de Chandler (1976), ao lançar uma nota técnica que serviria de guia fundamental para o trabalho de climatologistas e planejadores, e especialmente as diversas análises sequenciais de Oke (1976, 1982, 1984, 1995), nas quais o autor descreve detalhadamente as principais características do fenômeno, lançando muitas bases para o conhecimento atual, como será visto a seguir. Destaca-se também, com Roth (2007), o trabalho de Nieuwolt (1966) em Cingapura, tido como o primeiro estudo – em língua inglesa – de ICUs em regiões tropicais.

2.2.1 Formação e intensidade das ICUs

As ICUs são fenômenos encontrados em basicamente todos os ambientes urbanos, em climas de diversas latitudes. Porém, isso não significa dizer que não há variação entre elas em cada espaço urbano e suas especificidades físicas e geográficas. Existem diversos fatores, causas e consequências que podem ser apontados, sendo que alguns são em comum a todas as ICUs e outras, específicas das condições de cada local. De acordo com Oke (1982), Gartland (2010), Stewart e Oke (2012), Aguilar (2019) e Aguilar e Souza (2019), as seguintes características em comum dos espaços urbanos são apontadas como causas para a formação de ICUs:

1. Maior absorção da radiação solar devido à múltipla reflexão e radiação, que são interceptadas por construções;
2. Aumento da retenção (maior ganho e menor capacidade de perda) da radiação infravermelha (ondas longas), devido à redução do Fator de Visão do Céu – FVC – e à absorção realizada pela poluição do ar;

3. Aumento na capacidade de armazenamento do calor, devido ao incremento da admissão termal de superfícies urbanas, comumente feita por materiais escuros e de elevada capacidade térmica;
4. Grande quantidade de radiação solar absorvida na superfície é convertida para calor sensível (responsável pelo aquecimento do ar superficial), ao invés de latente, devido a processos de retirada da cobertura vegetal e impermeabilização dos solos, reduzindo a capacidade de evapotranspiração e seus efeitos resfriadores;
5. Fontes de calor antropogênico, especialmente por motores a combustão e processos de resfriamento artificial dentro de edifícios;
6. Redução na velocidade do vento, devido à maior rugosidade decorrente da geometria dos cânions urbanos.

Ressalta-se que estes fatores não estão necessariamente presentes em conjunto em um único espaço urbano, pois há eles variam conforme as características físicas e socioespaciais de cada local; porém, é comum que as mesmas áreas apresentem a combinação de alguns deles.

Além destas causas principais, suas variações podem ser fatores de intensificação ou amenização das ICUs. Coutts, Beringer e Tapper (2008), em estudo realizado na cidade de Melbourne em 2008, concluíram que a densidade urbana é um dos fatores cruciais para a intensificação da capacidade de retenção de calor em um local; contudo, a maneira como esta se organiza dentro dos ambientes urbanos, ou seja, o seu desenho urbano específico, é fundamental.

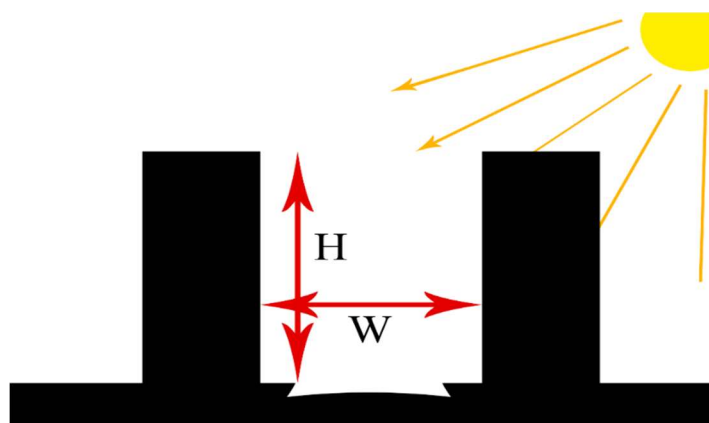
Assim, cidades mais compactas, geralmente verticalizadas e com população concentrada, tendem a apresentar este fenômeno mais expressivamente do que ambientes mais espaçados, fato que se relaciona mais com a organização e planejamento dos ambientes urbanos do que com o tamanho populacional local (OKE, 1973). Esta condição, durante um longo período, foi diretamente considerada causa, mas não necessariamente deve ocorrer para uma intensificação de ICUs.

A geometria urbana, como apontam Barbirato e Souza (2007), Nakata-Osaki (2016) e Sen e Roesler (2020), é outro fator relevante, pois o traçado das vias e dos edifícios interfere positiva ou negativamente na velocidade dos ventos,

que são responsáveis por transportar e afastar o calor. A expressão da morfologia urbana é dada por meio de dois elementos principais, que buscam explicar essa relação.

O primeiro deles refere-se ao cânion urbano (OKE, 1982), ou seja, a interação entre proximidade e altura das edificações, expressa por uma relação “H/W” (“Height”, altura, e “Width”, largura, em inglês), em que, quanto maior for essa relação, ou seja, quanto mais elevadas e próximas as construções forem umas das outras, maior será a capacidade de retenção de calor do local, intensificando as ICUs, como demonstra a figura a seguir.

Imagem 1 – Representação esquemática do cânion urbano e da relação “H/W”



Fonte: adaptado de Nakata-Osaki (2016)

Isto ocorre, pois a radiação solar incidente no espaço urbano será absorvida durante as horas do dia, devido à utilização de materiais de grande absorção, ou será refletida diversas vezes entre as construções próximas, fazendo com que o calor praticamente não se disperse para a atmosfera em ambientes de elevada densidade construída.

Vale destacar que, apesar que durante o dia prédios mais altos possuam um efeito de sombreamento, é no período noturno que essa interferência negativa é mais sentida, justamente pelo potencial de liberação do calor absorvido pelas construções durante as horas de exposição à luz do sol, fazendo com que a amplitude das ICUs seja geralmente mais intensa nas primeiras horas da noite, como foi observado por Oke (1982). Complementa-se também a este fator o resfriamento mais rápido das áreas rurais em relação às áreas urbanas próximas, aumentando suas diferenças de temperatura.

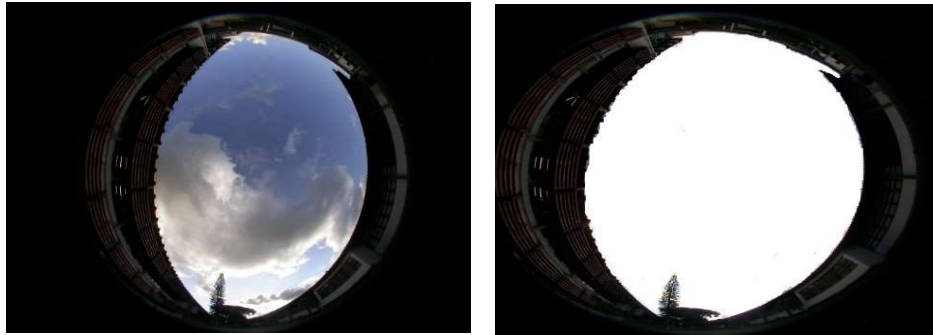
O segundo elemento se refere ao Fator de Visão do Céu (“FVC” ou “SFV”, em inglês) (GARTLAND, 2010), outra maneira de análise da influência das construções. Através da observação da fração de céu visível em determinado local, é obtida uma relação geométrica (variando de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo de 0, menor o FVC) que demonstra a proximidade das construções e sua conseqüente contribuição para a elevação térmica (NAKATA-OSAKI, 2016).

Assim, observa-se que o céu é um elemento essencial para o balanço de energia de um local. Isso porque em espaços mais abertos (com maior FVC), a radiação solar de ondas longas é refletida rapidamente para outros locais, espalhando-se na atmosfera, enquanto em regiões com maior densidade construída, a reflexão e absorção da radiação ocorre diversas vezes em vários pontos propícios, mantendo o calor retido, como aponta o estudo feito por Dirksen *et al.* (2019). Ressalta-se que a vegetação também é considerada para o levantamento do FVC, porém, ao contrário das construções, ela possui contribuição positiva para o ambiente, pelo resfriamento no processo de evapotranspiração.

Os modos de obtenção do FVC de um local podem variar de acordo com os objetivos e condições de cada pesquisa, entretanto um dos mais utilizados é por meio da câmera com lente “olho-de-peixe”, com a qual pode-se delimitar a porção visível do céu dentre as construções. A imagem 2 exemplifica a obtenção do FVC de um recorte urbano.

Finalmente, a presença de áreas verdes dentro dos espaços urbanos também é um fator essencial para reduzir a intensidade das ICUs. Áreas urbanas com vegetação arbórea abundante podem apresentar temperaturas menores até do que espaços rurais, segundo Garcia (1996), caracterizando a condição denominada de “Ilhas de Frescor” (JAUREGUI, 1997). Assim, evidencia-se que as ICUs não são fenômenos homogêneos e variam de acordo com o uso do solo urbano e suas características naturais.

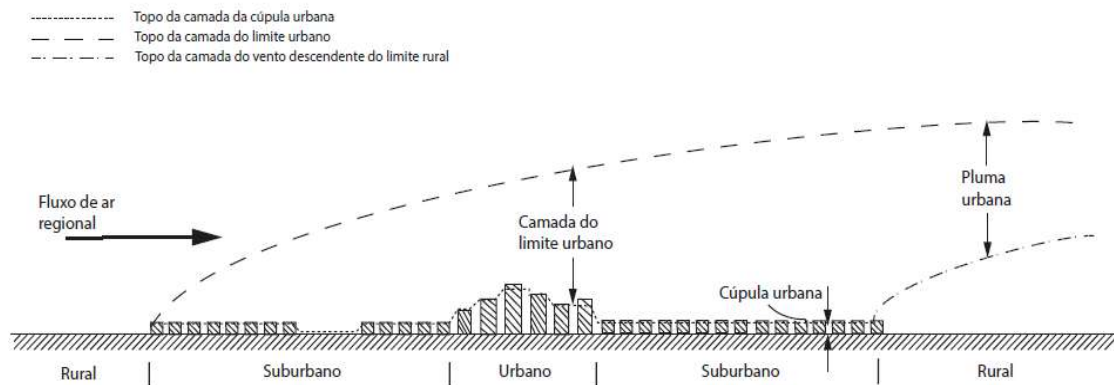
Imagem 2 – Exemplo de utilização de câmera “olho-de-peixe” para obtenção do FVC



Elaboração própria (2021)

Em um auxílio para a compreensão de ICUs, Oke (1976, 1995) as segmentou em duas principais camadas: a “*Urban Boundary Layer*” (UBL), camada superior e de maior amplitude – limite da interferência humana na atmosfera urbana, que compreende a influência antrópica no balanço energético em escala regional; e a “*Urban Canopy Layer*” (UCL), área menor, de caráter intraurbano e microclima limitado pelo topo das construções humanas (sendo maior em áreas verticalizadas e menor em áreas abertas), se constituindo como a área diretamente influenciada pela geometria destas, fazendo-se fundamental, pois é onde ocorre a maior parte das atividades cotidianas.

Imagem 3 – Representação Esquemática das Camadas das Ilhas de Calor Urbano



Fonte: adaptado de Oke (1976)

Também ressalta-se, junto a Jauregui (1997), que as ICUs são mais expressivas em noites de tempo estável, ou seja, sem nebulosidade ou precipitação e com pouca intensidade de ventos, já que a movimentação destes, por dissipar mais rapidamente o calor, e a presença de nebulosidade (que diminui a amplitude térmica local) auxiliam a reduzir sua intensidade, como apontam Gomes e Lamberts (2009) e Nakata-Osaki (2016).

Estas condições são abundantes dentro dos chamados sistemas pré-frontais, caracterizadas pelo avanço da “frente” fria, isto é, da entrada da massa Polar Atlântica (*mPa*), única massa de ar frio atuante no território brasileiro (tipicamente controlado por massas de ar quentes – tropicais e equatoriais), caso do interior do estado de São Paulo (MONTEIRO, 1973; AYOADE, 1996).

Na fase inicial deste sistema, o Prenúncio, a pressão atmosférica se eleva (massas de ar frio possuem alta pressão atmosférica), há um aumento da nebulosidade devido ao seu avanço, porém a precipitação ocorre apenas depois, na fase de Avanço, na qual ocorre o encontro de massas de ar com temperaturas diferentes, causando a chuva frontal (SEIXAS, 2015).

Destaca-se que a fase seguinte, Domínio da *mPa* na região, em que há estabilidade atmosférica e queda de temperatura, geralmente é extremamente curta ou praticamente inexistente durante os meses de calor elevado (novembro a fevereiro), devido à forte insolação e atuação de massas de ar quente, tipicamente tropicais. Assim, neste período, o sistema pré-frontal é mais curto, causando principalmente precipitações.

A observação deste processo é relevante para o estudo das ICUs devido ao fato destas serem mais expressivas nas fases iniciais dos sistemas pré-frontais, nas quais há um aumento gradativo da temperatura do ar, concomitantemente à uma redução de sua umidade relativa, até chegarem aos seus limites máximos e mínimos, respectivamente, em que ocorre a precipitação (SEIXAS, 2015). Estas condições, aliadas à estabilidade atmosférica típica desse momento, são essenciais para a intensificação de uma ICU.

Por fim, destaca-se que os fenômenos de ICUs são intensificados em momentos de ondas de calor, especialmente à noite, em uma sinergia entre ambos. Nestes casos, não apenas há o aumento da temperatura dos espaços urbanos e rurais, mas também nas diferenças térmicas entre eles. Este processo ocorre devido à falta de umidade no solo urbano, à maior absorção da radiação solar e às alterações nos fluxos de calor, como apontam os estudos de Li e Bou-Zeid (2013), Li *et al.* (2015) e Zhao (2018).

2.2.2 Consequências das ICUs

Em regiões temperadas ou subpolares, as ICUs podem, em alguns casos, apresentar um efeito relativamente benéfico, ao reduzir a rigoriedade do inverno

e as consequentes necessidades de aquecimento artificial em ambientes internos (EMMANUEL E KRÜGER, 2012; HE, 2018). Ressalta-se que isso é possível apenas quando não são considerados os efeitos negativos da poluição, um dos fatores contribuintes para ICUs. Inclusive, um estudo feito por Wafflle *et al.* (2017) aponta para a possibilidade de utilizar o efeito de aquecimento da ICU em Toronto para o cultivo de gêneros alimentícios que não se desenvolveriam tipicamente em seu clima tradicional dentro de seu espaço urbano.

Entretanto, de modo geral, as implicações das elevações térmicas são essencialmente negativas, especialmente em localidades de latitudes baixas e médias – as quais devem concentrar mais de metade da população mundial até 2050 (RODRÍGUEZ E D’ALESSANDRO, 2019): cidades tropicais, desérticas e/ou com verões quentes ou secos, como apontam Norton *et al.* (2015).

Os impactos gerados pelas ICUs são diversos e variam de acordo com as condições de cada local (GARTLAND, 2010; STEWART E OKE, 2012; NORTON *et al.* 2015; HE, 2018; AGUILAR, 2019). Porém, no geral, compreendem os seguintes aspectos: aumento do consumo energético para o resfriamento artificial interno (o qual intensifica as ICUs, criando um ciclo constante); redução nos índices de conforto térmico e ambiental urbano (gerando stress térmico); alterações nas taxas de pluviosidade e umidade de ambientes urbanos; danos à saúde e aumento nas taxas de mortalidade; e adulteração de dados climatológicos em estações urbanas.

Observa-se que todos estes efeitos podem causar prejuízos socioambientais aos espaços urbanos, mesmo em países desenvolvidos e/ou de climas mais frios, como observa Wang *et al.* (2016), afirmando que pequenas elevações na ICU de Toronto podem resultar em um aumento da taxa de mortalidade local. Porém, é nos países subdesenvolvidos, especialmente localizados na zona intertropical, que os impactos das elevações térmicas são mais sentidos, embora haja poucas pesquisas que os relatem detalhadamente.

No caso brasileiro, em que grande parte do território já apresenta naturalmente condições de desconforto, como verões com temperaturas bem elevadas e invernos com baixas taxas de umidade (AYOADE, 1996), os rigores climáticos e o desconforto térmico se tornam ainda mais intensos, afetando especialmente as populações vulneráveis, como as que habitam regiões periurbanas e/ou marginalizadas.

Como exemplo desta situação, destacamos a análise de Lima e Rueda (2018), que examinaram séries climáticas históricas da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) e concluíram que houve um acréscimo na pluviosidade local devido ao aumento concomitante da temperatura. Porém, o maior índice pluviométrico concentrou-se apenas na estação chuvosa, ocorrendo principalmente eventos chuvosos isolados de grande magnitude (houve redução na ocorrência de chuvas leves), acarretando mais enchentes e danos à população, principalmente às de baixas classes socioeconômicas.

2.2.3. Práticas de mitigação das Ilhas de Calor Urbano

Com o aumento dos estudos climatológicos urbanos, ocorreu também um crescente interesse em buscar e propor soluções viáveis no combate às ICUs. De forma geral, utiliza-se o termo “mitigação” das ICUs, pois os espaços urbanos são ambientes muito alterados, sendo que a proscrição total dos efeitos da ação humana se faz improvável, cabendo apenas tentativas de redução.

Resumidamente, estas práticas buscam amenizar os impactos dos fatores geradores de ICUs. Assim, são propostos novos sistemas de pavimentação e materiais construídos em geral, áreas de arborização e/ou de corpos d’água, reordenamento de padrões construtivos, além de práticas energéticas mais eficientes. Ressalta-se que estas propostas devem ser empregadas de maneira articulada, com um extenso planejamento prévio e contínuo, para aumentar sua eficácia, como aponta Mohajerani *et al.* (2017).

Como obra de referência desta atuação, destaca-se o trabalho de Gartland (2010), que descreve detalhadamente não só práticas de melhoria dos ambientes urbanos, mas como estas se mostram mais vantajosas em termos econômicos, sociais, urbanísticos e ambientais, caso sejam aplicadas pelos planejadores urbanos.

A intensa pavimentação das cidades, a qual recobre grande parte de suas áreas, em espaços como vias de tráfego, calçadas e estacionamentos, é apontada como um dos fatores principais para a formação de ICUs. Como atualmente se faz pouco viável que se projete uma cidade com presença reduzida de automóveis, são propostas alternativas para mitigar estes impactos.

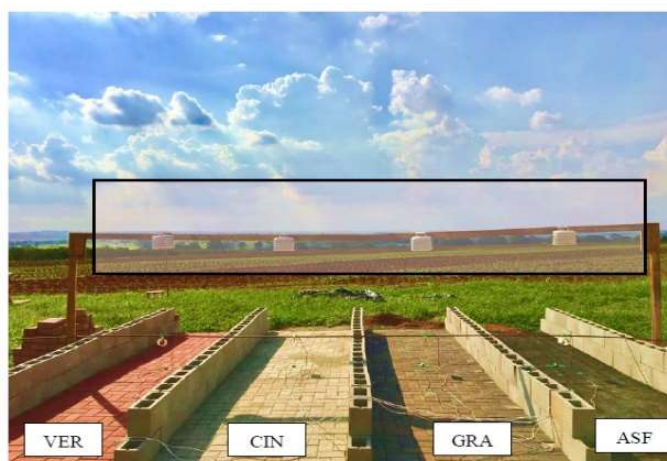
A primeira delas se refere ao aumento do albedo destas superfícies com a utilização de “pavimentos reflexivos”, seja usando materiais claros em sua

construção, ou simplesmente pintando a pavimentação tradicional existente com cores mais claras (FERRARI *et al.*, 2020). Destaca-se que o albedo do asfalto escuro não costuma ultrapassar 0,1, tendo baixíssima reflexão, enquanto asfaltos ecológicos e/ou claros, chamados “pavimentos frescos” (SEN & ROESLER, 2020), podem apresentar albedos de até 0,7 (GARTLAND, 2008).

A segunda prática viável corresponde à criação de pavimentos permeáveis, que possuem uma série de benefícios, como reduzir as taxas de escoamento superficial e conseqüentemente inundações (HAMIN, 2011), além de combater a formação de ICUs ao reter água em suas estruturas, que levará mais tempo para evaporar, resfriando o ambiente no entorno, como aponta Ferrari *et al.* (2020). Os autores também afirmam que o principal método deve ser a utilização conjunta de pavimentos permeáveis e reflexivos, que pode e deve ser incentivada como mitigadora da elevação das temperaturas urbanas.

Em caráter nacional, destaca-se a pesquisa de Kowalski (2019), o qual utilizou uma área experimental para reproduzir em escala reduzida os desempenhos térmicos de pavimentos com diferentes colorações e albedos (cinza, vermelho, concreto grafite e asfalto comum), observando quais apresentaram maior eficácia energética, além de relacioná-los com aspectos de cânion urbano e vento, como pode ser observado na imagem 4.

Imagem 4 – Área experimental de pavimentos em escala reduzida
Engenheiro Coelho/SP



Fonte: Kowalski (2019)

O autor concluiu que pavimentos com menor calor específico e maior refletância solar, aliados a maiores relações H/W e orientações geográficas que

aproveitem o vento, podem contribuir significativamente para reduzir ICUs e para o conforto térmico em ambientes abertos, especialmente se as características atmosféricas específicas do local forem consideradas.

Outra alternativa diz respeito ao planejamento dos espaços construtivos de acordo com as taxas de insolação, velocidade e direção do vento de cada local. Diversos estudos (KRÜGER, 2015; DIRKSEN *et al.*, 2019; SEN & ROESLER, 2020) ressaltam esta prática, apontando, por exemplo, que as áreas de expansão urbana podem ser planejadas de acordo com a orientação dos ventos. Com isso, ao invés de reduzir a velocidade do vento e seus potenciais resfriadores, é possível aproveitar sua atuação para mitigar as ICUs, por auxiliar no transporte do calor (SEN & ROESLER, 2020).

A mesma situação se refere à insolação, pois o desenho construtivo de um local pode ser projetado para aproveitar o máximo de radiação solar, em locais frios, ou reduzi-la (em conjunto com áreas de arborização), em ambientes tropicais e quentes (HODDER E PARSONS, 2007), diminuindo as necessidades de aquecimento ou resfriamento artificial.

Ressalta-se que os conceitos de FVC e Cânion Urbano se fazem fundamentais na elaboração destas medidas, pois auxiliam não apenas na proposição de novas áreas, mas também na alteração das pré-existentes. Destaca-se também que estas medidas podem proporcionar reduções nas fontes de emissão de calor antropogênico, outra maneira de mitigar as ICUs, como apontam Verdonck *et al.* (2018).

Os efeitos da existência de arborização e/ou de áreas verdes são evidentes na mitigação de ICUs, pois as plantas tornam os ambientes mais úmidos e sombreados, auxiliam nos fluxos de calor latente pela evapotranspiração, reduzem a produção de calor sensível, que é também responsável pelo aquecimento do ar. Isso faz com que espaços vegetados, mesmo no centro de grandes áreas urbanas, apresentem temperaturas relativamente reduzidas, caracterizando as chamadas “Ilhas de Frescor” (GARCIA, 1996; JAUREGUI, 1997).

Contudo, diversos estudos destacam que o tipo de vegetação utilizado, além da localização, concentração e distribuição das áreas verdes são fatores essenciais para que se atinja uma maior eficácia. Norton *et al.* (2015) destacaram a necessidade da existência de uma “infraestrutura verde”, ou seja, uma rede de

espaços vegetados que deve ser integrada ao planejamento urbano de acordo com as condições de cada fração urbana. Masoudi e Tan (2019) analisaram as diferentes influências que o padrão de áreas verdes em Cingapura possui para a mitigação de ICUs, buscando aperfeiçoar os benefícios.

Destaca-se também o estudo de Pielke e Avissar (1990), que evidencia como diversos tipos de cobertura vegetal apresentam propriedades térmicas de intensidades distintas, de acordo com características como albedo, rugosidade e altura, demonstrando que algumas vegetações (especialmente árvores nativas) são mais propícias para mitigar ICUs.

Uma possibilidade para minimizar as necessidades de utilização de grandes espaços urbanos destinados à vegetação (condição onerosa em espaços urbanos densamente ocupados) é o emprego de telhados e edifícios verdes (MOHAJERANI *et al.*, 2017), os quais apenas adaptam a estrutura construtiva existente, tornando as construções ambientalmente mais eficientes, algo que pode ser realizado tanto pelo setor público quanto pelo privado.

Finalmente, ressalta-se a benéfica utilização de corpos d'água (naturais ou artificiais), novamente de maneira integrada ao desenho urbano, devido ao seu elevado potencial de resfriamento do ambiente no entorno, conceito denominado "Ilha de Água de Resfriamento" (MASIERO & SOUZA, 2013).

Xue *et al.* (2019), utilizando como parâmetro duas cidades chinesas, demonstraram a relevância de arrefecimento dos corpos d'água, a qual possui capacidade maior até mesmo do que a de espaços vegetados. Para sua maior eficácia, os autores ressaltam que uma maior área e uma conectividade dos corpos d'água deve ser incentivada, além da sua articulação com áreas verdes próximas.

Apesar da extensa produção científica recente baseada em estratégias mitigadoras, destaca-se dois pontos finais a serem considerados: primeiramente, ainda há a necessidade de uma maior incorporação destas ações no planejamento urbano cotidiano, pois, especialmente nas cidades brasileiras, ainda se observa relativamente poucas medidas tomadas no âmbito prático.

Em segundo lugar, como apontam Martilli *et al.* (2020), é fundamental que estas ações sejam focadas nos aspectos causadores do desconforto térmico e/ou fontes de aumento térmico, tais como as propriedades termais dos materiais construídos, e não na redução da diferença de temperatura entre urbano e rural,

pois esta depende de uma série de fatores, o que faz com que não necessariamente ocorra uma melhora com a redução nas condições climáticas dos espaços urbanos.

Desta forma, ressalta-se a necessidade de um planejamento estratégico e integrado das práticas mitigadoras, adequando-as às condições específicas de cada espaço e definindo, assim, quais ações serão tomadas em um local, atingindo maior eficiência na redução da intensidade de ICUs.

2.3. AS ILHAS DE CALOR EM AMBIENTES PERIURBANOS

Historicamente, as análises microclimáticas realizadas nos espaços urbanos priorizaram as áreas centrais, onde a concentração populacional, a densidade e altura das construções são geralmente mais expressivas, fatores já apontados como cruciais para a formação de ICUs.

Ambientes periurbanos, entendidos com Castells (1973) como um espaço de interface próxima entre o “urbano” e o “rural”, tradicionalmente foram negligenciados, inclusive em países desenvolvidos, e aponta-se dois fatores como possíveis causas para este cenário: primeiramente, estas áreas apresentam um menor grau de ocupação humana e densidade construtiva. Em segundo lugar, há um enfoque histórico do planejamento urbano mundial de se voltar às regiões centralizadas (tradicionalis áreas de sedes empresariais, maiores fluxos comerciais e populacionais, além de maior ocupação histórica) tendo menor atenção às periferias, como apontam Geneletti *et al.* (2017) em sua revisão histórica sobre planejamento em áreas periurbanas.

Foi apenas recentemente que as regiões dos entornos urbanos passaram a ser mais consideradas pela climatologia urbana internacional, como denotam os estudos de Zhang *et al.* (2013), Polydoros e Cartalis (2015), Xue *et al.* (2019) e, no Brasil, por Anjos *et al.* (2013). Ainda assim, estes trabalhos representam uma pequena fração comparada ao expressivo montante atual de pesquisas relacionadas às ICUs e outros fenômenos microclimáticos urbanos.

Porém, destaca-se que o espaço urbano se configura como um conjunto complexo e dotado de diversas atividades reguladoras (SANTOS, 1999), sendo que, no contexto mundial atual de expressiva urbanização, a tradicional dicotomia rural-urbano (BACELAR E BEZERRA, 1999) e centro-periferia (GENELETTI *et al.*, 2017) já não se configura de maneira tão expressiva, pois a

atuação do capital (CORREA, 1999) reordena os espaços de acordo com seus interesses, fazendo com que novas áreas atinjam destaque, enquanto outras perecem. Isso ocorre também nas regiões periurbanas, alvos de novos empreendimentos imobiliários e empresariais (KUBRUSLY, 2000), de crescimento urbano recente e da modernização do espaço agrícola circundante (GRAZIANO DA SILVA, 1993; ELIAS, 2012).

Assim, o espaço urbano é um grande e complexo combinado, com diversas formas de uso do solo (STEWART & OKE, 2012), sendo que as regiões periurbanas também apresentam diversidades construtivas e formas de ocupação humana e, conseqüentemente, problemas relacionados às ICUs.

Além disso, se os processos de urbanização não se deram de maneira igual ao redor do globo, resultando em espaços urbanos diversificados, o mesmo ocorre com suas áreas periféricas, as quais apresentarão grande variabilidade organizacional e funcional, tanto entre cidades diferentes quanto considerando periferias distintas dentro do mesmo espaço urbano (GENELETTI *et al.*, 2017).

No caso brasileiro, ressalta-se a desigualdade histórica que diferenciou, nas últimas décadas, as regiões privilegiadas pelo poder especulativo e imobiliário daquelas negligenciadas pelo planejamento público e privado, como muitas vezes é o caso das periferias, que comumente apresentam situações como carências infraestruturais e ocupação desordenada do solo, especialmente no contexto nacional de crescimento urbano recente e acelerado.

Vale destacar também que a comparação clássica para a obtenção de uma ICU, ou seja, a diferença observada entre a temperatura no espaço urbano para o espaço rural do entorno, expressa na relação: $ICU = \Delta T_{urb} - \Delta T_{rur}$, não é totalmente apropriada, pois o rural também se caracteriza como um meio alterado antropicamente. Complementarmente, não há dados precisos anteriores à ocupação humana rural ou urbana de um local para uma comparação histórica das médias termais em ambos os espaços.

Assim, nas análises de formação e intensidade de ICUs, apenas a diferenciação básica entre espaços climáticos urbanos e rurais não é suficiente, como apontam Stewart e Oke (2012), ressaltando a necessidade de analisar as condições específicas de uso do solo para cada área urbana, e suas conseqüências correspondentes.

Martilli *et al.* (2020) ressaltam a relevância do meio rural para a análise das ICUs, já que sua “magnitude é uma função tanto de características urbanas quanto rurais”, sendo que “duas cidades com estruturas, materiais, cobertura e populações muito similares podem experimentar magnitudes de ICUs diferentes, baseadas apenas nas características distintas de seus entornos rurais”.

Os autores apontam ainda para o equívoco de, no combate ao aquecimento urbano, se levar em consideração apenas os fatores urbanos em si, sem analisar as influências do rural, fazendo com que a busca se limite a reduzir a magnitude de temperatura urbano-rural, e não necessariamente as origens para as elevadas médias térmicas urbanas.

Estas condições são ainda mais fundamentais na caracterização atmosférica das áreas periféricas, nas quais o meio rural circundante, com suas variações de formas de uso agrícola, deve ser levado em grande consideração, por ser um dos principais influenciadores das condições climáticas dos ambientes periurbanos, como apontam Hawkins *et al.* (2003).

Em estudo realizado na periferia de Nagano (Japão), Stewart *et al.* (2014) observaram a influência dos campos de arroz para as ICUs de áreas próximas, intensificando suas magnitudes quando os campos estão secos. Esse aspecto é também assinalado por Roth (2007), ao revisar estudos realizados na zona intertropical, os quais observaram em diversas cidades que a intensidade das ICUs é menor na estação chuvosa, pois os solos úmidos das áreas rurais aumentarão sua admissão térmica, ampliando seu potencial de arrefecimento.

A influência do rural é também apontada por Mendonça (1995), em análise sobre o município de Londrina/PR, na qual observou que:

cidades médias ou pequenas em meio a uma região de forte produtividade agrícola e sem espaços verdes possuem seu entorno rural como grande determinante do clima urbano, gerando grandes amplitudes térmicas (MENDONÇA, 1995).

Amorim *et al.* (2015) observaram, em estudo realizado em Presidente Prudente/SP, cidade com condições similares às de Piracicaba, que suas áreas periurbanas apresentaram diversas configurações térmicas devido às características físicas e socioeconômicas de cada local. Assim, as áreas periurbanas, transição entre o urbano e o rural, terão influência tanto dos fatores tradicionais para a formação de ICUs, tais como geometria e densidade urbana,

que também estão presentes em espaços periurbanos, quanto das configurações rurais, caracterizando uma condição única que necessita de maior atenção pelos climatologistas urbanos, que poderão assessorar mais precisamente o planejamento destes ambientes.

Para isso, é necessário observar a forma de ocupação destes locais, que, no cenário brasileiro, pode apresentar grande variedade (ocupação desordenada por população de baixa renda, conjuntos habitacionais de interesse social, projetos imobiliários verticais, condomínios afastados e distritos industriais) em conjunto com as condições do espaço rural. Estas dizem respeito a aspectos naturais, tais como tipo de solo e sua umidade, tipos e quantidade de cobertura vegetal (OKE *et al.*, 2017) e, especialmente, às diversas formas de uso do solo agrícola, como as variações tradicionais de cultivo.

3. ESTUDOS MICROCLIMÁTICOS RELACIONADOS A EXPANSÃO E PLANEJAMENTO DOS ESPAÇOS URBANOS

O processo de urbanização em escala mundial, intensificado a partir do advento das atividades industriais no séc. XVIII, restringiu-se inicialmente às nações desenvolvidas em geral. Porém, na segunda metade do séc. XX, momento de grande crescimento populacional e concomitante a um intenso êxodo rural generalizado, a urbanização tornou-se um fenômeno global. Atualmente, mais de metade da população mundial habita áreas urbanas (ONU, 2015).

Desta maneira, observa-se uma caracterização dupla: as alterações antrópicas na atmosfera se intensificam, assim como as necessidades por uma eficiente atividade de planejamento das cidades que possa atender às múltiplas demandas de suas populações. Especialmente nos países subdesenvolvidos, em que o crescimento urbano se configurou como um processo desordenado, existem sérios problemas nestes espaços que continuam a crescer em um ritmo acelerado ainda no séc. XXI (ONU, 2012; KRÜGER, 2015).

Este cenário abrange também a questão microclimática, pois não necessariamente as alterações antrópicas são mais intensas nos países subdesenvolvidos, porém estes apresentam cidades com enormes desigualdades no uso e configuração de suas áreas, de acordo com a atuação

segregacionista do capital (SANTOS, 1996b; ROLNIK, 2015), a qual privilegia alguns espaços para investimento, em detrimento de outros. Esta disparidade socioeconômica, observada territorialmente, apresenta distintas consequências atmosféricas, as quais afetam principalmente os setores sociais mais carentes.

3.1. BREVE CONTEXTO DE CRESCIMENTO URBANO NO BRASIL

O processo de urbanização brasileira relacionou-se primeiramente à sua industrialização tardia, ocorrida majoritariamente a partir do início do séc. XX (devido à crise econômica de 1929, que afetou a produção cafeeira, e ao processo de substituição de importações motivado pela 1ª Guerra Mundial), que incentivou fluxos populacionais às cidades, alterando parcialmente a lógica agrícola do território nacional (MARICATO, 2003; OTERO, 2016).

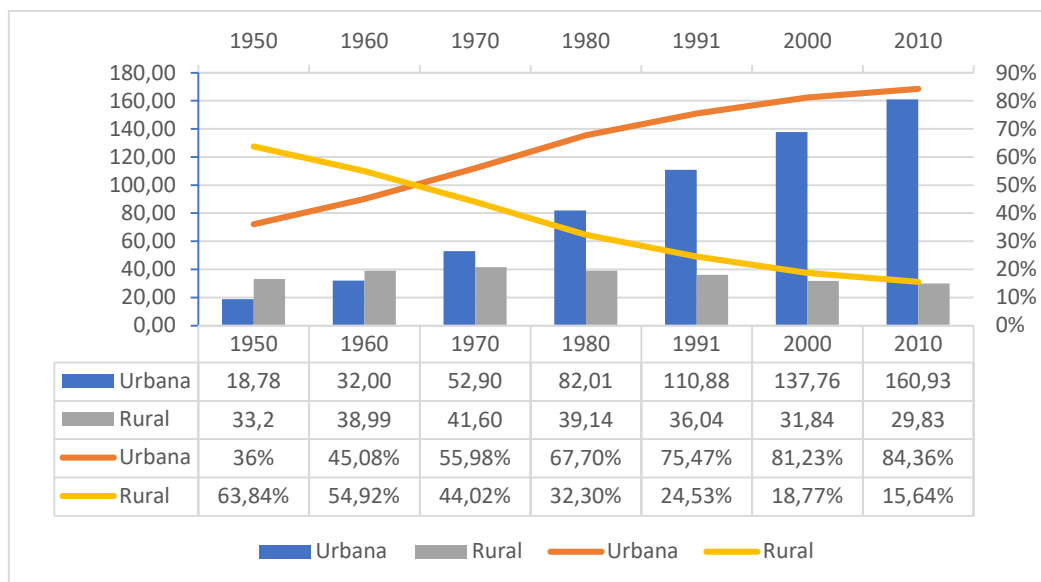
Porém, é principalmente a partir dos anos 1950 que o processo de urbanização se torna extremamente expressivo, devido a três fatores primordiais: a modernização de atividades agrícolas (substituindo progressivamente a mão de obra humana pela mecanização e intensificando a concentração de terras no espaço agrário), a vinda de empresas transnacionais intensificadoras da industrialização brasileira (DEAK, 1991) e o acelerado crescimento populacional brasileiro vivido a partir deste momento.

Assim, o Brasil passou por uma rápida transição de um país de população rural para urbana em poucas décadas: em 1950, 36,1% da população era urbana, passando a ser maioria em apenas 20 anos (55,9% em 1970) e atingindo um nível de urbanização muito elevado (84,3% do total, no censo de 2010, ((IBGE – séries estatísticas))), como pode ser observado no Gráfico 1. Isto ocorreu juntamente com um intenso crescimento populacional: de 52 milhões de habitantes em 1950 para 190 milhões em 2010, e estimativa de 212 milhões para 2020 (IBGE – séries estatísticas).

Este processo se deu de maneira espacialmente desigual, concentrando-se na região Centro-Sul, de maior expressão econômica, industrial e de infraestrutura (CANO, 2007; OTERO, 2016), e inicialmente também em relativamente poucos centros urbanos, os quais viveram enorme aumento, caracterizando, assim, um fenômeno de “metropolização” (SANTOS & SILVEIRA, 2001). Desta forma, algumas áreas urbanas apresentavam uma

parcela significativa da população brasileira (com questões urbanas mais intensas), condição que se ainda se mantém parcialmente.

Gráfico 1 – Evolução da população urbana e rural no Brasil, em termos percentuais e absolutos (milhões de habitantes)



Fonte: Adaptado de séries estatísticas do IBGE

Em décadas recentes, as taxas de crescimento das chamadas “cidades médias” (SPÓSITO, 2001) passaram a ser proporcionalmente maiores do que as das metrópoles, fazendo com ocorra o que é designado como “desmetropolização” ou “desconcentração concentrada” (NEGRI, 1996; STEINBERGER E BRUNA, 2001), ou seja, uma relativa diminuição desta concentração populacional (SANTOS, 1993).

Isso ocorre porque os grandes espaços urbanos passaram a ser menos atrativos para os agentes econômicos, que buscaram novas áreas, notadamente as cidades médias. Destaca-se também a ação estatal, direcionando investimentos a estes locais (como a instalação de parques industriais), para alcançar maior desenvolvimento socioeconômico (OTERO, 2016). Porém, a polarização mais expressiva ainda permanece sendo exercida pelas metrópoles, justificando o emprego do termo “concentrada” (AZZONI, 1986).

Este processo intensificou as demandas por planejamento nos espaços urbanos medianos, já que eles também passaram por um processo de crescimento urbano intenso e acelerado (NEGRI, 1996), acarretando um

aumento dos seus problemas socioambientais, como é o caso de Piracicaba/SP (NEGRI, 1996; OTERO, 2016).

As consequências deste fenômeno desordenado, em conjunto com a forte desigualdade social brasileira, são bastante negativas: déficit de moradias e habitações precárias, poluição, índices de violência elevados, mobilidade urbana, saneamento básico e serviços públicos deficitários, entre muitos outros.

Dentro da área de análise desta pesquisa, observa-se que este contexto contribuiu para ambientes urbanos com severos problemas atmosféricos, pois a combinação de fatores como expressiva impermeabilização do solo, canalização de cursos d'água, projetos arquitetônicos e urbanísticos pouco adequados (ou mesmo inexistentes), altos índices de poluição do ar, grande utilização de veículos movidos a combustão, verticalização excessiva de algumas áreas e supressão de áreas verdes cria as condições ideais para um espaço com estresse ambiental e para a formação de ICUs.

Ressalta-se ainda o fato de que grande parte do território nacional se caracteriza por clima tropical (AYOADE, 1996), tipificado por grande quantidade de dias com forte insolação e altas temperaturas ao longo do ano, fazendo com que as ICUs aumentem o desconforto devido à elevação térmica, demandando maior consumo energético para resfriamento artificial, como apontam Fernandes e Masiero (2020).

Desta maneira, o desconforto térmico observado nas cidades nacionais é consequência também do problemático processo de urbanização brasileira (além dos tradicionais aspectos do desenho urbano observado nas cidades em geral), sendo, portanto, mais um aspecto a ser levado em consideração pelos agentes urbanistas, objetivando um incremento na qualidade de vida da população brasileira e urbana como um todo.

3.2. CONFORTO AMBIENTAL URBANO

Como apontado, o processo de urbanização brasileiro acarreta demandas variadas para uma população crescente, as quais devem ser sanadas por uma atividade planejadora eficiente, inclusiva e adequada à realidade de cada espaço urbano. Dentro da esfera atmosférica, estas demandas se referem às implicações negativas da ação humana no clima, que ocasionam distúrbios climáticos e meteorológicos, trazendo prejuízos socioeconômicos e ambientais,

tais como como deslizamento de terra, enchentes, estresse térmico, poluição do ar entre outras.

Existem diferentes estratégias possíveis de serem empregadas pelos planejadores com o objetivo de amenizar essas consequências, sendo uma das principais a busca pela obtenção do conforto térmico (ASHRAE, 2005). O conforto térmico compreende a necessidade de alcançar uma condição de satisfação da população para com as condições ambientais de seu entorno, o que significa também uma menor necessidade de realizar esforços ao executar tarefas cotidianas, buscando atingir o mais próximo possível de um status de “neutralidade energética”. Assim, entendendo a temperatura do ar como um fator crítico para a configuração atmosférica geral (positiva ou negativa), o conforto térmico deve ser um objetivo crucial nas práticas de intervenção para melhoria ambiental dos espaços urbanos.

Destaca-se primeiramente que o conceito de conforto se divide em interno, referente ao ambiente interior das edificações, escopo que compete principalmente aos arquitetos e engenheiros, e o externo, que diz respeito às condições atmosféricas urbanas, competência maior da climatologia, aliada ao urbanismo. Contudo, ambos estão intrinsecamente relacionados, pois uma melhoria nas condições externas de conforto, por exemplo, pode auxiliar na redução das necessidades térmicas internas, como aponta Krüger (2015).

No estudo pioneiro realizado por Monteiro (1976), o conforto térmico ganha destaque, dentro do que o autor denominou “Sistema Clima Urbano”, o qual foi dividido em três subsistemas menores: o primeiro é o termodinâmico, responsável pelas análises dos padrões de ventilação, umidade e temperatura na atmosfera – e, por isso, o foco de análise dentro desta pesquisa –; o segundo é o físico-químico, com abordagens sobre a qualidade do ar, observando a poluição causada pela ação humana; e o terceiro, o canal hidrometeorológico, que analisa especialmente os grandes fenômenos meteorológicos, tais como tempestades e tornados, e seus possíveis impactos à população.

Dentro da esfera de análise do subsistema termodinâmico, Monteiro (1976) aponta justamente o conforto térmico como o principal canal de percepção, pois ele serve tanto como referência para as análises do balanço energético intraurbano (já que é influenciado pela temperatura do ar, pela

umidade atmosférica e pelos ventos), quanto como um importante objetivo a ser atingido pelas atividades humanas em geral.

Como apontam Katzschner (2006), Krüger e Rossi (2011) e Krüger (2015), os benefícios na obtenção do conforto ambiental abrangem a redução de gastos energéticos empregados no aquecimento ou resfriamento artificial, ventilação adequada a cada ambiente, ocupação mais efetiva de espaços abertos, redução de índices de poluição e melhorias na saúde da população urbana.

No caso de países tropicais e subdesenvolvidos, com urbanização expressiva e contínua, e onde os processos construtivos muitas vezes negligenciam aspectos climáticos, Rodríguez e D'Alessandro (2019) apontam para uma situação de crescente necessidade de emprego de sistemas de resfriamento artificial, contribuindo para maiores gastos energéticos e impactos ambientais, além de prejuízos socioeconômicos.

Porém, observa-se que as condições necessárias para obtenção do conforto podem apresentar grande variabilidade, pois elas dependem da relação direta existente entre os modelos arquitetônicos e urbanísticos para com as características climáticas de um local (COCCOLO *et al.*, 2016). Isso ressalta a necessidade de conhecimento prévio das condições atmosféricas de um local para a realização de novas construções, ou mesmo nas alterações das propriedades físicas dos materiais construtivos já existentes.

Para que seja possível mensurar uma classificação que, por muitas vezes, é tida como subjetiva, pois é referente também a aspectos fisiológicos, uma série de índices foram criados, buscando facilitar e tornar mais objetivo o trabalho dos envolvidos na área. Chen e Ng (2012) fizeram uma análise de diversos índices, classificando-os em duas categorias metodológicas principais: “métodos de estado estável”, ou seja, as condições necessárias que o ambiente físico possua para que o corpo humano possa atingir o equilíbrio térmico, e “métodos de estado em movimento ou instáveis”, que partem de observações fisiológicas para buscar o conforto.

Cita-se brevemente como exemplos o índice “PET” (Temperatura Equivalente Fisiológica, na sigla em inglês) e o “PMV” (Voto Médio Predito), de acordo com Kastzchner *apud* Fanger (2006); o índice UTCI (Universal Thermal Climate Index); além da carta bioclimática de Olgay (1963). Estes índices aliam

observações empíricas a dados estatísticos para a realização de diagnósticos, facilitando o emprego de ações posteriores.

Ressalta-se que os métodos de busca pelo conforto podem apresentar diversas possibilidades e variações: ambientes internos ou externos, estações climáticas, fenômenos meteorológicos ou tipos de clima analisados, modelos de utilização, formas de análise, além da relação fisiológica de cada corpo humano para com o ambiente ao seu redor.

Destaca-se que a compreensão deste conceito chave se faz fundamental para todos os envolvidos com a área da climatologia urbana, pois auxilia na elaboração de intervenções urbanas na busca de melhores condições para os seus habitantes. Assim, nesta procura por soluções climáticas e ambientais para as áreas periurbanas analisadas, entende-se que as ações sugeridas devem ter como objetivo a obtenção de um ambiente urbano mais agradável do ponto de vista termal, além de mais eficiente em termos econômicos e produtivos, o que engloba diretamente as concepções do conforto ambiental urbano.

4. O MÉTODO DE ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS (ZCLS)

Como abordado, o espaço urbano possui elevada complexidade, com diversas formas de uso, exibindo assim distintas consequências para o microclima. Por isso, a simples diferenciação entre urbano e rural se faz generalizante e incompleta, até pela variedade de termos possíveis para se definir “urbano” e “rural”, o qual também é diverso, como apontam Stewart e Oke (2012).

Esta complexidade pode dificultar análises mais abrangentes e, como contraponto a isso, Stewart e Oke (2012) desenvolveram um método de classificação e comparação relativamente simplificado que, por utilizar uma padronização através das formas de uso e ocupação do solo urbano, pode ser amplamente aplicado na identificação de possíveis causas da ocorrência de ICUs. Este método consiste nas chamadas “Zonas Climáticas Locais” (ZCL ou LCZ, em inglês) (STEWART E OKE, 2012), baseando-se nas características físicas e de uso de cada região de uma determinada cidade, a partir de um método padronizado de classificação da paisagem.

O objetivo deste método é estabelecer um protocolo de classificação que permita uma comparação mais precisa entre diferentes regiões de uma mesma

cidade. Assim, é possível criar uma base de dados quantitativos e qualitativos mais precisos que possa ser aplicada no mundo todo em estudos microclimáticos.

As ZCLs configuram-se como um marco na climatologia urbana recente ao romper paradigmas tradicionais deste campo de pesquisa e propor uma metodologia de ampla, eficiente e objetiva utilização, como fica evidente nos diversos trabalhos que a empregaram após seu lançamento (FENNER *et al.*, 2017; VERDONCK *et al.*, 2018; KOTHARKAR E BAGADE, 2018; AGUILAR, 2019; BECTHEL *et al.*, 2019).

Souza *et al.* (2020) demonstraram a relevância crescente deste método em um levantamento bibliométrico: os autores observaram que, nos últimos anos, a utilização das LCZs para análise de ICUs é uma constante cada vez mais presente. Contudo, os autores ressaltam para o fato dos artigos de maior relevância e alcance ainda se situarem majoritariamente nos países desenvolvidos, com concentração nos Estados Unidos, Canadá, Europa e Ásia.

De acordo com Stewart e Oke (2012), as ZCLs possuem uma série de contribuições, destacando: uma análise mais apurada da magnitude de ICUs (indo além da comparação tradicional “Urbano – Rural”, analisando as diferenças internas aos espaços urbanos); práticas de modelação do clima urbano, juntamente com previsões do tempo e séries climáticas históricas; e melhora na precisão dos estudos futuros de ICUs.

Todos estes aspectos contribuem para um objetivo final, que é o de assessorar de maneira mais eficiente a climatologia e o planejamento urbano, em parte devido a seus dados mais precisos da caracterização térmica das cidades, e em parte graças à sua linguagem simplificada, passível de maior comunicação com aqueles não pertencentes à área acadêmica.

4.1. CLASSIFICAÇÃO

Os autores tomaram como ponto de partida para as ZCLs a paisagem urbana, no que diz respeito à sua estrutura de superfície (ou seja, densidade e altura das construções) e cobertura (proporção de pavimentação e impermeabilização, por exemplo), além dos materiais construídos e fontes de calor antropogênico existentes na mesma, completando os fatores de formação de ICUs (STEWART E OKE, 2012).

Sua nomenclatura foi criada para evidenciar as caracterizações atribuídas às áreas urbanas, ou seja, estas apresentam uma escala local (interna às cidades), de natureza climática e com forma de representação zonal (a relação entre diversos elementos em um ambiente próximo).

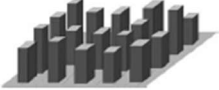
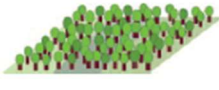


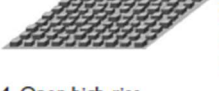
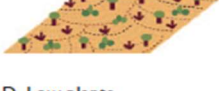
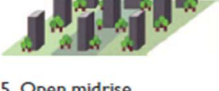
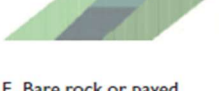




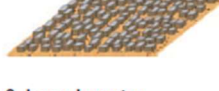




Assim, os territórios podem ser classificados em 17 possíveis ZCLs, diferenciadas por dois métodos principais: de acordo com os tipos e densidades de construções encontrados (*Built Type*), recebendo categorias de “1 a 10”, e com o tipo de cobertura do local (*Land Cover Type*), que possui classificações de “A a G”. Vale destacar que, em cada uma destas áreas, as condições necessitam ser uniformes e, por isso, as ZCLs podem variar muito de tamanho entre si, indo de alguns metros quadrados até vários quilômetros.

Cada zona apresenta características climáticas e termais próprias e diferenciadas entre si, mesmo sendo submetidas às mesmas condições atmosféricas e de relevo (STEWART *et al.* 2014), que irão variar ainda mais em condições máximas de ICUs, ou seja, nas primeiras horas da noite, com características de tempo estável e aberto.

Através desse método, a grande diversidade existente entre áreas urbanas e internamente a estas pode ser classificada para fins de uma análise objetiva, já que são considerados, em cada espaço, os elementos cruciais para a formação de uma ICU, como apontam também Martilli *et al.* (2020).

A partir desse ponto, cabe ao pesquisador relacionar essa base de dados com as condições específicas de sua área de estudo, compreendendo então a relação entre os elementos locais com os aspectos gerais atmosféricos, sendo possível a comparação com outras áreas e estudos diversos.

Tabela 1 – Classificações das ZCLs de acordo com o tipo de construções e cobertura do solo

Tipo construído	Definição	Tipos de cobertura do solo	Definição
 <p>1. Compact high-rise</p>	Mistura densa de altas edificações (mais de 10 andares). Poucas ou nenhuma árvore. Cobertura do solo majoritariamente pavimentada. Materiais construídos a partir do concreto, aço, rocha e vidro.	 <p>A. Dense trees</p>	Paisagem densamente arborizada, com árvores decíduas ou perenifólias. Cobertura do solo majoritariamente permeável (plantas baixas). Sua função zonal é a de florestas naturais, cultivo de árvores ou parques urbanos.
 <p>2. Compact midrise</p>	Mistura densa de edificações médias (3 a 9 andares). Poucas ou nenhuma árvore. Cobertura do solo majoritariamente pavimentada. Materiais construídos a partir de rocha, tijolos e telhas.	 <p>B. Scattered trees</p>	Paisagem levemente arborizada, com árvores decíduas ou perenifólias. Cobertura do solo majoritariamente permeável (plantas baixas). Sua função zonal é a de florestas naturais, cultivo de árvores ou parques urbanos.
 <p>3. Compact low-rise</p>	Mistura densa de edificações baixas (1 a 3 andares). Poucas ou nenhuma árvore. Cobertura do solo majoritariamente pavimentada. Materiais construídos a partir de concreto, rochas, tijolos e telhas.	 <p>C. Bush, scrub</p>	Arranjo aberto de arbustos e pequenas árvores lenhosas. Cobertura do solo majoritariamente permeável (solo exposto ou areia). Sua função zonal é a de vegetação natural ou agricultura.
 <p>4. Open high-rise</p>	Arranjo aberto de construções altas (mais de 10 andares). Abundância de coberturas permeáveis (plantas baixas, árvores espalhadas). Materiais construídos a partir de concreto, aço, rochas e vidro.	 <p>D. Low plants</p>	Paisagem inexpressiva de cultivos ou plantas gramíneas e herbáceas. Poucas ou nenhuma árvore. Sua função zonal é a de pastagens naturais, agricultura ou parques urbanos.
 <p>5. Open midrise</p>	Arranjo aberto de construções médias (3 a 9 andares). Abundância de coberturas permeáveis (plantas baixas, árvores espalhadas). Materiais construídos a partir de concreto, aço, rochas e vidro.	 <p>E. Bare rock or paved</p>	Paisagem inexpressiva de rochas ou coberturas pavimentadas. Poucas ou nenhuma árvore. Sua função zonal é a de desertos naturais (rochas) ou transporte urbano.
 <p>6. Open low-rise</p>	Arranjo aberto de construções baixas (1 a 3 andares). Abundância de coberturas permeáveis (plantas baixas, árvores espalhadas). Materiais construídos a partir de madeira, tijolos, concreto, rochas e telhas.	 <p>F. Bare soil or sand</p>	Paisagem inexpressiva de solo ou areia como coberturas. Poucas ou nenhuma árvore ou plantas. Sua função zonal é de agricultura ou desertos naturais.
 <p>7. Lightweight low-rise</p>	Mistura densa de construções de um pavimento. Poucas ou nenhuma árvore. Cobertura do solo majoritariamente irregular. Materiais construídos leves (madeira, sapé e metais ondulados).	 <p>G. Water</p>	Corpos d'água largos e abertos, como lagos e mares, ou pequenos corpos, como rios, reservatórios e lagoas
 <p>8. Large low-rise</p>	Arranjo aberto de construções largas e baixas (1 a 3 andares). Poucas ou nenhuma árvore. Cobertura do solo majoritariamente pavimentada. Materiais construídos a partir de aço, concreto, metal e rochas.	<p>Propriedades de cobertura do solo variáveis</p> <p>Propriedades de cobertura do solo variáveis ou efêmeras que mudam significativamente de acordo com condições sinóticas, práticas de agricultura ou ciclos de estação.</p>	
 <p>9. Sparsely built</p>	Arranjo esparsa de construções pequenas ou médias em um ambiente natural. Abundância de cobertura do solo permeável (plantas baixas, árvores espalhadas).	<p>b. bare trees</p>	Árvores decíduas sem folhas (inverno). Fator de visão do céu aumentado. Albedo reduzido.
 <p>10. Heavy industry</p>	Estruturas industriais de baixa e média altura (torres, depósitos, pilhas). Poucas ou nenhuma árvore. Cobertura do solo majoritariamente pavimentada ou irregular. Materiais construídos com metal, aço e concreto.	<p>s. snow cover</p>	Cobertura de neve com mais de 10 cm de profundidade. Admissão baixa. Albedo elevado.
		<p>d. dry ground</p>	Solo ressecado. Admissão baixa. Grande transmissão de calor. Aumento no albedo.
		<p>w. wet ground</p>	Solo alagado. Admissão alta. Pequena transmissão de calor. Redução no albedo.

Fonte: Adaptado de Stewart & Oke (2012)

4.2. APLICAÇÕES PRÁTICAS

Além das possibilidades de análise e comparação citadas que esta metodologia proporciona, o emprego das ZCLs possui aplicações consequentes a seu uso, dentre as quais: o monitoramento preciso das ICUs e seus fatores de formação, tal qual apontam Verdonck *et al.* (2018) e Aguilar *apud* Geletic e Lehnert (2019); análises mais eficazes e precisas sobre a interferência humana no clima (MARTILLI *et al.*, 2020); e modelação e simulação de condições

climáticas (STEWART *et al.*, 2014; VERDONCK *et al.*, 2018), resultando na elaboração de mapas intraurbanos, com o auxílio de softwares especializados. A seguir segue uma breve descrição de alguns dos diversos trabalhos que utilizaram as ZCLs como metodologia de análise.

Uma das primeiras pesquisas a buscar a comprovação deste método através de dados climatológicos empíricos foi a de Stewart *et al.* (2014), que compararam dados de temperatura do ar para três cidades (Uppsala, Nagano e Vancouver) e puderam observar as diferenças existentes entre as ZCLs analisadas. Assim, os autores atestaram a viabilidade comparativa do método, além da comprovação da diversidade térmica encontrada nas áreas urbanas, de acordo com sua forma de uso. No mesmo ano, Alexander e Mills (2014) realizaram um mapeamento com base em ZCLs na cidade de Dublin, comprovando as variações de temperatura de superfície existentes entre áreas de diferentes formas de ocupações dentro da mesma cidade.

Posteriormente, Verdonck *et al.* (2018), em seu estudo sobre três cidades belgas, evidenciaram a precisão dos mapas térmicos elaborados a partir de ZCLs, os quais formam uma ferramenta ainda mais completa na tarefa de análise de ICUs. Bechtel *et al.* (2019) estenderam essa análise para 50 cidades ao redor do globo, usando séries térmicas históricas para cada uma delas, tendo como objetivo principal uma integração mundial de dados baseada nas ZCLs.

Como referência para climas tropicais, destaca-se o trabalho de Kotharkar e Bagade (2018), que utilizou a metodologia de ZCLs em uma cidade “compacta e heterogênea”, Nagpur (Índia), ressaltando a utilidade que o método possui para o planejamento. Ressalta-se também o trabalho de Aguilar (2019), no qual são relacionados a morfologia e a densidade urbana de Bogotá (Colômbia) juntamente ao método de ZCLs para observar o desempenho das ICUs em diversas caracterizações internas a este espaço urbano.

Pesquisas realizadas em países de contextos físico e socioeconômico similares ao brasileiro, ou seja, com condições de subdesenvolvimento e urbanização desordenada, além de situados em territórios intertropicais, como nos casos da Índia e Colômbia, podem auxiliar na disseminação benéfica deste método junto aos estudos nacionais.

Nacionalmente, destaca-se alguns trabalhos de realização atual: primeiramente, a pesquisa de Masiero e Souza (2018), que empregaram o

método de ZCLs como meio de observação das variações de umidade por evaporação de corpos d'água em uma cidade de clima tropical, São José do Rio Preto/SP, a qual possui condições relativamente semelhantes às de Piracicaba.

A prática de ZCLs tem se destacado em teses de doutorado, como é o caso da realizada por Anjos (2017) em Aracaju, destacando-se por relacionar a aplicação de ZCLs a outra proposta de zoneamento climático-urbano, as URCH (Unidades de Resposta Climática Homogênea), fazendo uma análise mais completa do clima urbano. A tese de Ferreira (2019) realizou um mapeamento detalhado da Região Metropolitana de São Paulo através das ZCLs e de imagens de satélite, fornecendo uma significativa base para o conhecimento atmosférico e ambiental desta expressiva área urbana.

Por fim, destaca-se a teste de Pereira (2020), realizada na cidade de Santos/SP, utilizando as ZCLs para observar como as muitas variações morfológicas urbanas deste espaço (tais como aspectos construtivos diferentes entre áreas de alta renda e comunidades informais – comparação de caráter inovador em estudos microclimáticos) contribuem para a formação de microclimas diferentes.

Dentro da pertinência da área de estudo deste trabalho, referencia-se a conclusão de Fenner *et al.* (2017), os quais notaram que há diferenças térmicas entre ZCLs que apresentam mesma classificação metodológica, mas se diferenciam na localização: áreas centrais ou periurbanas. De acordo com os autores, isso ocorreu principalmente devido à influência de correntes frias de vento oriundas da área rural.

Destaca-se também o uso de plataformas digitais como ferramenta para o mapeamento das ZCLs, permitindo sua maior aplicabilidade prática. Optou-se por ressaltar os programas ENVI-MET, UrbClim e WUDAPT. É importante ressaltar que o mapeamento das LCZs é realizado por meio da plataforma WUDAPT. Os demais softwares realizam a caracterização e a resposta térmica segundo um tipo de desenho urbano e ou LCZ

O software ENVI-MET baseia-se em um sistema de auxílio ao planejamento do espaço urbano por meio de simulações do impacto que as dinâmicas climáticas como vento, insolação e pluviosidade apresentam sobre diversos ambientes construídos, diferentes entre si. Para isso, o software combina dados tecnológicos cartográficos pré-existentes de espaços urbanos às

características climáticas de cada local, unindo o planejamento à climatologia (ENVI-MET, 2020).

Dentre suas possíveis utilizações, pode-se realizar análises diversas, tais como: taxas de insolação, fluxo e velocidade das correntes de vento em ambientes urbanos; a eficiência energética, térmica e ambiental dos edifícios; o conforto térmico externo; além dos benefícios da vegetação como potencial de resfriamento. Estes dados, combinados às observações de ZCLs, podem oferecer conclusões precisas sobre os efeitos da ação humana nos climas urbanos, conseqüentemente demonstrando também quais medidas podem ser tomadas para amenizar os mesmos.

Já o WUDAPT (World Urban Database and Access Portal Tools) consiste em um projeto colaborativo a nível internacional, no qual são utilizados dados pré-existentes dos sistemas de sensoriamento remoto sobre as cidades ao redor do globo (processos Google Earth, Landsat e SAGA). Com estas informações, é possível fazer a descrição das formas urbanas de acordo com suas morfologias e formas de ocupação do solo, em conjunto com suas respectivas caracterizações térmicas (VERDONCK *et al.*, 2018; AGUILAR, 2019).

De acordo com Bechtel *et al.* (2019), o WUDAPT trabalha com diversas escalas de análise, cada uma representando um grau de precisão diferente, iniciando-se na escala local, como com as ZCLs. Com este sistema, pode-se criar uma base de dados relativamente acessível e de fácil compreensão, auxiliando na obtenção de espaços urbanos mais eficientes (MILLS *et al.*, 2015).

Por fim, destaca-se o UrbClim, método que foi baseado inicialmente em um esquema de análise de áreas vegetadas (*Land Surface Interaction Calculation* – LAIca), tendo sido estendido posteriormente para espaços urbanos. Este método utiliza o balanço energético das cidades para calcular os fluxos de calor atuantes nela. Sua utilização é recente, tendo sido mais aplicado em cidades europeias (VERDONCK *et al.*, 2018), e em algumas asiáticas (SHARMA *et al.*, 2016).

Sua relação com as ZCLs reside no fato de que este método também fraciona as diferentes feições urbanas, dividindo-as em células de análise com características específicas – para cada célula, é calculado o seu balanço de energia. Além disso, mapeamentos realizados a partir de ZCLs podem servir como base para esta metodologia classificatória (VERDONCK *et al.*, 2018).

4.2.1 Diretrizes para a utilização do método e ZCLs

Para a aplicação das ZCLs em uma área de análise, Stewart e Oke (2012) sugerem uma série de etapas a serem seguidas pelo pesquisador em seu método, já que as ZCLs são uma metodologia padronizada baseada em dados genéricos do espaço urbano. Assim, cabe ao pesquisador adaptar a classificação pré-existente às particularidades específicas da área de estudo.

A primeira etapa consiste na coleta de dados (tais como umidade, geometria urbana e cobertura do solo) referentes à área em questão, para determinar as propriedades superficiais do local. Nessa etapa, os autores ressaltam três pontos: preferencialmente, realizar visitas pessoais ao local; quantificar as características da área utilizando a escala própria; além de escolher uma área suficientemente homogênea para a aplicação eficaz do método.

O segundo passo é determinar de onde irão provir os dados termais para cada sensor utilizado, que deve ser instalado em uma área homogênea de ZCL; assim, para cada local analisado, um sensor diferente deve ser posicionado. Destaca-se que o tamanho desta área irá variar de acordo com o tempo proposto para o estudo, especialmente considerando-se a atuação de correntes de vento diferentes no local.

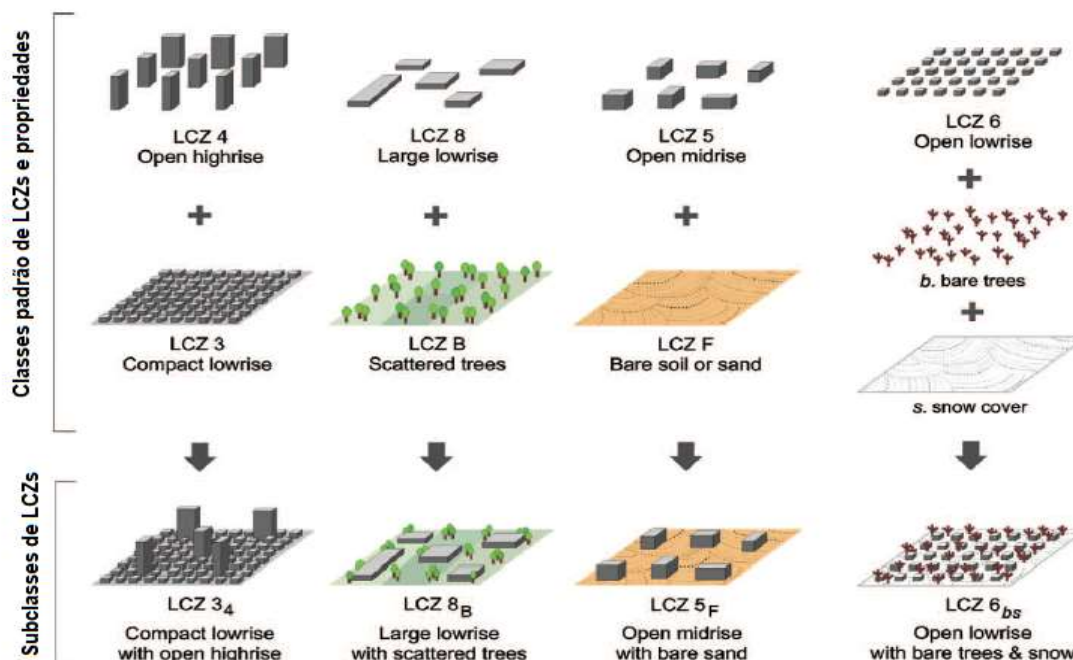
Após estas etapas, cabe ao pesquisador relacionar seu local de análise à ZCL correspondente, tarefa na qual Stewart e Oke (2012) destacam que será muito improvável que os dados analisados em áreas existentes combinem perfeitamente com alguma ZCL, sendo necessária uma interpolação dos mesmos, adequando-os o máximo possível.

Caso, ainda assim, a combinação não seja compatível, os autores propõem a criação de uma sub-classe, a qual combinaria as ZCLs classificatórias de tipos de construções com as que categorizam as formas de uso do solo, como pode ser visto na Imagem 5.

De acordo com Zheng *et al.* (2018), a tarefa de classificação pode ser realizada por meio de três maneiras principais: a utilização de metodologias de Sensoriamento Remoto (imagens de satélite, tais como do sistema Landsat); os dados SIG (Sistemas de Informação Geográfica), que podem vetorizar a configuração termal das áreas urbanas; e, principalmente, a observação *in loco*

e manual, recomendada para estudos em frações urbanas menores e períodos reduzidos de tempo, a qual foi realizada nesta pesquisa.

Imagem 5 – Esquema de combinação de ZCLs para formação de subclasses



Fonte: adaptado de Stewart & Oke (2012)

5. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-TERRITORIAL DE PIRACICABA E SUAS ÁREAS PERIURBANAS

Neste capítulo, as transformações do espaço urbano de Piracicaba são brevemente descritas, incluindo a ampliação e a ocupação de suas regiões periurbanas, assim como a caracterização dos bairros especificamente analisados nesta pesquisa, seu intenso atrelamento histórico e espacial à agroindústria canvieira, além de seus aspectos climáticos e atmosféricos.

5.1. EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO ESPAÇO URBANO DE PIRACICABA

Os primeiros processos de povoamento da atual região de Piracicaba/SP remontam ao início do séc. XVIII, com o objetivo de obter uma ligação terrestre entre a cidade de Itu e o já existente porto do rio Piracicaba. O município foi fundado oficialmente como povoado em 1767, e elevado à categoria de cidade em 1856. Desde os estágios iniciais de sua ocupação, seu espaço já era vinculado à produção canvieira (estimulada nacionalmente pela crise do ciclo

aurífero), integrando o então denominado “Quadrilátero do Açúcar”, composto também pelas cidades paulistas de Sorocaba, Mogi Guaçu e Jundiá (SPADOTTO, 2013).

Inserida no contexto nacional de urbanização, a cidade atravessou maior crescimento populacional e urbano inicialmente com a chegada de imigrantes europeus, relacionados principalmente ao ciclo do café, o qual influenciou o município de maneira breve comparativamente a outros do interior paulista, na passagem dos séculos XIX e XX.

Posteriormente, a partir dos anos 1930, o crescimento de Piracicaba se deu através do desenvolvimento de sua indústria de bens de capitais voltada ao suporte da produção de cana-de-açúcar (reestabelecida definitivamente no município), especialmente no caso de seu parque metalomecânico, como é exemplificado na fundação da empresa Dedini, e na fundação de uma instituição de ensino superior ligada à pesquisa agropecuária, a ESALQ (Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz, atualmente parte da Universidade de São Paulo), ambas na década de 1920.

A partir dos anos 1970 e 1980, período marcado pelo início do processo de descentralização industrial e crescimento acelerado das cidades médias, Piracicaba passou a atingir maior destaque não só em outros segmentos industriais diversificados, mas também atuando como um polo regional de serviços e comércios (MAIA, 2015).

Contudo, este crescimento se deu, dentre outros aspectos, pela modernização do espaço rural brasileiro, assim como de Piracicaba, que foi atrelado a um processo contínuo de concentração fundiária e intenso êxodo rural. Assim, o espaço rural passou a apresentar as características típicas da “agricultura científica globalizada” (SANTOS, 2000), tais como extensas áreas de monoculturas, produzidas em grandes propriedades voltadas aos interesses do capital mundial, especialmente a produção de etanol e açúcar para exportação.

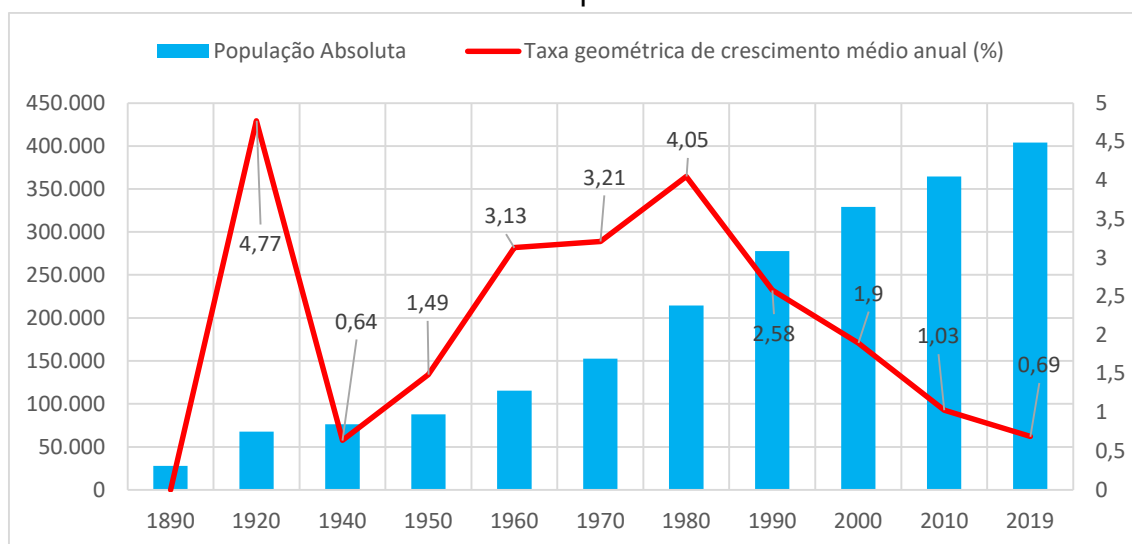
Esta substituição paulatina do espaço rural tradicional para um meio agrícola moderno (ELIAS, 2011), ocorrida em grande parte do campo brasileiro, é fundamental para que se possa compreender as condições territoriais atuais, que podem contribuir para a formação de ICUs em áreas urbanas próximas. Isso se deve ao fato de que as alterações antrópicas nesta configuração rural são

mais intensas, podendo causar maiores impactos a diversos meios naturais e, no que diz respeito a esta pesquisa, à atmosfera.

Destaca-se também como incentivador desta configuração o papel do PROALCOOL (Programa Nacional do Álcool), que surgiu como uma iniciativa estatal de estímulo à produção de álcool anidro para a produção de combustível, visto que o país atravessava uma crise energética decorrente do quadro de tensão estabelecido na produção mundial de petróleo, e também para evitar uma possível capacidade ociosa no setor (SZMRECSÁNYI E MOREIRA, 1991). Com isso, a atração de investimentos para o interior realizada pelo Estado exerceu notável relevância para o expressivo crescimento recente de Piracicaba.

Desta maneira, o município de Piracicaba passou por notável crescimento populacional e urbano, justamente nas décadas caracterizadas por expressiva urbanização e industrialização nacionais, como demonstra o gráfico 2. Destaca-se que este processo também trouxe diversas problemáticas urbanas ao município, como favelização, degradação ambiental e carência de alguns serviços públicos, especialmente em regiões periféricas (POMPERMAYER, 1998).

Gráfico 2 – Crescimento da População de Piracicaba, em termos absolutos e percentuais



Fonte: dados do IPPLAP (Instituto de Pesquisas e Planejamento de Piracicaba), organizados pelo autor

Concomitantemente, este crescimento se deu acompanhado de uma expressiva urbanização, a qual atingiu 98,17% em 2019 (IPPLAP *apud* SEADE),

e redução constante de sua população rural¹, com expressiva concentração em sua macrozona urbana (a qual exclui núcleos urbanos localizados na área rural conforme o Plano Diretor de Desenvolvimento de Piracicaba de 2018).

Observou-se também um fenômeno urbanístico duplo: aumento na verticalização de construções a partir da década de 1960 (MAIA, 2015) e, especialmente, um espraiamento horizontal da mancha urbana municipal, a qual foi progressivamente expandida. Seu perímetro urbano foi permanentemente aumentado, determinado por seus contínuos planos diretores (PDDP, 2018).

Este crescimento horizontal ocasionou na redução de sua densidade urbana, juntamente com a ocupação de áreas periurbanas distantes da região central, especialmente no eixo Norte do município. Este fator acarretou um grande número de vazios urbanos² e trouxe consequências como maior necessidade de deslocamentos por automóveis, formas irregulares de ocupação e supressão de áreas verdes (PDDP, 2018). Enquanto o centro urbano apresenta um processo de esvaziamento populacional, as regiões periurbanas de Piracicaba exibem constante adensamento, em suas diversas formas de uso e classes econômicas.

Sendo assim, são ressaltados dois pontos: primeiramente, a alteração antrópica nas áreas periféricas também é intensa, justificando a observação microclimática sobre conforto térmico e ICUs nelas. Em segundo lugar, devido a esta significativa diversidade construtiva, justifica-se uma mudança no foco de análise: uma perspectiva mais precisa, possibilitada pelo método de ZCLs, em vez da tradicional amplitude “urbano-rural”.

Complementando, nota-se a influência que o meio rural, especialmente o cultivo de cana-de-açúcar, possui tanto para a cidade de Piracicaba como um todo, quanto especificamente para suas regiões periurbanas, como aponta o Atlas Rural (2006): “a área de cultivo envolve toda a área urbana”.

Devido ao seu desenvolvimento atrelado ao setor sucroenergético, Piracicaba configurou-se como um espaço urbano destinado não apenas à produção agrícola em si, mas também a atender às suas demandas, o que inclui

¹ Esta reduziu-se a aproximadamente 7 mil habitantes em 2018, enquanto, em 1980, consistia em mais de 16 mil, então 7,5% do montante total. Fonte: IPPLAP *apud* SEADE.

² Estes representam aproximadamente 54% de todo o perímetro urbano, de acordo com o PDDP (2018).

uma gama de serviços e técnicas localizados no meio urbano, como indústrias de bens de capitais e comércio de equipamentos e insumos.

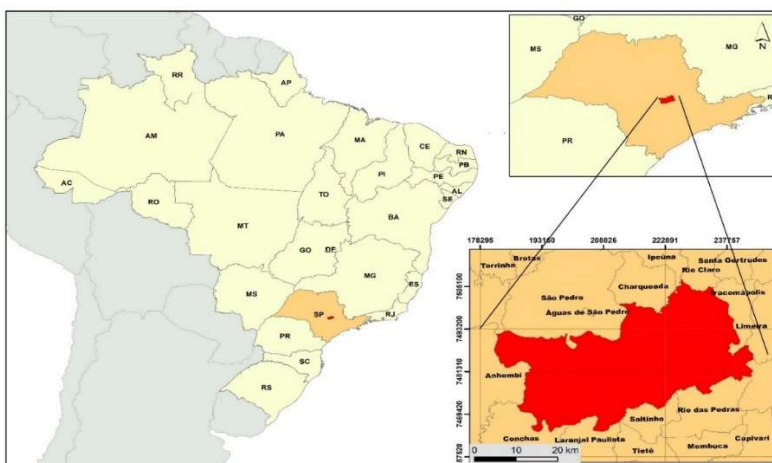
Desta maneira, Piracicaba é caracterizada como o que Elias (2011) designou como “cidades do agronegócio”, ou seja, espaços urbanos fortemente especializados a uma determinada produção agrícola, estando vulneráveis a suas variações de safra e mercado. Esta configuração fez com que as regiões periféricas piracicabanas tivessem uma relação histórica de contato e proximidade significativa para com o plantio da cana-de-açúcar, que foi progressivamente suprimindo as áreas verdes naturais.

Observa-se então este processo concomitante: enquanto se intensificava a produção agrícola municipal, aumentava também o crescimento populacional periférico, contribuindo para a formação de uma zona de transição rural-urbano pouco definida, ou um “*continuum*” (GRAZIANO DA SILVA, 1993), na qual o contato entre áreas agrícolas e urbanas é limítrofe e desordenado, ocorrendo manchas urbanas circundadas por plantio, ou vice-versa. Esta condição cria uma relação de interdependência não apenas socioeconômica, mas também atmosférica, passível de influências mútuas para a formação de microclimas.

5.2. CONDIÇÕES FÍSICAS E ATMOSFÉRICAS DO MUNICÍPIO DE PIRACICABA

De maneira geral, este item busca elencar brevemente as principais caracterizações físicas do território municipal de Piracicaba, com o objetivo de fornecer uma base para contextualização desta pesquisa.

Imagem 6 – Localização do município de Piracicaba



Fonte: adaptado de IBGE (2018)

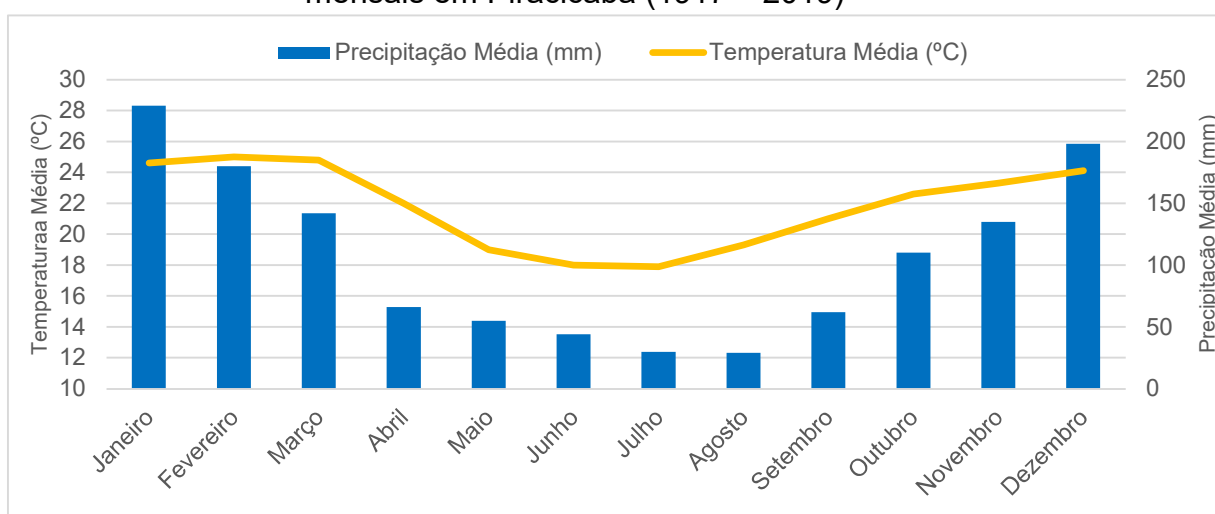
Localizado entre as coordenadas geográficas 22° 42' 30" de Latitude Sul e 47° 38' 01" de Longitude Oeste, com uma área territorial de 1.378,50 Km², sendo 245,44 Km² urbanos (IPPLAP, 2019), o município de Piracicaba constitui-se como sendo sede principal da Aglomeração Urbana de Piracicaba (AUP), importante rede urbana definida por lei em 2012 pela extinta EMPLASA (Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano), e é limítrofe à região metropolitana de Campinas, com grande destaque socioeconômico regional.

Situado na zona intertropical planetária, porém pouco ao Norte do Trópico de Capricórnio, o município apresenta, em parte significativa do ano, de acordo com a classificação climática de Köppen, um clima de categoria *Cfa*. Ou seja, clima subtropical úmido, com chuvas constantes e verões quentes (PEEL *et al.*, 2007).

Em alguns momentos de suas séries climáticas históricas, entretanto, a caracterização climática de *Cwa*, pode apresentar uma maior concentração de chuvas no verão, característica típica da movimentação de massas de ar em grande parte do interior brasileiro (DUBREUIL *et al.*, 2017).

O gráfico 3 demonstra, por meio de uma série histórica de 102 anos, a configuração típica do clima de Piracicaba, caracterizado por temperaturas elevadas no começo do ano, período que concentra também o maior volume de precipitações.

Gráfico 3 – Temperatura média (em °C) e Precipitação Média (em mm) mensais em Piracicaba (1917 – 2019)



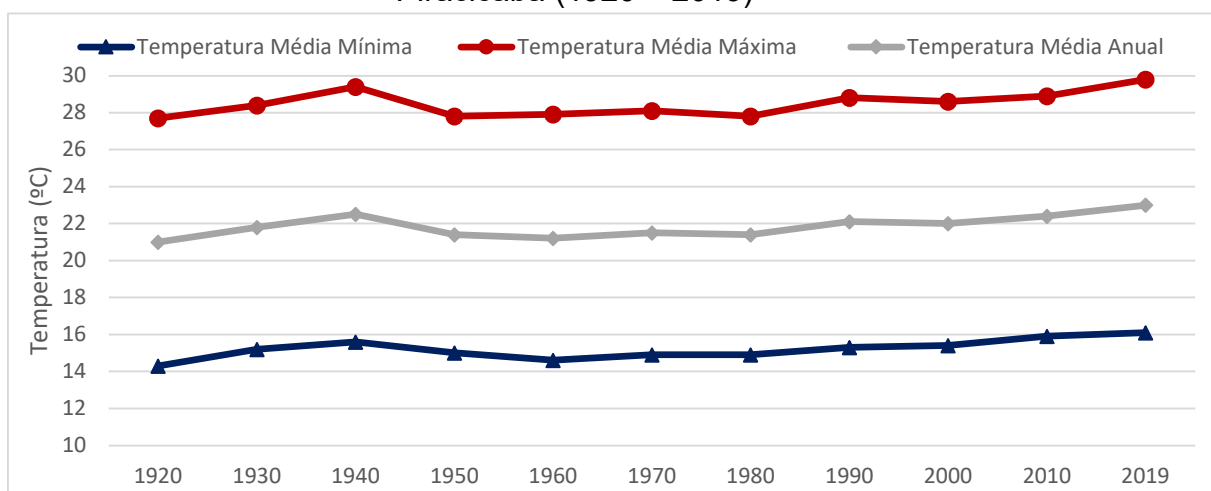
Fonte: Atlas Rural de Piracicaba e Estação Meteorológica da ESALQ

Porém, Dias *et al.* (2018) realizaram um levantamento de dados da estação meteorológica da ESALQ e observaram que o município apresentou

seguidas médias climáticas configuradas como Aw (tropical com invernos secos) recentemente, devido especialmente à elevação de suas temperaturas mínimas, demonstrando que alterações antrópicas em seu clima urbano já exibiram consequências observáveis. Assim, Piracicaba tem passado a apresentar um clima mais extremo, com maior intensidade de calor e chuvas mais concentradas (as taxas absolutas de precipitação anual não apresentaram grande redução e, sim, maiores variabilidade e inconstância entre cada ano).

O gráfico 4 corrobora essa afirmação, demonstrando a tendência crescente que as temperaturas de Piracicaba vêm apresentando nos últimos 100 anos. Ao longo deste período como um todo, desconsiderando-se variações passageiras de acréscimo ou diminuição térmica, tanto as temperaturas médias, mínimas e máximas, quanto médias gerais apresentaram um aumento de aproximadamente 2°C, sendo que o ano de 2019 apresentou as temperaturas mais elevadas até o momento.

Gráfico 4 – Temperaturas média mínima, máxima e anual, em °C, em Piracicaba (1920 – 2019)



Fonte: Estação Meteorológica da ESALQ

As causas para esta situação podem ser associadas a aspectos globais, como o cenário de mudanças climáticas e elevação geral da temperatura, porém esta observação seria premeditada, sendo necessárias análises mais aprofundadas ao longo de anos para determinar o real impacto que as mudanças climáticas podem ter para o município, as quais, apesar de impactarem

notavelmente espaços urbanos de diversos tamanhos, como aponta Duarte (2015), não abrangem o escopo deste trabalho.

Este impacto pode ser diretamente relacionado também a fatores locais, como a intensificação da urbanização, crescente impermeabilização dos solos e utilização de materiais de elevada absorção térmica, em conjunto com a supressão da vegetação original, além da transformação das áreas rurais. Cabe comparar os dados observados nas áreas periurbanas desta pesquisa para buscar determinar a extensão desse fenômeno.

Coltri *et al.* (2007) corroboram essa observação, analisando diversos elementos climáticos através das séries históricas em Piracicaba e constatando que houve uma tendência de aumento da temperatura média no município, relacionada à sua intensa urbanização nas últimas décadas.

Com relação a outros aspectos físicos de Piracicaba, destaca-se primeiramente seu relevo: situada na borda da Depressão Periférica Paulista, próxima à região de cuevas basálticas, possui uma altitude média de 528 metros (sendo que as altitudes mais baixas possuem aproximadamente 420m, enquanto as elevadas atingem até 780m). Além disso, sua rede hidrográfica é composta por três rios principais: o rio Piracicaba, de maior destaque por atravessar sua área urbana e possuindo forte influência histórica, social e ambiental na cidade, o rio Corumbataí e o rio Tietê, situado em suas divisas a Sudoeste (ATLAS RURAL, 2006).

As formações vegetais que originalmente ocupavam o território municipal eram compostas por florestas estacionais semi-decíduais e decíduais, trechos de cerrados e também matas ciliares. Destaca-se que todas essas formações foram extensivamente degradadas pela expansão urbana e agrícola, restando alguns cursos d'água em que predomina a vegetação preservada, e pequenos trechos de floresta em sua porção ocidental, mais distante da área urbana central, tendo menor densidade de ocupação (ATLAS RURAL, 2006).

5.3. EXPANSÃO DA MALHA URBANA: OS BAIRROS SANTA ROSA E JARDIM DONA LUÍSA (VILA FÁTIMA)

Como observado, o crescimento urbano de Piracicaba se intensificou horizontalmente em direção às suas periferias, ampliando sua mancha urbana e intensificando processos como necessidades de deslocamento e aumento de

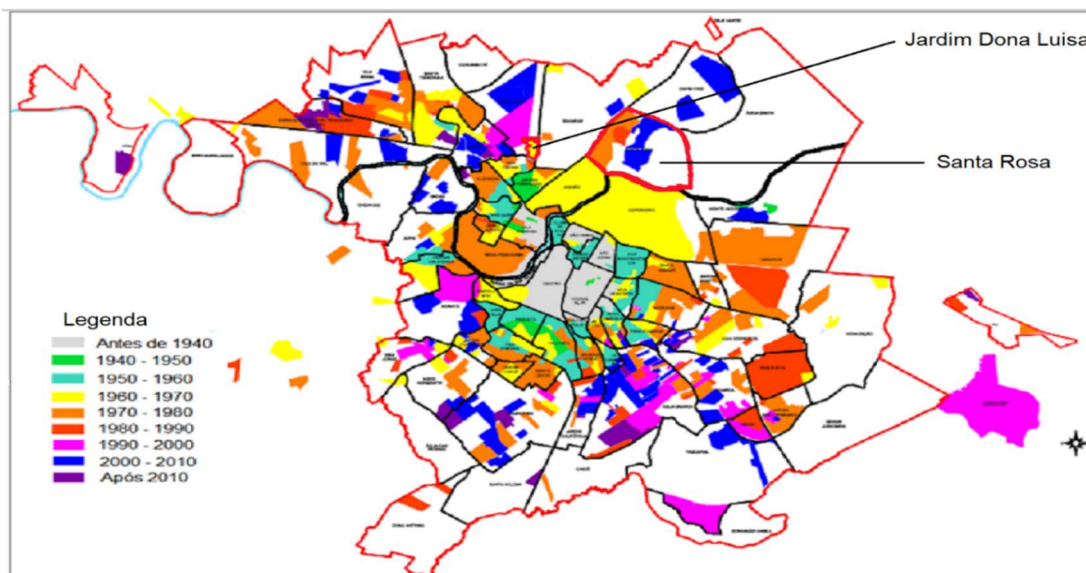
vazios urbanos. O último, sobretudo, originou uma variedade de regiões periurbanas, com distintas realidades de uso do solo e ordenamento espacial.

Ambas as áreas periurbanas selecionadas possuem seu processo de origem em um contexto de consolidação definitiva da plantação da cana-de-açúcar, a qual se deu concomitantemente ao desenvolvimento de mecanização do campo, êxodo rural e concentração de propriedades agrícolas, responsáveis pelo grande crescimento urbano e periférico de Piracicaba nesse período, como aponta Maia (2015).

Desta maneira, à medida em que mais migrantes rurais passaram a ocupar a malha urbana municipal, esta se expandiu em direção a áreas antigamente ocupadas por pastagens, lavouras e florestas, causando, dentre outras consequências, a formação de regiões periurbanas fronteiriças a áreas rurais, com distâncias cada vez maiores em relação à área central.

A região do Jardim Dona Luísa possui histórico de ocupação desde os anos 1960 (sendo que o bairro de Vila Fátima foi assim categorizado em 1978 (COSTA, 2004)), enquanto o Santa Rosa, “mais distante”, começou a ser habitado na década seguinte (oficializado como bairro em 1995 (COSTA, 2004)).

Mapa 1 – Localização dos bairros Santa Rosa e Jardim Dona Luísa



Fonte: adaptado de IPPLAP (2019)

Ambos os bairros se situam na Zona Norte, área relevante por apresentar a maior população³ e o maior crescimento populacional⁴ do município. Eles se localizam próximos à rodovia que liga Piracicaba a Rio Claro (SP-127), e possuem grande proximidade com áreas de cultivo canavieiro (anteriores à formação destas duas áreas urbanas): o Jardim Dona Luísa se situa limítrofe, em sua porção Leste, a estas áreas, enquanto o Santa Rosa possui canaviais ao Sul e a Oeste (através da rodovia, ainda em curta distância) de seu território, como demonstram as imagens abaixo.

Imagem 7 – Limite entre Jardim Dona Luísa e área de canaviais



Foto tirada pelo autor, 04/2019

Imagem 8 – Localização do Bairro Santa Rosa próximo a canaviais



Foto tirada pelo autor, 04/2019

A região também demonstra grandes diferenças em sua ocupação territorial, apresentando desde loteamentos de alto padrão (no Santa Rosa) à ZEIS (Zonas de Especial Interesse Social) e aglomerados subnormais, especialmente em sua área mais ocidental, como destaca seu PDDP (2018).

³ 85 mil habitantes em 2010. Fonte: PDDP, 2018.

⁴ Aproximadamente 23% em 10 anos (2000 – 2010). Fonte: PDDP, 2018.

Além disso, estas áreas destacam-se pela grande diversidade de formas de uso do solo, possuindo ambas proximidade com instalações industriais: a planta da ArcelorMittal situa-se na Vila Primavera, bairro vizinho ao Jardim Dona Luísa, enquanto que o Santa Rosa possui seu crescimento recente atrelado a um desenvolvimento tecnológico e industrial, como demonstra a imagem 11, devido à implantação dos seguintes equipamentos em seu território (ou em suas proximidades): Parque Tecnológico de Piracicaba; Instituto Federal de Educação; centro administrativo do grupo Raízen, unidade fabril da Hyundai e distrito industrial Uninorte (localizado no bairro Capim Fino, ao Norte), além de possuir uma série de outras indústrias, especialmente em sua região Norte.

Imagem 9 – Panorama espacial do bairro Santa Rosa



Foto tirada pelo autor, 02/20

Com relação às formas de ocupação por moradias, há uma diferenciação: o Jardim Dona Luísa é caracterizado por grande densidade ocupacional, possuindo, em sua maioria, lotes regulares e padronizados com tamanho mínimo de 200 m², com habitações de porte baixo a médio, em grande maioria térreas ou com até dois pavimentos (PDDP, 2013), tal qual mostra a imagem 12.

Imagem 10 – Panorama espacial do bairro Jardim Dona Luísa

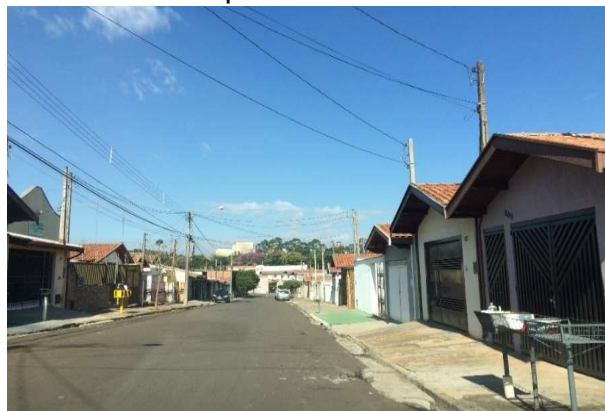


Foto tirada pelo autor, 02/20

Já o Santa Rosa era inicialmente ocupado por imóveis de uso ocasional, como chácaras e casas de veraneio, possuindo menor densidade habitacional. Atualmente, preserva parte dessa estrutura, combinando-a com habitações em terrenos maiores, além de dois loteamentos de alto padrão implantados nos últimos anos: o Alphaville e o Villa D'Aquila.

Por fim, destacam-se outras formas variadas de uso do solo: o Jardim Dona Luísa possui proximidade com o Cemitério da Vila Rezende, o Zoológico Municipal e com a APP do Ribeirão Guamium⁵. Já a área mais densamente ocupada do Santa Rosa é atravessada por uma área de proteção a manancial, afluente do rio Piracicaba no parque Jequitibá, limite Sul do bairro.

5.3.1 Aspectos Socioeconômicos

O bairro Vila Fátima (no qual se insere o Jardim Dona Luísa), por possuir uma ocupação mais antiga e consolidada, apresentou um crescimento populacional modesto em anos recentes: 13% de aumento, tendo apresentado 3.262 habitantes em 1991 e 3.681 em 2010 (IPPLAP, 2019). Contudo, sua densidade demográfica é relativamente elevada: 38,11 habitantes por hectare, número que não deve se alterar bruscamente, já que o território do bairro (de apenas 96,6 hectares) praticamente não apresenta mais vazios urbanos, possuindo 1.252 domicílios no último censo (IPPLAP, 2019).

Em contrapartida, o Santa Rosa apresentou um crescimento mais acelerado nas últimas décadas, indo de 1.026 para 5.271 habitantes, aumento de 430% (IPPLAP, 2019). Por sua vez, este crescimento pode continuar a ocorrer, visto que o território do bairro é notadamente maior (548 hectares) e ainda apresenta espaços urbanos consideráveis, possuindo inclusive “lotes vazios”, ou seja, áreas com infraestrutura disponível, mas sem ocupação (PDDP, 2018). Assim, sua densidade demográfica, que ainda é baixa (9,62 habitantes por hectare), pode sofrer grande aumento, especialmente no caso da construção de loteamentos fechados, como foi o caso nos últimos anos (o número de domicílios cadastrados no bairro dobrou em dez anos, indo de 929 para 1.832).

Devido a essas configurações, o PDDP ordenou a ocupação destes territórios da seguinte forma: o Jardim Dona Luísa constitui-se como uma região

⁵ Presente no Plano Diretor de 2018

de “ZAP” (Zona de Adensamento Prioritário), ou seja, área de infraestrutura urbana já consolidada, que deve ser utilizada de maneira a ocupar os domicílios ociosos restantes no bairro, combatendo a especulação imobiliária (PDDP, 2006 e 2018); já o Santa Rosa possui zoneamento duplo. Foi majoritariamente classificado como uma área de “ZAS” (Zona de Adensamento Secundário), caracterizada por ser um espaço com relativa infraestrutura, mas com significativo número de vazios urbanos a serem ocupados, aumentando o seu adensamento. Porém há em sua porção Sul também a classificação de uma “ZEIC” (Zona de Especial Interesse da Paisagem Construída), na qual o uso é restritamente habitacional.

Ressalta-se que os dois bairros possuem perfil socioeconômico de médio padrão, com a maior parte das famílias possuindo renda entre 1 a 2 salários mínimos (IPPLAP *apud* IBGE, 2019). Entretanto, ambos lidam com questões de desigualdade socioeconômica vivenciadas territorialmente: apresentam áreas de favelização⁶, demarcadas no PPDP como ZEIS (Zonas de Especial Interesse Social). Este cenário desigual é agravado no Santa Rosa, no qual a região oficial de aglomerado subnormal está a apenas algumas centenas de metros do condomínio Alphaville, de alta renda.

5.4. CULTIVO CANAVIEIRO: SAZONALIDADES E CONFIGURAÇÃO HISTÓRICA EM PIRACICABA

O cultivo da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é faz parte da história do território brasileiro, sendo muito ligado ao seu processo de colonização (FURTADO, 2005) devido a interesses históricos e às condições naturais do país, como seu clima majoritariamente tropical e solos favoráveis (THOMÉ *et al.*, 2017).

Atualmente, o Brasil se configura como o maior produtor mundial de cana-de-açúcar (Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB, 2019), com uma área colhida total de 8,48 milhões de hectares, produção de 642 milhões de toneladas e uma produtividade média de 75,7 mil quilos por hectare na safra de 2019/2020, de acordo com dados da CONAB.

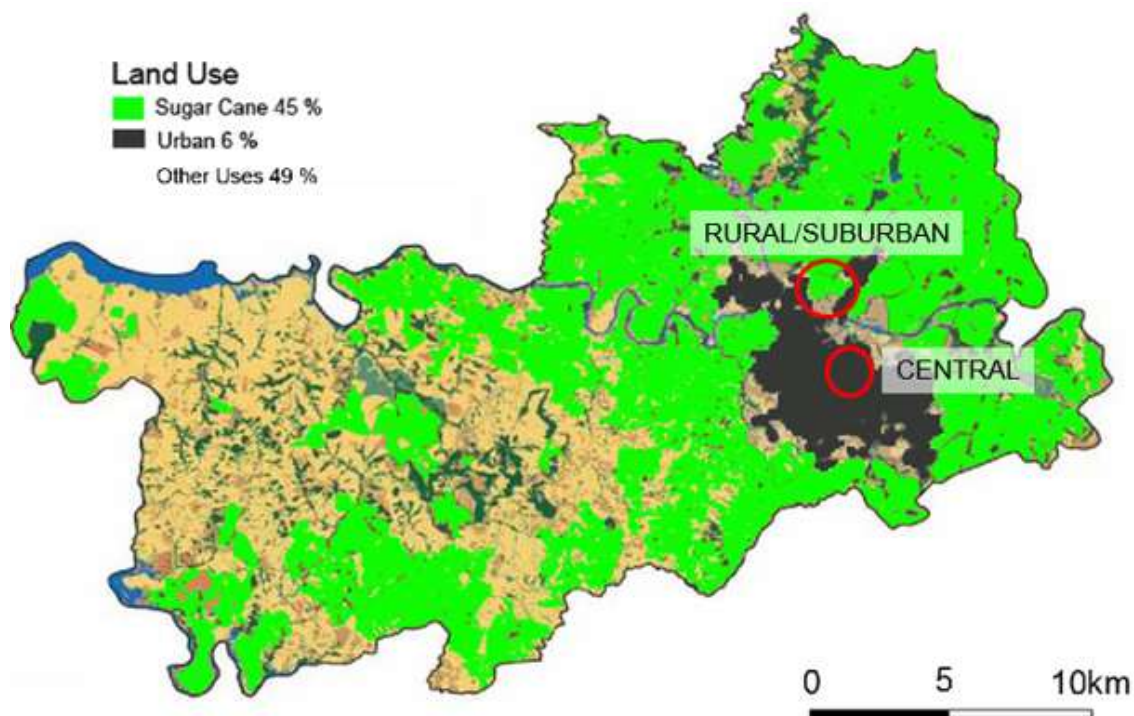
⁶ O Vila Fátima apresenta também alguns grupos familiares inscritos no Índice Paulista de Vulnerabilidade Social (IPVS) de Piracicaba. Fonte: PDDP, 2018.

Neste cenário, destaca-se o estado de São Paulo, responsável por 52,9% da produção e 50,7% da área plantada de cana-de-açúcar (CONAB, 2019), condição que se iniciou a partir da virada do séc. XX (FURTADO, 2005) e consolidou-se nas décadas seguintes. Destaca-se também, como já apontado, o município de Piracicaba, no qual a área destinada a este cultivo foi de 49 mil hectares em 2018, produzindo 3,28 milhões de toneladas, valores que correspondem, respectivamente, a 94,5% e 93% do total de culturas temporárias ou semi-perenes do município (IPPLAP *apud* IBGE, 2018).

Além dos aspectos históricos mencionados, a cultura canavieira se beneficiou de questões físicas propícias do município, como seu relevo relativamente plano ou ligeiramente ondulado (favoráveis à mecanização) e seus solos majoritariamente do tipo latossolos, com textura de média a argilosa, grande capacidade de retenção de água e também aptos à mecanização. Porém há também uma pequena porcentagem do cultivo realizado em áreas não-mecanizáveis, nas quais é necessária a prática da queima para realização da colheita (ATLAS RURAL, 2006).

Como observado no mapa abaixo, as porções de terra destinadas à cana-de-açúcar historicamente ocuparam as regiões próximas ao perímetro urbano, permeando-o, ou até áreas internas a ele, mantendo uma relação de grande proximidade com seus habitantes. Destaca-se que os bairros analisados se enquadram tanto nos aspectos territoriais descritos, quanto na sazonalidade típica da cultura canavieira que será descrita a seguir.

Mapa 2 – Porcentagem do uso da terra em Piracicaba



Fonte: Adaptado de Atlas Rural, (2006)

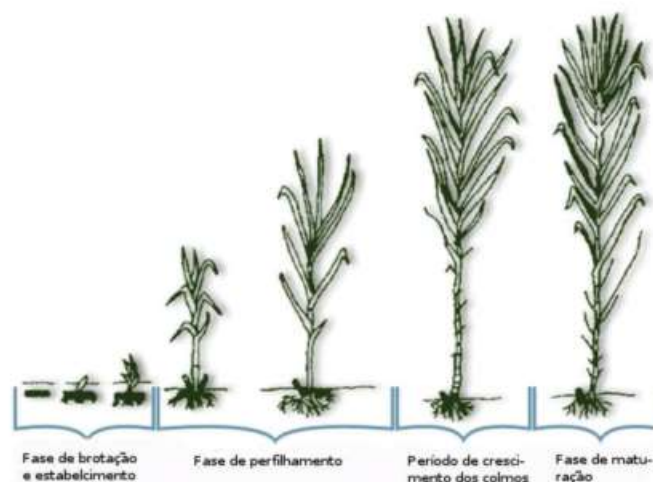
O cultivo de cana-de-açúcar é considerado semi-perene, pois completa seu ciclo inicial após duas ou mais estações de crescimento. O seu ciclo total costuma durar em média de 5 a 6 anos, período em que a planta brota e é cortada novamente várias vezes, já que a soqueira (conjunto de raízes) permanece no solo após o corte, sendo necessária à sua rebrota. Após este período, os índices mínimos de sacarose deixam de ser satisfatórios economicamente, necessitando que, na última colheita, se retire a soqueira das plantas antigas para o preparo da terra para um novo plantio (BARBIERI, 1993).

As estratégias produtivas, de maneira geral, respeitam inicialmente um ciclo de 18 meses até a primeira colheita (chamada de cana-planta) e, após o primeiro corte, mantém um período geral de 12 meses após a rebrota (conhecida como cana soca). Vale dizer que estes prazos são aproximados, pois variam significativamente de acordo com o tipo de planta utilizado e das condições edafoclimáticas locais, além do uso de práticas de melhoramento genético e insumos químicos (LEITE *et al.*, 2009).

Como aponta Marafon (2012), pode-se dividir o ciclo da cana-de-açúcar em quatro fases principais: 1 – germinação e emergência, 2 – estabelecimento

e perfilhamento, 3 – crescimento intenso e 4 – maturação, sendo que a duração de todos depende de fatores de radiação, disponibilidade hídrica e de temperatura do ambiente, conforme a imagem 13.

Imagem 11 – Fases do desenvolvimento da cana-de-açúcar



Fonte: Marafon (2012) *apud* Gascho e Shih (1993)

A fase inicial, de brotamento e surgimento das primeiras folhas, é muito influenciada pela temperatura ambiente, ocorrendo na faixa entre 19 °C e 43°C, mas com uma faixa ideal de 32 °C a 37°C, como aponta Marin *apud* Verret (2014). Esta também é determinada pela umidade, que deve ser abundante.

A segunda fase, de formação de raízes definitivas e especialmente surgimento de novos brotos laterais (perfilhamento) também se influencia pela temperatura (que necessita ser elevada), mas especialmente pelas taxas de radiação solar, a qual precisa ser de longa intensidade e duração para estimular este crescimento lateral até atingir a área ideal para a planta que, a partir deste momento, irá reduzir o perfilhamento e começar seu crescimento vertical.

No terceiro momento, ocorre o alongamento da planta em conjunto com seu aumento de massa e tamanho dos colmos, o qual é considerado lento em comparação a outros cultivares, mas que é benéfico para a acumulação de sacarose em seu estágio final (MARIN, 2014).

A última etapa do ciclo consiste na maturação, ou seja, quando a planta passa a acumular uma grande quantidade de sacarose em seus colmos (CARDOZO & SENTELHAS, 2013). Este processo é estimulado devido a um

fator externo de estresse ambiental: redução de disponibilidade hídrica, queda de temperatura ou ambos combinados, além da possibilidade de utilização de amadurecedores artificiais.

Este estágio dura alguns meses até atingir o ponto de máximo acúmulo de sacarose (calculado através do Índice de Maturação ((MARAFON, 2012)), no qual a cana-de-açúcar deve ser colhida rapidamente para não causar prejuízos à produtividade econômica. É necessário também possuir proximidade com a usina processadora, pois a planta perde rapidamente seu teor de sacarose após a colheita.

Devido às condições necessárias para que este ciclo ocorra, observa-se que o Centro-Sul brasileiro possui aspectos climáticos muito propícios ao cultivo canavieiro, pois seu clima majoritariamente tropical é composto por um período de elevadas temperaturas, altas taxas de pluviosidade e também de forte insolação, caracterizado pelo começo e final do ano, e acentuada queda nos índices pluviométricos durante o inverno, o qual pode apresentar também diminuição das temperaturas, considerando sua posição latitudinal (AYOADE, 1996).

Desta maneira, o período mais propício para o plantio da cana-de-açúcar nesta região se estabelece entre os meses de janeiro a março⁷, após o qual é respeitado o seu ciclo inicial de aproximadamente 18 meses (assim a planta passa por dois períodos de estresse ambiental, aumentando sua sacarose, o que faz com que a cana-planta possua maior produtividade, apesar do tempo maior de espera), como aponta Marin (2014).

Determina-se assim também sua fase de colheita, a qual oficialmente dura de abril a novembro (THOMÉ *et al.*, 2017), em que são colhidas progressivamente as plantas por ordem de plantio. Após essa fase inicial, ocorrem os momentos de rebrota, com ciclo menor (12 meses), o que irá manter a colheita do ano seguinte no mesmo período e, assim, sucessivamente.

As características apresentadas pelas plantações de cana-de-açúcar durante estes ciclos são de forte influência para o microclima dos ambientes periurbanos ao redor, sendo que pode-se destacar dois momentos distintos para a superfície: o período de pós-colheita (independentemente se este se tornará

⁷ Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_33_711200516717.html

um novo plantio, rebrota ou mesmo preparo para a rotação de culturas), em que o solo permanece significativamente exposto por algumas semanas, e o período que antecede a colheita (irrelevante também se foi empregado o ciclo de 12 ou 18 meses), tendo a altura e densidade das plantas seus valores máximos.

De acordo com Pielke e Avissar (1990), estas diferenças se darão devido à mudança no albedo apresentado pela superfície, à quantidade de umidade disponível consequente do processo de evapotranspiração das plantas, aos fluxos de ventos alterados pela rugosidade da vegetação e, por fim, à perda de calor para a atmosfera devido à irradiância dos distintos tipos de cobertura.

Os autores também ressaltam que é necessário observar as características de ambos: para o solo, sua densidade, porosidade, textura e albedo; para a vegetação, a área de suas folhas, sua altura, albedo⁸, rugosidade e percentual de cobertura (PIELKE E AVISSAR, 1990). Com relação aos objetivos desta pesquisa, estabelece-se então observar as diferenças entre os períodos distintos para a formação de ICUs nas regiões periurbanas Santa Rosa e Jardim Dona Luísa.

6. MATERIAIS E MÉTODOS

Conforme destacado, esta pesquisa propõe uma análise integrada: estabelecer a influência das safras canavieiras para a formação de ICUs em ambientes periurbanos e adequar duas regiões periurbanas selecionadas ao método de ZCLs, buscando observar como as diferentes formas de uso e ocupação do solo alteram as condições atmosféricas de seu entorno, como proposto por Stewart & Oke (2012).

Buscou-se essa integração metodológica porque as consequências causadas pelas periodicidades do solo agrícola serão diferentes em regiões periurbanas com distintas formas de ocupação do solo. Assim, é possível estabelecer com precisão essa relação de causa e consequência existente entre as regiões periurbanas e suas áreas agrícolas circundantes.

Desta maneira, a metodologia aplicada buscou constantemente observar quais fatores, dentre todos os que contribuem para a formação de ICUs (descritos no item 2.2.1.), estão especificamente presentes nas áreas de análise.

⁸ Estes destacam também que o albedo para radiação de ondas curtas da cana-de-açúcar é da ordem de 0,15 (PIELKE & AVISSAR *apud* LEE, 1990).

Neste capítulo, é feita uma breve exposição das etapas realizadas para atingir este objetivo.

Primeiramente, foi realizada uma descrição das características territoriais das áreas de estudo, usando como referência o entorno dos sensores de temperatura e umidade do ar utilizados na obtenção de dados. Na segunda etapa, estão descritos os equipamentos e métodos utilizados, assim como as variáveis observadas em campo. Em terceiro lugar, discorreu-se sobre as duas fases designadas para a coleta e, em um último momento, será descrita a prática adicional de obtenção de dados através do transecto móvel.

6.1. CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

Inicialmente, para definir as áreas periurbanas que foram analisadas, buscou-se observar uma série de requisitos pertinentes aos objetivos definidos na mesma. Primeiramente, o contexto de sua formação: procurou-se por áreas que tiveram o início (ou intensificação) de sua ocupação urbana como consequência ao já citado período de significativa urbanização municipal, particularmente a partir dos anos 1960. Assim, foi possível garantir que as áreas analisadas se inseriam na problemática urbana ocorrida em Piracicaba.

Em segundo lugar, foram observados locais cujas características socioespaciais apresentadas atualmente ainda se constituam, ao menos parcialmente, como consequências deste processo de urbanização acelerado, ou seja, grande adensamento populacional, carências infraestruturais, ocupação desordenada do solo, além de desigualdades socioeconômicas.

Por último, através de uma análise empírica percorrida pelas regiões periurbanas de Piracicaba, foram selecionados bairros que apresentassem tanto uma proximidade significativa com o meio rural, situando-se no limite do último perímetro urbano estabelecido em 2018, quanto uma grande variedade de formas de uso do solo, visando adequá-los ao método de ZCLs e suas diferentes possibilidades. Assim, foram elencadas finalmente duas áreas periurbanas que puderam cumprir com todas essas características: o bairro Santa Rosa e o Jardim Dona Luísa, cuja região está inserida no bairro oficial Vila Fátima.

Devido à configuração territorial destes dois ambientes, espera-se observar alguns dos fatores que contribuem para a formação de ICUs nas áreas periurbanas, tais como: maior absorção e armazenamento do calor e da radiação

solar devido aos materiais aplicados nas superfícies urbanas e a retirada da cobertura vegetal nativa, as quais contribuíram para uma maior formação do calor sensível.

Para que fosse possível comparar a caracterização atmosférica da área de plantio em relação aos ambientes próximos, foram instalados dois sensores em cada um dos bairros de análise. Visando uma diferenciação dos dados obtidos, eles foram posicionados em áreas com distintas formas de uso do solo em cada bairro. As tabelas a seguir contêm uma síntese de informações sobre os recortes definidos ao redor de cada sensor analisado.

Tabela 2 – Descrição do recorte Santa Rosa 1


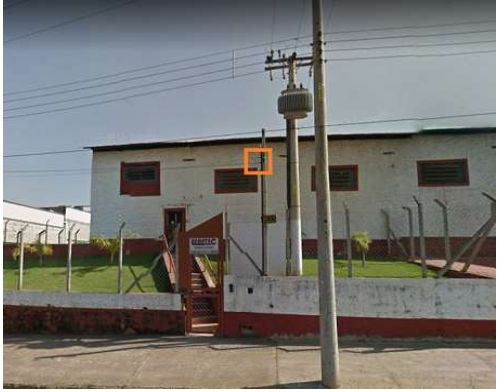
<p>Panorama do Recorte de Análise</p> 	<p>Altura do Sensor de temperatura e umidade</p>
	<p>2,5m</p>
	<p>Altitude média do terreno</p>
	<p>530m</p>
	<p>Posicionamento do sensor</p>
<p>Descrição dos arredores</p>	
<p>Defronte a uma área de proteção a manancial, com expressiva arborização. Proximidade com a área de canaviais para Oeste e, para Leste, com residências.</p>	

Tabela 3 – Descrição do recorte Santa Rosa 2

	<p>Altura do Sensor de temperatura e umidade</p>
--	--

<p>Panorama do Recorte de Análise</p> 	<p>2,5m</p>
<p>Descrição dos arredores</p>	<p>Altura média do terreno</p>
<p>Lotes empresariais espaçados, com expressiva impermeabilização do solo. Residências padronizadas, com um pavimento, ao Sul do sensor.</p>	<p>600m</p>
	<p>Posicionamento do sensor</p>
	

Tabela 4 – Descrição do recorte Jardim Dona Luísa 1

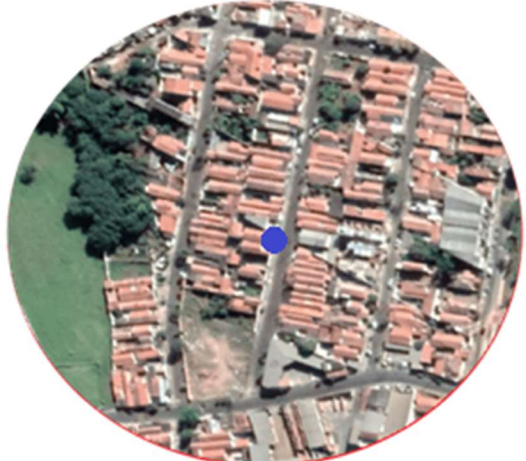


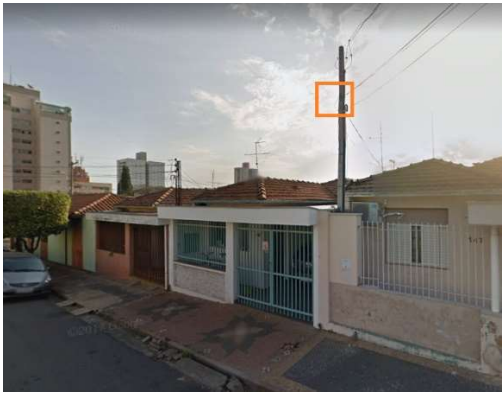
<p>Panorama do Recorte de Análise</p> 	<p>Altura do Sensor de temperatura e umidade</p>
<p>Descrição dos arredores</p>	<p>2,5m</p>
<p>Área de ocupação residencial mais densa. Imóveis com lotes regulares e residências de um pavimento. Proximidade com a unidade fabril da ArcelorMittal e com área de arborização a Oeste.</p>	<p>Altura média do terreno</p>
	<p>540m</p>
	<p>Posicionamento do sensor</p>
	

Tabela 5 – Descrição do recorte Jardim Dona Luísa 2

<p>Panorama do Recorte de Análise</p> 	<p>Altura do Sensor de temperatura e umidade</p>
	<p>2,5m</p>
	<p>Altura média do terreno</p>
	<p>560m</p>
<p>Descrição dos arredores</p>	<p>Posicionamento do sensor</p> 
	<p>Área com menor densidade ocupacional: lotes maiores mais espaçados, com menor área construída. Posicionamento frontal à área de canaviais, além de arborização mais intensa.</p>

Por fim, objetivando uma área urbanizada para referência, realizou-se a instalação de outro sensor termo-higrômetro em uma área do bairro central São Judas, o qual constitui uma forma de ocupação do solo distinta dos bairros analisados, como explicita a Tabela 6.

Tabela 6 – Descrição do recorte São Judas

<p>Panorama do Recorte de Análise</p> 	<p>Altura do Sensor de temperatura e umidade</p>
	<p>2,5m</p>
	<p>Altura média do terreno</p>
	<p>580m</p>
<p>Descrição dos arredores</p>	<p>Posicionamento do sensor</p> 
	<p>Região residencial, com urbanização mais densa e relativa verticalização de construções. Intensa impermeabilização do solo e baixa quantidade de áreas verdes.</p>

6.1.2. Área rural

A área rural limítrofe aos dois bairros estudados pertence ao polo regional da APTA⁹, que, além de utilizar seu território para pesquisas diversas, também arrenda parte significativa de sua área para produtores privados, que realizam o cultivo de cana-de-açúcar, por vezes praticando sua rotação em alguns segmentos com o plantio de soja. No centro desta propriedade também se localiza parte da APP do Ribeirão Guamium que abrange depois o Jardim Dona Luísa, região na qual há uma preservação expressiva de sua mata ciliar.

Foi instalada nesta propriedade uma estação meteorológica HOBO U30 para a obtenção de registros de temperatura e umidade do ar, direção e velocidade do vento. Esta estação foi posicionada em sua porção Centro-Sul, respeitando uma distância máxima de um quilômetro em linha reta até o início das habitações de ambos os bairros selecionados.

Imagem 12 – Vista dos canaviais utilizados para o estudo e o bairro Santa Rosa ao fundo



Foto 1: final da fase inicial de coleta, 12/19 (tirada pelo autor)

Foto 2: canaviais no início do estágio de crescimento, 02/20 (tirada pelo autor)

6.1.3. Recortes espaciais de análise

A análise da morfologia urbana de cada área observada realizou-se de acordo com a metodologia de ZCLs proposta por Stewart & Oke (2012). Deste modo, foram seguidas as diretrizes propostas por esses autores para adaptação

⁹ Agência Paulista de Tecnologia do Agronegócio, pertencente à Secretaria Estadual de Agricultura e Abastecimento, sendo responsável por pesquisas voltadas a melhorias produtivas nos espaços agrícolas. Fontes: <http://www.aptaregional.sp.gov.br/Quem-Somos/sobre-a-apta-regional.html> e <http://www.apta.sp.gov.br/quem-somos>.

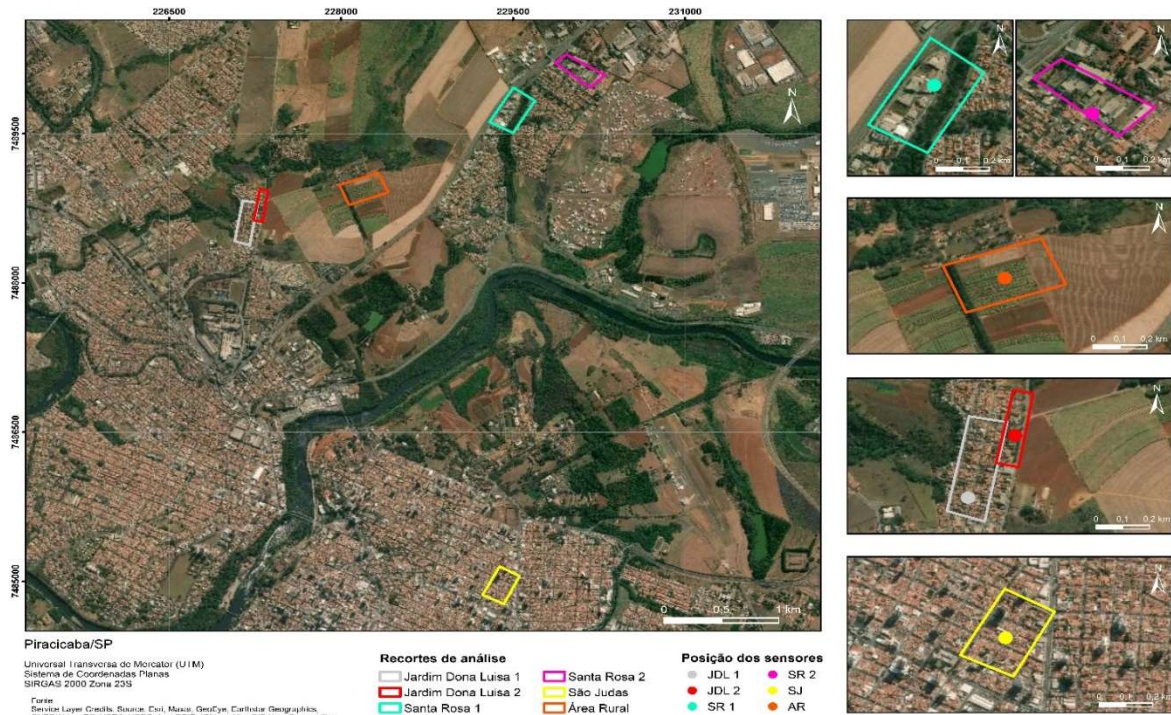
deste método às especificidades das áreas periurbanas em questão. Com isso, foram elencados os seguintes parâmetros urbanos, divididos em dois segmentos de análise complementares.

Primeiramente, os relativos à morfologia urbana, que são: Fator de Visão do Céu (FVC), cálculo do cânion urbano (relação H/W) e a altura média das edificações. O segundo parâmetro se refere à cobertura do solo, sendo consideradas as frações impermeáveis (dentro destas, a parte coberta por edificações ou por ruas) e permeáveis (áreas de vegetação ou de solo exposto combinadas) dos locais de análise.

O critério para definição das áreas ao redor dos sensores a serem selecionadas foi a paisagem urbana, como postulam Stewart e Oke (2012), ou seja, regiões com configuração e morfologia urbanas uniformes no entorno dos sensores de análise, já que estes são influenciados por estas condições.

Assim, recortes espaciais foram criados, com o auxílio de imagens de satélite e mapas municipais, além de observações empíricas, e elaborados no software ArcGis para a configuração de cada ambiente específico. Devido à variabilidade dos elementos da paisagem urbana, as áreas de cada local apresentaram tamanhos diversos, com valores aproximados variando de 25.000 a 100.000 m², de acordo com as condições semelhantes apresentadas por cada local, como demonstra o mapa a seguir.

Mapa 3 – Recortes territoriais de análise e posicionamento dos sensores nos bairros Santa Rosa, Jardim Dona Luísa e São Judas



O Fator de Visão do Céu foi obtido a partir do uso de câmera com lente “olho de peixe”: em cada recorte foram tiradas 2 fotografias representativas da condição dos mesmos, seguindo as especificações adequadas de altura e posicionamento da câmera (AGUILAR & SOUZA, 2019). Estas foram processadas no software RayMan (MATZARAKIS *et al.*, 2010), que forneceu o valor do FVC para cada fotografia. A partir da média para cada local, obteve-se o FVC final.

A relação H/W dos locais foi adquirida através do cálculo da relação de altura das edificações pelo comprimento do espaçamento nas ruas para cada trecho viário existente nos locais de análise. A partir destes números, foi realizada uma média ponderada com a representação proporcional espacial destas áreas para encontrar a relação média final¹⁰.

A altura média das edificações foi alcançada através de um levantamento empírico e por imagens de satélite das superfícies construídas, calculando-se proporcionalmente o espaço que cada construção com determinada altura ocupa nos locais, para chegar na média final proporcional.

As proporções de permeabilidade e impermeabilidade do solo de cada local foram obtidas a partir do mapeamento dos mesmos: através do

¹⁰ Exemplo ilustrativo do cálculo: relação H/W 1: 1,2, ocupando 75% da área e relação H/W 2: 0,8, ocupando 25% da área. Relação H/W média final: 1,1.

processamento de imagens de satélite e mapas-bases disponibilizados pela prefeitura de Piracicaba no software de mapeamento ArcGis® foi possível obter não apenas a porcentagem de cada uso do solo, mas também a feição urbana de cada local, como será demonstrado nos resultados.

6.2. PROCEDIMENTO DE OBTENÇÃO DE DADOS

Neste item estão descritas as especificações técnicas dos sensores usados, as variáveis coletadas, assim como os cálculos para obtenção das ICUs.

6.2.1 Elementos atmosféricos e especificações técnicas

As variáveis atmosféricas registradas durante as duas fases de coleta foram: umidade relativa e temperatura do ar para todos os sensores termohigrômetros e para a estação HOBO U30 a qual coletou também dados de pluviosidade, radiação solar, direção e velocidade do vento na área rural. Todos os equipamentos foram programados para fazer registros sincronizados a cada 30 minutos, a partir do primeiro dia de coleta em ambas as fases.

Os sensores utilizados nos ambientes periurbanos e no bairro central, mais urbanizado, foram do tipo HOBO/Pro V2 U23-001, com as seguintes especificações: faixa de operação de -40 a +70°C, precisão de 0,2°C acima de 0°C até 50°C e resolução de 0,02 °C a 25°C, conforme demonstrado na imagem 15. Destaca-se que todos os sensores foram posicionados respeitando uma distância mínima das construções e materiais próximos, os quais poderiam comprometer os dados, como descrevem as orientações técnicas de Oke (2006). Além disso, os sensores estavam inseridos em dispositivos protetores de pluviosidade, vento e radiação solar.

Já na área rural foi utilizada uma estação móvel HOBO equipada com bateria de alimentação solar, leitor do tipo Data Logger U30 WI-FI e uma grande variedade de sensores de medição, sendo que os utilizados nesta pesquisa estão especificados na tabela 7.

Imagem 13 – Sensor HOBO/ Pro V2 U23-001 e escudo protetor de PVC



Fonte: Onset Brasil (2012)

Tabela 7 – Equipamentos da estação HOBO utilizados para a coleta de dados

Sensor/Equipamento	Características Principais
Data Logger U30 WI-FI	<ul style="list-style-type: none"> • Memória de 512k bytes; • Período de coleta de dados de 1s até 18 horas; • 10 portas de entrada para sensores;
Sensor de umidade e temperatura S-THB-M002	<ul style="list-style-type: none"> • Faixa de Operação: de Temperatura: -40°C a +75 °C; de Umidade: 0 a 100% de UR; • Precisão: de Temperatura: ±0,2°C; de Umidade: ±2,5%; • Resolução: de Temperatura: 0,02°C; de Umidade: 0,1%;
Pluviômetro S-RGB-M002	<ul style="list-style-type: none"> • Taxa de medição máxima: 1270 mm/h; • Resolução: 0,2 mm; • Precisão: 0,2mm;
Sensor de direção e velocidade do vento S-WSET-A (com suporte metálico)	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidade do vento: 0 a 45 m/s; • Precisão de ± 1.1 m/s • Resolução de 0,38/s; • Direção do vento: 0 a 355° graus; • Precisão de 5 graus com resolução de 1,4 graus;
Painel Solar-6W	<ul style="list-style-type: none"> • Potência: 6W; • Tensão de saída: 6V;

Fonte: Onset Brasil (2012)

O posicionamento da estação meteorológica HOBO U30 na área de cultivo canavieiro, com relação às duas fases de coleta, está exposto na imagem a seguir.

Imagem 14 – Instalação da Estação Meteorológica nas fases inicial e final de obtenção de dados

Fase Inicial

Fase Final



Fotos tiradas pelo autor nos dias 22/11/19 e 24/09/20, respectivamente.

6.2.2 Cálculos das ICUs

As ICUs foram obtidas a partir de um cálculo simples, considerando a diferença entre cada recorte de análise (periurbanos e urbanizado) e a área rural. Para essa comparação, as ZCLs correspondentes aos recortes, demonstradas nos resultados, foram empregadas. Desta maneira, para a fase inicial, pós-colheita, os cálculos foram:

$$ICU = T \text{ ZCL } 2/3 - T \text{ ZCLF} \quad (1)$$

$$ICU = T \text{ ZCLs } 3, 5, 6 \text{ e } 8 - T \text{ ZCLF} \quad (2)$$

Em que “T” é a Temperatura do ar, expressa em °C, ZCL 2/3 equivale ao recorte urbanizado, ZCLs 3, 5, 6 e 8 aos recortes periurbanos e ZCLF equivale à área rural pós-colheita. Para a fase final, pré-colheita, os cálculos foram:

$$ICU = T \text{ ZCL } 2/3 - T \text{ ZCLC} \quad (3)$$

$$ICU = T \text{ ZCLs } 3, 5, 6 \text{ e } 8 - T \text{ ZCLC} \quad (4)$$

Em que “T” é a Temperatura do ar, expressa em °C, ZCLZ 2/3 equivale ao recorte urbanizado, ZCLs 3, 5, 6 e 8 aos recortes periurbanos e ZCLC equivale à área rural pós-colheita.

6.3. FASES DE OBTENÇÃO DE DADOS

Para selecionar os referidos períodos, buscou-se primeiramente uma adequação às variações sazonais da cana-de-açúcar. Desta maneira, a coleta foi dividida em dois momentos: uma fase logo após a colheita, situação em que o solo se mantém praticamente exposto em sua maioria ou coberto por resíduos

da colheita – palha – por pelo menos algumas semanas ou meses, quando ocorrerá a fase de rebrota ou novo plantio; e uma fase anterior à realização da mesma, no qual a planta está no estágio de maturação, já tendo atingido sua altura e volume máximos, respeitando os ciclos de 12 a 18 meses. Caracterizou-se assim os períodos de maior distinção de uso do solo canavieiro.

Como destacado no capítulo 5, o período oficial de colheita da cana-de-açúcar para toda a região Centro-Sul abrange um espaço significativo de tempo, de abril a novembro. Entretanto, foram realizadas visitas periódicas à área exclusiva de plantio onde foi realizada a coleta, para estabelecer precisamente qual foi o momento específico de maior colheita nesse local, o qual, para os anos de 2019 e 2020, se deu entre os meses de outubro e novembro.

6.3.1 Fase inicial: pós-colheita

Assim foi determinada a fase inicial de obtenção de dados: de 22 de novembro a 17 de dezembro de 2019. Escolheu-se empregar uma amplitude relativamente expressiva de tempo (26 dias) para a fase inicial devido principalmente ao fato dessa época do ano (aproximação do verão) apresentar elevados índices pluviométricos, os quais poderiam comprometer a análise.

Devido à intensa pluviosidade, optou-se por selecionar, nesta fase, momentos caracterizados como a primeira fase dos sistemas pré-frontais, já que estes são períodos de maior intensidade de ICUs, como citado anteriormente. Para isso, foram analisados primeiramente os dados disponibilizados pela estação do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) de Piracicaba, além dos dados de temperatura do ar e umidade relativa obtidos em campo, buscando dias que apresentaram a configuração típica desta fase.

Esta condição mostrou-se mais visível em três momentos principais, como será demonstrado nos resultados: dois períodos pré-frontais com três dias cada (24 a 26/11 e 07 a 09/12 de 2019), além de um dia de condição atmosférica estável, utilizado para o transecto móvel. Para corroborar essa conclusão, foram observadas também as imagens de satélite referentes a estes momentos.

6.3.2 Fase final: Pré-colheita

A fase final se deu entre os dias 21 de setembro a 07 de outubro de 2020, ou seja, logo antes da realização da colheita de ciclo de 12 meses na referida área. Esta fase foi mais curta do que a primeira, com 17 dias, pois as condições atmosféricas encontradas foram favoráveis à obtenção de dados, ou seja, tempo estável, com baixas taxas de pluviosidade ou mesmo nebulosidade. Esta expressiva estabilidade (que será demonstrada nos resultados) foi causada principalmente pela atuação praticamente nula do sistema de frentes durante o referido período, contribuindo para a formação de ICUs.

Em razão destes fatores, para eleger momentos representativos desta fase, optou-se por usar ocasiões com duas circunstâncias distintas: primeiramente, um momento (23 a 25/09 de 2020) com condições de temperatura e umidade do ar similares às encontradas na fase inicial de coleta (para melhor comparação entre estes). Em segundo lugar, foi escolhido um momento com grande representatividade do calor intenso e de sua estabilidade atmosférica (30/09 a 02/10 de 2020), possibilitando maior diferenciação em relação à fase inicial. Dentro dos resultados, também estarão expostas as condições atmosféricas destes momentos selecionados.

Destaca-se que a prática do transecto móvel também foi realizada, em dias favoráveis, na fase pré-colheita, o que permitirá maior comparação entre os dois momentos de análise.

6.4. TRANSECTOS MÓVEIS

Em ambas as fases de coleta, foram selecionados dias para a realização da prática adicional do transecto móvel. A justificativa para sua escolha se deu primeiramente pela diversidade de formas de uso do solo no bairro Santa Rosa (áreas residenciais, de arborização próximas a um manancial e distrito industrial), que poderão apresentar condições atmosféricas distintas, e que não seriam totalmente contempladas apenas por pontos fixos de coleta.

Além disso, a área de cultivo também não é completamente uniforme. Isso porque, como apontado anteriormente, a colheita canavieira se dá em um processo contínuo que dura alguns meses, respeitando a fase na qual ocorreu o plantio em cada área específica do canavial. Assim, é recorrente visualizar, nos canaviais, desde áreas colhidas há algumas semanas, com plantas na fase de

rebrotas ou primeiro brotamento, passando por regiões colhidas recentemente nas quais o solo está exposto, até algumas em que a colheita ainda não ocorreu, dependendo do momento observado.

Buscando observar se estas distintas características do meio rural apresentariam consequências diferentes para o microclima ao redor, foram planejados transectos móveis, com os quais fosse possível contemplar estas situações em seu percurso.

Para isso, foram utilizados mais dois sensores termo-higrômetros HOBO/Pro V2 U23-001 (dentro de dispositivos protetores). Estes foram instalados na parte frontal de duas bicicletas (a uma altura aproximada de um metro do solo, como demonstra a imagem 17), percorrendo assim de maneira mais eficaz o percurso planejado, em comparação ao que um pedestre poderia percorrer, porém sem motores movidos à combustão, pois poderiam prejudicar a confiabilidade dos dados. A velocidade média de ambos os veículos foi de 4,5 km/hora, para todos os momentos de coleta.

Imagem 15 – posicionamento do sensor termo-higrômetro em uma bicicleta



Foto tirada pelo autor, 09/20

Nos referidos dias, duas pessoas com as bicicletas percorreram simultaneamente seus trajetos: uma dentro do Santa Rosa e outra na área rural. Os percursos foram realizados em dois períodos: no final da manhã, que se iniciou às 10h30 – ocasião de intensificação da insolação –, e no final da tarde, início às 16h30 – com o início do declínio da radiação e da temperatura, ambos com uma hora de duração cada, e obtenção de dados de temperatura e umidade do ar em intervalos de cinco minutos. Ainda foi realizado mais um transecto no início da noite, às 19h00, com a mesma duração e intervalo de coleta, apenas

na área de cultivo canavieiro, buscando observar o rápido resfriamento que as áreas rurais possuem com relação aos ambientes urbanos.

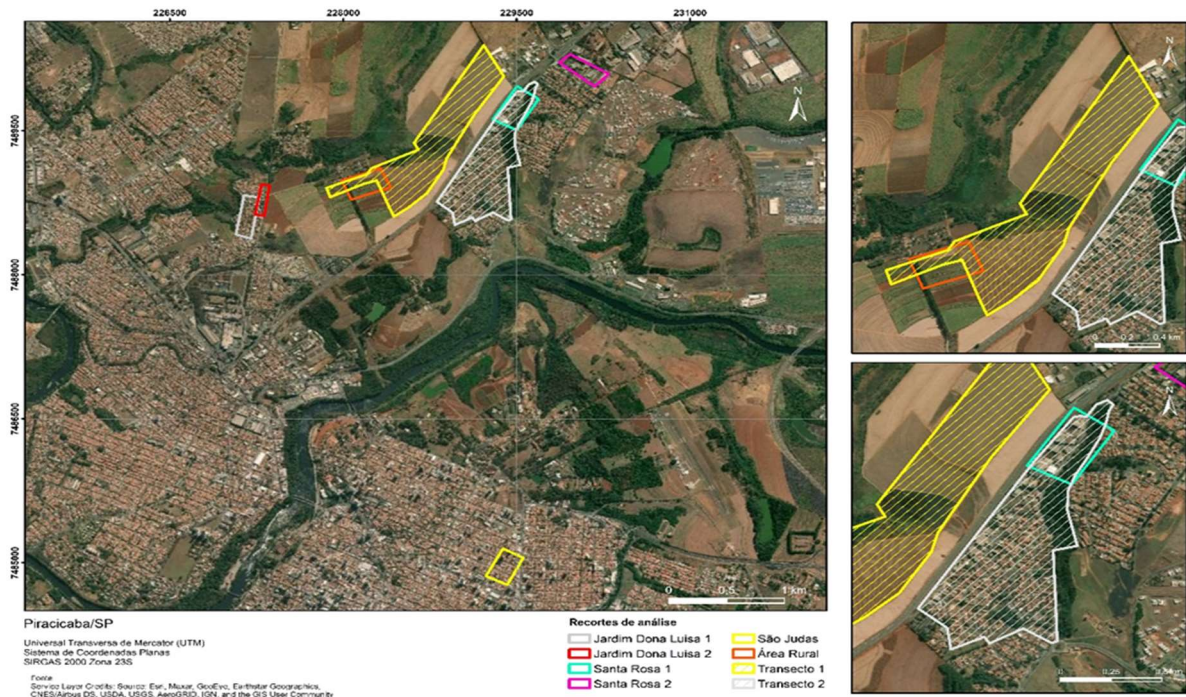
Na área rural, o transecto se iniciou onde estava localizada a estação HOBO U30 e percorreu pontos com diferentes estágios do crescimento da cana-de-açúcar: desde áreas ainda a serem colhidas a pontos com solo exposto, passando por áreas onde o cultivo apresentava alguns centímetros de altura, abarcando também parcela da APP. No Santa Rosa, o transecto se iniciou em uma região com uso predominantemente empresarial e percorreu parte de sua área mais densa, contornando a área de proteção a manancial e regiões de ocupação residencial.

Destaca-se que ambos os trajetos percorreram longos trechos paralelamente à rodovia que separa as regiões de análise, para, além de comparar as diferenças térmicas internas a estas áreas, também demonstrar como ocupações distintas de solo (rural e urbana) apresentam microclimas diferentes, ainda que bem próximas. Os percursos dos trajetos (transecto 1 – rural e transecto 2 – periurbano) estão expostos no mapa 4, que evidencia a proximidade destes com os recortes de análise Santa Rosa 1 e Área Rural.

A correlação dos dados obtidos durante os percursos foi realizada não apenas entre si (transecto rural e periurbano), mas também por meio de comparação com os mesmos horários de registro realizados pelos pontos fixos nos respectivos períodos: manhã, tarde e noite, especificamente com os dados da estação HOBO e dos sensores Jardim Dona Luísa 1 e Santa Rosa 2. A seleção destes últimos se deu devido ao seu maior distanciamento para com as áreas do transecto, permitindo maior diferenciação.

Com relação aos dias dos transectos, na fase inicial de coleta foi selecionado o dia 16/12, enquanto na fase final os transectos foram divididos em dois dias: 28/09 e 30/09, escolhidos devido às condições atmosféricas estáveis apresentadas nos mesmos – ausência de nebulosidade e precipitação, com forte insolação, as quais serão demonstradas nos resultados.

Mapa 4 – Trajetos percorridos pelos transectos móveis na área rural e periurbana (bairro Santa Rosa)



7. ANÁLISES DE RESULTADOS

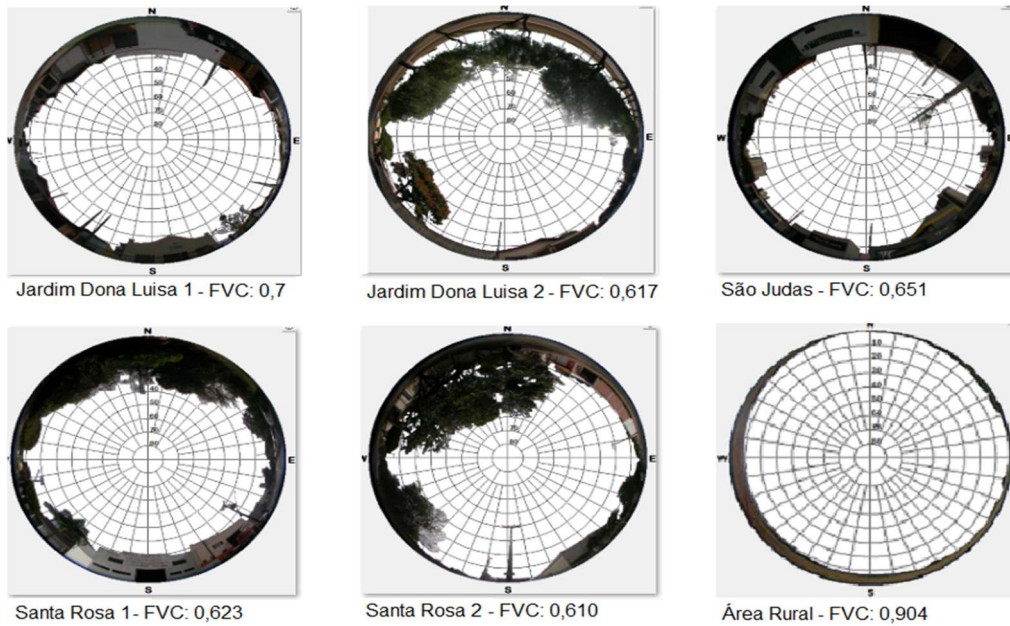
O levantamento de dados durante as referidas fases possibilitou a visualização de uma série de condições relevantes para as análises das configurações climática das áreas em estudo. Os resultados estão expostos de acordo com os métodos desta pesquisa, ou seja, primeiramente estão discriminadas as condições territoriais e de uso do solo das áreas de análise.

Posteriormente, são apresentadas a caracterização dos recortes espaciais de análise, as condições atmosféricas da fase inicial de coleta; as condições atmosféricas da fase final de coleta; as condições atmosféricas do transecto móvel; as análises das Ilhas de Calor Urbano (ICUs): ambiente urbanizado; as análises das Ilhas de Calor Urbano (ICUs): ambientes periurbanos; e, por fim, as análises dos transectos móveis.

7.1. CARACTERIZAÇÃO DOS RECORTES ESPACIAIS DE ANÁLISE

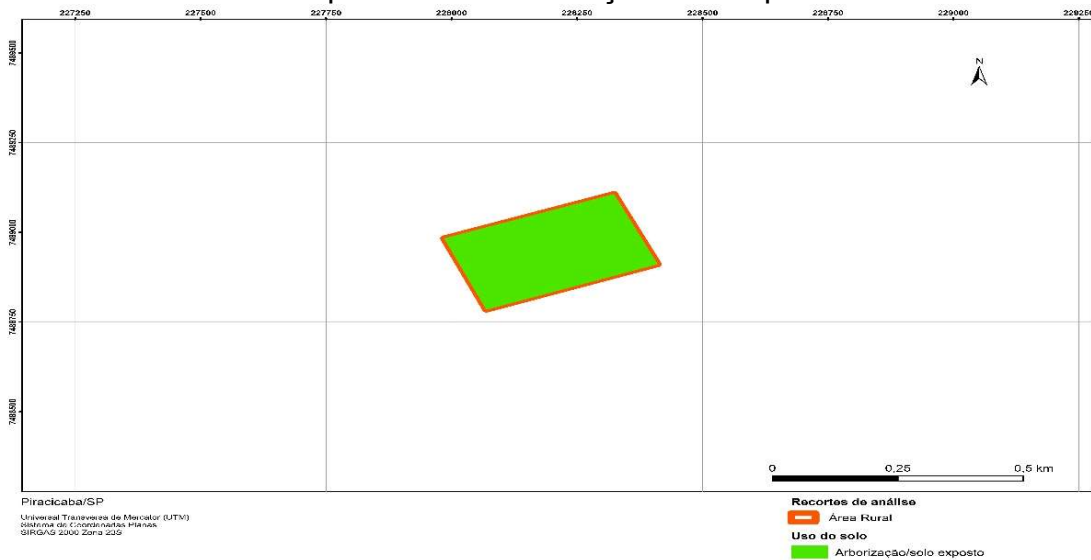
Neste item estão expostas as principais condições territoriais obtidas para cada área de análise, referentes à sua morfologia urbana e suas formas de uso do solo, tal como proposto nos métodos. Em primeiro lugar, foram obtidos os FVCs de cada área através da câmera “olho de peixe”, os quais estão ilustrados representativamente na imagem abaixo.

Imagem 16 – FVCs de representação para os recortes de análise

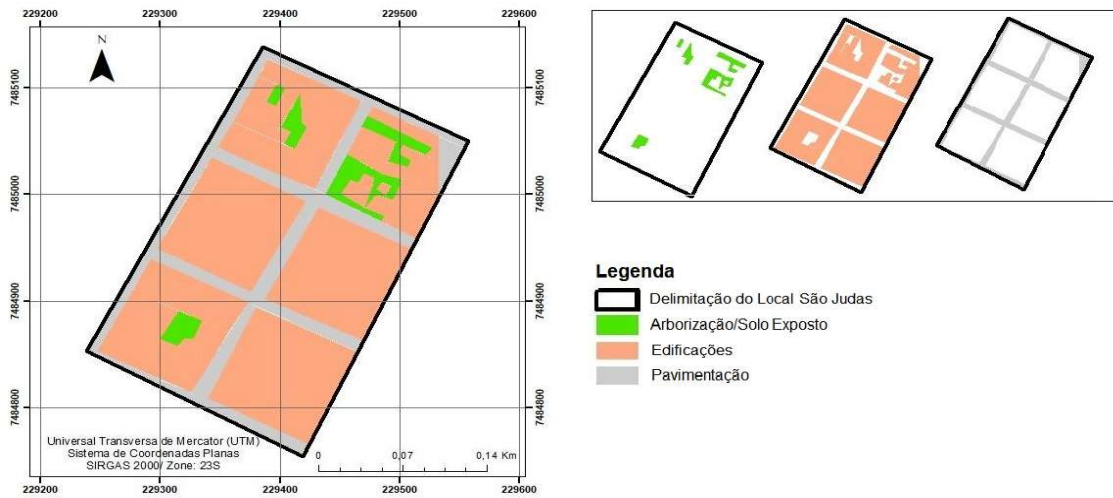


Os mapeamentos realizados permitiram melhores visualização e análise das feições de uso do solo para cada área, como está exposto a seguir.

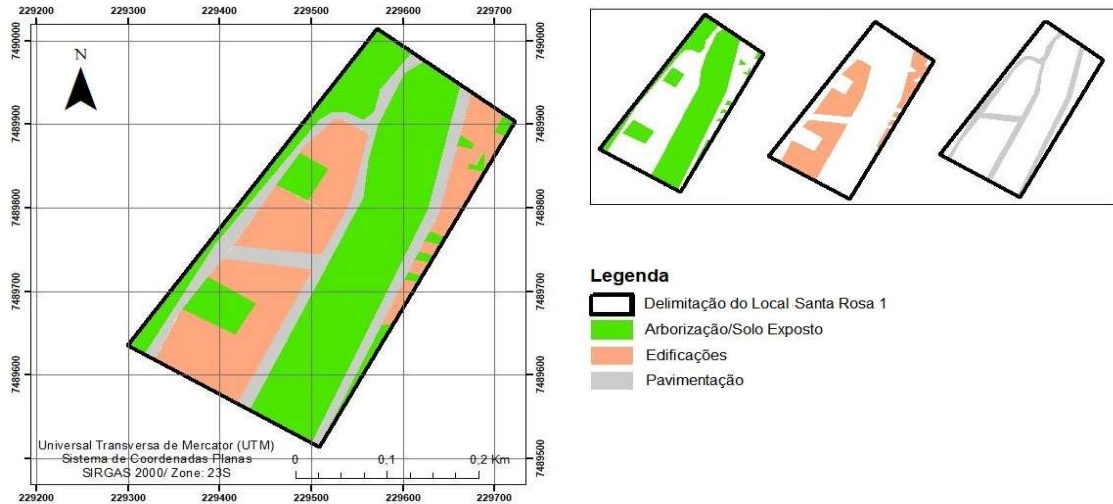
Mapa 5 – Delimitação do recorte de análise na área rural e sua superfície de arborização/solo exposto



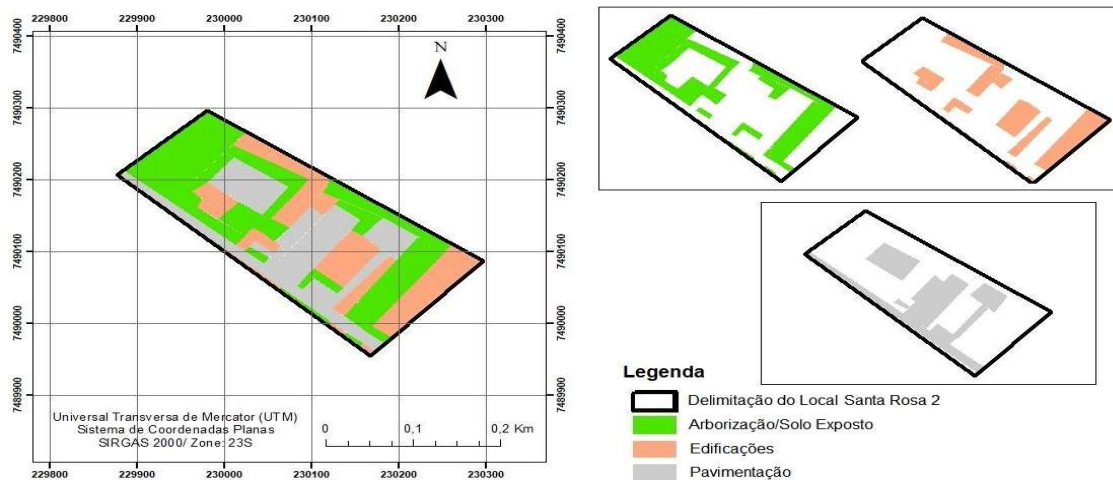
Mapa 6 – Delimitação do recorte de análise no bairro São Judas e suas superfícies de pavimentação, edificações e arborização/solo exposto



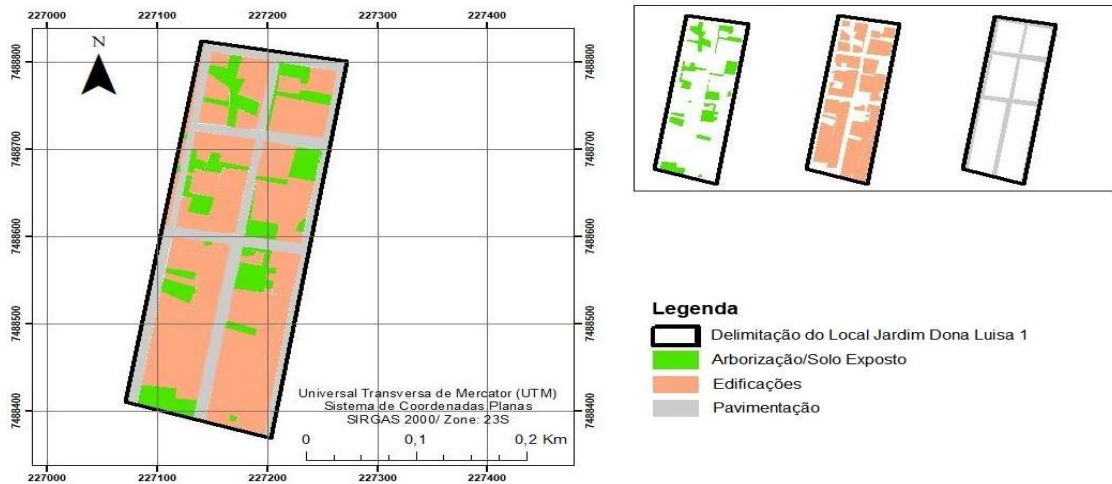
Mapa 7 – Delimitação do recorte 1 de análise no bairro Santa Rosa e suas superfícies de pavimentação, edificações e arborização/solo exposto



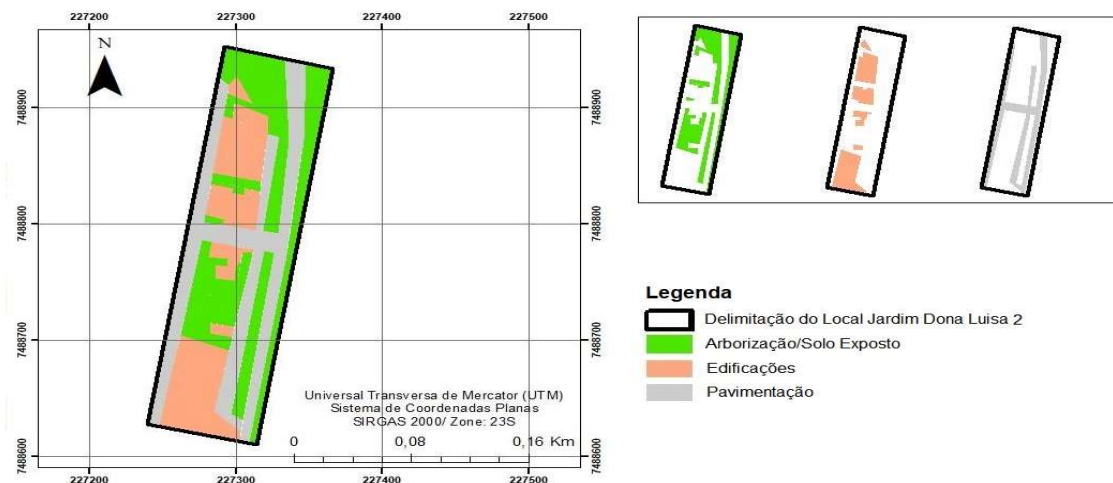
Mapa 8 – Delimitação do recorte 2 de análise no bairro Santa Rosa e suas superfícies de pavimentação, edificações e arborização/solo exposto



Mapa 9 – Delimitação do recorte 1 de análise no bairro Jardim Dona Luísa e suas superfícies de pavimentação, edificações e arborização/solo exposto



Mapa 10 – Delimitação do recorte 2 de análise no bairro Jardim Dona Luísa e suas superfícies de pavimentação, edificações e arborização/solo exposto



Os mapas acima demonstram as diversas feições encontradas para cada local de análise. Observa-se que a área do São Judas possui uma paisagem mais padronizada em relação a quarteirões e arruamento, com poucas áreas de vegetação e grande superfície construída ou impermeável. Por outro lado, os bairros periurbanos possuem arranjos menos uniformes, variando de acordo com a configuração no entorno de cada sensor.

O local Santa Rosa 1 é muito influenciado pela arborização presente em sua área, assim como por seus lotes empresariais relativamente espaçados um do outro. Já o Santa Rosa 2 possui como configuração principal a presença de

grupos industriais, alternados com generosa pavimentação para áreas de estacionamento e movimentos de veículos de carga, além de algumas áreas verdes.

No Jardim Dona Luísa 1, o entorno é densamente ocupado por residências térreas e taxa de permeabilidade do solo maior do que o bairro São Judas. Na área Jardim Dona Luísa 2, há um maior espaçamento entre as construções, maior abundância de áreas verdes e diversas áreas com solo permeável, além da proximidade com a área de canais.

A combinação dos fatores acima apontados, em conjunto com as relações H/W e altura média das edificações, permitiu não apenas a descrição mais precisa de cada área, servindo como base para a análise dos resultados, mas também classificá-los de acordo com a metodologia de ZCLs, como está demonstrado na tabela abaixo. A partir desta classificação e na análise dos resultados, os sensores de análise receberão a nomenclatura de sua respectiva ZCL.

Tabela 8 – Classificação dos locais de análise dentro da metodologia de Zonas Climáticas Locais

Local de análise	Área (mil m ²)	Altitude Média (m)	FVC	Relação H/W	Altura média das edificações (m)	Superfície Permeável (%)	Superfície Impermeável (const. + pavim.) (%)	Superfície construída (%)	Superfície pavimentada (%)	Classificação como ZCL
São Judas	65	600	0,65	0,83	6,5	5,28	94,72	72,76	21,96	Combinação 2 + 3 <i>Compact midrise</i> e <i>Compact low-rise</i>
Santa Rosa 1	98	530	0,62	0,4	6,75	50,23	49,77	31,22	18,55	5 <i>Open midrise</i>
Santa Rosa 2	60	610	0,61	0,42	3,6	41,13	58,87	27,78	31,09	8 <i>Large low-rise</i>
Jardim Dona Luísa 1	58	520	0,7	0,44	4,0	15,42	84,58	58,73	25,85	3 <i>Compact low-rise</i>
Jardim Dona Luísa 2	25	540	0,62	0,155	3,5	38,32	61,68	26,87	34,81	6 <i>Open low-rise</i>

Área Rural Pós-Colheita	80	565	0,90	0	0	100	0	0	0	F <i>Bare soil or sand</i>
Área Rural Pré-Colheita	80	565	0,90	0	0	100	0	0	0	C <i>Bush, scrub</i>

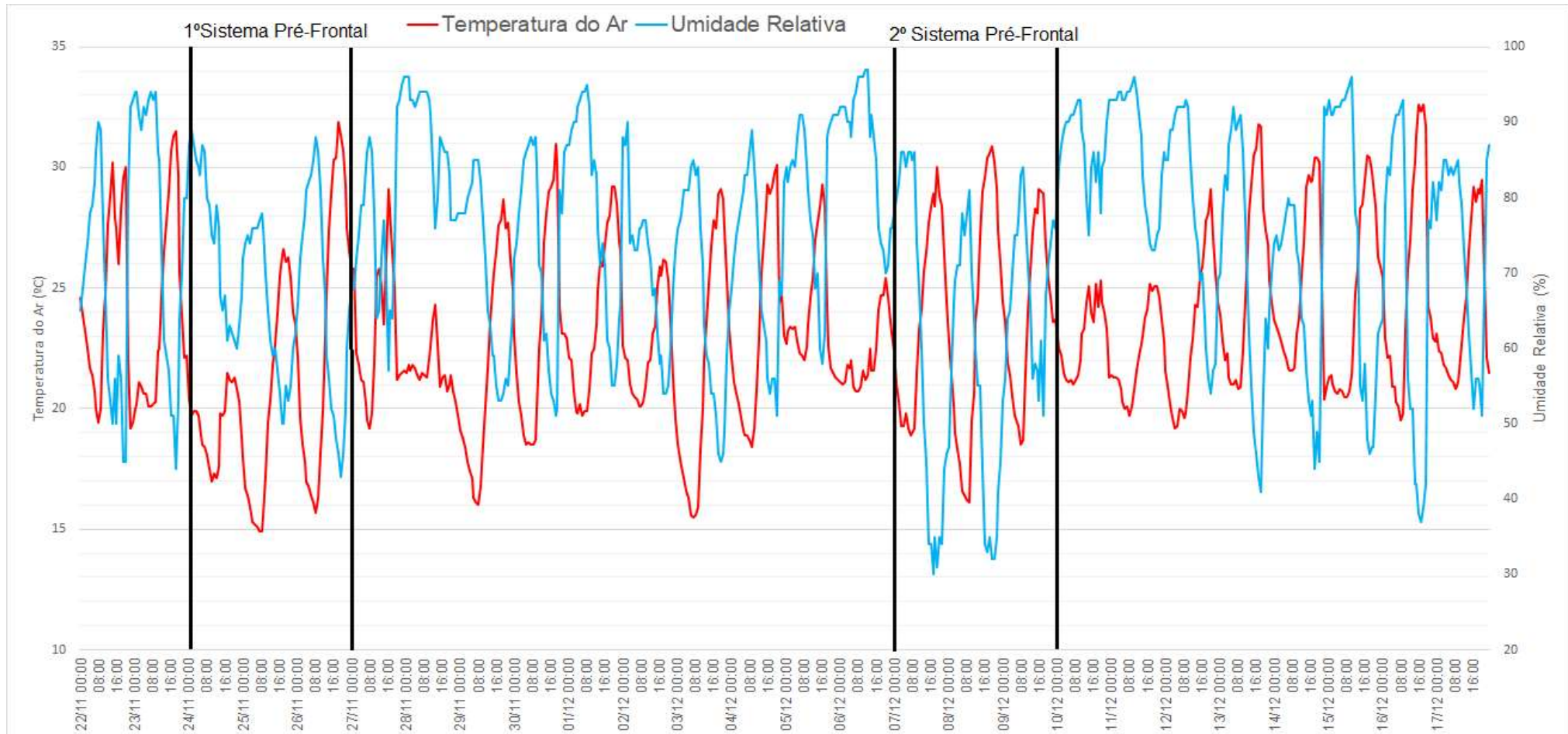
7.2. CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS DA FASE INICIAL DE COLETA

A primeira etapa de coleta e análise de informações meteorológica consistiu em identificar a atuação das massas atmosféricas pré-frontais através das variações de temperatura e umidade relativa do ar em Piracicaba/SP no período de 22 de novembro a 17 de dezembro, disponibilizados pelo INMET conforme o Gráfico 5.

Para confirmação das condições atmosféricas dos referidos períodos, foram analisadas imagens do satélite Meteosat 9, fornecidas pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC (2019, 2020), pertencente ao Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), para dois horários distintos: três da manhã e meio-dia, observando especificamente o interior do estado de São Paulo, onde se insere a região de Piracicaba.

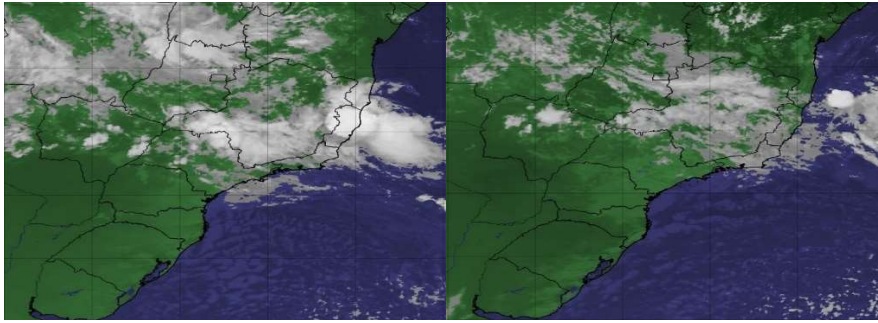
Apesar da fase de Prenúncio dos referidos sistemas pré-frontais caracterizarem-se, neste caso, por um período de três dias, optou-se, em relação às imagens de satélite, por fazer uma seleção também do dia posterior a estes, para melhor visualização do movimento das massas de ar atuantes sobre o território, conforme o conjunto de imagens de satélites (Imagem 19).

Gráfico 5 – Temperatura do Ar e Umidade Relativa em Piracicaba/SP, período de 22/11 a 17/12/2019

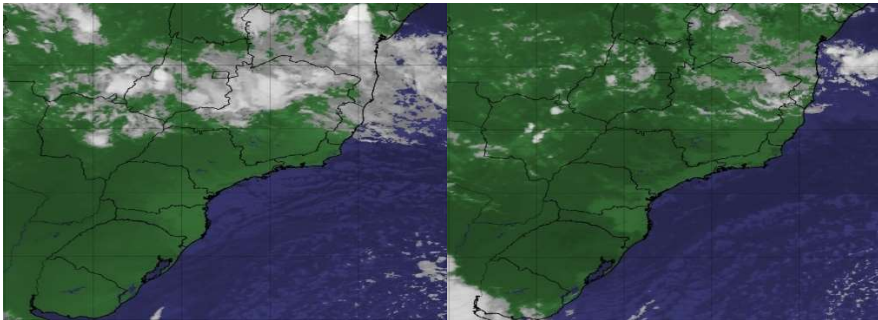


Fonte: estação automática do INMET. Disponível em: http://www.inmet.gov.br/sonabra/pg_dspDadosCodigo_sim.php?QTcyNg==

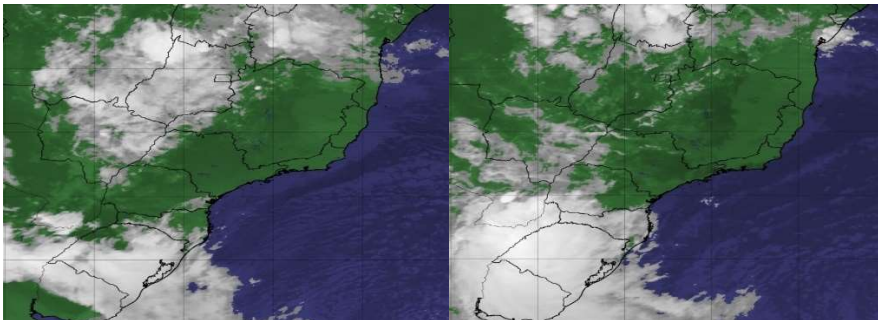
Imagem 17 – Imagens de satélite para o período de 24/11 a 27/11



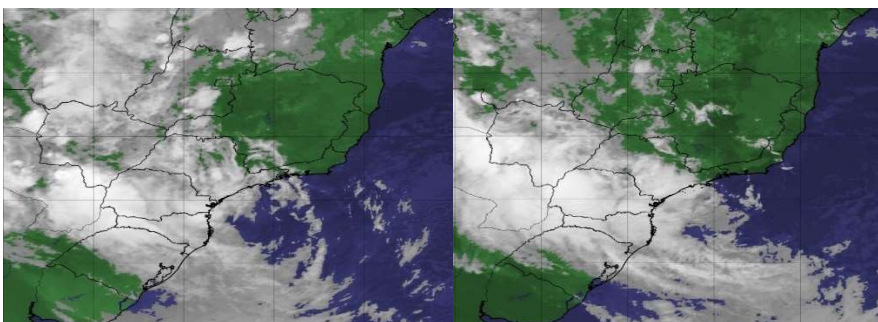
Dia 24/11 03:00 AM copyright 2010-2012 EUMETSAT EUMETSAT Dia 24/11 12:00 PM copyright 2010-2012 EUMETSAT



Dia 25/11 03:00 AM copyright 2010-2012 EUMETSAT EUMETSAT Dia 25/11 12:00 PM copyright 2010-2012 EUMETSAT



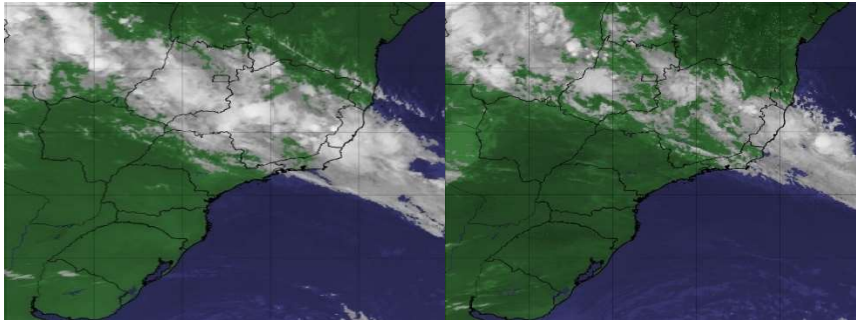
Dia 26/11 03:00 AM copyright 2010-2012 EUMETSAT EUMETSAT Dia 26/11 12:00 PM copyright 2010-2012 EUMETSAT



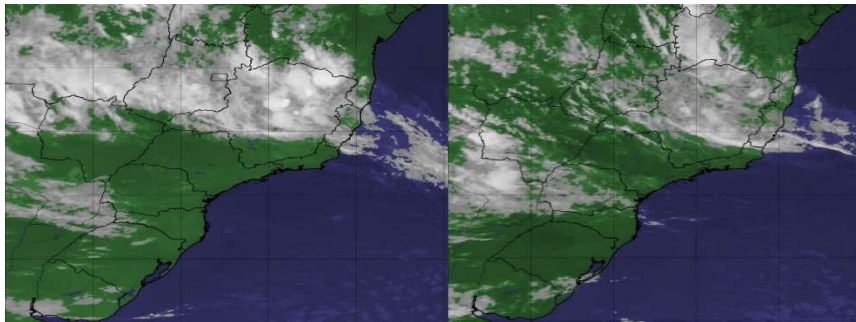
Dia 27/11 03:00 AM copyright 2010-2012 EUMETSAT EUMETSAT Dia 27/11 12:00 PM copyright 2010-2012 EUMETSAT

Fonte: CPTEC/INPE. Organizado pelo autor

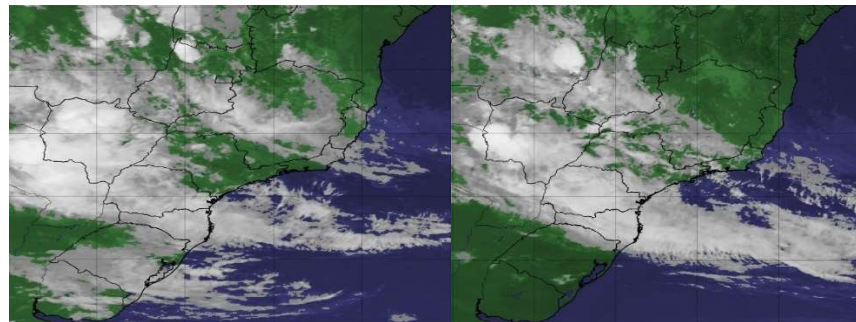
Imagem 18 – Imagens de satélite para o período de 07/12 a 10/12



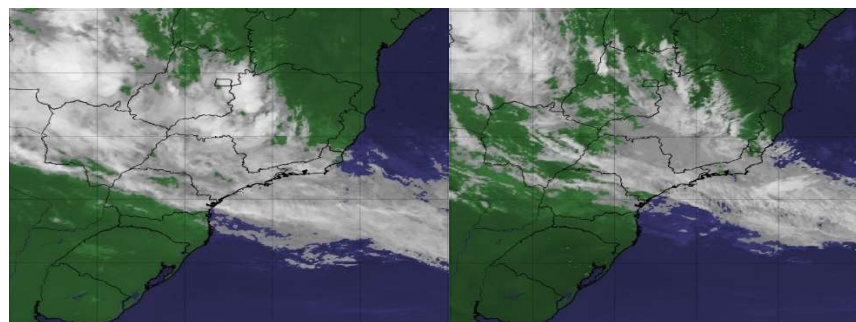
Dia 07/12 03:00 AM copyright 2010-2012 EUMETSAT EUMETSAT Dia 07/12 12:00 PM copyright 2010-2012 EUMETSAT



Dia 08/12 03:00 AM copyright 2010-2012 EUMETSAT EUMETSAT Dia 08/12 12:00 PM copyright 2010-2012 EUMETSAT



Dia 09/12 03:00 AM copyright 2010-2012 EUMETSAT EUMETSAT Dia 09/12 12:00 PM copyright 2010-2012 EUMETSAT



Dia 10/12 03:00 AM copyright 2010-2012 EUMETSAT EUMETSAT Dia 10/12 12:00 PM copyright 2010-2012 EUMETSAT

Fonte: CPTEC/INPE. Organizado pelo autor

Como demonstram as imagens acima, os primeiros dias de ambos os períodos (24/11 e 07/12) caracterizam-se pelo final de um sistema frontal

anterior, com nebulosidade e precipitação decrescentes, as quais se dissiparam ou continuaram rumando sentido Norte (movimento típico da Massa Polar Atlântica – *mPa*).

Nos segundos dias analisados (25/11 e 08/12), o tempo permanece com condições estáveis e sem nebulosidade, enquanto nos terceiros dias (26/11 e 09/12), encerrando a fase de Prenúncio, ainda podem ser observadas condições majoritariamente estáveis, porém com o avanço de nebulosidade oriunda do Sul, a qual se faz mais presente no final dos mesmos.

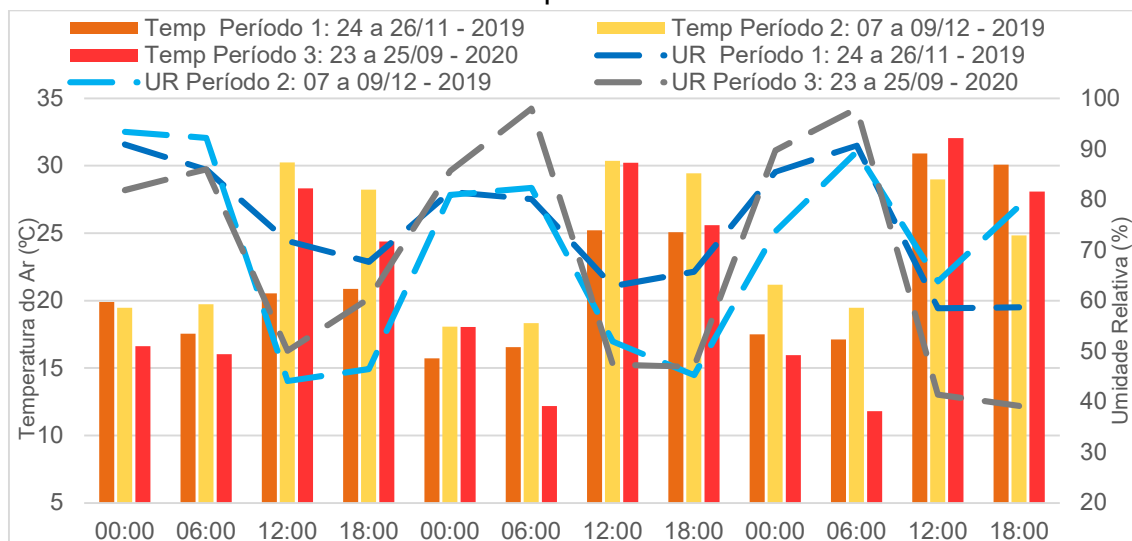
Por fim, nos últimos dias observados, os primeiros da fase de Avanço (27/11 e 10/12), pode-se visualizar expressivas instabilidade e nebulosidade, devido à chegada de uma frente fria, causando a precipitação e possivelmente a redução da intensidade de ICUs em ambos os períodos.

7.3. CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS DA FASE FINAL DE COLETA

Como destacado, a fase final de coleta apresentou (especialmente a partir da metade de sua duração) considerável estabilidade, fazendo com que o uso de imagens de satélite não apresentasse grande visibilidade. Assim, optou-se por outras maneiras de contextualização das condições encontradas.

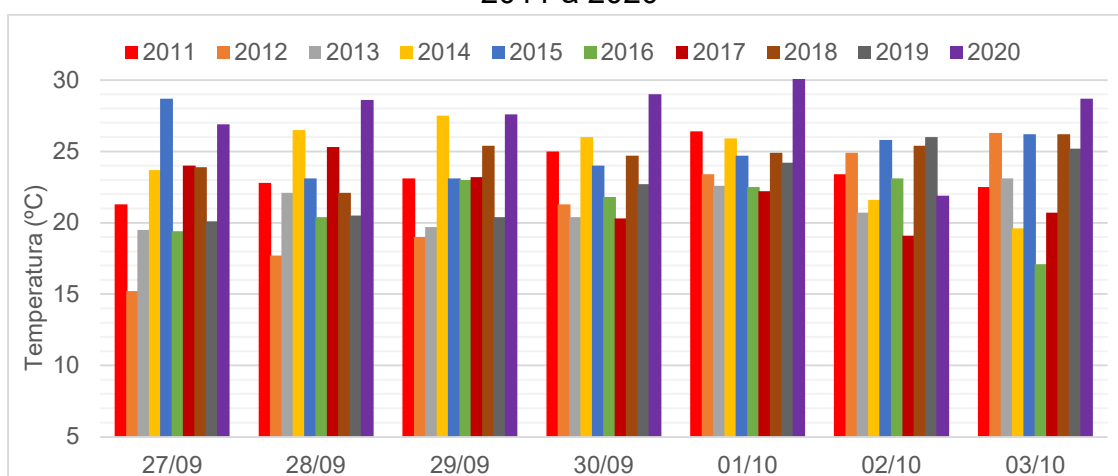
Para o primeiro recorte temporal, de condições similares às da fase inicial de coleta, foram comparados os dados de temperatura e umidade do ar obtidos pela estação HOBO U30 destes três momentos: os dois recortes da fase inicial de coleta e o primeiro recorte da fase final, para demonstrar sua semelhança.

Gráfico 6 – Comparação de Temperatura e Umidade do Ar para três recortes temporais de análise



Como pode ser observado, as condições atmosféricas dos três recortes temporais foram similares, com variações naturais, o que permitiu uma comparação dos períodos em função da variação da altura do canavial. Porém o segundo recorte temporal foi caracterizado por uma elevação expressiva da temperatura do ar. Para demonstrar este momento, foram analisadas as normais climatológicas disponibilizadas pela estação da ESALQ/USP, nos últimos dez anos, como demonstra o gráfico 7.

Gráfico 7 – Temperatura média diária, período de 27/09 a 03/10, de 2011 a 2020



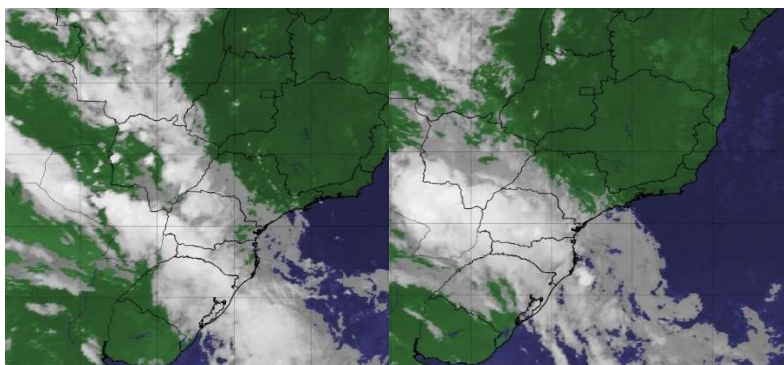
Fonte: estação meteorológica da ESALQ

Já que, para a observação de uma onda de calor é necessário um período maior de tempo, foram selecionados um total de 7 dias, contendo o recorte analisado em 2020, e que demonstram que, em sua grande maioria, as médias diárias nesta ocasião foram mais elevadas em 2020 do que em qualquer outro ano da série considerada.

7.4. CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS DO TRANSECTO MÓVEL

Para confirmação das condições atmosféricas estáveis observadas nos dias de realização do transecto móvel, foram obtidas imagens de satélite para os mesmos:

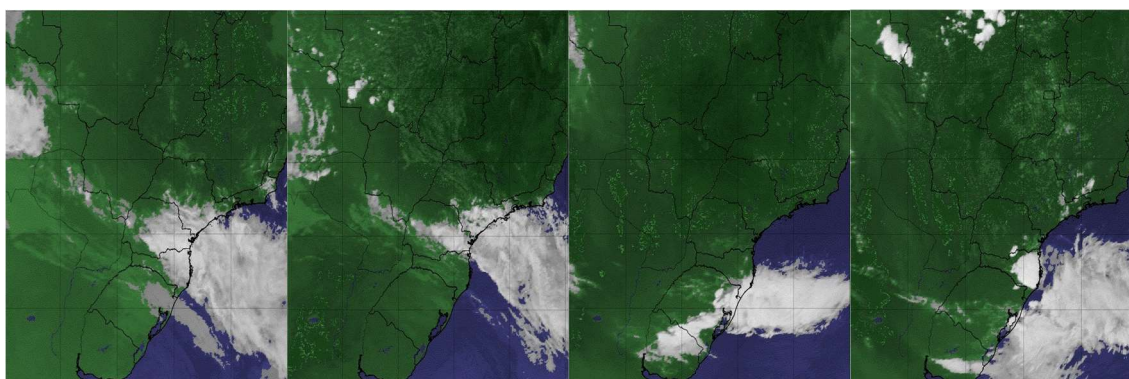
Imagem 19 – Imagens de satélite para o dia 16/12/19



Dia 16/12/19 00:00 AM copyright 2010-2012 EUMETSAT EUMETSAT Dia 06/12/19 06:00 AM copyright 2010-2012 EUMETSAT

Apesar da observação de um possível avanço inicial de um sistema frontal (observado pela nebulosidade na região Sul), as condições atmosféricas do dia 16/12 para a região de Piracicaba ainda permaneceram estáveis.

Imagem 20 – Imagens de satélite para os dias 28/09 e 30/09 de 2020



Dia 28/09 12:00 Dia 28/09 16:00 Dia 30/09 12:00 Dia 30/09 18:00

copyright 2010-2012 EUMETSAT

Já para os dias 28/09 e 30/09 de 2020, observa-se uma presença de nebulosidade ao Sul da região analisada, a qual não apresentou comportamento de avanço para o Norte, mantendo a estabilidade desejada. A tabela abaixo apresenta algumas características meteorológicas para os referidos dias, demonstrando as condições desejadas, tais como uma umidade relativa não tão elevada (caracterizando ausência de pluviosidade) e altas taxas de radiação solar.

Tabela 9 – Condições meteorológicas médias para os dias 16/12/19, 28/09/20 e 30/09/20

	16/12/2019	28/09/2020	30/09/2020
Temperatura do Ar (°C)	25.32	26.13	28.56
Umidade Relativa (%)	74.81	59.12	53.62
Velocidade do Vento (km/h)	6.39	7.24	5.88
Radiação Solar (W/m ²)	385.35	391.96	433.86

Fonte: estação meteorológica da ESALQ

7.5. ANÁLISE DAS ILHAS DE CALOR URBANO (ICUS): AMBIENTE URBANIZADO

De acordo com o proposto nos métodos desta pesquisa, as diferenças entre as temperaturas da ZCL2/3, isto é, do bairro urbano, para as ZCLs *F* e *C*, ou seja, a área rural com solo exposto ou com presença dos canais, foram calculadas para a obtenção do fenômeno de ICUs, em cada um dos momentos discriminados.

Gráfico 8 – Diferença térmica entre a ZCL2/3 e a ZCLF, dias 24 a 26/11/19, fase inicial/pós-colheita

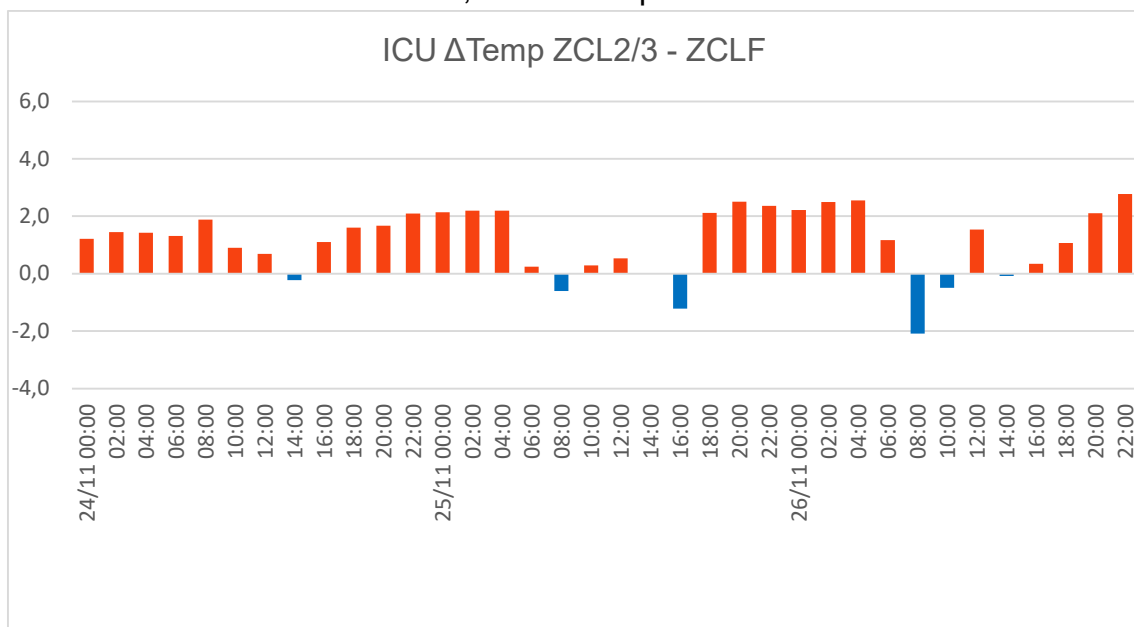
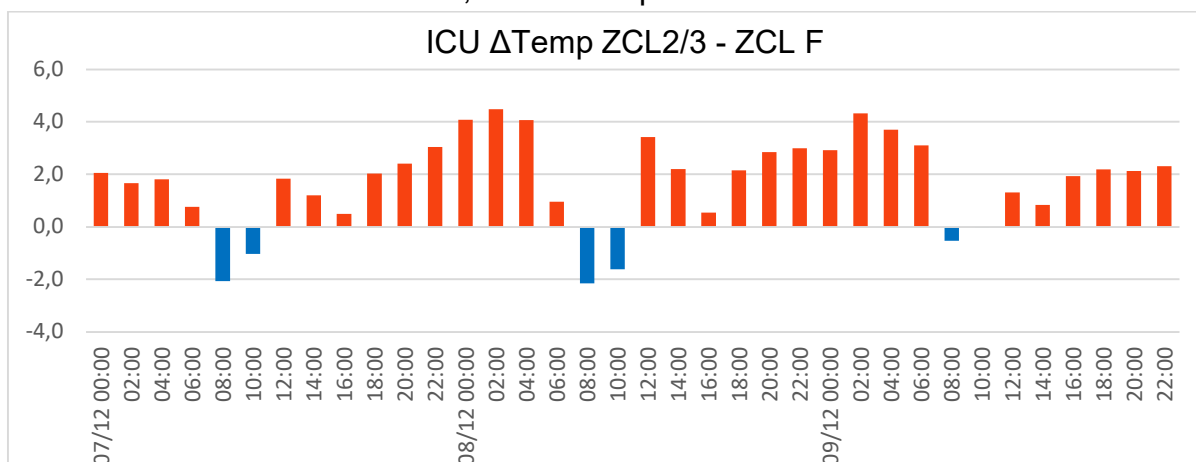


Gráfico 9 – Diferença térmica entre a ZCL2/3 e a ZCLF, dias 07 a 09/12/19, fase inicial/pós-colheita



Ambos os gráficos demonstram que, apesar das maiores ICUs terem sido registradas nas últimas horas da madrugada (máxima de 2,55°C às 04:00 do dia 26/11, para o primeiro recorte, e de 4,47°C às 02:00 do dia 08/12, para o segundo recorte), nas primeiras horas da manhã este processo se inverte, sendo que a ZCL 2/3 tende a ser mais fresca do que a área rural nestes momentos.

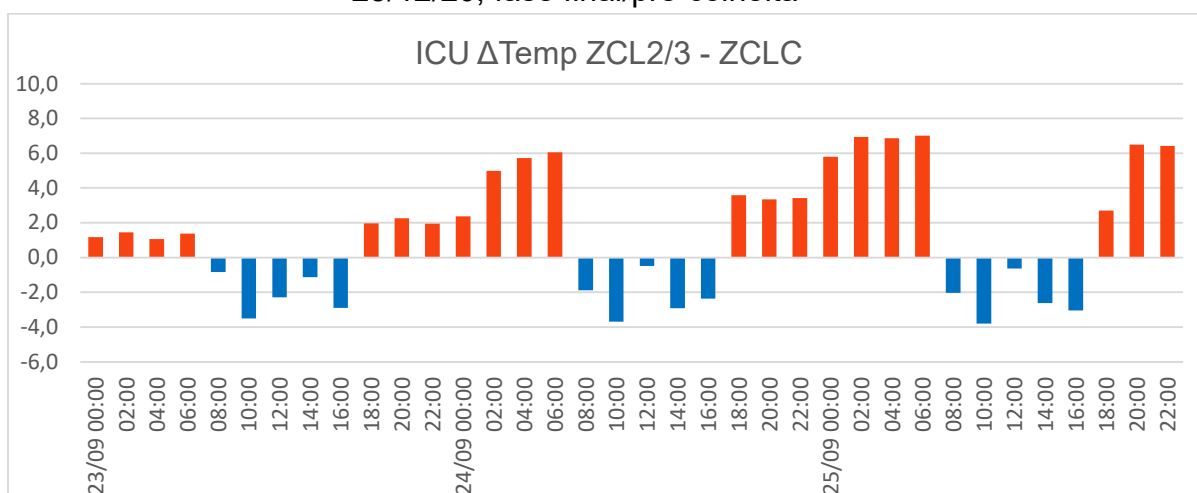
Isso se relaciona com o aquecimento acelerado que o solo rural exposto, na fase pós-colheita, apresenta logo no início do aumento da radiação solar. Observa-se que isto contribui para uma diferenciação negativa entre o bairro central e a área rural, a qual é mais intensa às 08:00 da manhã, fato registrado em 5 dos 6 horários analisados nos dois recortes. Porém, à medida em que os materiais construídos da área central vão gradativamente absorvendo a radiação solar, a temperatura do ar da região se intensifica, mantendo uma tendência relativamente crescente de aumento do calor em relação à área rural.

O elevado calor específico de estruturas comumente presentes nas áreas urbanas, tais como concreto, cimento e asfalto, auxilia na compreensão deste processo, uma vez que estes materiais demoram relativamente mais tempo para serem aquecidos, porém possuem um resfriamento bem mais lento. Além disso, a proximidade entre estas e a pequena quantidade de áreas verdes contribuem para esta maior concentração de calor em grande parte do dia.

Ainda foi possível observar uma intensificação das diferenças térmicas, positivas e negativas, no segundo recorte analisado (07 a 09/12), o que é explicado especialmente pela elevação das temperaturas médias registradas na

ZCL 2/3, justificadas pela maior proximidade com o solstício de verão. A área rural também apresentou tendência a crescimento, porém menos intenso, o que justifica a referida diferença e leva à observação da maior suscetibilidade que as áreas urbanas apresentam para as variações sazonais de insolação, quando comparadas às áreas rurais. O gráfico abaixo demonstra as diferenças térmicas para o primeiro momento da segunda fase de coleta, na pré-colheita.

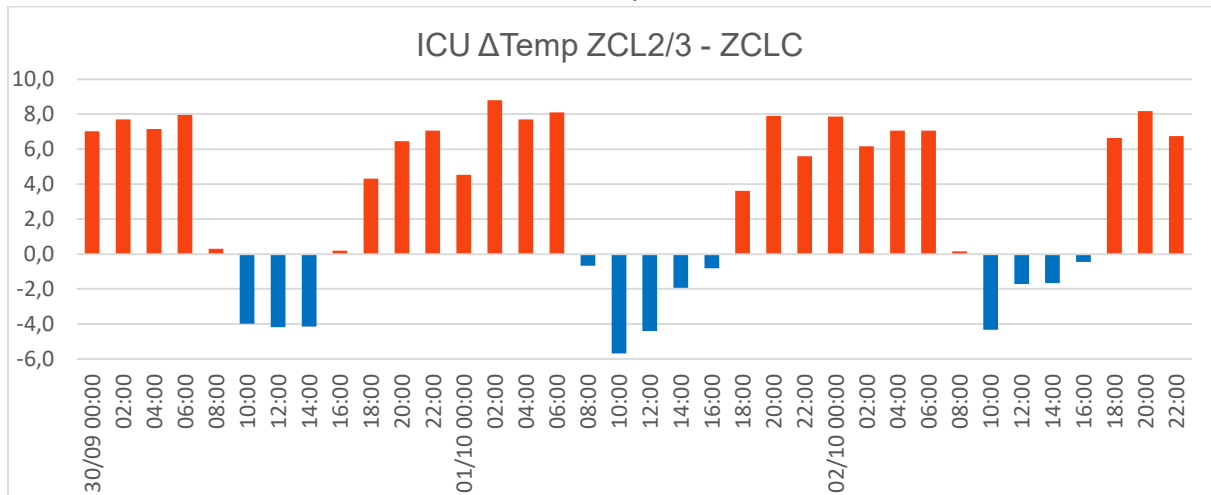
Gráfico 10 – Diferença térmica entre a ZCL2/3 e a ZCLC, dias 23 a 25/12/20, fase final/pré-colheita



Para esta fase, de maior semelhança térmica ao momento pós-colheita, observa-se um aumento na expressão das ICUs (valor máximo de 7°C às 06:00 do dia 25/09). Tal observação demonstra a diferença que a presença de vegetação possui, especialmente no resfriamento mais elevado da área rural durante o período da noite.

A comparação entre as duas fases de análise permite visualizar o impacto da sazonalidade canavieira para a formação de ICUs, intensificando este fenômeno quando há a presença da vegetação cultivada, que resfria mais a área rural, tornando maior a diferença para as áreas urbanizadas. O gráfico 11 analisa as diferenças térmicas para o recorte caracterizado pela onda de calor.

Gráfico 11 – Diferença térmica entre a ZCL2/3 e a ZCLC, dias 30/09 a 02/10/20, fase final/pré-colheita



Nota-se que o referido momento foi o de maiores diferenças, tanto positivas quanto negativas, entre as áreas analisadas. Esta comparação permite observar a contribuição da onda de calor: as áreas urbanas apresentaram elevadas temperaturas do ar inclusive durante o período da noite, aumentando a diferença para a área rural vegetada (máximo de 8,7°C às 02:00 do dia 01/10). Porém este fenômeno também sobreaqueceu a área rural, aumentando expressivamente sua diferença térmica negativa nas manhãs, momento em que esta é mais quente do que a região urbana.

Destaca-se que a presença da vegetação na fase pré-colheita contribuiu para aumentar a amplitude térmica da área rural, ao reduzir suas temperaturas mínimas no período da noite. Este processo se relaciona a dois fatores principais: a umidade relativa do ar e a dinâmica local de ventos.

Com relação à umidade relativa, foram comparados os valores da área rural e do bairro urbanizado em horários representativos das duas fases, como demonstram os Gráficos 12 e 13 a seguir.

Gráfico 12 – Umidade relativa do ar, área rural e bairro urbanizado, fase inicial/pós-colheita

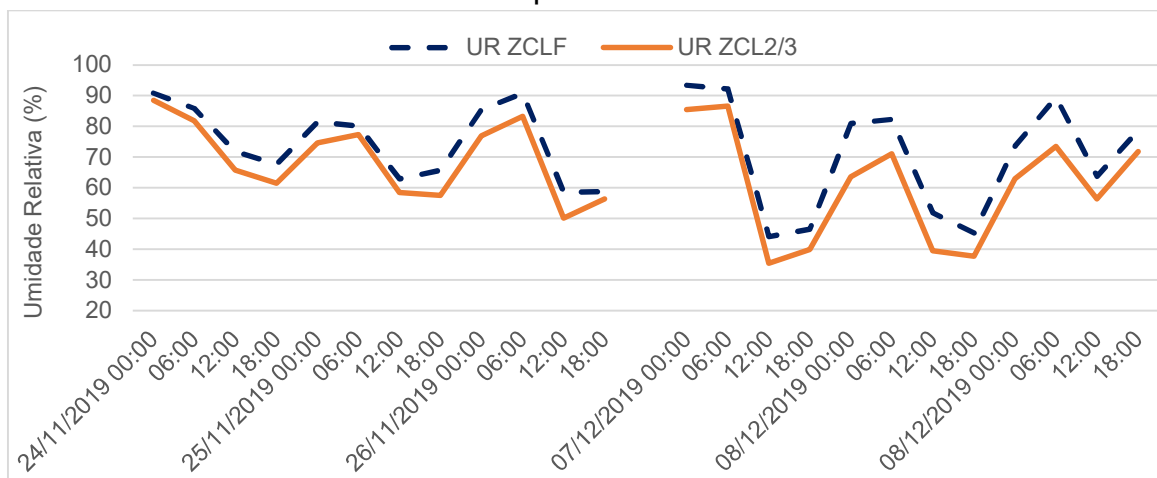
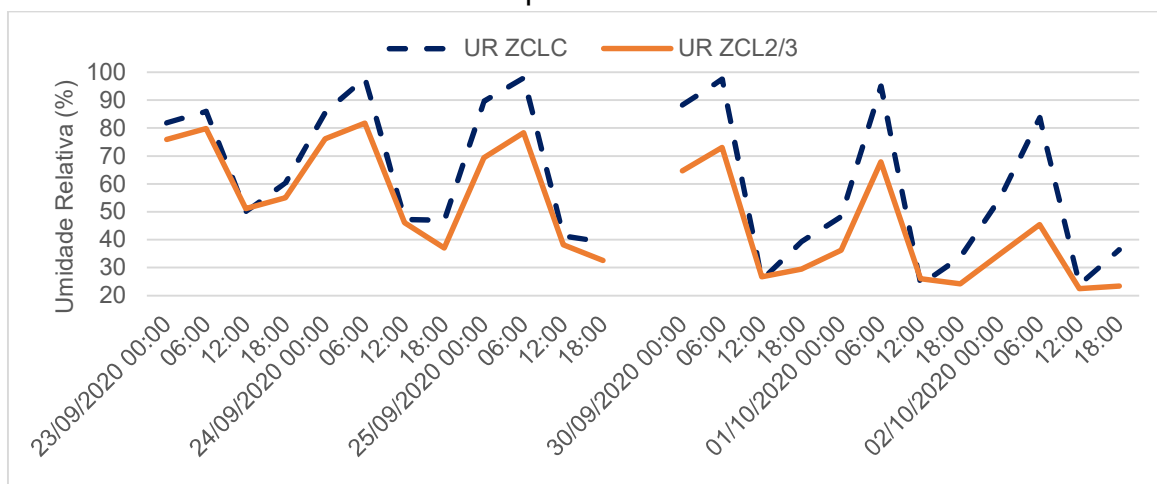


Gráfico 13 – Umidade relativa do ar, área rural e bairro urbanizado, fase final/pré-colheita

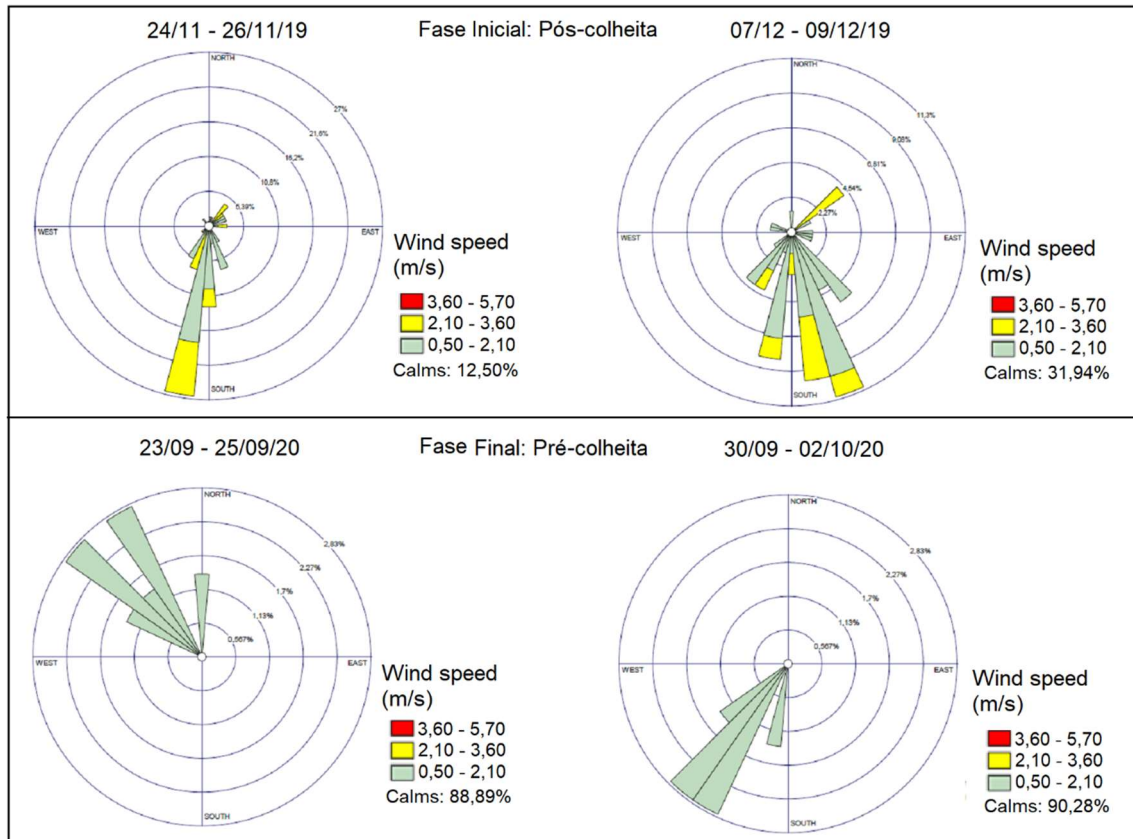


Observa-se que, na fase inicial, de intensa pluviosidade, a umidade relativa do ar apresentou valores mais expressivos, com menores reduções nos horários de baixa umidade (em torno do meio-dia), enquanto na fase final as variações foram maiores, típico do momento em questão.

Porém, é mais notável a contribuição da presença da vegetação ao ampliar as diferenças de umidade entre a área rural e a urbana: na fase final, à noite, as variações foram muito expressivas, graças ao processo de evapotranspiração. Isso evidencia o potencial de resfriamento da mesma, intensificando as diferenças térmicas para a área rural, especialmente em um período atmosférico quente e seco como o analisado.

Com relação à dinâmica dos ventos, foram analisadas duas variáveis: direção, obtida pela estação HOBO na área rural e tratada no software WRPLOT, e velocidade, através de uma comparação entre os dados da estação HOBO e da estação meteorológica da ESALQ, para referência urbana.

Gráfico 14 – Direção do vento na área rural, fases pós-colheita e pré-colheita



Observa-se que a tendência geral dos ventos apresentada foi a de origem Sul para a fase inicial e Noroeste/Sudoeste para a fase final. Como visto anteriormente no posicionamento da área rural, esta é circundada por áreas periurbanas justamente em suas porções Sul e Oeste. Assim, nas duas fases analisadas, o vento apresentou uma dinâmica similar, de soprar da área urbana em direção à rural, independentemente do momento do dia.

Este processo contribuiu para, no momento com solo exposto, um maior aquecimento da área rural, o que auxiliou a reduzir as diferenças térmicas entre a área rural e a área urbana. Já na fase com a presença de vegetação, apesar da direção ter sido a mesma, o aquecimento foi menos intenso, já que os canaviais obstruíram parcela significativa dos fluxos superficiais de ventos. Esta observação é corroborada pela análise da velocidade do vento, como demonstram os gráficos abaixo.

Gráfico 15 – Velocidade do vento em quilômetros por hora, estação da ESALQ e estação HOBO (área rural), fase inicial de coleta

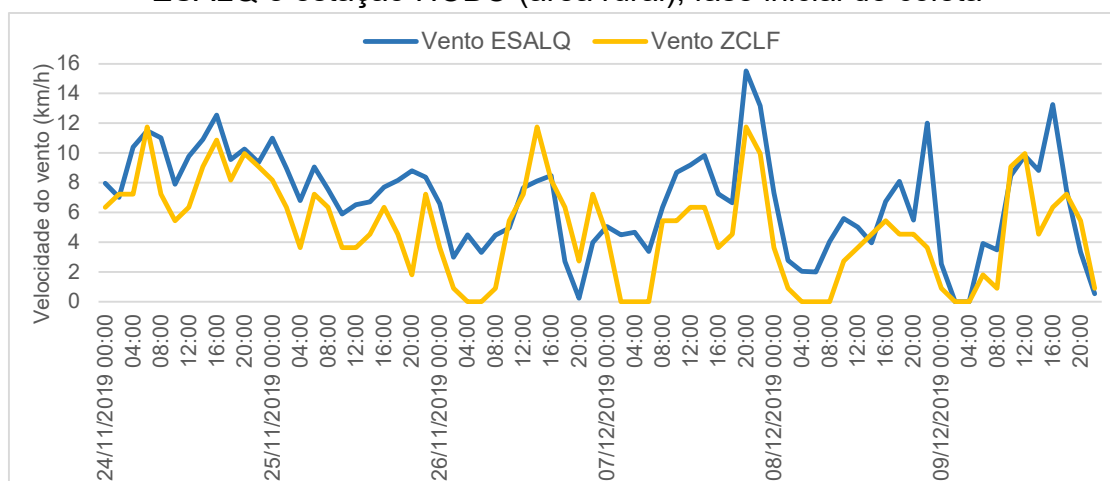
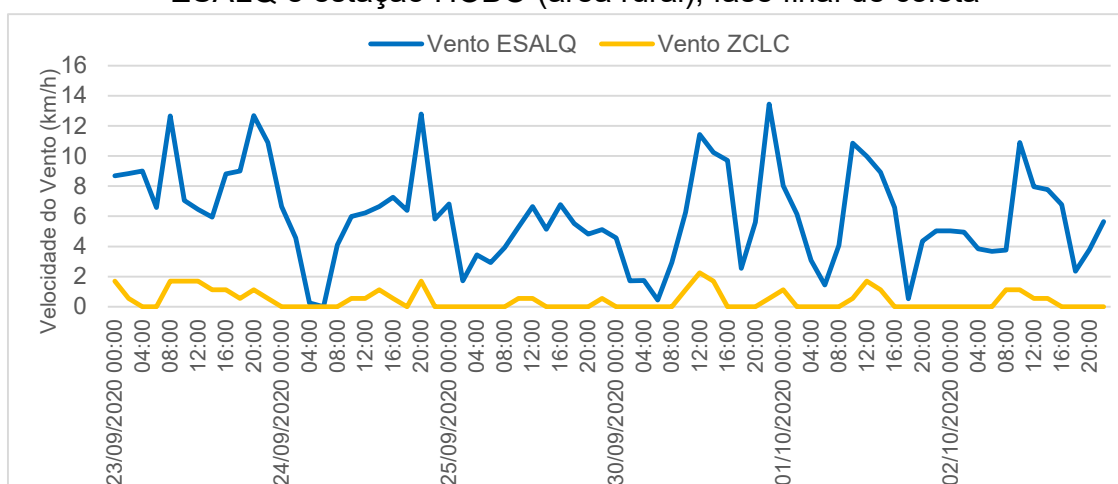


Gráfico 16 – Velocidade do vento em quilômetros por hora, estação da ESALQ e estação HOBO (área rural), fase final de coleta



Como observado, na fase inicial a velocidade do vento nas duas estações apresenta valores e comportamentos muito similares, enquanto na fase final os dados obtidos pela estação ESALQ, urbana, são muito mais expressivos do que os da estação rural HOBO U30, que são praticamente nulos. Isso foi devido à presença da cana-de-açúcar em estágio maduro, impedindo que a passagem do vento sensibilizasse o anemômetro da estação meteorológica. Por esta razão, a velocidade do vento no canal foi menor do que na ESALQ.

7.6. ANÁLISE DAS ILHAS DE CALOR URBANO (ICUS): AMBIENTES PERIURBANOS

Assim como proposto para a área urbana, as diferenças entre as temperaturas das ZCLs 5, 8, 3 e 6, isto é, de cada sensor nos bairros

periurbanos, para as ZCLs *F* e *C*, ou seja, a área rural com solo exposto ou com presença dos canaviais, foram calculadas para a obtenção do fenômeno de ICUs periurbanas para cada um dos momentos discriminados.

Gráfico 17 – Diferença térmica entre as ZCLs 5, 8 e 3 e a ZCLF, dias 24/11 a 26/11/19, fase inicial/pós-colheita¹¹

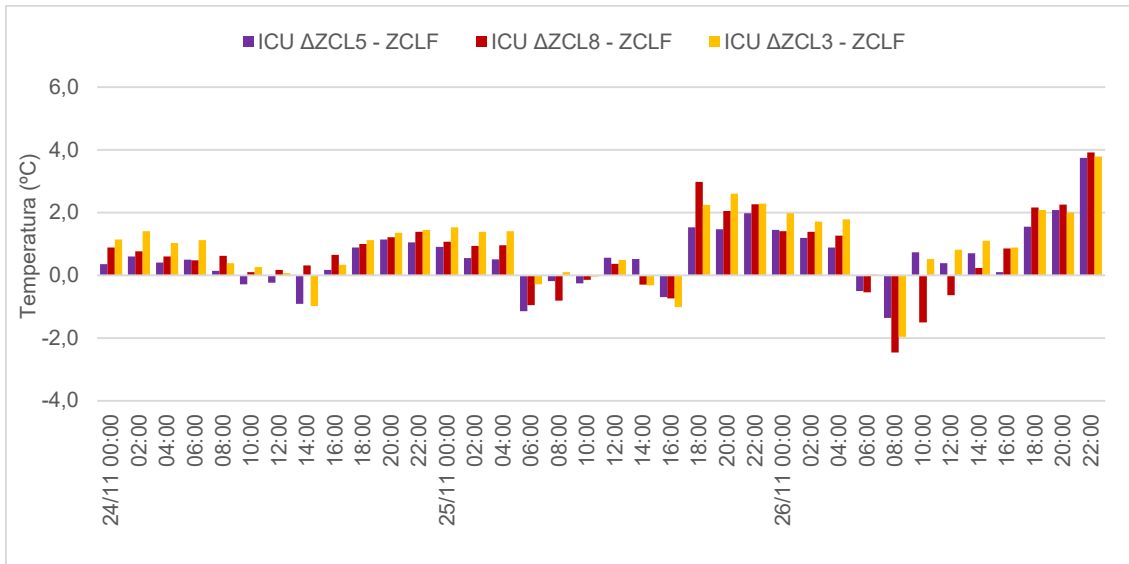
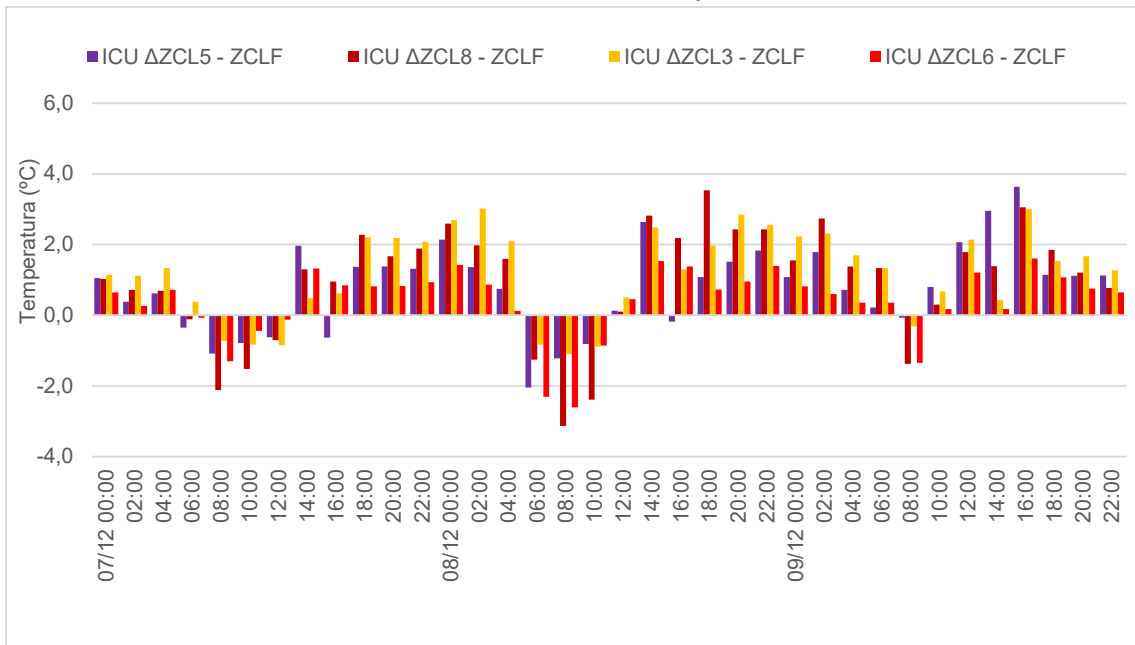


Gráfico 18 – Diferença térmica entre as ZCLs 5, 8, 3 e 6 e a ZCLF, dias 07/12 a 09/12/19, fase inicial/pós-colheita



¹¹ Esclarece-se que o sensor termo-higrômetro instalado na ZCL 6 ficou temporariamente alterado devido à intensa pluviosidade ocorrida em alguns momentos desta fase, fazendo com que dados imprecisos fossem registrados pelo mesmo e, por isso, seus registros não foram considerados para o período entre 24/11 a 26/11/19.

Os gráficos acima demonstram que os padrões térmicos tendem a se repetir nas áreas periurbanas, porém com menor intensidade de aquecimento do que no bairro central. Nota-se que a área rural é, em geral, mais fresca do que as periurbanas, com diferenças maiores na madrugada, e também que esta se aquece mais rapidamente no início da manhã.

Com relação aos bairros periurbanos entre si, observa-se que o sensor da ZCL 3, ou seja, a região mais densa entre os sensores periurbanos, apresentou as maiores temperaturas médias, corroborando a influência que a densidade urbana possui para o microclima ao redor. Em seguida nota-se o sensor da ZCL 8, localizado em área industrial, porém mais espaçada e com mais áreas verdes do que o primeiro.

Acredita-se que as fontes antropogênicas de calor causadas pelas indústrias próximas a estes dois sensores (movimentação de veículos de grande porte, emissão de poluentes e resfriamento artificial) podem ter contribuído para essa relativa elevação nas temperaturas do ar. Além disso, destaca-se que a maioria destas, por apresentar porte razoável, possui ciclos ininterruptos de produção, contribuindo para manter o aquecimento mesmo durante a noite.

Por outro lado, o sensor da ZCL 5 apresentou menores temperaturas em geral (mesmo também possuindo indústrias próximas, são de menor porte e encerram seus ciclos à noite). O sensor da ZCL 6 registrou as temperaturas mais baixas entre todos os sensores periurbanos (no segundo recorte), com valores próximos ao da área rural. Isso se explica por três fatores: seu maior espaçamento de construções, maior arborização e sua posição limítrofe à área de agricultura.

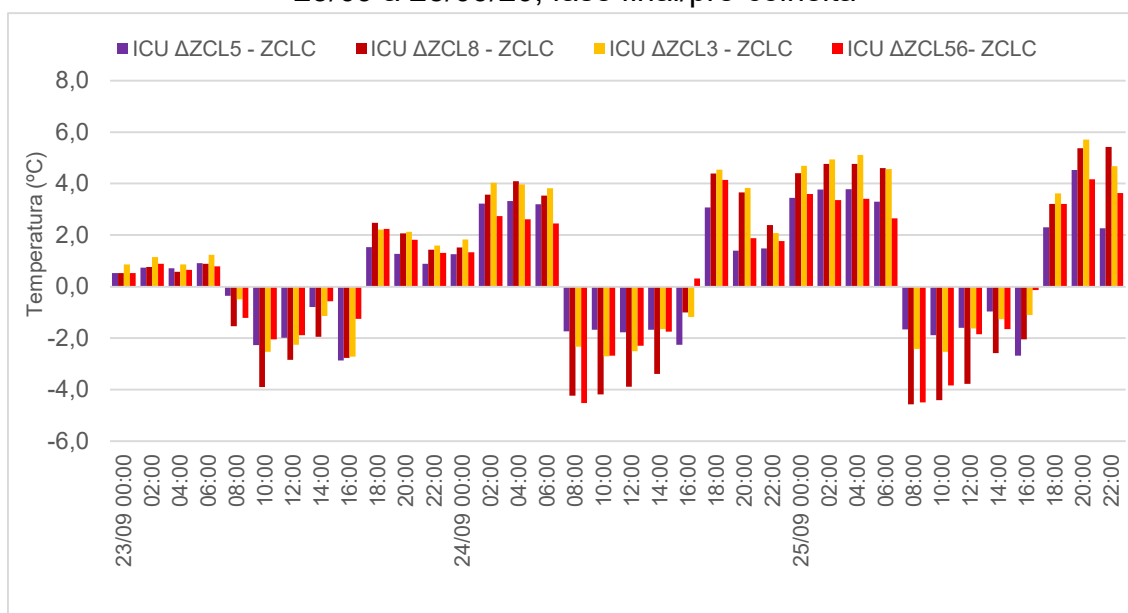
Observa-se também que os sensores das áreas com maiores densidades de ocupação por residências e indústrias (ZCLs 1 e 3) apresentaram, em geral, as maiores diferenças periurbanas em relação à área rural, a qual alcançou a expressão máxima de quase 5°C no final da primeira fase de análise. Porém nota-se que as maiores ICUs entre os ambientes periurbanos e rurais não foram apenas registradas na madrugada, como observado no bairro central, mas também no início da noite, entre 18:00 e 22:00, com valores próximos de ICUs.

Este fato demonstra que o resfriamento mais rápido e intenso da área rural, com a diminuição da radiação solar, proporciona diferenças térmicas, mas a menor densidade construtiva das áreas periurbanas contribui para estas, ao

longo das horas, reduzirem mais suas temperaturas do que o bairro mais urbano, apresentando menores valores durante a madrugada. Assim, as diferenças entre o ambiente rural e os periurbanos se mantêm relativamente constantes durante a noite, o que não ocorre em relação à área central.

Com relação à fase final de coleta, dois momentos distintos foram analisados: um primeiro, com condições atmosféricas similares à da fase inicial, e um segundo, caracterizado pela onda de calor. O gráfico abaixo demonstra as diferenças encontradas para o primeiro período da fase final.

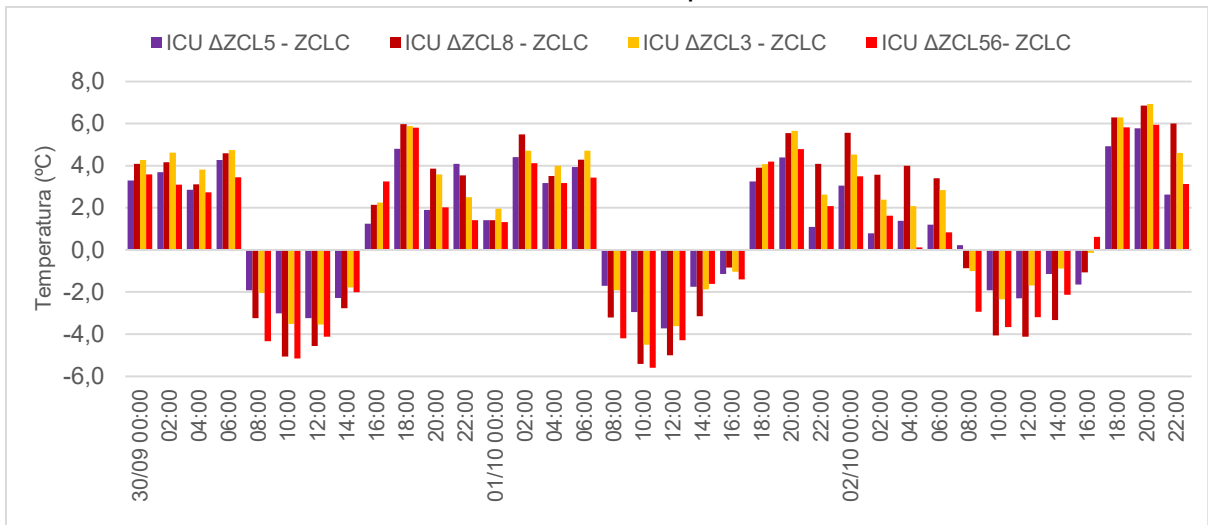
Gráfico 19 – Diferença térmica entre as ZCLs 5, 8, 3 e 6 e a ZCLC, dias 23/09 a 25/09/20, fase final/pré-colheita



Como pode ser observado, as diferenças neste momento são mais expressivas do que as visualizadas na fase inicial, mesmo com condições atmosféricas semelhantes. Enquanto nos dois períodos da primeira fase as diferenças máximas positivas não ultrapassaram os 4°C, neste momento elas chegaram a valores próximos de 6°C, assim como as negativas: máximas pouco superiores a 3°C na primeira fase e superiores a 4°C na segunda.

Assim como para a ICU entre a área rural e a urbana, este aumento nas diferenças pode ser atribuído à presença das monoculturas antes de serem colhidas, as quais auxiliaram no maior resfriamento (e umidificação) da área rural, especialmente à noite. Também se observa uma tendência similar à primeira fase de coleta, ou seja, maiores ICUs para aqueles sensores localizados em ZCLs mais densas, caso das ZCLs 8 e 3.

Gráfico 20 – Diferença térmica entre as ZCLs 5, 8, 3 e 6 e a ZCLC, dias 30/09 a 02/10/20, fase final/pré-colheita



Neste período de intenso aquecimento, as áreas periurbanas também sofreram grande elevação de suas temperaturas, o que contribuiu para as expressivas diferenças em relação à área rural, especialmente no caso das duas ZCLs mais densas, em processo similar à ZCL central.

7.7. ANÁLISE DOS TRANSECTOS MÓVEIS

As temperaturas registradas pelos transectos rural e periurbano nos referidos dias, fases inicial e final de coleta, foram comparadas entre si para analisar as diferenças rural/periurbano e fase inicial/final de obtenção de dados.

Gráfico 21 – Temperaturas registradas pelos transectos rural e periurbano, dia 16/12/19, fase inicial de coleta

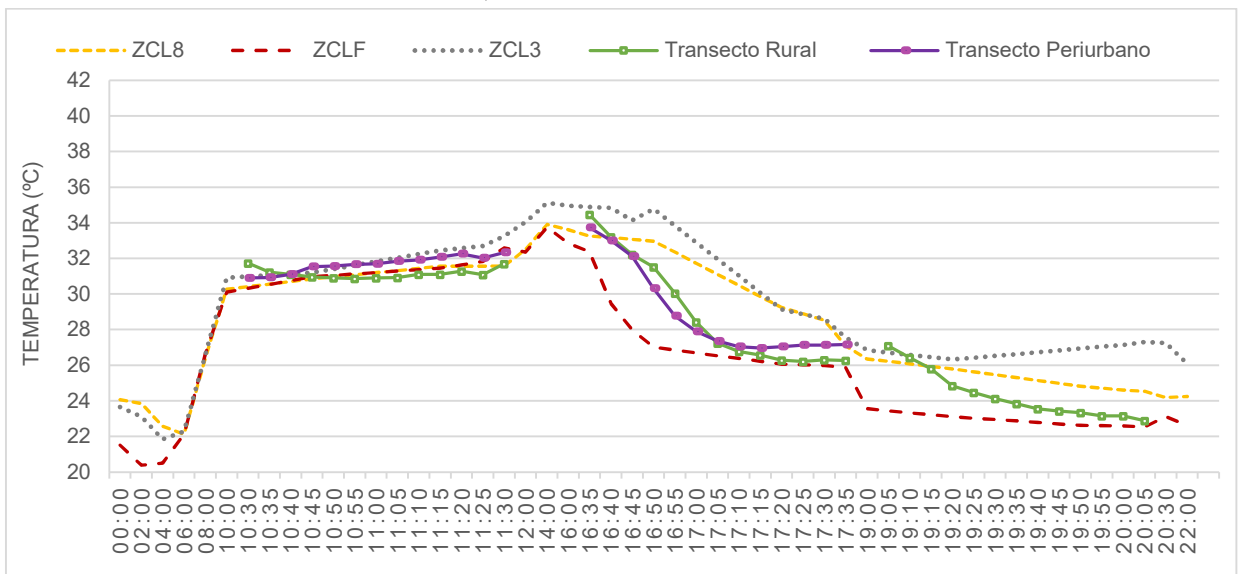
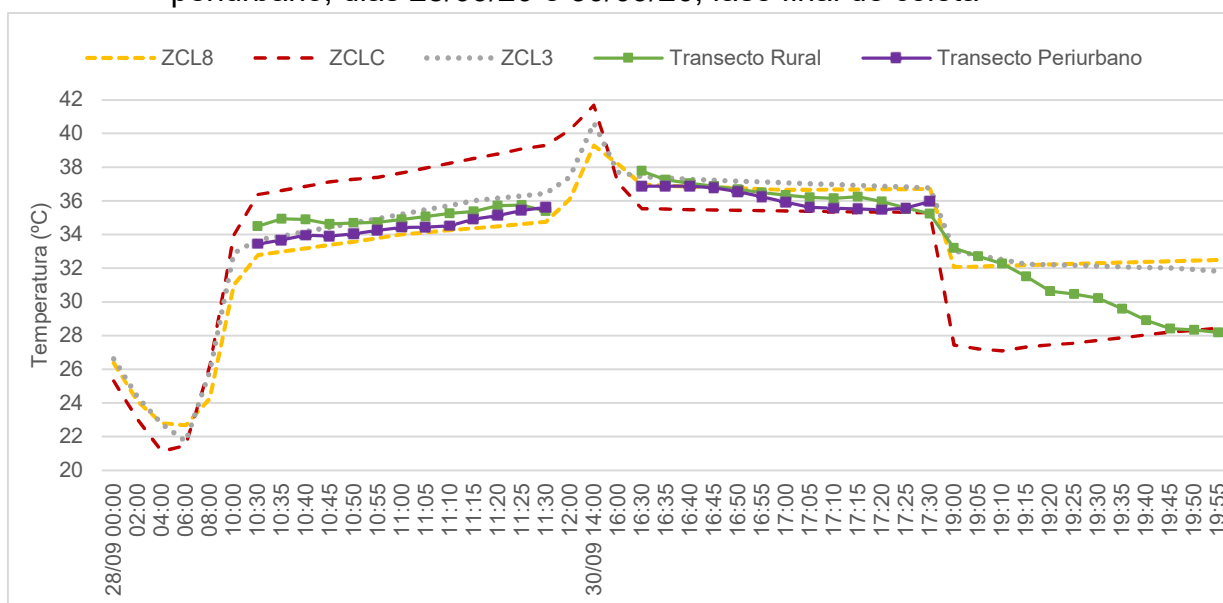


Gráfico 22 – Temperaturas registradas pelos transectos rural e periurbano, dias 28/09/20 e 30/09/20, fase final de coleta



O Gráfico 21 apresenta o transecto móvel durante um dia com o solo exposto e o 22, com a presença do canal. Constatamos que a tendência de variação de temperatura do ar entre os solos rural, periurbano e urbano são semelhantes aos registros em pontos fixos. Destaca-se que as diferenças de temperatura do ar aumentam conforme o ambiente construído se torna mais denso e a vegetação, mais exuberante.

CONCLUSÕES

Entre os principais aspectos das campanhas de levantamento e análise de informações, destacam-se a atuação das massas de ar e a dinâmica dos ventos sobre o território. Tais fenômenos macro climáticos, combinados com a sazonalidade do ambiente rural, influenciam os registros de ICUs em áreas urbanas e periurbanas.

É sabido que diversas cidades no Brasil, principalmente do interior do estado de São Paulo, estão sujeitas às influências decorrentes da antropização das áreas rurais, geralmente ocupadas por monoculturas, que são cruciais para prejudicar a qualidade de vida nestes locais. No caso de Piracicaba, ficou evidente a forte influência das áreas de cultivo sazonal da cana-de-açúcar na formação das ICUs em duas épocas distintas do ano, nas fases de pós-colheita e de pré-colheita, ou seja, com o solo totalmente exposto e com a vegetação

madura em seu maior estágio de crescimento, respectivamente. Esta conclusão foi possível com a aplicação da mesma metodologia em ambos os períodos: a instalação da estação HOBO na área rural e dos sensores termo-higromêtros nos bairros de análise, além da prática do transecto móvel.

A presença de vegetação mais exuberante nas bordas das áreas periurbanas contribui para o resfriamento mais elevado da área rural durante o período noturno, tornando maior a diferença de temperatura do ar para as áreas mais urbanizadas. Esta constatação permitiu desenvolver uma comparação entre as fases de solo exposto e da vegetação madura e a visualização do impacto da sazonalidade canavieira para a formação de ICUs. Ou seja, à medida em que a vegetação cultivada se desenvolve, a diferença de temperatura do ar entre as áreas rural e urbana se intensifica, pois a vegetação reduz o ganho de calor do solo rural. Assim, as variações sazonais nos cultivos agrícolas possuem significativa relevância para o estabelecimento de ICUs, especialmente em áreas periurbanas próximas.

Foi constatado que, no período em que o solo rural permanece exposto, há um maior ganho de calor na superfície, o que contribui para reduzir as diferenças de temperatura do ar entre a área rural e a área urbana, ocasionando ICUs com valores inferiores aos registrados com a vegetação madura. O sombreamento e a evapotranspiração da cana-de-açúcar são provavelmente os principais fatores que ajudam a reduzir o ganho de calor na superfície da área.

Também foi observado que a área rural é geralmente mais fresca do que as áreas periurbanas, com diferenças maiores na madrugada. As tendências de comportamento das ICUs nas áreas periurbanas são semelhantes às do ambiente urbanizado, porém com menor intensidade de aquecimento.

Os sensores posicionados na área central da cidade, ocupadas por áreas residenciais adensadas e indústrias – ZCL 8 e ZCL 3 –, apresentaram as maiores ICUs, que alcançaram quase 5°C. Contudo, foi observado que as maiores ICUs nos ambientes periurbanos não foram apenas registradas durante a madrugada, mas também ao anoitecer, entre 18h00 e 22h00. Tal fato demonstra que conforme a incidência da radiação solar diminui, o ambiente periurbano e o urbano central perdem calor proporcionalmente à sua densidade construída.

Estes resultados não só demonstram a influência de safras agrícolas e das variações construtivas da paisagem urbana (ZCLs) para o microclima

urbano como também podem contribuir significativamente para a compreensão mais detalhada dos fenômenos de ICUs em cidades com extensas áreas de monocultura. Não apenas em Piracicaba, mas também em ambientes periurbanos e em cidades médias interioranas em geral, visto que o caso de Piracicaba é representativo de muitos outros similares em caráter nacional. Estes mesmos procedimentos podem ser desenvolvidos em outras regiões para a compreensão dos fenômenos climáticos urbanos em cidades com diferentes configurações de ocupação do território rural e outras monoculturas como a soja, o café, o eucalipto ou o milho, por exemplo, são importantes produtos do agronegócio brasileiro.

Ao se conhecer os impactos da monocultura na qualidade de vida, tanto das áreas rurais como nas áreas urbanas, abre-se espaço para o debate de proposições de mitigação, instigando iniciativas possíveis de serem tomadas pelo setor público e privado (empresas e residentes dos bairros) em busca da amenização dos impactos atmosféricos nos ambientes de análise e um possível maior conforto ambiental urbano nos mesmos.

REFERÊNCIAS

AGUILAR, E. A. R. Forma urbana, densidade da população e Zonas Climáticas Locais: influências e avaliação da Ilha de Calor Urbana em Bogotá, Colômbia. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 140p., 2019.

AGUILAR, E. A. R, SOUZA, L. C. L. de. Urban form and population density: Influences on Urban Heat Island intensities in Bogotá, Colombia, Urban Climate, Volume 29, 2019,. 100497. ,ISSN 2212-0955, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100497>.

ALEXANDER, P.J.; MILLS, G. Local climate classification and Dublin's urban heat island. **Atmosphere**, v. 5, p. 755-774, 2014.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). **ASHRAE Handbook**, ASHRAE, Atlanta, 2005.

AMORIM, M. C. de C. T.; DUBREUIL, V.; QUENOL, H.; NETO, J. L. S. Características das ilhas de calor em cidades de porte médio: exemplos de Presidente Prudente (Brasil) e Rennes (França), **Confins Revista franco-brasileira de geografia**, n.7, 2009.

AMORIM, M. C. de C. T.; DUBREUIL, V.; CARDOSO, R. dos S. Modelagem espacial da ilha de calor urbana em Presidente Prudente (SP) – Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.16, 2015.

ANDRADE, H. O clima urbano – natureza, escalas de análise e aplicabilidade. **Finisterra**, v. 80, p. 67-91, 2005.

ANJOS, M.; GANHO, N.; ARAÚJO, H. M. de. Uma análise dos contrastes topoclimáticos no espaço urbano e periurbano de Aracaju/SE: os campos térmicos e higrométricos. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 13, p. 298-318, 2013.

ASSIS, E. S. Bases teóricas para a aplicação da climatologia ao planejamento urbano. **4º Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído**, Salvador, Anais ANTAC, 1997.

AYOADE, J. O. Introdução à climatologia para os trópicos. 4ª ed., Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 332 p., 1996.

AZZONI, C.R. Indústria e reversão da polarização no Brasil. IPE/USP, São Paulo, 176p, 1986.

BACELAR, T.; BEZERRA, M. L. Experiências recentes em planejamento: os casos das associações de municípios do Setentrião e do Oeste do Paraná. Paranacidade, Curitiba, 82p., 1999.

BARBIERI, V. Condicionamento climático da produtividade potencial da cana-de-açúcar (*saccharum spp.*): um modelo matemático-fisiológico de estimativa. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1993.

BARBIRATO, G.M.; SOUZA, L. C. L. de; TORRES, S. C. Clima e cidade: a abordagem climática como subsídio para estudos urbanos. Editora UFAL, Maceió, 164p., 2007.

BECHTEL, B.; DEMUZERE, M.; MILLS, G.; ZHAND, W.; SISMANIDISE, P.; SMALLF, C.; VOOGT, J. SUHI analysis using Local Climate Zones - A comparison of 50 cities. **Urban Climate**, v.28, 100451, 2019.

CANO, W. Desequilíbrios regionais e concentração industrial no Brasil 1930-1970, Editora Unesp, São Paulo, 384p., 2007.

CARDOZO, N.P.; SENTELHAS, P.C. Climatic effects on sugarcane ripening under the influence of cultivars and crop age. **Scientia Agricola**, v. 70, n.6, p.449-456, 2013.

CASTELLS, M. La question urbaine. François maspero, Paris, 78 p., 1973.

CHANDLER, T.J. Urban climatology and its relevance to urban design **World Meteorological Organization**, nº 438, Genebra, 1976.

CHEN, L.; NG, E. Outdoor thermal comfort and outdoor activities: A review of research in the past decade, **Cities**, v. 29, p. 118-125, 2012.

COCCOLO, S.; KAMPF, J.; SCARTEZZINI, J. L.; PEARLMUTTER, D. Outdoor human comfort and thermal stress: A comprehensive review on models and standards. **Urban Climate**, v. 18, p. 33-57, 2016.

COLTRI, P.; FAGNANI, M. A.; LABAKI, L. C.; FERREIRA, N. J. DEMÉTRIO, V. A. Variabilidade dos principais elementos climáticos e urbanização na região de Piracicaba/SP. **Bioengenharia**, v. 1 (2), p. 197-208, 2007.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. Boletim da safra da cana-de-açúcar, 2019. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana> Acessado em: 03/04/20.

CORRÊA, R. L. Metrôpoles, corporações e espaço: uma introdução ao caso brasileiro. **Revista Território**, v.6, 1999.

COSTA, F. P. da S. Evolução urbana e da cobertura vegetal de Piracicaba – SP (1940 – 2000). Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 96p., 2004.

COUTTS, A. M. BERINGER, J.; TAPPER, N. J. Investigating the climatic impact of urban planning strategies through the use of regional climate modelling: a case study for Melbourne, Australia. **International Journal of Climatology**, v. 28, p. 1943-1957, 2008.

DÉAK. C. Acumulação entravada no Brasil e a crise dos anos 80. **Espaço e Debates**, n. 32, p. 32-46, 1991.

DIAS, H.; ALCARVE C. A.; S. P. C. Um século de dados meteorológicos em Piracicaba, SP: mudanças do clima pela classificação de Koppen. In: XXCBAGRO, Juazeiro, 2017.

DIRKSEN, M.; RONDA, R.J.; THEEUWES, N.E.; PAGANI, G.A. Sky view factor calculations and its application in urban heat island studies. **Urban Climate**, v.30, 100498, 2019.

DORIGON, L. P.; AMORIM, M. C. de C. T. Spatial modeling of an urban Brazilian heat island in a tropical continental climate. **Urban Climate**, v. 28, 100461, 2019.

DUARTE, D. H. S. O impacto da vegetação no microclima em cidades adensadas e seu papel na adaptação aos fenômenos de aquecimento urbano. Contribuições a uma abordagem interdisciplinar. Tese de Livre-Docência, Universidade de São Paulo, São Paulo, 167 p., 2015.

ELIAS, Denise. Agronegócio e novas regionalizações no Brasil. Estudos Urbanos e regionais. **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais**. V.13, n.2, p. 153-167, 2011.

ELIAS, D. Relações campo-cidade, reestruturação urbana e regional no Brasil. In: **XII Colóquio de Geocrítica**, Bogotá, 2012.

ELIASSON, I. The use of climate knowledge in urban planning. **Landscape and Urban Planning**, v. 48, p. 31-44, 2000.

EMMANUEL, R.; KRÜGER, E. Urban heat island and its impact on climate change resilience in a shrinking city: The case of Glasgow, UK. **Building and Environment**, v. 53, p. 137-149, 2012.

FENNER, D.; MEIER, F.; BECHTEL, B.; OTTO, M.; SCHERER, D. Intra and inter 'local climate zone' variability of air temperature as observed by crowdsourced

citizen weather stations in Berlin, Germany. **Urban Meteorology**, v.26, p. 525–547, 2017.

FERNANDES, M. E.; MASIERO, E. Relação entre conforto térmico urbano e Zonas Climáticas Locais. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v.12, e20190247, 2012.

FERRARI, A.; KUBILAY, A.; DEROME, D.; CARMELIET, J. The use of permeable and reflective pavements as a potential strategy for urban heat island mitigation. **Urban Climate**, v.31, 100534, 2020.

FURTADO, C. Formação Econômica do Brasil. 32ª Edição, Companhia Editora Nacional, São Paulo, 198p., 2005.

GARTLAND, L. Ilhas de Calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas. Oficina de textos, São Paulo, 248 p., 2010.

GENELETTI, D. LA ROSA, D.; SPYRA, M.; CORTINOVIS, C. A review of approaches and challenges for sustainable planning in urban peripheries. **Landscape and Urban Planning**, v. 165, p. 231-243, 2017.

GOMES, P. S.; LAMBERTS, R. O estudo do clima urbano e a legislação urbanística: considerações a partir do caso Montes Claros, MG. **Ambiente Construído**, v. 9, p. 73-91, 2009.

GRAZIANO DA SILVA, J. A industrialização e a urbanização da agricultura brasileira. São Paulo em perspectiva, São Paulo, 1993.

GRIMMOND, C. S. B.; OKE, T.R. Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. **Journal of Applied Meteorology**, v.38, p. 1262-1292, 1999a.

HAMIN, E. M. Integrating Adaptation and Mitigation in Local Climate Change Planning. Climate change and land policies. Ingram, G. & Hong Y.U (orgs.) Lincoln Institute of Land Techonology, p. 122-144, 2011.

HAWKINS, T.W.; BRAZEL A.J.; STEFANOV W.L.; BIGLER W.; SAFFELL E.M. The Role of Rural Variability in Urban Heat Island Determination for Phoenix, Arizona. **Journal of Applied Metereology**, v. 43, p. 476-486, 2003.

HE, B. J. Potentials of meteorological characteristics and synoptic conditions to mitigate urban heat island effects. **Urban Climate**, v. 24, p. 26-33, 2018.

HODDER, S.G.; PARSONS, K. The effects of solar radiation on thermal comfort. **International Journal of Biometeorology**, v.51, p.233–250, 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Estatísticas Históricas séries econômicas, demográficas e sociais de 1550 a 1988. Disponível em <https://memoria.ibge.gov.br/sinteses-historicas/historicos-dos-censos/dados-historicos-dos-censos-demograficos.html>. Acessado em: 14/03/2020.

INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS (IPEF). Atlas Rural de Piracicaba. Piracicaba, 77p., 2006.

INSTITUTO DE PESQUISAS E PLANEJAMENTO DE PIRACICABA (IPPLAP). Piracicaba em dados. Disponível em: <http://ipplap.com.br/site/piracicaba-em-dados/> . Acessado em: 10/11/2019.

JAUREGUI, E. Increase in turbidity in Mexico City. **Ingenieria Hidraulica En Mexico** v.12, p.1–10, 1958.

JAUREGUI, E. The urban climate of Mexico City. **Erdkunde**, v.27, p.298–307, 1973.

JAUREGUI, E. Heat island development in Mexico City. **Atmospheric Environment**, v. 31, n. 22, p. 3821-3831, 1997.

Jô Soares entrevista Milton Santos, entrevista concedida em 10/07/1995. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=jzUIHAAiISM> >. Acessado em: 30/03/2021.

KATZSCHNER, L. Microclimatic thermal comfort analysis in cities for urban planning and open space design. **Network for Comfort and Energy Use in Buildings NCUB**, Londres, 2006.

KOTHARKAR, R.; BAGADE, A. Evaluating urban heat island in the critical local climate zones of an Indian city. **Landscape and Urban Planning**, v.169, p. 92–104, 2018.

KOWALSKI, L. F. Influência do albedo de pavimentos no campo térmico de cânions urbanos: estudo de modelo em escala reduzida. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 143p., 2019.

KRÜGER, E. L. Urban heat island and indoor comfort effects in social housing dwellings. **Landscape and Urban planning**, v.134, p.147-156, 2015.

KRÜGER, E. L.; ROSSI, F. A. Effect of personal and microclimatic variables on observed thermal sensation from a field study in southern Brazil.

KUBRUSLY, V.S. Gestão sócio-ambiental urbana e o geoprocessamento como apoio para análise do território: o caso da bacia hidrográfica do Guarapiranga. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 147 p., 2000. **Building and Environment**, v. 46, p. 690-697, 2011.

LEITE, G. H. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; SILVA, M. de A.; FILHO, W. G. V. Maturadores e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar variedade RB855453 em início de safra. **Bragantia**, v.68, n.3, p. 781-787, 2009.

LI, D.; SUN, T.; LIU, M.; YANG, L.; WANG, L.; GAO, Z. Contrasting responses of urban and rural surface energy budgets to heat waves explain synergies between urban heat islands and heat waves. **Environmental Research Letters**, v. 10, p. 1-10, 2015.

LI, D.; BOU-ZEID, E. Synergistic Interactions between Urban Heat Islands and Heat Waves: The Impact in Cities Is Larger than the Sum of Its Parts. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v.52 (9), p. 2051-2064, 2013.

LIMA, G. N. RUEDA, V. O. M. The urban growth of the metropolitan area of São Paulo and its impact on the climate. **Weather and Climate Extremes**, v. 21, p.17-26, 2018.

LIMA, N. R. PINHEIRO, G. M., MENDONÇA, F. Clima Urbano no Brasil: Análise e contribuição da metodologia de Carlos Augusto de Figueiredo Monteiro. **Geonorte**, Edição Especial 2, v.2, n.5, p.626–638, 2012.

MAIA, A. C. Direito à cidade: Plano de ação para o desenvolvimento urbano de Piracicaba. Trabalho de Conclusão de Curso, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, 177p., 2015.

MARAFON, A. C. Análise quantitativa de crescimento em cana-de-açúcar: uma introdução ao procedimento prático, Embrapa, Aracaju, 29p., 2012.

MARICATO, E. A produção capitalista da casa (e da cidade) no Brasil industrial. Alfa-Ômega, São Paulo, 437 p., 1979.

MARICATO, E. MetrÓpole, legislação e desigualdade. **Estudos Avançados**, v.17, p.151-166, 2003.

MARIN, F. R. Eficiência de produção da cana-de-açúcar brasileira: estado atual e cenários futuros baseados em situações multimodelos. Tese de Livre-Docência, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 263p., 2014.

MARTILLI, A.; KRAYENHOFF, E. S.; NAZARIAN, N. Is the Urban Heat Island intensity relevant for heat mitigation studies? **Urban Climate**, v.31, 100541, 2020.

MASIERO, E.; SOUZA, L. C. L. de. Variação de umidade absoluta e temperatura do ar intraurbano nos arredores de um corpo d'água. **Ambiente Construído**, v. 13, p. 25-39, 2013.

MASIERO, E.; SOUZA, L. C. L. de. Mapping humidity plume over local climate zones in a high-altitude tropical climate city, Brazil. **Ambiente Construído**, v. 18, p. 177-197, 2018.

MASOUDI, M; TAN, P. Y. Multi-year comparison of the effects of spatial pattern of urban green spaces on urban land surface temperature. **Landscape and Urban Planning**, v.184, p. 44–58, 2019.

MATZARAKIS, A.; RUTZ, F.; MAYER, H. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: Basics of the RayMan model. **International Journal of Biometeorology**, v. 54, p. 131-139, 2010.

MENDONÇA, F. de A. Clima e o planejamento urbano de cidades de porte médio e pequeno: proposição metodológica para estudo e sua aplicação a cidade de Londrina/PR. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

MILLS, G. Urban climatology and its relevance to urban design. **25º Conference on Passive and Low Energy Architecture (PLEA)**, Dublin, 2008.

MILLS, G.; BECHTEL, B.; CHING, J.; SEE, L.; FEDDEMA, J. FOLEY, M.; ALEXANDER, P.; O'CONNOR, M. An Introduction to the WUDAPT project. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN CLIMATE, 9., Toulouse, 2015. Proceedings... Toulouse, 2015

MOHAJERANI, A.; BAKARIC, J.; JEFFREY-BAILEY, T. The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of

asphalt concrete. **Journal of Environmental Management**, v. 197, p. 522-538, 2017.

MONTEIRO, C. A. de F. Teoria e Clima Urbano. Tese de Doutorado, Instituto de Geografia/USP, São Paulo, 181 p., 1976.

MONTEIRO, C. A. de F.; MENDONÇA, F. Clima Urbano. Editora Contexto, 1ª edição, São Paulo, 192 p., 2003.

NAKATA-OSAKI, C. M. Adaptação de um modelo simplificado para verificação da influência da geometria urbana na formação de ilha de calor noturna. Tese de Doutorado, 132p., Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2016.

NEGRI, B. Concentração e desconcentração industrial em São Paulo (1880-1990). Tese de Doutorado, Unicamp, Campinas, 279p., 1996.

NIEUWOLT S. 1966. The urban microclimate of Singapore. *J. of Trop. Geog.*, 22, 30-37.

NORTON, B. A.; COUTTS, A. M.; LIVESLEY, S. J.; HARRIS, R. J.; HUNTER, A. M.; WILLIAMS, N. S. G.; Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. **Landscape and Urban Planning**, v. 134, p. 127-138, 2015.

OKE, T. R. City size and the urban heat island. **Atmospheric Environment**, v.7, p.769-779, 1973.

OKE, T. R. The distinction between canopy and urban boundary-layer heat islands. **Atmosphere**, v.14, p. 268-277, 1976.

OKE, T. R. The energetic basis of the urban heat island. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.108, n° 455, p.1-24, 1982.

OKE, T. R. Towards a perspective for the greater use of climatic principles in settlement planning. **Energy Build**, v.7, p.1-10, 1984.

OKE, T. R. The Heat Island of the Urban Boundary Layer: Characteristics, Causes and Effects. **Wind Climate in Cities**, p. 81-107, 1995.

OKE, T. R. Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. World Meteorological Organization (WMO), report 81, n.1250, 2006.

OKE, T. R.; MILLS, G.; CHRISTEN, A.; VOOGT, J.A. Urban Climates, Cambridge University Press, Cambridge, 519p., 2017.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU) – Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World urbanization prospects: The 2011 revision, 2012.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Assembleia Geral: **Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development**. Nova York, 2015.

OTERO, E. V. Reestruturação Urbana em cidades médias paulistas: a cidade como negócio. Tese de Doutorado, 343 p., Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification Hydrology and Earth System Sciences, v.11, p.1633–1644, 2007.

PEREIRA, C. T. Dinâmica Climática e comportamento térmico em distintas local climate zones em uma cidade tropical costeira. Tese de Doutorado, 106p., Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

PEREIRA, C.T., MASIERO, É. & BOURSCHEIDT, V. Socio-spatial inequality and its relationship to thermal (dis)comfort in two major Local Climate Zones in a tropical coastal city. *Int J Biometeorol* (2021). <https://doi.org/10.1007/s00484-021-02099-9>

PIELKE, R. A.; AVISSAR, R. Influence of landscape structure on local and regional climate. **Landscape Ecology**, v. 4, p. 133-155, 1990.

POLYDOROS, A.; CARTALIS, C. Assessing the impact of urban expansion to the state of thermal environment of peri-urban areas using indices. **Urban Climate**, v. 14, p. 166-175, 2015.

POMPERMAYER, R. M. T. Espaço Urbano de Piracicaba: sua ocupação e evolução. Trabalho de Iniciação Científica – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1998.

PREFEITURA DE PIRACICABA. Plano Diretor de Desenvolvimento de Piracicaba (PDDP), 2018. Disponível em: <http://ipplap.com.br/site/plano-diretor/revisao-plano-diretor-2013/>. Acessado em: 20/03/20.

PREFEITURA DE PIRACICABA. Plano Diretor de Desenvolvimento de Piracicaba (PDDP), 2018. Disponível em: <http://planodiretor.piracicaba.sp.gov.br/>. Acessado em: 14/04/19.

PREFEITURA DE TORONTO. Programa de Adaptação e Mitigação Climática, Toronto, 2016.

ROLNIK, R. Guerra dos lugares: A colonização da terra e da moradia na era das finanças. Boitempo, São Paulo, 424 p., 2015.

RODRIGUEZ, C.M. D’ALESSANDRO, M. Indoor thermal comfort review: The tropics as the next frontier. **Urban Climate**, v. 29, 100488, 2019.

ROTH, M. Review of urban climate research in (sub)tropical regions. **International Journal of Climatology**, v. 27, p.1859–1873, 2007.

SANTOS, M. A natureza do espaço: técnica e tempo, razão e emoção. Hucitec, São Paulo, 260p., 1996.

SANTOS, M. Modo de produção técnico-científico e diferenciação espacial. **Revista Território**, n.6, 1999.

SANTOS, M.; SILVEIRA, M. L. O Brasil: Território e Sociedade no início do século 21. Record, Rio de Janeiro, 473 p., 2001a.

SEIXAS, G. T. C. de. Climatologia aplicada à arquitetura: investigação experimental sobre a distribuição de temperaturas internas em duas células de teste. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos, 126p., 2015.

- SEN, S.; ROESLER, J. Wind direction and cool surface strategies on microscale urban heat island. **Urban Climate**, v. 31, 100548, 2020.
- SHARMA, R.; HOOYBERGHS, H.; LAUWAET, D.; DE RIDDER, K. Application of UrbClimfor an Asian tropical city—The case of Delhi. **Living planet symposium**, v. 740, 2016.
- SOUZA, C. A. de.; FILHO, A. C. P.; GUARALDO, E. Estudo bibliométrico sobre ilhas de calor urbanas e zonas climáticas locais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v, 26, p. 51-69, 2020.
- SPADOTTO, Bruno R. Especialização regional e centralização de capital: O mercado sucroenergético e a vulnerabilidade territorial de Piracicaba (SP). In: 14º EGAL, Lima, 2013.
- SPOSITO, M. E. B. As cidades médias e os contextos econômicos contemporâneos. In: SPOSITO, M. E. B. (org.) Urbanização e cidades: perspectivas geográficas. Presidente Prudente: UNESP, p. 609-642, 2001.
- STEINBERGER, M.; BRUNA, G.C. Cidades médias: elos do urbano-regional e do público-privado. In: ANDRADE, T. A.; SERRA, R. V. Cidades Médias Brasileiras. Rio de Janeiro: IPEA, 393p., 2001.
- STEWART, I.D. Why should urban heat island researchers study history? **Urban Climate**, v. 30, 100484, 2019.
- STEWART, I.D.; OKE, T.R. Local Climate Zones for urban temperature studies. **Bulletin of American Meteorological Society**, n. 93, p. 1879-1900, 2012.
- STEWART, I.D.; OKE, T.R.; KRAYENHOFF, E. S.; Evaluation of the 'local climate zone' scheme using temperature observations and model simulations. **International Journal of Climatology**, v. 34, p. 1062-1080, 2014.
- SZMRECSANYI, T.; MOREIRA, E. P. O Desenvolvimento da Agroindústria Canavieira do Brasil desde a Segunda Guerra Mundial. **Estudos Avançados**, v. 5, n. 11., p. 57-79, 1991.
- Pereira, C.T., Masiero, É. & Bourscheidt, V. Socio-spatial inequality and its relationship to thermal (dis)comfort in two major Local Climate Zones in a tropical coastal city. *Int J Biometeorol* (2021). <https://doi.org/10.1007/s00484-021-02099-9>.
- THOMÉ, P.; VAZ, T. A.; GROFF, A. M. Fatores e Técnicas do cultivo Cana-De-Açúcar e sua correlação com a Qualidade e a Produtividade. In: Anais XI EEPA, Campo Mourão, 9p., 2017.
- VERDONCK, M. L.; DEMUREZERA, M.; HOOYBERGHSB, H.; BECKC, C.; CYRYSD, J. SCHNEIDERD, A.; DEWULFA, R.; COILLIEA, F. V. The potential of local climate zones maps as a heat stress assessment tool, supported by simulated air temperature data. **Landscape and Urban Planning**, v.178, p. 183–197, 2018.
- VOOGT, J.A. OKE, T. R. Complete Urban Surface Temperatures. **Journal of Applied Meteorology**, v. 3, p. 1117-1132, 1997.

WAFFLE, A.D.; CORRY, R.C.; GILLESPIE, T. J.; BROWN, R.D. Urban heat islands as agricultural opportunities: An innovative approach. **Landscape and Urban Planning**, v. 161, p. 103-114, 2017.

WANG, Y.; BERARDI, U.; AKBARI, H. Comparing the effects of urban heat island mitigation strategies for Toronto, Canada. **Energy and Buildings**, v.114, p.02-19, 2016.

XUE, Z.; HOU, G.; ZHANG, Z.; LYU, X.; JIANG, M.; ZOU, Y.; SHEN, X.; WANG, J.; LIU, X. Quantifying the cooling-effects of urban and peri-urban wetlands using remote sensing data: Case study of cities of Northeast China. **Landscape and Urban Planning**, v. 182, p. 92-100, 2019.

ZHANG, Y.; ODEH, I. O. A.; RAMADAN, E. Assessment of land surface temperature in relation to landscape metrics and fractional vegetation cover in an urban/periurban region using Landsat data. **International Journal of Remote Sensing**, v.34(1), p.168–189, 2013.

ZHAO, L.; OPPENHEIMER, M.; ZHU, Q.; BALDWIN, J.; EBI, K.; BOU-ZEID, E.; GUAN, K.; LIU, X. Interactions between urban heat islands and heat waves. **Environmental Research Letters**, v. 13, p. 1-11, 2018.

ZHENG, Y.; REN, C.; XU, Y.; WANG, R. GIS-based mapping of Local Climate Zone in the high-density city of Hong Kong. **Urban Climate**, v.24, p. 419-448, 2018.