



XIENCAC
ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO
NO AMBIENTE CONSTRUÍDO

VIIELACAC
ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO
NO AMBIENTE CONSTRUÍDO

Búzios - RJ - 2011

ANÁLISE DO CAMPO TÉRMICO DE SÃO CARLOS (SP): ESTUDO EM DIA REPRESENTATIVO DO PERÍODO DE VERÃO

Ricardo Victor Rodrigues Barbosa (1)

(1) Arquiteto, Professor do curso de Arquitetura e Urbanismo/*Campus* Arapiraca, rvictor@arapiraca.ufal.br
Universidade Federal de Alagoas, Grupo de Estudo da Atmosfera Climática Urbana – GATU
Av. Manoel Severino Barbosa, s/n, Bom Sucesso, Arapiraca - AL, 57309-005, Tel.: (82) 3482-1830

RESUMO

A modificação das condições iniciais do clima é consequência inerente da substituição da cobertura natural do solo pelo ambiente construído. Nesse processo, um dos mecanismos do sistema cidade-atmosfera mais afetado pela mudança do uso e da cobertura do solo é o campo térmico urbano. Assim, esta pesquisa objetivou estudar a configuração do campo térmico da cidade de São Carlos (SP) nas suas dimensões espaços-temporais, com vistas a conhecer a intensidade da ilha de calor urbano no período de verão, dentro de suas variações diurnas e das condições impostas pelos diferentes tipos de tempo habituais, com o aporte da abordagem dinâmica do clima. A análise da intensidade do campo térmico urbano foi feita a partir de registros de dados climáticos contínuos tomados em superfície por quatro estações automáticas instaladas em diferentes regiões da malha urbana. Os resultados obtidos denotaram que a maior intensidade da ilha de calor urbano, no período de verão, ocorreu na atuação da massa Tropical Atlântica sobre a região, cujo tipo de tempo habitual foi caracterizado por cenário atmosférico com predominância de céu claro, alta incidência de radiação solar direta e valores de temperatura do ar elevados com máxima diária acima da média das máximas indicadas pelas Normais Climatológicas. Sob essas condições, observou-se que as características do entorno construído exerceram maior influência no comportamento térmico urbano, na qual as diferenças térmicas entre diferentes regiões dentro da malha urbana de São Carlos foram superiores a 5°C. Observou-se, ainda, que a maior expressão da ilha de calor urbano ocorreu após o pôr-do-sol, nos horários entre 21:30h e 22:00h.

Palavras-chave: clima urbano, campo térmico urbano, ilha de calor.

ABSTRACT

Changes in initial conditions of the climate are consequence of replacing the natural ground cover by the built environment. In this process, one of the most affected mechanics of the city-atmosphere system due to the change of use and land cover is the urban thermal field. Thus, this research aim to study the configuration of the thermal field of São Carlos in the spatial and temporal dimensions for understanding the intensity of urban heat island in the summer, taking into account its diurnal temperature variations and imposed conditions by different weather types, guided by the climate dynamics approach. The analysis of the intensity of urban thermal field is made from records of climatic data observed in solid ground for four automatic weather stations placed in different areas of the city. The obtained results denote that the highest intensity of urban heat island in summer occurs in the activity of Tropical Atlantic air mass over the region, where the habitual weather was clear skies with high incidence of direct solar radiation and values of air temperature with high daily maximum above the average of the levels indicated by the Climate Normals. Under these weather conditions, it is observed that the characteristics of the built environment have a greater influence on urban thermal behavior, in which the temperature variations between different regions within the urban area of San Carlos were above 5°C. It is also observed that the highest intensity of urban heat island occurred after sunset, at times between 21:30 and 22:00h.

Keywords: urban climate, urban thermal field, urban heat island.

1. INTRODUÇÃO

Estimativas da Organização das Nações Unidas – ONU evidenciam que caminhamos para um mundo cada vez mais urbano. Neste cenário, a importância dos estudos sobre as cidades e os impactos provenientes da expansão urbana nas modificações dos ecossistemas existentes deve ser reconhecida e efetivamente incorporada ao planejamento das cidades. Essa concepção visa à preservação das condições de sustentabilidade ambiental devido aos impactos das estruturas urbanas sobre as diferentes esferas do sistema natural que a sustentam – hidrosfera, litosfera, pedosfera, biosfera e atmosfera. Dentre eles, vem assumindo cada dia mais importância àqueles relativos ao sistema atmosférico, destacando-se, nesta investigação, as modificações nas condições iniciais do clima pelo processo de urbanização.

Embora seja reconhecida a importância da consideração do clima no planejamento das cidades, com vistas à existência de espaços adequados ao conforto do usuário urbano, constata-se que muito pouco do conhecimento disponível em climatologia urbana é usado de forma efetiva (ELNAHAS, 1999; ASSIS, 2003). Sob esse aspecto, torna-se imprescindível que profissionais ligados ao planejamento urbano possam dispor de metodologias para análise quantitativa e integrada de atributos da forma urbana e do clima, de modo a mitigar os impactos adversos da expansão urbana na atmosfera.

A partir desse cenário, a presente investigação abordou a temática clima urbano sob o enfoque da influência das características geoambientais e geourbanas na configuração do campo térmico urbano, por meio do estudo da intensidade da ilha de calor. A abordagem foi feita por meio de estudo de caso, tomando como ecossistema de estudo a cidade de São Carlos (SP), localizada na região central do estado de São Paulo (21°35'45" e 22°09'30" de latitude Sul e 47°43'04" e 48°05'26" de longitude Oeste), na região Sudeste do Brasil.

Acredita-se de que o conhecimento do comportamento do campo térmico urbano nas suas dimensões espaços-temporais e dentro de suas variações diurnas e das condições impostas pelos diferentes tipos de tempo pode contribuir para diagnosticar alterações que ocorrem no sistema cidade-atmosfera e subsidiar ferramentas de planejamento urbano climaticamente adequadas.

2. OBJETIVO

A pesquisa teve por objetivo estudar a configuração do campo térmico da cidade de São Carlos (SP) nas suas dimensões espaços-temporais, com vistas a conhecer a intensidade da ilha de calor urbano no período de verão, dentro de suas variações diurnas e das condições impostas pelos diferentes tipos de tempo.

3. ECOSSISTEMA DE ESTUDO: A CIDADE DE SÃO CARLOS (SP)

O município de São Carlos possui extensão territorial de 1.140 km² e está localizado na região centro-norte do estado de São Paulo, entre as coordenadas geográficas 21°35'45" e 22°09'30" de latitude Sul e 47°43'04" e 48°05'26" de longitude Oeste, na região Sudeste do Brasil. Dista aproximadamente 240 km da capital do estado e limita-se ao norte com os municípios de Rincão, Luis Antônio e Santa Lúcia; ao sul com Ribeirão Bonito, Brotas e Itirapina; a oeste com Ibaté, Araraquara e Américo Brasiliense; e a leste com Descalvado e Analândia.

O município está assentado na borda oeste das Cuestas Basálticas, próximo ao Planalto Ocidental. A província geomorfológica das Cuestas Basálticas localiza-se entre as províncias do Planalto Ocidental e a Depressão Periférica (ALMEIDA, 1964), segundo a subdivisão geomorfológica do estado de São Paulo (IPT, 1981; ROSS & MOROZ, 1997).

A área urbana localiza-se na parte sul de São Carlos e abrange uma área de 67,52 km² – o que representa apenas 6% da área total do município; das quais apenas 33 km² é, de fato, ocupada. A cidade encontra-se a uma altitude média de 856m acima do nível do mar, em uma das áreas de maior altitude do município.

Com relação aos aspectos demográficos, em 2007, o município contava com uma população estimada de 212.956 habitantes (IBGE, 2009), dentre os quais 95,1% residiam em área urbana. O crescimento demográfico do município no período entre 1970 e 2000 foi superior ao crescimento demográfico do estado de São Paulo e do Brasil para o mesmo período.

Os índices pluviométricos, em São Carlos, definem a existência de duas estações bem distintas, definidas pelos seus índices pluviométricos: uma seca e uma chuvosa. A estação seca estende-se de abril a setembro, caracterizada por precipitações escassas, na ordem de 301,9 mm, representando apenas 20,2% do total anual. Esse período também apresenta baixa umidade do ar, reduzida nebulosidade e menor temperatura

do ar. Nesse período predominam as massas Tropical Atlântica e Polar Atlântica sobre a região (TOLENTINO, 1967).

A estação chuvosa ocorre nos meses de outubro a março, devido às incursões da massa Equatorial Continental e ao dinamismo da frente Polar Atlântica sobre a massa Tropical Atlântica, que responde, em grande parte, pela gênese das chuvas que se produzem durante a atuação de sistemas frontais nesse período do ano (MONTEIRO, 1973). A estação chuvosa é caracterizada, ainda, por elevadas temperatura do ar, alta umidade do ar e precipitações abundantes, na ordem de 1.193,2 mm, que representa 78,8% do total anual. (TOLENTINO, 1967).

3.1. Características e os tipos de tempo habituais do período de verão

Os meses correspondentes ao período de verão coincidem com a estação chuvosa, caracterizando-se por elevados índices pluviométricos (na ordem de 707,3 mm, nos meses de dezembro a fevereiro, o que corresponde a 47,3% do total anual).

De acordo com Monteiro (1973), a evolução dos tipos de tempo no período de verão na região de São Carlos, assim como em todo território paulista, é influenciada, basicamente, por três fatores dinâmicos da circulação atmosférica regional: (a) domínio da massa Tropical Atlântica, (b) individualização e domínio da massa Tropical Continental e (c) incursões da massa Equatorial Continental.

No domínio da massa Tropical Atlântica, as chuvas mantêm íntima conexão com os fenômenos da frente Polar Atlântica, especificamente pelo cenário de instabilidade atmosférica na pré-frontal. O autor (*op. cit.*) ressaltou que o dinamismo da frente Polar Atlântica afeta a massa Tropical Atlântica por meio de fenômenos superiores. Essa dinâmica responde, na maioria das vezes, pela gênese das chuvas que se produzem durante a sua atuação.

Os tipos de tempo habituais do período de verão são caracterizados, assim, pela sucessão de avanços periódicos de sistemas frontais sobre a região. Dessa forma, podemos distinguir períodos pré-frontais, períodos de avanço dos sistemas frontais e períodos pós-frontais.

O período pré-frontal apresenta cenário atmosférico estável, com bom tempo e céu claro. A temperatura máxima do ar é, freqüentemente, superior à média das máximas das Normais Climatológicas, devido à intensa insolação nesse período do ano aliado à ausência de nebulosidade característica da fase de domínio de massas Tropicais. A umidade relativa do ar é reduzida devido ao aumento da temperatura do ar, o que favorece maior amplitude térmica diária. Os ventos sopram predominantemente do quadrante NE, proveniente do anticiclone Tropical. O período pré-frontal encerra-se com a fase a qual Monteiro (1963) denominou “*prenúncio*”, que antecede a passagem de uma frente fria sobre a região.

O período de avanço corresponde à passagem da frente Polar Atlântica sobre a região. Esse período é caracterizado pelas chuvas produzidas por perturbações pré-frontais resultantes da dinâmica da circulação regional. O momento do avanço do sistema frontal sobre a região é marcado por queda acentuada nos valores da temperatura do ar e conseqüente incremento nos índices de umidade relativa do ar. Há, ainda, o surgimento dos ventos de O, SO e NO, responsáveis por elevadas velocidades do ar, devido ao processo de instabilidade atmosférica, ao aparecimento de calhas induzidas, entre outros (VECCHIA, 1997).

O período pós-frontal é caracterizado, inicialmente, pelo domínio absoluto da massa Polar Atlântica, que ocorre logo após a passagem da frente fria sobre a região. No verão, o domínio na pós-frontal é caracterizado, freqüentemente, por leve declínio da temperatura do ar, visto que a massa Polar Atlântica chega sobre a região em estudo sensivelmente modificada devido ao maior aquecimento do continente. Nesse sentido, deve-se considerar que a massa Polar Atlântica, após o solstício de verão, atravessa o continente em processo de aquecimento bem mais intenso, além do enfraquecimento do abastecimento de ar polar, o que implica no fato de que suas propriedades sejam consideravelmente diferentes daquelas observadas no decorrer do inverno (MONTEIRO, 1973). A fase de domínio é marcada, ainda, por forte nebulosidade, reduzida amplitude térmica e ventos predominantes do quadrante SE, oriundos do anticiclone Polar.

A massa de ar polar que dominou o tempo sobre a região começa a se modificar em virtude de seu avanço para latitudes mais baixas e pelo tempo de permanência em contato com a superfície do continente que favorece o aquecimento basal, entrando em processo de tropicalização (Massa Polar Velha ou Tropicalizada). Essa fase é marcada pela dissipação da nebulosidade, aumento gradativo da temperatura do ar e da amplitude térmica diária. A fase de tropicalização marca o fim do domínio da massa Polar Atlântica e a retomada do domínio da massa Tropical no cenário atmosférico na região, dando início a um novo ciclo.

Assim, a seqüência dessas fases traduz os tipos de tempo habituais do período de verão na região de São Carlos, podendo variar de acordo com a freqüência, a intensidade e a duração dos sistemas atmosféricos dominantes na região.

3. MÉTODO

Os procedimentos metodológicos adotados no desenvolvimento da presente investigação compreenderam três etapas distintas, desenvolvidas de forma seqüencial. A primeira etapa consistiu na aquisição de registros climáticos contínuos, tomados em superfície, por meio de estações automáticas instaladas em diferentes áreas da malha urbana de São Carlos. As estações climáticas foram instaladas em regiões da cidade com diferentes características do sítio urbano e do entorno construído. A segunda etapa consistiu na definição do período de análise, com vistas a identificar episódios representativos do fato climático de verão, de forma a alcançar melhor precisão e representatividade dos resultados obtidos por meio de investigação experimental.

Por fim, a terceira etapa consistiu na análise e discussão dos resultados obtidos, com vistas a conhecer o comportamento do campo térmico da cidade de São Carlos em sua dimensão temporal. Essa etapa buscou identificar diferenças térmicas entre as regiões monitoradas, de modo a identificar indícios de formação de ilhas de calor urbano nos diferentes tipos de tempo de um episódio climático de verão. Os procedimentos metodológicos da investigação experimental foram melhor detalhados a seguir.

4.1. Aquisição de registros climáticos em superfície

Os registros climáticos em superfície foram provenientes de quatro estações automáticas instaladas na malha urbana de São Carlos, com registros de dados climáticos contínuos e ininterruptos totalizados em média aritméticas a cada 30 minutos. As estações usadas como parâmetros do comportamento climático em área urbana foram instaladas no Campus I e no Campus II da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo; na Faculdade de Direito de São Carlos – Fadisc; e no conjunto residencial Samambaia.

As estações localizam-se em bairros distintos, em diferentes altitudes e com distintos padrões de uso e ocupação do solo, constituindo-se, desta forma, em registro de dados representativos para análise espacial que considere a topografia do sítio e a ocupação do solo urbano. A Figura 1a mostra a localização das quatro estações automáticas na malha urbana de São Carlos sobre modelo digital de terreno, evidenciando a conformação do relevo na cidade com indicação das diferentes altitudes em cada estação climática, ao tempo que a Figura 1b mostra o perfil topográfico transversal da área urbana de São Carlos com a localização das quatro estações climáticas adotadas na presente investigação experimental.

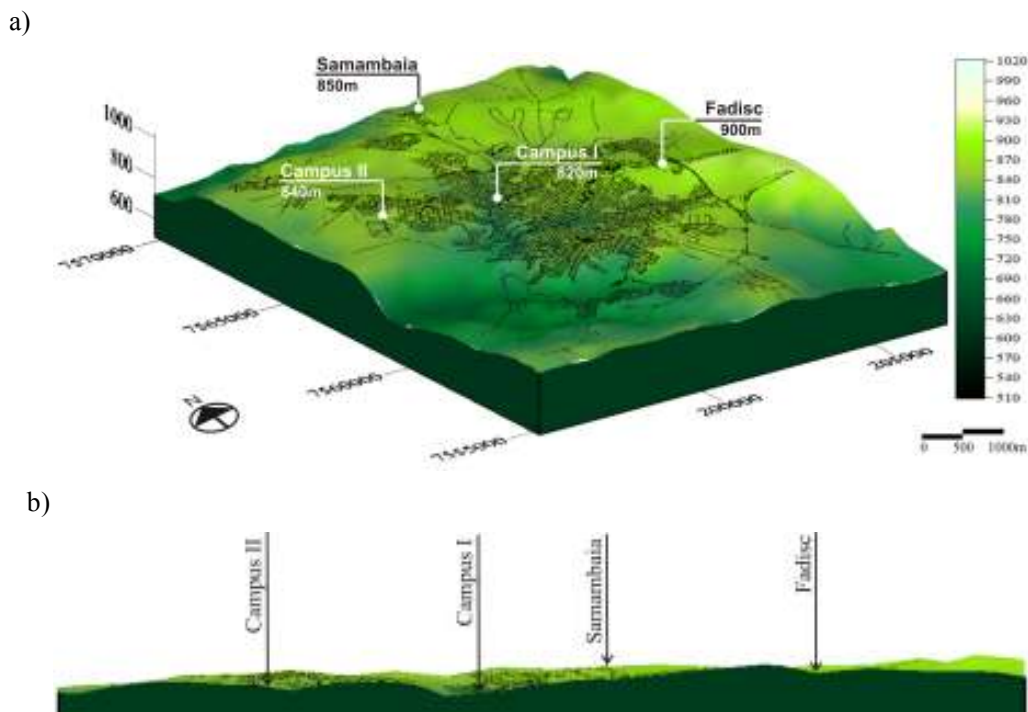


Figura 1: (a) Localização das quatro estações automáticas na malha urbana de São Carlos sobre modelo digital de terreno, mostrando a conformação do relevo na cidade com indicação das diferentes altitudes em cada estação climática; (b) perfil topográfico transversal da área urbana de São Carlos com a localização das quatro estações climáticas adotadas na presente investigação experimental.

A estação automática do Campus I localiza-se na porção central da cidade, com cota altimétrica de 820 m, situada em fundo de vale. Dista, aproximadamente, 3 km, em linha reta, na direção sudeste da estação no Campus II; 4 km na direção oeste da estação na Fadisc; e 5,5 km na direção sul da estação no Samambaia. Seu entorno construído é caracterizado pelo uso misto do solo, com residências, pontos comerciais e institucional (o próprio Campus da Universidade de São Paulo). Apresenta área densamente construída, com a presença de alguns prédios baixos e outros com mais de dez pavimentos, além de pouca vegetação arbórea. A cobertura do solo é predominantemente asfáltica, com reduzidas áreas de solo vegetado. O padrão habitacional é predominantemente alto, com densidade populacional entre 50 a 100 hab/ha (PMSC, 2004).

A estação automática do Campus II localiza-se na porção Oeste da cidade, com cota altimétrica de 840 m. Dista, aproximadamente, 3 km, em linha reta, na direção noroeste da estação no Campus I; 7 km na direção oeste da estação na Fadisc; e 6,6 km na direção sudoeste da estação no Samambaia. Seu entorno construído é caracterizado pelo uso do solo predominantemente residencial, com alguns poucos pontos de comércio e serviço local, além do uso institucional (o próprio Campus da Universidade de São Paulo).

A área apresenta densidade de construção moderada, com predomínio de edificações térreas sem recuo em lotes estreitos. As vias de circulação apresentam leito carroçável largo e grandes espaços abertos, embora sem presença de vegetação arbórea. A cobertura do solo é predominantemente asfáltica, com extensas áreas de solo nú e gramado. O padrão habitacional é predominantemente baixo, com densidade populacional entre 50 a 100 hab/ha (PMSC, 2004).

A estação automática na Faculdade de Direito de São Carlos – Fadisc localiza-se na porção Leste da cidade, em cota altimétrica de 900 m (uma das regiões mais elevadas do perímetro urbano de São Carlos). Dista, aproximadamente, 4 km, em linha reta, na direção leste da estação no Campus I; 7 km na direção sudeste da estação no Campus II; e 7 km na direção sul da estação no Samambaia. Seu entorno construído é caracterizado pelo uso do solo predominantemente residencial, além do uso institucional (a própria Faculdade de Direito de São Carlos).

A área apresenta baixa densidade de construção, circundada por condomínios fechados de alto padrão habitacional e extensa área de vegetação arbórea. A cobertura do solo é predominantemente gramínea e vias de circulação com leito asfaltado. A densidade populacional é menor que 50 hab/ha (PMSC, 2004).

Por fim, a estação automática no Samambaia localiza-se na porção Norte da cidade, em cota altimétrica de 850 m. Dista, aproximadamente, 5,5 km, em linha reta, na direção norte da estação no Campus I; 6,6 km em direção nordeste da estação no Campus II; e 7 km em direção noroeste da estação na Fadisc. Seu entorno construído é caracterizado pelo uso do solo residencial, situando-se em condomínio fechado e afastado do centro urbano. A área apresenta densidade de construção baixa e alto padrão habitacional. O condomínio residencial Samambaia possui áreas verdes em seu interior e está circundado por extensa área de vegetação arbórea. A cobertura do solo é predominantemente asfáltica. Informações sobre densidade populacional não foi encontrada, mas estima-se que seja menor que 50 hab/ha.

4.2. Definição de um episódio climático representativo do período de verão

Os dados climáticos provenientes das quatro estações automáticas descritas anteriormente foram compilados em tabelas distintas. Frente a gama de possíveis períodos de observação, foi necessário identificar um episódio que delineasse mais precisamente a verdade das condições climáticas pela sua representatividade e resolução, aplicando-se, dessa forma, como instrumento válido de avaliação.

Nesse sentido, optou-se por delimitar episódio climático que atendessem a dois critérios básicos: (a) contivesse dentro do período de observação um dia de extremo rigor térmico, com temperatura do ar acima da média das máximas indicada pelas Normas Climatológicas (BRASIL, 1992) para o período de verão; e (b) apresentasse encadeamento habitual de tipos de tempo do período de verão.

Dessa forma, foi feito estudo do ritmo climático para os meses de dezembro de 2004, janeiro e fevereiro de 2005. Por meio da análise rítmica, observou-se que o mês de fevereiro de 2005 apresentou-se mais adequado para a presente investigação, sobretudo por apresentar maior quantidade de dias com predominância de céu claro, menor total pluviométrico mensal e maior quantidade de dias com temperatura do ar próxima ou acima da média das máximas indicada pelas Normas Climatológicas (BRASIL, 1992).

Após definido o mês de fevereiro de 2005, foi feito o delineamento dos episódios climáticos ocorridos nesse mês, baseado no comportamento das variáveis meteorológicas e na sucessão dos diferentes tipos de tempo. Os resultados encontrados foram confrontados com as análises do Boletim Climanálise do Instituto de Pesquisas Espaciais – INPE (CLIMANÁLISE, 2005) para o referido mês, objetivando maior conhecimento da dinâmica dos sistemas frontais atuantes e validação dos episódios delineados.

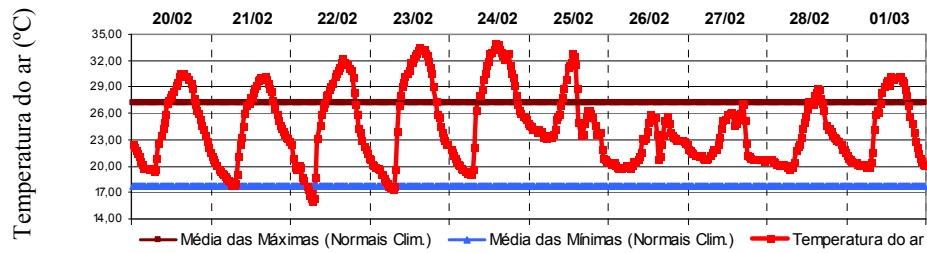


Gráfico 1: Comportamento da temperatura do ar na cidade de São Carlos entre os dias 20/02 e 01/03/2005, com indicação da média das máximas e da média das mínimas para o mês de fevereiro fornecidas pelas Normais Climatológicas de 1961-90

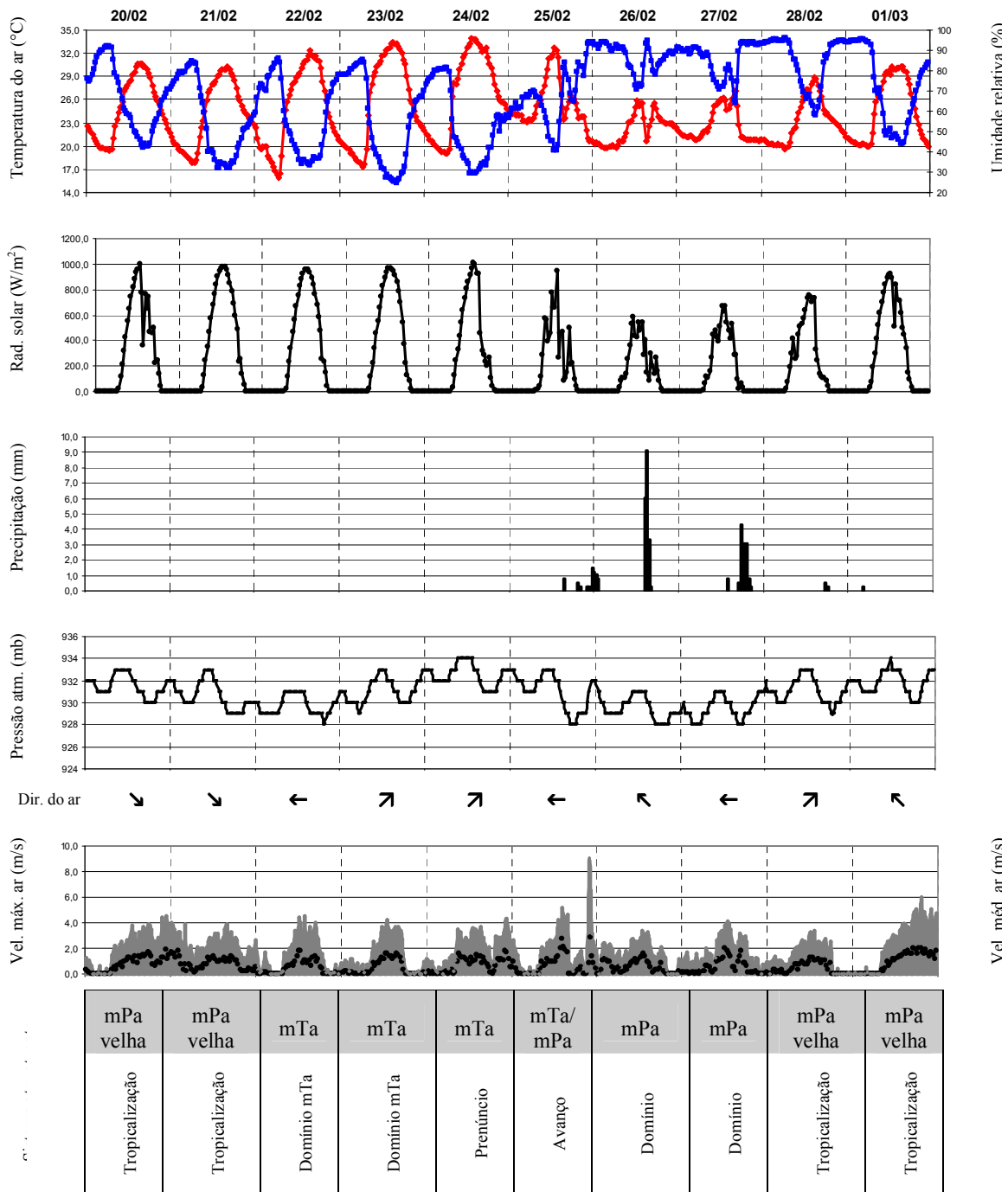


Figura 2: Análise rítmica do episódio climático compreendido entre os dias 20/02 a 01/03/2005 com indicação do sistema atmosférico atuante.

A análise dos dados mostrou que, em fevereiro de 2005, cinco sistemas frontais atuaram sobre a região de São Carlos. O Climanálise (2005) informou que as frentes frias que atuaram ao longo desse mês foram de fraca intensidade, causando nebulosidade e chuva fraca.

A partir da identificação e delineamento dos cinco episódios climáticos ocorridos no mês de fevereiro, optou-se por definir o quinto episódio, cujo avanço do sistema frontal sobre a região de São Carlos ocorreu no dia 25/02/2005, como representativo para a análise do campo térmico urbano. Os fatores que levaram à escolha desse episódio climático pautaram-se nos dois critérios deliberados anteriormente. Nesse sentido, o episódio climático compreendido entre os dias 20/02/2005 e 01/03/2005 continha, em seu período de observação, dias de forte rigor térmico, com temperatura do ar acima da média das máximas indicada pelas Normais Climatológicas, conforme pode ser observado no Gráfico 1.

Para o presente artigo limitou-se à análise do dia 23/02/2005, por este dia caracterizar-se como o dia de céu claro e calmaria e por estar inserido em um encadeamento habitual de tipos de tempo no período de verão, conforme mostra a Figura 2, caracterizando-o, assim, como um dia representativo e, portanto, válido como instrumento de análise para a investigação em tela.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

No dia 23/02/2005 permaneceu a tendência de elevada amplitude térmica diária, da ordem de 16,1°C. Observou-se maior aumento no valor da temperatura máxima – 33,5°C, às 15:30h – e pequena elevação da mínima diária, no valor de 17,4°C, às 7:00h (pouco após o nascer do Sol). Os registros de umidade relativa do ar alcançaram os menores índices de todo o verão de 2005, permanecendo abaixo dos 50% a partir das 9:30h, com mínima de 24%, às 16:30h, voltando a registrar índices superiores a 50% só após às 20:00h. Dessa forma, pode-se observar que tratou de um dia extremamente seco.

O gráfico dos valores horários de radiação solar global seguiu a tendência dos dias precedentes com a continuidade da curva parabólica indicando céu claro. Os valores horários de radiação solar global atingiram pico de 965 W/m², às 13:00h, com média diária de 296 W/m², ao longo de 13 horas de insolação, e curva parabólica contínua indicando céu claro. A pressão atmosférica variou 4mb, com pico de 933mb, a partir das 10:30h permanecendo estável até às 12:30h, retornando a este valor no final do dia, a partir das 23:00h. A mínima registrada no final da tarde, às 16:30h, foi de 930mb.

Os ventos predominantes foram do quadrante NE, o que sugere o início do domínio da massa Tropical Atlântica sobre a região. Durante a manhã, houve a predominância de aragem e brisa leve do quadrante NE, com velocidades inferiores a 2,5m/s. No período vespertino, entretanto, passaram a predominar os ventos dos quadrantes NW/W, caracterizando aragem com velocidade média de 1,5m/s, porém com rajadas de brisa fraca de 4,2m/s.

Nesse dia, o comportamento da temperatura do ar registrada nas quatro estações urbanas apresentou maiores diferenças durante a madrugada, no início da manhã e após às 20:00h, coincidindo, mais uma vez, com horários de ocorrência de calmaria. O céu claro, a baixa disponibilidade de vapor d'água na atmosfera e a reduzida ventilação proporcionaram maior definição na formação de ilhas de calor urbano.

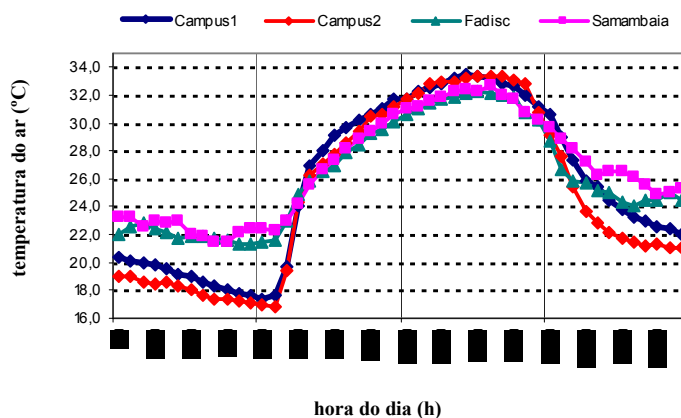


Gráfico 2: Comportamento da temperatura do ar registrada no dia 23/02/2005 nas quatro estações urbanas.

Durante a madrugada, observou-se comportamento semelhante entre as estações no Campus I e no Campus II, com acentuada perda de radiação calorífica e menores temperaturas do ar. As mínimas de 17,4°C e 16,9°C foram registradas no Campus I e no Campus II, respectivamente, pouco após o nascer do Sol. O resfriamento observado nas estações na Fadisc e no Samambaia foi bastante reduzido durante a madrugada,

apresentando comportamento diferente das estações no Campus I e no Campus II, porém semelhantes entre si. As temperaturas mínimas nessas estações foram registradas no nascer do Sol, com valores próximos a 21°C, em ambas, o que resultou em diferenças de até 5,1°C entre as estações no Campus I e no Samambaia, às 6:30h.

Após o nascer do Sol, observou-se intenso aquecimento matinal nas estações no Campus I e no Campus II, conforme observado nos dias anteriores. O período de maior aquecimento nessas estações ocorreu entre 7:00h às 8:30h, com variação de temperatura superior a 9°C, em ambas. No mesmo período de tempo, as estações na Fadisc e no Samambaia apresentaram variação de temperatura inferior a 4°C.

A partir das 9:00h, observou-se equilíbrio nos valores de temperatura do ar registrados em todas as estações, sugerindo a conformação de um campo térmico urbano mais homogêneo, possivelmente favorecido pela permanência de céu claro e pela baixa disponibilidade de vapor d'água na atmosfera que propiciou o aquecimento do ar nas quatro áreas monitoradas. O aquecimento do ar a partir desse horário deu-se de forma mais amena em todas as estações, até alcançar a temperatura máxima próximo às 15:30h.

No período vespertino, todas as estações apresentam elevadas temperaturas do ar. Entretanto, após o pôr-do-sol, observou-se tendência de resfriamento em todas as estações, com destaque ao resfriamento acentuado ocorrido na estação no Campus II, também observado no dia anterior. A tendência de acentuado resfriamento após o pôr-do-sol observado nesse dia e no dia precedente deu-se pela combinação das seguintes condições atmosféricas: baixa umidade do ar, permanência de céu claro e ocorrência de calmaria, as quais favorecem a troca de energia calorífica por radiação entre as superfícies e a abóbada celeste.

Contudo, apesar das condições atmosféricas favoráveis a perda de calor armazenado pelas superfícies urbanas, observou-se que as estações na Fadisc e no Samambaia apresentaram reduzida perda de radiação calorífica após o pôr-do-sol, permanecendo com temperaturas do ar próxima aos 25°C, o que resultou na reduzida amplitude térmica diárias observadas nessas duas estações (10,9°C, na Fadisc; e 11,2°C, no Samambaia) em relação à amplitude térmica diária observada nas outras duas estações (16,1°C, no Campus I; e 16,5°C, no Campus II).

O Gráfico 3 apresenta as diferenças de temperatura do ar observada entre as estações automáticas, duas a duas, ao longo do dia 23/02/2005. A partir da análise dos gráficos, observou-se tendência de aumento na diferença térmica entre as estações durante a madrugada, o que sugere a influência das propriedades físicas dos materiais constituintes do entorno urbano e da forma de ocupação do solo na troca noturna de energia calorífica com a abóbada celeste, visto que, nesse dia, durante a madrugada houve o predomínio de céu claro e calmaria.

Nesse sentido, observou-se acentuada diferença térmica durante a madrugada entre as estações no Campus I e na Fadisc, na ordem de 4,0°C, e entre as estações no Campus I e no Samambaia, na ordem de 5,1°C, ambas diferenças registradas ao nascer do Sol, às 6:30h. Entretanto, diferenças maiores foram registradas entre as estações no Campus II e na Fadisc (4,7°C) e entre as estações no Campus II e no Samambaia (5,5°C), pouco após o nascer do Sol, às 7:00h. As diferenças térmicas observadas nas estações urbanas pouco após o nascer do Sol deu-se, sobretudo, pela intensa perda de radiação calorífica durante a madrugada notada nas estações no Campus I e no Campus II – fato também observado no dia precedente.

Durante o período diurno, todas as estações apresentaram comportamentos semelhantes apresentando temperatura do ar elevada, resultado do intenso aquecimento das superfícies urbanas proporcionado pelas condições de céu claro, característico da fase de domínio da massa Tropical Atlântica, como mencionado anteriormente. Nesses horários, a diferença térmica entre as estações foram inferiores a 1,4°C – máxima registrada entre as estações no Campus I e na Fadisc, às 15:00h.

As diferenças de temperatura do ar entre as estações após o pôr-do-sol apresentaram comportamento e valores semelhantes aos observados no dia anterior. As maiores diferenças térmicas nesses horários foram registradas entre as estações no Campus II e no Samambaia, na ordem de 4,7°C, às 21:30h, e entre as estações no Campus II e na Fadisc, na ordem de 3,9°C, às 23:30h. Essas diferenças térmicas tenderam a aumentar durante a madrugada, culminando na diferença máxima ao nascer do Sol.

Observou-se que o durante o período diurno a estação no Campus I apresentou maior aquecimento em relação às mesmas estações, com exceção da estação no Campus II, à qual apresentou comportamento análogo. Entre as estações no Campus I e no Campus II, mereceu atenção a diferença de temperatura do ar observada após o pôr-do-sol, apresentando pico de 2,6°C, às 20:30h. Esse fato também foi observado no dia precedente, sugerindo comportamento regular na fase de domínio da massa Tropical Atlântica. O pico de diferença entre as duas estações deu-se pela intensa perda de radiação calorífica notada no Campus II pouco tempo após o pôr-do-sol. Contudo, após o pico de diferença de temperatura, observou-se tendência, em ambas as estações, em diminuir a diferença térmica e apresentar comportamento e valores de temperatura do ar semelhantes no decorrer da madrugada.

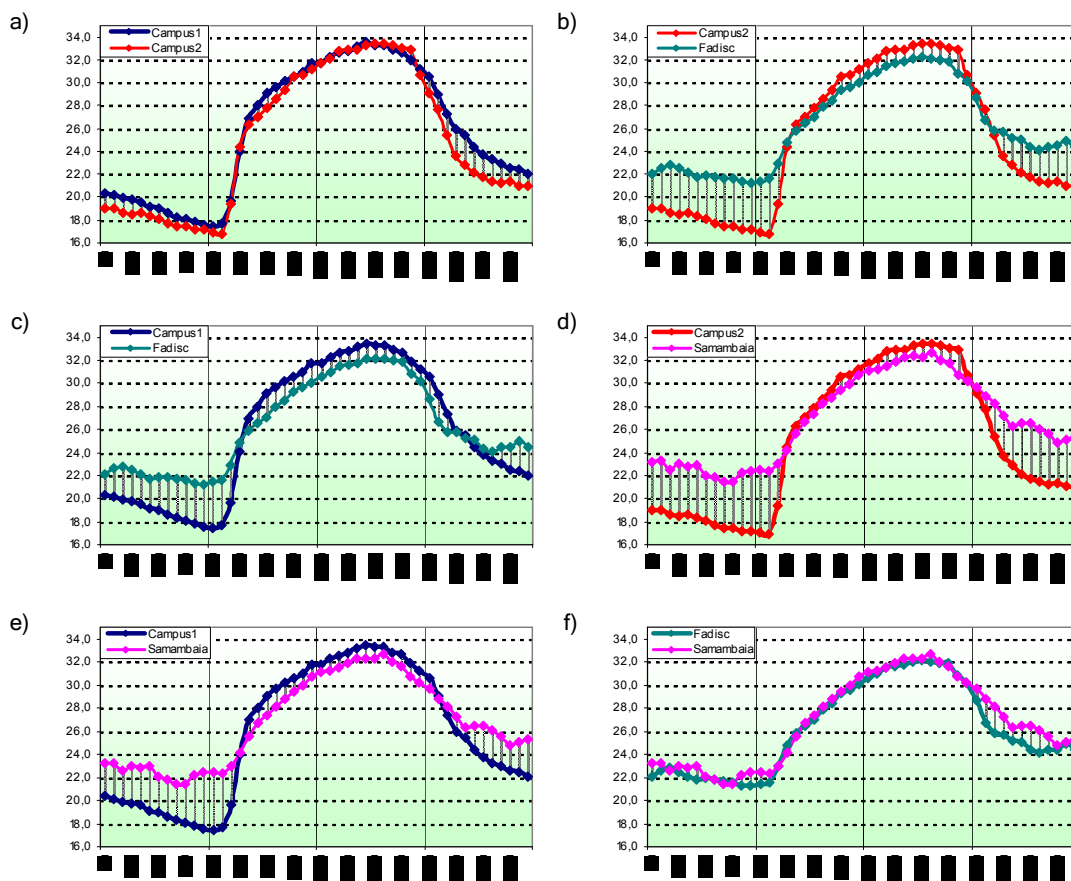


Gráfico 3: Diferenças no comportamento da temperatura do ar registrada no dia 23/02/2005 nas quatro estações urbanas, analisadas duas a duas.

Com relação ao Campus II, os resultados mostram tendência em apresentar comportamento semelhante ao observado na estação no Campus I, chegando a apresentar diferenças nulas no período vespertino. Notou-se, ainda, a intensa diferença de temperatura do ar entre essa estação e as estações na Fadisc e no Samambaia, sobretudo durante a madrugada e após o pôr-do-sol, com ocorrência de calmaria.

Com relação às estações na Fadisc e no Samambaia, os dados mostraram intensa diferença de temperatura do ar entre essas duas estações e as estações no Campus I e no Campus II, especialmente durante a madrugada e após o pôr-do-sol, como observado anteriormente. Observou-se, ainda, que as estações na Fadisc e no Samambaia apresentaram comportamento análogo durante todo o dia, com pequena diferença térmica após o pôr-do-sol, devido ao perda de radiação calorífica mais lenta observada na estação do Samambaia.

5. CONCLUSÕES

A investigação em tela constatou o comportamento térmico diferenciado em diferentes regiões da cidade de São Carlos, no período de verão, evidenciando a influência das características do entorno construído nas condições térmicas locais. Os resultados obtidos forneceram maior compreensão da configuração do campo térmico urbano nas suas dimensões espaços-temporais, por meio da intensidade da ilha de calor urbana em quatro regiões da cidade dentro de suas variações diurnas e das diferentes condições impostas pelos tipos de tempo habituais do período de verão.

O aporte da abordagem dinâmica do clima permitiu identificar e caracterizar os tipos de tempo habituais do período de verão compreendidos em episódios representativos do fato climático para a região de São Carlos. Assim, o estudo do comportamento térmico diário nas quatro estações automáticas instaladas dentro da malha urbana foi realizado ao longo de um episódio climático representativo, com dados totalizados em intervalos de 30 minutos, o qual permitiu maior precisão nas análises.

A partir dos resultados obtidos, observou-se que a variação na intensidade das ilhas de calor urbano, identificadas pelas diferenças térmicas entre as regiões monitoradas, apresentou estreita relação com o cenário atmosférico imposto pelos diferentes tipos de tempo. Essa constatação conduziu a considerar que,

antes das características do entorno construído, as condições atmosféricas características dos diferentes tipos de tempo favorecem às diferentes conformações do campo térmico urbano.

Após a análise do comportamento térmico ao longo de todo episódio, constatou-se que a maior intensidade da ilha de calor urbano no período de verão, em São Carlos, ocorre na atuação da massa Tropical Atlântica sobre a região. Nessa fase, o tipo de tempo habitual é caracterizado por cenário atmosférico com predominância de céu claro, alta incidência de radiação solar direta e valores de temperatura do ar elevados com máxima diária acima da média das máximas indicadas pelas Normais Climatológicas. Sob essas condições, observou-se que as características do entorno construído exercem maior influência no comportamento térmico urbano. Nesse caso, as diferenças térmicas entre diferentes regiões dentro da malha urbana de São Carlos podem ser superiores a 5°C.

Observou-se, ainda, que as maiores diferenças térmicas ocorreram próximo ao nascer do Sol, no momento de menor aquecimento do ar, e após o pôr-do-sol, das 21:30h às 22:00h. Contudo, as elevadas diferenças térmicas registradas próximo ao nascer do Sol não podem ser consideradas indícios de ilhas de calor, uma vez que os valores de temperatura do ar nesses horários são reduzidos, não implicando necessariamente em bolsões de ar aquecidos. Em contrapartida, as diferenças térmicas observadas após o pôr-do-sol foram indícios de troca de energia térmica por radiação entre as superfícies urbanas e a abóbada celeste, em decorrência do armazenamento de calor pela massa edificada, caracterizando, assim, ilhas de calor urbano.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. F. M. *Fundamentos geológicos do relevo paulista*. São Paulo: Instituto de Geografia, Universidade de São Paulo (Série Teses e Monografias), 1964.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária (Secretaria Nacional de Irrigação. Departamento Nacional de Meteorologia). *Normais climatológicas (1961-1990)*. Brasília: DNMET, 1992.
- CLIMANÁLISE: boletim de monitoramento e análise climática. Cachoeira Paulista, SP: CPTEC/INPE, v. 20, n. 2. 2005. Disponível em: <<http://antartica.cptec.inpe.br/~rantar/climanalise/0205/>>. Acesso em: 23 jan. 2008.
- ELNAHAS, M. M. How do planners and architects deal with conflicting climate design objectives? In: XVI, PLEA (Passive and Low Energy Architecture), Austrália. *Anais...* v.1, p.225-230, 1999.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Cidades: Resultados do Universo – Censo 2000*. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>>. Acesso em: 17 set. 2009.
- IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Mapa geomorfológico do estado de São Paulo*. Escala 1/500.000. v.1. (texto). São Paulo, 1981.
- MONTEIRO, C. A. F. *A dinâmica climática e as chuvas no Estado de São Paulo: estudo geográfico sob forma de atlas*. São Paulo. Instituto de Geografia, Laboratório de Climatologia, Universidade de São Paulo, 1973.
- PMSC – Prefeitura Municipal de São Carlos. *Plano Diretor de São Carlos I: diagnóstico da Cidade*, Proc. 2146.03, PL 215, Cd-rom, 2004.
- ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. *Mapa geomorfológico do estado de São Paulo*. Escala 1/500.000. Departamento de Geografia. FFLCH-USP-IPT-FAPESP. São Paulo, 1997.
- TOLENTINO, M. *Estudo crítico sobre o clima da região de São Carlos*. São Carlos: s.ed. (Concurso de monografias), 1967.
- VECCHIA, F. A. S. *Clima e ambiente construído: a abordagem dinâmica aplicada ao conforto humano*. 1997. 316p. Tese (Doutorado em Ciências com ênfase em Geografia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.